

**Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi kar
Geofizikai Tanszék**

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

-Doktori értekezés-

Írta:
Nyári Zsuzsanna

Tudományos vezető:
Dr. Gyulai Ákos
Tudományos főmunkatárs

Doktori program címe:
**Alkalmazott földtani és
geofizikai kutatások**

Alprogram címe:
Geofizika

Programvezető:
Dr. Némedi Varga Zoltán
egyetemi tanár

Alprogramvezető:
Dr. Steiner Ferenc
egyetemi tanár

**Miskolc
2000**

Tartalom

1. Bevezetés.....	2
2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre.....	6
2.1 Direkt feladat megoldása.....	6
2.2 Modellezési hiba vizsgálata.....	9
2.3 Előremodellezés összetett földtani környezetben.....	15
2.4 Elméleti görbék dipól-dipól elrendezésre.....	16
2.5 Elméleti görbék Wenner elrendezésekre.....	21
3. Paraméter érzékenységi vizsgálatok.....	31
3.1 Érzékenységi vizsgálatok dipól-dipól elrendezésnél.....	32
3.2 Érzékenységi vizsgálatok Wenner elrendezéseknél.....	35
4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés.....	40
4.1 Előzmények.....	40
4.2 Dekonvolúció az üregkutatásban.....	41
4.3 Az eljárás tesztelése.....	46
4.4 Dekonvolúció alkalmazása terepi adatokon.....	50
5. Analitikus modellezésen alapuló inverzió.....	57
5.1 Geofizikai adatfeldolgozás inverzióval.....	57
5.2 Üregkutatási célú mérési adatok inverziós feldolgozása.....	58
5.3 Az inverzió minősítése.....	60
5.4 Az inverzió tesztelése.....	61
5.5 Terepi adatok feldolgozása inverzióval.....	69
6. Analitikus modellezésen alapuló szimultán inverzió.....	71
6.1 A szimultán inverzió tesztelése.....	72
6.2 Terepi adatok feldolgozása szimultán inverzióval.....	78
7. Összefoglalás.....	82
Hivatkozások.....	85
Melléklet.....	87

1. Bevezetés

A felszínközeli üregek komoly veszélyt jelentenek a közlekedés biztonságára és az épületek állékonyságára. A mérnökgeofizikai problémák megoldásával foglalkozó szakemberek számára fontos feladatot jelent ezen veszélyes objektumok kijelölése, méreteinek meghatározása. A sokelektrodás mérési rendszerek megjelenése óta a fajlagos ellenállás mérések egyre nagyobb szerephez jutnak az üregkutatási feladatok megoldásában. Szükségessé vált tehát olyan adatfeldolgozási módszerek kidolgozása, melyek kihasználják a számítógép vezérelte mérési rendszer nyújtotta gyors adatgyűjtés előnyeit, és alkalmazkodnak a számítástechnika által elérhetővé vált pontossági követelményekhez. A dolgozat olyan, analitikus modellezen alapuló adatfeldolgozási eljárásokat mutat be, melyek a gyakorlatban is sikerrel alkalmazhatók felszínközeli üregek és üregszerű inhomogenitások kimutatására, paramétereinek minősített meghatározására, és a hosszadalmas, FD modellezésnek bizonyos körülmények között gyorsabb, sőt pontosabb alternatíváit kínálják.

A szelvény menti fajlagos ellenállás mérések eredményeként, amennyiben a felszíni mérési pontokon többféle elektróda távolsággal is mérünk, egy kétdimenziós pszeudo szelvény állítható elő, melyen a profilmenti távolság és az adott elektróda elrendezés által meghatározott, valamely szempont alapján definiált vonatkoztatási mélység függvényében ábrázoljuk a nyers látszólagos fajlagos ellenállás értékeket. A leggyakrabban alkalmazott elektróda elrendezésekhez tartozó vonatkoztatási mélységek és az elektróda távolságok kapcsolatát EDWARDS (1977) számította ki. A pszeudo szelvények feldolgozására többféle véges elemes ill. differenciás módszert dolgoztak ki, melyek nagy része DEY ÉS MORRISON (1979) kutatási eredményein alapul.

OVERMEEREN ÉS RITSEMA (1988) nyomán egyre inkább elterjedt a számítógéppel vezérelt sokelektrodás egyenáramú mérőrendszer, amellyel azonos idő alatt a korábbiaknál nagyságrendekkel több adatot lehetett gyűjteni.

1. Bevezetés

Többek között ez a technikai fejlődés tette szükségessé olyan feldolgozási eljárások kidolgozását, melyekkel a vonalmentén mért, több mélységpontra vonatkozó szelvények megnövekedett adatmennyisége gyorsan és megbízhatóan dolgozható fel. BARKER (1992) kifejlesztett egy gyors, csillapított legkisebb négyzetek elvét használó inverziós rekonstrukciós eljárást a pszeudo szelvények feldolgozására. A módszer kvázi-Newton eljárásan alapul, és nem szükséges hozzá iterációkat végezni. LOKE ÉS BARKER (1996) továbbfejlesztette ezt az eljárást, és a rekonstrukciót beillesztette egy olyan inverziós algoritmusba, mely már 3-4 iterációs lépés után eredménnyel szolgált. GYULAI ÉS ORMOS (1997) által kidolgozott inverziós módszer 1D-s direkt feladat megoldásra vezette vissza a 2D-s geológiai szerkezetek leírását. Ezt a 1,5D-s modellezési eljárást sikerrel GYULAI (1998) sikerrel alkalmazta felszínközeli üregek kimutatására is. PRÁCSER (1998) 2,5D-s inverziós eljárást dolgozott ki, melyhez a modellezést mind véges elemes, mind véges differenciás módszerrel elvégezte. SORENSSEN (1996) egy folyamatos adatgyűjtésre képes geoelektromos mérőrendszert fejlesztett ki. Műszerével napi 10-15 km hosszúságú vonalak mérést tette lehetővé. Az adatfeldolgozáshoz MOLLER ÉS SORENSSEN (1998) egy dekonvolúciós eljárást dolgozott ki, melyben a látszólagos fajlagos ellenállás értékeket Born aproximáció segítségével fejezi ki. A Fourier transzformált térben a nagyméretű 2D-s feladatból sok kicsi, 1D-s, hullámszámfüggő feladatot készít, melyeket minimális variancia becslésének módszerével old meg. A fent ismertetett feldolgozási módszerek eredménye minden esetben egy 2D-s ellenállás szelvény, melynek segítségével feltérképezhetők a vizsgált térrész elektromos ellenállás viszonyai, és kijelölhetők az ürege utaló anomáliák.

Az analitikus modellezési eljárás olyan eszköz, mellyel pontosan (numerikus hibától mentesen) és gyorsan leírható a választott modell. A gyakorlati alkalmazások érdekében gondosan kell kiválasztani a megfelelő modellt. Fontos, hogy a modell egyszerű legyen, csak azokat a paramétereket tartalmazza, amelyek megismerése a kutatás szempontjából érdekesek. Másrészről a modellnek alkalmasnak kell lennie arra, hogy segítségével leképezhető legyen a valóságban igencsak összetett felépítésű kutatott térrész.

1. Bevezetés

A felszínközeli üregek kutatásához olyan kétdimenziós modellt választottam, melynek az egyenáramú elektromos térre gyakorolt hatását már korábban többen tanulmányozták. LÖSCH és társai (1979) vezették le a Laplace egyenlet megoldását végtelen hosszúságú és elektromos ellenállású körhengert tartalmazó homogén féltérre. Ezt az analitikus modellt vizsgálta FERENCZY (1980) dipól-dipól mérési elrendezés esetén. Ezeket a vizsgálatokat folytattam további három elektróda elrendezésre, és igazoltam, hogy ez a levezetések sajátosságai során csak kis mértékű modellhiba keletkezik. Elvégeztem a GYULAI (1989) által bevezetett definíciók szerinti érzékenységi vizsgálatokat a modellparaméterekre vonatkozóan, és az így kapott eredményeimet felhasználva fejlesztettem ki olyan feldolgozási eljárásokat, melyekkel megoldhatók a mérnökgeofizikai, mérnökgeológiai feladatok.

A kiválasztott modell analitikusan számított válaszfüggvényével elvégezhető egyik legegyszerűbb feldolgozási módszer az alakszűrés, melynek alkalmazásával az anomália helye meghatározható. TSOKAS ÉS TSOURLOS (1997) dolgozott ki egy olyan, archeogeofizikai gyakorlatban alkalmazható, dekonvolúción alapuló szűrési eljárást, mellyel a földalatti objektumok felszíni vetületei megbízhatóan kijelölhetők. Ezt a módszert fejlesztettem tovább speciálisan üregkutatási célra. A módszer segítségével nagy pontossággal meghatározhatók a mérési vonal mentén található üreg(ek), üregszerű ható(k) száma és pozíciója. Az eljárás tesztelése és gyakorlati felhasználása során bebizonyosodik, hogy zajos környezetben, nehéz terepi viszonyok esetén is megbízható megoldást ad, még akkor is, amikor erre a széles körben elterjedt, FD inverzió alapuló módszer képtelen volt.

Sokszor előfordul azonban, hogy nem csak az üreg(ek) helye, hanem az(ok) mérete is a kutatás tárgyát képezi(k). Ilyen esetekben alkalmazható egy olyan, analitikus előremodellezésen alapuló inverziós eljárás, mely a mérési vonal mentén elhelyezkedő üreg(ek) méretéről és mélységéről is számszerű értéket ad. A szakirodalom többféle inverziós eljárást ismertet (pl.: MENKE (1984)), melyek közül a DOBRÓKA és társai (1991) által kidolgozott, és geoelektromos adatokon

1. Bevezetés

is sikerrel alkalmazott minősített inverziós algoritmust választottam. Az eljárás a modellparaméterek értékeinek becslésén túl azok megbízhatóságát is minősíti.

A becslés megbízhatóságát növelni lehet, ha azonos vonal mentén mért több elektróda elrendezés adatait használjuk fel az inverziós eljárásban, ilyenkor szimultán inverzióról beszélünk. A módszerrel csökkenthető a modellparaméterek becslésének bizonytalansága. GYULAI ÉS ORMOS (1996) alkalmazott többféle elektróda elrendezés és mérési irány adatait felhasználó, analitikus előremodellezésen alapuló szimultán inverziót dőlt réteges földtani szerkezetek kutatására. Az előremodellezési és érzékenységi vizsgálatok eredményei, valamint GYULAI (1998) kutatásai alapján a dipól-dipól és a Wenner alfa elrendezések adataira dolgoztam ki szimultán inverziós eljárást.

Összetett földtani viszonyok esetére mindkét inverziós eljárásba beleépítettem egy jelkiemelő korrelációs szűrést. Az analitikus modellszámítások felhasználásával alkalmazott keresztkorrelációs szűrés és az inverziós eljárások együttes használatával olyan esetekben is sikerült megbízható megoldást találni, mikor az L_2 normán alapuló eljárások nem vezettek eredményre.

Valamennyi ismertetésre kerülő adatfeldolgozási eljárást terepi adatokra is alkalmaztam. A dolgozatban szereplő összes teszt- és gyakorlati mérést egy Diapir 10R típusú látszólagos fajlagos ellenállást mérő műszeren alapuló, számítógéppel vezérelt, sokelektrodás mérési rendszerrel végeztem. A műszert és a mérési rendszert bemutató ábrák az F mellékletben találhatók.

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

Az analitikus modellezés módszerével a kiválasztott modell válaszfüggvénye egzakt módon, numerikus hibától mentesen megadható, így megfelelő eszköz az üreg hatásainak megismerését célzó kutatásoknak. Egyszerűen és gyorsan vizsgálhatók a különböző elektróda elrendezések alkalmazásának feltételei és a modellparaméterek érzékenysége. A fejezet ismerteti az analitikus előremodellezéssel elméleti vizsgálataimat, melyek legfontosabb eredményeit az elmúlt évek során publikáltam (NYÁRI (1997a) és NYÁRI (1997b)).

2.1 Direkt feladat megoldása

Az analitikus számításokhoz használt kétdimenziós modell egy homogén feltérben elhelyezkedő, végtelen hosszúságú és ellenállású, vízszintes körhenger volt (2.1 ábra). A modell paraméterei:

- ρ_1 : homogén feltér ellenállása
- ρ_2 : körhenger ellenállása
- H : hengerközéppont mélysége
- R : henger alapkörének sugara
- X : henger pozíciója a mérési vonal mentén

Az egyenáramú elektromos teret leíró Laplace egyenlet megoldását erre a modellre LÖSCH és társai (1979) írták le. Vonalforrás esetén homogén feltér potenciálja (V_0):

$$V_0(C, P_{11}, \dots, P_{1q}, P_{21}, \dots, P_{2q}) = \frac{I \cdot \rho_1}{\pi q} \left(\ln \frac{1}{R_{11}} + \dots + \ln \frac{1}{R_{1q}} - \ln \frac{1}{R_{21}} - \ln \frac{1}{R_{2q}} \right) \quad (2.1)$$

- ahol: I : mérőáram
 C : tápelektroda pozíciója
 P : potenciál elektróda pozíciója
 $\overline{R}_{rq}$: C táp- és P mérőelektroda távolsága
 $r=1$: pozitív elektróda (alsó index)

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

r=2: negatív elektróda (alsó index)

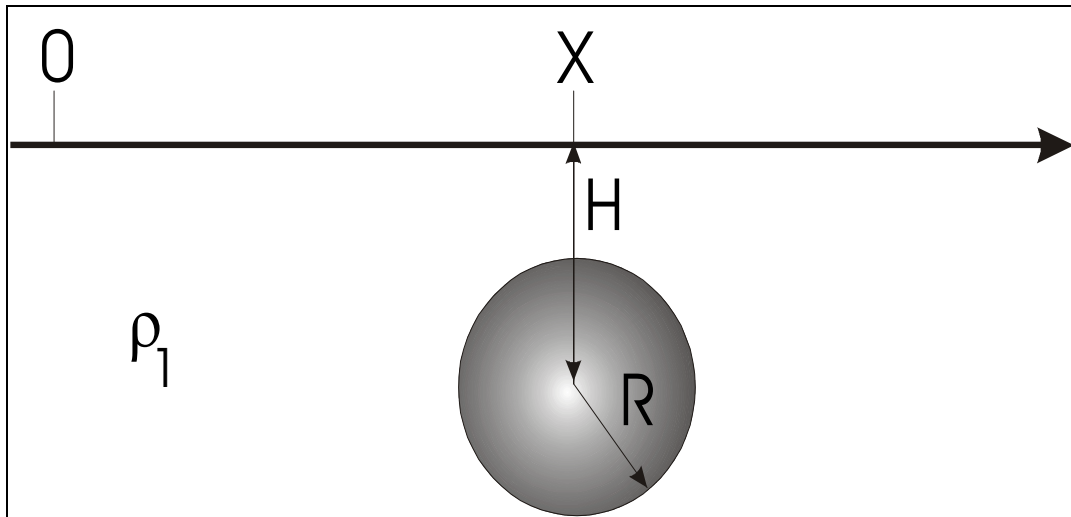
q: elektródapárok száma (alsó index)

A körhenger által keltett zavarpotenciál (V_c) az egyenáramú térben:

$$V_c(\xi, \eta) = \sum_{m=1}^{\infty} (A_m^{(1)} \cos m\xi + B_m^{(1)} \sin \xi)(e^{m\eta} + e^{m\eta_0}) \quad (2.2)$$

ahol: ξ, η, η_0 : Löscher és társai (1979) által bevezetett bipoláris koordináták

A, B: integrációs konstansok



2.1 ábra

A kétdimenziós modell és paraméterei

Földfelszínen lévő elektródák, és a henger tengelyére merőleges, egyenes vonalú mérési profil esetén a következő egyszerűsítések tehetők, ha x_q a q-dik elektróda helykoordinátája:

$$\eta = 0$$

$$\eta_0 = \ln \left(\frac{H}{R} + \sqrt{\frac{H^2}{R^2} - 1} \right) \quad (2.3)$$

$$\xi_q = 2 \arctan \frac{\sqrt{H^2 - R^2}}{x_q}$$

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

Az egyszerűsítések elvégzése után tetszőleges négyelektródás mérési elrendezés esetén az (2.1) és (2.2) potenciálok:

$$\Delta V_0 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\ln \frac{1 - \cos(\xi_{P_1} - \xi_{C_2})}{1 - \cos(\xi_{P_1} - \xi_{C_1})} - \ln \frac{1 - \cos(\xi_{P_2} - \xi_{C_2})}{1 - \cos(\xi_{P_2} - \xi_{C_1})} \right) \quad (2.4)$$

$$\Delta V_c = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2I\rho_1}{m\pi} \cdot \frac{\alpha}{e^{2m\eta_0} - \alpha} \left\{ (\cos m\xi_{C_1} - \cos m\xi_{C_2})(\cos m\xi_{P_1} - \cos m\xi_{P_2}) + \right. \\ \left. + (\sin m\xi_{C_1} - \sin m\xi_{C_2})(\sin m\xi_{P_1} - \sin m\xi_{P_2}) \right\} \quad (2.5)$$

$$\text{ahol: } \alpha = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

A vonalforrásra számított potenciálok pontforrásként való összegzésével elkövetett modellhiba 2D-snak tekinthető hatók esetén nem jelentős. A modellhibára irányuló részletes vizsgálatokat a 2.2 fejezet ismerteti. A ρ_a látszólagos fajlagos ellenállás a két potenciál segítségével számítható:

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + \frac{\Delta V_c}{\Delta V_0} \quad (2.6)$$

Azonos mérési vonal mentén lévő több üreg esetén a látszólagos fajlagos ellenállást a hatók külön-külön számított potenciáljainak szuperpozíciójával kapjuk:

$$\Delta V_s = \sum_{i=1}^{n_h} \Delta V_c^i + (n_h - 1)\Delta V_0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + \frac{\Delta V_s}{\Delta V_0} \quad (2.8)$$

ahol: ΔV_s : összegzett anomália

ΔV_c^i : i-dik henger anomáliája

n_h : hatók száma

GYULAI (1998.) FD modellezésen alapuló számításokkal igazolta, hogy a szuperpozíció elvén történő összegzés nem túl közeli hatók esetén alkalmazható. A szuperpozíció alkalmazásának analitikus modellekre vonatkozó vizsgálatait a 2.2.2 fejezet ismerteti.

2.2 Modellezési hiba vizsgálata

Az analitikus modellezés során elkövetett hibákat kétféle szempontból vizsgáltam:

1. a 2.1 fejezetben ismertetett direkt feladat vonalforrásra vonatkozó megoldása mennyiben közelíti a 2D hatók pontforrás esetén adott válaszát.
2. A több hatót tartalmazó modell leírásához mennyiben alkalmazható a szuperpozíció elve.

Az elkövetett modellhiba számszerűsítéséhez a PRÁCSER (1998) által kidolgozott 2,5 dimenziós modellezési eljárással előállított értékeket alkalmaztam kontrollként. Az így előállított adatsorokat, a 2D-s modell terét, pontforrásokhoz határozta meg a 2.1 fejezetben is ismertetett elsődleges (ΔV_0) és másodlagos (ΔV_c) potenciálok szétválasztásának módszerével. A véges differencia (továbbiakban FD) számításokhoz használt 2D-s modell annyiban különbözött az analitikustól, hogy nem körhenger, hanem négyzetalapú hasáb jellemezte a hatót (A1.melléklet). A modellezési hibát az azonos elrendezéshez tartozó, azonos paraméterű modellekre analitikusan és numerikusan számított adatsorok közti L_2 norma alapján számolt távolsággal jellemeztem.

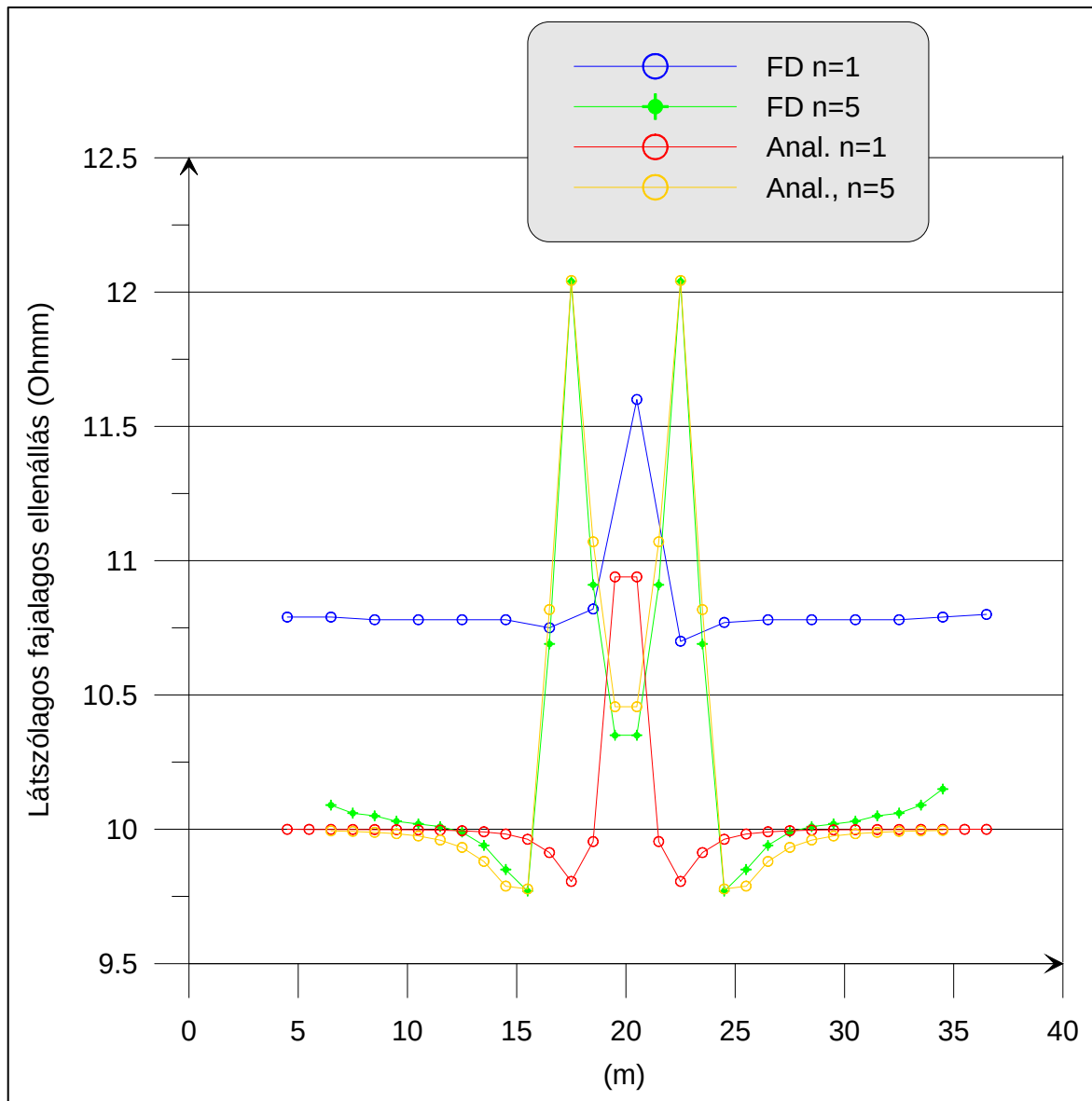
A modellezési hiba vizsgálatának eredményeit NYÁRI (2000) cikkemben ismertettem.

2.2.1 Források problémája

A vonalforrásokra kiszámított potenciálok alkalmazása pontforrások terének vizsgálatához abból a megfontolásból tűnt ésszerűnek, hogy a mérési vonalra

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

merőleges, a hatóval párhuzamos, végtelen hosszúságú vonalforrások az (x,z) síkban pontként jelennek meg.



2.2 ábra

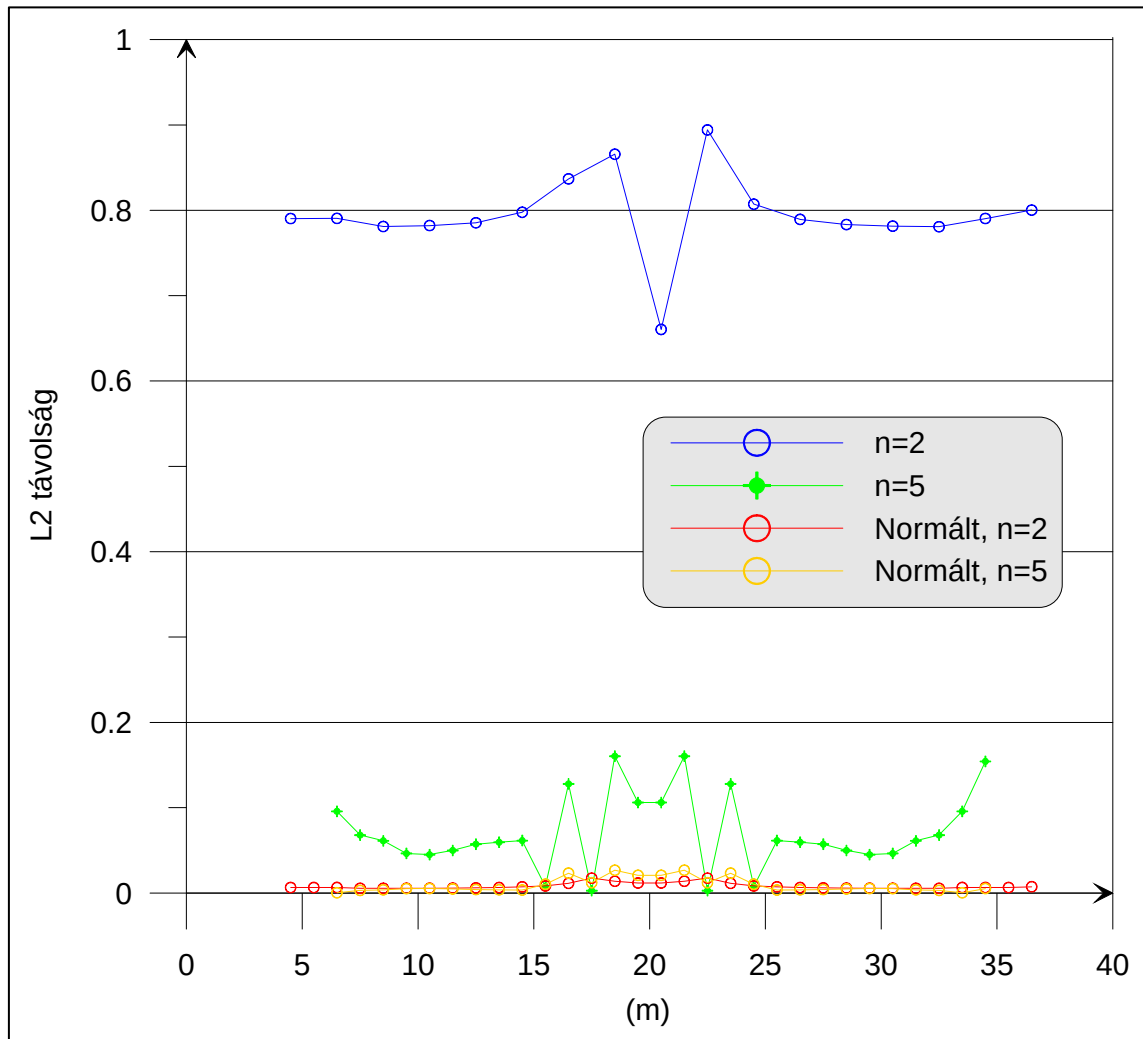
*Analitikus és FD modellezéssel előállított látszólagos fajlagos ellenállás görbék.
Ható helye: $X=20$ m*

LÖSCH és társai (1979) a (2.1)-(2.8) kifejezések alkalmazhatóságának vizsgálatakor modellkísérletekkel igazolták, hogy a vonalforrás alkalmazása a jelentéktelen eltérést adott a 3D-s térben vett pontforrások esetével összehasonlítva.

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

Az összehasonlító vizsgálatokhoz alkalmazott modell egy $10\ \Omega\text{m}$ fajlagos ellenállású homogén féltérbe helyezett $1000\ \Omega\text{m}$ ellenállású ható volt $1\ \text{m}$ -es fedővel és $1\ \text{m}$ -es oldaléllel, illetve átmérővel. A látszólagos fajlagos ellenállást mindkét módszer dipól-dipól elrendezésre és $\Delta x=1\ \text{m}$ egységnyi elektróda távolságra, $n=1, 2, \dots, 8$ mélység szintekre adta meg. A modell szerkezete és a hozzá tartozó látszólagos fajlagos ellenállás szelvény az A1. mellékletben láthatók. A kétféle módszerrel számított adatrendszer RMS kritérium szerint számított eltérése $25,34\%$ volt. Ez igen jelentős mértékű eltérés, ám figyelembe kell venni, hogy ez az összeg tartalmazza az FD modellezési eljárásban elkövetett numerikus hibát is. A 2.2 ábra a két módszerrel számított látszólagos fajlagos ellenállás görbéket mutat különböző mélység szinteken. Mindkét mélység szinten nagyon hasonlóak az anomália alakok, ám a felső szinten egy jelentős mértékű eltolás figyelhető meg a két módszerrel számított görbe között. Ez az eltolás a mélyebb szinten eltűnik. Látható, hogy $n=2$ esetében az FD modellezéssel számított görbe a hatótól távol eső része nem a homogén féltér ellenállás értékéhez tart, hanem egy annál magasabb értékhez, és ez okozza az eltolást. Ez a numerikus hiba a forrásoktól távolodva fokozatosan eltűnik. Az $n=5$ mélység szinten (amely vonatkoztatási mélysége pontosan a ható középpontja) a két görbe eltérése már csak $0,904\%$. Az FD módszer eltolásból fakadó numerikus hibája eliminálható az adatrendszerek homogén féltérre való normálásával, amint azt a normált adatrendszerek közti eltérés alacsony értéke ($0,871\%$) mutatja. Ez az érték tartalmazza a kétféle számítási mód közti (numerikus hibától mentes) eltérést, továbbá a két eltérő hatóalak (körhenger, ill. négyzet alapú hasáb) miatt bekövetkező hibát is. A 2.3 ábra a kétféle (FD és analitikus) módszerrel számított görbék pontjainak távolságát mutatja. Látható, hogy a forráshoz közeli, normálatlan esetben az eltérés a homogén féltér fölött a legnagyobb, és a hatónál csökken a hiba. Normálás után, illetve a nagyobb mélység szinteken normálás nélkül is már csak a ható fölött figyelhető meg eltérés a két adatrendszer között, amely már tényleg csak a kétféle számítási mód, valamint a ható alakja (négyzet, ill. kör alap) okozta eltérést tartalmazza. Az adatrendszerek közti átlagos eltérést a 2.4/a és 2.4/b ábra szemlélteti. Itt is megfigyelhető a normálás hatása mind az

egész adatrendszer, mind a különböző mélységszintre számított görbék esetén. Látható, hogy normálás előtt a legfelső szint hibája jelentős mértékben meghaladja az átlagos hibát, míg normálás után ennek a szintnek lesz a legkisebb a hibája, legnagyobb pedig az üreg középpontjának mélységre vonatkoztatott ($n=5$) szinté, ám még ez is 1% alatti.



2.3 ábra

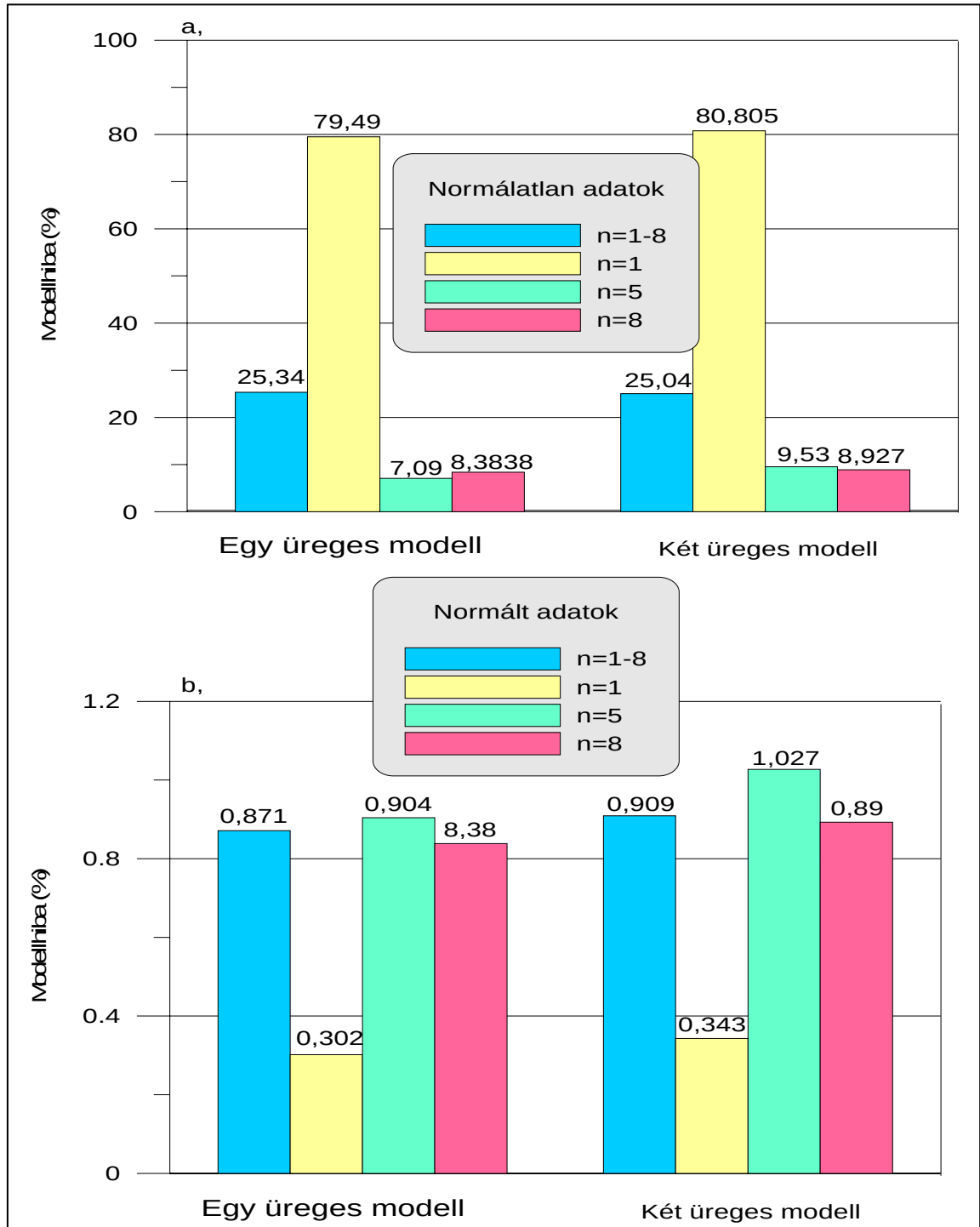
Analitikus és FD modellezéssel előállított látszólagos fajlagos ellenállás görbék eltérése pontonként. Ható helye: $X=20\text{ m}$

2.2.2 Szuperpozíció problémája

Több üreg hatásának leírása szuperpozíciós összegzéssel csak abban az esetben tűnik észszerűnek, ha a látszólagos ellenállás számítása a homogén feltér elsődleges, és az üreg okozta másodlagos potenciálok szétválasztásával történik.

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

Ilyenkor kézenfekvőnek látszik több üreg hatását az általuk okozott egyes anomáliák összegzésével megadni. Ekkor figyelmen kívül hagyjuk az üregek egymásra gyakorolt hatását. Vizsgálatom tárgyát tehát az képezte, hogy (a



2.4 ábra

Modellhibák alakulása egy- és kétüreges modelleknél

későbbi számítások során előfordulható legkisebb üregtávolságot feltételezve) a közeli hatók egymásra gyakorolt mikor hanyagolható el, ezáltal az egyedi hatásuk összegzésével előállított függvény valóban az általuk keltett valódi potenciáalteret közelíti-e.

A módszer alkalmazásának ellenőrzéséhez két darab, 1000 Ω m fajlagos ellenállású, 1 m fedőjű és oldalélű, ill. átmérőjű 2D-s hatót helyeztem 10 Ω m fajlagos ellenállású homogén féltérbe. A modellezett mérés paraméterei: dipól-dipól elrendezés, egységnyi elektródatáv: $\Delta x=1$ m, $n=1,2,\dots,8$. A modellek és a számított pszeudo szelvények az A2. mellékletben láthatók. A normálás előtti és utáni eltéréseket az egész adatrendszerre, valamint az egyes mélységszintekre a 2.4/a és 2.4/b ábra mutatja. Látható, hogy az egy üreges esethez képest egyetlen esetben sincs a hiba értékében nagy mértékű eltérés, bár mindegyik hiba érték csekély mértékben nagyobb, mint az előző esetben. A teljes adatrendszerre számított modellhiba két üreges esetben is 1% alatt maradt. Fordított irányú ellenálláskontraszt (szigetelő közegben jól vezető hatók) esetére elvégzett vizsgálatok is hasonlóan alacsony modellhibát eredményeztek.

A fentiek alapján tehát a szuperpozíció alkalmazása egymáshoz nem túl közeli hatók esetén megengedhetőnek tűnik.

2.3 Előremodellezés összetett földtani környezetben

A 2.1 fejezetben bemutatott analitikus modellezési eljárásnál feltételeztük, hogy a kutatandó térrész az egyenáramú mérés paramétereinek szempontjából leírható egy egyszerű modellel, amely szerint a mért eredő potenciál különbség (ΔV_e) a homogén féltér (ΔV_0) és az üreg keltette tér (ΔV_c) potenciáljából adódik:

$$\Delta V_e = \Delta V_0 + \Delta V_c$$

Összetett földtani környezet esetén – amennyiben SZARKA (1990) tanulmánya alapján a féltér eredő potenciálját a primer és szekunder források

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

potenciáljának szuperpozíciójából származtatjuk –az eredő potenciál különbség értékben megjelenik a hatón kívüli földtani hatások okozta potenciál különbség (ΔV_f) is:

$$\Delta V_e = \Delta V_0 + \Delta V_c + \Delta V_f \quad (2.9)$$

Írjunk át (2.9) kifejezést fajlagos ellenállás egyenletté! Ekkor a normálások, egyszerűsítések elvégzése után látható, hogy mért látszólagos fajlagos ellenállás ($\rho_a(x)$) már nem a (2.6) kifejezés alapján számítható, hanem:

$$\rho_a(x) = \rho_0(x) + \rho_c(x) + \rho_f(x) \quad (2.10)$$

ahol:

$$\rho_a(x) = \rho_1 \left(1 + \frac{\Delta V_e(x)}{\Delta V_0(x)}\right), \quad \rho_0(x) = \rho_1, \quad \rho_c(x) = \rho_1 \frac{\Delta V_c(x)}{\Delta V_0(x)}, \quad \rho_f(x) = \rho_1 \frac{\Delta V_f(x)}{\Delta V_0(x)}$$

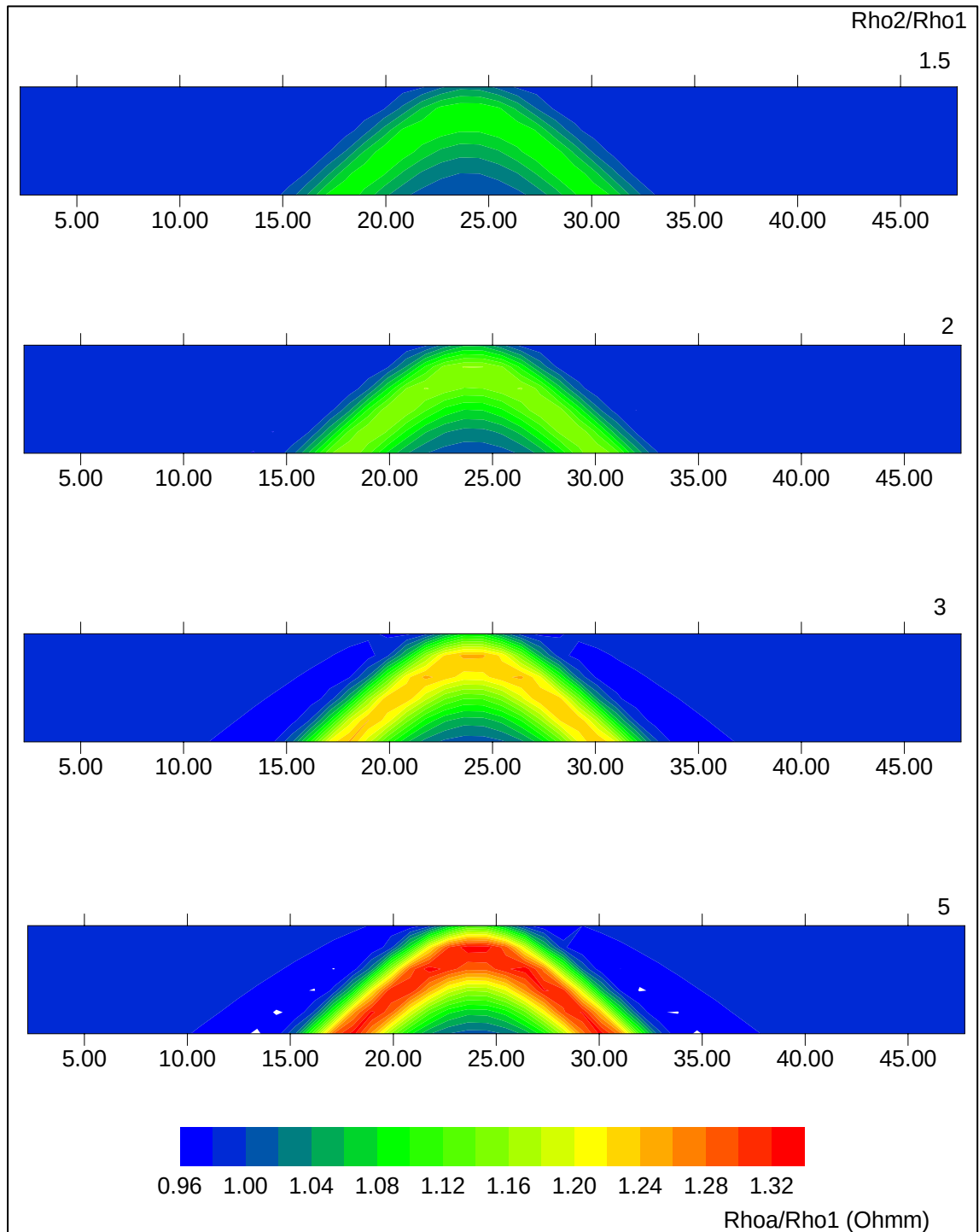
A megoldandó feladat szempontjából feltételezzük, hogy a kutatandó ható anomáliája leírható a $\rho_c(x)$ függvénnyel, cél tehát a mérési adatokból a többi összetevő eliminálása. Ezt elérhetjük úgy, hogy a kifejezést korreláljuk az üreg analitikusan előállított $\rho_c(x)$ hatásával. Ekkor ugyanis a homogén feltér és a földtani környezet hatása kiesik, mivel azok nem korrelálnak $\rho_c(x)$ -el. Az eredmény pedig egy olyan függvény lesz, mely megfelel az inverziós adatfeldolgozás azon alapfeltevésének, miszerint a mérési és az előremodellezéssel előállított adatrendszer kellően hasonlítson egymásra:

$$\rho_a(x) \star \rho_c(x) \approx \rho_c(x) \star \rho_c(x) \quad (2.11)$$

A bemutatott eljárással a mérési adatokon egy jelkiemelő alakszűrést hajtunk végre, miáltal adatainkból eltüntetünk minden olyan hatást, amely nem a kutatandó objektumtól ered. A módszerrel jelentősen javítható a mérési adatok jel-zaj viszonya.

2.4 Elméleti görbék dipól-dipól elrendezésre

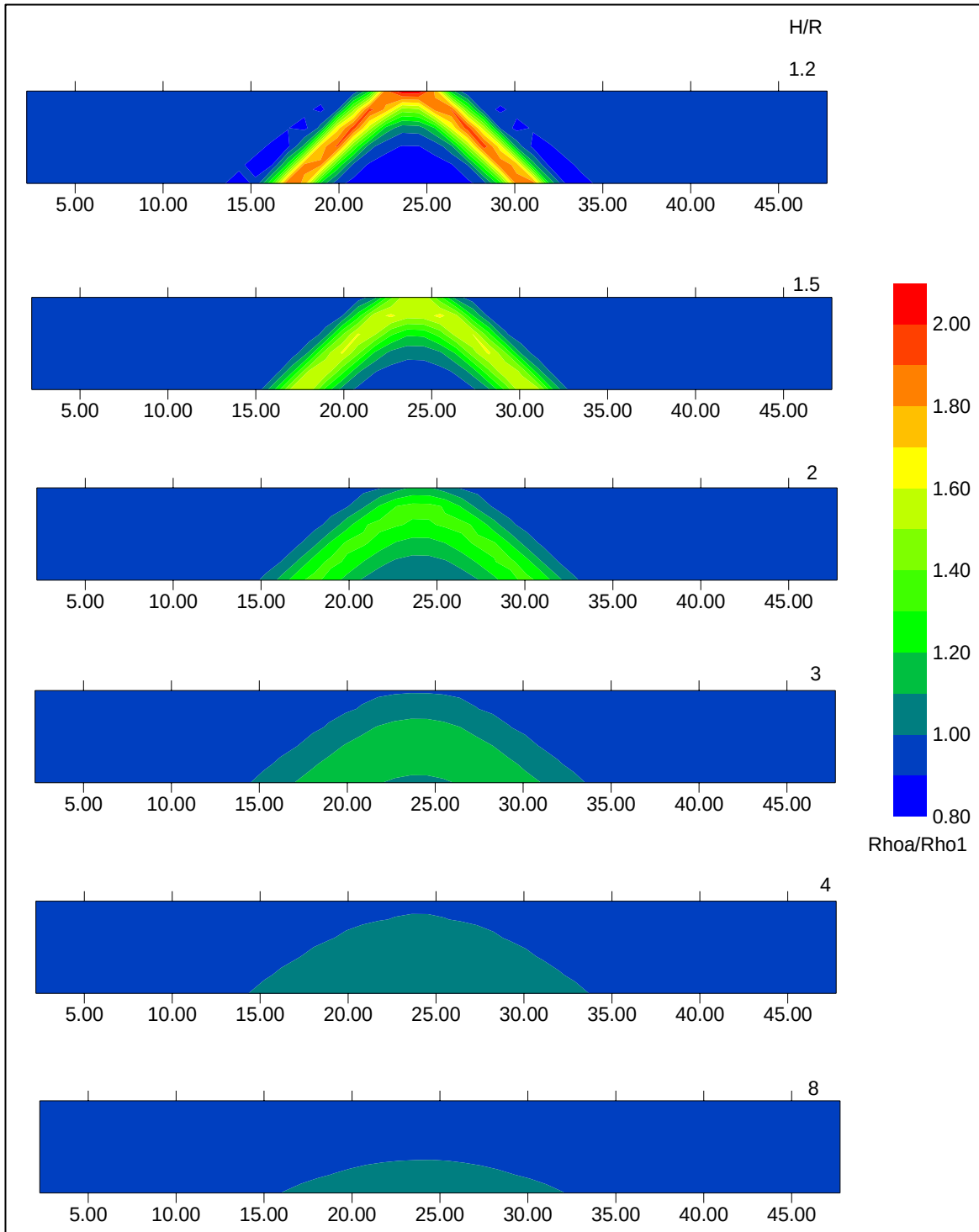
Dipól-dipól elrendezés esetén a két táp- (A, B) és a két mérőelektróda (M, N) között azonos távolság van: $a=AB=MN$. A mérés



2.5 ábra

*Ellenállás kontraszt vizsgálata dipól-dipól elrendezésnél
Modell: $H/R=2$, $X=24$ m*

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre



2.6 ábra

Mélység-méret arány vizsgálata dipól-dipól elrendezésnél

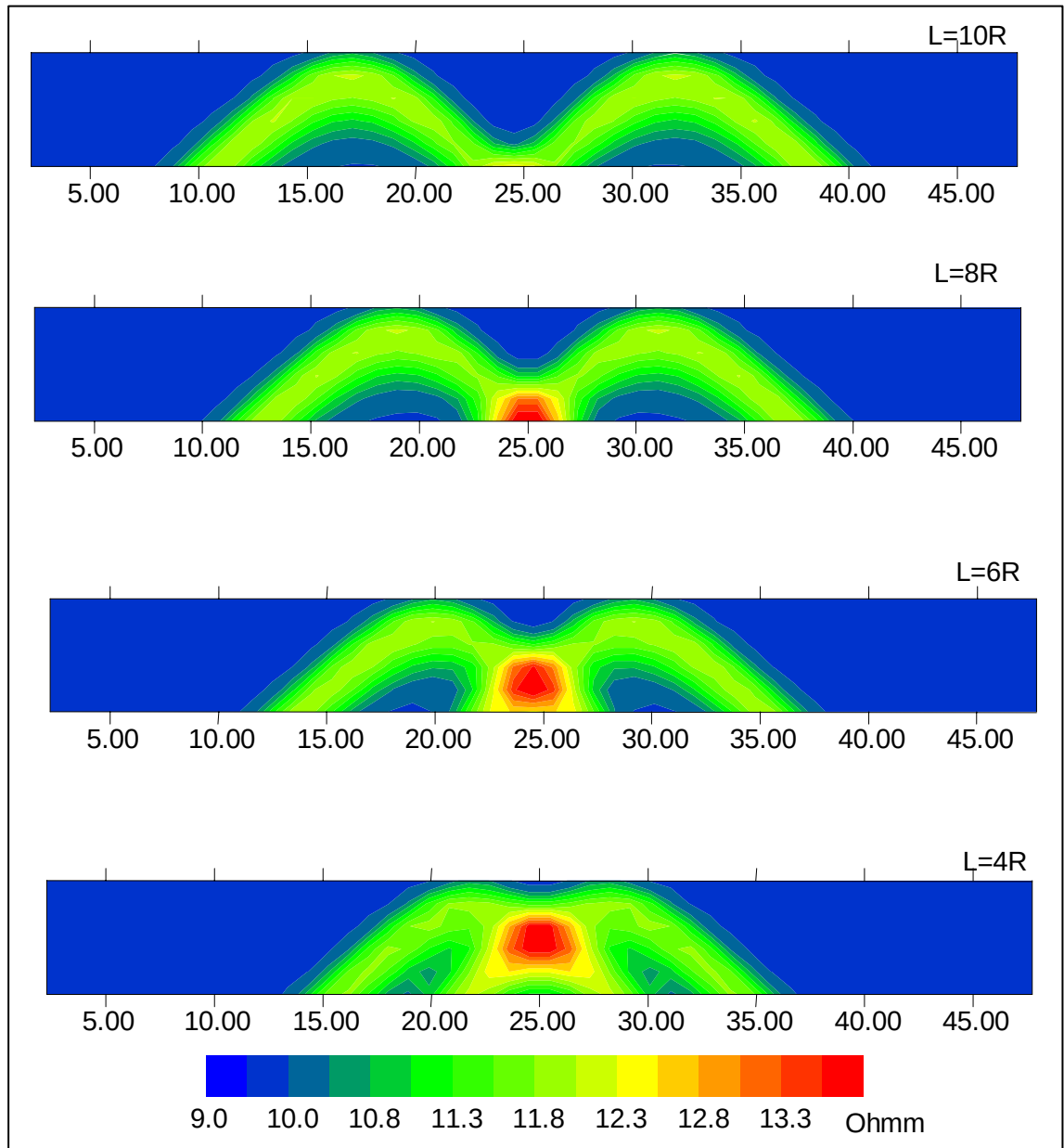
Modell: $\rho_2/\rho_1=5$, $X=24\text{ m}$

során a dipólok közti távolság növelésével növelhető a mérés vonatkoztatási pontjának mélysége. A 2.5 és 2.6 ábrák különböző modellekre számított pszeudo szelvényeket mutatnak be. Megfigyelhető, hogy az egyes szelvényeken a dipólok közti távolság növelésével az üregre utaló anomália az üregközépponttól az üreg két szélé irányába tevődik át. Közvetlenül az üreg fölött egy minimumzóna alakul ki, így egy jellegzetes, erre az elrendezésre jellemző, kifli alakú anomália jelöli az üreget, ami a gyakorlati problémák megoldásakor jelentősen bonyolítja az adatok értelmezését. A 2.5 ábrán állandó hatóméret és mélység esetén a környezet és az üreg ellenállása közti eltérő kontrasztú modellek görbéi láthatók. Geoelektromos üregkutató feladatok megoldása során FERENCZY (1980) 10% anomáliahatást tartott még megbízhatóan kimutathatónak. Ezen érték fölötti anomáliahatás már relatív kicsi, $\rho_2/\rho_1=2$ mértékű ellenállás kontraszt esetén tapasztalható. A 2.6 ábrán bemutatott szelvények segítségével a hatómélység-sugár hányados változásának hatása vizsgálható. Ebből a szempontból a $H/R=4$ arány jelenti a 10%-os kimutathatósági küszöböt.

Két üreg hatásának vizsgálatát és az analitikus modellezéssel elérhető felbontóképesség határait illusztrálja a 2.7 és 2.8 ábra. A 2.7 ábrán lévő szelvények két azonos mélységű méretű ($H_1=H_2=3$ m, $R_1=R_2=1.5$ m), egymáshoz egyre közelebb elhelyezkedő ható fölött számított fajlagos ellenállás ábrázolják $\rho_2=5\rho_1$ ellenálláskontraszt esetén.

Az üregközéppontok közti távolság (L) csökkenésével egyre jobban összemosódnak a hatókra utaló anomáliák, $L<6R$ esetén pedig már nem különíthetők el egymástól. A 2.8 ábra a felbontóképesség vizsgálatához nyújt segítséget. Két eltérő méretű ($R_1=2R_2$), azonos mélységű üreget közelítettem egymáshoz. Megfigyelhető, hogy amint a két üreg anomáliája egymással részleges fedésbe kerül ($L<3(R_1+R_2)$), a kisebbik üreg hatása a 10%-os kimutathatósági határ alá kerül.

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

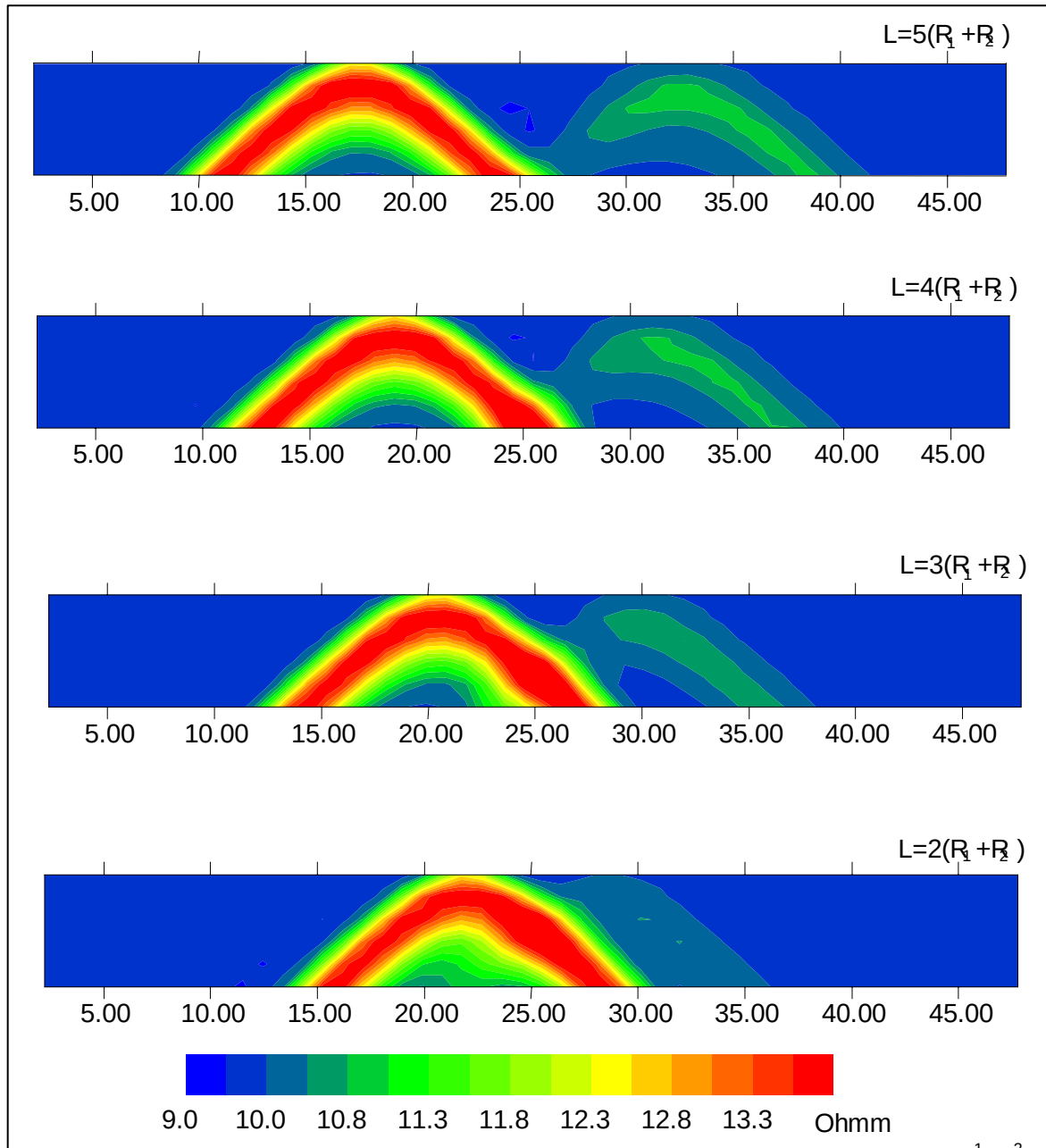


2.7 ábra

Két, egyforma méretű üreg hatásának vizsgálata dipól-dipól elrendezésnél

Modell: $\rho_2/\rho_1=10$, $H_1/R_1=H_2/R_2=2$, $x(L/2)=24$ m

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre



2.8 ábra

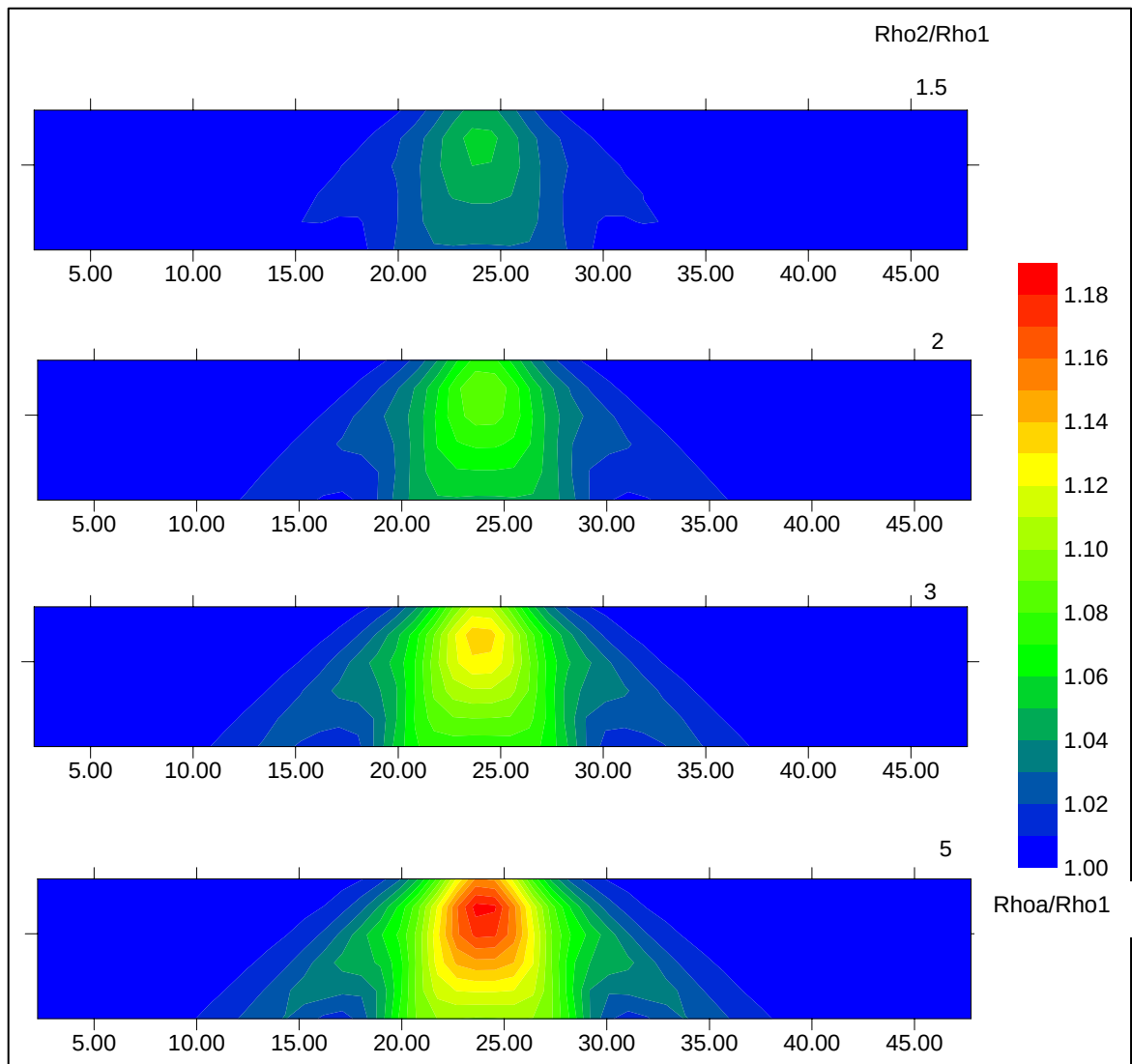
Eltérő méretű üregek hatásának vizsgálata dipól-dipól elrendezésnél

Modell: $\rho_2/\rho_1=10$, $H_1/R_1=1.5$, $H_2/R_2=3$, $x(L/2)=24$ m

2.5 Elméleti görbék Wenner elrendezésekre

A Wenner elrendezések közös sajátossága, hogy mind a négy elektróda közti távolság azonos, melyek együttes növelésével valósítjuk meg a mélységi szondázást. Az elektródák sorrendje szerint az alábbi három módosulatot különböztetjük meg:

- Wenner alfa (W_α) AMNB
- Wenner béta (W_β) ABMN
- Wenner gamma (W_γ) AMBN

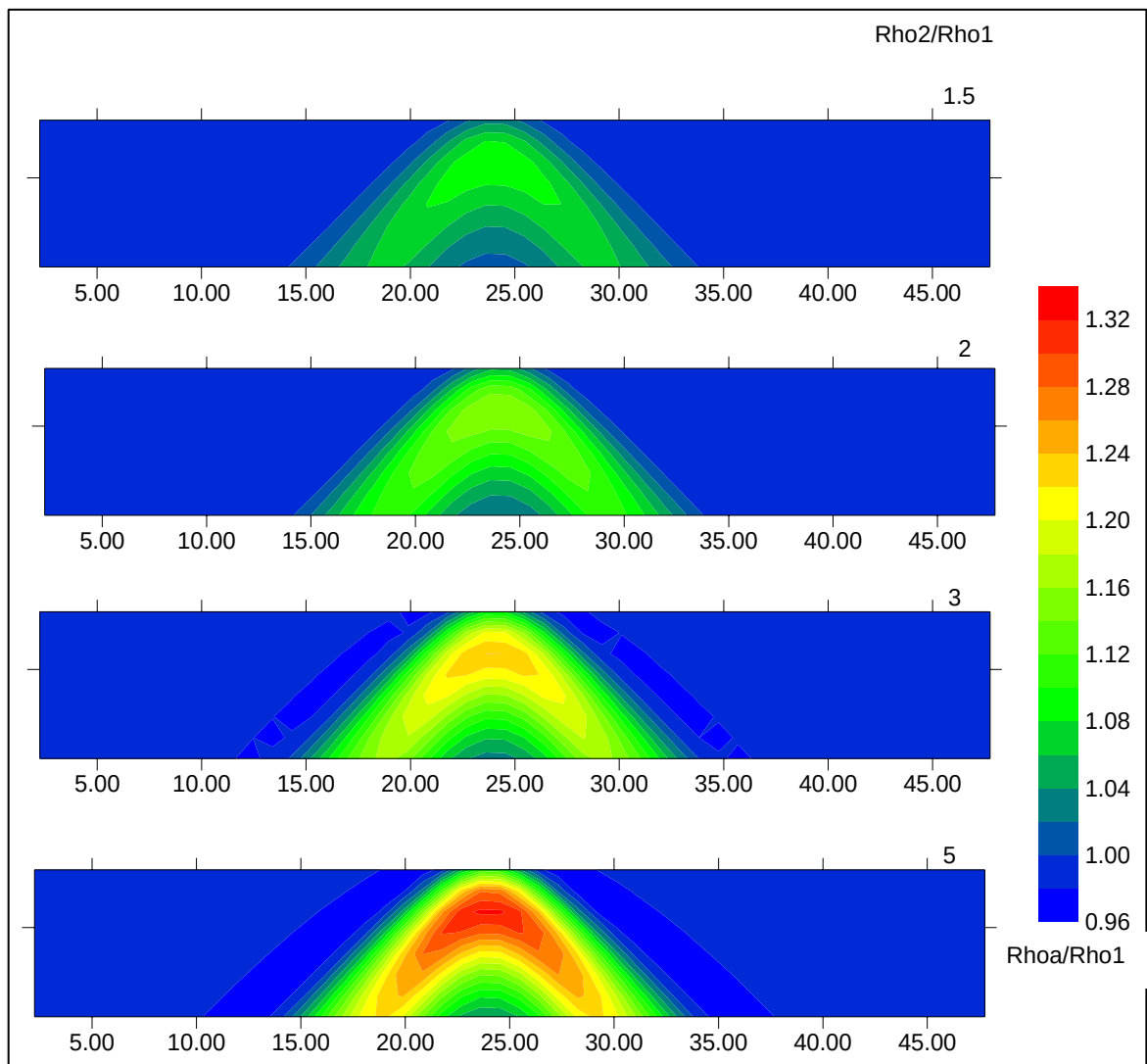


2. 9 ábra

Ellenálláskontraszt vizsgálata W_α elrendezésnél
Modell: $H/R=2$, $X=24$ m

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

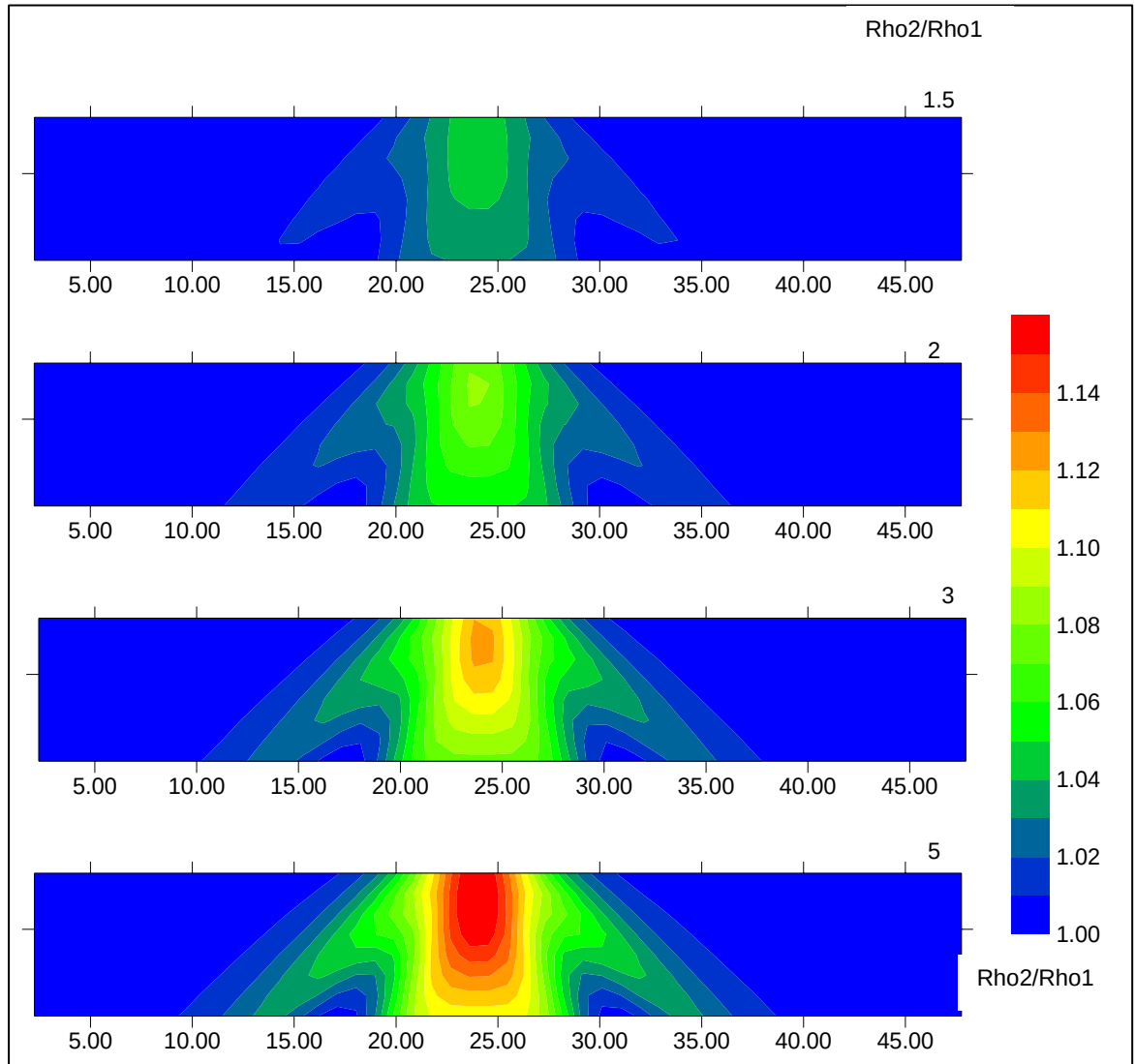
Figyeljük meg, hogy a W_β módosulat esetén az elektródák sorrendje megegyezik a dipól-dipól elrendezésével. Különbség van azonban a vertikális pontsűrűségben, mivel a Wenner elrendezés követelményeinek megfelelően a mélységi szondázás során egyszerre növeljük mind a négy elektróda távolságát, így a mélységszintek egymástól nagyobb távolságban vannak, mint a dipól-dipól elrendezés alkalmazásakor. Mivel a két elrendezésnél eltérő az elektródapárok (AB, MN) távolsága, a látszólagos fajlagos ellenállás értékek sem azonosak.



2.10 ábra

*Ellenállás kontraszt vizsgálata W_β elrendezésnél
Modell: $H/R=2$, $X=24$ m*

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre



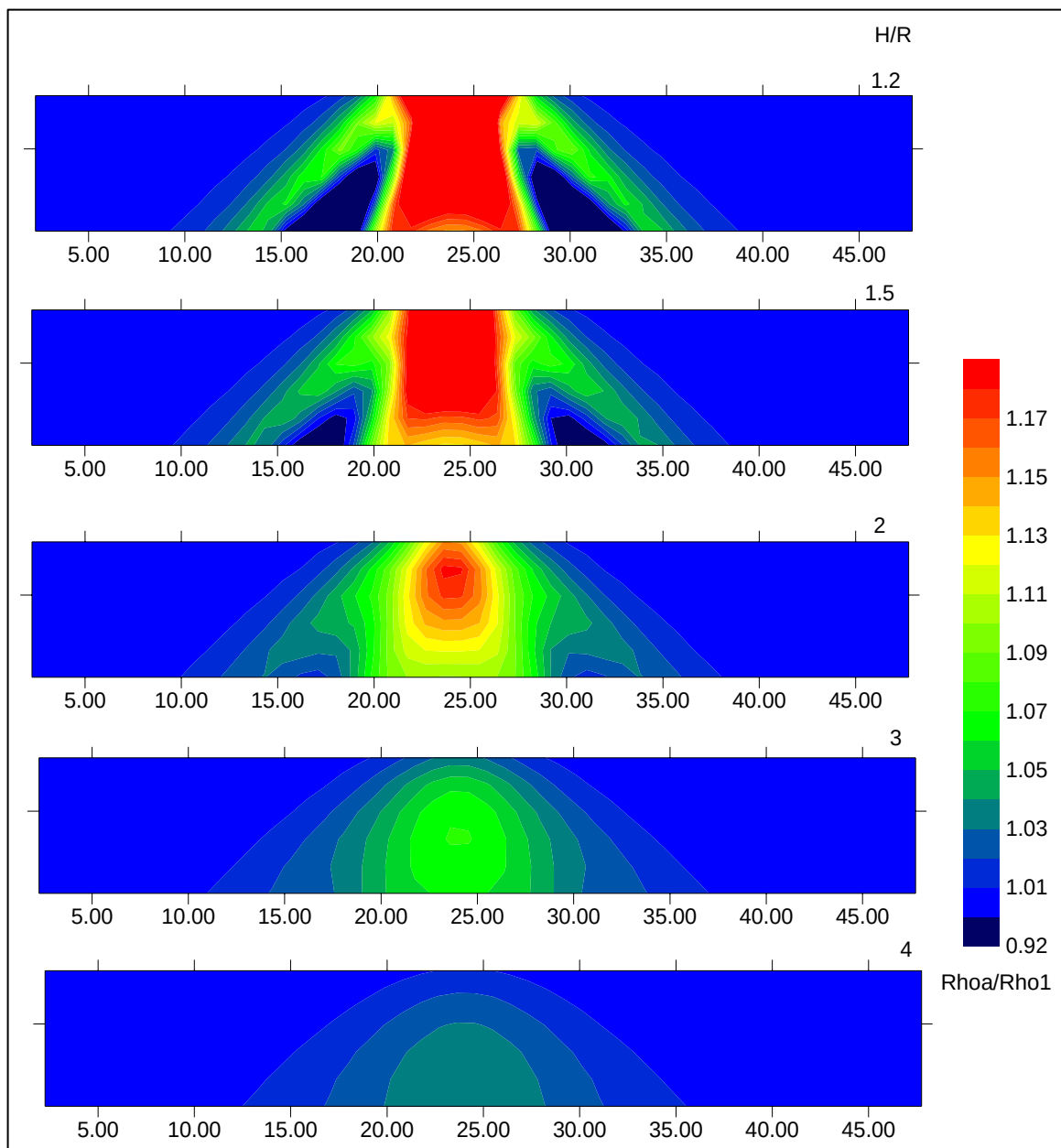
2.11 ábra

*Ellenállás kontraszt vizsgálata W_γ elrendezésnél
Modell: $H/R=2$, $X=24$ m*

A Wenner módosulatokkal számított elméleti görbék viselkedésének vizsgálatához a 2.3 fejezetben ismertetett modelleket használtam. A 2.9, 2.10, 2.11 ábrák a ható és a környezete közti ellenálláskontraszt mértékének hatását mutatja be a három Wenner módosulat esetében. A béta módosulatnál számolt görbék mind alakra, mind jelerősségre nagyon hasonlítanak a dipól-dipólnál tapasztaltakhoz. Az alfa és gamma módosulatokkal számolt anomáliák közös tulajdonsága, hogy a maximumok –a dipól-dipóllal és a W_β -val ellentétben– minden

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

mélység szinten az üreg fölött jelentkeznek. Az alfa módosulat esetén az anomália megfelelő ellenállás kontraszt ($\rho_2=5\rho_1$) esetén leképezi az üreg alakját, míg a gamma módosulathoz csak a horizontális leképezés valósul meg, vertikálisan az anomália elkenődik. Mindkét módosulathoz a 10%-os kimutathatósági feltétel csak $\rho_2=3\rho_1$ mértékű ellenállás kontraszttól valósul meg. A 2.12, 2.13, 2.14 ábrákon a hatómélység és méret arányának a hatása

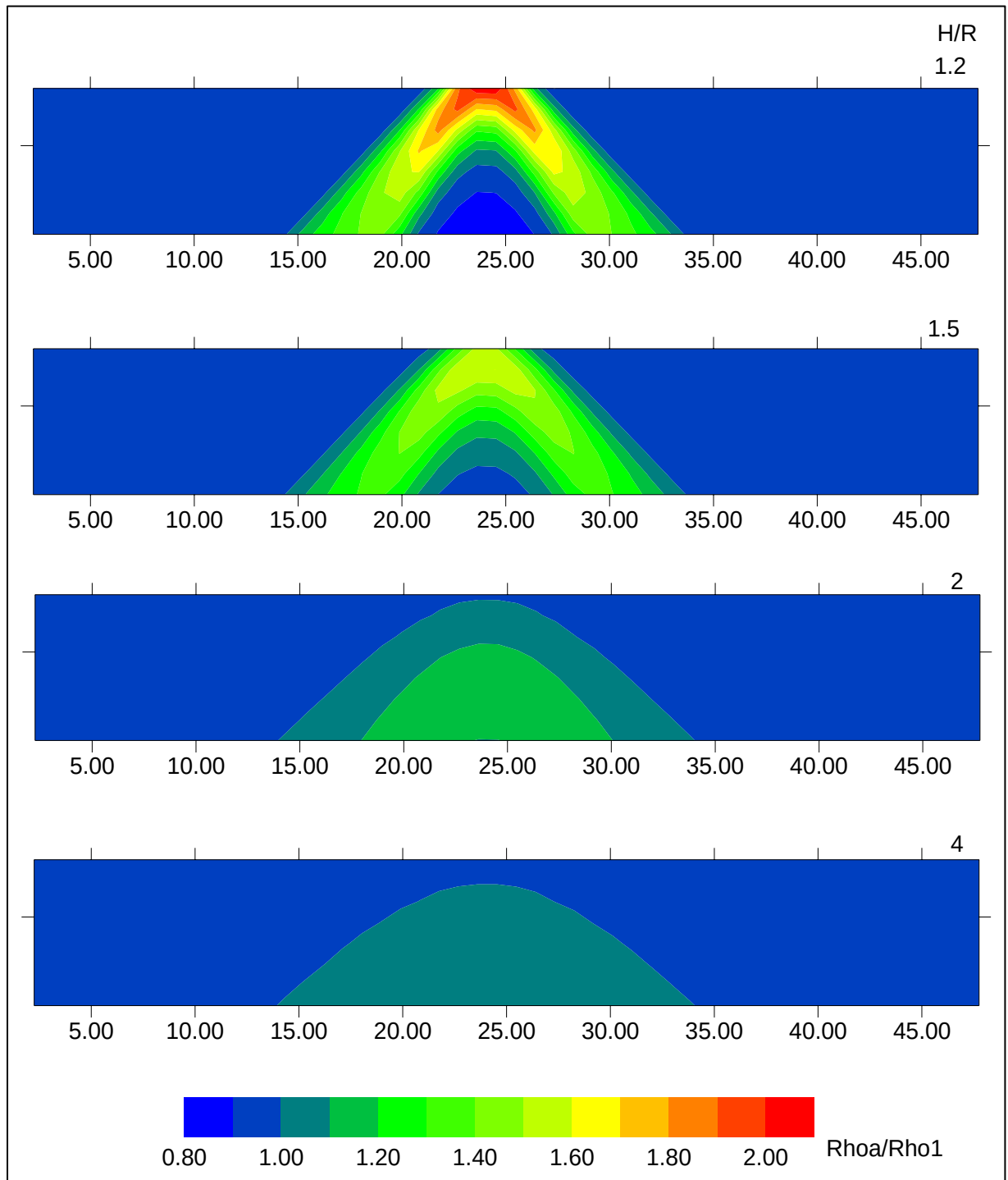


2.12. ábra

Mélység-méret arány vizsgálata W_α elrendezésnél

Modell: $\rho_2/\rho_1=5$, $X=24\text{ m}$

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre



2.13 ábra

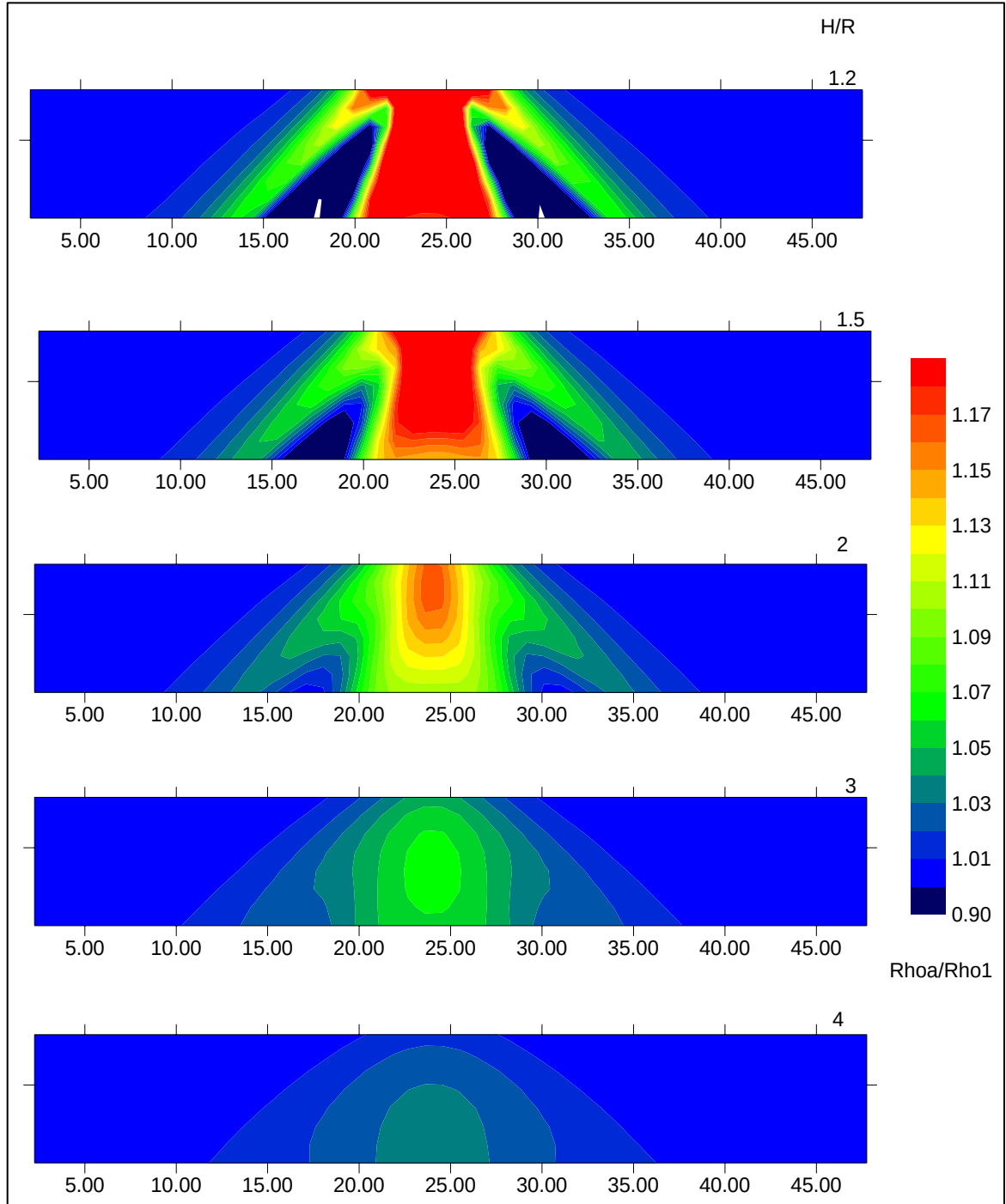
Mélység-méret arány vizsgálata W_β elrendezésnél

Modell: $\rho_2/\rho_1=5$, $X=24$ m

követhető nyomon. Várakozásainknak megfelelően a béta módosulat elméleti görbéi ismét hasonlóságot mutatnak a dipól-dipól elrendezés görbéivel. Az alfa és gamma módosulatnál a 10%-os anomália hatás

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

eléréshez ismét nagyobb kontraszt szükséges ($H/R < 2$), mint a dipól-dipól elrendezés alkalmazásakor. Más lényegi különbség e két módosulat között nem jelentkezett.



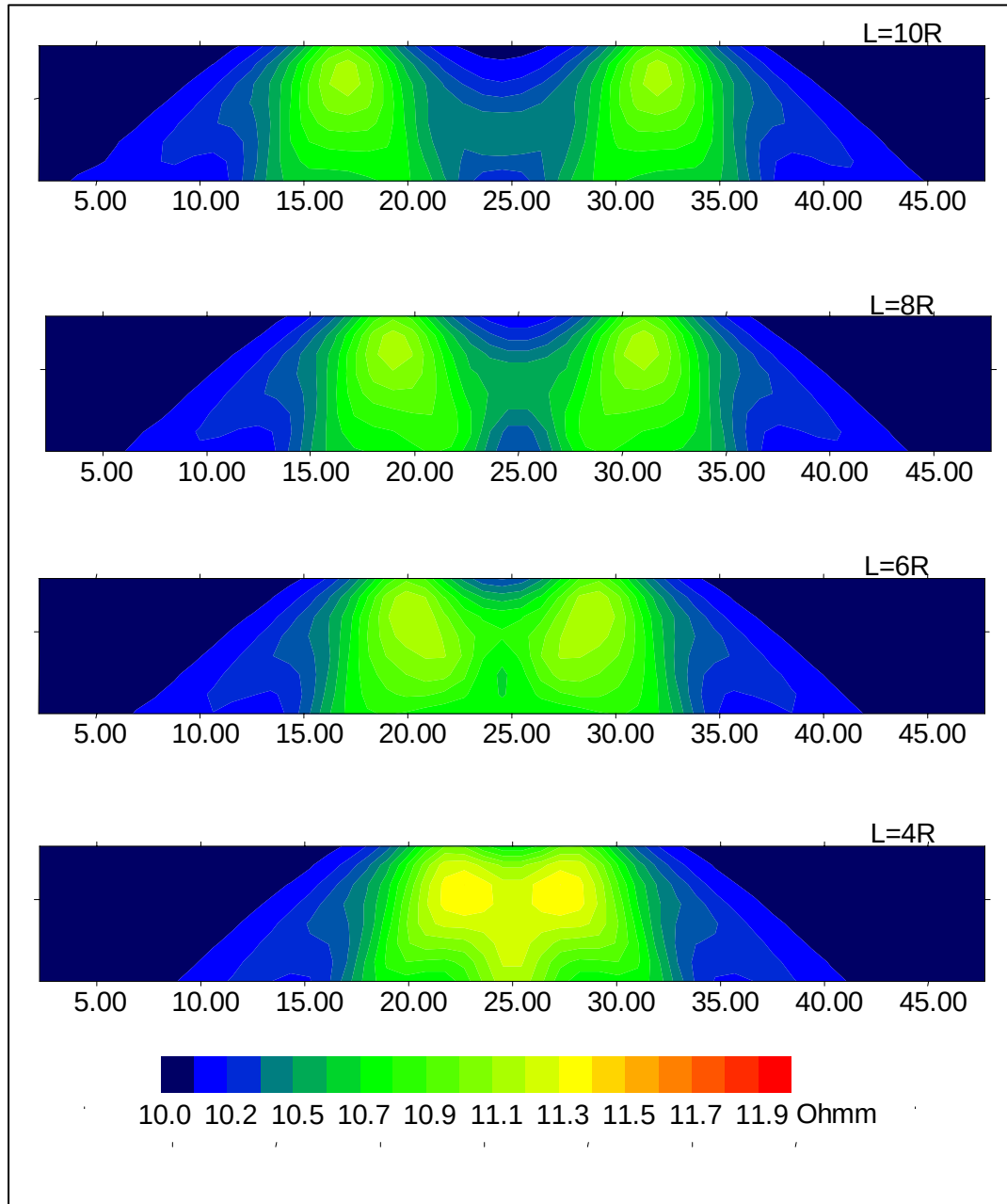
2.14 ábra

Mélység-méret arány vizsgálata W_γ elrendezésnél

Modell: $\rho_2/\rho_1=5$, $X=24$ m

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

Két azonos méretű üreg középpontjainak távolságát változtattam a 2.15 és 2.16 ábrán látható szelvényeken. Bár a jelerősség ezekben az esetekben is kisebb, mint a dipól-dipól elrendezés esetében, viszont a kisebb szélességű anomália miatt két üreg hatása még $L=4R$ esetén is

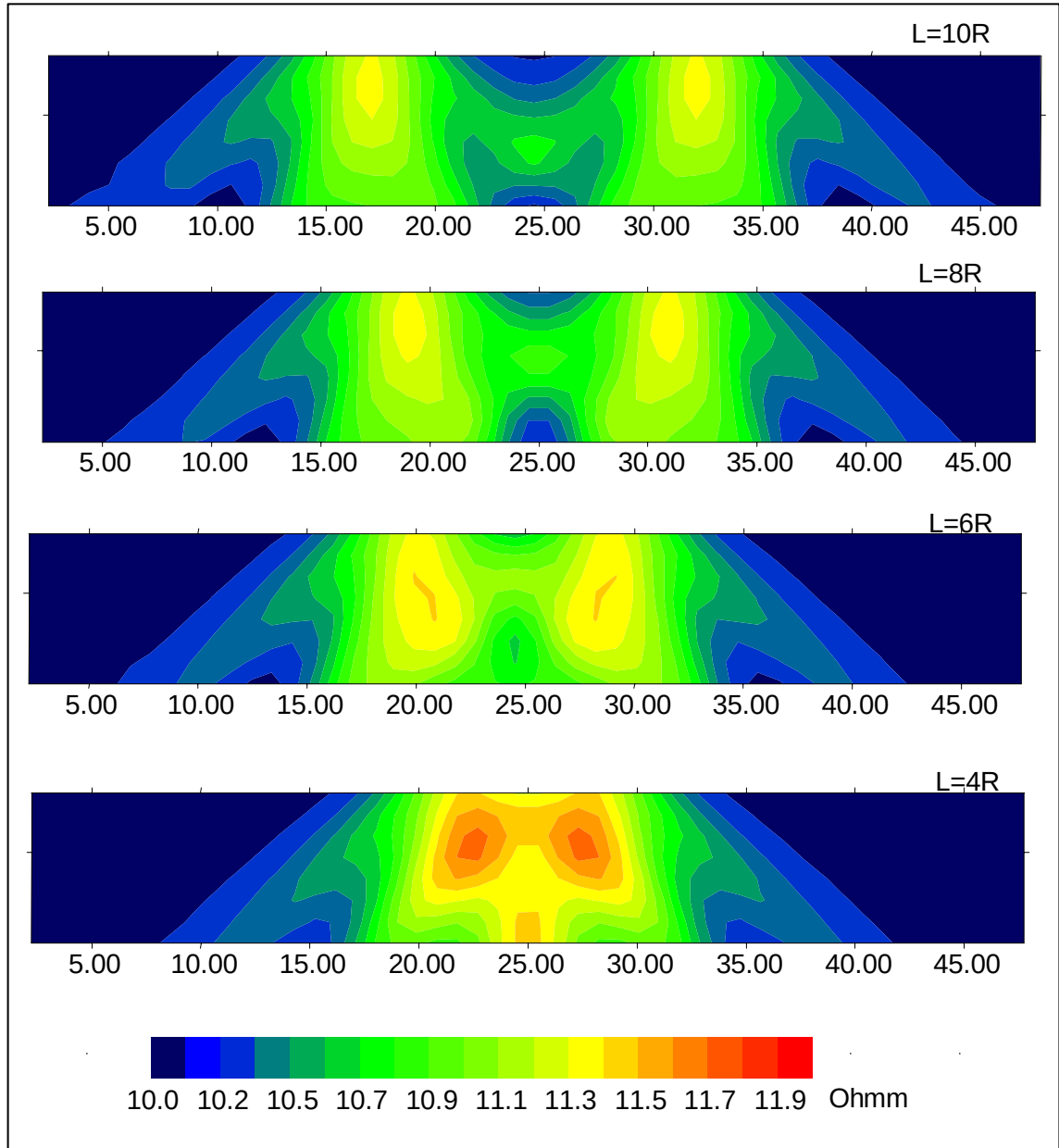


2.15 ábra

Két, egyforma méretű üreg közti távolság hatásának vizsgálata W_α elrendezésnél Modell: $\rho_2/\rho_1=10$, $H_1/R_1=H_2/R_2=2$, $x(L/2)=24$ m

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

elkülöníthető. Az elkülönülés a gamma módosulat esetén a leginkább szembevetű. A 2.17 és 2.18 ábra ezen két módosulat esetén számított szelvényeket mutatja be két eltérő méretű ható közelítésekor. A dipól-dipól elrendezéshez hasonlóan az itt vizsgált két konfiguráció esetén is a két üreg anomáliája $L=3(R_2+R_1)$ távolságig különíthető el egyértelműen egymástól.

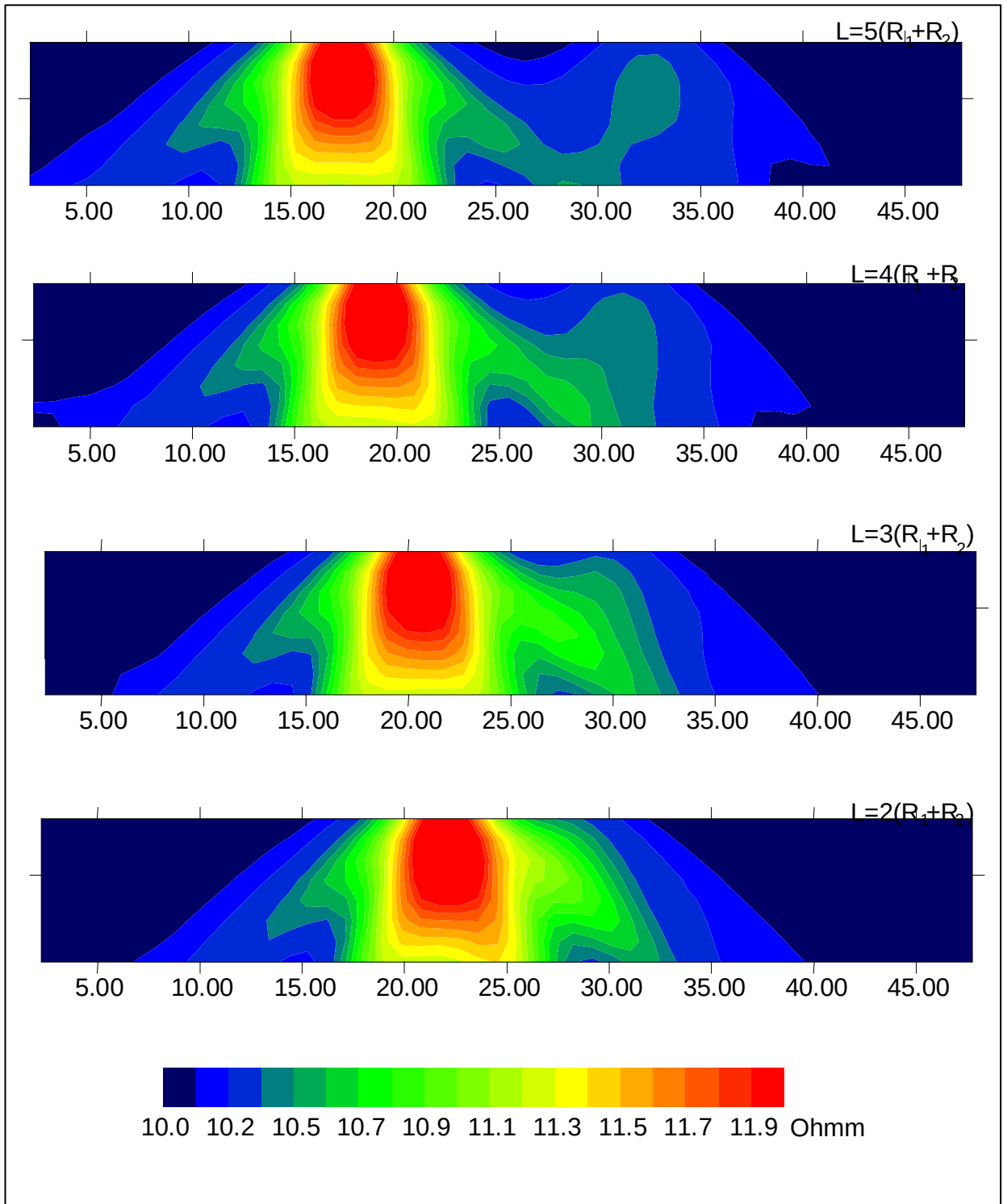


2.16 ábra

Két, egyforma méretű üreg közti távolság hatásának vizsgálata W_γ elrendezésnél

Modell: $\rho_2/\rho_1=10$, $H_1/R_1=H_2/R_2=2$, $x(L/2)=24$ m

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre

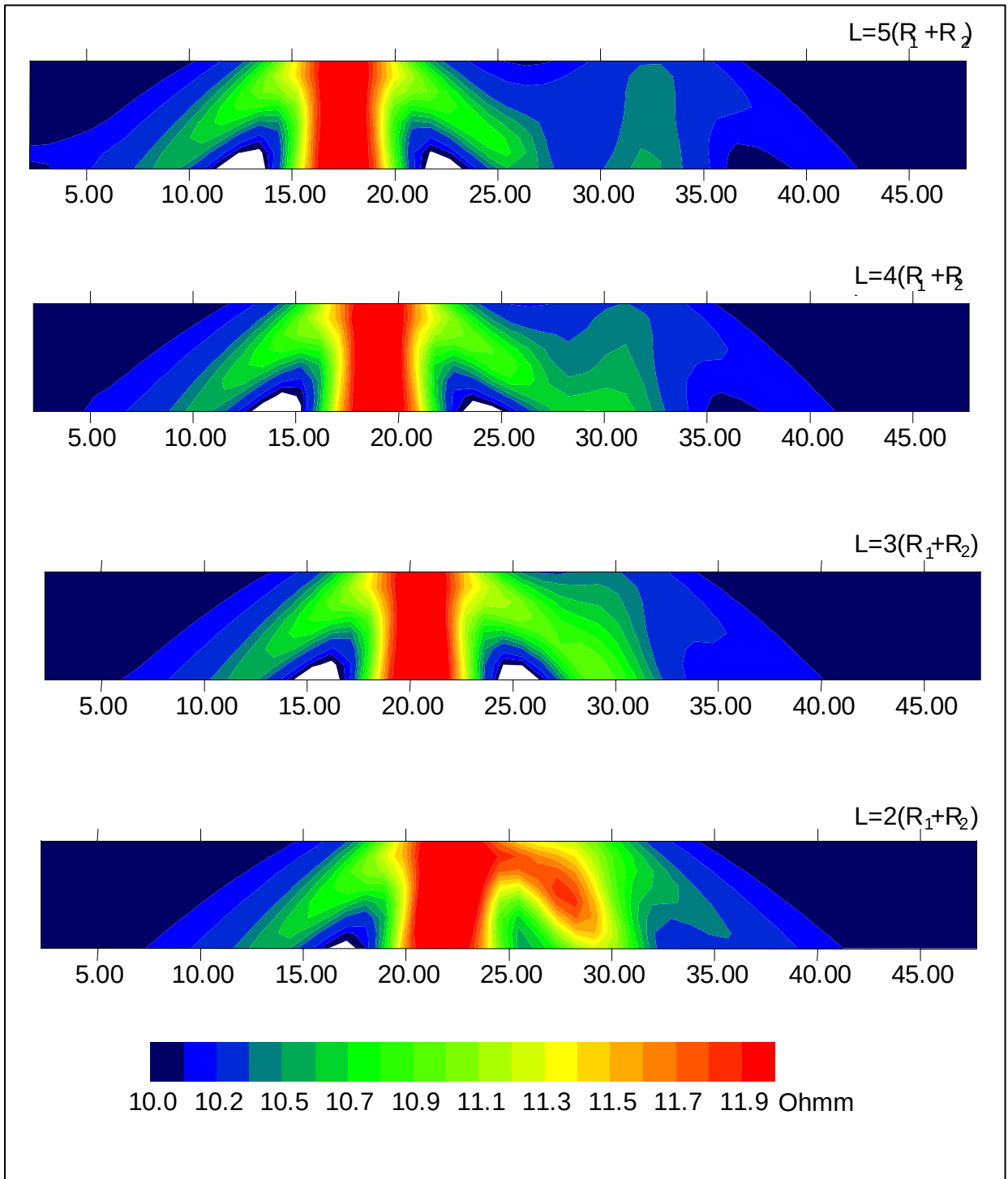


2.17 ábra

Eltérő méretű üregek hatásának vizsgálata W_α elrendezésnél

Modell: $\rho_2/\rho_1=10$, $H_1/R_1=1.5$, $H_2/R_2=3$, $x(L/2)=24$ m

2. Analitikus modellvizsgálatok négyféle elektróda elrendezésre



2.18 ábra

Eltérő méretű üregek hatásának vizsgálata W_γ elrendezésnél

Modell: $\rho_2/\rho_1=10$, $H_1/R_1=1.5$, $H_2/R_2=3$, $x(L/2)=24$ m

3. Paraméter érzékenységi vizsgálatok

A paraméter érzékenységi vizsgálatok célja, hogy összehasonlíthatóvá váljanak a különböző mérési elrendezések, illetve hogy segítséget nyújtson a későbbiek során a terepi munka megtervezéséhez, a mérési paraméterek kiválasztásához. A vizsgálatokból megfigyelhető, hogy az egyes modellparaméterek egységnyi megváltozása milyen mértékű és irányú változást okoz a látszólagos fajlagos ellenállásban. GYULAI (1998.) vizsgálta homogén és rétegzett közegbe helyezett négyszög alakú hatókkal az üreggeometria (magasság, szélesség) érzékenységét többfajta elektróda elrendezés esetén.

Tetszőleges p paraméter φ_e érzékenységének mérőszáma GYULAI (1989) után:

$$\varphi_e = \frac{\partial \rho_a}{\partial p} \frac{p}{\rho_a}$$

Pozitív érzékenység esetén a paraméter értékének növekedése növeli látszólagos fajlagos ellenállást, negatív esetben pedig csökkenti azt. A 2. fejezetben ismertetett elméleti görbéken végzett vizsgálatok alapján a paraméter érzékenységek megismeréséhez az alábbi két modellt használtam:

Paraméter	M1	M2
ρ_2/ρ_1	3	1/3
H/R	2	2
X	24 m	24 m

3.1 táblázat

Érzékenység vizsgálatokhoz használt modellek

Mindkét modell egy-egy gyakorlatban is előforduló esetet ír le: M1 modell egy kis fajlagos ellenállású közegbe helyezett szigetelőt (pl.: löszfalba vájt pince), míg M2 egy a környezeténél jobban vezető üreget (pl.:fémmel biztosított üreg) reprezentál. A vizsgálat tárgyát képező két modellből számított látszólagos fajla-

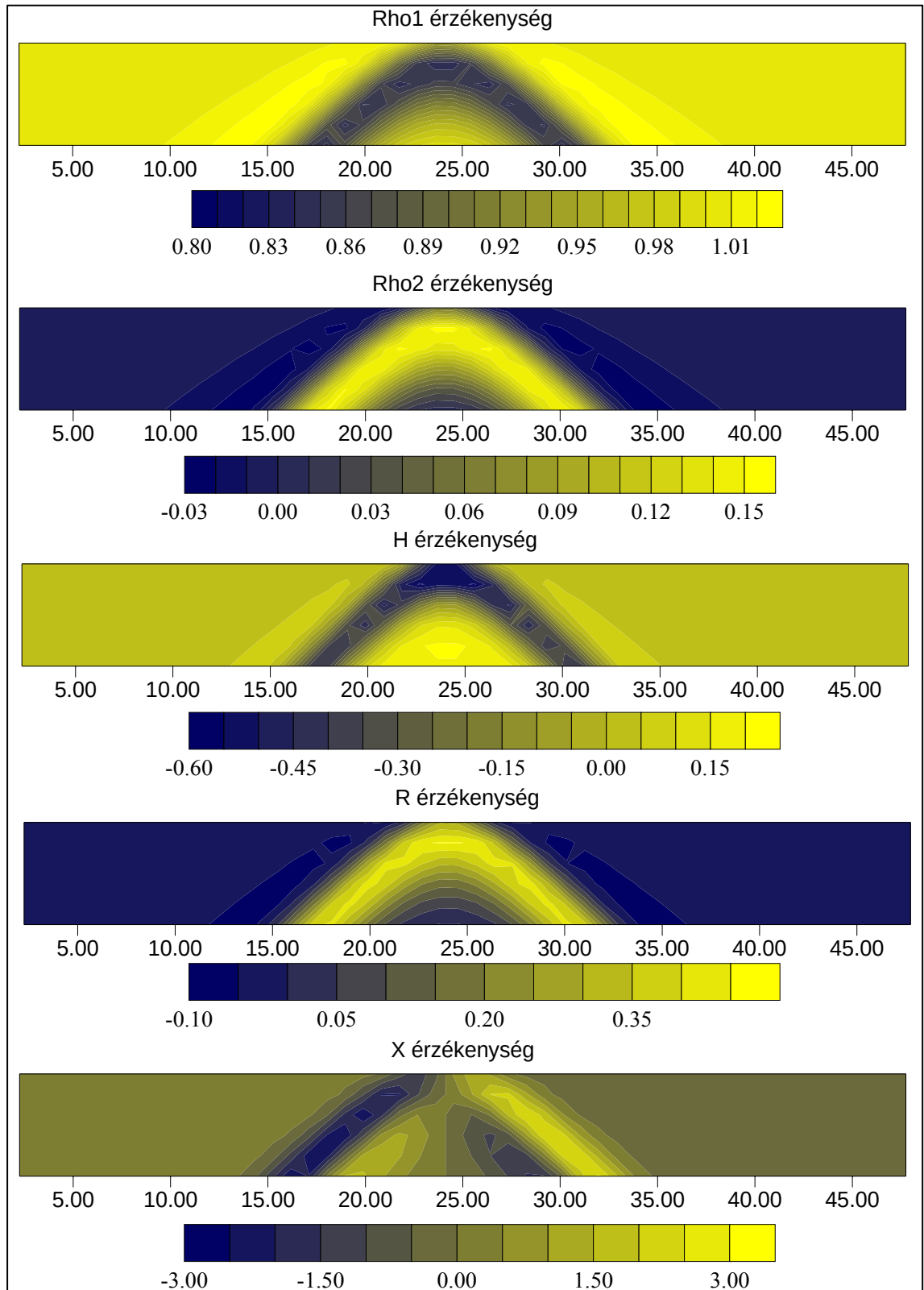
gos ellenállás szelvények láthatók a B mellékletben. A paraméterérzékenységgel kapcsolatos kutatásaimat az ehhez kapcsolódó OTKA részjelentésben (NYÁRI 1997b) dokumentáltam.

3.1 Érzékenységi vizsgálatok dipól-dipól elrendezésnél

Dipól-dipól elrendezés esetén a 3.1 és 3.2 ábra az M1 és M2 modellek paramétereinek érzékenységét mutatja be a profilmenti távolság és az elektródák közti távolság függvényében. Mindkét modellnél megfigyelhető, hogy csak kis elektróda távolságoknál van az érzékenység abszolút értékének maximuma az üreg fölött, az elektróda távolságok növekedésével azok az üreg széleinek irányába tolódnak el. Ez azt jelenti, hogy a mélységi szondázások során a kutatási mélység növekedésével ezen eltolódások miatt az üreg a pseudo szelvényből kevésbé jól lokalizálható. Megfigyelhető, hogy az üreg ellenállásának érzékenysége rendkívül alacsony, nullától érzékelhető eltérés csak közvetlenül az üreg fölött található, ám annak mértéke is minimális (15%). Erre magyarázattal szolgál, hogy a direkt feladat megoldásához használt modellünk végtelenhez közeli nagy fajlagos ellenállású hatót tartalmaz. Az elméleti görbék vizsgálatakor kiderült, hogy a $\rho_2/\rho_1=3$ ellenállás kontraszt ennek feltevésnek megfeleltethető, amit a ρ_2 paraméter érzékenységi vizsgálat is igazolt. Mindazonáltal a későbbi inverziós feldolgozás során a ρ_2 paraméter megbízható becslését az érzékenység ilyen kicsiny értéke kérdésessé teszi. A mélység és sugár paraméterek érzékenységének abszolút értéke hasonló, ám előjelük egymással ellentétes. (Az 5. és 6. fejezetben ismertetésre kerülő korrelációs vizsgálatokból kiderül, hogy ezen két mennyiség előjele ρ_2 paraméterhez viszonyítva már nem az.) A két érzékenységanomália alakja szinte teljesen szimmetrikus az ordinátára, ami arra enged következtetni, hogy ezen két paraméter erősen korrelál egymással. Mivel a mélység érzékenysége abszolút értékben nagyobb, várhatóan értéke a feldolgozás során nagyobb pontossággal becsülhető, mint a sugaré. Az M1 és M2 modellnél lévő

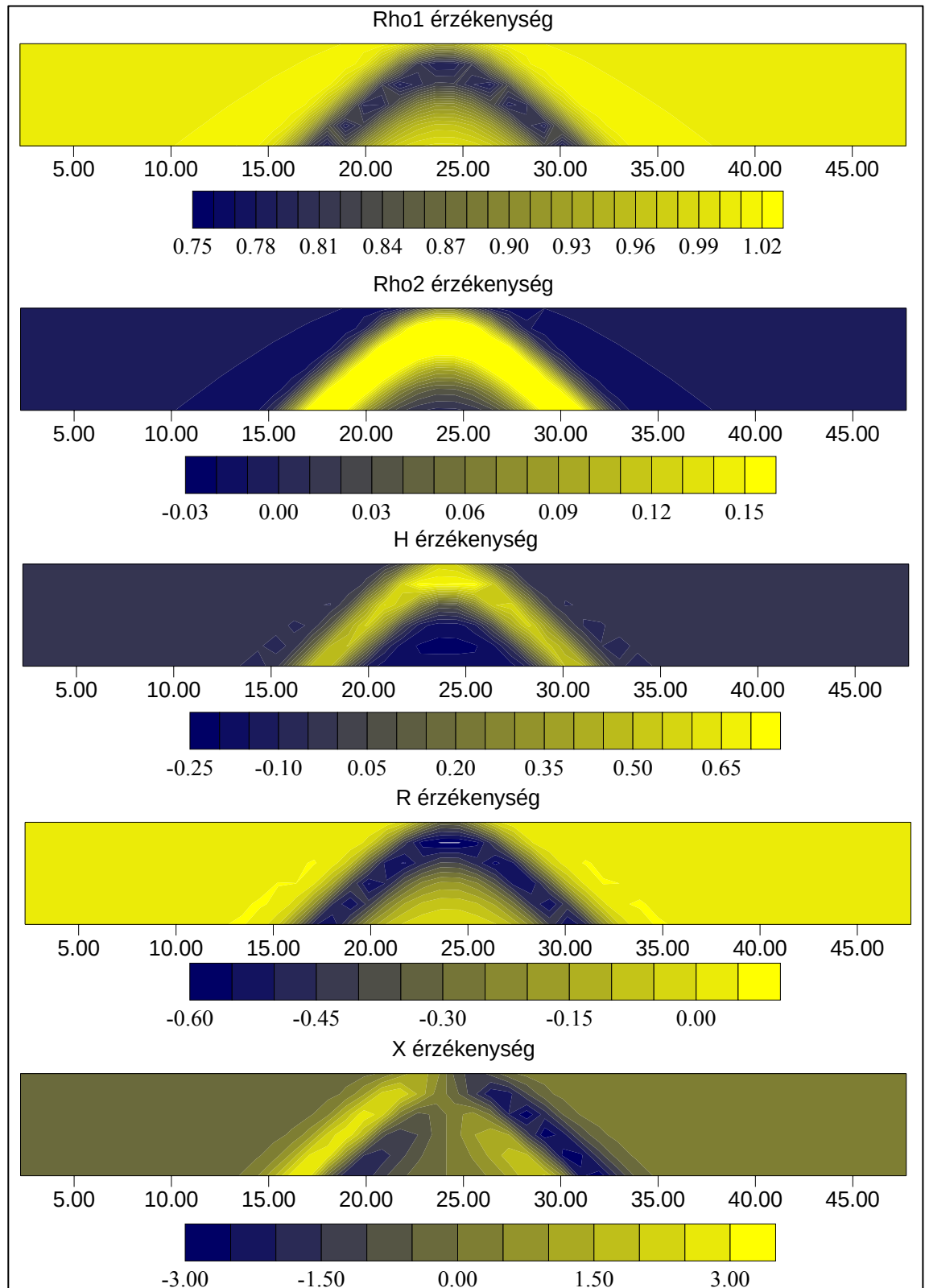
3. Paraméter érzékenységi vizsgálatok

ellentétes irányú ellenállás kontraszt miatt a H és R paraméterek érzékenysége is ellentétes irányú.



3.1 ábra
M1 modell paramétereinek érzékenysége dipól-dipól elrendezésnél

3. Paraméter érzékenységi vizsgálatok



3.2 ábra

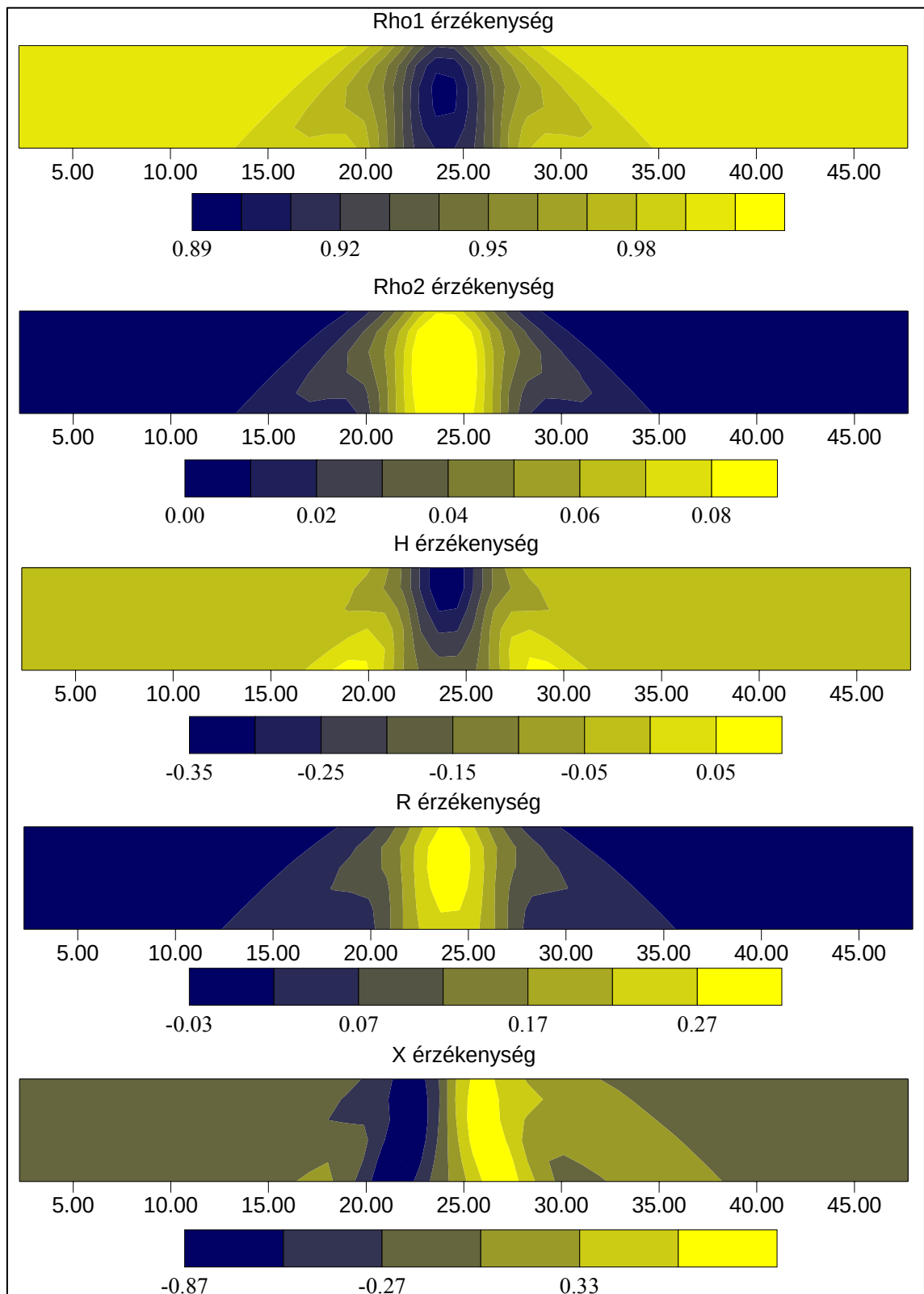
M2 modell paramétereinek érzékenysége dipól-dipól elrendezésnél

A helyparaméter érzékenysége alakja jelentősen eltér a többi paraméterétől. Értéke az üreg fölött minden esetben pontosan zérus, szigetelő hatónál minimumát, vezetónél maximumát akkor éri el mikor a táp-, ellentétes szélsőértékét mikor a mérődipól van pontosan az üreg felett. Érdekes megfigyelni, hogy az M1 és M2 modell között csak az ellenállás kontraszt irányában van különbség, a mértékében nem ($\rho_2/\rho_1[M1]=\rho_1/\rho_2[M2]$), mégis a jól vezető ható hely, mélység és sugár paraméterinek érzékenysége abszolút értékben 10-40%-kal magasabbak a szigetelő hatóénál.

3.2 Érzékenységi vizsgálatok Wenner elrendezéseknél

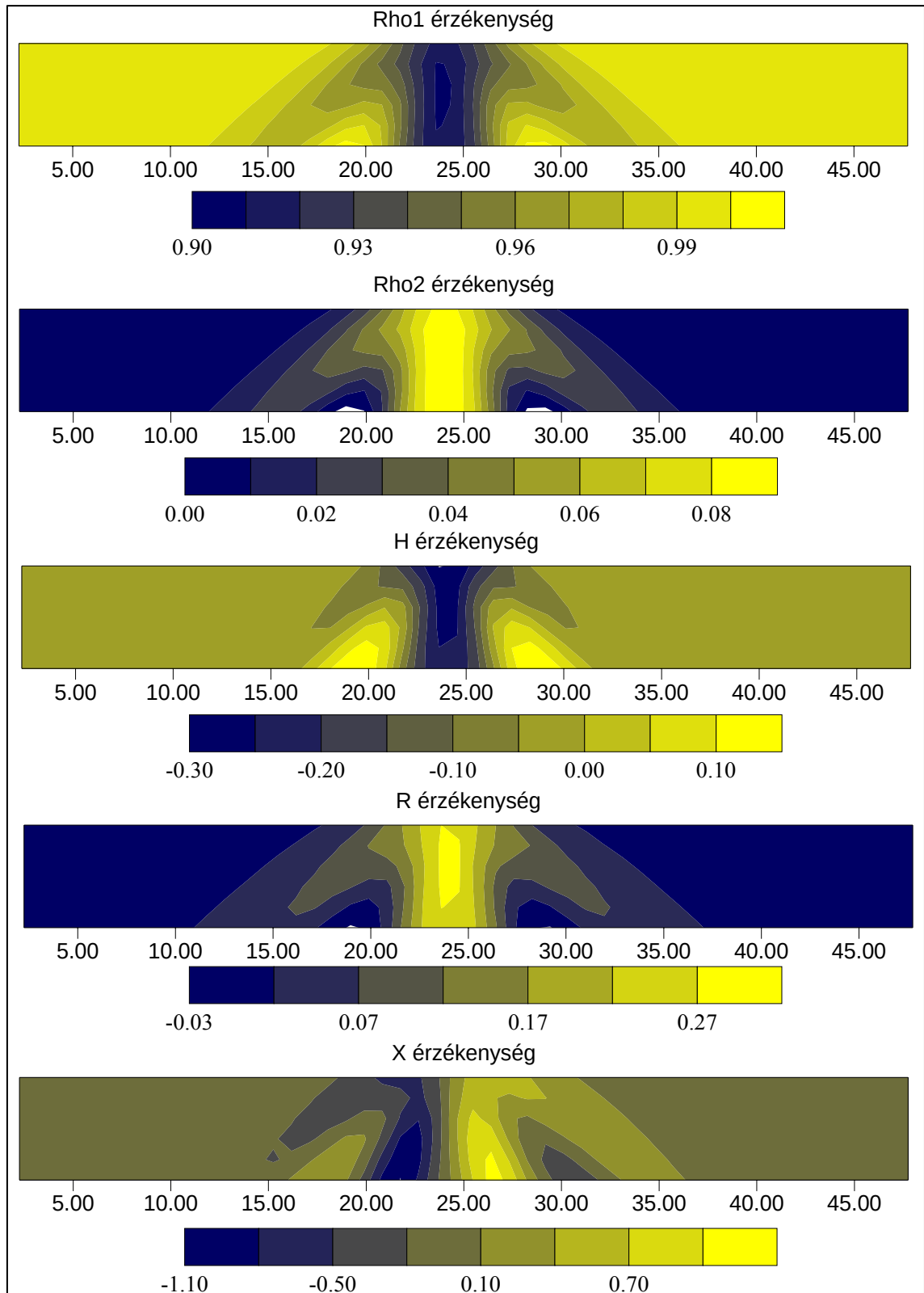
A vizsgált modellekhez számított fajlagos ellenállás szelvények láthatók W_α W_γ elrendezéseknél a B mellékletben. Az M1 modell érzékenységei a két módosulatnál a 3.3, 3.4, az M2-é a 3.5, 3.6 ábrán láthatók. Feltűnő, hogy az összes modell paraméter érzékenysége dipól-dipól elrendezésnél jóval nagyobb abszolút értékű, mint a Wenner módosulatoknál. Ezeknél a módosulatoknál azonban a dipól-dipóllal ellentétben az érzékenységek szélső értéküket a ható felett éri el, ami azt jelenti, hogy a mért látszólagos fajlagos ellenállás görbén is az üreg feletti szűk görbeszakaszon következik be változás a paraméterek megváltozásának esetén. Bár a hely-paraméter (X) érzékenysége ezekben az esetekben is az üregre szimmetrikus, és középpontja felett zérus, ám alakja a dipól-dipól esettel ellentétben nem elnyúlt, hanem mintegy lehatárolja a hatót. Az abszolút értelemben vett érzékenység értékek csekély mértékben nagyobbak az alfa módosulat esetén, mint a gamma módosulatnál. Legnagyobb különbség a két módosulat között a geometriai paraméterek (H,R) abszolút értékében van. A jól vezető ható (M2) érzékenységei a dipól-dipól esetekhez képest kisebb mértékben térnek el (5-15 %) a szigetelő hatóétól (M1).

3. Paraméter érzékenységi vizsgálatok



3.3 ábra
M1 modell paramétereinek érzékenysége Wenner alfa elrendezésnél

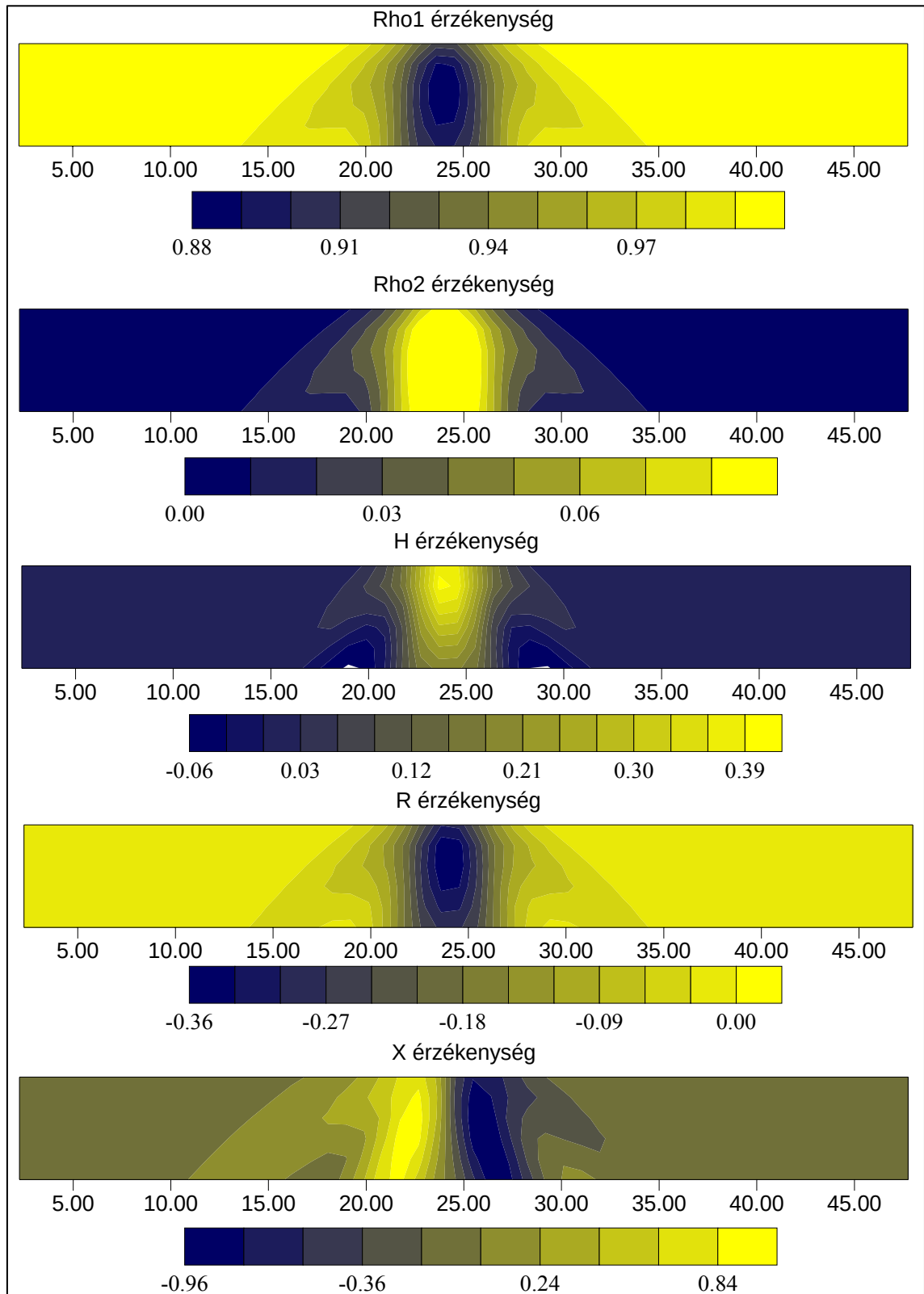
3. Paraméter érzékenységi vizsgálatok



3.4 ábra

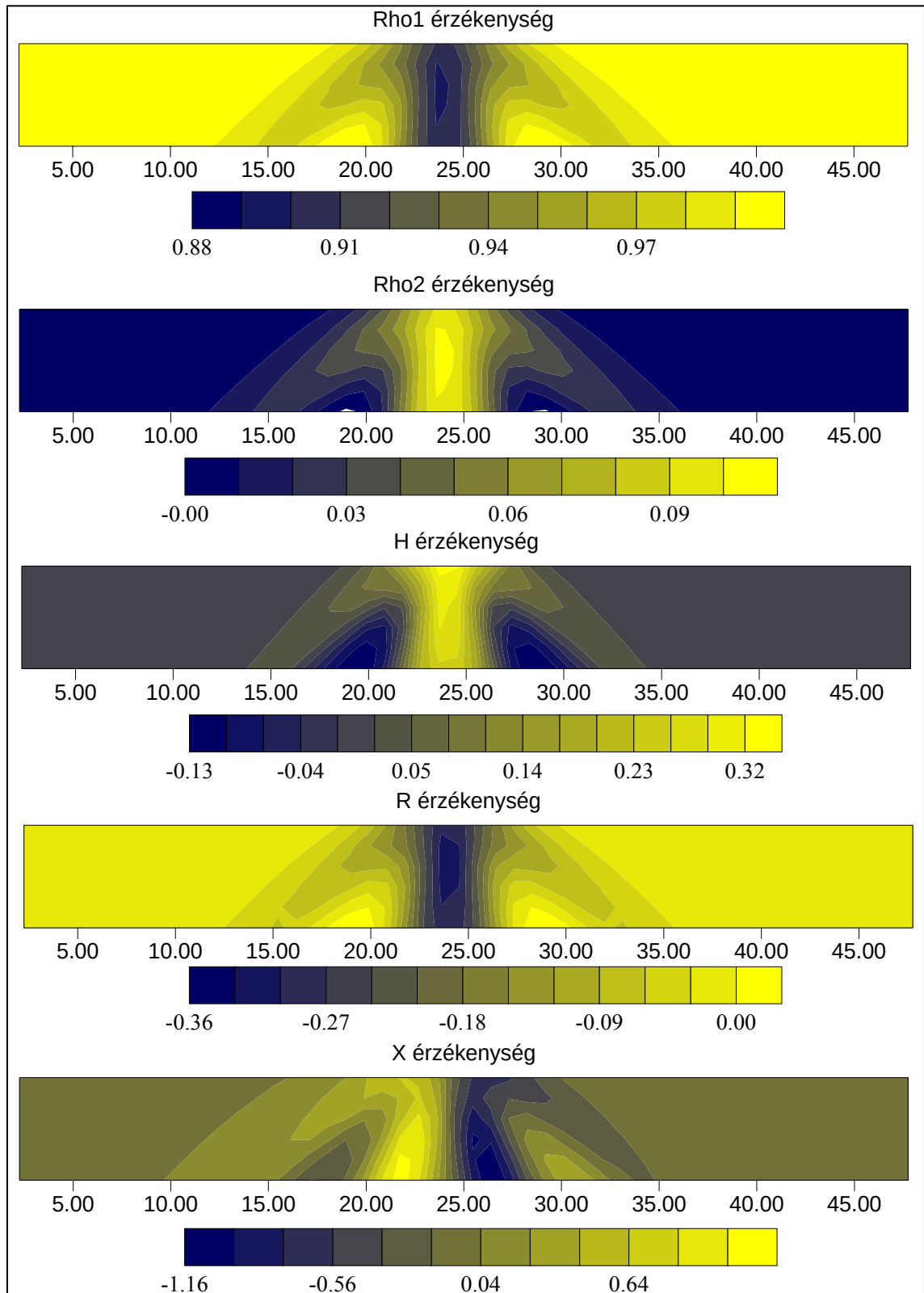
M1 modell paramétereinek érzékenysége Wenner gamma elrendezésnél

3. Paraméter érzékenységi vizsgálatok



3.5 ábra
M2 modell paramétereinek érzékenysége Wenner alfa elrendezésnél

3. Paraméter érzékenységi vizsgálatok



3.6 ábra

M2 modell paramétereinek érzékenysége Wenner gamma elrendezésnél

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés

4.1 Előzmények

Az ismertetésre kerülő szűrési eljárás segítségével a felszínközeli üregek horizontális helyzetét és számát kívánjuk megbízhatóan meghatározni. A módszerrel a mérési vonal menti üreg, üregszerű ható vagy hatók középpontjának felszíni vetületét adhatjuk meg. Az eljárást használhatjuk önálló feldolgozási módszerként, illetve felhasználható az inverziós eljárás kiegészítéseként, miáltal növelhető a modellparaméterek becslésének pontossága.

Régészeti célú kutatások kapcsán a felszínközeli kétdimenziós hatók helyzetének meghatározására TSOKAS ÉS TSOURLOS (1997) egy olyan dekonvolúciós eljárást dolgozott ki, amely a következő elven alapul. A mérési vonal mentén a $\rho(x)$ anomália úgy tekinthető, mint valamely (például az origóban adott) $\rho_0(x)$ hatót leíró elméleti görbe és egy $D(x)$ pozíciófüggvény konvolúciója:

$$\rho(x) = \rho_0(x) * D(x), \quad (4.1)$$

ahol $D(x)$ ideális esetben egy $\delta(x-x_1)$ jellegű Dirac-delta függvény, amely a $\rho_0(x)$ függvényt a ható fölé, x_1 pontba tolja. A szerzők $\rho_0(x)$ -et egy nagy ellenállású hatót tartalmazó homogén féltér esetén FD modellezéssel kapott görbékkel közelítették, ahonnan – feltételezve, hogy a mérési és az elméleti görbe eltérése nem túl jelentős – a pozíciófüggvényt a

$$\rho(x) * \rho_0^{-1}(x) = D(x) \quad (4.2)$$

konvolúció elvégzésével kapták, ahol

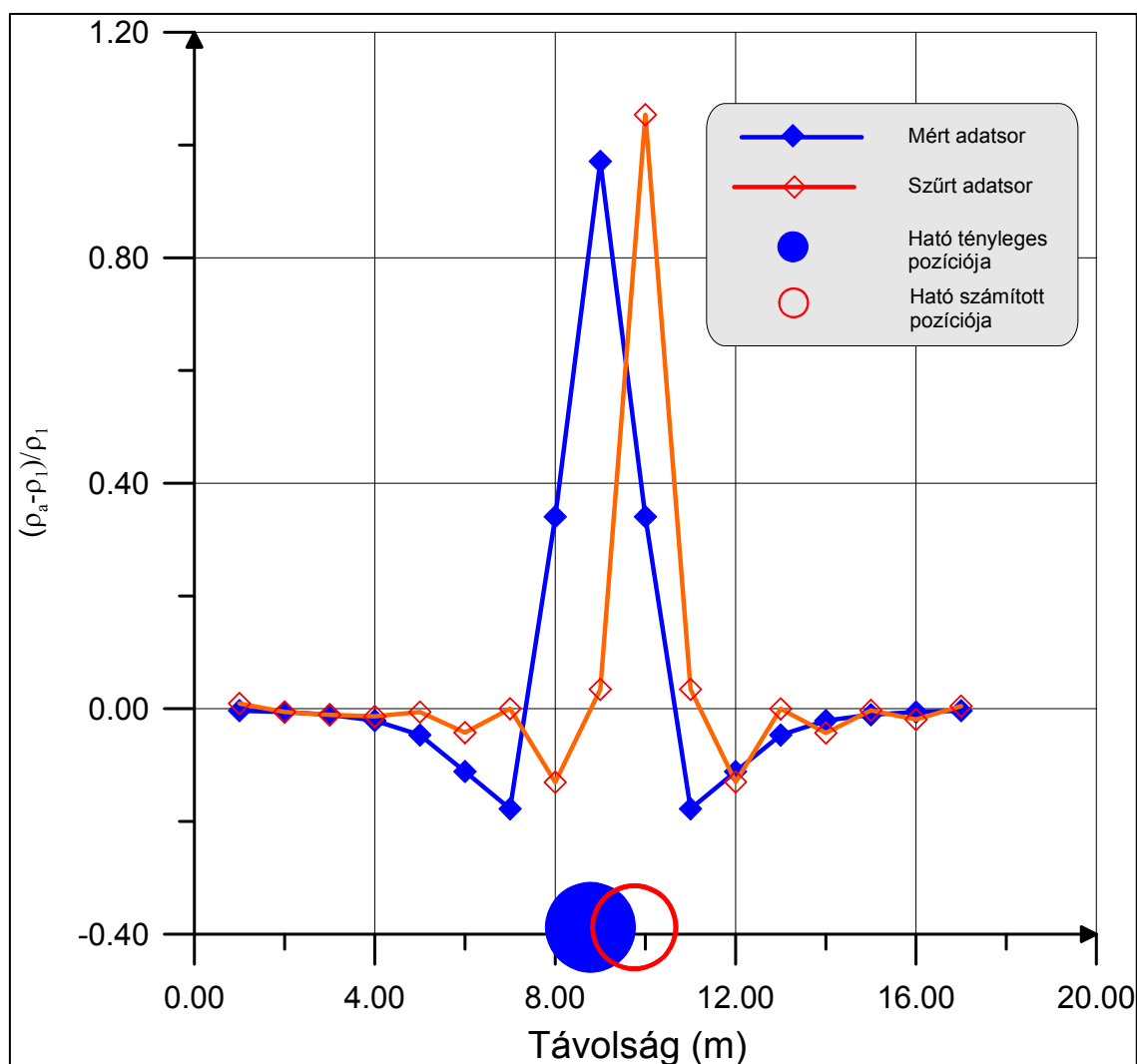
$$\rho_0(x) * \rho_0^{-1}(x) = \delta(x). \quad (4.3)$$

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés

A pozíció függvény tehát kijelöli a ható helyzetét, és – tekintve, hogy a Dirac-delta függvényt közelíti – a ható anomáliájánál keskenyebb, szinuszkardinális jellegű függvényként jelenik meg (4.3) szerint elvégzett művelet után. Az eljárás folyamatábrája a C1 mellékletben látható.

4.2 Dekonvolúció az üregkutatásban

Az előző fejezetben ismertetett eljárást teszteltem üregkutatási célú alkalmazásra. Az analitikusan számolt $\rho(x)$ függvényre elvégeztem a dekonvolúciót a hivatkozott irodalomban megjelent szűrőoefficiensek



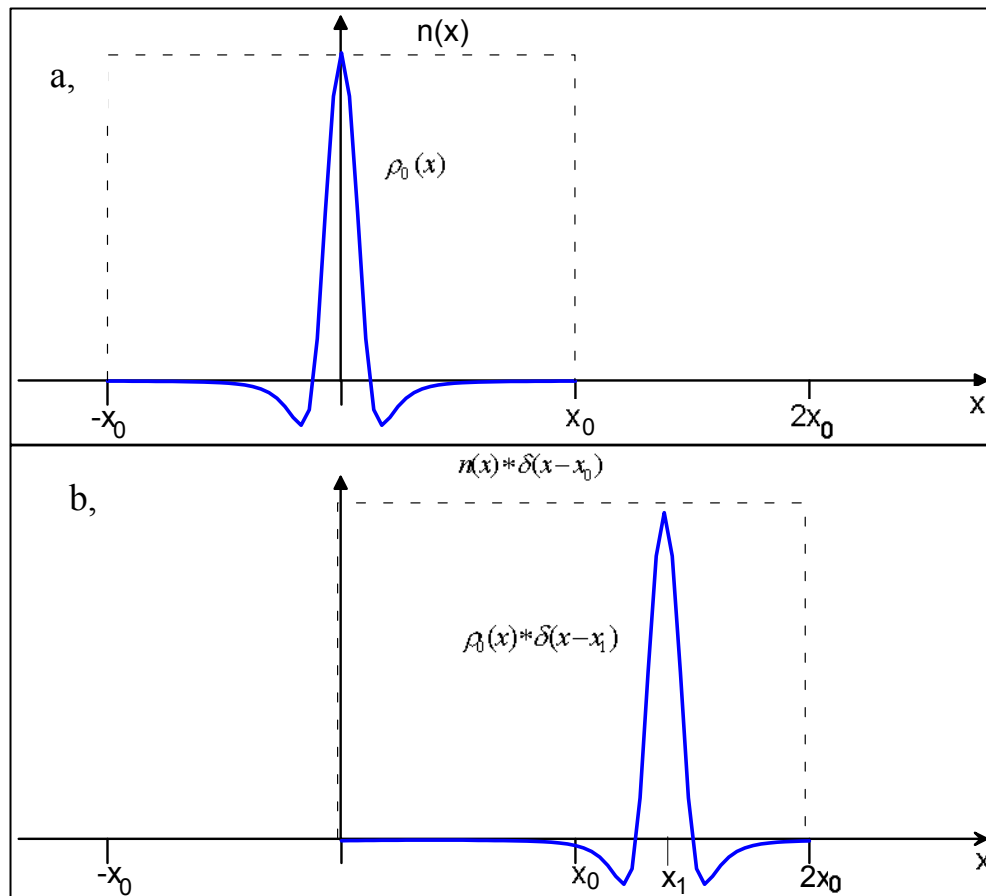
4.1 ábra

TSOKAS, TSUOURLOS(1997) dekonvolúciójának eredménye

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés

($\rho_0^{-1}(x)$ értékek) felhasználásával. A 4.1 ábrán látható, hogy az így kapott pozíciófüggvény maximuma nem a ható tényleges középpontja fölött jelentkezik, hanem attól jelentősen eltolódva. Hasonló eltolás figyelhető meg a hivatkozott szerzők által ismertetett numerikus példák némelyikénél is. Vizsgálatom tárgyát a következőkben az képezte, hogy miként küszöbölhető ki ez a jelentős mértékű eltolás, valamint zajjal terhelt mérési adatok esetén hogyan növelhető az eredmények megbízhatósága (NYÁRI, FANCSIK 1998. és Fancsik, Nyári 1999.).

Fogjuk fel a mérési vonal egy x_1 pontjánál található $\rho(x)$ anomáliát, mint végezzámú, diszkrét minta által reprezentált függvényt. A diszkretizációtól eltekintve ez a függvény előállítható az origóban felvett $\rho_0(x)$ függvényből a következő, a 4.2 ábrán szemléltetett módon. Megfigyelhető, hogy $\rho_0(x)$ -et egy $\delta(x-x_1)$



4.2 ábra

Dekonvolúciós szűrés szemléltetése

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés

függvény tolja az x_1 pontba, és egy origó középpontú, a mérés térbeli kiterjedésével egyenlő ($2x_0$) hosszúságú $n(x)$ négyszögimpulzus csonkítja x_0 eltolás figyelembe vételével. Röviden:

$$\rho(x) = [\rho_0(x) * \delta(x - x_1)][n(x) * \delta(x - x_0)] \quad (4.4)$$

A kiindulópont tehát a hivatkozott publikációhoz hasonlóan az, hogy a mért és a számított fajlagos ellenállás görbék alakja nagyjából megegyezik, csak pozíciójuk eltérő. A $\rho(x)$ függvény (4.4) szerinti definíciójához számított pozíciófüggvény tehát (4.5) művelet elvégzésével írható fel:

$$D(x) = \{[\rho_0(x) * \delta(x - x_1)][n(x) * \delta(x - x_0)]\} * \{\rho_0(x)n(x)\}^{-1} \quad (4.5)$$

A modellezett görbét célszerű a mérési vonalnak megfelelő hosszt alapul véve csonkítani.

A probléma további vizsgálatához érdemes elvégezni a (4.5) kifejezés Fourier transzformációját. Amennyiben k -val jelöljük a térfrekvenciát, az alábbi kifejezést kapjuk:

$$D(k) = \frac{[e^{-ikx_1} R_0(k)] * [e^{-ikx_0} N(k)]}{R_0(k) * N(k)} \quad (4.6)$$

ahol $R_0(k)$ $\rho_0(x)$, $N(k)$ pedig $n(x)$ függvény Fourier transzformált párját jelenti.

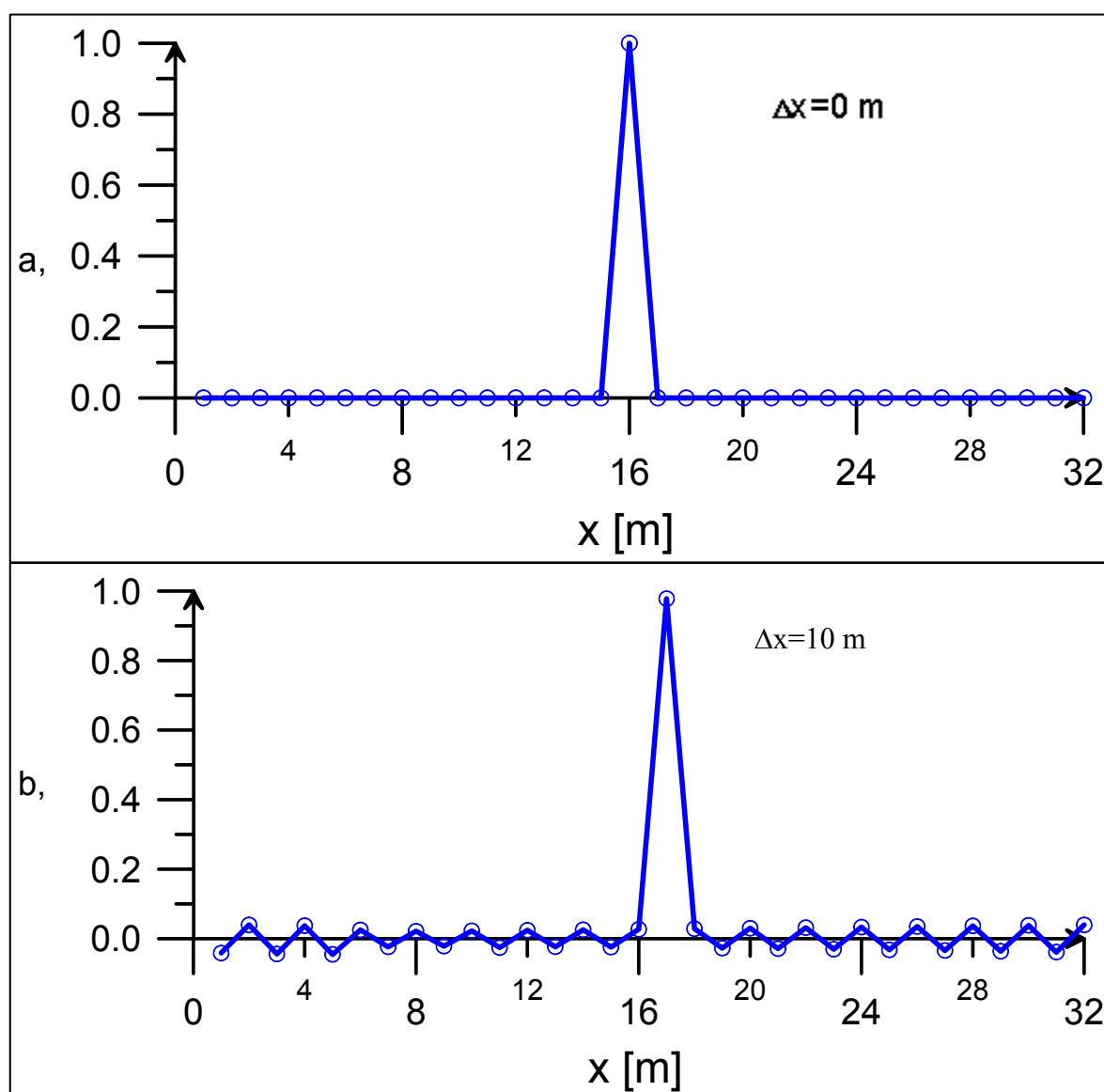
A (4.7) kifejezést (4.6) átalakítása után kapjuk.

$$D(k) = e^{-ikx_1} \frac{R_0(k) * [N(k)e^{-ik(x_0 - x_1)}]}{R_0(k) * N(k)} \quad (4.7)$$

Látható, hogy (4.7) kifejezésben a számláló és a nevező nem egyezik meg egymással. Akkor kapunk a mérés körülményei által meghatározott tartományon vett pozíciófüggvényre a várakozásunknak megfelelően Dirac-féle $\delta(x - x_1)$ függvényt,

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés

ha a számlálóban lévő $e^{-ik(x_0-x_1)}$ „zavaró tag” elhanyagolható, vagy eliminálható. Ez akkor lehetséges, ha $x_0 \approx x_1$, vagyis $\Delta x = 0$. A „zavaró tag” okozta eltolást a 4.3 ábra szemlélteti. Az ábra a, részén az az eset pozíciófüggvénye látható, amikor a mérési és a modell görbéken egyaránt $x = 16$ m-nél található a ható, tehát a „zavaró tag” elhanyagolható. A 4.3 ábra b, részén lévő pozíciófüggvényt $\Delta x = x_0 - x_1 = 10$ m esetre számítottam. Maximuma már nem pontosan a ható fölött ($x = 16$ m) található, tehát megjelent a „zavaró tag” okozta eltolás.

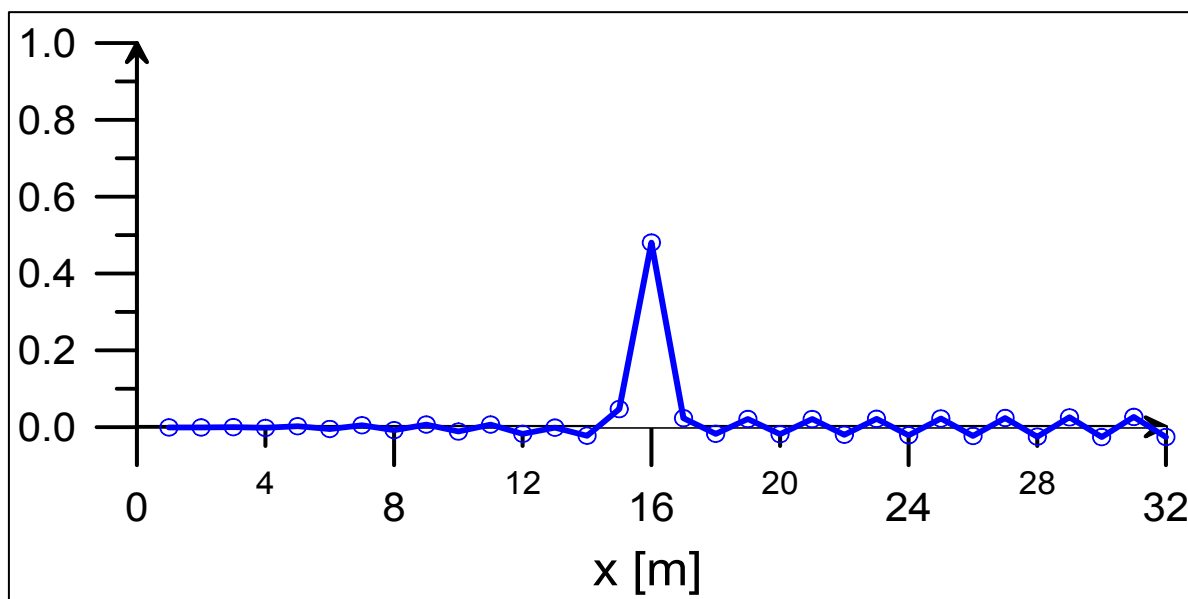


4.3 ábra

A „zavaró tag” hatásának szemléltetése (hatópozíció: 16 m)

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés

A zavaró tag hatásának kiküszöbölésére egy lehetőség, hogy szükséges, hogy megváltoztatjuk a $\rho_0(x)$ elméleti görbének és $n(x)$ négyszögimpulzusnak az egymáshoz viszonyított helyzetét. Ekkor a (4.7) kifejezés nevezőjében az $e^{-ik(x_0-x')}$ mennyiség jelenik meg, amely elhanyagolható ha $x'=x^1$. Mivel alapesetben a keresett ható helye ismeretlen, célszerű x' -t minden egyes mérési ponton fölvenni, és a dekonvolúció elvégzése után ezeket összegezni. A „zavaró tag” hatásának ezen eljárással történő csökkentését keresőüreg módszernek, az x' koordinátákhoz tartozó pozíciófüggvények összegzését pedig horizontális összegzésnek neveztem el. A 4.4 ábra a fent említett eljárásokkal előállított pozíciófüggvényt mutatja be a 4.3 ábra b, részén bemutatott esetben. Látható, hogy az összegzett pozíciófüggvény ebben az esetben a ható tényleges helyzetének megfelelő pozícióban éri el maximumát.



4.4

Dekonvolúció eredménye a „zavaró tag” eliminálása után. Hatóhelyzet: 16 m

Az eredményül kapott pozíció függvény minden esetben közel Dirac-delta alakú, tehát a dipól-dipól elrendezéssel mért szelvényeken nagyobb dipóltávolságoknál jelentkező 2 maximumú anomáliát is ezzel az eljárással mintegy „összehúzzuk”.

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés

Gyakorlatban általában a mérés nem csak egy mérési görbét, hanem több mélység szinten mért adatokból összeálló pszeudo szelvényt eredményez. Az ilyen szelvények feldolgozásához minden mélység szinthez tartozó x koordinátára el kell végezni a horizontális összegzést, majd a szintenként kapott pozíciófüggvényeket újra összegezni kell. Ezt az összegzést szemléletesen vertikális összegzésnek nevezttem el, alkalmazása pedig további jelkiemelést eredményez. Az üregkutatási célra kifejlesztett dekonvolúciós eljárás folyamatát a C2 melléklet szemlélteti.

Abban az esetben, mikor a mérési adatok nagymértékű zajjal terheltek, tehát nincs meg a mért és a számított adatrendszer között a kellő hasonlóság, célszerű a 2.3 fejezetben ismertetett korrelációs szűrést alkalmazni.

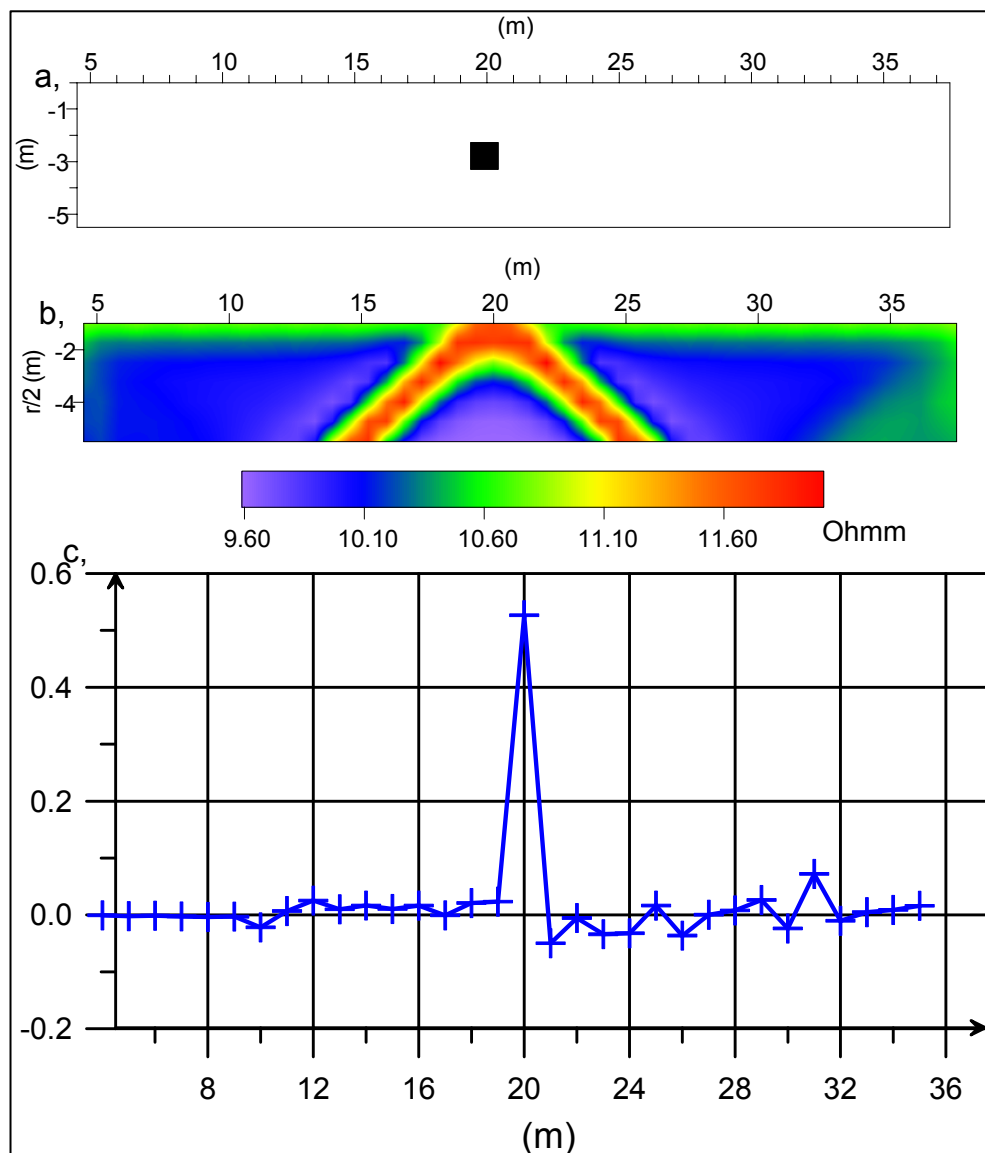
4.3 Az eljárás tesztelése

A keresőüreg eljárás hatékonyságát 2,5D-s véges differenciás modellezéssel előállított adatokon vizsgáltam meg. A $\rho(x)$ függvényt tehát FD módszerrel állítottuk elő, míg a $\rho_0(x)$ kereső függvényt a 2. fejezetben leírt analitikus módszerrel számítottam. Az ellenőrzés első lépéseként a TSOKAS ÉS TSOURLOS (1997) által is vizsgált, a 4.1 ábrán bemutatott esetet néztem. A modellezetett ható egy 1m oldalhosszúságú alaplappal rendelkező, 1000 Ωm fajlagos ellenállású hasáb volt, melyet 10 Ωm fajlagos ellenállású közegbe helyeztünk (4.5/a, ábra). A pszeudo szelvényt (4.5/b, ábra) $a=AB=MN=1$ m egységnyi elektródaközzel, $n=1,2,\dots,8$ mélység szintre dipól-dipól elrendezéssel készítettem. A dekonvolúció eredményeként kapott pozíciófüggvény (4.5/c, ábra) pontosan határozta meg a ható helyét.

A 4.6 ábrán olyan esetet mutatok be, amely a dekonvolúciós módszer horizontális felbontóképességét illusztrálja. Az előző modellen annyit változtattam, hogy két darab egyforma hasábot helyeztem a homogén feltérbe, egymástól 1m távolságra (4.6/a, ábra). A 4.6/b. ábrán a pszeudo szelvény, a c, ábrán pedig a dekonvolúció eredménye látható. Az előállított pozíció függvény pontosan a két

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés

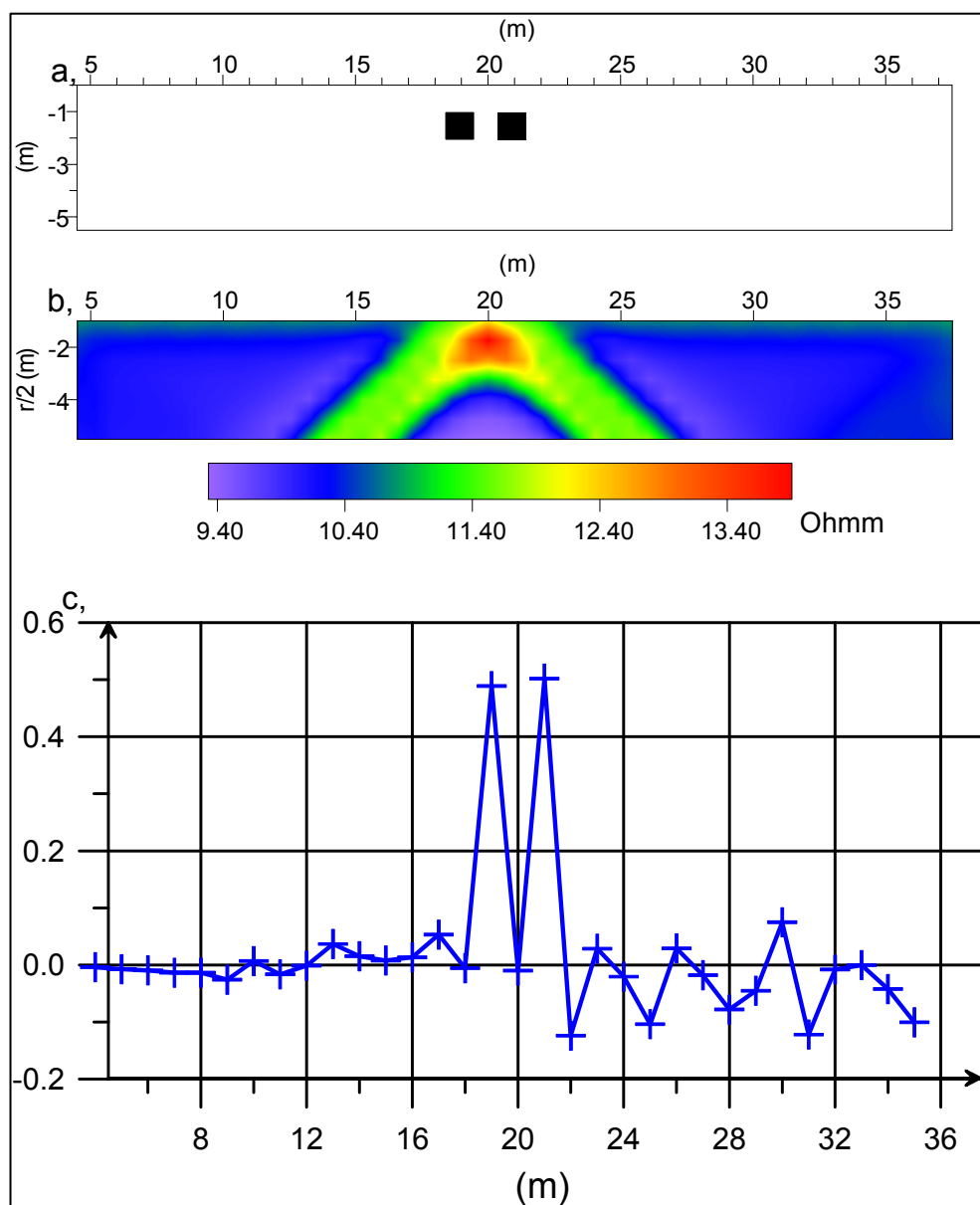
hasáb középpontja felett adott egyértelmű maximumot. A módszer rendkívül jó horizontális felbontóképességét igazolja a 4.7 ábrán látható fajlagos ellenállás szelvény, mely ugyanezen feladat megoldását mutatja be a Res2DInv feldolgozó program segítségével, mely a LOKE ÉS BARKER (1996) által kifejlesztett FD inverzót alkalmazza. MOLLER ÉS SORENSSEN (1998) is ezt a programot használta az általuk kidolgozott dekonvolúciós eljárás eredményének ellenőrzésére.



4.5 ábra

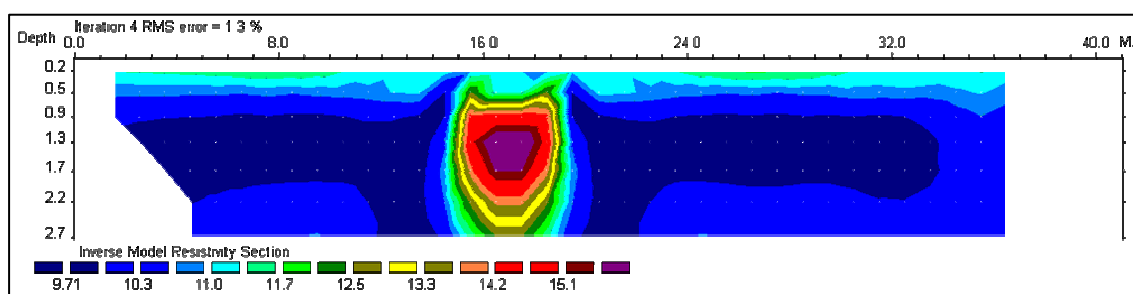
Dekonvolúciós eljárás egy hatóval rendelkező esetben

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés



4.6. ábra

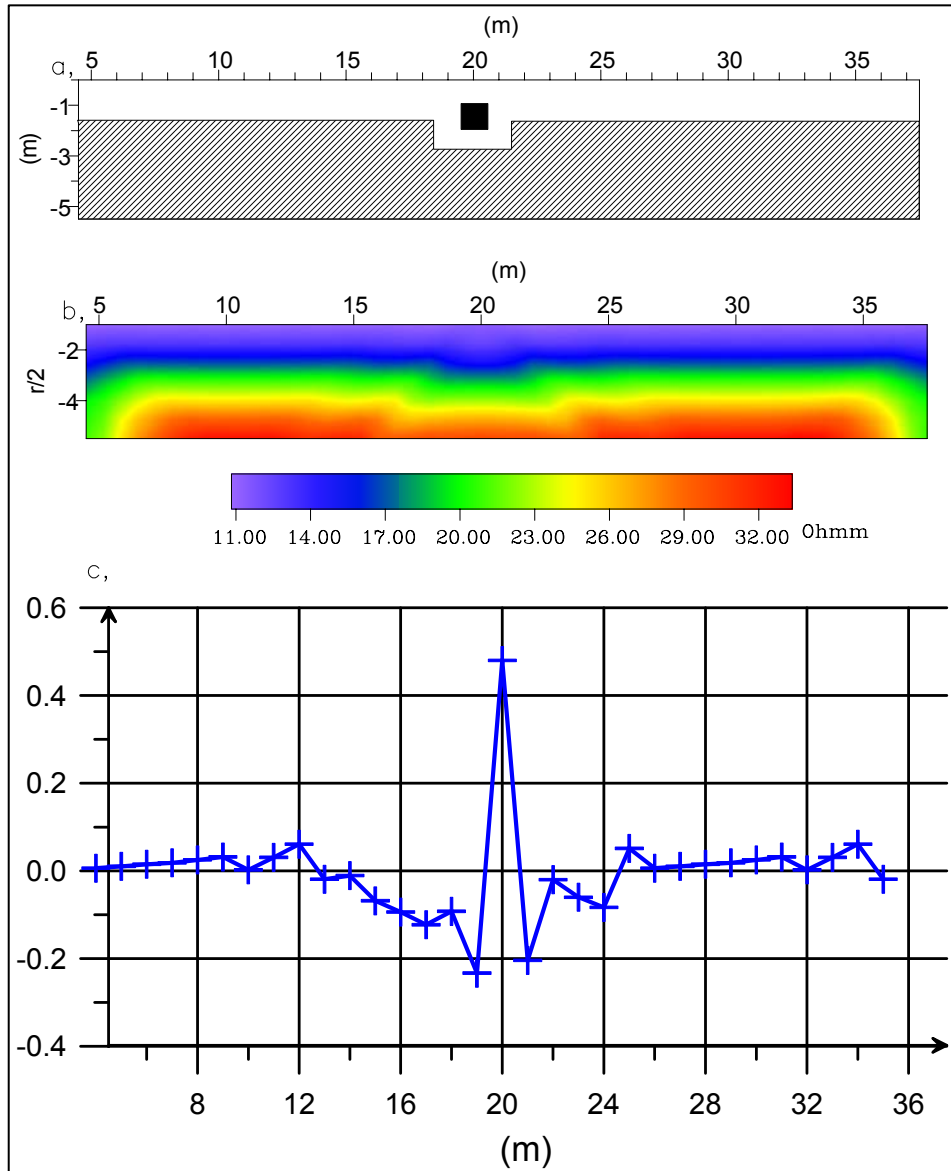
A dekonvolúciós eljárás horizontális felbontóképessége



4.7. ábra

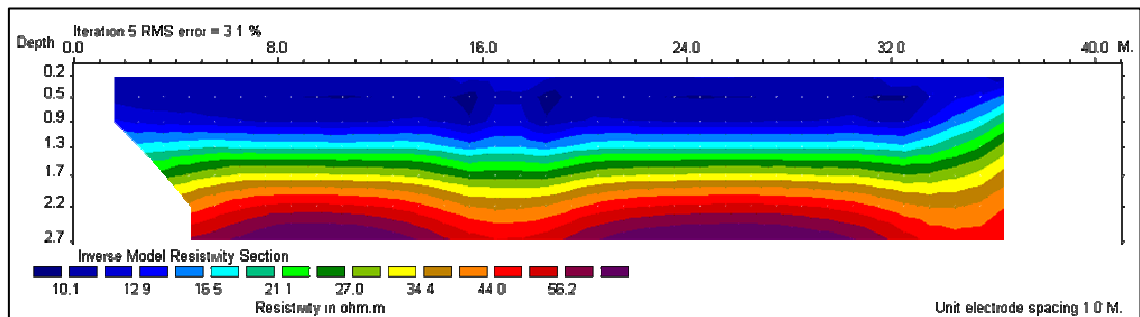
A 4.6/b ábrán lévő geoelektromos szelvény FD inverziójának eredménye

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés



4.8. ábra

Dekonvolúció összetett földtani környezetet leíró modellre



4.9. ábra

A 4.8./b ábrán lévő geoelektromos szelvény FD inverziójának eredménye

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés

Összetett földtani szerkezet esetén is kiemelhető ezzel az eljárással az üreg hatása. A 4.8/a, ábrán bemutatott modellnél a 4.5/a ábrán lévő hatót egy $10\Omega\text{m}$ és egy $100\Omega\text{m}$ ellenállású közeg közé helyeztem. Látható, hogy a 2,5D-s FD módszerrel előállított pszeudo szelvényen nem figyelhető meg jellegzetes, üreg jelenlétére utaló anomália (4.8/b ábra). A dekonvolúciós eljárás segítségével azonban sikerült kiemelni az összetett közegből az üreg hatását (4.8/c, ábra). Összehasonlítás-képpen érdemes megtekinteni az FD inverzióval előállított eredményszelvényt (4.9 ábra), mely alapján üregesedést nem lehetne kimutatni.

4.4 Dekonvolúció alkalmazása terepi adatokon

4.4.1 Tesztmérés jól vezető ható esetén

Az első terepi példa egy olyan mérést ismertet, melynek során ismert körülmények között teszteltem az előzőekben ismertetett feldolgozási eljárást. A teszteléshez sikerült egy olyan területet találni, mely a vizsgált ható szempontjából kétdimenziósnak tekinthető, így alkalmazható rá a 2. fejezetben bemutatott modell. Lényeges eltérés a kiindulási modellhez képest az, hogy a ható a környezetéhez képest nem végtelenül nagy, hanem végtelenül kicsi fajlagos ellenállással rendelkezik. A 2. és 3. fejezetben bemutatott modell- és paraméter érzékenységi vizsgálatok azonban arra engedtek következtetni, hogy a 2. fejezetben ismertetett levezetés negatív irányú anomáliák esetén is alkalmazható.

A tesztmérésre Budapest XIV. kerületében került sor, a Rákos patak partján. A kutatandó objektum egy ismert nyomvonalú, méretű és mélységű, a mérés szempontjából végtelen hosszúságúnak tekinthető távfűtő csővezeték volt (4.10 ábra). A cső méretei és helyzete a 2. fejezetben ismertetett jelölések alapján: $H=0,94\text{ m}$, $R=0,47\text{ m}$, $X=14,0\text{ m}$.



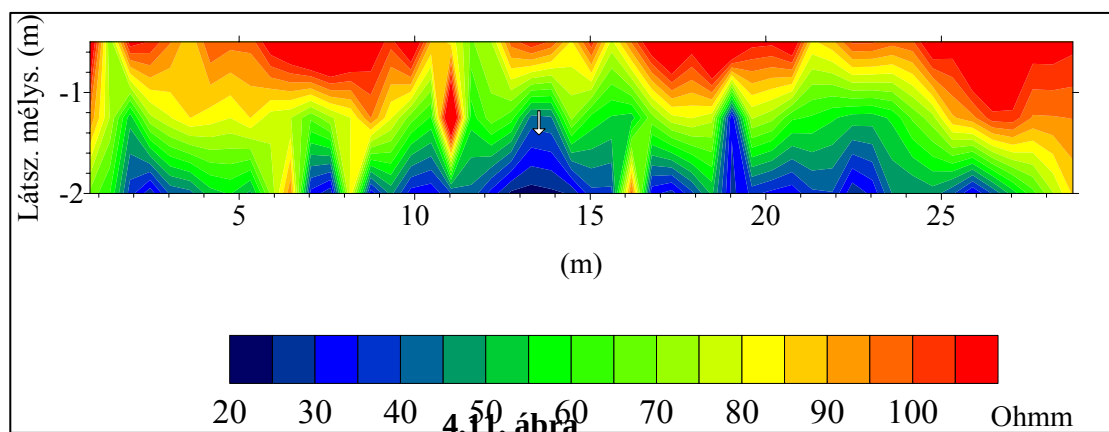
4.10. ábra

Tesztmérés helyszíne. A ↓ a vizsgált hatót jelöli

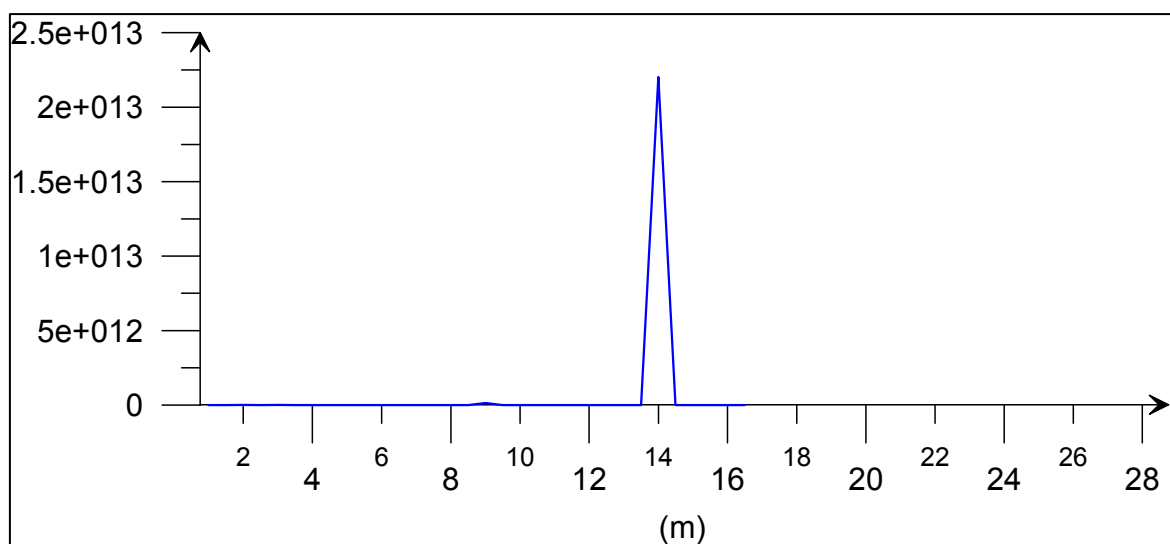
A mérést a cső nyomvonalára merőlegesen, dipól-dipól elrendezéssel, 0,5 m-es egységnyi elektróda távolsággal, 8 mélység szintre végeztem. A mért látszólagos fajlagos ellenállás szelvény a 4.11 ábrán látható. Megfigyelhető, hogy az inhomogén anyagú feltöltés okozta környezeti hatásoktól nagyon nehezen különíthető el a ható okozta anomália, ezért az adatfeldolgozáskor a 2.3 fejezetben leírt jelkiemelési eljárást is elvégeztem. Végrehajtva a dekonvolúciót, pontosan a ható fölött egy rendkívül határozott maximumot kapunk, amennyiben a vertikális összegzést a harmónikus közép módszerével végezzük (4.12 ábra).

Ez a tesztmérés tehát igazolta, hogy a dekonvolúciós eljárással még igen zajos környezetből is kiemelhető a 2D-s (üregszerű) ható anomáliája, és helyzete pontosan megadható.

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés



4.11. ábra
Látszólagos fajlagos ellenállás szelvény. Hatópozíció: $X=14$ m



4.12. ábra

Lineáris szűrés eredménye összegzések elvégzése után

4.4.2 Eltemetett falmaradványok kutatása

A bemutatásra kerülő terepi példa egy régészeti célú kutatás során mutatja be az analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrési eljárás sikeres felhasználást (HOLCZINGER és társai 1999.). A kutatási terület a Veszprém megyében található Balácapusztán volt egy római kori villagazdaság területén, melyről egy légi felvétel látható a 4.13 ábrán. Az évek óta folyó ásatások során számos betemetett épületmaradványt találtak, a mérések feladata az volt, hogy támpontot adjon a további ásatási helyszínek kijelöléséhez. A már feltárt falmaradványok fedője körülbelül 0,5 m volt.

A kutatási területet kilenc darab, egymással párhuzamos, 55 m hosszú mérési szelvénnel fedtük le, melyek egymástól 2,5 m távolságra helyezkedtek el. A mérést dipól-dipól elrendezéssel, egy méteres egységnyi elektróda távolsággal, 3



4.13 ábra

A balácapusztai villagazdaság madártávlatból. A ▼ jelöli a kutatási területet

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés

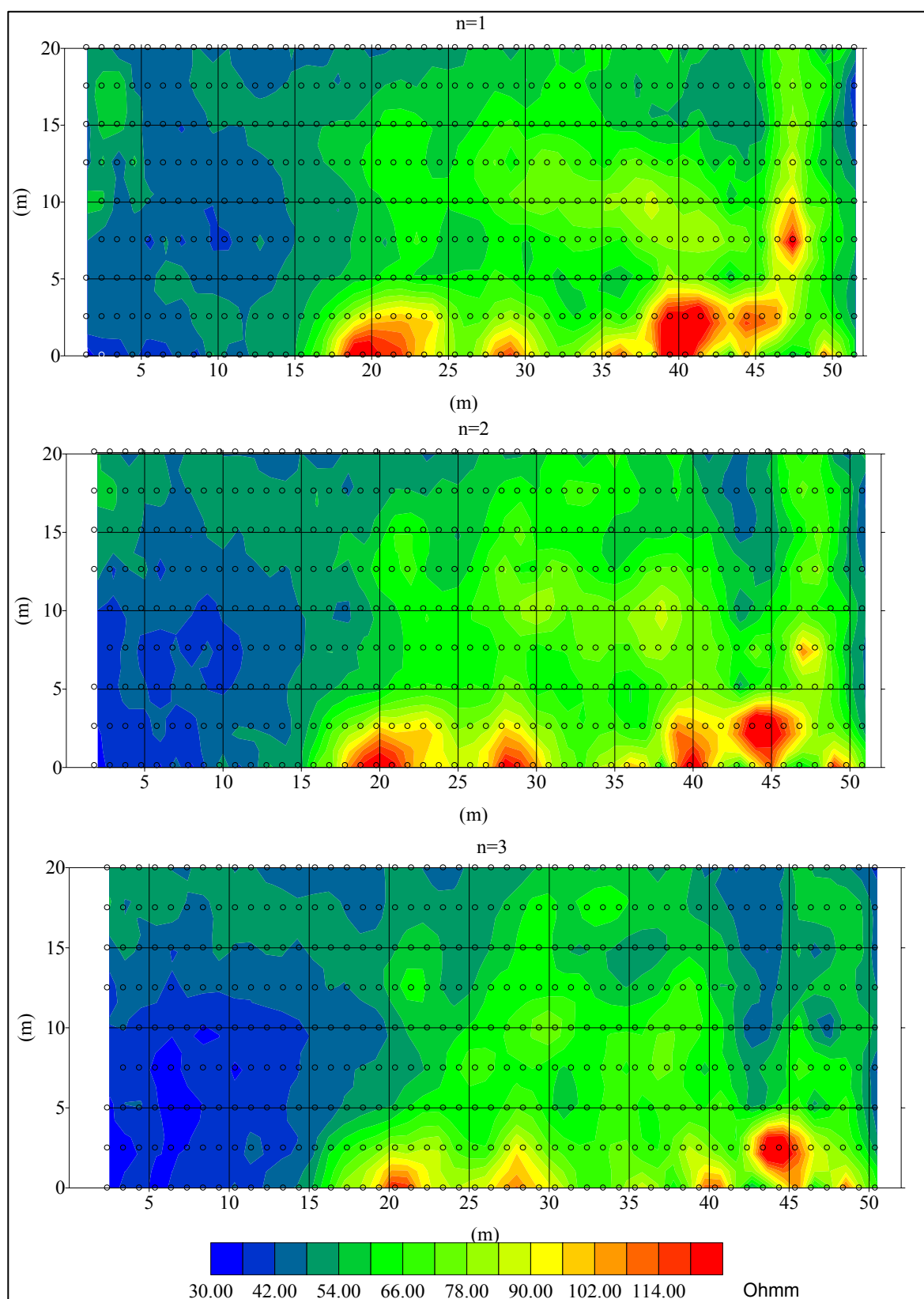
mélység szinten végeztem. A nyers mérési adatok mélység szintenként a 4.14 ábrán láthatók.

A területen korábban is folytak geoelektromos kutatások, melynek adatait SÖRÉS (1985) dolgozta fel keresztkorrelációs alakszűréssel. A 7 pontos korrelációs szűrő koeficienseit 2. fejezetben ismertetett analitikus képletek alapján számolta.

A mérési adataink feldolgozását a felszínközeli inhomogenitások eltávolításával kezdtem, melyet a SÖRÉS (1985) által sikerrel alkalmazott, 3 pontos konvolúciós szűrővel végeztem el. Ezek után hajtottam végre mindegyik szelvényen a dekonvolúciót, ám a mélység szintek közti vertikális összegzés elvégzésének a mélység szintek alacsony száma miatt nem volt értelme (4.15 ábra). Bár jelen esetben nem üreg volt a kutatandó objektum, hatása közelíthető volt a 2. fejezetben bemutatott kétdimenziós modellel. A feladat megoldása során különös jelentőséget kapott a horizontális összegzés, hiszen ennek segítségével a feldolgozás elején nem kellett a priori feltételeznünk a szelvényenkénti hatószámot, a módszer minden egyes hatónak kijelölte a pontos helyét. Az eredményül kapott szelvényeket mélység szintenként ábrázolva megfigyelhető, hogy a terület jobb szélén lévő hosszanti maximumok a mélység növekedtével ellaposodnak, ugyanakkor a szelvény középső-alsó szakaszán újabb, a legfelső szintre még nem jellemző hatók jelennek meg.

A kutatási területen földradar méréseket is végeztük, melynek eredményei egybevágtak a geoelektromos mérés feldolgozása után kapott eredményekkel, és ezek alapján az ásatások további irányára határozott javaslatot tudtunk tenni.

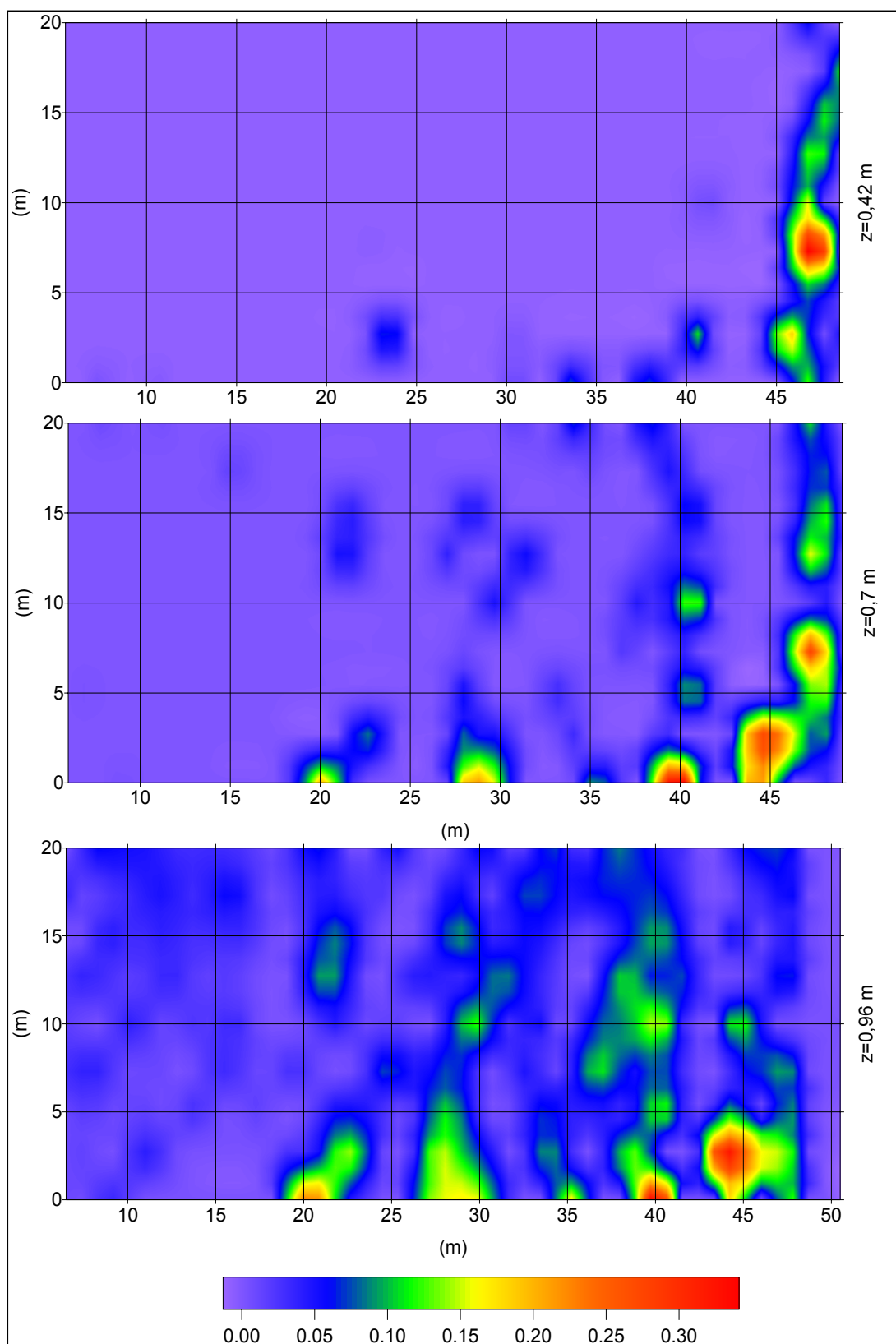
4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés



4.14. ábra

Mérési adatok mélységszeletei. A nullkörök a mérési pontokat jelölik.

4. Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrés



4.15. ábra

Dekonvolúciós szűrés eredménye mélység szintenként, vertikális összegzés nélkül

5. Analitikus modellezésen alapuló inverzió

5.1 Geofizikai adatfeldolgozás inverzióval

Geofizikai mérési adatok inverziós feldolgozása során célunk, hogy a bemenő adatsorból egy kutatni kívánt geológiai szerkezet bizonyos paramétereit megfelelően becsülni tudjuk. Az eljáráshoz elengedhetetlen a modellparaméterek kezdeti becslésének megadása, ami általában a priori ismeretek alapján történik. Kivételt jelentenek azok az eljárások, melyek kiinduló modellnek a homogén félteret veszik (pl.: LOKE ÉS BARKER (1996)).

MENKE (1984) többféle inverziós eljárás matematikai alapjait ismertette. Ezek közül több is sikerrel alkalmazható a geofizikai gyakorlatban, köztük linearizált feladatok esetén a csillapított legkisebb négyzetes megoldás. Ennek lényege, hogy a mért adatok és a kiindulási (start) modell paramétereivel elvégzett direkt feladat megoldásával kapott válaszfüggvény eltérését L_2 norma alapján minimalizáljuk. A minimalizálás tárgyát képező hibavektor:

$$\underline{\bar{e}} = \underline{\bar{y}} - \underline{G} \underline{\bar{x}} \quad (5.1)$$

ahol: $\underline{\bar{x}}$: modellparaméterek eltérésvektora
 $\underline{\bar{y}}$: mérési adatok és a válaszfüggvény eltérésvektora
 $\underline{G}$: deriváltak együttható mátrixa

A minimalizálás elvégzéseként egy lineáris egyenletrendszert kapunk, melynek, Marquard-Levenberg megoldása eredményezi a modellparaméterek kezdeti becslésének korrekció vektorát:

$$\underline{\bar{x}} = \left(\underline{G}^T \underline{G} + \lambda \underline{I} \right)^{-1} \underline{G}^T \underline{\bar{y}} \quad (5.2)$$

ahol: $\underline{I}$: egységmátrix
 λ : csillapítási tényező

5.2 Üregkutatási célú mérési adatok inverziós feldolgozása

A mérési adatok inverziójához a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékén kidolgozott (DOBRÓKA és társai (1991.)), szeizmikus és geoelektromos adatok feldolgozására sikerrel alkalmazott algoritmust vettem alapul. Az eljárás szerint a modellparaméterek nem lineáris válaszfüggvényének linearizálása Taylor-sorfejtéssel történik, melynek során elhanyagoljuk a másod- és annál magasabb rendű tagokat. Emiatt a paraméterek elég jó előzetes ismerete szükséges. Az inverzió eredménye egy olyan paramétereloszlás, melyre a számított direkt feladat és a mért adatok közötti eltérés a legkisebb. A kapott eredmények értékét növeli, hogy az eredeti algoritmusban DOBRÓKA és társai (1991) alkalmazták a SALÁT és társai (1982) által javasolt minőségellenőrzést, amely megbízhatóság szempontjából minősíti a modellparamétereket, valamint az adattér- és modelltérbeli eltérés alapján az inverziót. Az eljárás részletezése és alkalmazhatósága a geoelektromos üregkutatásban szakirodalmából megismerhető (NYÁRI, 1994., NYÁRI 1995.).

Az algoritmust az alábbiak szerint továbbfejlesztettem üregkutatási célú geoelektromos adatok feldolgozásához NYÁRI (2000.) alapján:

1. A keresett modell $\bar{P}$ paramétervektorát a 2. fejezetben bemutatott 2D-s modellnek megfelelően vettem fel úgy, hogy az az üregek számától függetlenül alkalmazható legyen (felső index: üreg sorszáma):

$$\bar{P}=(\rho_1^1, \rho_2^1, H^1, R^1, X^1, \dots, \rho_2^i, H^i, R^i, X^i, \dots) \quad (5.3)$$

Fontos azonban megjegyezni, hogy a modellhez tartozó üregszám paraméter az inverzió során nem változtatható, így ahhoz, hogy az eljárás konvergens legyen, ezt az értéket pontosan kell ismerni a startmodell felállításakor. Amennyiben a priori módon nem ismerjük a hatók számát, akkor ez a paraméter pl. a 4. fejezetben ismertetett dekonvolúciós eljárással becsülhető meg.

2. Figyelembe véve, hogy napjainkban a felszínközeli geoelektromos méréseket leggyakrabban több behatolási mélységet adó elrendezéssel végzik, a

5. Analitikus modellezés alapuló inverzió

mérési adatok vektorát ($\bar{Y}_s^{mért}$, s mérési elrendezésre) a pszeudo szelvény összes adatával töltöm fel:

$$\bar{Y}_s^{mért} = (\rho_a^1)_{n=1}, (\rho_a^2)_{n=1}, \dots, (\rho_a^{m_1})_{n=1}, (\rho_a^1)_{n=2}, (\rho_a^2)_{n=2}, \dots, (\rho_a^{m_2})_{n=2}, \dots \quad (5.4)$$

ahol: n: mélység szint sorszáma

m_i : i-dik mélység szinten mért adatok száma

A kiértékelés ezáltal nem görbénként zajlik, tehát lényegében az azonos mérési elrendezésekhez tartozó mérési adatok összességére egy együttes inverziót valósítottam meg. Ezzel a módosítással nagymértékben növeltem a megoldandó probléma túlhatározottságát, ami az L_2 norma minimalizálásán alapuló inverziós eljárás pontosságának kedvez.

3. Az előremodellezést a 2. fejezetben ismertetett analitikus eljárással végeztem.

4. Összetett földtani környezetben mért adatok feldolgozásához a 2.3 fejezetben ismertetett jelkemerő eljárást építettem a programba. Az alakszűrést úgy végeztem, hogy az előremodellezési eljárás során analitikusan számolt válaszfüggvénnyel minden egyes iterációs lépésben kiszámítottam a mérési adatok keresztkorrelációs ($R_k(\xi)$) és a válaszfüggvény autokorrelációs függvényét ($R_a(\bar{P}, \xi)$). A korrelációs függvények s mérési elrendezés estén:

$$R_k(\xi) = \frac{1}{x} \int_{x_0}^{x_1} \rho_a(x) Y(\bar{P}, x + \xi) d\xi = \bar{Y}_s^{mért} \star \bar{Y}(\bar{P}, s)^{szám} \quad (5.6)$$

$$R_a(\bar{P}, \xi) = \frac{1}{x} \int_{x_0}^{x_1} Y(P, x) Y(P, x + \xi) dx = \bar{Y}(\bar{P}, s)^{szám} \star \bar{Y}(\bar{P}, s)^{szám} \quad (5.7)$$

ahol $\bar{Y}(\bar{P}, s)^{szám}$: s mérési paraméterekkel $\bar{P}$ paraméterű modell

válaszfüggvénye a direkt feladat megoldása után

Az eljárás folytatásakor már ezen két korrelációs függvény eltérését minimalizáltam az alábbi módosított hibavektorral:

$$\bar{e}_R = \bar{y}_R - \underline{\underline{G_R}} \bar{x} \quad (5.8)$$

ahol: $\bar{y}_R$: R_k és R_a függvények eltérésvektora

$\underline{G}_R$: R_a függvényből számított deriváltak együttható mátrixa

Mivel a modellparaméterek nem függvényei az x mérési helyparaméternek, $R_a(\bar{P}, \xi)$ függvényből az inverzióban szereplő $\underline{G}_R$ derivált mátrix ugyan úgy származtatható, mint $Y(\bar{P}, x)$ -ből $\underline{G}$. Így ugyan azon P modellparaméterektől függ $R_a(\bar{P}, \xi)$, mint ρ_c függvény, tehát R_a szerinti inverzió ugyan azokat a modellparamétereket eredményezi, mint $Y(\bar{P}, x)$ alapján végzett eljárás.

5.3 Az inverzió minősítése

A mérési adatok feldolgozását a kapott eredmények minősítése teszi teljessé, melynek segítségével információt nyerhetünk az inverzióval kapott becsléseink megbízhatóságáról és pontosságáról. DOBRÓKA és társai (1991) minőségellenőrzött inverziójából kiindulva vettem át az adatfeldolgozási eljárás minősítő paramétereit.

Az eljárás egészét az illesztési hibával, vagyis a mérési adatok és a becsült modellparaméterekkel számított válaszfüggvény adattérbeli eltéréseivel jellemeztem, melyet a HERING és társai (1995) által alkalmazott relatív távolsággal számszerűsítettem:

$$D = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{Y_i^{\text{mért}} - Y_i^{\text{szám}}}{Y_i^{\text{szám}}} \right)^2}$$

ahol: M : összes adatszám

Teszt adatsorok esetén, amikor egzakt módon ismertek a keresett modell paraméterei, az inverzió pontosságát az eredményül kapott és az egzakt modell modelltérbeli távolságával jellemezhetjük:

$$d = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \left(\frac{P_i^{\text{egzakt}} - P_i^{\text{szám}}}{P_i^{\text{szám}}} \right)^2}$$

ahol: L : modellparaméterek száma

Az egyes modellparaméterek minősítésére bevezettem a bizonytalanság mennyiséget, amely százalékban adja meg a becsült értéktől megengedett eltérését. A bizonytalanság a kovariancia mátrix főátlójának mennyiségeiből vont négyzetgyökből (variancia) származtatható. A kovariancia mátrix elemei SALÁT és társai (1982) szerint Marquard-Levenberg algoritmust alkalmazó inverzió esetén az alábbiak szerint számíthatók:

$$\underline{\text{cov}} = \sigma^2 (\underline{G} \underline{G}^T)^{-1}$$

ahol σ : variancia

Az egyes paraméterek közti függőséget lineáris esetben a korrelációs mátrix elemei jellemzik, melyek kiszámítása a kovariancia mátrixból történik:

$$\text{corr}_{ij} = \frac{\text{cov}_{ij}}{\sqrt{\text{cov}_{ii} \text{cov}_{jj}}}$$

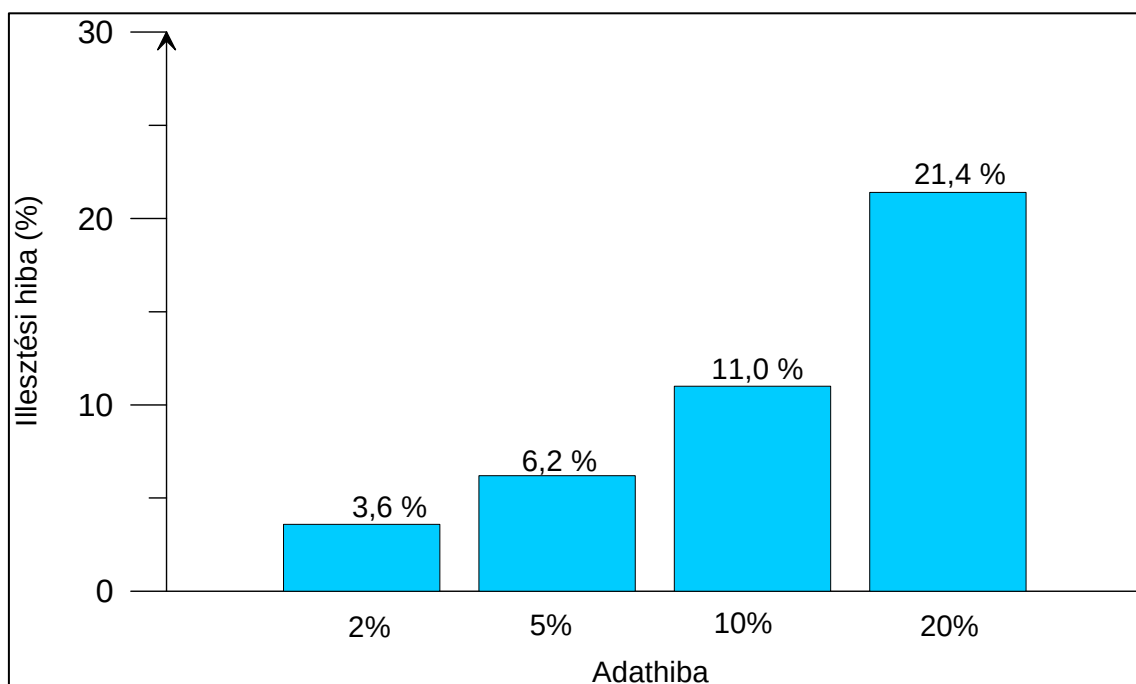
5.4 Inverzió tesztelése

A kidolgozott inverziós eljárás tesztelése arra irányult, hogy megismerjük annak pontossági, megbízhatósági jellemzőit. A 3. fejezetben ismertetett paraméter érzékenységi vizsgálatok eredményei alapján a tesztelést már csak azon két elektróda elrendezésre végeztem, melyek leginkább ajánlhatók geoelektromos üregkutatás céljára: a rendkívül jó horizontális felbontó képességgel jellemezhető dipól-dipól konfiguráció, és a jel/zaj viszony szempontjából kedvezőbbnek tekinthető Wenner elrendezések közül a legnagyobb anomália hatást produkáló alfa módosulat.

A paraméter érzékenységi vizsgálatok azt is kimutatták, hogy a mérési adatok szinte egyáltalán nem érzékenyek az üreg ellenállásának megváltozására, így ennek a paraméternek az inverzióval történő meghatározási pontossága nem képezte a vizsgálat tárgyát.

A teszteléshez az adatrendszereket analitikus modellszámításokkal állítottam elő, melyekhez különböző szórású Gauss-eloszlású hibákat adtam hozzá.

Első lépésként az inverziós algoritmus „jóságát” (illesztési hiba, relatív modelltávolság) vizsgáltam. A vizsgált adatrendszerekhez 2, 5, 10, 20 % szórású Gauss hibát adtam hozzá, és figyeltem a két távolság-paraméter változását. Azt tapasztaltam, hogy a modell paramétereitől függetlenül az illesztési hiba kissé eltér az adatrendszer hibájától (5.1 ábra). A relatív modelltávolság még a



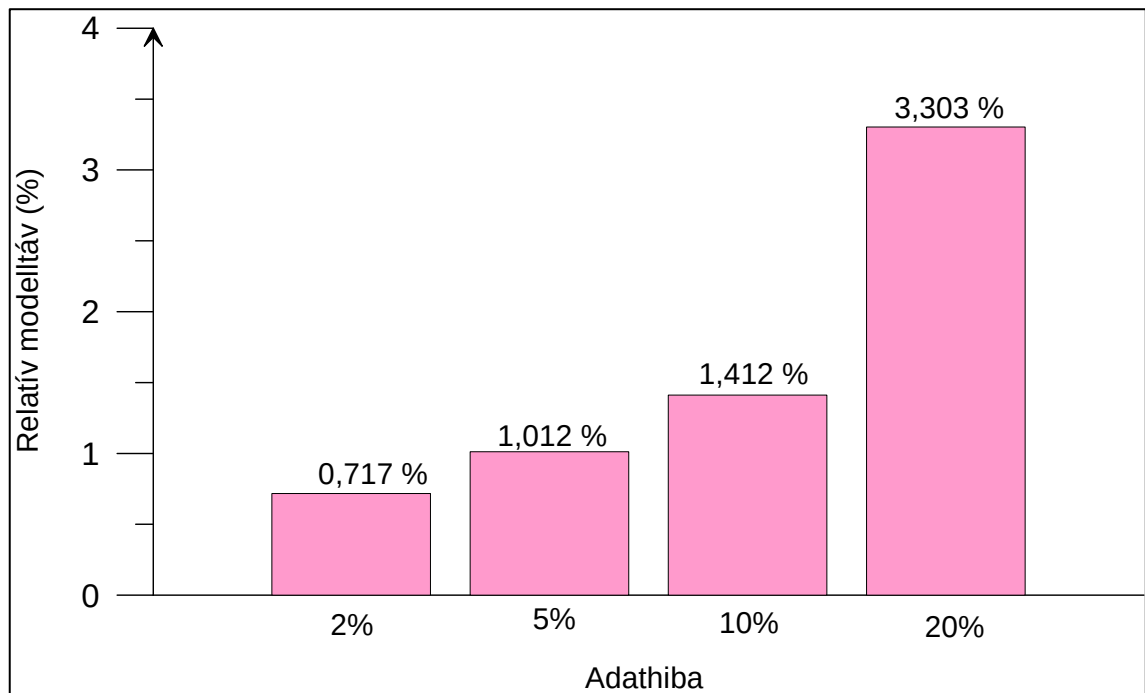
5.1 ábra

Illesztési hiba alakulása eltérő hibájú adatrendszereknél

kimagasló, 20%-os adathiba esetén is 4% alatt tudott maradni (5.2 ábra), vagyis a modelltávolság nem növekedett az adathibával arányosan. az eljárás nagyon pontosan adta vissza a keresett modellt. Az egyes paraméterek becslésének bizonytalansága az 5.3 ábrán látható. Legnagyobb megbízhatósággal a környezet ellenállása és az üreg helye becsülhető meg. A két geometriai paraméter (H, R) bizonytalansága az adatrendszer hibájának nagyságrendjében található, a sugáré mindig valamelyest nagyobb, mint a mélységé.

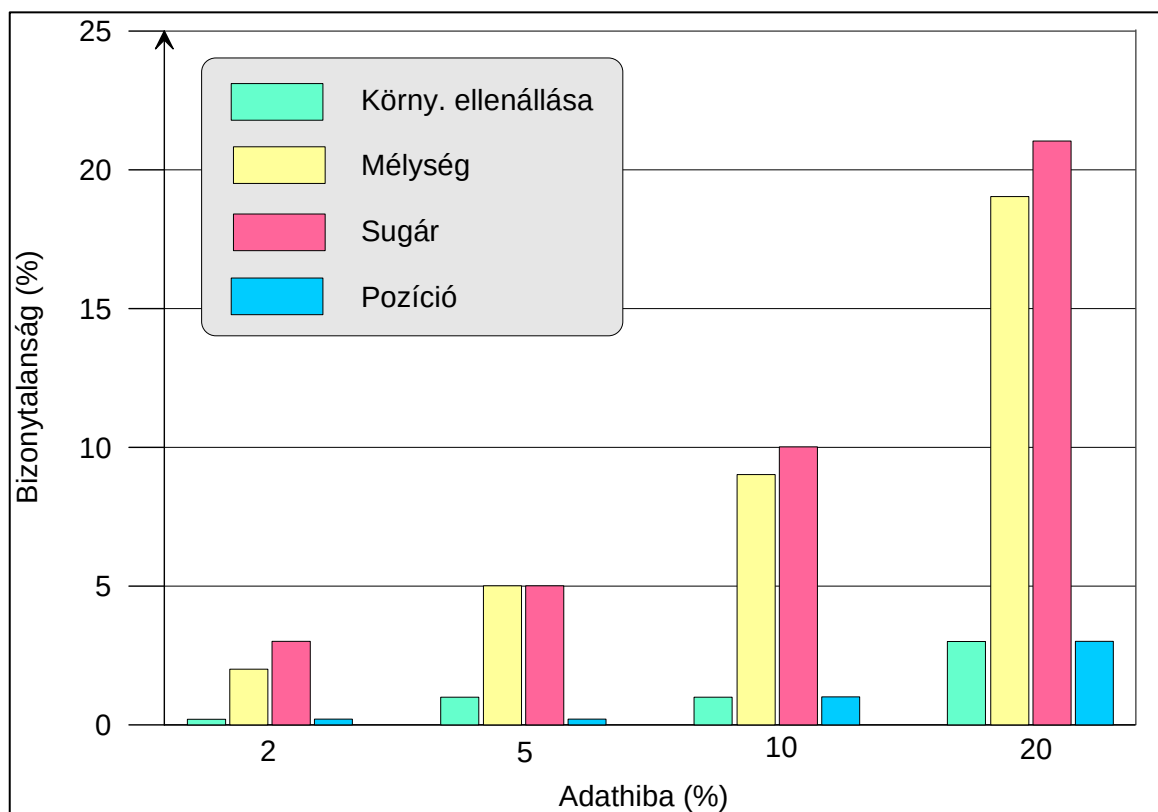
A következőkben azt hasonlítottam össze, hogy hogyan változik az egyes modellparaméterek bizonytalansága kis (2%) és nagy (5%) mértékű zajterhelés esetén eltérő elektródaconfigurációk alkalmazásakor. Az 5.1

5. Analitikus modellezésen alapuló inverzió



5.2 ábra

Relatív modelltávolság alakulása eltérő hibájú adatrendszereknél



5.3 ábra

Modellparaméterek becslési bizonytalanságának alakulása eltérő hibájú adatrendszereknél

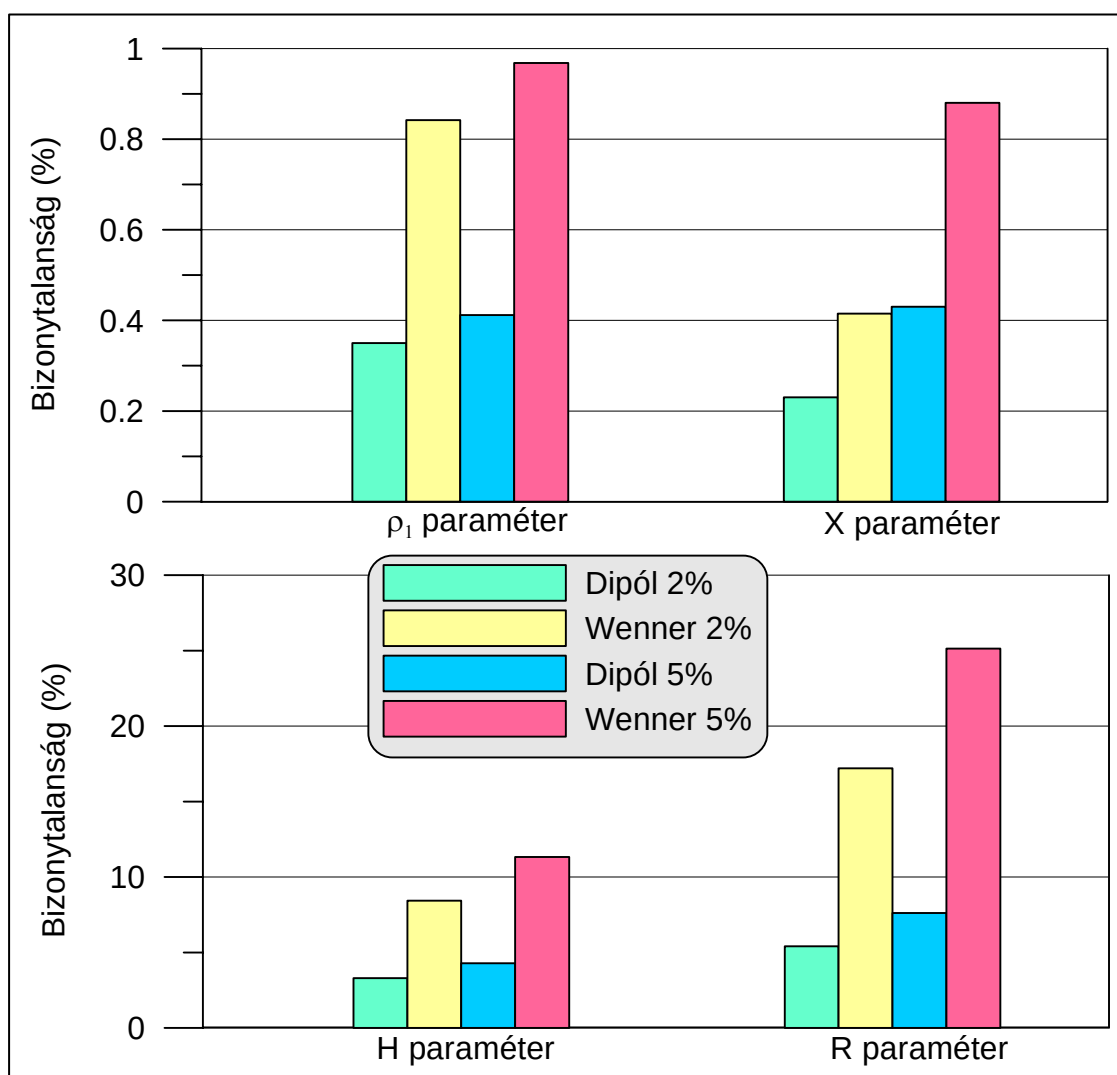
5. Analitikus modellezésen alapuló inverzió

táblázatban ismertetett M1 modellre számított adatrendszerek inverziója során kapott minősítő paraméterekből látszik, hogy a dipól-dipól elrendezés esetén a paraméterek megbízhatósága sokkal jobb, mint a Wenner elrendezés esetén (5.4

Paraméter	ρ_2/ρ_1	H_1 [m]	R_1 [m]	X_1 [m]	H_2 [m]	R_2 [m]	X_2 [m]
M1	100	3	2	16	-	-	-
M2	100	4	3	10	2	1,5	20
M3	100	4	3	12,5	2	1,5	18

5.1 táblázat

Inverzió teszteléséhez használt modellek paraméterei



5.4 ábra

M1 modell paramétereinek bizonytalansága az inverziós becslést követően

ábra). Az inverzió jóságára utaló két távolság-paraméter (illesztési hiba, relatív modell-távolság) tekintetében azonban a két elektródaelrendezés nem mutat számottevő mértékű eltérést. A vizsgált megbízhatósági paramétereket és relatív távolságot tartalmazó táblázat a D1 mellékletben található.

A következő vizsgálataim célja az volt, hogy megvizsgáljam az inverzió során a felbontóképesség alakulását az egyes elektróda elrendezések esetén. Két darab, két üreget tartalmazó modell (M2 és M3) paramétereit (5.1 táblázat) figyeltem meg kis és nagy szórású hibával terhelt adatrendszereknél. Mindkét modellenél két azonos H/R aránnyal jellemezhető, de eltérő méretű és mélységű hatónk volt, melyek távolsága modellenként más volt. A modellek inverzióval kapott minősítő paramétereit az 5.2 és 5.3 táblázat, látszólagos fajlagos ellenállás szelvényeit a D2 és D3 melléklet jeleníti meg. A modellparaméterek bizonytalanságaiból látható, hogy mindkét elektróda elrendezés esetén az üregek

Minősítő paraméter	Modell paraméter	M2 modell	Dipól elr., 2% hiba	Wenner elr., 2% hiba	Dipól elr., 5% hiba	Wenner elr., 5% hiba
Bizonytalanság [%]	ρ_1	10 Ωm	0.396	0.79	0.577	1.122
	H_1	4 m	5.198	12.97	7.625	19.58
	R_1	3 m	7.06	21.6	10.275	33.486
	X_1	10 m	0.421	1.11	0.62	1.708
	H_2	2 m	3.635	14.15	5.337	21.428
	R_2	1.5 m	6.279	27.95	9.319	44.455
	X_2	20 m	0.13	0.37	0.191	0.556
Illesztési hiba [%]			4.21	4.33	6.131	6.173
Rel. mod. táv [%]			1.978	1.731	0.955	1.213
Adatszám			177	147	177	147

5.2 táblázat
M2 modell és minősítő paramétereit

5. Analitikus modellezésen alapuló inverzió

helye a sekélyebben lévő hatónál adható meg kisebb bizonytalansággal. További érdekesség, hogy a méret és mélység paraméterek bizonytalansága a dipól-dipól elrendezésnél a sekélyebb, míg a Wennernél a mélyebb hatónál volt kisebb. Ez a tény a két elrendezéssel végzett szimultán inverziónál (6. fejezet) bírhat nagy jelentőséggel.

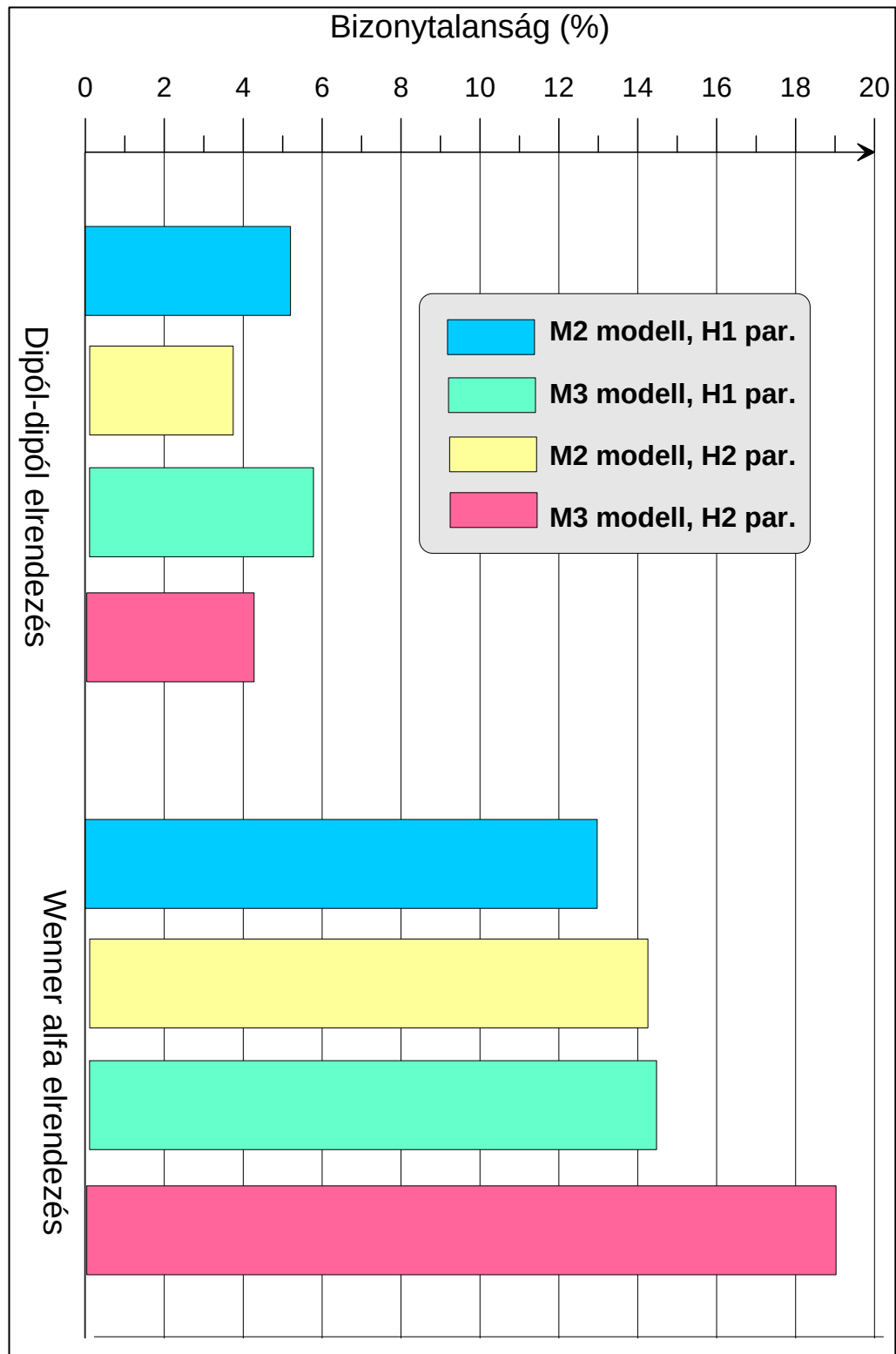
A két üreg középpontja közti távolság csökkenésekor (M3 modell) mindkét konfigurációnál a nagyobb üreg paramétereinek bizonytalansága csak kis mértékben, míg a kisebbik, felszínközeli hatóé erőteljesen megnőtt (5.5 ábra).

Minősítő paraméter	Modell paraméter	M3 modell	Dipól elr., 2% hiba	Wenner elr., 2% hiba	Dipól elr., 5% hiba	Wenner elr., 5% hiba
Bizonytalanság [%]	ρ_1	10 Ωm	0.381	0.668	0.551	0.944
	H_1	4 m	5.675	14.437	8.314	20.88
	R_1	3 m	7.616	23.452	10.882	64.03
	X_1	12.5 m	0.404	1.208	0.598	1.816
	H_2	2 m	4.24	18.999	6.346	30.831
	R_2	1.5 m	7.156	35.743	10.816	61.233
	X_2	18 m	0.163	0.526	0.244	0.761
Illesztési hiba [%]			4.212	4.289	6.054	6.093
Rel. mod. táv [%]			0.588	1.768	2.548	6.882
Adatszám			177	147	177	147

5.3 táblázat

M3 modell és minősítő paramétere

A korrelációs együtthatók megfigyelésével a modellparaméterek egymáshoz viszonyított függéséről, vagyis az ekvivalencia jelenségéről kaphatunk információt. Az M1 modell inverziójának korrelációs mátrixából (5.4 táblázat) látható, hogy a ható geometriájára jellemző két paraméter (H , R) nagyon erősen függ egymástól és a ható fajlagos ellenállásától, tehát itt kell leginkább



5.5 ábra

Mélység paraméterek bizonytalanságának alakulása M2 és M3 modelleknél dipól-dipól és Wenner alfa elektróda elrendezések esetén

ekvivalenciától tartani. Az üreg helyzete a többi paramétertől szinte függetlenül határozható meg. A Wenner elrendezés alkalmazásakor észrevehetően megnő az összes paraméter közti korreláció abszolút értéke. A kétüreges modellek korrelációs mátrixa a D2 és D3 mellékletben található. A két ható paraméterei egymástól igen csekély mértékben függenek, bár ez a függőség jelentősen megnő a hatók közeledésével. Minden paraméter tekintetében észrevehető, hogy a dipól elrendezés esetén határozottan kisebb a korrelációs együtthatók abszolút értéke, mint Wenner elrendezésnél. A két elrendezés közti eltérés a kis abszolút értékű tagoknál több nagyságrendet is elér. A hatók közeledtével az elektróda elrendezések okozta eltérés mértéke csökken. Mindkét modell és mérési konfiguráció esetén egyértelműen nagyobbak a korrelációs értékek a nagyobb méretű ható paraméterei között.

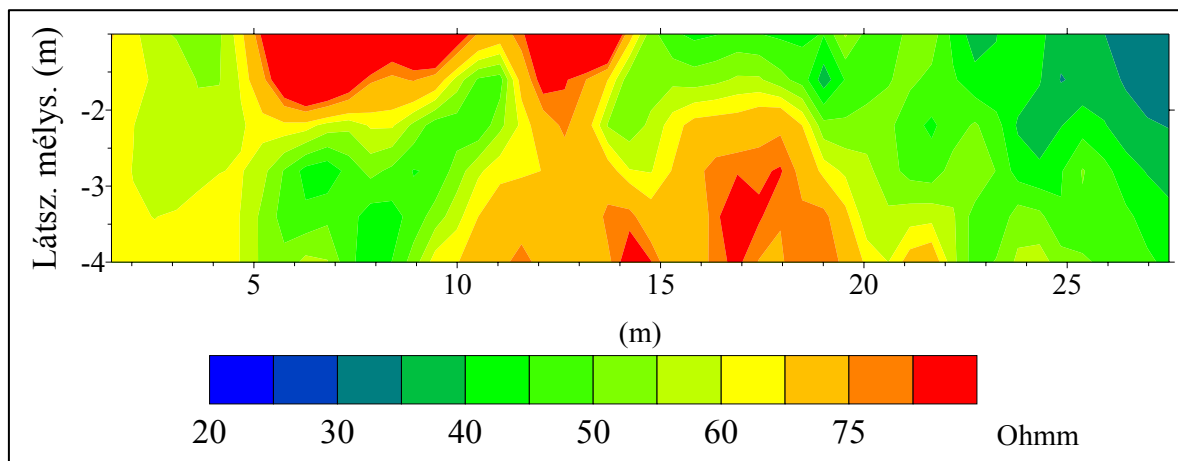
Dipól	ρ_1	ρ_2	H	R	X
ρ_1	1	0,1152	-0,025	-0,099	-0,014
ρ_2	0,1152	1	-0,778	-0,915	0,0535
H	-0,025	-0,778	1	0,9569	-0,059
R	-0,099	-0,915	0,9569	1	-0,057
X	-0,014	0,0535	-0,059	-0,057	1
Wenner	ρ_1	ρ_2	H	R	X
ρ_1	1	0,3691	-0,531	-0,469	0,06
ρ_2	0,3691	1	-0,928	-0,987	0,199
H	-0,531	-0,928	1	0,9717	-0,26
R	-0,469	-0,987	0,9717	1	-0,21
X	0,060	0,199	-0,26	-0,21	1

5.4 táblázat

M1 modell korrelációs együtthatói az inverzió elvégzése után

5.5 Terepi adatok feldolgozása inverzióval

A Budapesti Kongresszusi Központ parkjában mért 30 m hosszúságú dipól-dipól szelvényen a szelvény közepén, 3 m mélységben üregszerű anomáliát találtunk (5.6 ábra). Elvégezve az inverziós feldolgozást, nagy biztonsággal kijelölhető volt az üreg helye, mélysége és sugara pedig 15-



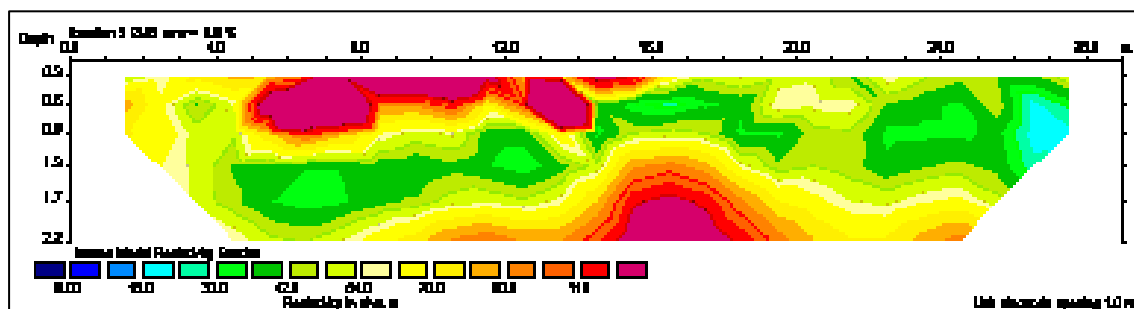
5.6 ábra

Látszólagos fajlagos ellenállás szelvény. Egységnyi elektróda távolság: 1 m

Paraméter	ρ_1	H	R	X
Modell	60 Ωm	3,97 m	1,68 m	17,1 m
Bizonytalanság	4%	15,7%	22,7%	1,9%

5.5 táblázat

Az 5.6 ábrán látható szelvény inverziós feldolgozásának eredményei



5.7 ábra

Az 5.6 ábrán látható mérési szelvény feldolgozása FD inverzióval

20%-os pontossággal vált meghatározhatóvá (5.5 táblázat). A szelvényen végzett FD inverzió (5.7 ábra) alapján kijelenthető, hogy valóban lokális hatóval van dolgunk, melynek pozíciója megegyezett az inverzió során kapott eredménnyel. A ható méretének megadásához és pontos lehatárolásához azonban mindenképpen szükséges volt egy olyan feldolgozási eljárás elvégzése, mellyel ezek az értékek konkrétan megadhatók. Nem utolsó sorban fontos érv az általam kidolgozott eljárás mellett, hogy annak eredményeit megbízhatóság szempontjából minősítettem is.

6. Analitikus modellezésen alapuló szimultán inverzió

Szimultán inverzió alkalmazása során egyazon mérési módszer különböző mérési paraméterekkel mért adatsorait visszük egy feldolgozási eljárásba. Az egyedi inverzióhoz képest így javulást várunk a paraméterbecslések pontosságának mértékében. Egyenáramú méréseknél GYULAI ÉS ORMOS (1996) sikerrel alkalmaztak analitikus modellezésen alapuló szimultán inverziót dőlt réteges szerkezetek kimutatására. A szimultán inverzió létjogosultságát a geoelektromos üregkutatásban GYULAI (1998) munkája is igazolta. FD modellek vizsgálatával kimutatta, hogy az üregek geometriai paramétereire (szélesség, hosszúság, mélység) a különböző elektróda elrendezések eltérő mértékben érzékenyek. Így két megfelelően választott elrendezéssel mért adatrendszer feldolgozása egy inverziós eljárásban ezen paraméterek pontosabb meghatározását teszi lehetővé. További érv a szimultán inverzió alkalmazása mellett az, hogy az üregkutatásra leginkább megfelelő szimmetrikus, négyelektródás elrendezés a dipól-dipól, aminek azonban a vonatkoztatási mélység növelésével gyorsan romlik a jel/zaj viszonya. Nagyobb mélységskála kutatásához alkalmazható a Wenner elrendezés, ám ezzel jelentősen romlik a horizontális felbontóképesség, és csökken az anomália jelerőssége. A két elrendezés mérési adatainak szimultán feldolgozásával azonban lehetőség nyílik mindkettő előnyeinek egyidejű kihasználására, ezáltal a modellparaméterek pontosabb becslésére.

Az általam kifejlesztett szimultán inverziós eljáráshoz (NYÁRI, 2000) a DOBRÓKA és társai (1991) által kidolgozott együttes inverziós algoritmust vettem alapul azzal a különbséggel, hogy ugyanazon mérési vonal mentén nem két eltérő geofizikai módszer, hanem különböző paraméterekkel jellemezhető, azonos módszerrel, de egymástól függetlenül végzett mérések adatai alkották a feldolgozandó adatrendszert. A kiindulási modell paraméter vektorát (5.1) kifejezésnek megfelelően vettem fel. Lényegi különbség az egyedi inverzióhoz

képest a mért adatok ($\bar{Y}_s^{mért}$) és az előremodellezés során előállított válaszfüggvény $\bar{Y}(\bar{P}, s)^{szám}$ definiálásában van:

$$\bar{Y}_s^{mért} = \begin{cases} \bar{Y}_{s_1}^{mért} & 1 \leq i \leq M_1 \\ \bar{Y}_{s_2}^{mért} & M_1 + 1 \leq i \leq M_2 \end{cases}$$

ahol: $\bar{Y}_{s_i}^{mért}$: s_i mérési elrendezéssel mért pszeudo szelvény M_i

darab adata (5.3) kifejezés szerint

$$\bar{Y}(\bar{P}, s)^{szám} = \begin{cases} \bar{Y}(\bar{P}, s_1)^{szám} & 1 \leq i \leq M_1 \\ \bar{Y}(\bar{P}, s_2)^{szám} & M_1 + 1 \leq i \leq M_2 \end{cases}$$

ahol: $\bar{Y}(\bar{P}, s_i)^{szám}$: s_i mérési és $\bar{P}$ modellparaméterekkel

analitikusan előállított válaszfüggvény

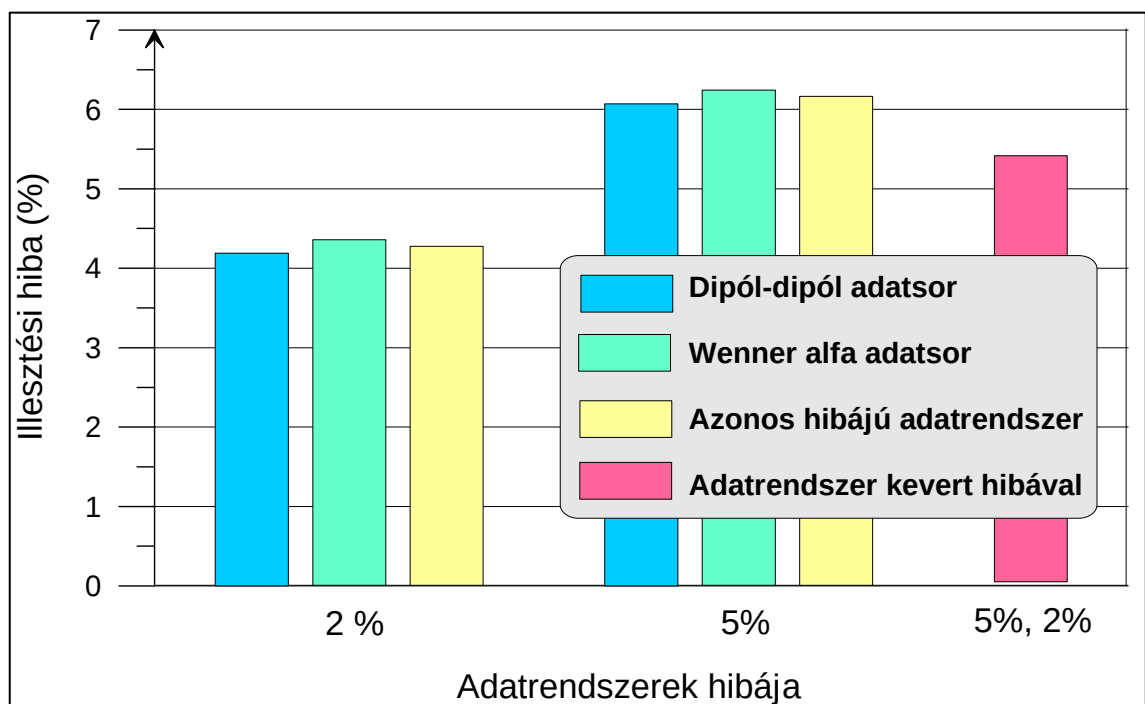
A továbbiakban a hibavektor felállítása, a minimalizálás elvégzése és az egyenletrendszer megoldása (5.1) illetve (5.2) képletnek megfelelően történik. Szükség esetén szimultán inverzióhoz is alkalmazható korrelációs jelkiemelés, amikor a hibavektor felállítása (5.8) kifejezés szerint történik. Az inverzió minőségellenőrzése az 5.3 fejezetben ismertetett minősítő paraméterek segítségével történik.

6.1 A szimultán inverzió tesztelése

A szimultán inverziós eljárás teszteléséhez az 5. fejezet 5.1, 5.2 és 5.3 táblázataiban bemutatott paraméterekkel jellemezhető M1, M2 és M3 modelleket alkalmaztam. Az inverziót szintén az előző fejezetben ismertetett paraméterek segítségével minősítettem. Az alacsony (2%) és magas (5%) Gauss hibával terhelt adatrendszerek mellett egy olyan esetet is vizsgáltam, mely a terepi lehetőségekhez próbált igazodni: a dipól-dipól mérési adatokhoz nagyobb (5%)

hibát generáltam, mint a Wenner adatokhoz (2%), így egy kevert hibájú adatrendszert hoztam létre.

Az inverzió egészét minősítő paraméterek (illeszkedés, modelltavolság) vizsgálatához az M1 modellre számított adatrendszereket alkalmaztam. A 6.1 ábrán az illesztési hiba alakulása figyelhető meg. Látható, hogy ennek tekintetében minden esetben csekély mértékű javulást hozott a szimultán inverzió. A relatív modelltavolságok vizsgálatakor is (6.2 ábra) hasonlóan kis mértékű javulás figyelhető meg a szimultán inverzió hatására.

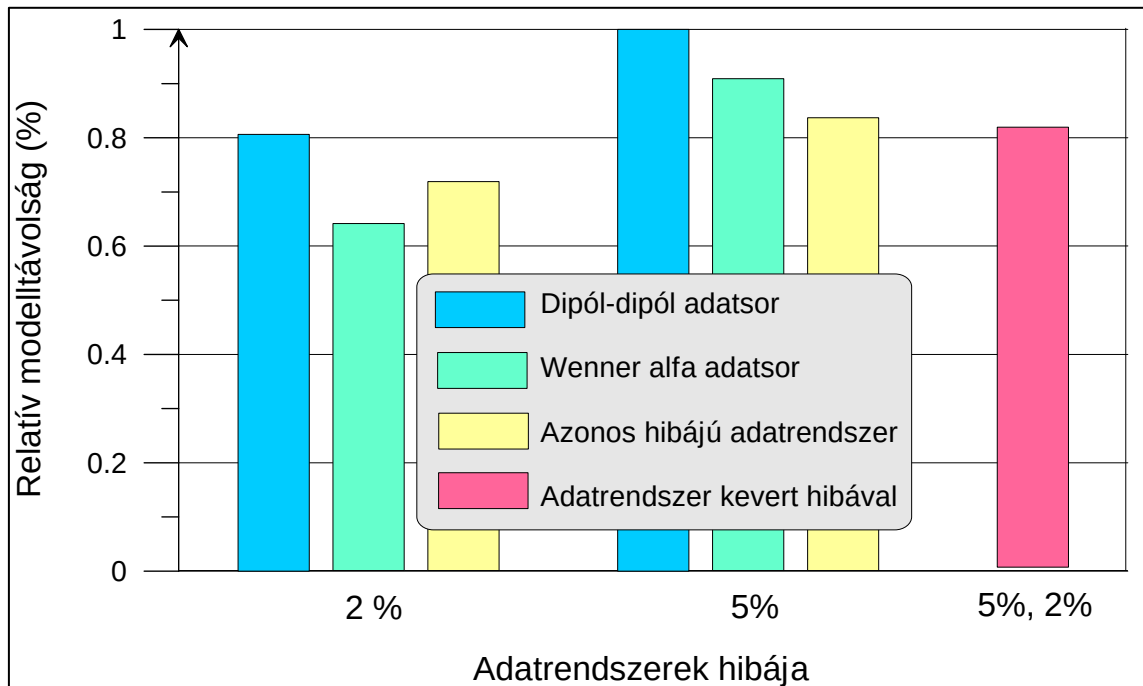


6.1 ábra

Különböző adatrendszerek szimultán inverziójakor az illesztési hiba alakulása M1 modellnél

A modellparaméterek becslésének bizonytalanságát először az egy üreget leíró M1 modellre vizsgáltam (E1 melléklet). Összehasonlítva az eredményeket az egyedi inverzió minősítő paramétereivel (D2 melléklet) látható, hogy szimultán inverzióval minden paraméter esetében csökkent a bizonytalanság. Legnagyobb mértékű javulást a H és R paraméterek esetén lehetett elérni. A 6.3 ábra a mélység paraméter becslésének bizonytalanságát mutatja a D2 és E1 mellékletekben közölt bizonytalansági értékek alapján. Megfigyelhető, hogy a

szimultán inverzió alkalmazása a Wenner méréseknél okozott rendkívüli mértékű javulást, de a paraméterek a dipól-dipól adatrendszereknél is egyértelműen javultak. A terepi körülményeket mintázó kevert adatrendszereknél kapott bizonytalanság pedig mindkét résztvevő adatsorral külön-külön elérhető értékek alá került.



6.2 ábra

Különböző adatrendszerek szimultán inverziójakor a relatív modelltávolság alakulása M1 modellnél

A korrelációs együtthatók (E1 melléklet) vizsgálatából az látható, hogy míg az ellenállás és helyparaméter szempontjából csak a Wenner adatrendszerhez képest volt javulás, addig a H és R paraméterek közötti függőséget mindkét elrendezés tekintetében sikerült csökkenteni.

Az egymáshoz közeledő, eltérő méretű, de azonos H/R arányú üregeket leíró M2 és M3 modellek becslésének bizonytalanságait a 6.1 és 6.2 táblázatok mutatják. Az M1 modellhez hasonlóan ezekben az esetekben is jelentős javulás látható a szimultán inverzió alkalmazásakor, mely javulás a geometriai paraméterek, ill. a Wenner elrendezés esetében a legnagyobb mértékű.

6. Analitikus modellezésen alapuló szimultán inverzió

Megfigyelhető, hogy az 5.5 ábrán szemléltetett jelenség, miszerint

Minősítő paraméter	Modell paraméter	2% adat-hiba	5% adat-hiba	Kevert hiba
Bizonytalanság [%]	ρ_1	0,342	0,495	0,433
	H_1	3,763	5,476	4,747
	R_1	5,464	7,977	6,872
	X_1	0,398	0,3586	0,507
	H_2	3,44	5,063	4,379
	R_2	6,023	9,033	7,724
	X_2	0,12	0,182	0,157

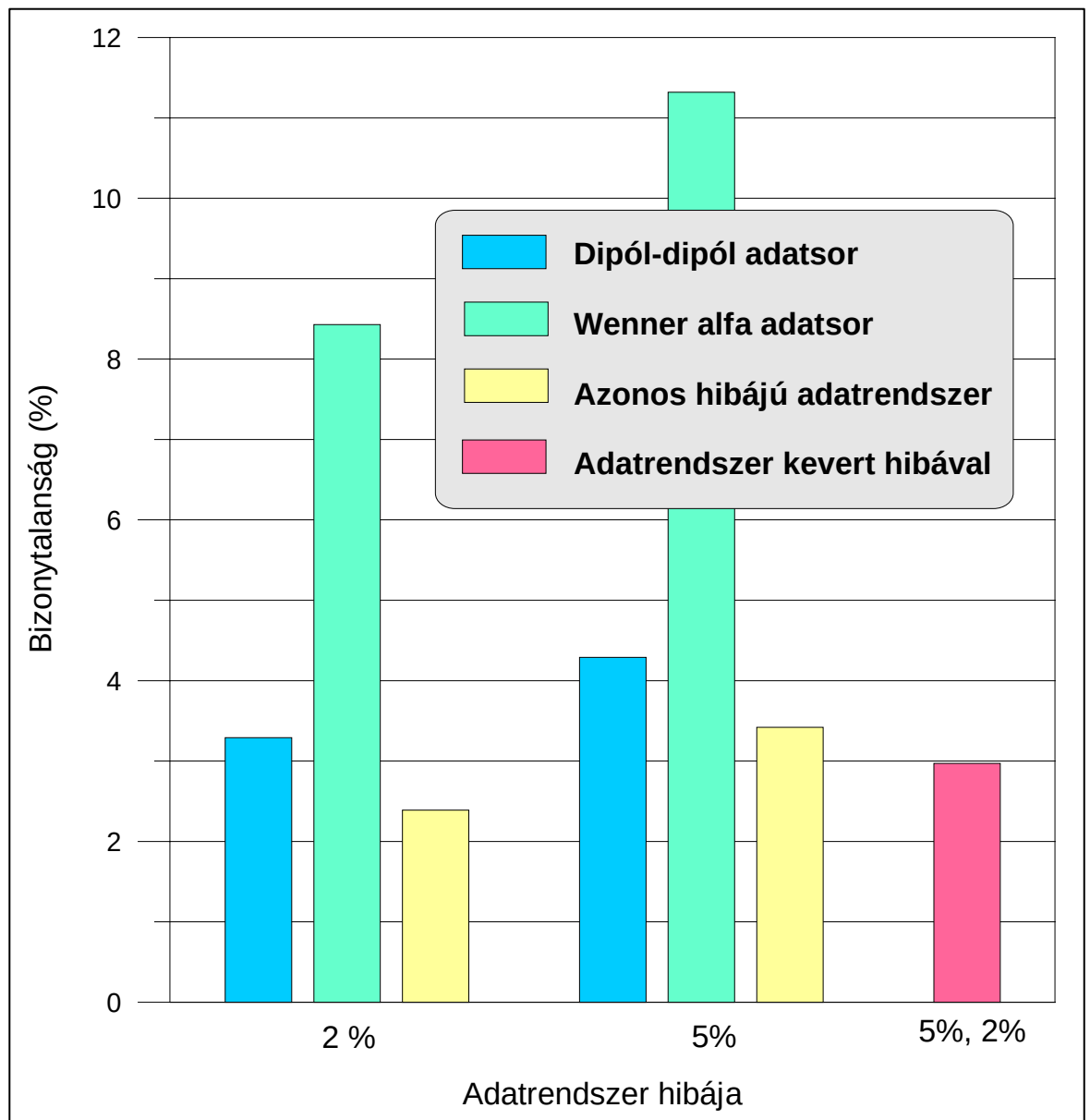
6.1 táblázat

M2 modell paramétereinek bizonytalansága különböző hibával terhelt adatrendszerek szimultán inverziójakor

Minősítő paraméter	Modell paraméter	2% adat-hiba	5% adat-hiba	Kevert hiba
Bizonytalanság [%]	ρ_1	0,315	0,451	0,395
	H_1	4,017	5,779	5,028
	R_1	5,794	8,298	7,194
	X_1	0,379	0,555	0,483
	H_2	4,114	6,13	5,314
	R_2	6,983	10,574	9,905
	X_2	0,156	0,233	0,202

6.2 táblázat

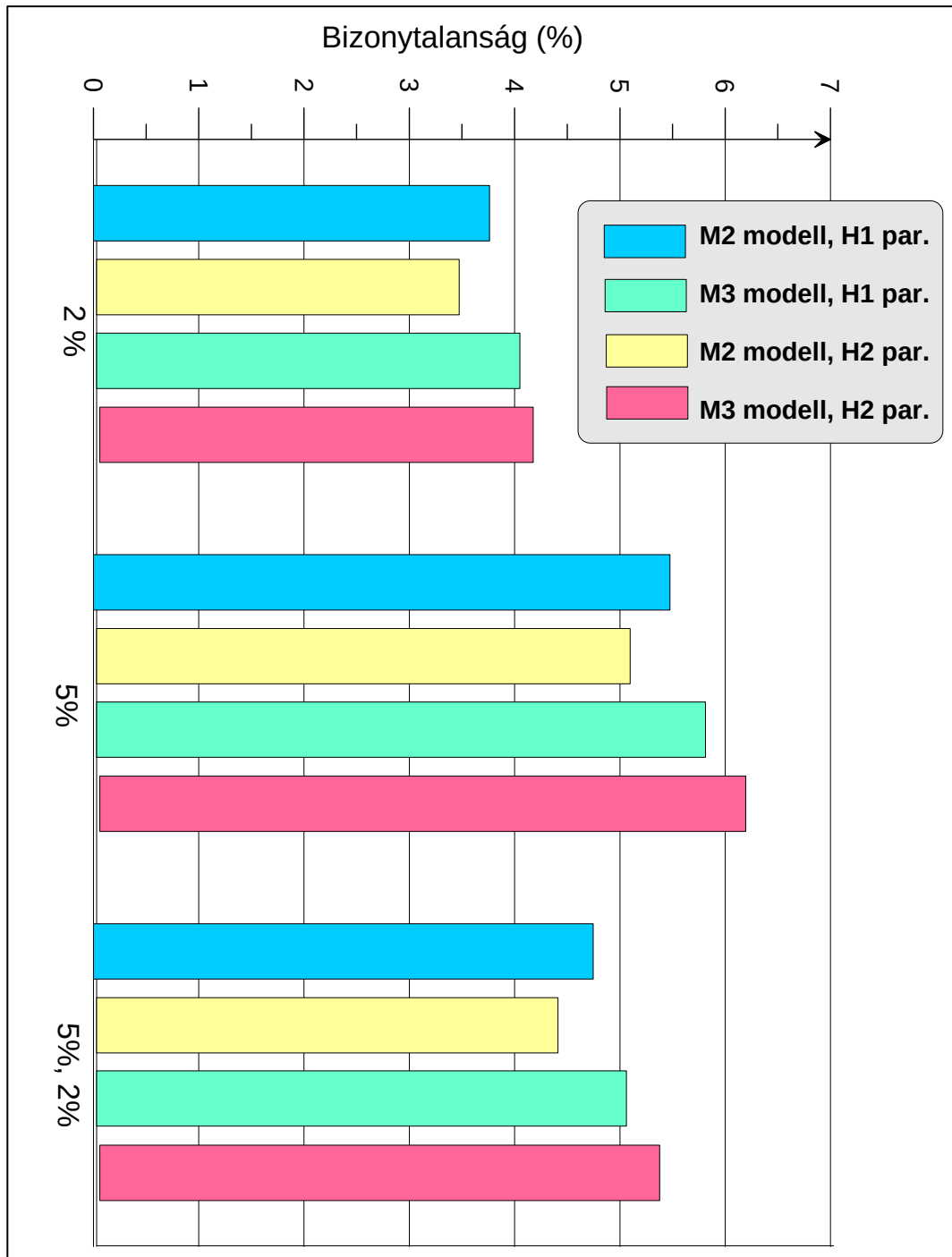
M3 modell paramétereinek bizonytalansága különböző hibával terhelt adatrendszerek szimultán inverziójakor



6.3 ábra

H paraméter bizonytalansága eltérő hibájú sima és szimultán inverziók elvégzése után

a közeledő üregeknél a bizonytalanság eltérő módon változik a sekélyebb és a mélyebb ható geometriai paramétereinél az egyes elektróda elrendezések alkalmazásakor. Szimultán inverziónál (6.4 ábra) ezek a hatások már nem jelennek meg karakterisztikusan, hiszen az eljárásba bevon két mérési elrendezés ellentétes hatásai kiegyenlítik egymást.



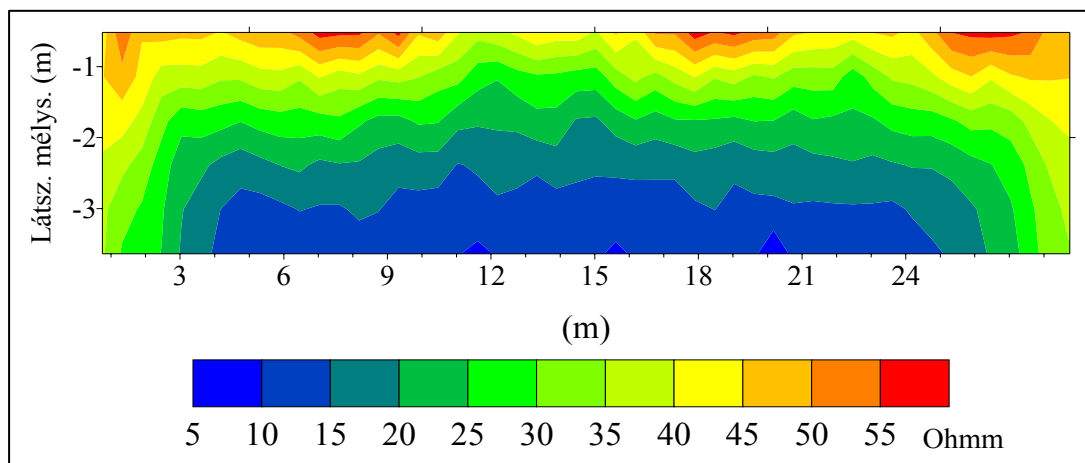
6.4 ábra

M2 és M3 modell mélységparamétereinek bizonytalansága különböző hibájú adatrendszerek szimultán inverziója után

A korrelációs együtthatóknál (E1, E2 melléklet) nem tapasztalható olyan mértékű javulás, mint ami az egy üreget tartalmazó M1 modellre jellemző. A kettes számú, kisebbik ható geometriai paramétereinek egymáshoz viszonyított függését már nem is sikerült a dipól-dipóllal elért érték alá vinni. Mindezek ellenére a szimultán inverzió létjogosultsága vitathatatlan, hiszen az egyes paraméterek bizonytalanságának tekintetében mindkettő alkalmazott konfigurációval egyedi inverzió során elérhető eredményeket sikerült egyértelműen javítani.

6.2 Terepi adatok feldolgoása szimultán inverzióval

Először egy teszt területen végzett mérés feldolgozásához alkalmaztam a szimultán inverziót. A jól vezető ható kutatására irányuló mérést és a dipól-dipól elrendezéssel mért szelvényt a 4.4.1 fejezetben ismertettem. A területen ugyanazon terítéssel Wenner elrendezéssel is mértünk, melynek látszólagos fajlagos ellenállás szelvénye a 6.5 ábrán látható. A 6.3 táblázat mutatja a célmodellt, valamint a feldolgozás eredményeit mind a dipól- dipól szelvényre végzett egyedi, mind a két szelvényre végzett szimultán



6.5 ábra

Wenner elrendezéssel mért látszólagos fajlagos ellenállás szelvény. Egységnyi elektródatáv: 0,5 m

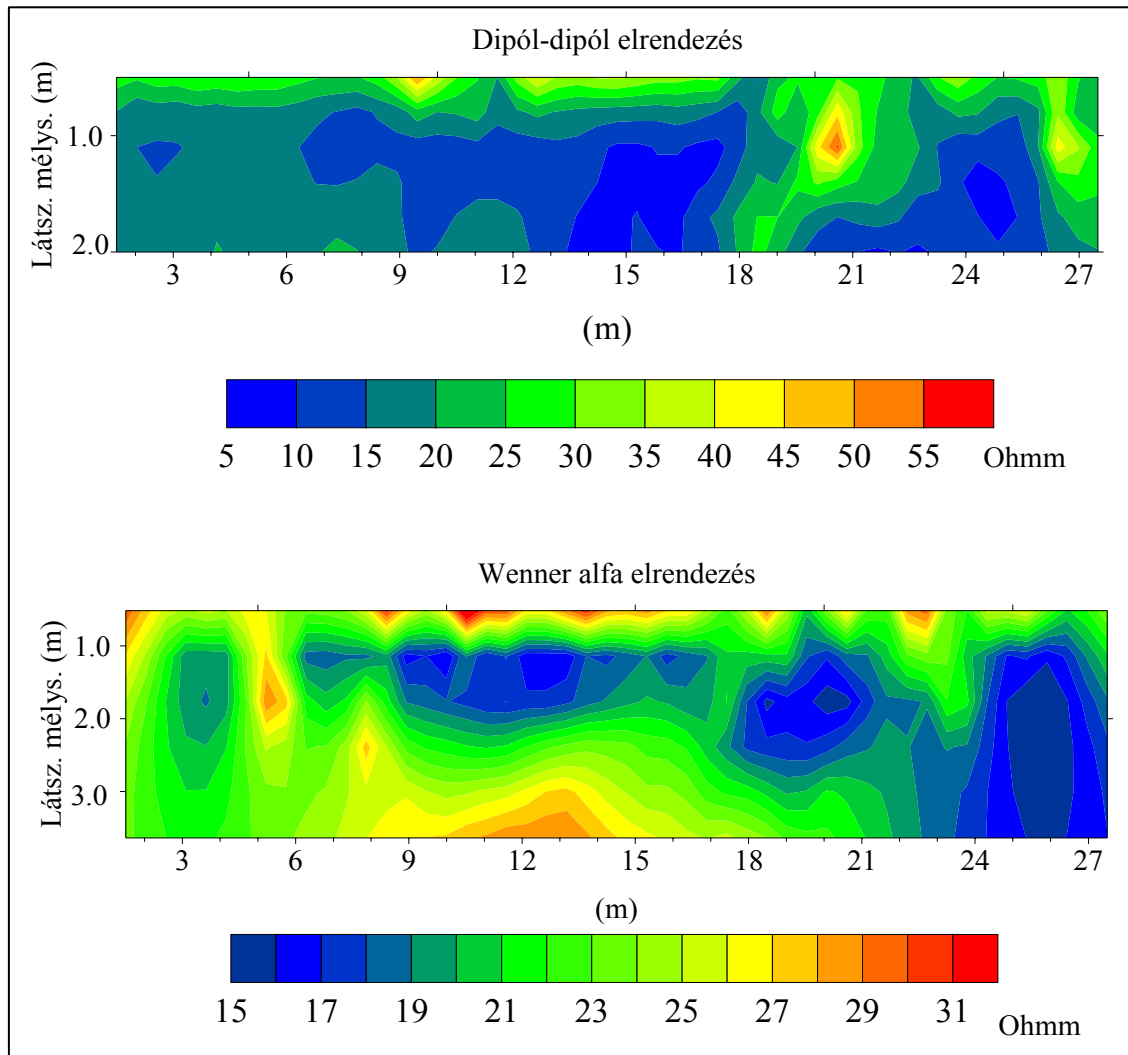
Paraméter	ρ_1	H	R	X	D_r
Tényleges érték	-	0,94 m	0,47 m	14,0 m	-
Egyedi inverziós érték	90 Ω m	1,06 m	0,47 m	14,6 m	6,95 %
Egyedi inverziós bizonytalanság	6,22 %	63,8 %	65,8%	4,7%	-
Szim. inverziós érték	40 Ω m	0,97 m	0,46 m	14,0 m	2,18 %
Szim. inverziós bizonytalanság	5,7 %	24,3 %	24,6 %	4,6 %	

6.3 táblázat

Tesztmérés feldolgozásának eredményei sima és szimultán inverzió után. D_r a három modellparaméterből (H,R,X) számított relatív modelltávolságot jelenti

inverzió után. A három egzaktul ismert paraméterre (H, R, X) vonatkozóan relatív modelltávolságot is számoltam. Látható, hogy már az egyedi inverzió is nagyon jól megközelítette a modell tényleges paramétereit, de a szimultán inverzióval határozottan közelebb kerültünk a tényleges ható értékeihez. A modellparaméterek bizonytalanságát csak a szimultán inverzió elvégzésével lehetett elfogadható mértékűvé csökkenteni. A teszt terület egy rendkívül inhomogén, feltöltött térrész, mely magyarázatot ad a paraméterek még így is jelentős bizonytalanságára.

A másik terepi példa egy mérnökgeofizikai probléma megoldásának részletét mutatja be. Tarján község egyik aszfaltútján beszakadásokat észleltek, melyekért a közeli, löszbe vájt pincéket okolták, melyek tényleges helyzete ismeretlen volt. A Dorogi Útépítő Kft. megbízásából geofizikai módszerekkel kutattuk a kérdéses utat és környékét. Látszólagos fajlagos ellenállás méréseket az út két oldalán, az útpadkán végeztünk dipól-dipól és Wenner elrendezéssel. Egy 30 m hosszúságú szakaszon mért ellenállás szelvényeket mutat be a 6.6 ábra. Ezen tisztán kivehető



6.6 ábra

*Különböző elektróda elrendezéssel mért látszólagos fajlagos ellenállás szelvények.
Egységnyi elektróda távolság: 1 m.*

egy üreg-indikáció a dipól-dipól a szelvény 20-21 méterre eső szakaszán szinte a teljes kutatási mélységtartományban, ám a Wenner szelvényen a mélyebb hatók már ezt elnyomják. A dipól-dipól adatok egyedi, és a két adatrendszer szimultán inverziójának eredményei a 6.4 táblázatban láthatók. Újból megfigyelhető, hogy a modellparaméterek értékén csekély mértékben változtatott a szimultán inverzió, ám azok megbízhatóságát jelentős mértékben megnövelte. A geoelektromos adatok feldolgozásával kapott eredményeket mind a helyszínen végzett földradar mérések, mind a későbbi útkarbantartó munkálatok igazolták.

6. Analitikus modellezésen alapuló szimultán inverzió

Paraméter	ρ_1	H	R	X
Egyedi inverziós érték	17,68 Ωm	1,41 m	0,64 m	21,7 m
Egyedi inverziós bizonytalanság	3,9 %	25,41 %	31,3%	3,1%
Szim. inverziós érték	22,72 Ωm	1,53 m	0,64 m	21,6 m
Szim. inverziós bizonytalanság	2,8 %	4,4 %	5,1 %	2,1 %

6.4 táblázat

Geoelektromos feldolgozásának eredményei egyedi és szimultán inverzió után.

Mindkét terepi példával sikerült egyértelműen bizonyítani a szimultán inverzió létjogosultságát. Látható, hogy amennyiben a lehetőségek adóttak, érdemes időt szánni egy terítés kétszeri, a dipól-dipól mellett Wenner alfa elrendezéssel történő megmérésére is. Bebizonyosodott, hogy a Wenner módosulattal mért adatrendszer bevonása az inverzióba nemcsak nem rontja el a dipól eredményeit, de javítja azok pontosságát és megbízhatóságát.

7. Összefoglalás

A dolgozat bemutatott három, általam kidolgozott, analitikus modellezésen alapuló, gyakorlatban is alkalmazható adatfeldolgozási eljárást, melyekkel felszínközeli üregek, üregszerű hatók pozíciója, illetve paraméterei határozhatók meg. A feldolgozási eljárásokban használt analitikus modellezési eljárást elméleti görbeseregek előállításával, pszeudo szelvények formájában teszteltem, továbbá vizsgáltam az egyes modellparaméterek érzékenységét is.

Modellvizsgálatokkal igazoltam, hogy a vonalforrásokra vonatkozó levezetés kétdimenziós modellek esetén alkalmazható pontforrások terének vizsgálatához. Több üreg hatásának modellezésekor a szuperpozíció elvének alkalmazásával nem követünk el számottevő hibát, amennyiben a látszólagos fajlagos ellenállást a homogén féltér elsődleges és a hatók okozta másodlagos potenciálok szétválasztásából származtatjuk. Összetett földtani viszonyok esetének leírására is alkalmassá tettem az eljárást egy jelkiemelő korrelációs szűrési eljárás bevezetésével.

Négyfajta elektróda elrendezésre végeztem elméleti vizsgálatokat. Ezek igazolták, hogy jelerősség szempontjából az axiális dipól elrendezés a leginkább alkalmazható az üregek kimutatására, míg a Wenner módosulatok közül az alfa tűnt a leginkább megfelelőnek. A számítások alapján meghatároztam az egyes elrendezésekre a ható és a környezete közti ellenállás kontraszt, illetve a mélység/sugár arány kimutathatósági határértékeit. Két tetszőleges méretű üreg esetén megadtam az anomália alakok szétválasztásához szükséges minimális távolságot a hatók sugarainak függvényében.

A paraméter érzékenységi vizsgálatok keretében meghatároztam az egyes elektróda elrendezésekhez a modellparaméterek érzékenységét az elektródák mérési vonal menti elhelyezkedésének függvényében. Kimutattam, hogy minden elrendezés esetében a ható fajlagos ellenállásának érzékenysége rendkívül alacsony, és legnagyobb érzékenységgel a helyparaméter bír.

Analitikus modellezésen alapuló dekonvolúciós szűrési eljárást dolgoztam ki felszínközeli hatók pozíciójának megadása céljából. Az általam kidolgozott, a

mérési adatok horizontális és vertikális összegzését alkalmazó módszerrel összetett földtani esetekben is megbízhatóan kijelölhetők a mérési vonal mentén lévő üregszerű hatók száma és pozíciója. Az eljárással kapott eredmények bemenő adatokkal szolgálhatnak egy esetleges inverziós feldolgozáshoz, aminek ezáltal növelhető a pontossága.

Egy a szakirodalomban ismertetett, L_2 norma minimalizálásán alapuló inverziós algoritmust fejlesztettem tovább geoelektromos adatok üregkutatói célú felhasználására. Az előremodellezést az általam kifejlesztett analitikus eljárással végeztem, és beépítettem az algoritmusba a korrelációs alakszűrést is. Az új algoritmus tesztelése igazolta, hogy a kiindulási modell még rendkívül magas (20%-os) szórású Gauss jellegű adathiba esetén is igen pontosan visszaállítható. A keresett modell paramétereinek közül a ható pozíciója adható meg a leginkább megbízhatóan. A vizsgált két elektróda elrendezés közül az axiális dipól esetén bizonyultak a minősítő paraméterek a legjobbnak. Két eltérő méretű üreg modellezésekor megállapításokat tettem az üregek mélységének, a hatók távolságának és a paraméterbecslések bizonytalanságának összefüggéseire vonatkozóan a vizsgált két elektróda elrendezés esetén.

Az axiális dipól és a Wenner alfa elrendezésekkel azonos mérési vonal mentén történő mérések feldolgozásához egy szimultán inverziós eljárást fejlesztettem ki. A modellvizsgálatok során a terepi körülmények szimulálásához az azonos hibájú adatrendszerek mellett kevert hibájúakat is alkalmaztam. Igazoltam, hogy a szimultán inverzió az egyedihez képest jelentős mértékben megnöveli a modellparaméterek megbízhatóságát, csökkenti a köztük lévő ekvivalenciát.

A sikeresen tesztelt inverziós algoritmusok általános értelemben is hozzájárulhatnak az inverziós módszerek fejlesztéséhez. A jelkiemelő korrelációs technika és a most már bizonyított jóságú szimultán inverziós algoritmus más direkt feladattal számos, más jellegű geofizikai probléma megoldásához is alkalmazható.

Az egyes feldolgozási eljárások ismertetése és tesztelése után bemutatott terepi példák igazolták, hogy a dolgozatban a megoldásukra kidolgozott módszerek a gyakorlatban is sikeresen alkalmazhatók.

A dolgozatban bemutatott tudományos eredmények jelentős részét számos hazai és nemzetközi fórumon publikáltam, ahol ezeket elfogadták és új eredményként ismerték el.

Köszönetnyilvánítás

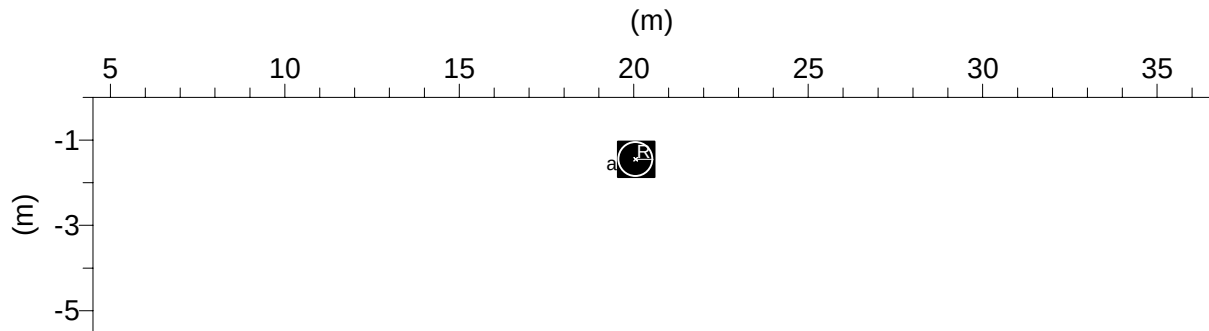
Az értekezés elkészítésekor és doktori tanulmányaim elvégzésekor nemcsak szakmai, hanem erkölcsi támogatást is kaptam témavezetőmtől, Dr Gyulai Ákostól. Dr Ormos Tamás rengeteg segítséget nyújtott elsősorban a külföldi szakmai kapcsolataim fejlesztése terén. A Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének vezetőjének, minden munkatársának, egykori és jelenlegi doktoranduszainak hálával tartozom, hiszen valamilyen mértékben mindannyian hozzájárultak ahhoz, hogy eljussak az értekezés benyújtásáig. Hálával tartozom munkahelyemnek, az ELGI-nek tanulmányaim anyagi és erkölcsi támogatásáért. Szakmailag jelentős fejlődést sikerült elérnem a Mérnökgeofizikai Főosztályon eltöltött évek alatt. Itt dolgozó kollégáim türelmét, segítő készségét kiemelten köszönöm. Az értekezésben bemutatott 2,5 dimenziós FD modellszámításokért Prácsér Ernőnek tartozom hálával. Szakmai és egyéb természetű kérdéseimmel bátran fordulhattam Markos Tündéhez és Fancsik Tamáshoz, kiket ezért kiemelt köszönet illet.

Hivatkozások

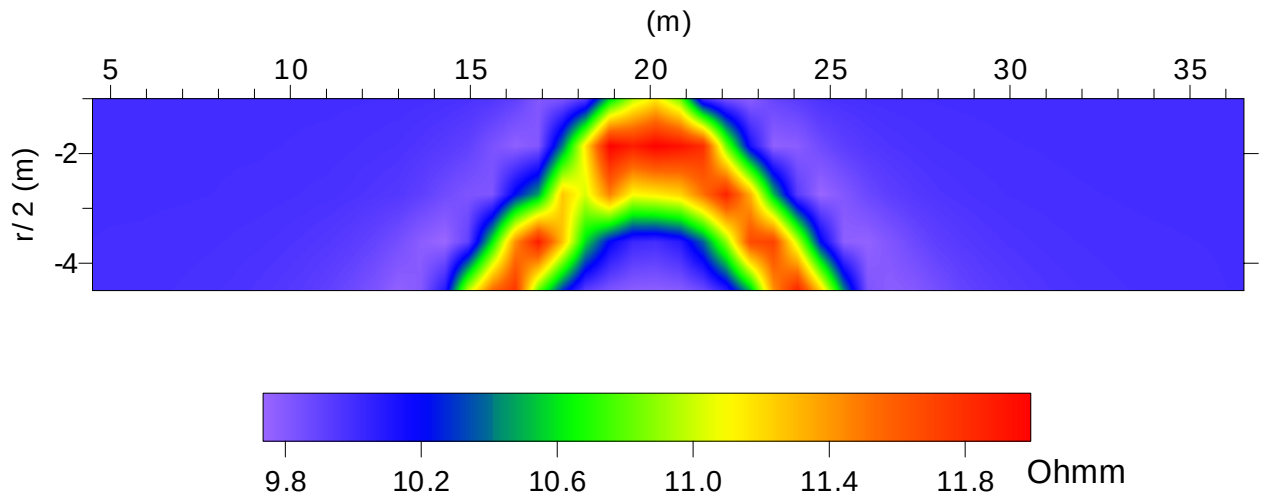
- BARKER, R.D. 1992: A simple algorithm for electrical imaging of subsurface. First Break 10 53-62.
- DEY, A., MORRISON, H.F. 1979: Resistivity modeling for arbitrarily shaped two dimensional structures. Geophysical Prospecting 27 106-136.
- DOBRÓKA M., GYULAI Á., ORMOS T., CSÓKÁS J., DRESEN L. 1991: Joint inversion of seismic and geoelectric data recorded in an underground coal mine. Geophysical Prospecting 39 644-665.
- EDWARDS 1977: Pseudosection for Resistivity and IP. Geophysics 42 5 1020-1036.
- FANCSIK T., NYÁRI ZS. 1999: Processing of geoelectric cavity detection data using deconvolution filtering method EAGE Helsinki, PO94
- FERENCZY L. 1980: Felszínközeli üregek mélységének és méretének meghatározása geoelektromos dipól szelvényezéssel. Magyar Geofizika 21 4 134-142.
- GYULAI Á. 1989: Parameter sensitivity of underground DC measurements. Geophysical Transactions 35 3 209-225.
- GYULAI Á. 1998: A geoelektromos üregkutatás néhány kérdése . Magyar Geofizika 39 2 43-50.
- GYULAI Á., ORMOS T. 1996: Geoelektromos adatok analitikus előremodellezésen alapuló szimultán inverziója dőlt réteges földtani szerkezetekre. Magyar Geofizika 37 1 17-26.
- GYULAI Á., ORMOS T. 1997: Vertikális elektromos szondázások kiértékelése 1.5-D inverziós módszerrel. Magyar Geofizika 38 1 25-29.
- 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.
- HOLCZINGER I., PATTANTYÚS-Á.M., NYÁRI ZS. 1999.: Geofizikai mérések a balácapusztai régészeti területen Magyar Geofizikusok Vándorgyűlése, Zalakaros, pp.: 38.
- LOKE, M.H., BARKER, R.D. 1996: Rapid least squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting 44 131-152.
- LÖSCH, W., MILITZER, H., RÖSLER, R. 1979: Zur geophysikalischen Hohlraumortung mittels geoelektrischer Widerstandsmethoden Freiburger Forshungshefte C341 53-126.
- MENKE W. 1984: Geophysical data analysis: discrete inverse theory, New York, London, Academic Pr.
- MOLLER, I., SORENSEN, K. 1998: A new approach for fast 2-D geoelectrical mapping of near-surface structures. E. J. of Environmental and Engineering Geophysics 2 3 247-261.
- NYÁRI ZS. (PLANK ZS.) 1994.: Üregkutatás geofizikai módszerekkel, Diplomaterv, Miskolci Egyetem Geofizikai Tsz.
- NYÁRI ZS. (PLANK ZS.) 1995.: Hohlraumerkundung mit geoelektrischen Meßverfahren Tagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Hamburg Németország, pp 222
- NYÁRI ZS. 1997a.: Analitikus modellezés a geoelektromos üregkutatás lehetőségeinek vizsgálatára, Magyar Geofizika, 38/3. pp.: 194-204
- NYÁRI ZS. 1997b: 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.
- NYÁRI ZS., FANCSIK T. 1998. Dekonvolúciós szűrési lehetőségek a geoelektromos üregkutatásban, Magyar Geofizika. 39/3pp.: 80-83
- NYÁRI ZS. 2000: Quality controlled resistivity inversion in cavity detection Geophysical Transactions 2000 Vol43 N1 pp 47-63.
- OVERMEEREN, R.A., RITSEMA, I.L. 1988: Continuous vertical electrical sounding. First Break 6 313-324.
- PRÁCSER E. 1998: Pontforrás potenciáljának számítása kétdimenziós modell esetén. Magyar Geofizika 39. 4. 126-131.
- SALÁT P., TARCSAI GY., CSEREPES L., VERMES M., DRAHOS D. 1982: A geofizikai interpretáció információs statisztikus mutatói. Tankönyvkiadó Budapest
- SORENSEN, K. 1996: Pulled Array Continuous Electrical Profiling. First Break 14 3 85-90.
- SÖRÉS L. 1985: Jelentés a Balácapusztán végzett régészeti célú geoelektromos mérésekről. ELGI jelentés
- SZARKA L. 1990: A Coulomb törvény: a geoelektromos anomáliák alapja, Magyar Geofizika 31. 1-2. pp.:1-9.
- TSOKAS, G.N., TSOURLOS, P. 1997: Transformation of the resistivity anomalies from archeological sites by inversion filtering. Geophysics 62 1 36-43.

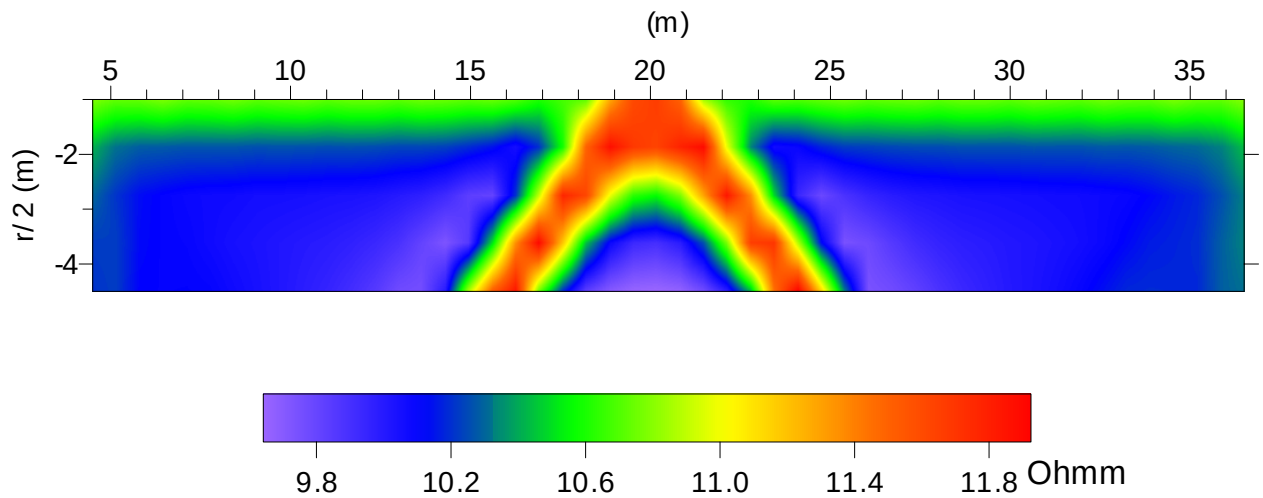
A1 Melléklet



Modellhiba vizsgálatához alkalmazott egy hatós modell

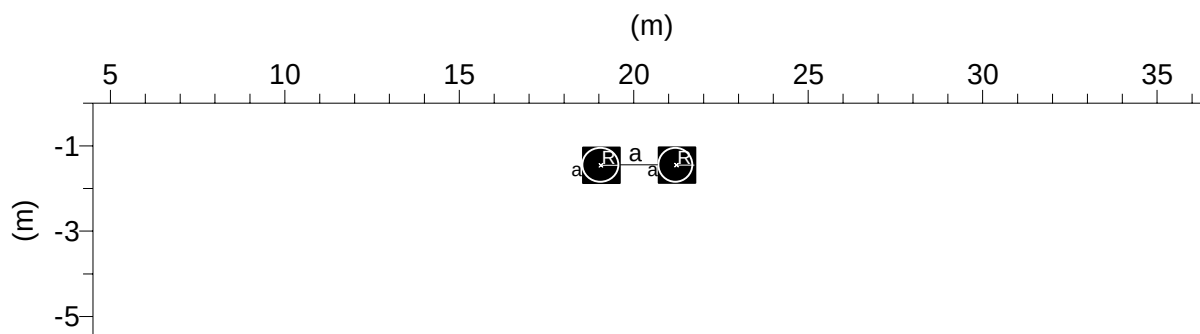


A fenti modellre $R=0,5$ m sugarú körhenger hatóval analitikusan számított pseudo szelvény, r :terítéshossz

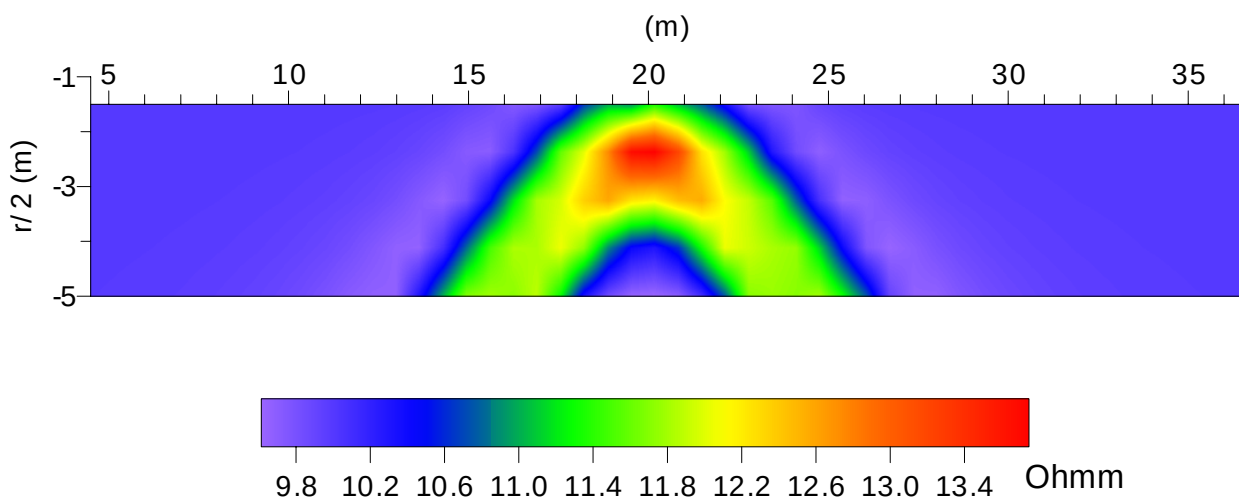


A fenti modellre $a=1$ m oldalélű négyzetes hasáb hatóval FD modellezéssel számított pseudo szelvény, r :terítéshossz

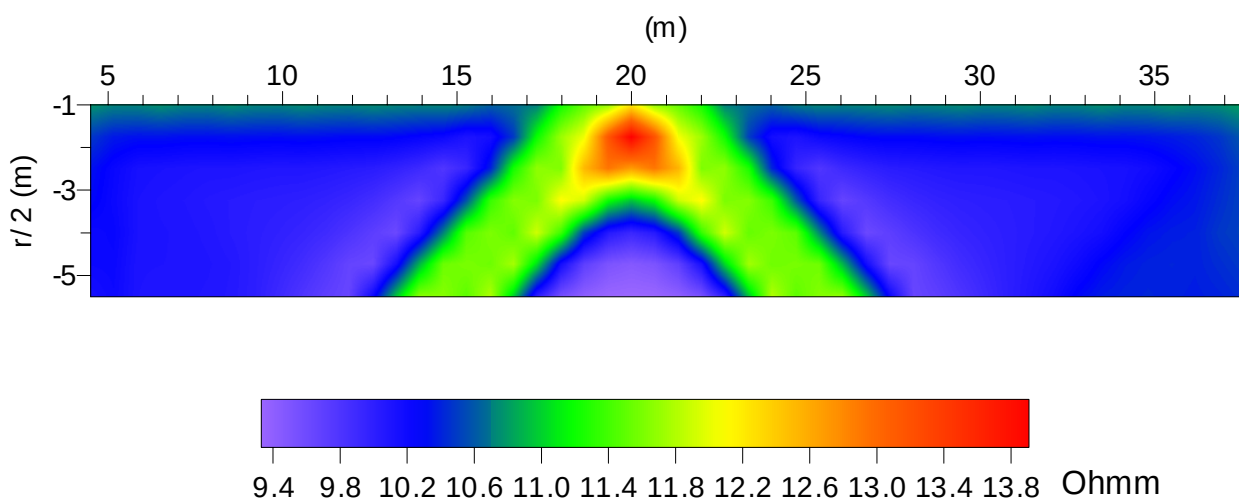
A2 Melléklet



Modellhiba vizsgálatához alkalmazott két hatásos modell. Hatótávolság: 1m.

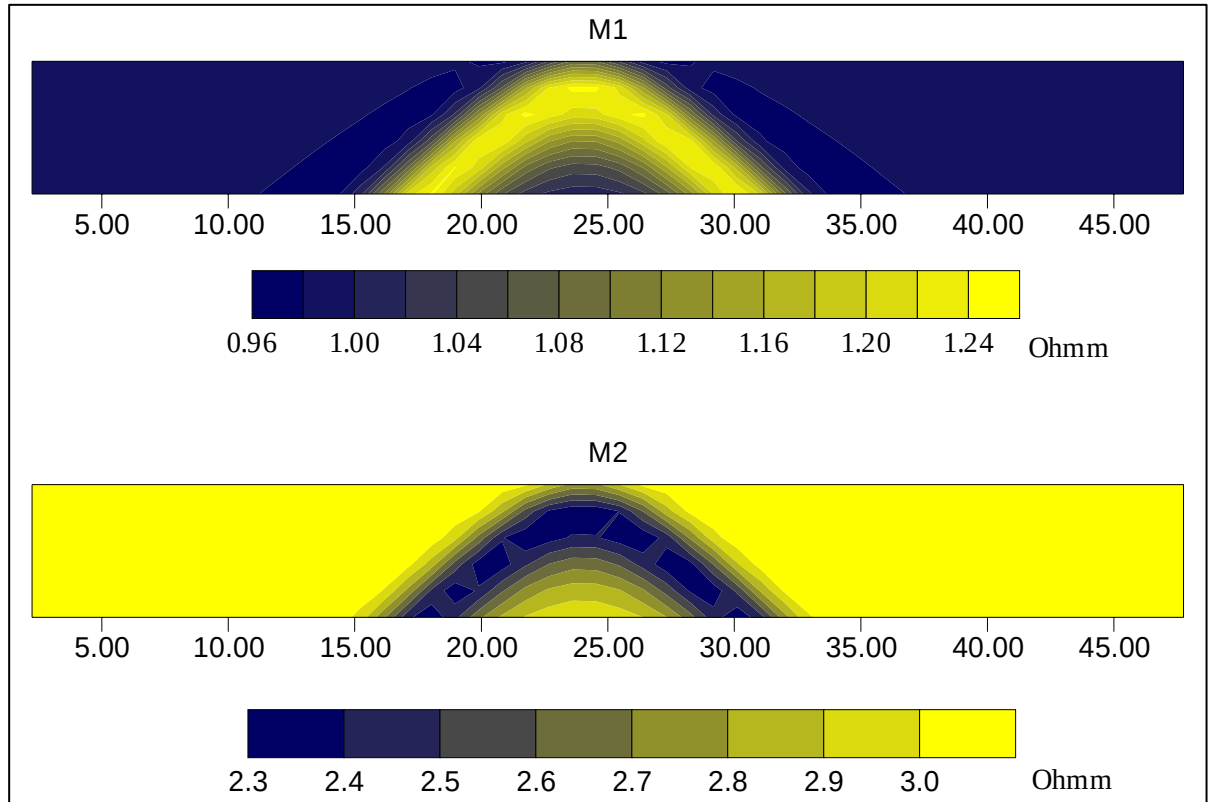


A fenti modellre $R=0,5$ m sugarú körhenger hatóval analitikusan számított pseudo szelvény, r :terítéshossz



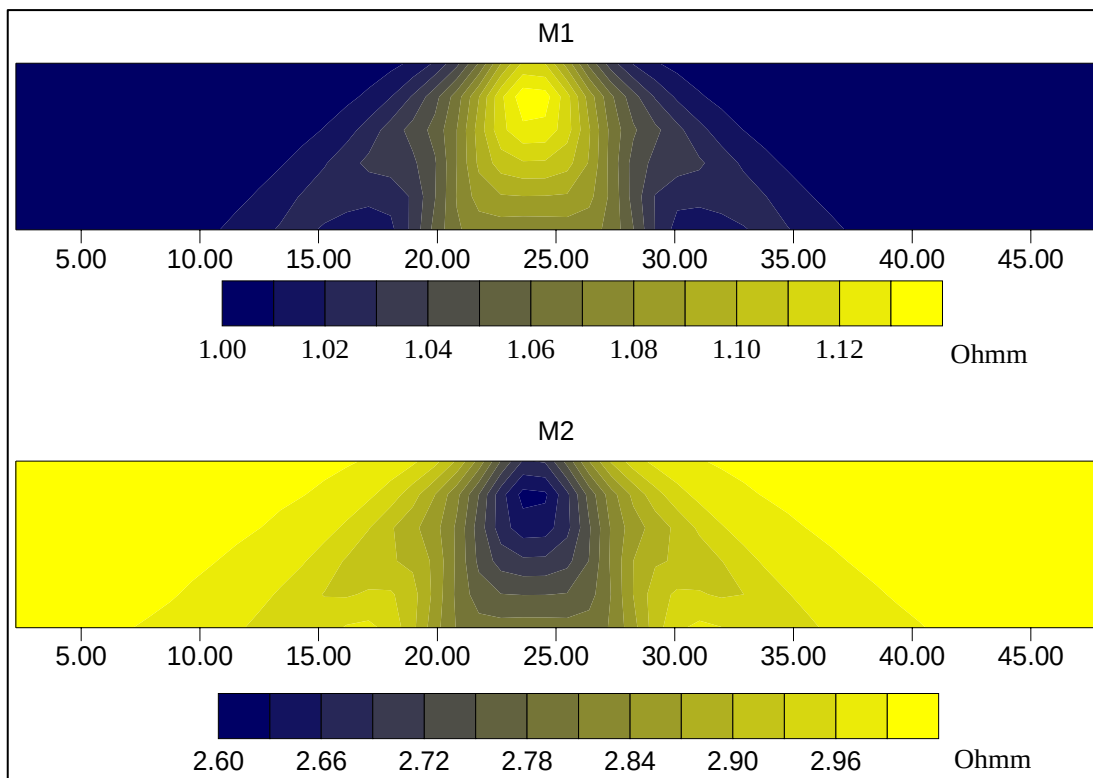
A fenti modellre $a=1$ m oldalélű négyzetes hasáb hatóval FD modellezéssel számított pseudo szelvény, r :terítéshossz

B Melléklet

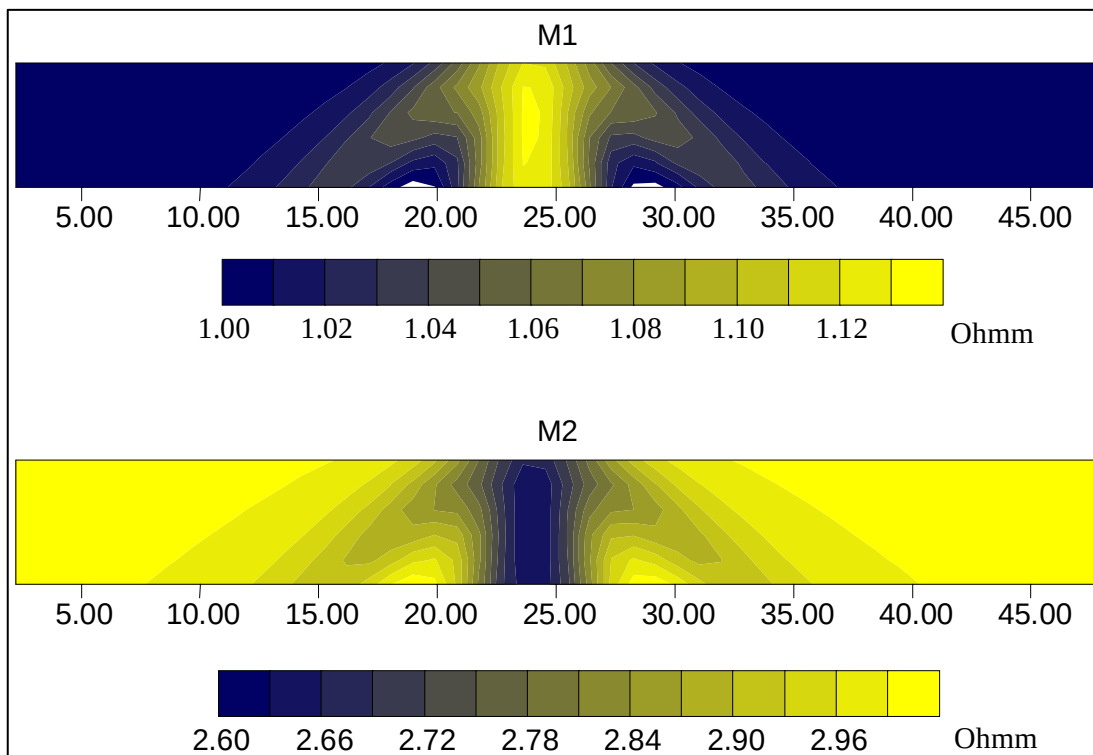


A 3. Fejezetben a paraméter érzékenységi vizsgálatokhoz alkalmazott M1 és M2 modellekre számolt pszeudo szelvények axiális-dipól elrendezésnél, $n=1-6$.

Melléklet

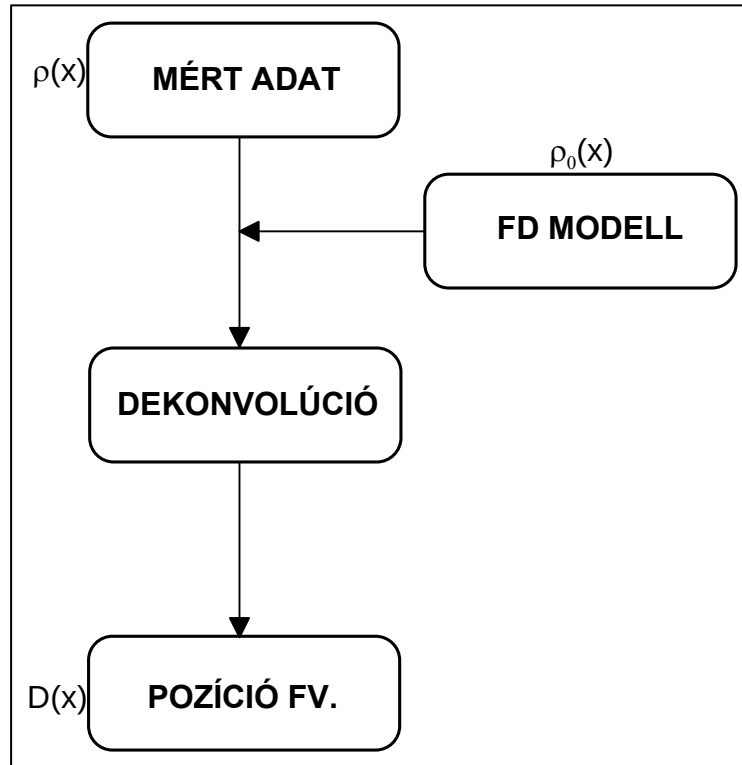


A 3. Fejezetben a paraméter érzékenységi vizsgálatokhoz alkalmazott M1 és M2 modellekre számolt pszeudo szelvények Wenner alfa elrendezésnél, $n=1-6$.



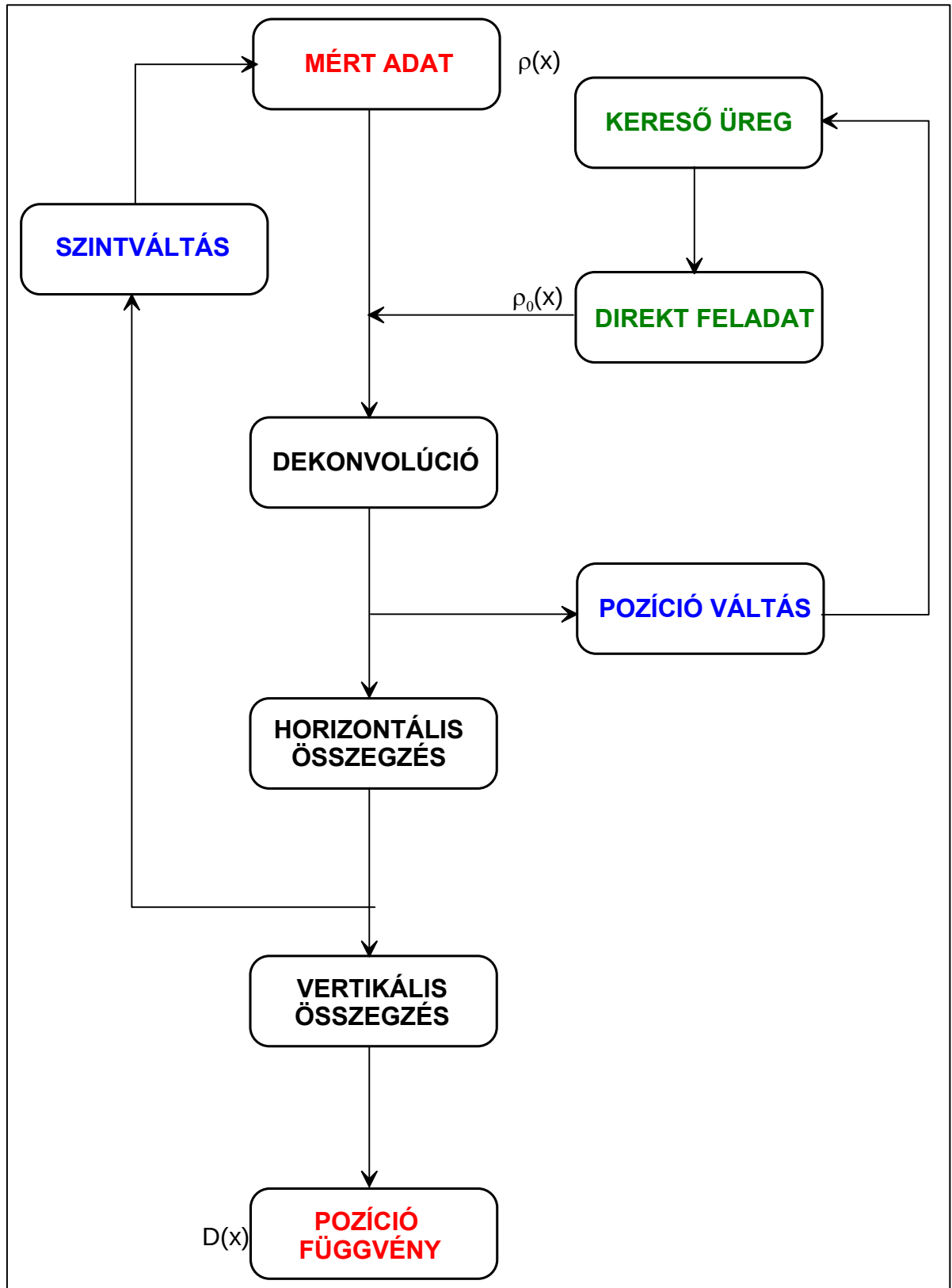
A 3. Fejezetben a paraméter érzékenységi vizsgálatokhoz alkalmazott M1 és M2 modellekre számolt pszeudo szelvények Wenner gamma elrendezésnél, $n=1-6$.

C1 Melléklet



Tsokas, Tsourlos(1997) dekonvolúciójának folyamatábrája

C2 Melléklet



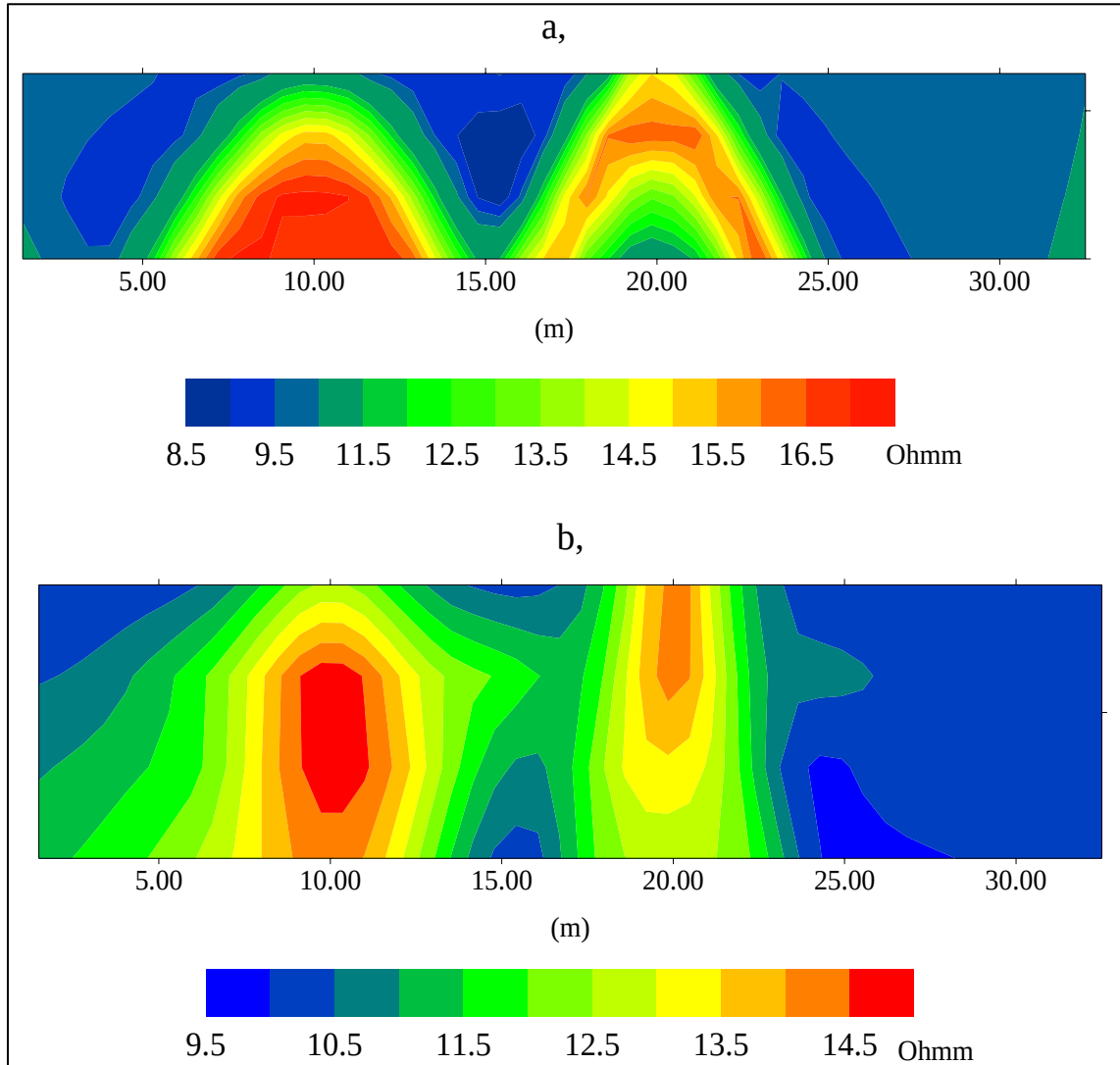
Az új dekonvolúciós eljárás folyamatábrája

D1 Melléklet

Minősítő paraméte r	Modell paraméter	M1 modell	Dipól elr., 2% hiba	Wenner elr., 2% hiba	Dipól elr., 5% hiba	Wenner elr., 5% hiba
Bizonytalanság [%]	ρ_1	10 Ohmm	0.35	0.842	0.412	0.968
	H	3 m	3.29	8.43	4.29	11.32
	R	2 m	5.41	17.20	7.62	25.14
	X	16 m	0.23	0.415	0.43	0.88
Illesztési hiba [%]			4.19	4.346	6.07	6.23
Rel. mod. táv [%]			0.806	0.64	1.0	0.907
Adatszám			177	147	177	147

M1 modell és minősítő paramétere

D2 Melléklet

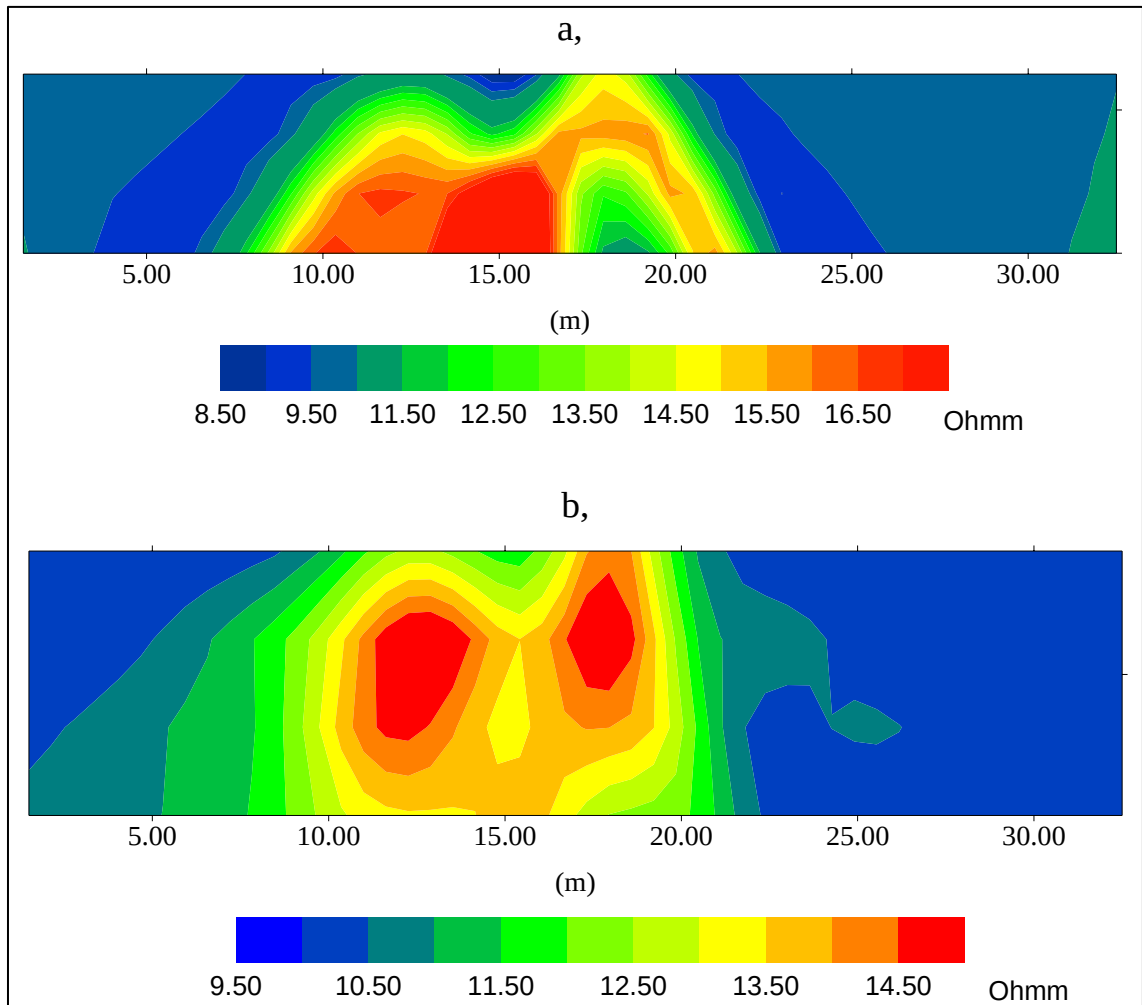


M2 modellre számított látszólagos fajlagos ellenállás szelvények axiális dipól (a,) és Wenner alfa (b,) elrendezéseknél. Egységnyi elektródatáv : 1m, $n=1-8$.

Dipól	ρ_1	ρ_2^1	H_1	R_1	X_1	ρ_2^2	H_2	R_2	X_2
ρ_1	1,000	0,201	-0,064	-0,140	0,002	0,155	-0,261	-0,262	-0,011
ρ_2	0,201	1,000	-0,609	-0,744	0,046	-0,025	-0,020	-0,011	-0,057
H_1	-0,064	-0,609	1,000	0,978	-0,052	0,018	0,059	0,034	0,049
R_1	-0,140	-0,744	0,978	1,000	-0,055	0,012	0,069	0,046	0,052
X_1	0,002	0,046	-0,052	-0,055	1,000	0,047	-0,028	-0,033	0,029
ρ_2	0,155	-0,025	0,018	0,012	0,047	1,000	-0,797	-0,935	0,068
H_2	-0,261	-0,020	0,059	0,069	-0,028	-0,797	1,000	0,943	-0,086
R_2	-0,262	-0,011	0,034	0,046	-0,033	-0,935	0,943	1,000	-0,071
X_2	-0,011	-0,057	0,049	0,052	0,029	0,068	-0,086	-0,071	1,000
Wenner	ρ_1	ρ_2^1	H_1	R_1	X_1	ρ_2^2	H_2	R_2	X_2
ρ_1	1,000	0,268	-0,355	-0,363	0,102	0,283	-0,451	-0,389	-0,069
ρ_2	0,268	1,000	-0,928	-0,975	0,120	-0,076	0,088	0,072	-0,098
H_1	-0,355	-0,928	1,000	0,984	-0,175	0,120	-0,140	-0,116	0,139
R_1	-0,363	-0,975	0,984	1,000	-0,155	0,088	-0,099	-0,080	0,125
X_1	0,102	0,120	-0,175	-0,155	1,000	0,063	-0,104	-0,084	-0,017
ρ_2	0,283	-0,076	0,120	0,088	0,063	1,000	-0,918	-0,983	0,061
H_2	-0,451	0,088	-0,140	-0,099	-0,104	-0,918	1,000	0,971	-0,086
R_2	-0,389	0,072	-0,116	-0,080	-0,084	-0,983	0,971	1,000	-0,067
X_2	-0,069	-0,098	0,139	0,125	-0,017	0,061	-0,086	-0,067	1,000

M2 modell korrelációs együtthatói

D3 Melléklet



M3 modellre számított látszólagos fajlagos ellenállás szelvények axiális dipól (a,) és Wenner alfa (b,) elrendezéseknél. Egységnyi elektródatáv : 1m, n=1-6.

Dipól	ρ_1	ρ_2^1	H_1	R_1	X_1	ρ_2^2	H_2	R_2	X_2
ρ_1	1,000	0,067	0,111	0,047	0,104	0,126	-0,218	-0,220	0,010
ρ_2	0,067	1,000	-0,683	-0,792	-0,200	-0,044	0,174	0,116	-0,089
H_1	0,111	-0,683	1,000	0,983	0,259	0,084	-0,246	-0,179	0,147
R_1	0,047	-0,792	0,983	1,000	0,268	0,081	-0,243	-0,174	0,147
X_1	0,104	-0,200	0,259	0,268	1,000	0,147	-0,307	-0,251	0,142
ρ_2	0,126	-0,044	0,084	0,081	0,147	1,000	-0,816	-0,938	0,247
H_2	-0,218	0,174	-0,246	-0,243	-0,307	-0,816	1,000	0,953	-0,260
R_2	-0,220	0,116	-0,179	-0,174	-0,251	-0,938	0,953	1,000	-0,266
X_2	0,010	-0,089	0,147	0,147	0,142	0,247	-0,260	-0,266	1,000
Wenner	ρ_1	ρ_2^1	H_1	R_1	X_1	ρ_2^2	H_2	R_2	X_2
ρ_1	1,000	0,267	-0,297	-0,314	0,153	0,248	-0,321	-0,304	-0,035
ρ_2	0,267	1,000	-0,926	-0,972	-0,214	-0,070	0,161	0,123	-0,212
H_1	-0,297	-0,926	1,000	0,986	0,344	0,148	-0,303	-0,234	0,322
R_1	-0,314	-0,972	0,986	1,000	0,302	0,121	-0,254	-0,195	0,292
X_1	0,153	-0,214	0,344	0,302	1,000	0,309	-0,531	-0,432	0,467
ρ_2	0,248	-0,070	0,148	0,121	0,309	1,000	-0,896	-0,975	0,242
H_2	-0,321	0,161	-0,303	-0,254	-0,531	-0,896	1,000	0,969	-0,396
R_2	-0,304	0,123	-0,234	-0,195	-0,432	-0,975	0,969	1,000	-0,324
X_2	-0,035	-0,212	0,322	0,292	0,467	0,242	-0,396	-0,324	1,000

M3 modell korrelációs együtthatói

E1 Melléklet

Paraméter	Paraméterek bizonytalansága (%)		
	2 % adathiba	5% adathiba	Kevert adathiba
$\rho_1=10 \Omega\text{m}$	0,28	0,40	0,35
H=3 m	2,39	3,42	2,97
R= 2 m	4,36	6,2	5,38
X=16 m	0,15	0,22	0,19

M1 modell paramétereinek bizonytalansága különböző hibával terhelt adatrendszerek szimultán inverziójakor

	ρ_1	ρ_2	H	R	X
ρ_1	1	0,24	-0,323	-0,341	-0,002
ρ_2	0,24	1	-0,804	-0,94	0,044
H	-0,323	-0,804	1	0,9488	-0,048
R	-0,341	-0,94	0,9488	1	-0,045
X	-0,002	0,044	-0,048	-0,045	1

M1 modell paramétereinek korrelációs együtthatói kevert hibájú dipól-dipól és Wenner adatsorok szimultán inverziójakor

E2 Melléklet

M2	ρ_1	ρ_2^1	H_1	R_1	X_1	ρ_2^2	H_2	R_2	X_2
ρ_1	1,000	0,234	-0,313	-0,359	0,006	0,182	-0,345	-0,321	-0,021
ρ_2	0,234	1,000	-0,733	-0,856	0,056	-0,031	-0,002	0,002	-0,061
H_1	-0,313	-0,733	1,000	0,972	-0,088	0,041	-0,018	-0,014	0,075
R_1	-0,359	-0,856	0,972	1,000	-0,084	0,029	0,008	0,008	0,074
X_1	0,006	0,056	-0,088	-0,084	1,000	0,052	-0,048	-0,049	0,024
ρ_2	0,182	-0,031	0,041	0,029	0,052	1,000	-0,811	-0,944	0,067
H_2	-0,345	-0,002	-0,018	0,008	-0,048	-0,811	1,000	0,944	-0,088
R_2	-0,321	0,002	-0,014	0,008	-0,049	-0,944	0,944	1,000	-0,072
X_2	-0,021	-0,061	0,075	0,074	0,024	0,067	-0,088	-0,072	1,000
M3	ρ_1	ρ_2^1	H_1	R_1	X_1	ρ_2^2	H_2	R_2	X_2
ρ_1	1,000	0,148	-0,187	-0,226	0,066	0,139	-0,225	-0,229	-0,027
ρ_2	0,148	1,000	-0,777	-0,879	-0,182	-0,045	0,168	0,115	-0,092
H_1	-0,187	-0,777	1,000	0,977	0,232	0,104	-0,280	-0,207	0,154
R_1	-0,226	-0,879	0,977	1,000	0,236	0,093	-0,260	-0,189	0,151
X_1	0,066	-0,182	0,232	0,236	1,000	0,166	-0,335	-0,276	0,171
ρ_2	0,139	-0,045	0,104	0,093	0,166	1,000	-0,823	-0,943	0,246
H_2	-0,225	0,168	-0,280	-0,260	-0,335	-0,823	1,000	0,954	-0,273
R_2	-0,229	0,115	-0,207	-0,189	-0,276	-0,943	0,954	1,000	-0,272
X_2	-0,027	-0,092	0,154	0,151	0,171	0,246	-0,273	-0,272	1,000

M2 és M3 modellek paramétereinek korrelációs együtthatói kevert hibájú dipól-dipól és Wenner adatsorok szimultán inverziójakor

F Melléklet



Diapir 10R mérőműszer



Sokelektrodás mérőrendszer