



KITAIBEL PÁL KÖRNYEZETTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

GEOKÖRNYEZETTUDOMÁNY PROGRAM

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

Egyenáramú geoelektromos elrendezések
kétdimenziós leképezési tulajdonságai analóg
és numerikus modellezés alapján

Doktorjelölt:

SZOKOLI Kitti

Témavezető:

DR. SZALAI Sándor

ISBN 978-963-334-299-2

**Egyenáramú geoelektromos elrendezések kétdimenziós leképezési
tulajdonságai analóg és numerikus modellezés alapján**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében a Nyugat-magyarországi Egyetem

Kitaibel Pál Doktori Iskolája Geokörnyezettudomány programja keretében

Írta:

Szokoli Kitti

Témavezető: Dr. Szalai Sándor

Elfogadásra javaslom (igen/nem)

aláírás

A jelölt a doktori szigorlaton %-ot ért el,

Sopron
a Szigorlati Bizottság Elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr. Törös Endre) igen/nem

aláírás

Második bíráló (Dr. Turai Endre) igen/nem

aláírás

(Esetleg harmadik bíráló (Dr.) igen/nem)

aláírás

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján %-ot ért el

Sopron,
a Bírálóbizottság Elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....
.....

Az EDT elnöke

Nyilatkozat

Alulírott Szokoli Kitti jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy az **Egyenáramú geoelektromos elrendezések kétdimenziós leképezési tulajdonságai analóg és numerikus modellezés alapján** című PhD értekezésem önálló munkám, az értekezés készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény szabályait, valamint a Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola által előírt, a doktori értekezés készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében. ¹

Kijelentem továbbá, hogy az értekezés készítése során az önálló kutatómunka kitétel tekintetében témavezetőmet, illetve a programvezetőt nem tévesztettem meg.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy az értekezést nem magam készítettem, vagy az értekezéssel kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Nyugat-magyarországi Egyetem megtagadja az értekezés befogadását.

Az értekezés befogadásának megtagadása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Sopron, 2016. október 28.

.....

Szokoli Kitti

¹ 1999. évi LXXVI. tv. 34. § (1) A mű részletét – az átvevő mű jellege és célja által indokolt terjedelemben és az eredetihez híven – a forrás, valamint az ott megjelölt szerző megnevezésével bárki idézheti. 36. § (1) Nyilvánosan tartott előadások és más hasonló művek részletei, valamint politikai beszédek tájékoztatás céljára – a cél által indokolt terjedelemben – szabadon felhasználhatók. Ilyen felhasználás esetén a forrást – a szerző nevével együtt – fel kell tüntetni, hacsak ez lehetetlennek nem bizonyul.

Egyenáramú geoelektromos elrendezések kétdimenziós leképezési tulajdonságai analóg és numerikus modellezés alapján

A dolgozatomban a leggyakrabban használt hagyományos (W-Sch, W- α , W- β , P-Dp, Dp-Dp), a négyelektródás optimalizált (ún. Stummer), a γ_{11n} (n=2-7), a γ_{q0} és a γ_{313} elrendezések kimutathatósági mélységét és horizontális fölbontóképességét tanulmányoztam analóg és numerikus modellezéssel, illetve csak analóg modelleken keresztül bizonyos modellhibák hatását.

Sikeresen alkalmaztam az analóg modellezés egy új formáját, terepi körülményekhez közeli viszonyokat teremtve a laboratóriumban. A többek között a befoglaló közegben fellépő eltérő nedvességtartalom és tömörödöttségi viszonyok miatt fellépő zajokkal terhelve végeztem a vizsgálataimat, de a modell paraméterei kontrollálhatóak voltak. A numerikus és az analóg modellezés eredményei között csak kisebb eltéréseket lehet fölfelezni. A hagyományos elrendezések közül a W- β elrendezés leképezési tulajdonságai bizonyultak a legjobbnak a vizsgált modellekre.

Dolgozatomból egyértelműen kiderült, hogy érdemes a γ -típusú elrendezésekkel foglalkozni, ugyanis a kimutathatósági mélységük nagyobbak bizonyult a hagyományos elrendezéseknél a vizsgált modellek esetében, illetve a horizontális fölbontóképesség vizsgálat során is az összes vizsgált hatót el tudták különíteni egymástól, míg a hagyományos elrendezések erre nem voltak képesek. A γ_{11n} (n=2-7) elrendezések esetében kevesebb zavaró álnomália jelenik meg az invertált elektromos fajlagos ellenállás szelvényeken és pontosabban visszaadják a vizsgált modellt, ha a tükrözött változataival, tehát a γ_{n11} (n=2-7) elrendezésekkel együtt alkalmazzuk az eredeti konfigurációkat. Ugyanakkor az igazolható, valódi terepi mérések még hiányoznak ahhoz, hogy egyértelművé váljon ezeknek az elrendezéseknek a gyakorlati alkalmazhatósága.

A γ -típusú elrendezések várhatóan kis hatású hatók, illetve monitoring vizsgálatok esetében szolgálhatnak többlet információval a hagyományos elrendezésekhez képest, így nagyon jól kiegészíthetik azokat.

Two-dimensional imaging properties of DC geoelectric arrays using numerical and analogue modelling

The numerical and analogue studies let us assume that the γ -type configurations may be very useful complements to the traditional configurations (α - and β -type). The normalized parameter sensitivity maps investigation showed that the γ -type arrays are more sensitive for the 2D and 3D anomalies than the traditional arrays. The joint applications of γ_{11n} arrays and their oppositely oriented version, the γ_{n11} arrays proved to be even better, than the original configurations. Most of the γ -type arrays proved to be definitely better than those of the traditional configurations in horizontal resolution and depth of detectability investigations.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani témavezetőmnek, Szalai Sándornak és Szarka Lászlónak, akiknek hála már egyetemistaként megismerkedtem a nem-konvencionális elrendezésekkel. Sándor lehetőséget és teret adott arra, hogy a kutatásban örömet leljem. Köszönettel tartozom Prácser Ernőnek, aki mondhatni a második témavezetőm volt. Bármilyen kérdésben a legjobb tudása szerint és a lehető legobjektívebben próbált mindig a segítségemre lenni. Hálával tartozom Wesztergom Viktornak, a rendszeresen megtartott konzultációkért és a támogatásért, amit a disszertációm befejezése előtt nyújtott. Köszönettel tartozom Magyar Baláznak és Stickel Jánosnak, akik mindig nyitottak voltak a nem-konvencionális kutatási témákra. Köszönetet szeretnék mondani Kovács Károlynak, Novák Attilának, Molnár Csabának, Molnár Tibornak és Túri Janó Bácsinak, akikhez bármikor fordulhattam a méréssel kapcsolatos gyakorlati és technikai kérdésekben. Hálával tartozom Nagy Tamásnak, aki megismertetett az R programozási nyelvvel és disszertációm írásakor fölmerülő *LaTeX* kérdések megoldásakor is a segítségemre volt.

Köszönetet szeretnék mondani Majercsákné Zelenák Andreának, aki minden fölmerülő probléma esetében végtelen kedvességgel és türelemmel fordult felém.

Hálával tartozom Taligás Tímeának és Meditz Andreának az ábrák megszerkeztésében nyújtott segítségükért.

Köszönet illeti a Magyar Tudományos Akadémia Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézetét a kutatásomhoz szükséges szakmai háttér biztosításáért. Szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik közvetlenül vagy közvetetten segítettek, hogy az értekezés megszülethessen.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni Családomnak és Barátaimnak munkám során tanúsított szerető támogatásukat és biztatásukat.

Tartalomjegyzék

1. Elméleti alapok	10
1.1. Az egyenáramú ellenállás módszer fizikai alapja és elve	10
1.1.1. A látszólagos fajlagos ellenállás meghatározása	11
1.2. Egyenáramú geoelektromos modellek	16
1.3. A linearizált geofizikai inverzió és a direkt feladat számítása	17
1.4. Az egyenáramú méréseket eredményeiket befolyásoló zajok	21
1.5. Az analóg modellezés	22
2. A γ-típusú elrendezések kutatásának előzményei	25
2.1. A null és a kvázi-null geoelektromos elrendezések	25
2.2. Az egyenáramú elrendezések paraméter-érzékenység térképeinek vizsgálata	28
2.3. Az egyenáramú elrendezések normált mélységérzékenység-karakterisztika függvényeinek vizsgálata	34
2.4. Az egyenáramú geoelektromos módszer alkalmazási és fejlesztési lehetőségei	36
3. Az elvégzett vizsgálatok	38
3.1. Az alkalmazott modellek és a sokelektrodás konfigurációk paraméterei . .	38
3.2. A γ_{11n} és a γ_{n11} elrendezések együttes alkalmazásának jelentősége	42
3.3. A különböző egyenáramú elrendezésekkel végrehajtott numerikus model- lezések	44
3.3.1. Kimutathatósági mélység vizsgálat	44
3.3.2. Horizontális fölbontóképesség vizsgálat	59
3.4. A különböző egyenáramú elrendezésekkel végrehajtott analóg modellezések	62
3.4.1. Kimutathatósági mélység vizsgálat	66

3.4.2.	Horizontális fölbontóképesség vizsgálat	80
3.4.3.	Egyes modellhibák vizsgálata	83
3.5.	Összefoglalás	90
3.6.	Az értekezés eredményeinek hasznosítási lehetőségei és a kutatás folytatásának irányai	96

A dolgozat témája és célkitűzései

A vertikális elektromos szondázást egydimenziós - azaz horizontális rétegsorból álló - geológiai problémák föltárására kezdték el alkalmazni az 1900-as évek elején. Ma már több, mint száz egyenáramú elrendezés létezik. A gyakorlatban az az 5-6 konfiguráció terjedt el amelyek kivitelezése és a mért adatainak földolgozása nem okozott különösebb nehézséget. Ezeket összefoglalóan hagyományos elrendezéseknek fogom nevezni. Az utóbbi évtizedekben a geoelektromos módszer alkalmazási köre kibővült, két-, sőt háromdimenziós modellel közelíthető problémákra is kiterjedt, viszont ugyanazt a néhány elrendezést alkalmazzák a mai napig, amelyeket a kezdetekben, az egydimenziós geológiai problémák föltárására használtak. Ugyanakkor a felhasználási kör kibővülésével és az elektromos ellenállás tomográfia (EET) elterjedésével kialakult az igény arra, hogy a mérésekkel kapható információt próbálják meg maximalizálni, de általában a hagyományos elrendezések leképezési tulajdonságait vizsgálják különböző modellekre nézve.

Néhány évtizeddel ezelőtt a Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetben fölmerült bizonyos speciális érzékenységgű elrendezések kutatásának a lehetősége, melyek különösen érzékenynek tűntek a többdimenziós változásokra. Az általam vizsgált γ -típusú elrendezések ezek egy típusának, az ún. kvázi-null elrendezéseknek olyan változatai, amelyek az EET mérések során alkalmazhatóak. A gyakorlatban az ilyen speciális érzékenységgű konfigurációk, így a γ -típusú elrendezések sem terjedtek el az adatfeldolgozás megoldatlansága miatt.

A Prácser Ernő által írt kétdimenziós inverziós algoritmusnak és a mérési adatok feldolgozásának módosításával a γ -típusú elrendezések adatfeldolgozása körüli problémák megoldódtak. Dolgozatomban numerikus és analóg modellezéssel vizsgáltam a γ -típusú és a hagyományos elrendezések bizonyos kétdimenziós leképezési tulajdonságait, így a kimutathatósági mélységüket (lemez és henger modell esetében) és horizontális fölbontóképességüket, valamint csak analóg modellezéssel bizonyos modellhibák hatását. Az analóg modellezéshez egy olyan környezetet alakítottam ki, ahol a terepi mérésekhez viszonylag közel álló körülmények között végeztem a vizsgálataimat. A célom egyrészt az analóg modellezés során a γ -típusú elrendezések zajjal terhelt közegben való alkal-

mazhatóságának vizsgálata volt. Másrészt a γ -típusú elrendezések leképezési tulajdonságainak összevetése a hagyományos elrendezésekével ugyanazokon a numerikus és analóg modelleken keresztül.

1. fejezet

Elméleti alapok

1.1. Az egyenáramú ellenállás módszer fizikai alapja és elve

Az egyenáramú ellenállás módszer a leggyakrabban alkalmazott geoelektromos módszer. A Föld felszínén végzett mérések alapján a felszín alatti elektromos fajlagos ellenállás eloszlásáról kapunk képet. Mélységi változások kimutatását az áram betáplálási pontok távolításával érjük el, míg ha a látszólagos fajlagos ellenállás változását egy meghatározott vízszintes irányban akarjuk nyomon követni, akkor a kiválasztott elrendezéssel az elegendően sűrűn megválasztott pontokban mérve kell végighaladnunk a kiválasztott egyenes szakasz mentén.

A kőzetmintákra, illetve földfelszín alatti kőzetekre elektromos feszültséget kapcsolva azokban áramvezetés lép föl. A kőzetekre nagyon jó közelítéssel érvényes az *Ohm-törvény*, tehát a közethasáb két végére kapcsolt V elektromos feszültség és a hasábon áthaladó I áramerősség között egyenes arányosság van, és az arányossági tényező az R ellenállás. A tapasztalatok szerint a R ellenállás egyenesen arányos a hasáb l hosszával és fordítottan arányos a hasáb A keresztmetszetével, az arányossági tényező ρ , a kőzet **elektromos fajlagos ellenállása**, mely olyan kőzetfizikai tényezőktől függ, mint:

- porozitás
- nedvességtartalom

Kőzet	ρ (Ωm)	Kőzet	ρ (Ωm)
Kavics (száraz)	$10^2 - 10^4$	Mészkö, dolomit	$10^2 - 10^4$
Homok (száraz)	$10^3 - 10^4$	Homokkő	$50 - 10^4$
Kavics (víztelített)	$50 - 10^3$	Gránit, gneisz	$10^2 - 10^7$
Homok (víztelített)	$20 - 10^2$	Andezit	$10^2 - 10^5$
Agyag	$2 - 20$	Diorit	$10^2 - 10^8$
Agyagmárga	$5 - 50$	Bazalt	$10^2 - 10^6$

1.1. táblázat. Néhány kőzet elektromos fajlagos ellenállása. Forrás: [Szarka, 1997].

- az oldott sók mennyisége és minősége
- a kőzetalkotó ásványok fajlagos ellenállása
- a kőzet szerkezeti sajátosságai

A felsorolt tényezők közül a kőzet fajlagos ellenállásának kialakításában döntő szerepe a nedvességtartalomnak, azaz a pórusokban levő elektrolitnak van. Amint azt a 1.1. táblázatból is látjuk, az adott kőzet fajlagos ellenállása is igen széles tartományban változik, nem csak a különböző kőzeteké egymáshoz képest.

1.1.1. A látszólagos fajlagos ellenállás meghatározása

A látszólagos fajlagos ellenállás bevezetésekor Bhattacharya és Patra (1968) levezetését követem. Az áram terjedése a féltérben a töltésmegmaradás törvényén alapszik és kifejezhető a következő módon:

$$\text{div} \mathbf{j} = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (1.1)$$

ahol $\mathbf{j}$ [$\frac{A}{m^2}$] az áramsűrűség és q [$\frac{C}{m^2}$] a töltéssűrűség. Az 1.1 egyenletet *kontinuitási egyenletnek* is nevezik, mely a stacionárius áram esetében:

$$\text{div} \mathbf{j} = 0 \quad (1.2)$$

kifejezésre egyszerűsödik. Amennyiben ρ [Ωm] a közeg ellenállása és az áramsűrűség $\mathbf{j}$, akkor $\mathbf{j}$ és az $\mathbf{E}$ [$\frac{V}{m}$] elektromos mező közötti kapcsolatra fölírható *Ohm törvénye*:

$$\mathbf{j} = \frac{1}{\rho} \mathbf{E} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } V \quad (1.3)$$

ahol V [V] az elektromos potenciál. Izotróp közeg esetében a ρ skaláris függvénye a mérési pontnak, valamint a $\mathbf{j}$ és $\mathbf{E}$ vektorok egyirányba mutatnak, míg anizotróp közeg esetében $\mathbf{j}$ nem feltétlenül esik egybe $\mathbf{E}$ irányával. Az 1.2 és az 1.3 egyenletekből izotróp közegre megkapjuk az elektromos egyenáramú kutatás alapegyenletét:

$$\text{div} \left(\frac{1}{\rho} \text{grad } V \right) = 0 \quad (1.4)$$

vagy:

$$\text{grad} \left(\frac{1}{\rho} \right) \text{grad } V + \frac{1}{\rho} \text{div grad } V = 0 \quad (1.5)$$

Homogén közegben ρ független a koordináta-rendszertől, így az 1.5 egyenlet

$$\text{div grad } V = 0 \quad (1.6)$$

alakra egyszerűsödik, vagy más alakban:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (1.7)$$

Az elektromos potenciál eloszlása egyenáramok esetében homogén, izotróp közegben kielégíti a *Laplace-egyenletet*, mely gömbi koordinátákkal:

$$\Delta V = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} V \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} V + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} V \right) \quad (1.8)$$

Feltételezzük, hogy a felszínen egy homogén közegbe I áramot vezetünk egy végtelenben elhelyezkedő tetszőleges P pontban. Ekkor a potenciál P -től r távolságban csak r -től fog függeni, emiatt az 1.8 egyenletben a ϕ -től és θ -tól függő tagok nullával lesznek egyenlőek.

$$\frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dV}{dr} = 0 \quad (1.9)$$

egyenletet kapjuk, melynek megoldása:

$$V = C_1 + \frac{C_2}{r} \quad (1.10)$$

A forrástól nagy távolságban a potenciál értékét nullának tekinthetjük, ezért C_1 integrálási konstans nulla lesz. Az ekvipotenciális felületek az elektromos tér erővonalaiival gömbszimmetrikusak, míg az áramvonalak iránya radiális. Az áramsűrűség r távolságban fölírható:

$$\mathbf{j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{1}{\rho} \frac{C_2}{r^2} \quad (1.11)$$

Ennek megfelelően az r sugarú gömbfelületen átfolyó teljes áram:

$$4\pi r^2 \mathbf{j} = \frac{4\pi}{\rho} C_2 \quad (1.12)$$

Mivel ez egyenlő I -vel, a P pontban bevezetett teljes árammal, ezért az 1.12 egyenletből C_2 kifejezhető: $C_2 = I\rho/4\pi$, mely a teljes térre vonatkozik, melyből megkapjuk a homogén féltér potenciálját:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r} \quad (1.13)$$

A gyakorlatban két elektródán keresztül vezetjük az áramot a földbe, azaz egy forráson és egy nyelőn keresztül; bármely pontban a „bipoláris” elrendezés esetében a potenciál:

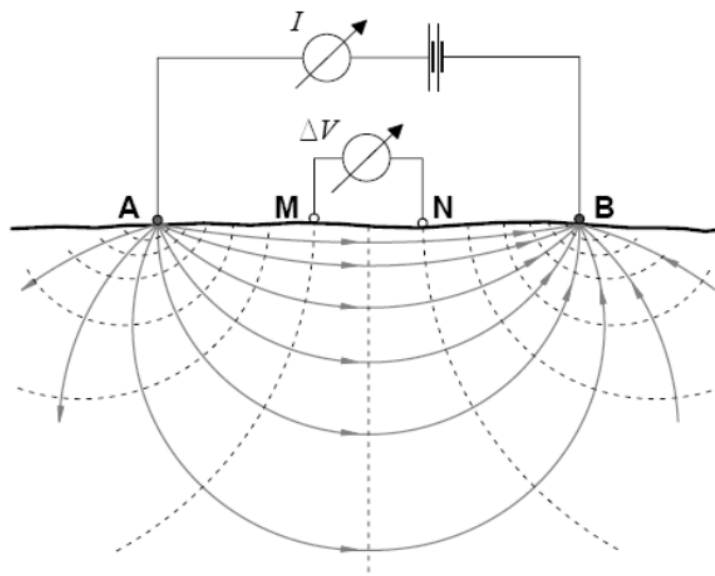
$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.14)$$

ahol r_1 és r_2 rendre a forrásnak és a nyelőnek a P ponttól mért távolsága.

Tekintsünk egy olyan esetet, amikor két pontelektróda, az A és B , ún. áramelektródák segítségével I erősségű áramot táplálunk a homogén izotróp féltérbe. A potenciálkülönbséget M és N potenciáelektródák között a felszínen mérjük (1.1. ábra). Felhasználva az 1.14 egyenletet a potenciálkülönbség meghatározható a következő módon:

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho_a}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\} \quad (1.15)$$

ahol ρ_a a vizsgált féltér *látszólagos fajlagos ellenállása*, mely annak az ekvivalens



1.1. ábra. Az egyenáramú geoelektromos mérés során alkalmazott áramelektrodák (A,B) és potenciálelektrodák (M,N), valamint az áramvonalak (folytonos vonalak) és az ekvipotenciális vonalak (szaggatott vonalak) szemléltetése.

homogén féltérnek az ellenállását jelenti, amely felett ugyanazt mérnénk, amit a kutató inhomogén féltér felett. Az 1.15 egyenletből kifejezhető az úgynevezett k geometriai tényező:

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)} \quad (1.16)$$

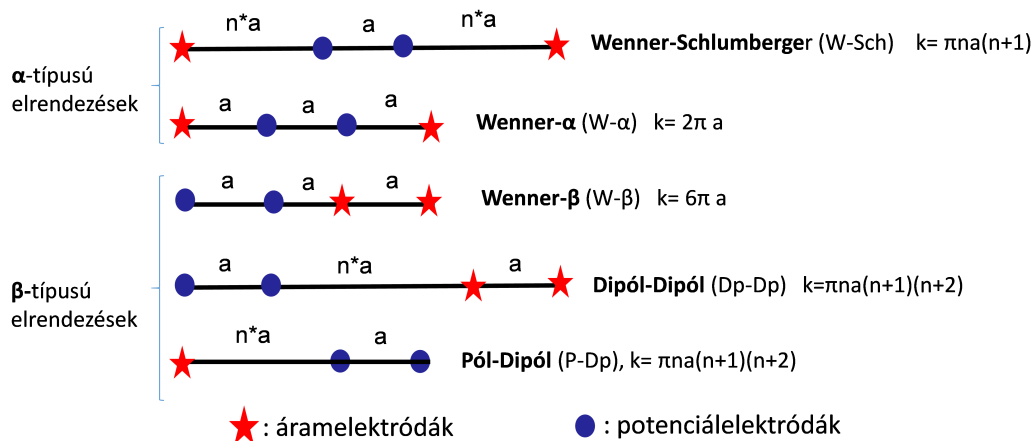
A k geometriai tényező biztosítja, hogy homogén féltér felett, elrendezéstől függetlenül ugyanazt a látszólagos fajlagos ellenállást mérjük.

Az 1.15. egyenletből így kifejezhető a ρ_a látszólagos fajlagos ellenállás:

$$\rho_a = k \frac{\Delta U}{I}. \quad (1.17)$$

A leggyakrabban használt egyenáramú geoelektromos konfigurációk

Mind az áram-, mind pedig a potenciálelektrodákat nem csak a föld felszínén, hanem a felszín alatt, pl.: fúrólyukakban, bányavágatokban, illetve folyók, tavak felszínén, vagy azok medrében is elhelyezhetjük, ily módon rendkívül nagy számú elektróda-elrendezést lehet kialakítani, amelyek közül mindig a megoldandó feladathoz és a mérési



1.2. ábra. A leggyakrabban használt egyenáramú geoelektromos konfigurációk és k geometriai tényezőjük. a és n : az egymáshoz legközelebb elhelyezkedő elektrodák közötti távolság.

lehetőségekhez leginkább megfelelőt kell használni. Eddig csak a felszíni elektróda elrendezésekből több, mint 100-at írtak le és rendszereztek [Szalai és Szarka, 2008a]. Ezek közül a *Wenner-α*, a *Wenner-β*, a *Wenner-Schlumberger*, a *Dipól-Dipól* és a *Pól-Dipól* elrendezésekkel végzik az összes mérés mintegy 90 %-át. A továbbiakban ezeket a konfigurációkat összefoglalóan hagyományos elrendezéseknek fogom nevezni.

Az 1.2. ábra mutatja be az 5 leggyakrabban alkalmazott elrendezést és k geometriai tényezőjüket, melyet az 1.16. egyenlet alapján határoztak meg. Az α -típusú elrendezések esetében az áramelektrodák között helyezkednek el a potenciálelektrodák. A β -típusú elrendezések esetében az áramelektrodákon túl helyezkednek el a potenciálelektrodák. Ahogy azt a 2.1. fejezetben látni fogjuk a γ -típusú elrendezések esetében az áram- és a potenciálelektrodák egymást váltják.

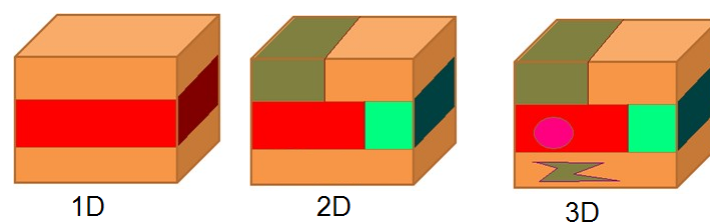
Napjainkban általában két-(2D), vagy háromdimenziós multielektrodás méréseket végeznek. Előbbivel a kutatott féltér látszólagos fajlagos ellenállás eloszlásáról egy keresztmetszeti képet kapunk. A 2D mérés során adott számú elektródát egyszerre helyezünk el egy egyenes mentén, egymástól egyenlő távolságra. A mérést számítógép vezérli az általunk megadott konfiguráció szerint, valamit gyűjti a mért adatokat. Alkalmazása lehetővé teszi az optimalizált konfigurációk kidolgozását és kutatását. Az optimalizált konfigurációk annyiban térnek el a hagyományos konfigurációktól, hogy különböző típusú

elrendezéseket is tartalmazhatnak. Valamilyen szempont szerint kiválasztott elrendezések adják a legjobb eredményeket, azaz elvileg jobb eredményeket képesek adni, mint bármely hagyományos konfiguráció önmagában.

Dolgozatomban a négyelektrodás optimalizált, ún. Stummer [Stummer és tsai., 2004] konfigurációt is vizsgáltam. Esetében az alap Dp-Dp konfiguráció 147 (30 elektrodás rendszer esetében) elrendezéséhez minden esetben úgy adódnak hozzá újabb és újabb elrendezések, hogy az ún. jószág függvény („goodness function”) értéke minden egyes lépésben a lehető legnagyobb mértékben nőjön. A Stummer elrendezés a korábbi numerikus modellezések során a legtöbb esetben jobb leképezési tulajdonságokkal bíró elrendezésnek bizonyult, mint a többi a hagyományos elrendezés [Szalai és tsai., 2013].

1.2. Egyenáramú geoelektromos modellek

A vizsgált hatók egyszerűsített képét nevezzük modellnek, amely valamilyen matematikailag jól kezelhető képe a valóságnak (1.3. ábra). Dolgozatomban csak kétdimenziós (2D) modelleket vizsgáltam. Ekkor a fajlagos ellenállás csak a terítés irányához rögzített koordináta-rendszer két tengelyének irányában változik: horizontálisan (párhuzamosan a terítéssel) és vertikálisan. A gyakorlatban például 2D modellel közelíthetők az egyirányban hosszan elnyúló inhomogenitások, így repedések, alagutak, bányavágatok, csövek és barlangok. Egydimenziós (1D) modellek esetében a fajlagos ellenállás csak vertikális irányban változik, tehát tulajdonképpen a felszínnel párhuzamos rétegzett félteret közelítjük 1D modellel. Háromdimenziós (3D) modellek esetében a fajlagos ellenállás a terítés irányához rögzített koordináta-rendszer mindhárom irányában változik. A gyakorlatban például az üregeket, a barlangokat és az összetett geológiai szerkezeteket közelítjük 3D modellel.



1.3. ábra. Az 1D, 2D és 3D egyenáramú geoelektromos modellek szemléltetése.

1.3. A linearizált geofizikai inverzió és a direkt feladat számítása

A geofizikai információfeldolgozás során a cél, hogy azokról a hatókról információt kapjunk, amelyek valamilyen fizikai jelenség által meghatározták a mért értékeinket. A hatók valamilyen geológia, földtani, esetenként ember alkotta objektumok. Forrásnak is nevezzük őket, mivel valamilyen fizikai teret befolyásolnak.

A direkt feladat számítása során a célunk, hogy a vizsgált modellünkre az adott fizikai rendszernek megfelelő mérési eredményeket meghatározzuk. Az inverzió során a mért adatokat egybevetjük a feltételezett modellen számított adatokkal, és valamilyen – rendszerint a két adatrendszer eltérését alkalmas módon jellemző skaláris függvény szélső értékének megkeresését szolgáló – algoritmus segítségével úgy változtatjuk meg a modellt jellemző paramétereket, hogy a mért és a számított adatok különbsége csökkenjen. Így az előzetesen feltételezett modellt módosítottuk, és az előálló új modellen ismét elméleti adatokat számítottunk, majd ezeket a mérési adatokkal összevetve határozzuk meg a földtani modell paramétereinek újabb korrekcióját. A geofizikai inverzió ezáltal rendszerint iteratív eljárás, amelynek minden szakaszában létezik egy aktuális modell. Az iterációt addig folytatjuk, míg egy előre meghatározott feltétel nem teljesül. Jelen dolgozatban csak a linearizált geofizikai inverzióra térek ki bővebben, de számos más megközelítés is létezik, illetve kutatási lehetőséget rejt magában ez a téma is, ilyen például az ún. kombinált inverziós eljárás (CGI), vagy a kombinált súlyozott inverziós eljárás (CGWI) fejlesztése [Gyulai és tsai., 2014], [Gyulai és Szabó, 2014].

A pontforrás potenciálja a rétegzett féltér felszínén a Laplace-egyenlet megoldásával, a határ- és peremfeltételek figyelembevételével:

$$V_{r,0} = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} + 2 \int_{-\infty}^{\infty} K(m) J_0(mr) dm \right) \quad (1.18)$$

ahol r a pontelektródától mért távolság, J_0 a nulladrendű Bessel-függvény, m a szeparációs állandó és $K(m)$ a földtani információkat hordozó magfüggvény.

Az 1.4 egyenlet diszkretizálásának egyik módja a *véges különbségek* módszere. Fölveszünk egy véges kiterjedésű rácsot az (x, z) síkon és a V skalár potenciálkülönbséget ezekben a rácspontokban számítjuk ki. A módszer lényege az, hogy meghatározzuk azt a lineáris kapcsolatot, amely a szomszédos rácspontok potenciál értékei között fennáll. Ezek együttesen egy lineáris egyenletrendszer alkotnak [Prácsér, 1998].

A **lineáris inverzió** alapja az a feltételezés, hogy az adatok és a modell között lineáris függvénykapcsolat van, amit egy $N * M$ méretű mátrix fejez ki. Tegyük föl, hogy ismerjük az f függvényt, amely a $\mathbf{p}$ modellparaméterekhez hozzárendeli az $\mathbf{m}$ adatvektort:

$$\mathbf{m} = f(\mathbf{p}) \quad (1.19)$$

$\mathbf{p}$ N dimenziós, $\mathbf{m}$ M dimenziós. Az inverzió feladata az 1.19 leképezés invertálása, olyan $\mathbf{p}$ modellparaméter vektor keresése, amelyre pl. a

$$\|\mathbf{m} - f(\mathbf{p})\| = \min. \quad (1.20)$$

L_2 norma minimális lesz. Az f leképezés nem lineáris, ami megnehezíti az inverziót, ezért ennek a Taylor sorfejtett első két tagját vesszük:

$$\mathbf{m} + \Delta \mathbf{m} = f(\mathbf{p}) + J \Delta \mathbf{p} \quad (1.21)$$

Az 1.21 egyenletben J az f leképezéshez tartozó $M * N$ -es Jacobi mátrix. Tételezzük föl, hogy a J Jacobi mátrix szinguláris értékek szerinti felbontása:

$$J = U \Lambda V^T \quad (1.22)$$

ahol Λ a sajátértékeket tartalmazó átlós mátrix. Az U mátrix az adattérbeli, a V mátrix

a paraméterbeli sajátvektorokat tartalmazza. Ekkor a

$$\|J\Delta\mathbf{p} - \Delta\mathbf{m}\|^2 \quad (1.23)$$

menyiségét minimalizáló $\Delta\mathbf{p}$ paramétervektor a Lánczos inverzzel kapható meg:

$$\Delta\mathbf{p} = V\Lambda^{-1}U^T\Delta\mathbf{m} \quad (1.24)$$

A gyakorlatban az $R\Delta\mathbf{p}$ vektort tudjuk számítani, ahol $R = VV^T$ a fölbontóképeség mátrix. Az egyes paramétereket nem tudjuk meghatározni, csak azoknak egy lineáris transzformáltját. Ez azt jelenti, hogy ha a fölbontóképeség mátrix az egységmátrixtól különbözik, az egyes paramétereket külön-külön nem tudjuk kiszámítani, csak azoknak egy lineáris transzformáltját. Az 1.24 egyenlet nem ad stabil megoldást, ha a sajátértékek között nagyon kis érték is van. Ebben az esetben az U és V mátrixok legkisebb sajátértékekhez tartozó oszlopait elhagyjuk, vagy pedig α csillapító taggal Λ inverzének a j -ik elemét a következő képlet szerint számítjuk:

$$\frac{\lambda_j}{\lambda_j^2 + \alpha} \quad (1.25)$$

$\frac{1}{\lambda_j}$ helyett. Az 1.23 egyenlet minimalizálása másképpen is megoldható:

$$\Delta\mathbf{p} = (J^T J)^{-1} J^T \Delta\mathbf{m} \quad (1.26)$$

Ha $(J^T J)^{-1}$ létezik, akkor az ekvivalens a szinguláris értékek szerinti fölbontással. A szinguláris értékek szerinti fölbontás nagy előnye, hogy mindig létezik, ellentétben $(J^T J)^{-1}$ -vel.

A mért és a szintetikus adatokat minden esetben **simító inverzióval** dolgoztam föl. Legyen $\mathbf{m}_m$ a mért adatokat tartalmazó vektor, $\mathbf{p}_0$ a modellparamétereket tartalmazó vektor, melyhez az $\mathbf{m}_0$ vektor tartozik. Az a cél, hogy a paraméter vektort egy $\mathbf{p}$ vektor hozzáadásával úgy változtassuk meg, hogy a $\mathbf{p}_0 + \Delta\mathbf{p}$ -hez tartozó $\mathbf{m}_0 + \Delta\mathbf{m}$ adatvektor

$\mathbf{m}_m$ -hez közelebb legyen. $\Delta \mathbf{m}$ ismert, értéke $\mathbf{m}_m - \mathbf{m}_0$. $\Delta \mathbf{p}$ és $\Delta \mathbf{m}$ között érvényes a

$$\Delta J \mathbf{p} \approx \Delta \mathbf{m} \quad (1.27)$$

összefüggés, ahol J a *Jacobi mátrix*. A cél a következő mennyiség minimalizálása:

$$\|J \Delta \mathbf{p} - \Delta \mathbf{m}\|^2 + \lambda \|S(\mathbf{p}_0 + \Delta \mathbf{p})\|^2 \quad (1.28)$$

ahol S a simító mátrix, λ pedig egy állandó, amivel a simítás és az illesztés viszonyát lehet szabályozni. A szakirodalomban az 1.28 egyenletnek megfelelő képlet gyakran $\mathbf{p}_0$ nélkül szerepel, ez azonban csak azt biztosítja, hogy a paraméterek megváltoztatását leíró függvény sima legyen. A cél pedig az, hogy az inverzió eredményeként kapott modellt leíró függvény legyen sima. A 1.28 akkor lesz minimális, ha valamennyi $\mathbf{p}_i, i = 1, N$ szerinti deriváltja 0. A $\mathbf{p}_1$ szerinti deriváltakat vektor alakban írva:

$$2(J^T J \Delta \mathbf{p} - J^T \Delta \mathbf{m}) + 2\lambda(S^T S \mathbf{p}_0 + S^T S \Delta \mathbf{p}) = 0 \quad (1.29)$$

Ezt átrendezve kapjuk:

$$\Delta \mathbf{p} = (J^T J + \lambda S^T S)^{-1} (J^T \Delta \mathbf{m} - \lambda S^T S \mathbf{p}_0) \quad (1.30)$$

Minél nagyobb lambda értéke, annál inkább a simítás hatása érvényesül, az illeszkedés rovására [Prácsér, 2015].

A mért és a számított adataink közötti különbségek meghatározására statisztikai normákat használunk. Az L_p -norma ([Menke, 1984]) az egyik legáltalánosabb hibafüggvény, mely a következőképpen definiálható:

$$L_p = \left(\sum_{i=1}^n |\rho_i^m - \rho_i^c|^p \right)^{1/p} \quad (1.31)$$

A ρ_i^c a számított, míg a ρ_i^m a mért látszólagos fajlagos ellenállás értékeket jelentik, n az adatok száma, p pedig egy tetszőleges valós szám. Az L_p -norma egyik változata a

legkisebb négyzetek elvére épülő L_2 -norma [Lines és Treitel, 1984]:

$$L_2 = \left(\sum_{i=1}^n |\rho_i^m - \rho_i^c|^2 \right)^{1/2} \quad (1.32)$$

Az inverziós eljárás során esetemben az RMS értéke adta meg a mért és a számított látszólagos fajlagos ellenállás értékek hibáját.

$$RMS = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_i^m - \rho_i^c}{\rho_i^m} \right)^2 \right)^{1/2} * 100 \quad (1.33)$$

A mért adataink a legkülönbözőbb valószínűségi eloszlásúak is lehetnek és nagyon gyakran az ún. kieső adatokra is számítanunk kell, ezért van szükség ún. robusztus és rezisztens statisztikai eljárásokra, amelyek jól tudják a vizsgált adatrendszerrel kezelni függetlenül az adateloszlás típusától. Steiner a leggyakoribb értékek elvére épülő P_k -normát a következőképpen definiálta:

$$P_{k;n} = \epsilon \left(\prod_{i=1}^n \left(1 + \frac{\rho_i^m - \rho_i^c}{(k\epsilon)^2} \right) \right)^{1/2n} \quad (1.34)$$

ahol ϵ a skálárparaméter, vagy dihézió [Steiner, 1990].

1.4. Az egyenáramú méréseket eredményeit befolyásoló zajok

A geoelektromos modell feltételezése azt jelenti, hogy a rendkívül bonyolult reális körülményeket idealizálják, leegyszerűsítik, matematikailag kezelhetővé alakítják.

A modell fizikai oldala többnyire a **gerjesztés és az észlelés idealizációiból** áll. Egyenáramról szokás beszélni akkor is, ha a gerjesztés néhány hertz frekvenciájú szinuszosan-, vagy négyszöghullám szerint változó váltakozó-áram. Az árambevezető elektródák mérete a vizsgált térrészhez képest elhanyagolható legyen, ekkor azok idealizált pontszerű áramforrással helyettesíthetők. Ideális esetben a mérőelektródák ugyancsak pontszerűnek tekinthetők [Drahoš és tsai., 1987].

EET mérések esetében ügyelni kell a elektróda szekvencia sorrendjére, ugyanis

az **áramelektrodák polarizációja** még a négyszöghullám szerint változó váltóáram esetében is percekig fennállhat és hatása nagyságrendekkel nagyobb lehet, mint az indukált jel [Dahlin, 2000].

Műszerzaj, ezen belül műszerjárás esete a jel változását jelenti az idő függvényében. Az **elektromos vezetékekből** származó zajokat, az 50 Hz és felharmonikusait az általunk használt műszer kiszűri. Jól vezető földelt fémes testek (pl.: fém kerítés, fémsodrony szőlőkordon, fémcsövek, távvezetékek) is jelentősen módosítják a felszíni potenciáleloszlást.

Az idealizált **geológiai modelltől való eltérés** is minden mérés során előfordul. A geoelektromos módszereknél leggyakoribb idealizációk:

- homogén fajlagos ellenállású sík határfelületű féltér
- homogén fajlagos ellenállású végtelen vízszintes rétegekből felépített féltér
- homogén fajlagos ellenállású féltérbe beágyazott egyszerű geometriai alakú (pl.: végtelen lemez, gömb, végtelen hasáb, véges hasáb) a féltér értékétől eltérő fajlagos ellenállású inhomogenitás
- sík határfelületű féltér, amelyben két különböző homogén fajlagos ellenállású tartományt egyszerű alakú felület választ el [Drahoš és tsai., 1987]

A hagyományos elrendezések esetében a **elektrodák pontatlan pozicionálásából** származó hibák elhanyagolhatóak, kivéve, ha a terepi viszonyok nem teszik lehetővé, hogy a kívánt helyre szúrjuk az elektródát. Abban az esetben, ha ilyen problémával találkozunk az elektródát a profil irányára merőlegesen kell elmozdítani a kívánatos helyéhez viszonyítva, nem pedig a profil irányában [Szalai és tsai., 2007].

1.5. Az analóg modellezés

Az analóg, vagy fizikai modellezés lényege, hogy a terepi mérés minden geometriai méretét ugyanabban a méretarányban lekicsinyítjük egy kísérleti úton kényelmesen kezelhető méretre.

A modellezés törvényét a *Maxwell*-egyenletekből Dosso vezette le [Dosso, 1967]:

$$\sigma_m f_m d_m^2 = \sigma_t f_t d_t^2 \quad (1.35)$$

ahol, σ a vezetőképesség, f a frekvencia és d a geometriai méret. A „ t ” és „ m ” indexek a természeti és a modell paramétereit jelentik. Esetemben az 1.35 egyenlet egyszerűsödik, mivel f_t és f_m egyenlők.

A modellezés elvi problémái: A talajt modellező anyagnak tökéletesnek homogénnek kell lennie. Talajminta alkalmazása esetén a modell kis méretei mellett még a leg gondosabb kezelés mellett sem kerülhetők el a kisebb lokális inhomogenitások. Ilyen kis méretek esetében a tökéletes homogenitás csak elektrolit alkalmazásával biztosítható. Mivel azonban az elektrolitok vizes oldatok, a modellben az egyenáramú mérésekről le kell mondani, hiszen egyenáram bevezetésekor az elektródákon polarizáció, majd vízbontás indul meg. Váltóáram alkalmazása mellett - elegendően magas frekvenciáknál - az elektródák polaritása olyan gyorsan változik, hogy nincs idő a polarizáció és a vízbontás megindulásához [Ujfaludi, 1973].

Az 1970-es évek végén a Geofizikai Kutató Vállalat, az Eötvös Lóránd Geofizikai Intézet és az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet (GGKI) geoelektromos - főként elektromágneses - laboratóriumi modellkísérletek megindítását és koordinált végzését tűzte ki célul. A negyedik együttműködő partner a Híradástechnikai Ipari Kutató Intézet volt, vállalva az egyedi célú berendezések fejlesztésével járó nehézségeket. Három kutatási területen indult meg a modellezés alkalmazása:

- A földkéreg és a felső köpeny felépítésének, tehát a nagy mélységű szerkezetek vizsgálata elektromágneses indukciós szondázással,
- A Pannon-medence nagy ellenállású aljzatának, illetve az üledékes rétegsor sajátosságainak meghatározása a szénhidrogén-kutatási feladatokhoz kapcsolódva, elektromos- és elektromágneses frekvenciaszondázásokkal,
- A magyar középhegységekben, illetve annak előterében lévő pár száz m-nél mélyebb medencék vizsgálata kisfrekvenciás és egyenáramú módszerekkel bauxit- és szénkutatás céljából. [Ádám és tsai., 1981]

Szarka a GGKI elektromágneses modellező laboratóriumában szigetelő aljzatú kétréteges féltérben a tápelektrodák között elhelyezkedő nagy ellenállású kiemelkedések hatását mérte meg. A modellmérési adatokból mélységszámítási eljárással hatófelületeket határozott meg, amelyeknek a tényleges szerkezetekkel való összehasonlítása hasznos információt szolgáltat a terepi mérési módszer, valamint az adatfeldolgozási eljárás alkalmazhatóságára nézve [Szarka, 1980].

Spitta a Föld belsejében elhelyezkedő jó elektromos vezetőképességű szerkezeteket modellezett különböző alumínium testekkel [Spitta, 1973].

Bania és Cwiklik az elektródákön föllépő polarizáció ellenére egyenáramú analóg modell méréseket végeztek elektrolitban. Egy épület alatt elhelyezkedő 3 m mély üres pince oldalhatását vizsgálták az épülettől különböző távolságokban. Analóg modell mérésekkel igazolták a terepi méréseik során kapott eredményeket [Bania és Cwiklik, 2013].

2. fejezet

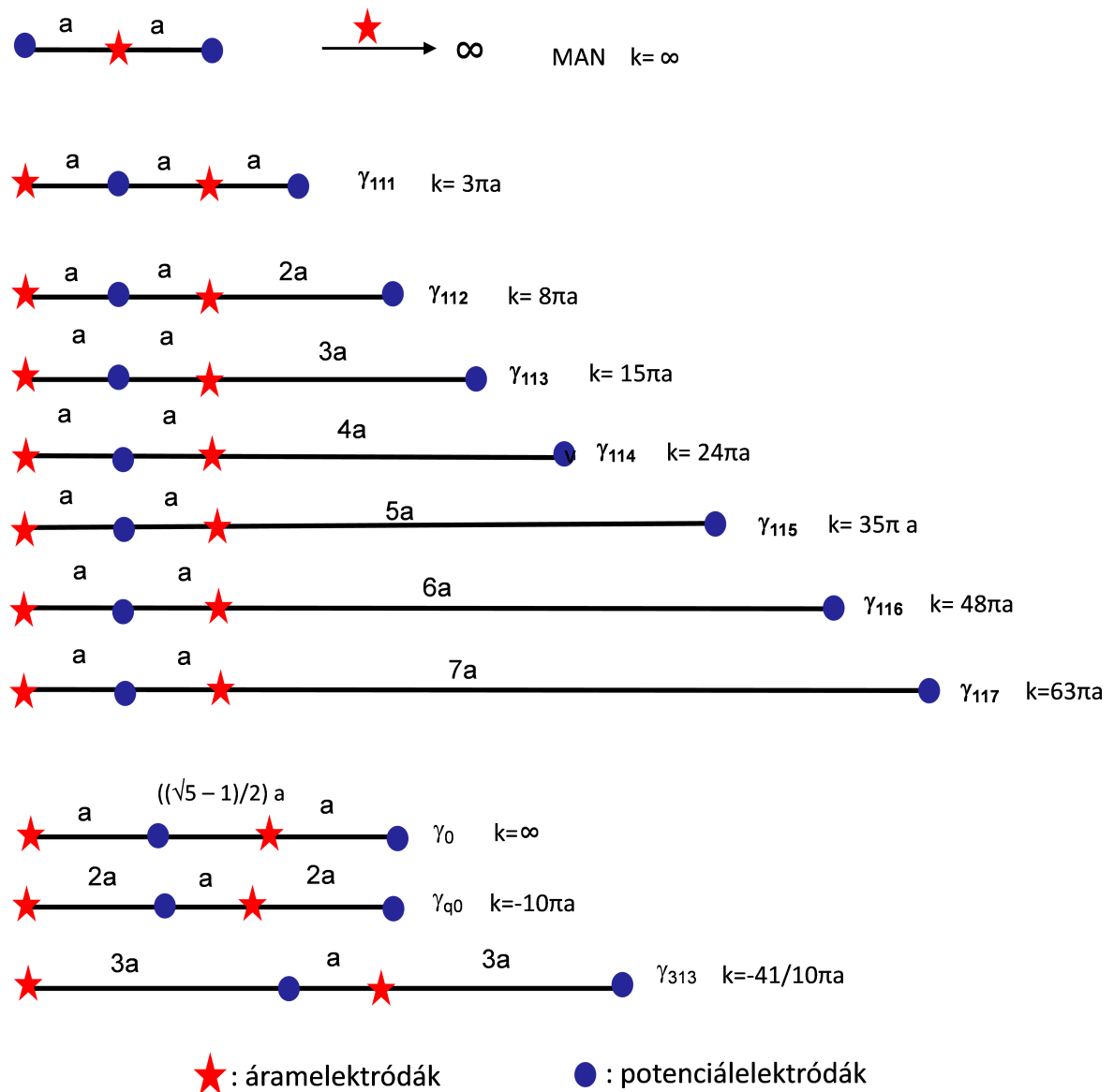
A γ -típusú elrendezések kutatásának előzményei

2.1. A null és a kvázi-null geoelektromos elrendezések

A null elrendezések alatt olyan elektróda elrendezéseket kell érteni, amelyek esetében a homogén féltér felszínén a mérőelektródák között mért potenciálkülönbség nulla lenne. A több, mint 100 leírt elrendezés [Szalai és Szarka, 2008a] mintegy negyede a null elrendezések 3 típusába sorolható. Ezek közül a fókuszált null elrendezések gyakorlatban történő mellőzését az indokolja, hogy több áramkörre lenne szükség a mérésekhez. Az összetett null elrendezések esetében pedig több mérésből kapott adatból számítjuk ki az eredményt. A geometriai null elrendezések gyakorlati alkalmazása a legegyszerűbb. Ekkor a null helyzet az elektródák megfelelő geometriájú elhelyezésével érhető el [Szalai, 2002].

A Szarka László témavezetése alatt folyó diplomamunka mérései közben találkozott először Szalai Sándor a null elrendezésekkel, valamint ekkor merült föl ezeknek a speciális érzékenységűnek tűnő elrendezéseknek a kutatása is [Szalai, 1993].

Miután a 2D elektromos ellenállás tomográfia (EET) alkalmazása általánossá vált a geoelektromos egyenáramú kutatásban, fölmerült a lineáris null elrendezések vizsgálatának lehetősége is. Egy lineáris null elrendezés létezik, a MAN konfiguráció. A 2.1. ábra szemlélteti a paramétereit. Szalai és társai többek között a MAN elrendezéssel ta-



2.1. ábra. A MAN , a γ_0 és a dolgozatban vizsgált γ -típusú egyenáramú geoelektromos elrendezések geometriája és k geometriai tényezője, melyet az 1.16 képlet szerint határoztam meg. a : az egymáshoz legközelebb elhelyezkedő elektrodák közötti távolság.

nulmányoztak egy függőlegesen repedezett mészkő tömböt, majd a profilmérés során kapott anomáliákat, a hagyományos elrendezésekkel mért $\Delta U/I$ értékkel és magukkal a repedésekkel vetették össze. Eredményeik szerint a null elrendezések a mélyebben elhelyezkedő repedéseket pontosabban kimutatták, mint a hagyományos elrendezések [Szalai és tsai., 2002].

Bebizonyosodott, hogy profilmérés során bizonyos kétdimenziós hatók esetében hasznos információkkal is szolgálhatnak a null elrendezések. Az alkalmazhatóságukat vizsgálni kezdték az EET mérésekre is. Számos probléma adódott az elméleti végtelen elektróda pozíciójával, illetve a mért adatok inverziójával is. Ezek miatt fordult Szalai a kvázi-null elrendezések tanulmányozása felé.

A γ_{11n} elrendezések is ebbe a csoportba tartoznak, esetükben a MAN elrendezés elméleti végtelenben elhelyezkedő elektródája véges távolságba kerül, ahogy azt látjuk a 2.1. ábrán. A kereskedelmi forgalomban kapható inverziós programok csak kis hatású ható esetében tudták invertálni a mért látszólagos fajlagos ellenállás értékeket, valamint a mért negatív látszólagos fajlagos ellenállás értékeket sem tudták kezelni. A Prácser Ernő által írt inverziós algoritmus a korábban föllépő problémákat megoldotta, így elméletben minden feltétel adott volt a γ_{11n} elrendezések vizsgálatához.

A 2.1. ábrán látjuk, hogy az n értékének növekedésével a γ_{11n} elrendezéseknek egyre nagyobb a k geometriai faktora, mely a MAN elrendezés esetében már végtelen lesz.

A γ_0 elrendezést, ami egy másik lineáris null elrendezés, nem lehet az EET mérések során alkalmazni, mivel a geometriája ezt nem teszi lehetővé, ahogy azt látjuk a 2.1. ábrán. Kissé módosított változata, a γ_{q0} elrendezés viszont már beépíthető a multi-elektrodás mérésekbe. A teszt mérések során fölmerült bennem a γ_{q0} elrendezés geometriájának módosítása, így kaptam a γ_{313} elrendezést (2.1. ábra), melynek leképezési tulajdonságait a többi elrendezéshez hasonlóan vizsgáltam, mivel a vele kapott kezdeti eredmények biztatóak voltak.

2.2. Az egyenáramú elrendezések paraméter-érzékenység térképeinek vizsgálata

A különböző mélységekre vonatkozó paraméter-érzékenység térképek (PÉT) megmutatják, hogy az adott mélységben, különböző koordinátájú pontokban elhelyezkedő elhanyagolható méretű, a környezetétől eltérő fajlagos ellenállású hatók mekkora hatással lennének az adott elrendezéssel mért látszólagos fajlagos ellenállásra. Roy és Apparao a *normált mélységérzékenység-karakterisztika* függvényeket vizsgálták az egyes elrendezések kutatási mélységének megállapításához [Roy és Apparao, 1971]. Barker ábrázolt először paraméter-érzékenység térképeket néhány lineáris elrendezésre, majd használta ezeket értelmezésre [Barker, 1979]. A paraméter-érzékenység kérdésének egy másfajta megközelítésében Gyulai a mélység- (vastagság) és fajlagos ellenállás érzékenység definíciója után különböző telepes modellekre (szén, bauxit) számított paraméter-érzékenység függvényeket [Gyulai, 1989]. Noel és Xu kétdimenziós érzékenységi vizsgálatokat végeztek [Noel és Xu, 1991]. Hursán a numerikusan számított térképein részletesen vizsgálta a Dipól-axiális és Dipól-ekvatoriális elrendezéseket [Hursán, 1996].

Az egyenáramú (stacionárius) tér hatására keletkező elektromos töltések (inhomogén térben tértöltések, a határfelületeken felületi töltések) révén az egyenáramú anomáliák az elektrosztatikus töltéshatást leíró Coulomb-törvény révén is értelmezhetők. [Szarka, 1990], [Szarka, 1992]. Az elsődleges pontforrások mellett ezek a keletkező töltések lesznek a kialakuló elektromos tér másodlagos forrásai. A geoelektromos anomália forrása túlnyomórészt a határfelületeken a gerjesztő tér hatására kialakuló elektromos töltéseloszlás.

Szalai és Szarka azzal az egyszerű feltételezéssel élt, mely szerint elektromos dipólként kezeli az inhomogenitás (kocka) szemközti lapjain fölhalmozódó negatív, illetve pozitív töltéseket [Szalai és Szarka, 2000], [Szalai és Szarka, 2008b] és [Szalai és Szarka, 2008c]. Ez lehetővé teszi a másodlagos tér számítását, mintha azt a kockával összefüggésben lévő, három egymásra merőleges dipól rendszere okozná. Ez a felfogás hasonló Zhdanov és Keller *Born-féle* közelítéséhez [Zhdanov és Keller, 1994].

A határfelületen felhalmozódó töltésre fölírható a következő egyenlet

[Li és Oldenburg, 1991]:

$$\tau = 2\epsilon_0 k_h E_b \quad (2.1)$$

A 2.1 egyenletben E_b az elektromos térerősség határfelületre merőleges komponense, amely homogén térben lépne föl. E_b elektromos tér két eltérő vezetőképességű közeg határán τ felületi töltéssűrűséget hoz létre k_h ellenálláskontraszt esetében, melynek értéke $k_h = \frac{\rho - \rho_1}{\rho + \rho_1}$. ϵ_0 a dielektromos állandó.

p_i ($i = x, y, z$) megfelel az a oldalhosszúságú kocka egyes oldalpárjai által képzett dipólmomentum komponenseknek:

$$p_i = \frac{\epsilon_0 \rho I}{\pi} k_h a^3 G_i^{cur}, \text{ ahol } G_i^{cur} = \sum_{cur=1}^N \frac{i_{cur} - i_C}{r_{curC}^3} \quad (2.2)$$

ahol r_{curC} ($cur=1, \dots, n$) az áramelektrodák távolsága a kocka C középpontjától, i_C a kocka középpontja helyvektorának i irányú komponense és i_{cur} az áramelektrodák helyvektorának i irányú komponense. Ha:

$$G_i^{MN} = \frac{i_C - i_M}{r_{CM}^3} + \frac{i_N - i_C}{r_{CN}^3}, \text{ akkor } \Delta V^{cube}(p_i) = \frac{p_i}{2\pi\epsilon_0} G_i^{MN} = \frac{\rho I}{2\pi^2} k_h a^3 G_i^{cur} G_i^{MN} \quad (2.3)$$

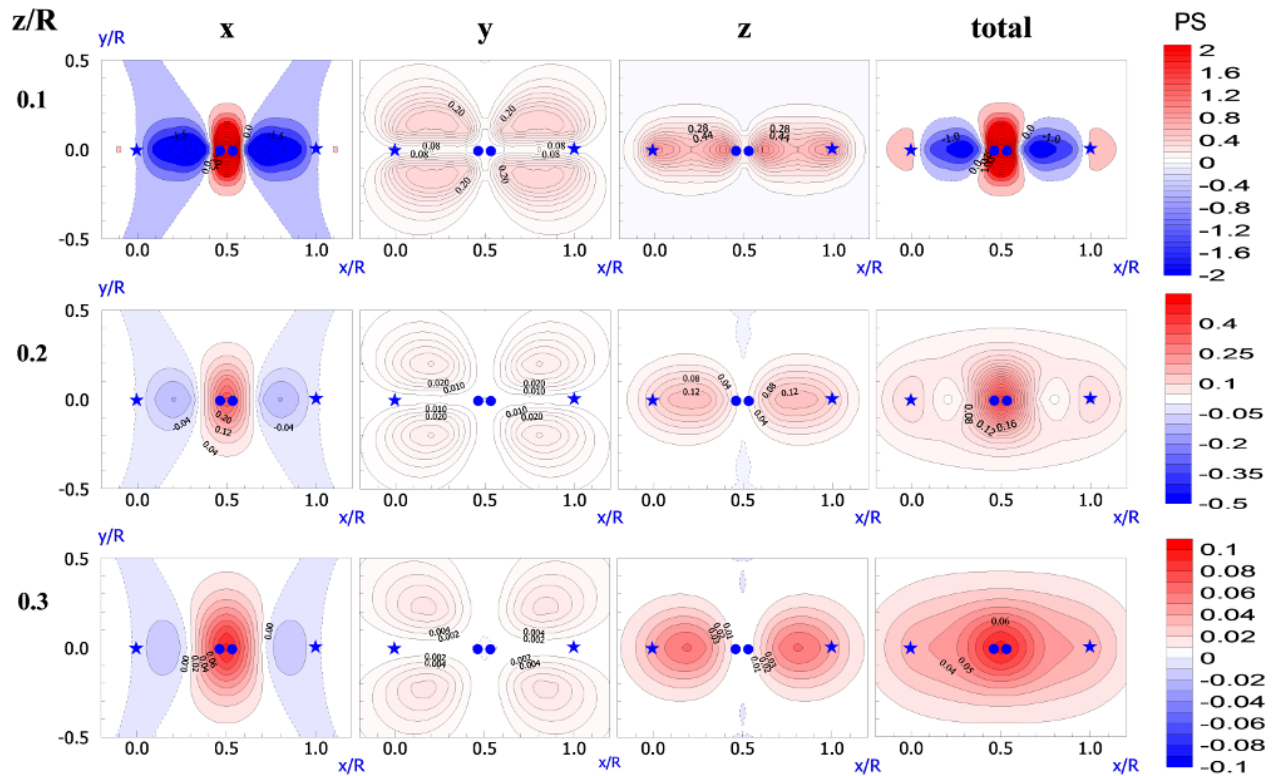
ahol i_M és i_N a potenciálelektrodák helyvektorainak megfelelő komponensei, valamint r_{CM} és r_{CN} a potenciálelektrodák és a kocka C középpontjának távolsága. A potenciálkülönbség az egyes p_i dipól komponensek összege lesz:

$$\Delta V^{cube}(p_i) = \frac{\rho I}{2\pi^2} k_h a^3 \sum_{i=1}^n (G_i^{cur} G_1^{MN}) = \frac{\rho I}{2\pi} k_h a^3 G^{cube} \quad (2.4)$$

A paraméter-érzékenység térképeken a kocka hatását az adott elrendezésre számított homogén féltérrel normálták, így a következő kifejezést kapták:

$$\frac{\Delta V^{cube}}{\Delta V^{hom}} = \frac{ka^3}{\pi} = \frac{G^{cube}}{G^{hom}} \quad (2.5)$$

A PÉT térképeket három különböző mélységben, a karakterisztikus hossz távolságának 0.1-, 0.2-, és 0.3-szeresének megfelelő mélységekben számolták ki az el-

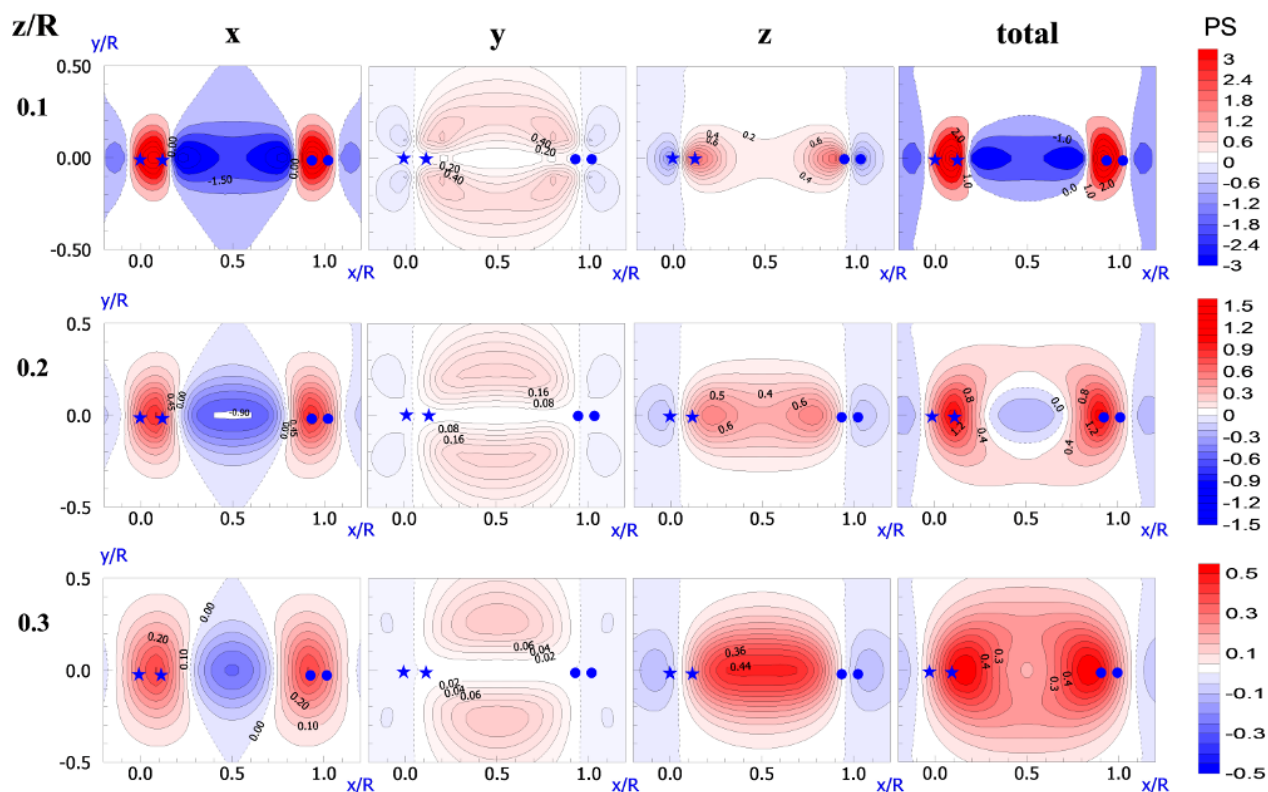


2.2. ábra. A *Schlumberger* elrendezés paraméter-érzékenység térképei a kocka x-, y-, z-komponenseire, valamint a teljes kockára három különböző mélységben. PS: paraméter-érzékenység értékek Forrás: [Szalai és Szarka, 2008b].

rendezés irányához rögzített koordináta-rendszer x, y és z komponenseire (a különböző irányú elektromos dipólok hatását szemléltetve), valamint a teljes térre. Karakterisztikus hossz alatt dipól elrendezések esetében a dipólok távolságát, míg lineáris elrendezések esetén a két, nem végtelenben elhelyezkedő legtávolabbi elektróda távolságát kell érteni. A térképek pozitív értékei a látszólagos fajlagos ellenállás megnövekedését, míg negatív értékei annak csökkenését mutatják az elhanyagolhatóan kis térfogatú, környezeténél nagyobb fajlagos ellenállású inhomogenitás hatására.

Dolgozatomban bemutatásra kerülnek egy α (Sch)-, egy β ($Dp - Dp$)-, és egy γ (γ_{117})-típusú elrendezés paraméter-érzékenység térképei.

Az 2.2 ábrán jól látható, hogy a Schlumberger elrendezés esetében az érzékenység elsősorban a potenciálektródák környékére koncentrálódik, ha a kocka teljes hatását vizsgáljuk (4. oszlop). Ez teljes mértékig indokolja, hogy az elrendezés középpontját tekintik vonatkoztatási pontnak, azaz annak a pontnak, amelyhez adott helyen végrehajtott mérés eredményét hozzá rendelik. Kiterjedt negatív érzékenységű zónák is találhatók,

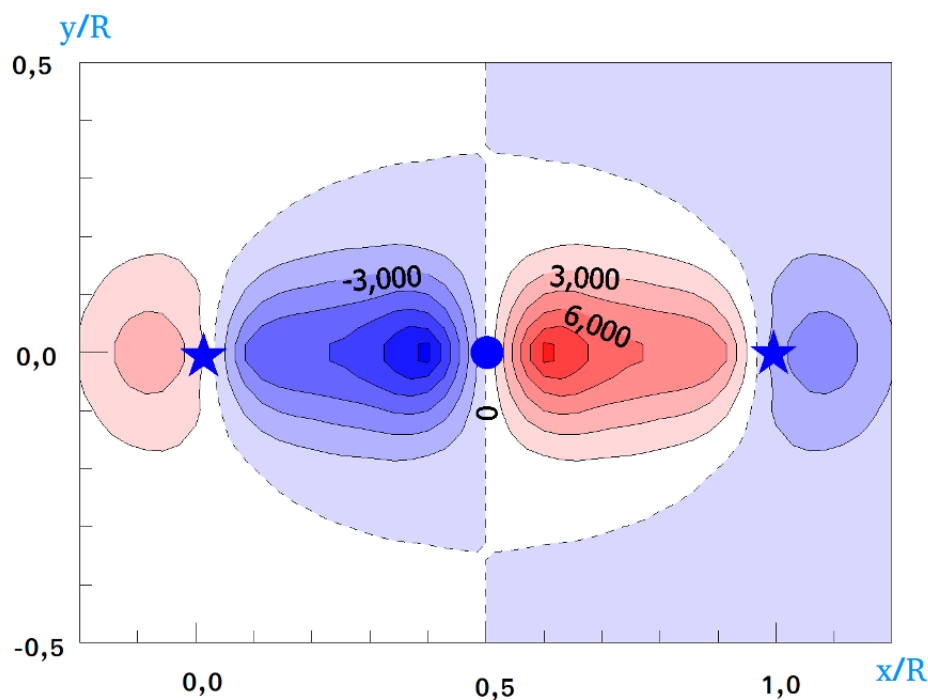


2.3. ábra. A *Dipól-Dipól* elrendezés paraméter-érzékenység térképei a kocka x -, y -, z -komponenseire, valamint a teljes kockára három különböző mélységben. PS: paraméter-érzékenység értékek Forrás: [Szalai és Szarka, 2008b].

ami azt jelenti, hogy az itt lévő inhomogenitások a várttal ellenkező hatást kiváltva kis ellenállásúként növelik, míg nagy ellenállásúként csökkentik a mérhető látszólagos fajlagos ellenállás értékét. Jól látható az is, hogy az érzékenységi zónák a mélységgel egyre elmosódottabbá válnak, az értékek pedig rohamosan csökkennek, azaz az információ domináns része egyértelműen a felszín közeli tartományból származik. Ha megnézzük az x komponens hatását (2.2. ábra) akkor jól látható, hogy gyakorlatilag ez határozza meg a kocka teljes hatását is. Ennek oka, hogy az áram domináns komponense is ilyen irányú, így a töltések is elsősorban az erre merőleges lappárokon tudnak fölhalmazódni így az ezek által kialakított tér lesz domináns.

A *Dipól – Dipól* elrendezésnek (2.3. ábra) mindhárom mélységben nagyobbak a paraméter-érzékenység értékei, mint *Schlumberger* elrendezésének az adott mélységben. Az érzékenység a dipólok környezetében a maximális, az érzékenység eloszlása azonban a mélység növekedésével egyre elmosódottabbá válik.

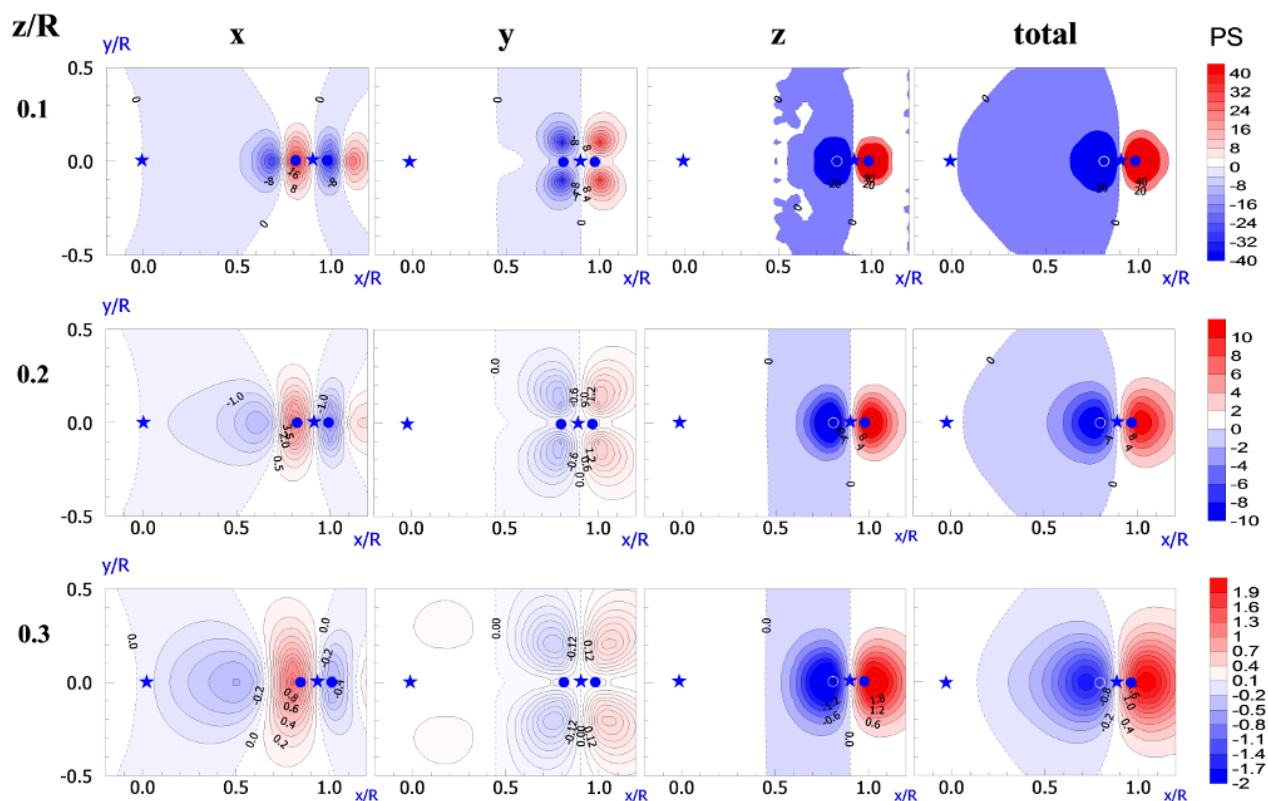
A 2.4 ábrán megfigyelhető antiszimmetria-tengely ($x/R=0,5$) a legtöbb null elren-



2.4. ábra. A MAN elrendezés paraméter-érzékenység térképe a teljes térre $R=0.1$ mélységben. Forrás: [Szalai és Szarka, 2008b].

dezés paraméterérzékenység térképén megjelenik. Az antiszimmetria-tengely két oldalán abszolút értékben ugyanakkora, viszont ellenkező előjelű paraméter-érzékenység értékek találhatók. Emiatt az antiszimmetria-tengelyre szimmetrikusan elhelyezkedő inhomogenitások a tengelytől egyforma távolságra lévő darabjai kompenzálják egymás hatását és a mért érték nulla lenne mind 1D, mind 2D inhomogenitások esetén, ha a dőlésirány egybeesik az $y/R=0$ egyenessel, illetve 3D testek esetén, ha a szimmetria-tengely megegyezik ezzel a vonallal. Emiatt a null elrendezések nagyon érzékenyek a féltér szimmetrikustól való eltéréseire is.

A γ_{117} elrendezés paraméter-érzékenység térképein is megfigyelhető egy kvázi antiszimmetria-tengely ($x/R=0.9$), ha a teljes kocka hatását, vagy ha az y és z oldalpárokat vizsgáljuk (2.5. ábra). A kvázi antiszimmetria-tengely miatt ez az elrendezés is érzékeny a féltér szimmetrikustól való eltéréseire. Mindhárom vizsgált mélységben nagyobbak a paraméter-érzékenység értékei, mint a hagyományos elrendezéseknek (2.2.



2.5. ábra. $A_{\gamma 117}$ elrendezés paraméter-érzékenység térképei a kocka x-, y-, z- komponenseire, valamint a teljes kockára három különböző mélységben. PS: paraméter-érzékenység értékek Forrás: [Szalai és Szarka, 2008b].

és 2.3. ábrák). Emellett azt is észrevehetjük, hogy az érzékenység maximum zónája (az áramelektrodák környezetében) a legnagyobb vizsgált mélységben ($z/R=0,3$) sem módosul jelentősen a kisebb mélységekhez képest ($z/R=0,1; 0,2$) szemben a bemutatott *Schlumberger* (2.2.ábra) és a *Dipól – Dipól* (2.3.ábra) elrendezés paraméter-érzékenység térképeivel.

Összességében a paraméter-érzékenység térképek tanulmányozása után felállítható a következő növekvő sorrend a paraméter-érzékenység értékekre mindhárom vizsgált mélységben: α -, β - és γ -típusú elrendezéseké. Emellett a γ -típusú elrendezések esetében megfigyelhető egy kvázi-antiszimmetria tengely, melynek köszönhetően érzékenyebbek ezek az elrendezések a féltér szimmetrikustól való eltéréseire, mint a hagyományos elrendezések.

2.3. Az egyenáramú elrendezések normált mélységérzékenység-karakterisztika függvényeinek vizsgálata

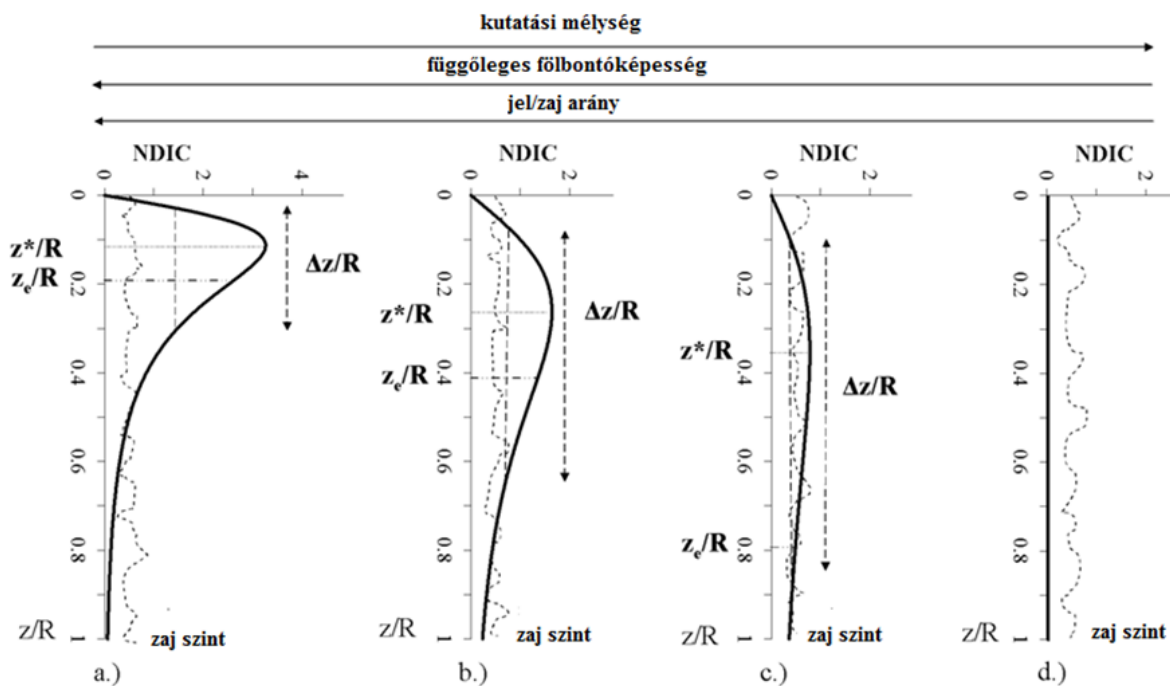
A kutatási mélység az egyes elrendezések egyik legfontosabb paramétere. A mélységérzékenység meghatározására Roy és Apparao meghatározták a *normált mélységérzékenység-karakterisztika* (*NMK*) függvényt [Roy és Apparao, 1971]. A paraméter-érzékenység térképek esetében (2.2 fejezet) vizsgált elhanyagolható kiterjedésű kocka z komponensét tekintve, majd azt a teljes x, y tartományban integrálva megkapták egy vékony réteg hatását. Ez a megközelítés nem teljesen pontos, mivel nem veszi figyelembe a kis kockák közötti kölcsönhatásokat. Az *NMK* függvények az integrálás során kapott értékek változása a mélység függvényében. A *kutatási mélységet* az egyes elrendezések maximális értékéhez tartozó mélységként definiálták. Az *effektív kutatási mélységet*, azaz az *NMK* függvény alatti terület integráljának feléhez tartozó mélységértéket Edwards definiálta ugyanezen függvényből, mint egy alternatív kutatási mélységet [Edwards, 1977].

Szalai és társai mindkét definíció szerint meghatározták a kutatási mélységet 30 elrendezésre. Eszerint egy többé-kevésbé lineáris kapcsolat figyelhető meg a *Roy – Apparao* és az *Edwards*-féle kutatási mélységértékek között [Szalai és tsai., 2009]. Emellett kiszámították ezen elrendezések vertikális fölbontóképességét is.

A fölbontóképesség az egyes elrendezések másik alapvető paramétere. Azt mutatja meg, hogy az adott elrendezés mennyire képes egymástól elkülöníteni több inhomogenitást. Megfigyelhető egy általános reciprok viszony a kutatási mélység és a függőleges fölbontóképesség között. Jóllehet nagy például a Pól-Pól elrendezés kutatási mélysége, de ugyanakkor nagyon rossz a fölbontóképessége. A leggyakrabban használt elrendezések, a Wenner- α , a Wenner- β , a Wenner-Schlumberger, a Dipól-Dipól és a Pól-Dipól elrendezések sokelektrodás méréseknél megfelelő kompromisszumot nyújtanak a *kutatási mélység* és a *függőleges fölbontóképesség* között [Szalai és tsai., 2009].

A 2.6. ábra a mélységérzékenység karakterisztika függvények típusait mutatja be. A kutatási mélység tetszőlegesen növelhető (2.6 d. ábra), így akár elvileg a végtelent is

elérheti. Ez csak azonban azért fordulhat elő, mert ez a definíció nem számol a minden mérés eredményét befolyásoló zajokkal. Ha a mért értékek a zajszintet nem haladják meg, akkor hiába lenne elméletileg nagyon nagy egy elrendezés kutatási mélysége, az a valóságban nem realizálódhat (2.6. ábra) [Szalai és tsai., 2009].



2.6. ábra. Mélységérzékenység karakterisztika függvények típusai néhány kiválasztott elrendezés alapján (balról jobbra: Wenner- α , aszimmetrikus Dipól-ekvatoriális, Pól-Pól, MAN elrendezés), ezek z^*/R (kutatási mélység a maximum alapján [Roy és Apparao, 1971]) és z_e/R (kutatási mélység a középérték alapján [Edwards, 1977]) értékei hipotetikus zajszinttel. A vízszintes nyilak a növekvő értékek felé mutatnak. Forrás: [Szalai és tsai., 2009].

Többek között ezért bevezettek egy új definíciót a *kutatási mélység* mellett, az ún. *kimutathatósági mélységet* (KM) [Szalai és tsai., 2009]. Ez azt a mélységet jelenti, amely mélységből az adott modell hatása, adott sokelektrodás geoelektromos elrendezést használva, adott zajszint mellett már nem érzékelhető.

2.4. Az egyenáramú geoelektromos módszer alkalmazási és fejlesztési lehetőségei

A geoelektromos módszer az egyik legrégebbi geofizikai kutatási módszer. Kezdetekben kizárólag nyersanyagkutatásra használták. Később egyre több alkalmazási területet hódít meg, elsősorban roncsolásmentes alkalmazhatósága és a relatíve gyorsan kivitelezhető mérések miatt. Kedvező tulajdonsága, hogy az elektromos fajlagos ellenállás dinamikatartománya a vizsgált kőzetekre és egyéb anyagokra nézve nagyon nagy. Napjainkban egyre nagyobb szerepet kap a **hidrogeológiai és környezetvédelmi vizsgálatokban, katasztrófa-megelőzésben, mérnöki és régészeti problémák** megoldásában is. A technika fejlődésével alkalmassá vált a módszer különböző folyamatok (pl.: földcsuszamlás, szivárgás) több hónapig, vagy évig tartó nyomon követésére, **monitorozására** is.

A karszt-hidrogeológiai kutatások egyik legfontosabb feladata a felszín alatti vízvezető barlangjáratok feltárása, hiszen ezek határozzák meg a fő áramlási irányokat és a vízáramlás várható sebességét. Prodán többek között geoelektromos módszerrel vizsgálta sikeresen egy karsztosodott terület felszín alatti képződményeit és szerkezetét [Prodán, 2010]. Turai és Hursán a különböző eltemetett régészeti objektumok elektromos fajlagos ellenállása és a befoglaló közeg fajlagos ellenállása közötti kapcsolatot vizsgálták, elősegítve a geoelektromos módszerek régészetben való pontosabb alkalmazását [Turai és Hursán, 2012]. Hazánkban különösen aktuális probléma a koltári katasztrófa után, illetve az elég gyakran jelentkező árvízvédelmi problémák miatt a gátszerkezetek vizsgálata. A tomográfus vizsgálatok eredményeként ki kell emelni, hogy olyan károsodáshoz vezető jelenségeket sikerült feltárni, melyeket korábban más módszerekkel nem lehetett [Nagy, 2011].

A felhasználási kör kibővülésével és az elektromos ellenállás tomográfia (EET) elterjedésével kialakult az igény arra, hogy az ezekkel a mérésekkel kapható információt próbálják meg maximalizálni. Tehát a cél: a vizsgált modellre általában a legjobb közelítést adó, jobb leképezési tulajdonságokkal rendelkező elrendezés kiválasztása. Dahlin és Zhou [Dahlin és Zhou, 2004] tíz különböző elrendezéssel 5 különböző modellen elvégzett numerikus vizsgálatai rámutatnak az egyes elrendezések többé-kevésbé eltérő

kétdimenziós leképezési sajátosságaira. Mi nyolc különböző modellt vizsgáltunk 5 hagyományos és a négyelektródás optimalizált, ún. Stummer elrendezéssel. Az elrendezések között egy többé-kevésbé kvantitatív sorrendet állítottunk föl minden egyes modellre attól függően, hogy az egyes elrendezések mennyire voltak képesek visszaadni az eredeti modellt [Szalai és tsai., 2013].

Szalai és társai a paraméter-érzékenység térképekre (2.2. fejezet) alapozva feltételezték, hogy a γ_{11n} elrendezéseknek nagyobb a kimutathatósági mélységük (KM), mint a hagyományos elrendezéseknek. Több modellre vizsgálták a hagyományos és a γ_{11n} elrendezések KM értékeit. Eredményeik szerint a vizsgált modellekre $n = 2$ -től minden γ_{11n} elrendezésnek nagyobb a kimutathatósági mélység értéke, mint a hagyományos elrendezéseknek [Szalai és tsai., 2011].

A γ_{11n} elrendezésekkel eddig még csak numerikus vizsgálatokat folytattunk [Szalai és tsai., 2011], [Szalai és tsai., 2014], [Szalai és tsai., 2015], terepi alkalmazhatóságukkal kapcsolatban még sok tisztázatlan kérdés merül fel. Ezért a γ_{11n} és a hagyományos geoelektromos elrendezések analóg modellezéssel történő tanulmányozása elkerülhetetlennek tűnt. Az analóg modellezés eredményei igazolhatóak, így mérési tapasztalatot szerezhettem ezekkel az elrendezésekkel, miközben leképezési tulajdonságaikat összevettem a hagyományos elrendezésekével, valamint lehetőségem nyílt a numerikus modellezés eredményeinek igazolására is.

3. fejezet

Az elvégzett vizsgálatok

3.1. Az alkalmazott modellek és a sokelektrodás konfigurációk paraméterei

Dolgozatomban analóg és numerikus modellezéssel vizsgáltam ugyanazokkal a modellekkel a különböző elrendezések **kimutathatósági mélységét** (lemez és henger modell esetében) és **horizontális fölbontóképességét**, valamint csak analóg modellezéssel bizonyos **modell hibák** hatását. Ebben a fejezetben azokat a modelleket mutatom be részletesen, amelyeket analóg és numerikus modellezéssel is vizsgáltam. Az összehasonlíthatóság érdekében a két esetben ugyanazokat a sokelektrodás konfigurációkat alkalmaztam. Ezek paramétereit a 3.1. ábrán mutatom be. Az elektrodák száma (36 db) és az egymástól mért távolságuk (1cm) is megegyezett a mérések során. A szelvények bal és jobb oldalára nem esnek mérési adatok, ezért az értelmezés során a szelvény ezen részeit nem vesszük figyelembe. Az inverzió kezdő modellje minden esetben $30\ \Omega m$ elektromos fajlagos ellenállású homogén féltér volt. Az utolsó iteráció simító tényezőjét (1.3. fejezet) minden esetben az adott elektromos fajlagos ellenállás szelvény alatt jelöltem. Ugyanúgy az RMS értékeket, melyeket az 1.33. képlet szerint határoztam meg. A simító tényezőt (λ) fokozatosan csökkentettem, mert a korábbi tapasztalatok szerint, az ilyen módon végrehajtott inverzió sokkal stabilabb. Nem jelennek meg az EET szelvényeken valószínűleg elektromos fajlagos ellenállás értékek. A simító tényezők a következő sorrendben követték egymást: 100, 70, 50, 30, 20, 15, 10, 7, 5, 3 és 2 melyekkel két, vagy

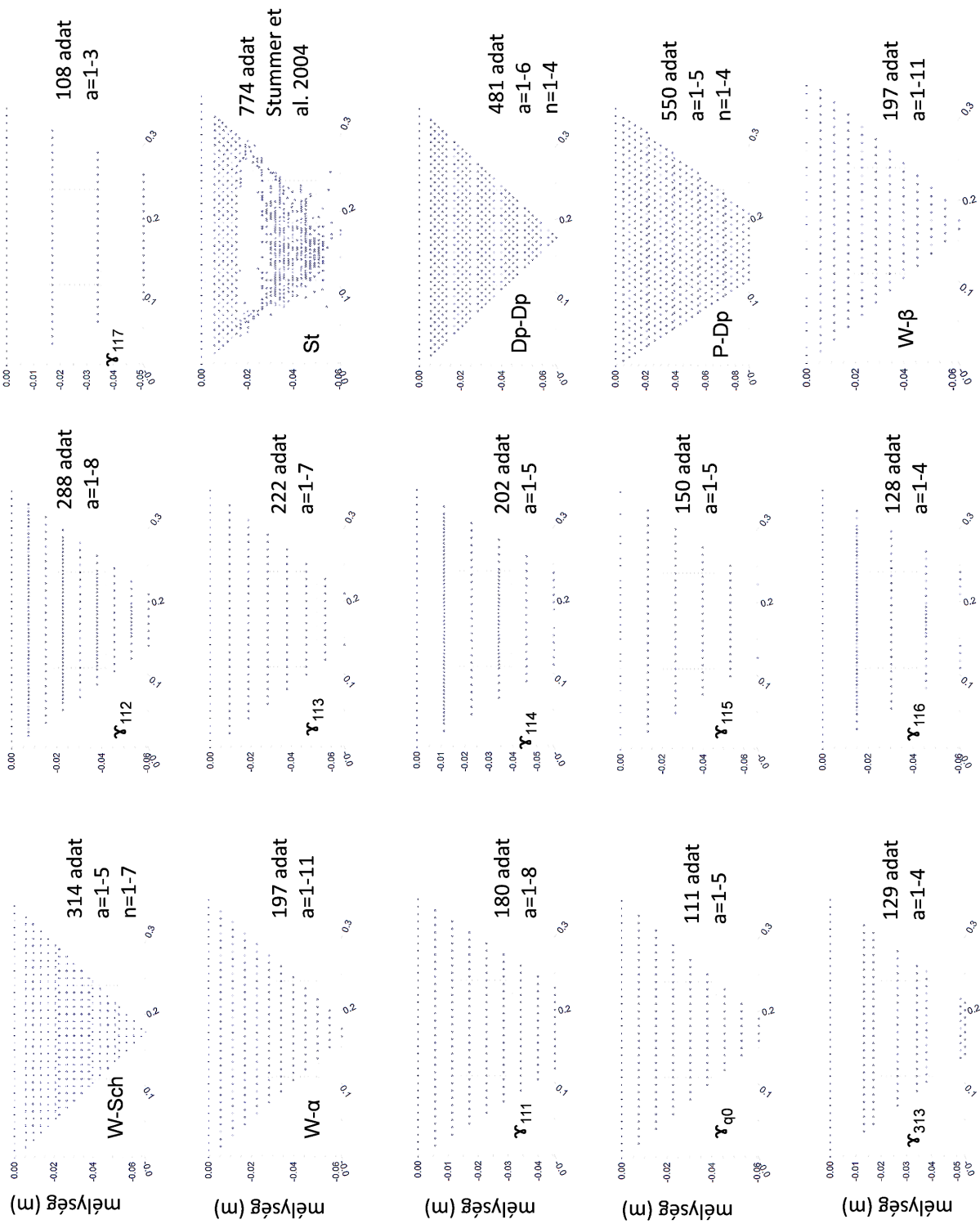
három iterációt számítottam.

A nagy elektromos vezetőképességű lemez modell **kimutathatósági mélységének** (3.2. ábra) analóg vizsgálata során egy 0,5 cm vastag grafit lemez felszínének mélységét centiméterenként szisztematikusan növeltem 2 cm-től 7 cm-ig. A grafit lemezt a terítés irányához rögzített koordináta-rendszer y és z irányában végtelennek lehet tekinteni, mivel méretei y és z irányban 90 és 15 cm, míg az EET terítés hossza 35 cm volt. Ugyanennek a vizsgálatnak a numerikus modellezése során a lemez elektromos fajlagos ellenállását $4 \cdot 10^{-5} \Omega m$ -nek, valamint a féltérét $40 \Omega m$ -nek vettem.

A 2,5 cm oldalhosszúságú prizma modellt az analóg modellezés során egy hengerrel helyettesítettem, mely a terítés irányához rögzített koordináta-rendszer y irányában végtelennek tekinthető. A henger modellt csak 2 mélységben, 2 illetve 2,5 cm mélyen vizsgáltam. Ennek oka, hogy az analóg mérések során horganyzott vascsövet alkalmaztam, melynek elektromos fajlagos ellenállás értéke eltér a vas irodalmi elektromos fajlagos ellenállás értékétől. Emellett a vascső cinkbevonatán egy nagyon vékony oxid réteg is keletkezik, mely akár elektromosan szigetelő tulajdonságú is lehet. Az analóg modellezés eredménye szerint a féltér elektromos fajlagos ellenállásánál kisebb volt a vizsgált modell elektromos fajlagos ellenállása, de az egyértelműen látszott, hogy a kontraszt jóval kisebb, mint amekkora eredetileg lett volna a vas és a nedves homok között. Emiatt a numerikus modellezés során $1 \Omega m$ -nek vettem a horganyzott vascső elektromos fajlagos ellenállását.

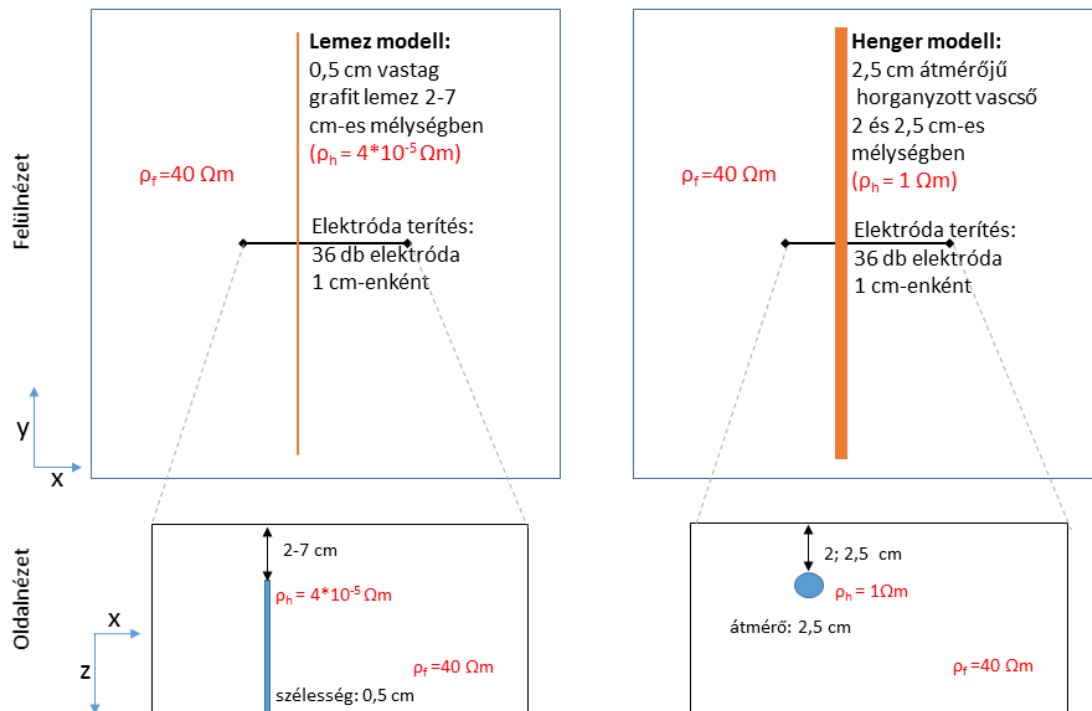
A **horizontális fölbontóképesség** analóg vizsgálata során három grafit lemezt helyeztem el a nedves homokba egymással párhuzamosan, 2 cm mélyen, egymástól 5, illetve 10 cm-re (3.2. ábra). A lemezek mérete ugyanakkora volt, mint a kimutathatósági mélység vizsgálata során alkalmazott lemezé, így y és z irányban ezek is végtelennek tekinthetőek. Ennek a vizsgálatnak a numerikus modellezése során is $4 \cdot 10^{-5} \Omega m$ -nek vettem a lemezek elektromos fajlagos ellenállását, valamint $40 \Omega m$ -nek a féltérét.

Mind a kimutathatósági mélység, mind a horizontális fölbontóképesség numerikus vizsgálata során 3 %-os normál eloszlású véletlen zajjal terheltem a szintetikus látszólagos fajlagos ellenállás értékeket. A analóg modellezés során a vizsgált modellek pozícióját $\pm 0,5$ cm-es pontossággal tudtam megadni.

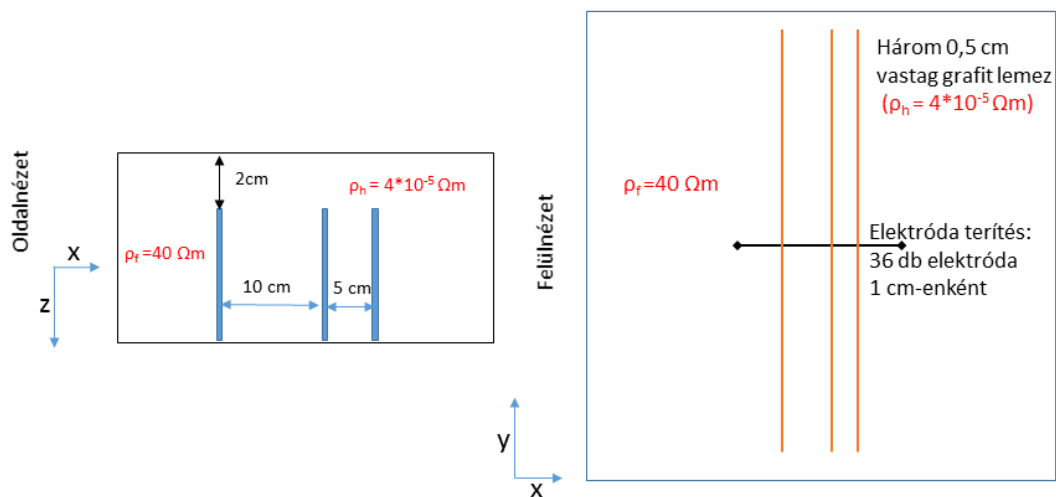


3.1. ábra. Az analóg és numerikus modellezés során alkalmazott konfigurációk paraméterei. Az a és n paramétereket az 1.2 és a 2.1. ábrákon definiáltam.

A kimutathatósági mélység vizsgálata



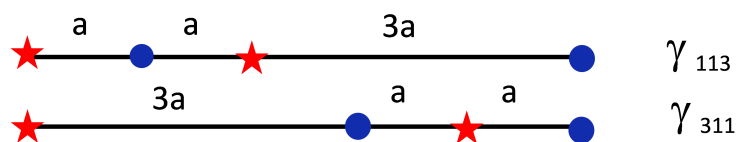
A horizontális fölbontóképesség vizsgálata



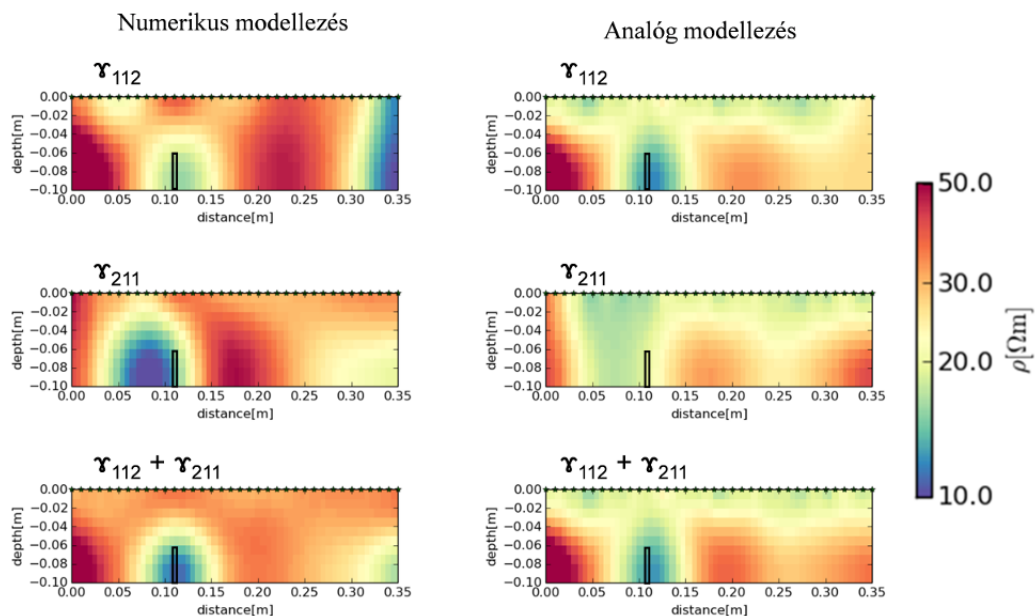
3.2. ábra. Az analóg és numerikus modellezéssel vizsgált modellek felülnézeti és oldalnézeti képe, illetve a numerikus modellezésnél alkalmazott paraméterek. ρ_f : a féltér elektromos fajlagos ellenállása, ρ_h : a ható elektromos fajlagos ellenállása

3.2. A γ_{11n} és a γ_{n11} elrendezések együttes alkalmazásának jelentősége

Az γ_{11n} konfigurációk első numerikus modellezéseit a 2.1. ábrán bemutatott geometria szerint végezték [Szalai és tsai., 2011]. Hamar kiderült, hogy lehet még javítani ezeknek az elrendezéseknek a leképezési tulajdonságain. Tükröztem az eredeti (lásd: 2.1. ábra) konfiguráció geometriáját meghatározó $11n$ paramétert, így kapva a γ_{n11} elrendezéseket (lásd: 3.3. ábra), majd a γ_{11n} és párja, a γ_{n11} elrendezésekkel ugyanazon modell fölött mért, vagy számított látszólagos fajlagos ellenállás értékeket együtt invertáltam [Szalai és tsai., 2015].



3.3. ábra. Az eredeti, γ_{11n} és a tükrözött, γ_{n11} elrendezések szemléltetése az $n=3$ elrendezés példáján.

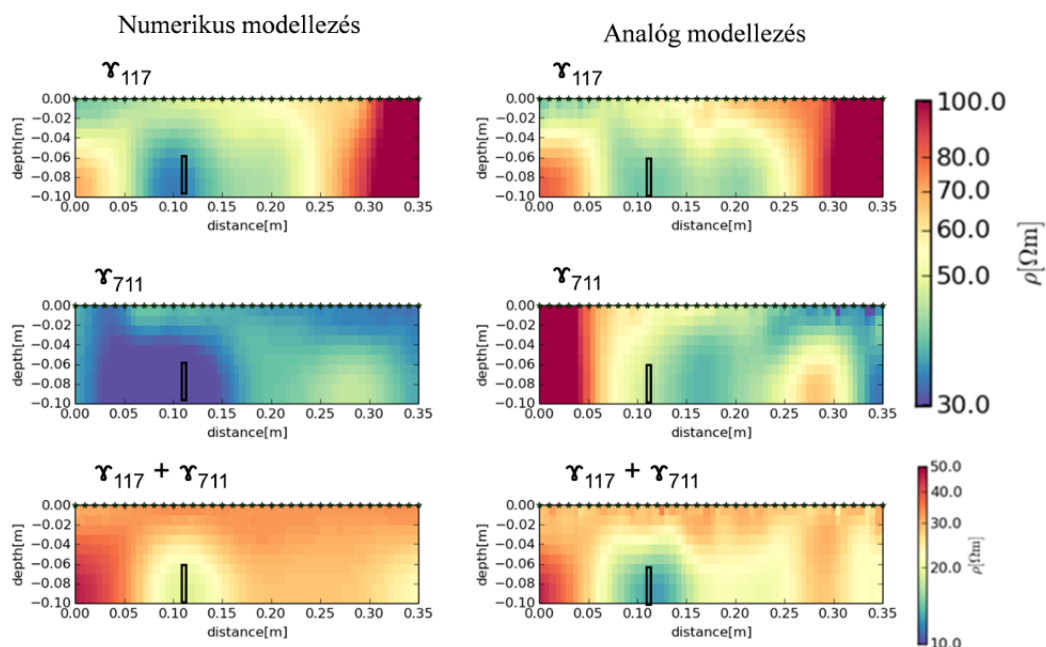


3.4. ábra. A γ_{112} és a γ_{211} elrendezések, valamint az együttes alkalmazásuk numerikus és analóg modellezés esetében.

A tükrözés hatásának bemutatására a vizsgált γ_{11n} elrendezések közül két konfigurációt mutatok be. A γ_{112} (3.4. ábra) elrendezést, mely legközelebb áll a hagyományos konfigurációkhoz, illetve a γ_{117} -et (3.5. ábra), mely a legjobban közelíti a null elrendezésekhez az általam vizsgált γ_{11n} elrendezések közül, mivel az n értékek növekedésével egy fokozatos átmenet figyelhető meg a két állapot között. Mindkét elrendezés esetében a 0,5 cm vastag 6 cm mélyen elhelyezkedő nagy elektromos vezetőképességű lemez modell felett végzett vizsgálat eredményét mutatom be.

A **numerikus** eredményeken (3.4. és 3.5. ábrák bal oldala) jól látszik, hogy az invertált elektromos fajlagos ellenállás szelvényeken mindkét elrendezés esetében (γ_{112} és γ_{117}) zavaró álanomáliák figyelhetőek meg, míg együttes alkalmazásuk során (3.4. és 3.5. ábrák alsó sora) ezek nem jelennek meg. Míg a γ_{112} elrendezés esetében kisebb mértékben jelentkeznek ezek a zavaró álanomáliák, a γ_{117} esetében már majdhogynem ellehetetlenítik az elektromos fajlagos ellenállás szelvények értelmezését. A párban végzett inverzió eredménye tehát sokkal meggyőzőbb az önmagában kivitelezett γ_{11n} elrendezésekkel végzett mérések eredményeinél.

Az **analóg** modellezés során is hasonló változás figyelhető meg a γ_{11n} és a γ_{n11} elren-



3.5. ábra. A γ_{117} és a γ_{711} elrendezések, valamint az együttes alkalmazásuk numerikus és analóg modellezés esetében.

deezések együttes alkalmazásának köszönhetően (3.4. és 3.5. ábrák jobb oldala), főleg a γ_{117} elrendezés esetében. A γ_{112} elrendezés esetében az eredeti és a tükrözött elrendezéssel együtt alkalmazott ($\gamma_{112} + \gamma_{211}$) konfiguráció között nem tapasztalható nagy különbség, csak a γ_{211} és a $\gamma_{112} + \gamma_{211}$ elrendezések között. A $\gamma_{117} + \gamma_{711}$ elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényén (3.5. ábra jobb oldal) ugyanakkor szisztematikus zajokat is felfedezhetünk. Feltételezésem szerint ez a medence falának, azaz véges méretének tudható be, melyben a méréseket végeztem. (Az analóg modellezést részletesen a 3.4. fejezetben tárgyalom.) Általánosan elmondható, hogy a γ_{11n} ($n=2-4$) elrendezések esetében ez nem okozott gondot, csak az ezeknél nagyobb n paraméterű konfigurációk esetében.

A továbbiakban bemutatásra kerülő analóg és numerikus modellezést minden esetben az eredeti (γ_{11n}) és a tükrözött (γ_{n11}) elrendezések együttes alkalmazásával kiviteleztem és azok eredményeit együttesen dolgoztam föl.

Az itt tárgyaltak képezik az 1. tézisemet:

1.tézés:

A szerző bebizonyította, hogy a γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezések és a tükrözött változatainak (γ_{n11} ($n=2-7$)) együttes alkalmazása pontosabban visszaadja a vizsgált modellt, mint az eredeti γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezések. Kevesebb zavaró álanomália jelenik meg az invertált elektromos fajlagos ellenállás szelvényeken.

3.3. A különböző egyenáramú elrendezések végrehajtott numerikus modellezések

3.3.1. Kimutathatósági mélység vizsgálat

Lemez modell vizsgálata

Ebben a fejezetben a bemutatásra kerülő ábrasorozaton (3.6., 3.7., 3.8., 3.9., 3.10. és 3.11. ábrák) keresztül ismertetem a nagy elektromos vezetőképességű lemez modell esetére elvégzett numerikus kimutathatósági mélység vizsgálatot. A 3.1. fejezetben részletesen ismertettem a modell paramétereit. Az inverzió során az utoljára alkalma-

zott simító tényezőt, valamint az RMS (1.33. egyenlet) értékét minden elrendezés alatt föltüntettem.

A Wenner-Schlumberger (W-Sch) elrendezés már a legkisebb vizsgált mélységben, 2 cm mélyen elhelyezkedő lemez modellt sem tudta kimutatni (3.6. ábra). A Wenner- α (W- α) elrendezés ugyan ebből a mélységből még ki tudta mutatni a vizsgált hatót, de a következő, 3 cm-es mélységből már nem (3.7. ábra). A vizsgált elrendezések közül ennek a két α -típusú elrendezésnek a legkisebbek a paraméter-érzékenység értékei (2.2. ábra) mindhárom vizsgált mélységben, illetve a normált mélységérzékenység-karakterisztika függvényeik maximuma alapján is kicsi a kutatási mélységük. Így nem meglepő, hogy a numerikus modellezés során is az α -típusú elrendezések kutatási mélysége bizonyult a legkisebbnek. A többi vizsgált elrendezés ki tudta mutatni a lemez modellt a 2 és 3 cm-es mélységből.

A 4 cm mélyen elhelyezkedő ható (3.8. ábra) a Pól-Dipól (P-Dp) és a Dipól-Dipól (Dp-Dp) elrendezések elektromos fajlagos ellenállás szelvényein megjelenő anomáliák már pontatlanabban adták vissza. Az elektromos fajlagos ellenállás szelvényeiken már megfigyelhető egy terítés irányában történt kis mértékű elmozdulás a modell helyéhez képest, valamint az anomália alakjának változása is. Ebben a nagyobb mélységben a lemez modell alakját kevésbe adják vissza ezek a hagyományos elrendezések, mint a kisebb mélységekben. A Dp-Dp elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényén az anomália balra, míg a P-Dp konfiguráció esetében jobbra tolódik el a modell helyéhez képest. Ez a jelenség a mélység növekedésével fokozódik. Az 3.8. ábrán megfigyelhetjük, hogy a hagyományos elrendezések közül a Wenner- β (W- β) konfiguráció adta vissza legpontosabban a vizsgált modellt. Az kijelenthető már, hogy a β -típusú elrendezéseknek nagyobb a kimutathatósági mélység értékük, mint az α -típusú elrendezéseké. Mivel a β -típusú elrendezéseknek nagyobbak a paraméter-érzékenység értékeik (2.2. fejezet, 2.3. ábra) és az NMK függvények maximuma alapján is nagyobb kutatási mélységük, mint az α -típusúaknak (2.2. ábra), ez várható is volt.

A 6 és 7 cm-es mélyen elhelyezkedő lemez modellt (3.10. és 3.11. ábrák) a hagyományos elrendezések közül a Wenner- β adja vissza a legpontosabban. A elektromos fajlagos ellenállás szelvényeken megjelenő anomáliák a terítés irányában nem térnek el a modell helyéhez képest, szemben a Dp-Dp és a P-Dp elrendezésekkel. Emellett a ha-

gyománys elrendezések közül a $W\text{-}\beta$ elektromos fajlagos ellenállás szelvényén jelenik meg a legalakhűbben a vizsgált modell. A négyelektródás optimalizált, ún. Stummer (St) elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényén még ebben a mélységben is viszonylag pontosan megjelenik a vizsgált ható.

A γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezések az összes vizsgált mélységben pontosan visszaadták a lemez modellt. A legnagyobb vizsgált mélységekben, 6-7 cm esetében (3.10. és 3.11. ábrák) sem tapasztaltam a terítés irányában eltérést a modell helyéhez képest. Emellett az elektromos fajlagos ellenállás szelvényeken tapasztalható anomáliák viszonylag alakhűen és élesebben visszaadják az eredeti modellt, mint akár a hagyományos elrendezések közül legpontosabb eredményt produkáló $W\text{-}\beta$ elrendezés. A fenti jelenséget magyarázhatja, hogy a γ_{117} elrendezésnek (2.5. ábra) voltak a legnagyobbak a paraméter-érzékenység értékei és a legélesebbek a változásai mindhárom vizsgált mélységben.

A 3.1. táblázat összefoglalja a nagy elektromos vezetőképességű lemez modell felett numerikus modellezéssel végzett kimutathatósági mélység vizsgálat eredményeit.

d	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								γ_{q0}	γ_{313}
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}			
2	x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
3	x	x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	x	x	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	x	x	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	x	x	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	
7	x	x	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	

3.1. táblázat. Nagy elektromos vezetőképességű lemez felett végzett kimutathatósági mélység numerikus vizsgálatának összefoglaló táblázata. **d**: a lemez modell mélysége cm-ben, **1**: az adott elrendezés visszaadta a vizsgált modellt, **0**: ugyan megjelent egy alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen, de az alapján nem lehet a modell helyére és alakjára következtetni, **x**: egyáltalán nem jelent meg alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen. Szürke háttérrel jelöltem az utolsó 1-es értéket.

A 3.1. táblázat eredményei alapján állítottam fel a 2. tézist.

2.tézis:

A szerző megállapította numerikus modellezéssel a hagyományos és a γ_{11n} ($n=2-7$) konfigurációk kimutathatósági mélységét nagy elektromos vezetőképességű lemez modell esetére, ami alapján a következő növekvő sorren-

det állította föl:

- α -típusú (W-Sch, W- α) elrendezések
- β -típusú (P-Dp, Dp-Dp, W- β) elrendezések
- γ_{11n} (n=2-7) elrendezések

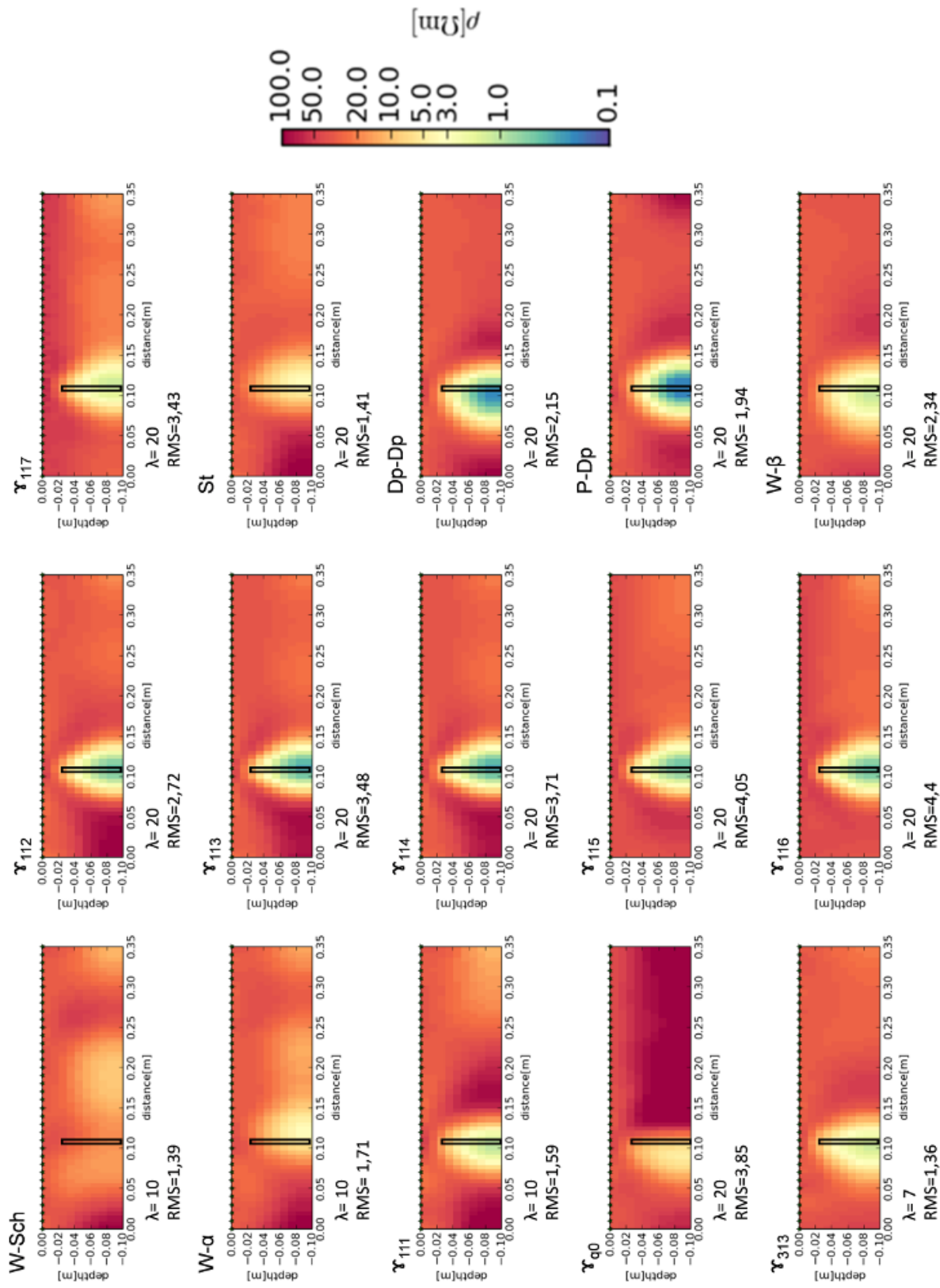
A tézisben foglalt eredmények mellett a nagy elektromos vezetőképességű lemez modell adott mélységben történő vizsgálata során még a következőket figyeltem meg: Az egyes γ_{11n} (n=2-7) elrendezések eredményei között nem tapasztalható jelentős különbség. A γ_{11n} (n=2-7) elrendezések elmélete alapján az n érték növekedésével a null elrendezések felé közelítve valamiféle különbségre számítottam a kapott eredmények között. Lehetséges, hogy a modell 7 cm-nél nagyobb mélységben történő vizsgálata során beigazolódott volna az elrendezések elmélete alapján kialakított felvetésem.

A γ_{q0} elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényén a 2 cm mélyen vizsgált lemez modell mellett (3.6. ábra) egy nagyon éles kontraszt figyelhető meg az elektromos fajlagos ellenállás értékekben. Az analóg modellezés során ez a jelenség még határozottabban jelentkezett. Az inverzió után kapott elektromos fajlagos ellenállás értékek is kisebbek voltak, mint a többi vizsgált elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényén. Azt feltételeztem, hogy γ_{q0} elrendezés geometriája olyan közel áll a γ_0 elrendezés geometriájához, hogy az már majdhogynem ellehetetleníti a mért és a számított látszólagos fajlagos ellenállás értékek inverzióját. Ez vezetett a γ_{313} elrendezés vizsgálatához, ugyanis ennek az elrendezésnek a geometriája már közelebb áll a hagyományos elrendezésekhez, mint a γ_{q0} konfigurációé, melynek a geometriai faktor értéke is számottevően kisebb. A γ_{q0} elrendezés esetében a lemez modell mélységének növelésével ez a ható mellett tapasztalható éles kontraszt egyébként fokozatosan mérséklődik.

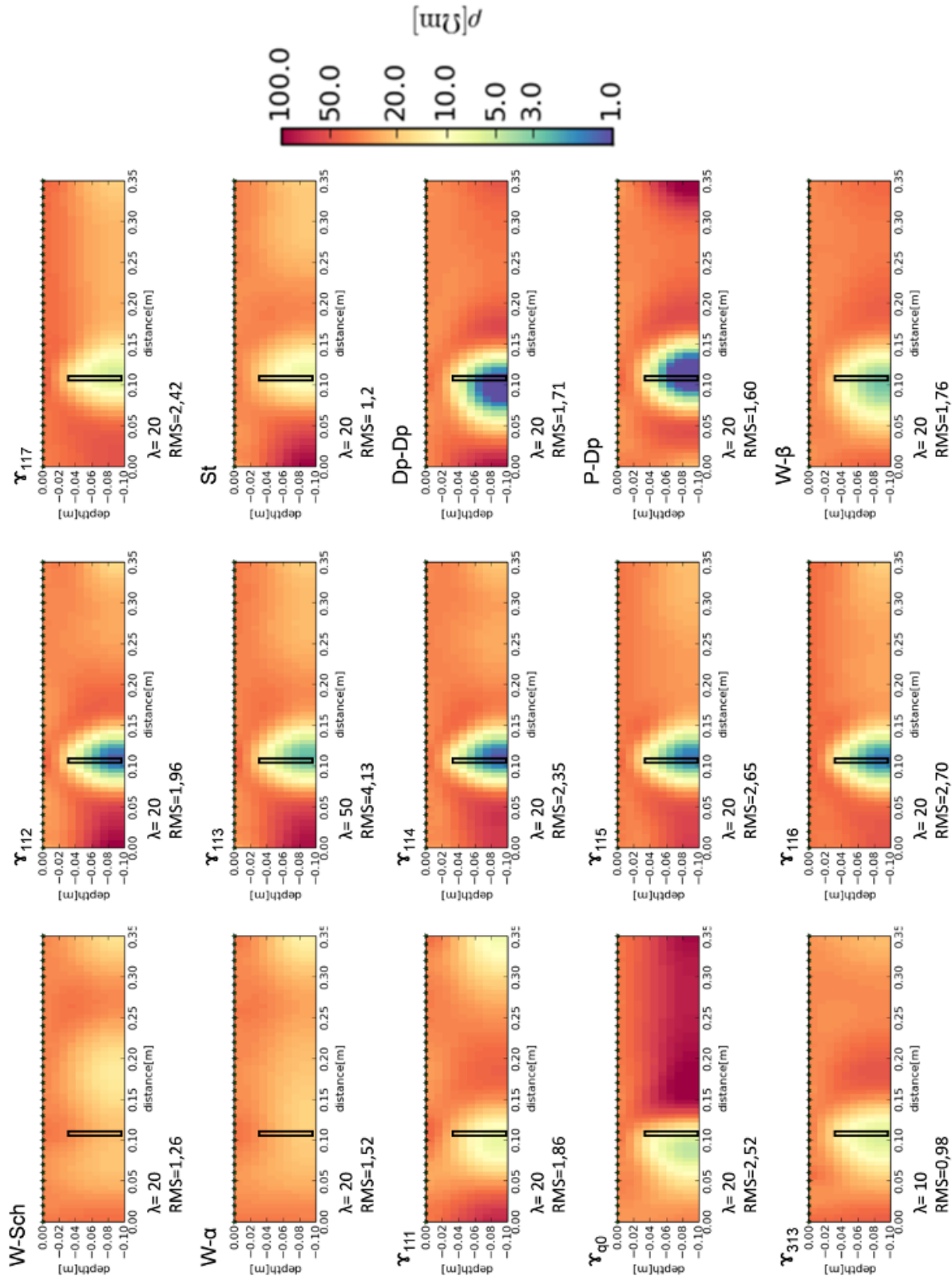
A γ_{313} elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvénye 7 cm mélyen (3.11. ábra) elhelyezkedő ható esetében a többi elrendezéséhez képest jóval zajosabbnak tűnik. Ugyanennek a modellnek az analóg vizsgálata során nem tapasztaltam ezt (3.22. ábra), pedig ott nagy valószínűséggel lokális inhomogenitások is előfordultak.

Ha kizárólag numerikus modellezéssel vizsgáltam volna az egyenáramú elrendezések kimutathatósági mélységét, akkor célszerű lett volna még folytatni ezt a szisztematikus

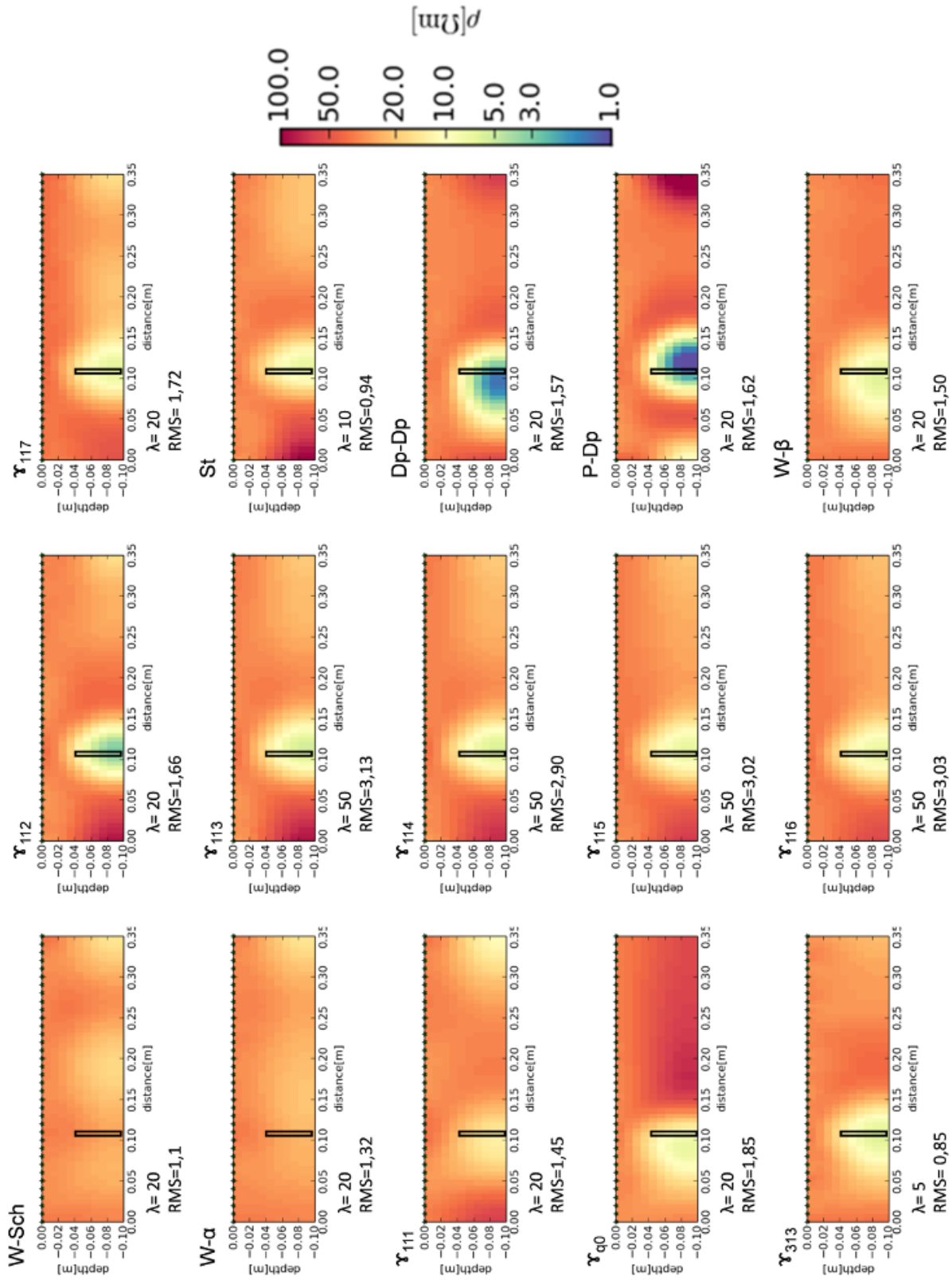
tanulmányozást, de a következő fejezetben bemutatásra kerülő analóg modellek miatt ragaszkodtam az egységes vizsgálatokhoz.



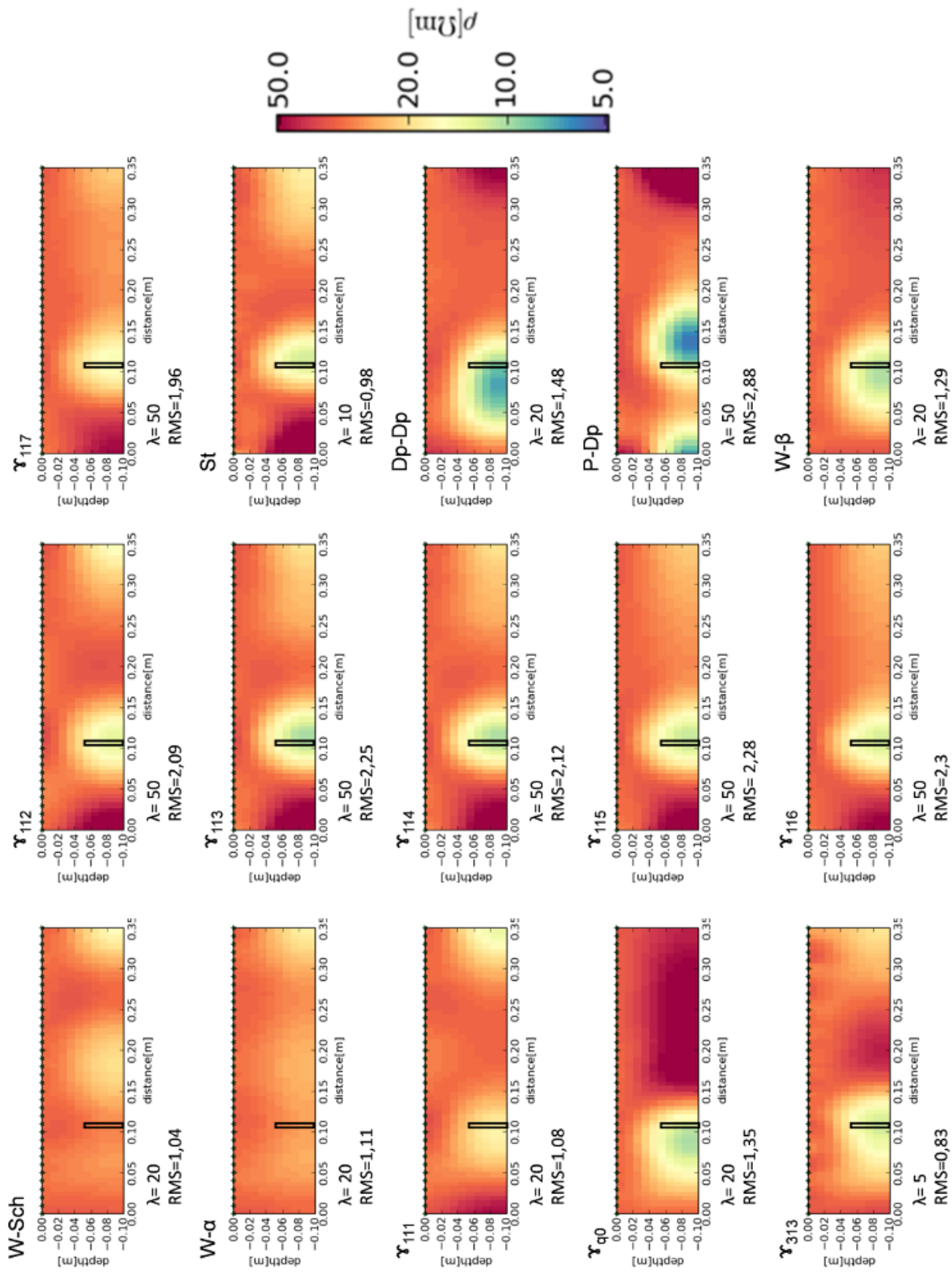
3.6. ábra. A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 2 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, a 1.33 képlet szerint meghatározva.



3.7. ábra. A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 3 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.



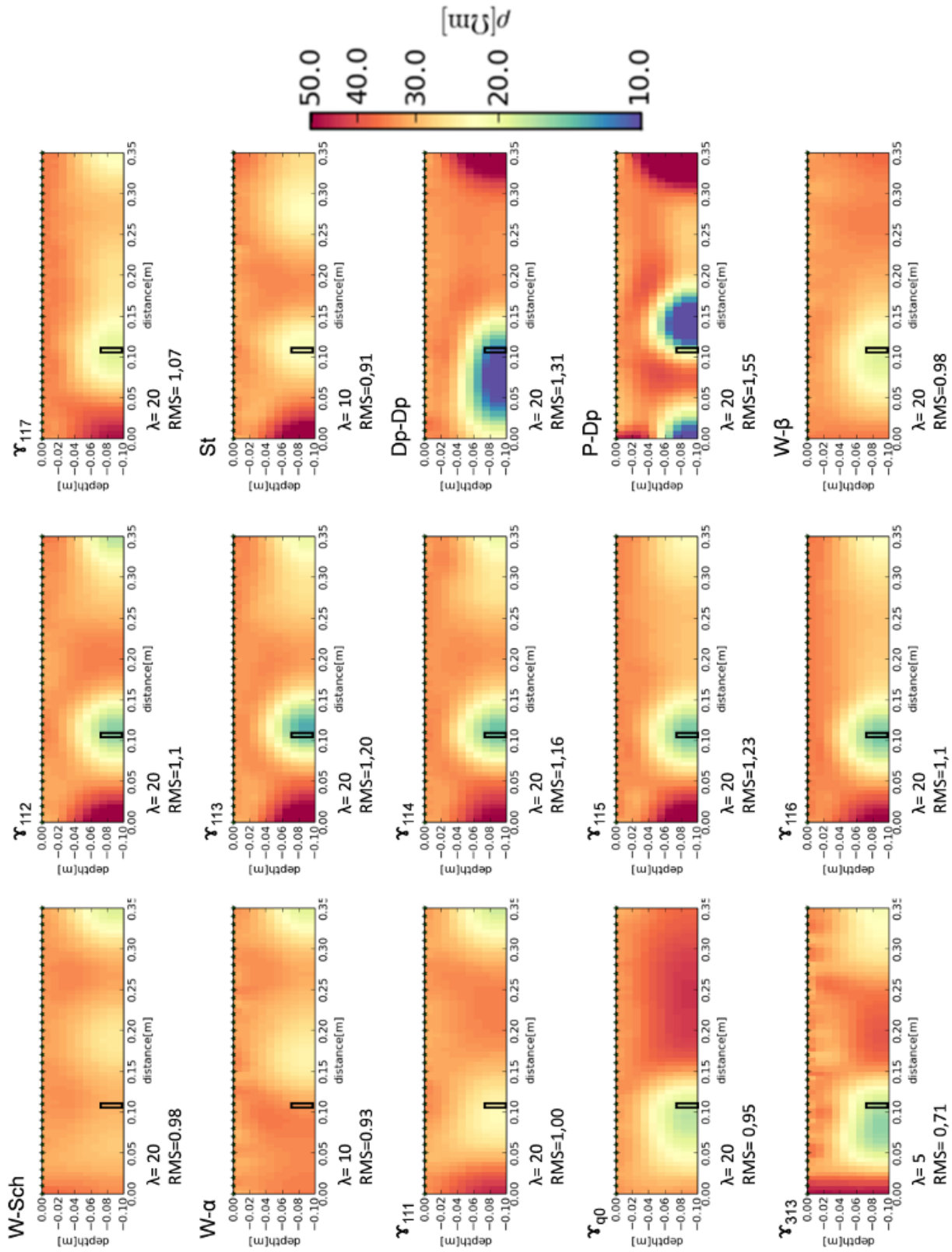
3.8. ábra. A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 4 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.



3.9. ábra. A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 5 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.



3.10. ábra. A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 6 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.



3.11. ábra. A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 7 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.

Prizma modell vizsgálata

A 2,5 cm oldalhosszúságú négyzet alapú hasáb modellt csak 2 mélységben, 2 és 2,5 cm mélyen vizsgáltam (3.12. és 3.13. ábrák). A 3.1. fejezetben részletesebben kifejtettem ennek okát, valamint ismertettem a modell paramétereit. A numerikus modellezés során $1 \Omega m$ -nek vettem a henger modell elektromos fajlagos ellenállás értékét, a $40 \Omega m$ -es háttérérték mellett. Mint utólag kiderült, az analóg modellezéskor valószínűleg még ennél is kisebb volt a kontraszt a nedves homok és henger alakú modelltest között. Ezt arra alapozom, hogy a lemez modell esetében kisebb eltéréseket tapasztaltam a numerikus és az analóg modellezés eredményei között. A modell jól megválasztott fajlagos ellenállás értéke mellett itt is elvártam volna a hasonlóságot az analóg és a numerikus modellezés eredményei között. Mivel ennél a modellnél a két vizsgálat összehasonlítása nem lenne korrekt, a numerikus és az analóg modellezéssel kapott eredményeket csak külön-külön elemzem.

A prizma modell kimutathatósági mélységével kapcsolatban is megállapítható, hogy az α -típusú elrendezéseknek a legkisebb ez az értéke. A 3.13. ábrán, azaz ahol a henger mélyebben volt, a W - α elrendezés EET szelvényén már nem jelent meg az alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália. A β -típusú elrendezések esetében az elektromos fajlagos ellenállás szelvényeken a mélység növekedésével változik az anomáliák alakja. Kiterjedtebbek lesznek, de ez még nem zavarja az elektromos fajlagos ellenállás szelvények értelmezését. A St elrendezés EET szelvényén ez nem figyelhető meg, esetében nem tapasztalható különbség a két mélységben vizsgált hatók anomáliái között.

A γ_{11n} ($n=1-7$) elrendezések is mindkét mélységben kimutatták a vizsgált modellt és az anomália alakjában sem tapasztalható jelentős változás a két mélységben vizsgált EET szelvények között.

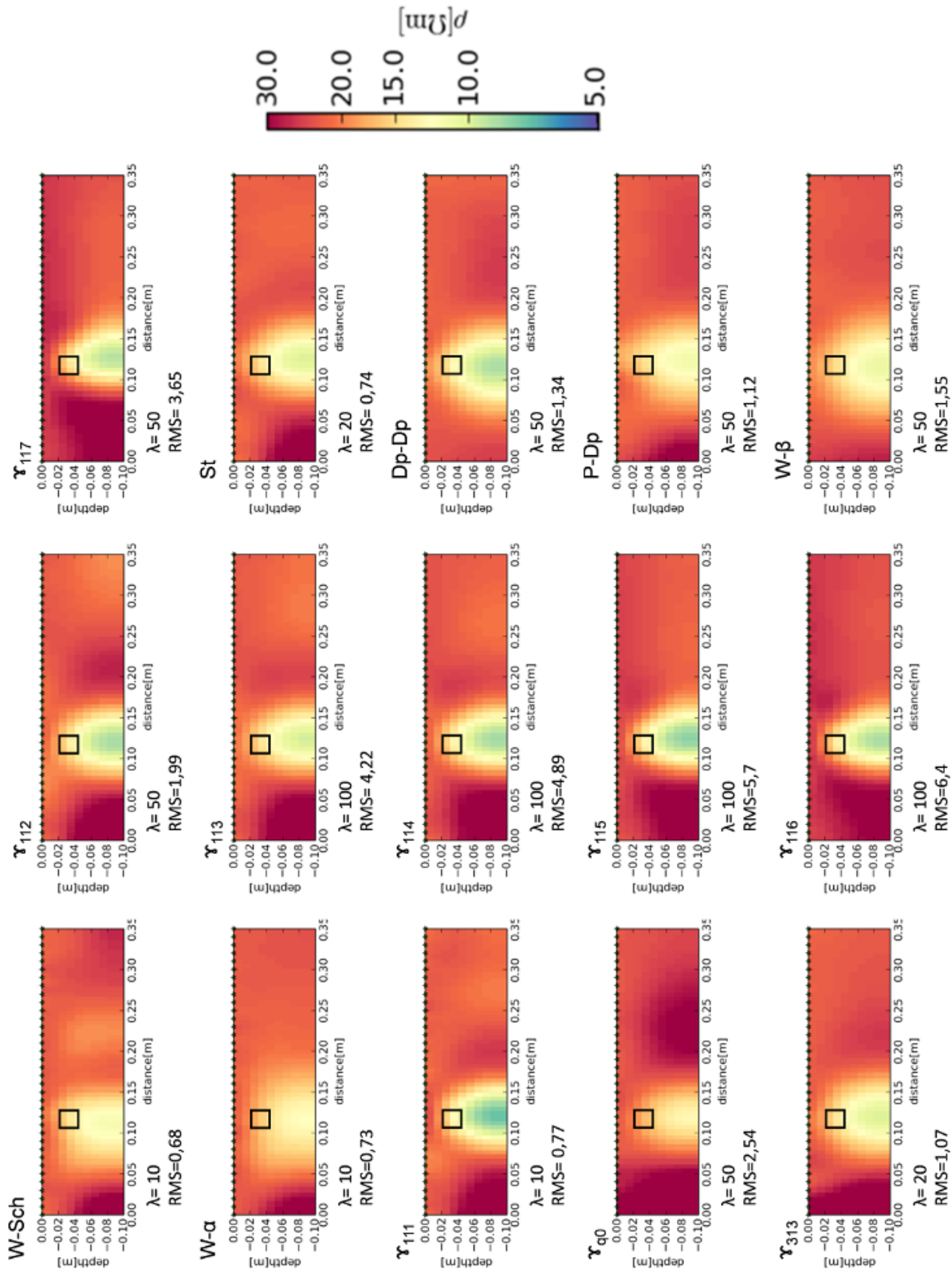
A modell nem megfelelően megválasztott elektromos fajlagos ellenállása miatt ez a vizsgálat hiányos. Emiatt a β - és a γ - típusú elrendezések egymáshoz viszonyított kimutathatósági mélységéről a prizma modell esetében semmilyen megállapítást nem tudok tenni. Az azonban egyértelmű, hogy a β - és a γ -típusú elrendezések kimutathatósági mélység értéke meghaladja az α -típusú elrendezésekét.

Az $1 \Omega m$ elektromos fajlagos ellenállású prizma modell kimutathatósági mélység

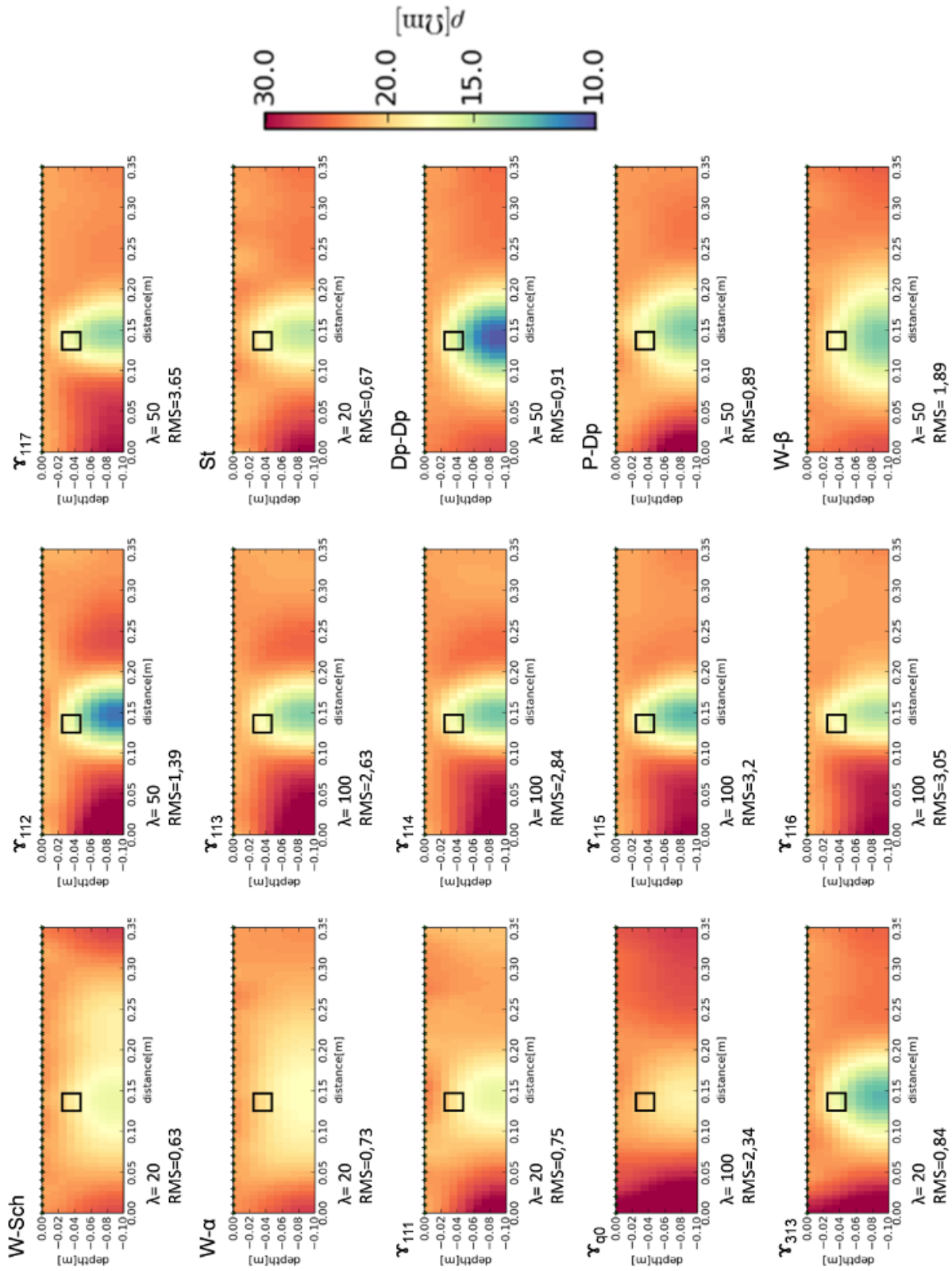
vizsgálatát a 3.2. táblázat foglalja össze.

d	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}	γ_{q0}	γ_{313}
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.5	1	x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	x	1

3.2. táblázat. 1 Ωm elektromos fajlagos ellenállású prizma modell felett végzett kimutathatósági mélység numerikus vizsgálatának összefoglaló táblázata. **d**: a prizma modell mélysége cm-ben, **1**: az adott elrendezés visszaadta a vizsgált modellt, **x**: egyáltalán nem jelent meg alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen. Szürke háttérrel jelöltem az utolsó 1-es értéket.



3.12. ábra. A 2 cm mélyen elhelyezkedő 1 m elektromos fajlagos ellenállású prizma modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.



3.13. ábra. A 2,5 cm mélyen elhelyezkedő 1 m elektromos fajlagos ellenállású prizma modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.

3.3.2. Horizontális fölbontóképesség vizsgálat

A horizontális fölbontóképesség tanulmányozása során azt vizsgáltam, hogy három egymással párhuzamos, egymástól 5, illetve 10 cm-re elhelyezkedő nagy elektromos vezetőképességű 0,5 cm vastag lemezből az egyes elrendezések hányat tudnak elkülöníteni egymástól. A modell paramétereit a 3.1. fejezetben és a 3.2. ábrán részletesen tárgyaltam.

A W-Sch elrendezés egyik hatót sem tudta a többitől külön választani, ahogy azt a 3.14. ábrán látjuk. Ez az elrendezés a kimutathatósági mélység vizsgálata során az egyetlen nagy elektromos vezetőképességű lemez modellt sem tudta kimutatni ebből a mélységből, így nem is várhatjuk el, hogy a három lemezt külön tudja választani egymástól. A kimutathatósági mélység és a horizontális fölbontóképesség szorosan összefüggnek, olyan értelemben, hogy ha egy elrendezés ki sem tudja mutatni a vizsgált hatót, akkor értelmetlen a horizontális fölbontóképességéről beszélni.

A W- α elrendezés a kimutathatósági mélység vizsgálata során a 2 cm mélyen elhelyezkedő lemezt kimutatta és a horizontális fölbontóképesség vizsgálata során is a távolabb elhelyezkedő lemezt valamelyest külön tudta választani a többitől.

A γ_{q0} EET szelvényén a 3.3.1. fejezetben tárgyalt jelenség, mely szerint egy nagyon éles elektromos fajlagos ellenállás kontraszt figyelhető meg a modell mellett, itt is föllépett (3.14. ábra).

A W-Sch és a W- α elrendezések paraméter-érzékenység térképei alapján hasonlóak a leképezési tulajdonságaik, és ennek megfelelően a vizsgált modellek esetében hasonlóak az EET szelvényeik, egy kis különbség azonban mindig fölfedezhető. A lemez modell kimutathatósági mélység és horizontális fölbontóképesség vizsgálata során a W- α elrendezés bizonyult jobbnak, míg a prizma modell esetében a W-Sch elrendezés kimutathatósági mélysége bizonyult nagyobbak. Olyan esetekben, mikor egymáshoz hasonló leképezési tulajdonságokkal rendelkező elrendezéseket vizsgálunk, az adott modelltől fog függeni az egyes elrendezések egymáshoz képesti sikeressége.

A β -típusú (W- β , Dp-Dp, P-Dp), a St, a γ_{111} és γ_{112} elrendezések a két egymáshoz közelebb elhelyezkedő nagy elektromos vezetőképességű lemezt nem tudták elkülöníteni egymástól, csak a harmadik, távolabb elhelyezkedőt a többitől.

A γ_{11n} ($n=3-7$) mindhárom lemez modellt el tudta választani egymástól. Ennél a modellnél sem tapasztalható jelentős különbség a különböző n értékű ($n=3-7$) γ_{11n} elrendezések között.

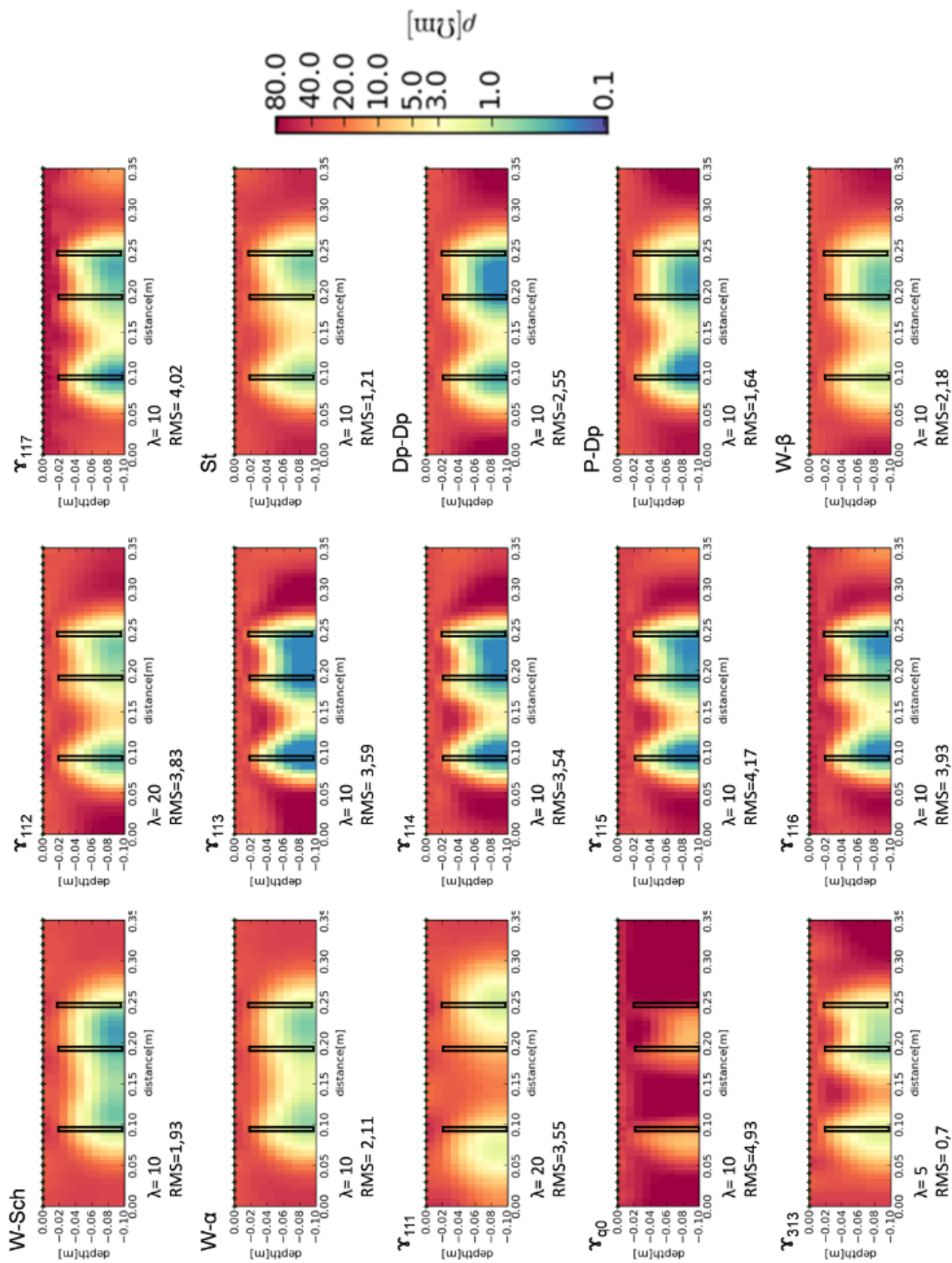
A 3.3. táblázat összefoglalja a horizontális fölbontóképesség numerikus vizsgálatának eredményeit, mely alapján fölállítottam a 3. tézist.

	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}	γ_{q0}	γ_{313}
N	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3

3.3. táblázat. Három nagy elektromos vezetőképességű lemez modell felett végzett horizontális fölbontóképesség numerikus vizsgálatának eredménye. **N**: a megjelenő anomáliák száma, **1** megjelenő anomália esetében mindhárom hatót összevonta az adott elrendezés, **2** esetében csak a távolabb elhelyezkedő modellt különítette el az adott elrendezés, míg **3** esetében elkülönültek a vizsgált hatók.

3.tézis:

A szerző megmutatta a horizontális fölbontóképesség numerikus vizsgálatával, hogy az α -típusú elrendezések egyik hatót sem tudták határozottan elkülöníteni a többitől. A β -típusú, az optimalizált (Stummer), a γ_{111} és a γ_{112} elrendezések csak a másik kettőtől távolabb elhelyezkedő lemezt tudták elkülöníteni. A legtöbb γ -típusú elrendezés viszont mindhárom hatót képes volt elkülöníteni egymástól.

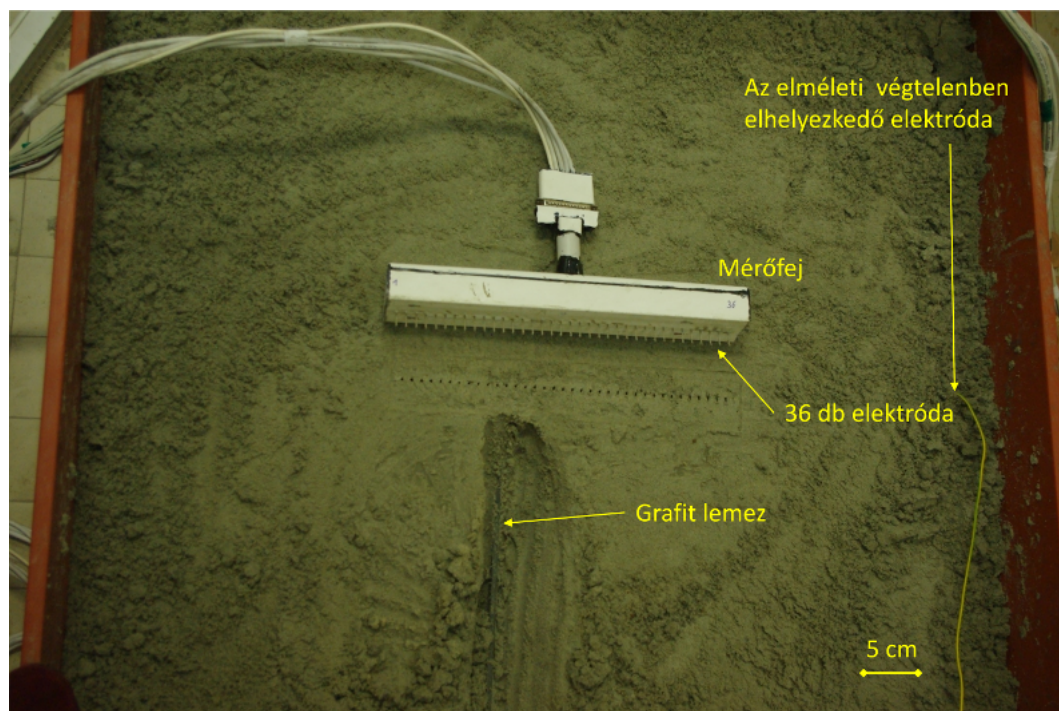


3.14. ábra. Horizontális fölbontóképesség vizsgálat: A 2 cm mélyen elhelyezkedő 3 egymással párhozamos, egymástól 5, illetve 10 cm-re elhelyezkedő nagy elektromos vezetőképességű lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált szelvény. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.

3.4. A különböző egyenáramú elrendezésekkel végrehajtott analóg modellezések

Az analóg modellezés során egy olyan új megközelítést alkalmaztam, mely szerint nem az idealizált geológiai modelleket vizsgáltam, hanem a természetben előfordulókhöz közelebb állókat. Ez alatt azt értem, hogy homogén feltér helyett, amit általában elektrolittal modelleznek, nedves homokot alkalmaztam a befoglaló közeg modellezésére. Az elektrolittal ellentétben ebben lokális inhomogenitások is előfordultak, illetve olyan jelenségek is lejátszódtak, amik a természetben végrehajtott mérések esetében is: a homok felszíne fokozatosan száradt, kapilláris jelenség lépett föl, illetve a gravitáció hatása is érvényesült a folyadék mozgásával. A célom az volt, hogy terepihez viszonylag közeli körülményeket teremtsék, ugyanakkor a méréseim igazolhatóak legyenek.

A γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezések kutatása miatt különösen fontos volt ebben a zajos befoglaló közegben való mérés, mivel terepi alkalmazhatóságukat elsősorban emiatt vonták kétségbe.



3.15. ábra. Az analóg modellezés bemutatása

Az analóg modellezéshez egy speciális mérőfejet fejlesztettünk (3.15). A 36 darab

1mm átmérőjű, 1,5 cm hosszú, egymástól 1 cm-re elhelyezkedő magas krómtartalmú rozsdamentes acél elektródákat egy 1 cm vastag bakelit lemezbe fűrtük bele. Ez biztosította a mérőfej merevségét, ezáltal a pozicionálási hibákból származó zajok minimalizálását. A modellezés dimenziójához képest nem tekinthetők ugyan pontszerűnek ezek az elektródák, viszont a megfelelő kontaktus miatt szükség volt ekkora felszínű elektródákra. Minden elektródához egy 970 Ω -os előtét ellenállást kötöttünk sorba, ezáltal a terepi alkalmazásra tervezett Iris Syscal Pro műszer alkalmasabbá vált ezekre a mérésekre. Minden mérést a legkisebb beállítható feszültségen, 12 V-on kiviteleztem. A 3.15. ábra mutatja be a mérőfejet, a mérésre használt műanyag ládát és a háromelektrodás P-Dp elrendezés esetében alkalmazott elméleti végtelen elektróda pozícióját. A „végtelenben” levő elektródát minden esetben a terítés irányában helyeztem el a többi elektródától a lehető legtávolabb.

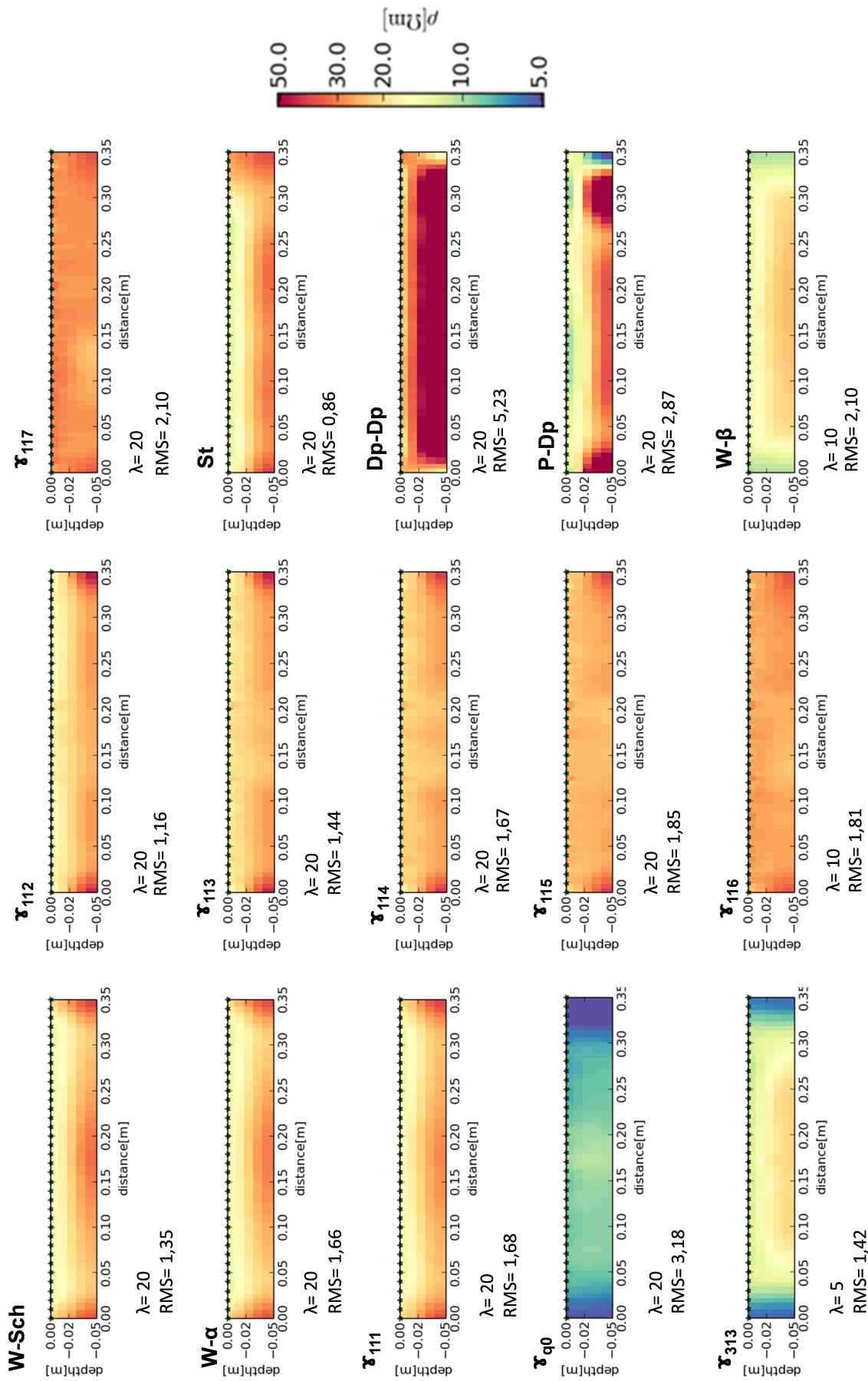
Egy $1m^2$ ($1m \times 1m$) alapterületű, 0,44m mély műanyag ládában végeztem a méréseket. A medencét 0.1-1 mm-es szemcseméretű mosott homokkal töltöttem föl, melynek nedvességtartalma ismeretlen volt (szabad ég alatt tárolták a homokbányában) és nem volt lehetőségem a kiszárítására. Ez azonban nem is volt célom, hiszen egyrészt ez is a terepihez hasonló körülményeket eredményezett és a nedvességre a megfelelő kontaktus miatt is szükség volt. A homok alkalmazásával kapcsolatban arra feltétlenül ügyelni kell, hogy ne tömörítsük nagyon össze a homokot, mert a kontaktus az elektróda és a közeg között nem lesz megfelelő. Ennek oka az, hogy a tömörítéskor a nedvesség kiszorul, a víztartalom csökken, így nem feltétlenül lenne meg a megfelelő kontaktus.

A tesztmérések során kiderült, hogy huzamosabb használat (több modell lemérése) után az elektródák korrodálódnak, emiatt minden egyes modell lemérése után krómtisztító pasztával ápoltam az elektródákat.

A befoglaló közeg elektromos fajlagos ellenállása

A mérőfej és a mérés kivitelezésének tökéletesítése egy hosszú folyamat volt, melynek eredményeként viszont a befoglaló közeg fajlagos ellenállás szelvényei már csak elfogadhatóan zajosak voltak minden elrendezés esetében. Ezt a 3.16. ábrán is láthatjuk, ahol a befoglaló közeg, azaz a "homogén" féltér felett meghatározott elektromos fajlagos ellenállás szelvényeit mutatom be. Az inverzió során ugyanolyan nagyságrendű simító

tényezőket alkalmaztam, mint a különböző modellek vizsgálata során. A valós, terepi mérésekhez képest ebben a kis dimenzióban sokkal nehezebb volt elérni, hogy a lokális inhomogenitások ne zavarják olyan mértékben a méréseket, ami már értelmezhetetlenné tette volna az elektromos fajlagos ellenállás szelvényeket.



3.16. ábra. A befoglalt közeg elektromos fajlagos ellenállás szelvénye a vizsgált elrendezésekkel, λ : az inverzió során az utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.

3.4.1. Kimutathatósági mélység vizsgálat

Lemez modell vizsgálata

A 3.17., 3.18., 3.19., 3.20., 3.21. és 3.22. ábrasorozaton a lemez modell kimutathatósági mélység analóg modellezéssel történő vizsgálatát mutatom be. A vizsgálat során egy 0,5 cm vastag grafit lemez tetejének mélységét szisztematikusan centiméterenként növeltem 2 cm-től 7 cm-ig. A modell felül- és oldalnézeti képe a 3.2. ábrán volt látható.

Mivel a γ_{q0} elrendezés analóg modellezéssel kapott elektromos fajlagos ellenállás szelvényein a legtöbb modell esetében a többi elrendezés elektromos fajlagos ellenállás értékeitől eltérő értékek szerepeltek, erre az elrendezésre nem tudtam a többi elrendezésre alkalmazott skálát használni. A γ_{q0} elrendezés skáláját külön föltüntettem a többi elrendezésre alkalmazott skála alatt minden ábra jobb oldalán. Ugyanakkor a γ_{q0} -nak a módosított változata, a γ_{313} elrendezés EET szelvényeinek az egységes skálán való ábrázolása már nem okozott gondot. Ez a konfiguráció közelebb áll a hagyományos elrendezésekhez.

A γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezések látszólagos fajlagos ellenállás értékeinek invertálása során a legutoljára alkalmazott simító tényező általában nagyobb, vagy ugyanakkora volt, mint a hagyományos elrendezéseké. A γ_{11n} elrendezések RMS értékei többnyire nagyobbak voltak, mint a hagyományos elrendezéseké és az RMS n értékének növekedésével is nőtt.

Az ábrasorozat első ábráján, a 3.17. ábrán jól láthatjuk, hogy a W-Sch, a W- α és a γ_{111} elrendezések még a 2 cm mélyen elhelyezkedő lemez modellt sem tudták kimutatni. Ez a három konfiguráció a legtöbb analóg módon vizsgált modellre hasonló EET szelvényt produkált, emiatt az ábrákon egymás alá helyeztem őket, függetlenül attól, hogy részben α -, részben γ - típusú elrendezések. A W-Sch és W- α elrendezéseknek volt a legkisebb kimutathatósági mélység értéke a numerikus vizsgálatok alapján is. Az analóg modellezés eredményei így módon igazolták a numerikus vizsgálatok eredményeit. A γ_{111} elrendezés azonban amíg numerikus modellezés során 6 cm-es mélységig ki tudta mutatni a modellt, addig analóg modellezés során még a 2 cm mélyen elhelyezkedőt sem.

A felszín közelében elhelyezett ható esetében, a 3.17 és 3.18 ábrákon a γ_{q0} és a γ_{313} elrendezések elektromos fajlagos ellenállás szelvényén a vizsgált modell mellett egy nagy elektromos fajlagos ellenállás kontraszt figyelhető meg. Ez a numerikus modellezések

során is jelentkezett (3.3.1. fejezet).

A P-Dp elrendezés a 3 cm mélyen elhelyezkedő lemez modellt (3.18. ábra) már nem tudta kimutatni. Az EET szelvényén ugyan megfigyelhető a felszín közelében egy alacsony fajlagos ellenállású zóna, de ez alapján nem lehet a lemez modellre következtetni. Az analóg modellezés alapján a β -típusú elrendezések közül a P-Dp elrendezésnek a legkisebb a kimutathatósági mélysége.

A 4 cm mélyen (3.19. ábra) elhelyezkedő lemezt a St elrendezés még ki tudta mutatni, míg a következő mélységben vizsgált modellt (3.20. ábra) már egyáltalán nem. Az EET szelvényén nem fedezhető föl alacsony fajlagos ellenállású anomália. A hagyományos elrendezésekre általánosságban az jellemző, hogy a mélység növekedésével az EET szelvényeken megjelenő anomáliák kiterjedése nagyobb lesz. Például a Dp-Dp konfiguráció elektromos fajlagos ellenállás szelvényein 5-7 cm mélyen (3.20., 3.21. és 3.22. ábrák) elhelyezkedő modell esetében nagyon jól megfigyelhető ez.

Az 3.20. ábrán, az 5 cm mélyen elhelyezett modell vizsgálatakor már a $W-\beta$ és a γ_{313} elrendezések EET szelvényein megjelenő anomáliák esetében is megfigyelhető a terítés irányában történt elmozdulás a modell pozíciójához képest.

A legnagyobb vizsgált mélységekben, 6-7 cm mélyen elhelyezkedő modell (3.22. ábra) esetében ugyan még megjelenik egy alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália a $W-\beta$ és a Dp-Dp elrendezések elektromos fajlagos ellenállás szelvényein, viszont azok alapján nem lehetne a modell helyét meghatározni.

A γ_{11n} ($n=2-7$), γ_{q0} és a γ_{313} elrendezések még a legnagyobb mélységben elhelyezett lemezt is ki tudták mutatni (3.22. ábra). A γ_{11n} ($n=5-7$) elrendezések esetében azonban 5-7 cm-es mélységben (3.20., 3.21. és 3.22. ábrák) szisztematikus zajok is megjelentek a modell mellett. Ezek a numerikus vizsgálatok során nem léptek föl. Ahogy a 3.2. fejezetben írtam, ezeket a szisztematikus zajokat okozhatta a szigetelő falú medence is. A γ_{11n} ($n=2-4$) elrendezések elektromos fajlagos ellenállás szelvényein nem jelennek meg a zavaró álanomáliák.

A hagyományos és a St elrendezések elektromos tomográfia szelvényein valamilyen szinten minden modell esetében fölfedezhető a felszín közelében egy alacsony fajlagos ellenállású zóna, ami a γ_{11n} ($n=4-7$) elrendezéseken nem tapasztalható. A jelenség minden analóg mérés során föllépett, egy látványos példán (3.27) szeretném majd részletesen

bemutatni.

A grafit lemez analóg modellezéssel vizsgált kimutathatósági mélységének eredményeit a 3.4. táblázatban alul összegzem. A 4. tézis első fele a kimutathatósági mélység numerikus és analóg vizsgálatának összehasonlítására vonatkozik, emiatt a numerikus modellezéssel kapott eredményekkel együtt mutatom be az analóg modellezés eredményeit. Az analóg modellezés eredményeinek összefoglaló táblázatában nem vettem figyelembe a γ_{11n} ($n=5-7$) elrendezések esetében föllépő szisztematikus zajokat.

A numerikus modellezés eredménye:

d	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								γ_{q0}	γ_{313}
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}			
2	x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
3	x	x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	x	x	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	x	x	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	x	x	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	
7	x	x	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	

Az analóg modellezés eredménye:

d	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}	γ_{q0}	γ_{313}
2	x	x	1	1	1	1	x	1	1	1	1	1	1	0	1
3	x	x	1	1	1	1	x	1	1	1	1	1	1	0	0
4	x	x	0	0	1	1	x	1	1	1	1	1	1	1	1
5	x	x	x	0	1	x	x	1	1	1	1	1	1	1	1
6	x	x	x	0	0	x	x	1	1	1	1	1	1	1	1
7	x	x	x	0	0	x	x	1	1	1	1	1	1	1	1

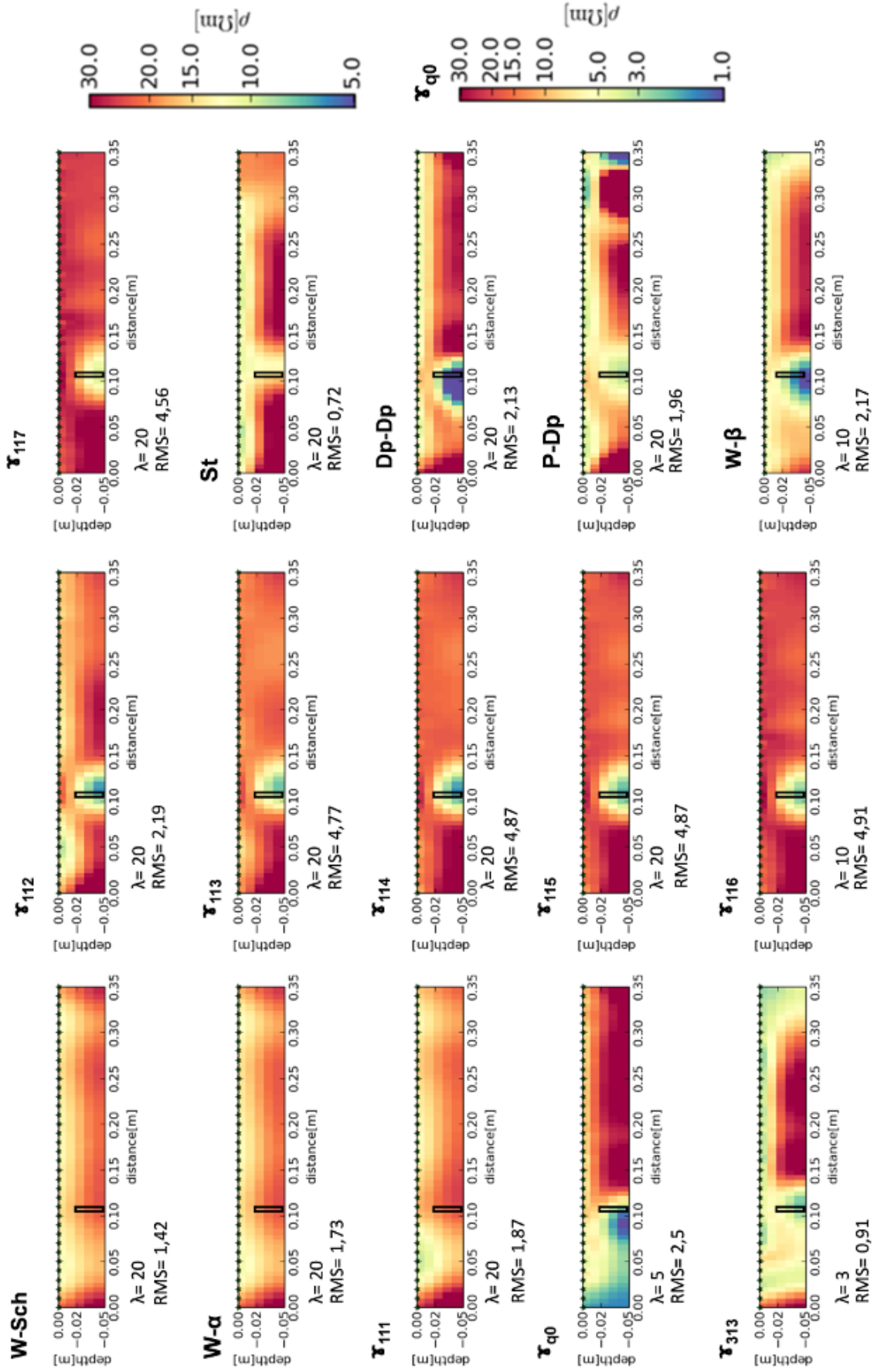
3.4. táblázat. Nagy elektromos vezetőképességű lemez felett végzett kimutathatósági mélység numerikus és analóg vizsgálatának összefoglaló táblázatai. **d**: a lemez modell mélysége cm-ben. **1**: az adott elrendezés visszaadta a vizsgált modellt, **0**: ugyan megjelent egy alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen, de az alapján nem lehet a modell helyére és alakjára következtetni, **x**: egyáltalán nem jelent meg alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen. Szürke háttérrel jelöltem az utolsó 1-es értéket.

A 3.4. táblázatban bemutatott eredmények alapján megfogalmazható a 4. tézis első fele.

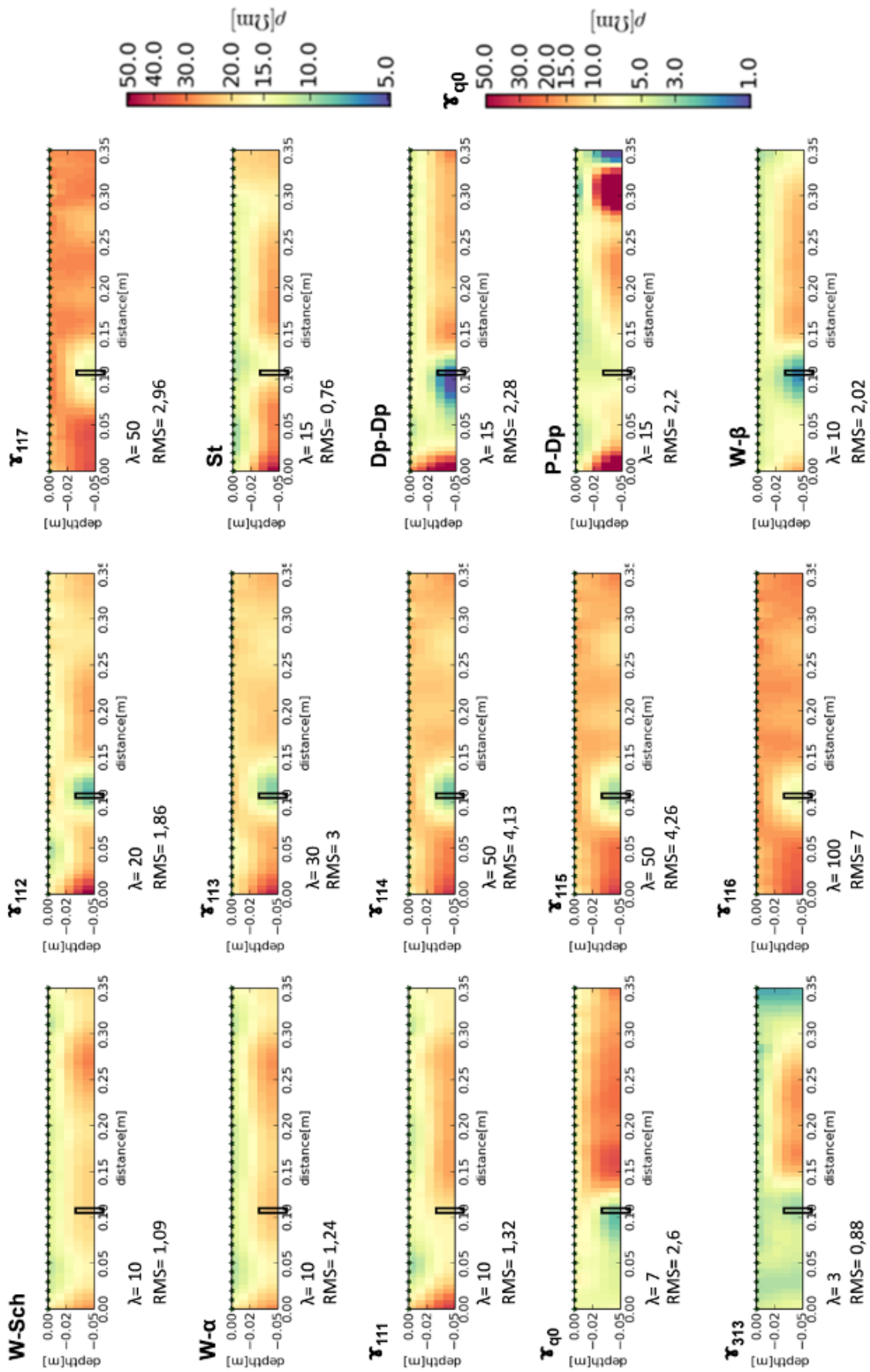
4.tézis:

A szerző analóg modell mérésekkel igazolta a hagyományos és a γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezések lemez modellre vonatkozó kimutathatósági mélységének

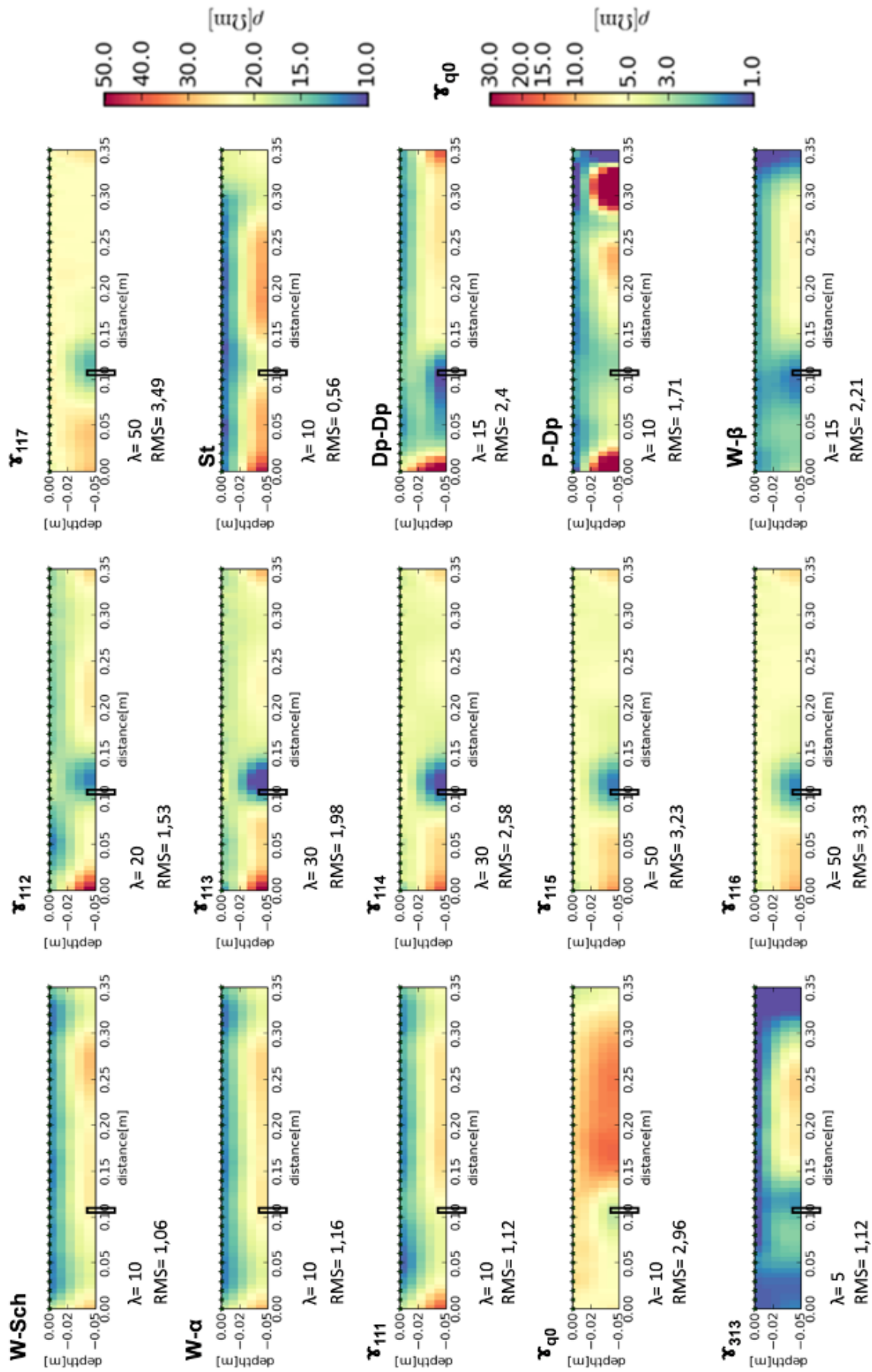
és a horizontális fölbontóképességének numerikus vizsgálata során kapott eredményeit (2. és 3. tézisek). Így kimutatta, hogy a mérési eredményeket befolyásoló zajok nem lehetetlenítik el a vizsgált nem hagyományos elrendezésekkel végrehajtott méréseket.



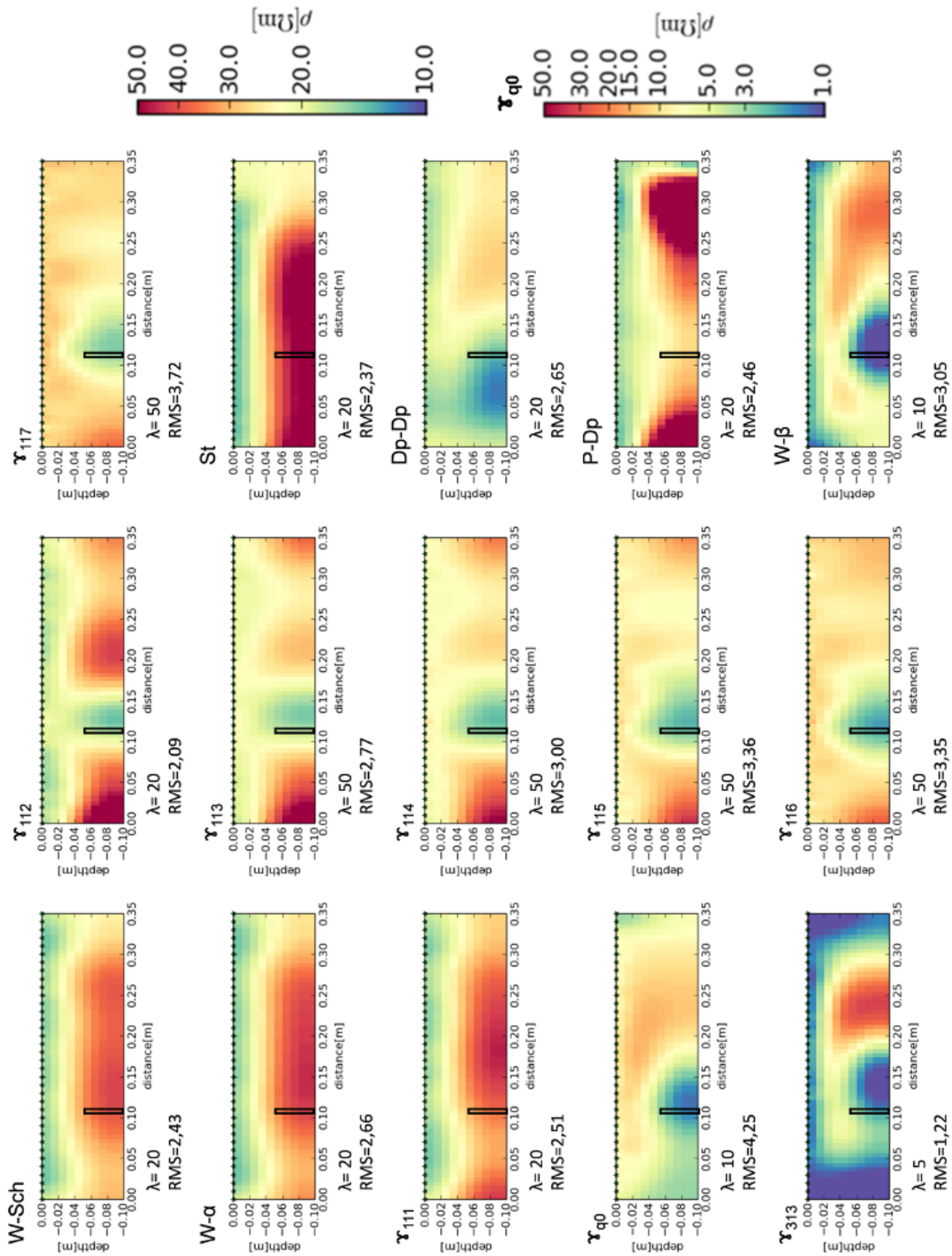
3.17. ábra. A 0,5 cm vastag 2 cm-es mélységben elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.



3.18. ábra. A 0,5 cm vastag 3 cm-es mélységben elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.

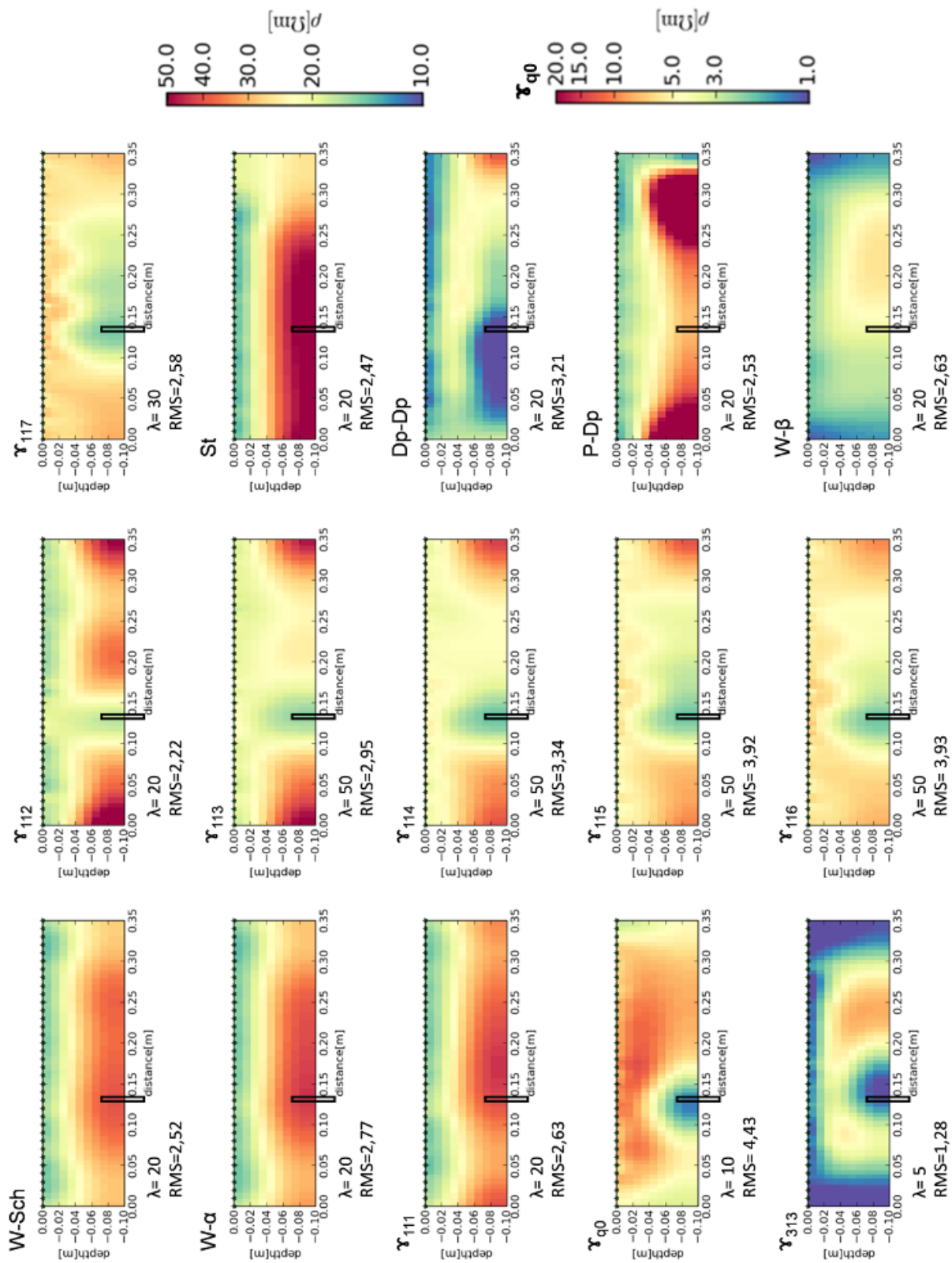


3.19. ábra. A 0,5 cm vastag 4 cm-es mélységben elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.



3.20. ábra. A 0,5 cm vastag 5 cm-es mélységben elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.





3.22. ábra. A 0,5 cm vastag 7 cm-es mélységben elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.

Henger modell vizsgálata

A henger modellt csak két mélységben vizsgáltam, 2 és 2,5 cm mélyen. Ennek oka, hogy a modellezéshez használt horganyzott vascső elektromos fajlagos ellenállása lényegesen eltér a vas irodalmi fajlagos ellenállás értékétől, emiatt jóval kisebb volt a kontraszt a modell és a befoglaló közeg között. A legtöbb vizsgált hagyományos elrendezés már a 2,5 cm mélyen elhelyezett hatót sem tudta kimutatni. A modelleket részletesen bemutatom a 3.2. ábrán.

A W-Sch, W- α , a γ_{111} és a P-Dp elrendezések már a 2 cm mélyen elhelyezkedő hatót sem tudták kimutatni, ahogy azt a 3.23. ábrán látjuk. Ezeknek az elrendezéseknek a legkisebb tehát a kimutathatósági mélységük a vizsgált henger modell esetében.

A Dp-Dp elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényén megjelenő anomália már ebben a mélységben is jóval nagyobb kiterjedésű (3.23. ábra), mint a vizsgált modell és a terítés irányában is eltér modell helyétől. Ezt a jelenséget a nagyobb mélységben (5-7 cm) elhelyezkedő nagy elektromos vezetőképességű lemez modell esetében is tapasztaltam. A St elrendezés a 2 cm mélyen elhelyezkedő henger modellt ugyan még ki tudta mutatni, de a 2,5 cm mélyen elhelyezkedő modellt egyáltalán nem jelenítette meg az EET szelvényen. A hagyományos elrendezések közül a W- β elrendezés adja vissza legjobban a vizsgált modell alakját és pozícióját mindkét vizsgált mélységben. A lemez modell kimutathatósági mélység analóg vizsgálata során is ezt a sorrendet lehetett föllátni a hagyományos elrendezések között.

A szelvény bal szélén (1-7 cm) egy alacsony fajlagos ellenállású anomáliát figyelhetünk meg a 2 cm mélyen elhelyezkedő modell esetében (3.23. ábra). A Dp-Dp és valamelyest a W- β elrendezés is egybeolvasztották ezt a felszínközeli anomáliát a vizsgált modell által okozott anomáliával, míg a St, a γ_{112} és γ_{113} elrendezések egyértelműen különválasztották a két anomáliát. A γ_{11n} ($n=4-7$) elrendezések nem detektálták a felszínközeli változást.

A γ_{11n} ($n=2-7$), a γ_{313} és a γ_{q0} elrendezések mellett a W- β konfiguráció is kimutatta a 2,5 cm mélyen elhelyezkedő horganyzott vascső modellt (3.24. ábra). A γ_{11n} ($n=2-4$) elrendezések nagyon pontosan visszaadták a vizsgált modellt. Nagyobb n értékű elrendezések esetében ismételtén megfigyelhetők a szisztematikus zajok, igaz nem olyan zavaró mértékben, mint a nagyobb mélységben (5-7 cm) vizsgált lemez modell esetében

(3.4.1. fejezet).

Nagyon érdekes, hogy a γ_{q0} és a γ_{313} elrendezések a nagyobb mélységben vizsgált hatót pontosabban visszaadták, mint a kisebb mélységben elhelyezkedőket.

A befoglaló közeghez képest kisebb elektromos fajlagos ellenállású henger modell kimutathatósági mélység vizsgálatát a 3.5. táblázatban foglaltam össze.

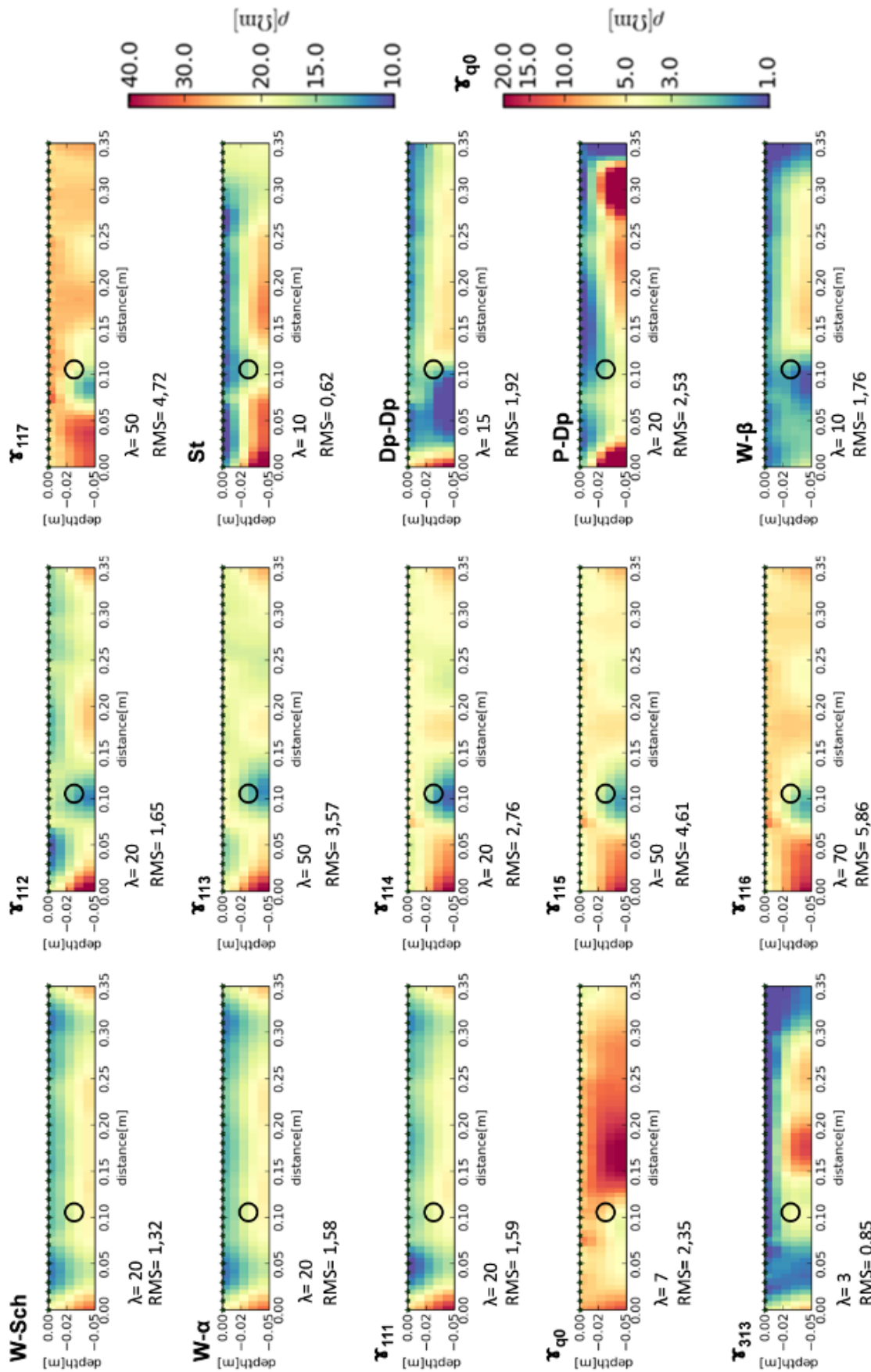
d	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}	γ_{q0}	γ_{313}
2	x	x	0	0	1	1	x	1	1	1	1	1	1	1	1
2.5	x	x	x	0	1	0	x	1	1	1	1	1	1	1	1

3.5. táblázat. Az alkalmazott elrendezésekkel a befoglaló közeghez képest kisebb elektromos fajlagos ellenállású henger modell fölött végzett kimutathatósági mélység analóg vizsgálatának összefoglaló táblázata. **d**: a henger modell mélysége cm-ben **1**: az adott elrendezés visszaadta a vizsgált modellt, **0**: ugyan megjelent egy alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen, de az alapján nem lehet a modell helyére és alakjára következtetni, **x**: egyáltalán nem jelent meg alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen. Szürke háttérrel jelöltem az utolsó 1-es értéket.

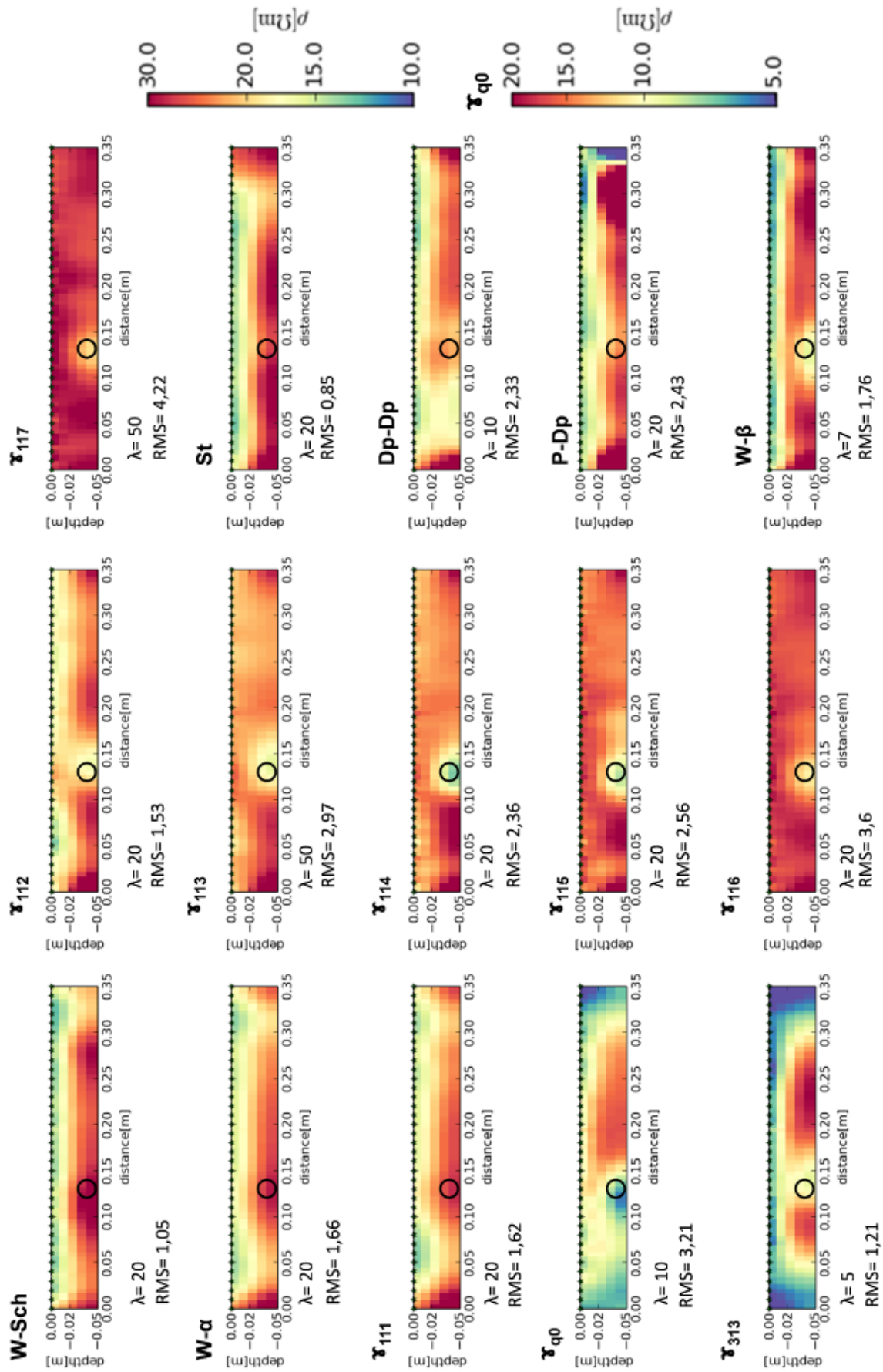
A lemez és henger modellek analóg kimutathatósági mélység vizsgálatának eredménye alapján állítottam föl az 5. tézist.

5.tézis

A szerző megmutatta mind a lemez, mind a henger modell analóg vizsgálatával, hogy az $n=2-7$ paraméterű γ_{11n} elrendezések elektromos fajlagos ellenállás szelvényein élesebben megjelenő anomáliáknak köszönhetően a legnagyobb vizsgált mélységben is lehetséges a ható jobb lokalizálása és alakhűbb megjelenítése.



3.23. ábra. A 2 cm mélyen elhelyezkedő a befoglaló közeghez képes kisebb elektromos fajlagos ellenállású henger modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.



3.24. ábra. A 2,5 cm mélyen elhelyezkedő a befoglaló közeghez képes kisebb elektromos fajlagos ellenállású henger modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.

3.4.2. Horizontális fölbontóképesség vizsgálat

A horizontális fölbontóképességét vizsgálata során három párhuzamos 0,5 cm vastag grafit lemez felett végeztem a méréseket. Kettő közülük közelebb, 5 cm-re helyezkedett el egymástól, a harmadik pedig 10 cm-re a hozzá közelebb eső lemeztől. A 3.2. ábrán látható a modell felül- és oldalnézeti vázlata.

A 3.25. ábrán láthatjuk, hogy a W-Sch és a W- α elrendezések egyáltalán nem tudják elválasztani egymástól a három hatót. Ennek a modellnek a numerikus vizsgálatokor a W- α konfiguráció a két lemeztől távolabb elhelyezkedő harmadik lemezt valamelyest még külön tudta választani a többitől. A W-Sch és a W- α elrendezések esetében megjelenő anomáliák széle nem a két szélső lemezen túl van, hanem azok előtt még. Tehát a megjelenő anomália kisebb, mint lemez modellek által kijelölt terület. Terepi méréseknél, repedés rendszerek kiterjedésének meghatározásánál nagyon fontos lehet ez a jelenség.

A β -típusú, a St, a γ_{111} és a γ_{112} elrendezések csak a két egymáshoz közelebb elhelyezkedő lemez által okozott anomáliát vonták össze. Az összevont anomáliájú lemezek esetében az anomália a két lemez közé esett. Ezeknél az elrendezéseknél is kisebb az anomália mérete, mint a lemez által kijelölt terület.

A γ_{11n} ($n=3-7$), a γ_{313} és a γ_{q0} elrendezések mindhárom modell testet képesek voltak különválasztani. A γ_{q0} elrendezés esetében itt is megjelenik a hatók mellett a határozott elektromos ellenállás kontraszt, amit a numerikus modellezésnél is tapasztaltam. Ennek köszönhetően a γ_{q0} nagyon pontosan meghatározta a modellek helyét.

Három grafit lemez fölött végzett horizontális fölbontóképesség analóg modellezéssel vizsgált eredményeit a 3.6. táblázatban alul összegzem. A 4. tézis második fele a horizontális fölbontóképesség numerikus és analóg vizsgálatának összehasonlítására vonatkozik. Emiatt a numerikus modellezés során kapott eredményekkel együtt mutatom be az analóg modellezés eredményeit.

A numerikus modellezés eredményei:

	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}	γ_{q0}	γ_{313}
N	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3

Az analóg modellezés eredményei:

	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}	γ_{q0}	γ_{313}
N	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3

3.6. táblázat. Három nagy elektromos vezetőképességű lemez modell felett végzett horizontális fölbontóképesség numerikus és analóg vizsgálatának eredménye. **N**: a megjelenő anomáliák száma. **1** megjelenő anomália esetében mindhárom hatót összevonta az adott elrendezés, **2** esetében csak a távolabb elhelyezkedő modellt különítette el az adott elrendezés, míg **3** esetében elkülönültek a vizsgált hatók.

A 3.6. táblázat eredményei alapján megfogalmazható a 4. tézis második fele.

4.tézis

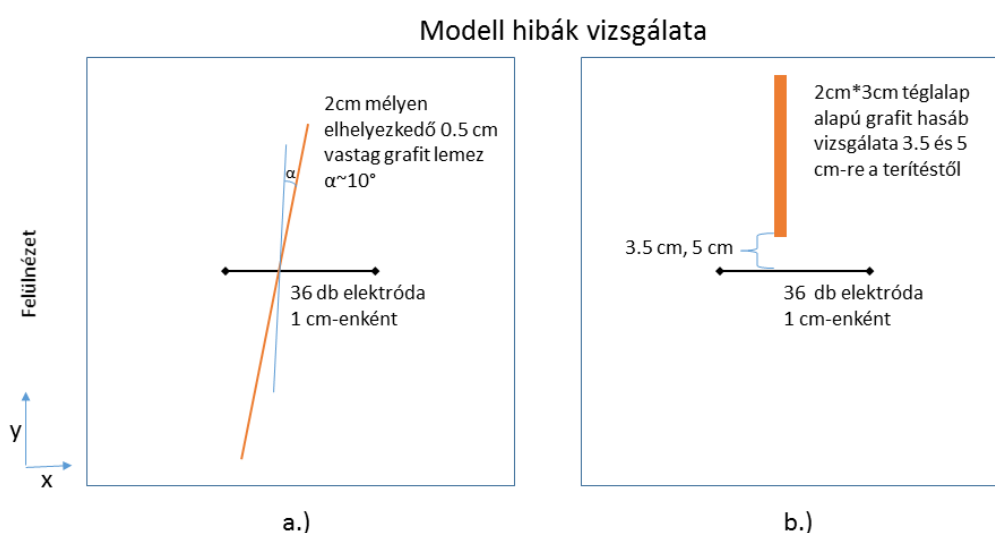
A szerző analóg modell mérésekkel igazolta a hagyományos és a γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezések lemez modellre vonatkozó kimutathatósági mélységének és a horizontális fölbontóképességének numerikus vizsgálata során kapott eredményeit (2. és 3. tézisek). Így kimutatta, hogy a mérési eredményeket befolyásoló zajok nem lehetetlenítik el a vizsgált nem hagyományos elrendezésekkel végrehajtott méréseket.



3.25. ábra. Horizontális fölbontóképesség vizsgálat: A 2 cm mélyen elhelyezkedő 3 egymással párhozamos, egymástól 5, illetve 10 cm-re elhelyezkedő grafit lemez fölött végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált szelvény. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.

3.4.3. Egyes modellhibák vizsgálata

Terepen, hiányos *a priori* információk birtokában előfordulhat, hogy nem a megfelelő módon kivitelezzük a méréseket. Gyakran megesik például, hogy terítési irány pozicionálási hibát vétünk. Ebben az esetben a terítés iránya nem lesz merőleges a ható irányára, illetve az is előfordulhat, hogy a rossz helyen kivitelezett mérés miatt a vizsgált kétdimenziós inhomogenitás nem tekinthető y irányban végtelennek, hanem csak a térítéstől egy adott távolságban elhelyezkedő véges hatónak. Ilyen eseteket vizsgálatát mutatom be ebben a fejezetben. Az alkalmazott modellek a 3.26. ábrán láthatóak.



3.26. ábra. A modellhibák vizsgálata során tanulmányozott modellek felülnézetben

Először egy 2 cm mélyen elhelyezkedő, 0,5 cm vastag grafit lemezt vizsgáltam az ideális merőleges pozíció helyett attól 10°-ban eltérő helyzetben (3.26. a. ábra). Ekkor egyedül a P-Dp elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényén nem lehet itt felfedezni a vizsgált modellt. Ez azért volt meglepő számomra, mert a paraméter-érzékenység térképei hasonlóak a Dp-Dp elrendezéséhez. A többi elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényén pontosan megjelent az anomália.

A másik modellhiba típus, amit vizsgáltam, az y irányban véges ható problémája (3.26. b. ábra). Ez nemcsak modellhiba lehet, hanem előfordulhat, hogy egy megoldandó feladat modellje, illetve, hogy egy vizsgálat esetében zajforrásként jelentkezik. Városi környezetben, pl. ahol nincs elegendő hely a vizsgálatokra és az épületek, vagy

műtárgyak zavaró oldalhatása megjelenhet az elektromos fajlagos ellenállás szelvényeken. Ilyen esetekben zajként fognak fellépni az EET szelvényeken ezek a véges távolságban elhelyezkedő hatók.

A 2 cm mélyen elhelyezkedő 2 cm * 3 cm-es téglalap alapú grafit hasábot 3.5 és 5 cm-re helyeztem el a profiltól. 3,5 cm-re a profiltól a W-Sch, a W- α és a γ_{111} elrendezések elektromos fajlagos ellenállás szelvényén a hasáb modell egyáltalán nem jelenik meg (3.29. ábra). A hagyományos elrendezések közül a W- β , a St és valamelyest a Dp-Dp elrendezések mutatták ki ebből a távolságból a vizsgált hatót (3.29. ábra.).

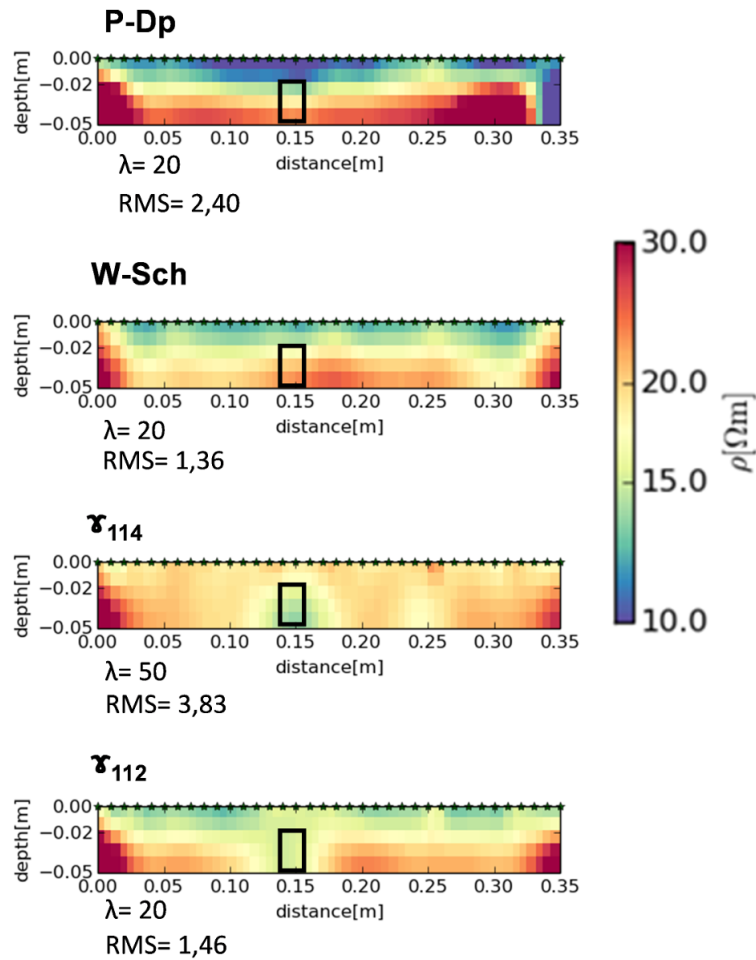
A 3.29. ábrán megfigyelhetjük, hogy a γ -típusú elrendezések közül a γ_{112} , a γ_{113} és a γ_{313} elrendezések adják vissza legalakhűbben az eredeti modellt. A γ_{114} és a γ_{q0} elrendezések elektromos fajlagos ellenállás szelvényén a terítés irányában eltérés tapasztalható a modell helyéhez képest, a γ_{11n} (n=5-7) elrendezések EET szelvényein megjelenő anomáliák pedig kevésbé élesek.

A terítéstől 5 cm-re elhelyezkedő modell (3.30. ábra) esetében már a P-Dp, és a St elrendezések EET szelvényein nem fedezhető föl alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália. A Dp-Dp és a W- β konfigurációkén még megjelenik egy a modellnél nagyobb kiterjedésű kis elektromos fajlagos ellenállású anomália, de az alapján már nem lehetne meghatározni a modell helyét.

Érdekes, hogy a γ_{11n} (n=2-7) elrendezések a terítéstől messzebb elhelyezkedő hatót jobban visszaadták, mint a közelebb elhelyezkedőt. A terítéstől 5 cm-es (3.30. ábra) távolságban elhelyezkedő ható vizsgálatok az egyik γ_{11n} elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényén megjelenő anomália esetében sem figyelhető meg a profil irányában történő eltérés a modell helyéhez képest.

A vizsgált elrendezések közül a véges távolságban elhelyezkedő modellre a γ -típusú elrendezések a legérzékenyebbek. Nagyon fontos, hogy ezt szem előtt tartsuk, mikor városi környezetben nincs elegendő hely a méréseink kivitelezésére és az épületek, vagy tárgyak zavaró oldalhatása megjelenhet az elektromos fajlagos ellenállás szelvényeken. Ugyanakkor ha az a cél, hogy oldalról nézzünk be pl. egy épület alá [Bania és Cwiklik, 2013], akkor a γ_{11n} elrendezések ezen tulajdonsága kifejezetten előnyös lehet.

A 3.27. ábrán az analóg modellezés során egy általánosan fellépő jelenséget mutatok be, mely két okból is nagyon fontos. A terítéstől 5 cm-re elhelyezkedő véges ható modelljét



3.27. ábra. Véges ható analóg vizsgálata a P-Dp, a W-Sch, a γ_{114} és a γ_{112} elrendezések esetében: 5 cm-re helyezkedik el a grafit hasáb a terítéstől λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.

választottam ezek szemléltetésére.

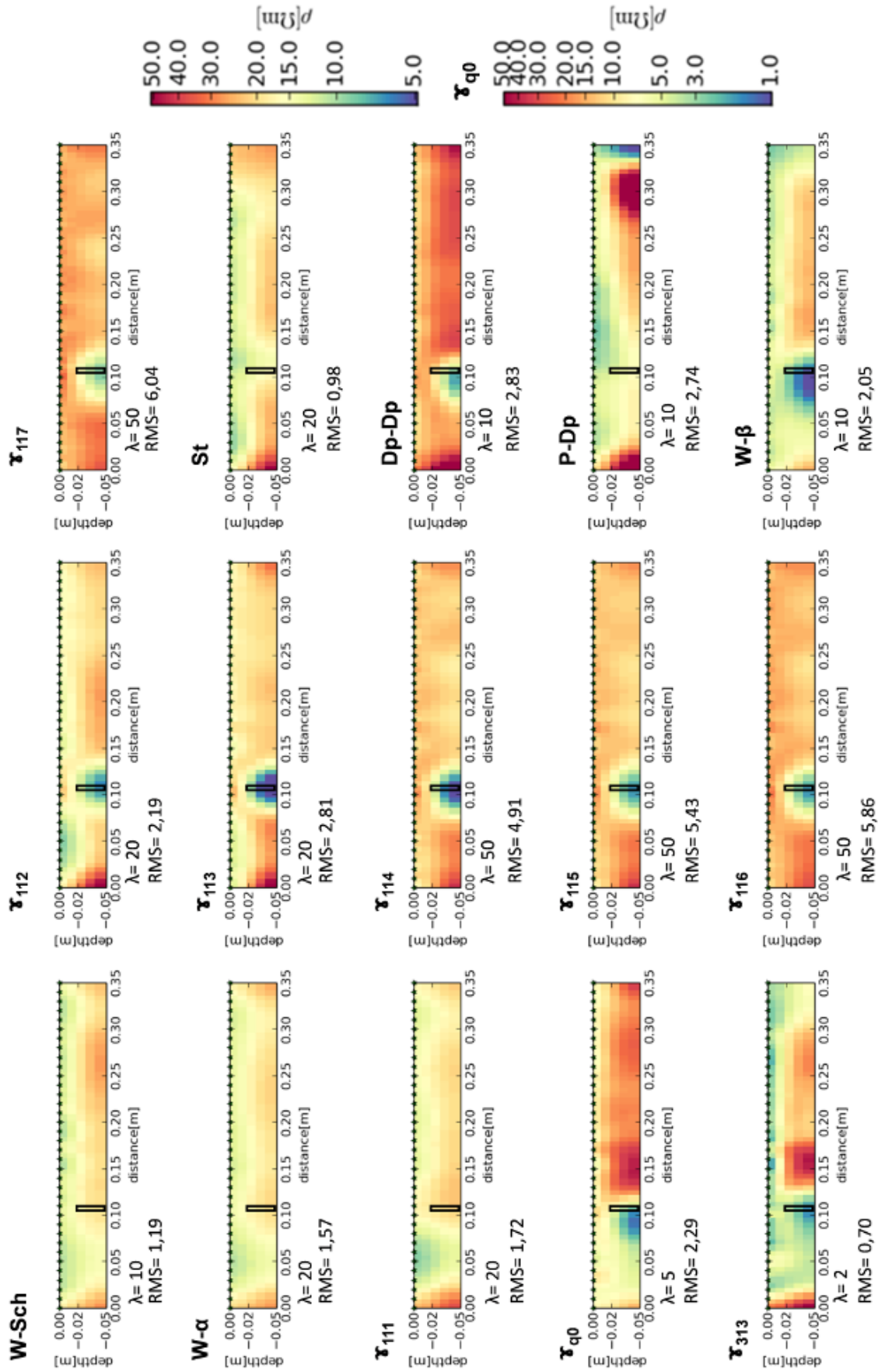
A 3.27. ábrán a P-Dp elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényén egyáltalán nem jelenik meg a vizsgált 2D ható, illetve a felszínközeli 1D és 2D változások nem jelennek meg olyan részletgazdagon, mint mondjuk a W-Sch elrendezés esetében. A W-Sch elrendezés nagyon jól leképezi a felszínközeli változásokat. A γ_{114} elrendezés EET szelvényén csak a vizsgált 2D ható jelenik meg, míg a γ_{112} elrendezés a felszínközeli változásokat és a vizsgált 2D modellt is visszaadja. A felszínközeli változások ugyanúgy jelentek meg az EET szelvényén, mint a W-Sch elrendezésén.

Ezek alapján fölállítottam az 6. tézist.

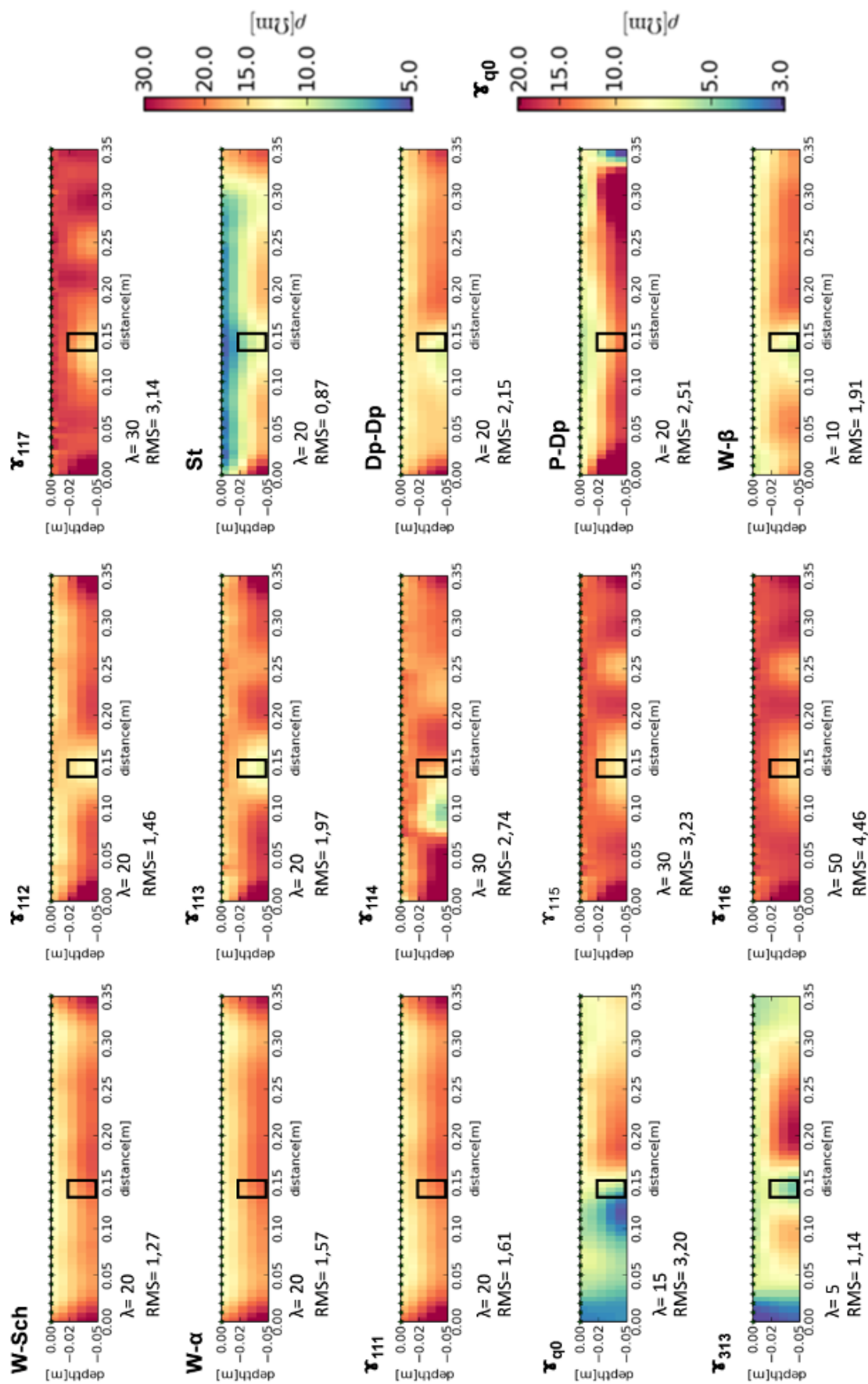
6.tézis:

Az analóg modell mérésekkel igazolta a szerző, hogy növekvő n -nel a γ_{11n} elrendezések viselkedése közelít a null elrendezésekhez, amelyek az 1D változásokra teljesen érzéketlenek, azokon mintegy "átlátnak". A W-Sch és a W- α elrendezések az 1D és a felszínközeli 2D változásokat jelenítették meg. A γ_{112} elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényein mind az 1D, mind a vizsgált nagyobb mélységben lévő 2D ható megjelent. γ_{11n} ($n=4-7$) elrendezések viszont csak a vizsgált 2D ható által kiváltott fajlagos ellenállás változásokat tudták kimutatni.

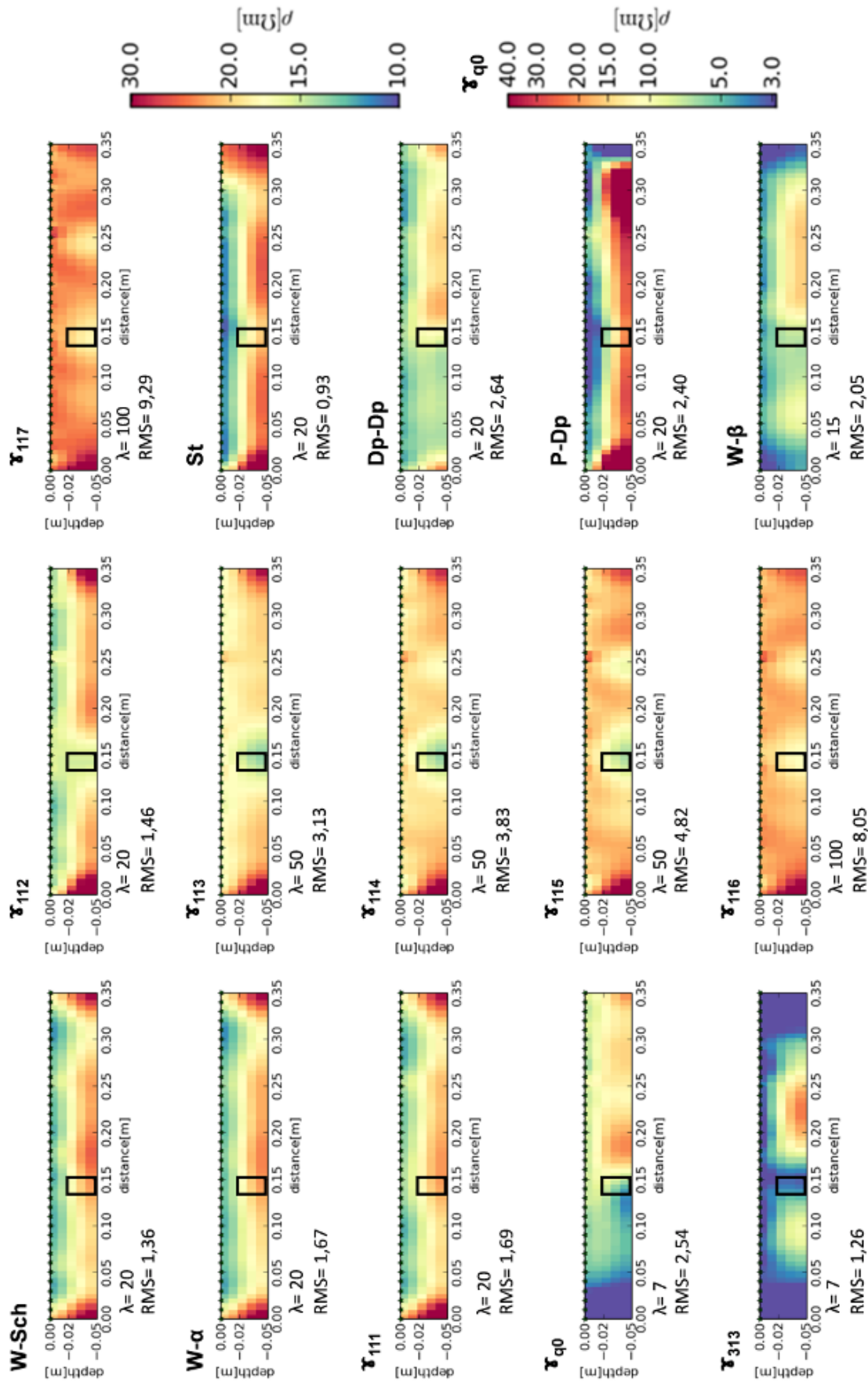
A másik ok, ami miatt bemutatásra került a 3.27. ábra egy új megközelítés felvetése. Míg bizonyos elrendezések (W-Sch, W- α) nagyon jól visszaadják a felszínközeli 1D és 2D változásokat, de a kimutathatósági mélységük a legkisebb volt a vizsgált elrendezések közül, addig pl. a γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezéseknek nagyobb a kimutathatósági mélység értéke, viszont a legtöbb γ_{11n} nem detektálta a felszínközeli változásokat. A vizsgálataim alapján úgy tűnik, hogy célravezetőbb lenne nem elvárni, hogy egyetlen elrendezés szolgáltatson ugyanolyan minőségű információt a vizsgált feltér egészéről, hanem célirányosan több elrendezéssel mérni, majd az EET szelvények földolgozásakor azok eredményét egymást kiegészítve értelmezni.



3.28. ábra. Terítési irány pozicionálási hiba analóg vizsgálat: 2 cm mélyen elhelyezkedő grafit lemez modell. $\alpha = 10^\circ$, λ : az inverzió során az utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.



3.29. ábra. Végtes ható analóg vizsgálata: 2 cm mélyen a terítéstől 3,5 cm-re elhelyezkedő grafit hasáb felett végzett vizsgálat eredménye. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.



3.30. ábra. Véges ható analóg vizsgálata: 2 cm mélyen, a terítéstől 5 cm-re elhelyezkedő grafit hasáb felett végzett vizsgálat eredménye. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.

3.5. Összefoglalás

Az eredetileg egydimenziós modellek kutatására kifejlesztett egyenáramú geoelektromos módszer felhasználási köre ez elmúlt évtizedekben olyan kutatási területekre is kibővült, ahol két-, vagy háromdimenziós modellek írják le a vizsgált hatókat.

A paraméter-érzékenység térképek vizsgálatából kiderült, hogy a nagy n értékű γ_{11n} elrendezések különösen érzékenyek a féltér szimmetrikustól való eltéréseire, köszönhetően a térképeken megjelenő kvázi-antiszimmetria tengelynek. Feltételezhető volt, hogy emitt kedvezőek lesznek a két- és háromdimenziós leképezési tulajdonságaik is.

A dolgozatomban a leggyakrabban használt hagyományos (W-Sch, W-, W- β , P-Dp, Dp-Dp), a négyelektrodás optimalizált (ún. Stummer), a γ_{11n} ($n=2-7$), a γ_{q0} és a γ_{313} elrendezések kimutathatósági mélységét és horizontális fölbontóképességét tanulmányoztam analóg és numerikus modellezéssel, illetve csak analóg modelleken keresztül bizonyos modellhibák hatását.

Sikeresen alkalmaztam az analóg modellezés egy új formáját, terepi körülményekhez közeli viszonyokat teremtve a laboratóriumban. A többek között a befoglaló közegben fellépő eltérő nedvességtartalom és tömörödöttségi viszonyok miatt fellépő zajokkal terhelve végeztem a vizsgálataimat, viszont a vizsgált modellek paraméterei igazolhatóak voltak.

A kimutathatósági mélység (2. és 4. tézis) és a horizontális fölbontóképesség (3. és 4. tézis) numerikus és analóg vizsgálatai során kapott eredményeit a 3.7. és 3.8. táblázatokban foglaltam össze.

A numerikus modellezés eredménye:

d	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}	γ_{q0}	γ_{313}
2	x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	x	x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	x	x	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
5	x	x	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
6	x	x	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0
7	x	x	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0

Az analóg modellezés eredménye:

d	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}	γ_{q0}	γ_{313}
2	x	x	1	1	1	1	x	1	1	1	1	1	1	0	1
3	x	x	1	1	1	1	x	1	1	1	1	1	1	0	0
4	x	x	0	0	1	1	x	1	1	1	1	1	1	1	1
5	x	x	x	0	1	x	x	1	1	1	1	1	1	1	1
6	x	x	x	0	0	x	x	1	1	1	1	1	1	1	1
7	x	x	x	0	0	x	x	1	1	1	1	1	1	1	1

3.7. táblázat. Nagy elektromos vezetőképességű lemez felett végzett kimutathatósági mélység numerikus és analóg vizsgálatának összefoglaló táblázatai. **d**: a lemez modell mélysége cm-ben, **1**: az adott elrendezés visszaadta a vizsgált modellt, **0**: ugyan megjelent egy alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen, de az alapján nem lehet a modell helyére és alakjára következtetni, **x**: egyáltalán nem jelent meg alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen. Szürke háttérrel jelöltem az utolsó 1-es értéket.

A numerikus modellezés eredményei:

N	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}	γ_{q0}	γ_{313}
N	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3

Az analóg modellezés eredményei:

N	α -típusú elr.		β -típusú elr.				γ -típusú elr.								
	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	W- β	St	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}	γ_{q0}	γ_{313}
N	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3

3.8. táblázat. Három nagy elektromos vezetőképességű lemez modell felett végzett horizontális fölbontóképesség numerikus és analóg vizsgálatának eredménye. **N**: a megjelenő anomáliák száma, **1** megjelenő anomália esetében mindhárom hatót összevonta az adott elrendezés, **2** esetében csak a távolabb elhelyezkedő modellt különítette el az adott elrendezés, míg **3** esetében elkülönültek a vizsgált hatók.

A doktori munka eredményeit a következő tézisekben foglaltam össze:

Az 1. tézis modelltől függetlenül, minden analóg és numerikus vizsgáltra vonatkozik.

1.tézés

A szerző bebizonyította, hogy a γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezések és a tükrözött változatainak (γ_{n11} ($n=2-7$)) együttes alkalmazása pontosabban visszaadja a vizsgált modellt, mint az eredeti γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezések. Kevesebb zavaró álanomália jelenik meg az invertált elektromos fajlagos ellenállás szelvényeken.

A kimutathatósági mélység (2. tézis) numerikus vizsgálata során egy nagy elektromos vezetőképességű lemez modellt vizsgált a szerző, a vastagságát 4-14 -szeresen meghaladó mélységintervallumban.

2.tézés

A szerző megállapította numerikus modellezéssel a hagyományos és a γ_{11n} ($n=2-7$) konfigurációk kimutathatósági mélységét nagy elektromos vezetőképességű lemez modell esetére, ami alapján a következő növekvő sorrendet állította föl:

- α -típusú (W-Sch, W- α) elrendezések
- β -típusú (P-Dp, Dp-Dp, W- β) elrendezések
- γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezések

A horizontális fölbontóképesség vizsgálatban (3. tézis) a három 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű, egymással párhuzamos lemez, egymástól a mélységük 2,5 és 5-szörös távolságában lévő lemez elkülöníthetőségét tanulmányozta a szerző. A számított látszólagos fajlagos ellenállás értékeket mindkét numerikus vizsgálat során 3%-os normál eloszlású véletlen zajjal terhelte meg.

3.tézis

A szerző megmutatta a horizontális fölbontóképesség numerikus vizsgálatával, hogy az α -típusú elrendezések egyik hatót sem tudták határozottan elkülöníteni a többitől. A β -típusú, az optimalizált (Stummer), a γ_{111} és a γ_{112} elrendezések csak a másik kettőtől távolabb elhelyezkedő lemezt tudták elkülöníteni. A legtöbb γ -típusú elrendezés viszont mindhárom hatót képes volt elkülöníteni egymástól.

A 4. tézis a numerikus modellezések eredményeinek (2. és 3. tézisek) analóg modellezéssel történő igazolására vonatkozik. Az analóg modellezéshez a terepi mérésekhez viszonylag közel álló környezetet alakított ki a szerző. Nedves homokot alkalmazott a féltér modellezésére, melyben többek között az eltérő nedvességtartalom és tömörödöttség miatt környezetétől eltérő elektromos fajlagos ellenállású lokális inhomogenitások is előfordultak és az elektróda polarizáció jelensége is föllépett.

4. tézis

A szerző analóg modell mérésekkel igazolta a hagyományos és a γ_{11n} ($n=2-7$) elrendezések lemez modellre vonatkozó kimutathatósági mélységének és a horizontális fölbontóképességének numerikus vizsgálata során kapott eredményeit (2. és 3. tézisek). Így kimutatta, hogy a mérési eredményeket befolyásoló zajok nem lehetetlenítik el a vizsgált nem hagyományos elrendezésekkel végrehajtott méréseket.

Az 5. tézis a grafit lemez kimutathatósági mélység vizsgálata során és a beágyazó közeghez képest nagyobb elektromos vezetőképességű henger modell vizsgálatakor tapasztalt jelenségre épül. A nagy elektromos vezetőképességű henger modellt az átmérőjéhez közeli mélységtartományban vizsgáltam.

5. tézis

A szerző megmutatta mind a lemez, mind a henger modell analóg vizsgálatával, hogy az $n=2-7$ paraméterű γ_{11n} elrendezések elektromos fajlagos ellenállás szelvényein élesebben megjelenő anomáliáknak köszönhetően

a legnagyobb vizsgált mélységben is lehetséges a ható jobb lokalizálása és alakhűbb megjelenítése.

A 6. tézis a modelltől függetlenül analóg modellezés során fellépő, de az elméleti eredmények alapján várt jelenségre épül.

6. tézis:

Az analóg modell mérésekkel igazolta a szerző, hogy növekvő n -nel a γ_{11n} elrendezések viselkedése közelít a null elrendezésekhez, amelyek az 1D változásokra teljesen érzéketlenek, azokon mintegy "átlátnak". A W-Sch és a W- α elrendezések az 1D és a felszínközelbeli 2D változásokat jelenítették meg. A γ_{112} elrendezés elektromos fajlagos ellenállás szelvényein mind az 1D, mind a vizsgált nagyobb mélységben lévő 2D ható megjelent. γ_{11n} ($n=4-7$) elrendezések viszont csak a vizsgált 2D ható által kiváltott fajlagos ellenállás változásokat tudták kimutatni.

Az analóg és a numerikus modellezési eljárások egymást kiegészítő jellegűek. Kétségtelen, hogy ha egy problémára létezik megbízható numerikus megoldás, akkor azt célszerű használni, de a fizikai kísérletezés szerepe mindig megmarad. Az analóg modellezésnek a geoelektromos kutatásban elfoglalt szerepét a numerikus modellezés ellenőrzésén túl a sikeres (terepihez közeli) mérések után, az összetett valós problémák kutatásában is látom, melyeket numerikus módon nem lennének képesek vizsgálni.

A dolgozatomból egyértelműen kiderült, hogy érdemes a γ -típusú elrendezésekkel foglalkozni. A legtöbb analóg és numerikus módon vizsgált modell esetében pontosan visszaadták a vizsgált hatókat. A γ_{112} elrendezés EET szelvényein mind az 1D, mind a vizsgált nagyobb mélységben lévő 2D ható megjelent, szemben a nagyobb n értékű γ_{11n} elrendezésekkel, melyek csak a vizsgált 2D hatókat tudták kimutatni. Ugyanakkor az igazolható, valós terepi mérések még hiányoznak ahhoz, hogy egyértelművé váljon ezeknek az elrendezéseknek a gyakorlati alkalmazhatósága.

A numerikus és az analóg modellezés eredményei között csak kisebb eltéréseket lehet fölfedezni. A hagyományos elrendezések közül a W- β elrendezés leképezési tulajdonságai bizonyultak a legjobbnak a vizsgált modellekre. A γ -típusú elrendezések kis hatású hatók,

vagy kismértékű elektromos fajlagos ellenállás módosulások időbeli változása esetében többlet információval szolgálhatnak a hagyományos elrendezésekhez képest, így nagyon jól kiegészíthetik őket.

3.6. Az értekezés eredményeinek hasznosítási lehetőségei és a kutatás folytatásának irányai

A γ -típusú elrendezések kis hatású hatókat, vagy kismértékű elektromos fajlagos ellenállás módosulások időbeli változását sikeresebben mutathatják ki, mint a hagyományos elrendezések. A kis hatású hatókat két csoportra oszthatjuk, a lefelé véges (prizma modell) és a lefelé végtelennek tekinthető modellekre (dyke modell), miközben mindkét típus szélessége kicsi tetejének mélységéhez képest. Prizma modellel közelíthetők pl. az eltemetett falmaradványok, földalatti üregek (barlangok és bányavágatok) és a közművek (csövek és vezetékek). Lemez modellel írhatóak le a repedések és a dyke-ok.

A γ_{11n} elrendezésekkel kapcsolatban lehetőséget látok még a különböző n értékű elrendezésekkel mért, vagy számított látszólagos fajlagos ellenállás értékek közös inverziójában. A γ_{11n} elrendezések esetében célszerű lenne tanulmányozni olyan inverzió eredményeit, melynek kezdő modelljét valamelyik hagyományos elrendezés invertált eredménye adta. A hagyományos elrendezések esetében is javíthatja a leképezés minőségét bizonyos elrendezések együttes inverziója.

A γ_{313} és a γ_{q0} elrendezések bizonyos modellek esetében nagyon biztató eredményeket produkáltak, további vizsgálataik, illetve a paraméter-érzékenység térképeik kiszámítása is előremutató lenne.

A terepi körülményekhez közel álló analóg modellező környezet is számos lehetőséget hordoz magában. Lehetővé teszi bizonyos modelltestek elektromos fajlagos ellenállásának időbeli változásának detektálását. Topográfia hatásának tanulmányozására, valamint zajjal terhelt közegben végzett mérések végzésére is alkalmas lehet.

Ábrák jegyzéke

1.1.	Az egyenáramú geoelektromos mérés során alkalmazott áramelektrodák (A,B) és potenciálelektrodák (M,N), valamint az áramvonalak (folytonos vonalak) és az ekvipotenciális vonalak (szaggatott vonalak) szemléltetése.	14
1.2.	A leggyakrabban használt egyenáramú geoelektromos konfigurációk és k geometriai tényezőjük. a és n : az egymáshoz legközelebb elhelyezkedő elektrodák közötti távolság.	15
1.3.	Az 1D, 2D és 3D egyenáramú geoelektromos modellek szemléltetése. . . .	17
2.1.	A MAN , a γ_0 és a dolgozatban vizsgált γ -típusú egyenáramú geoelektromos elrendezések geometriája és k geometriai tényezője, melyet az 1.16 képlet szerint határoztam meg. a : az egymáshoz legközelebb elhelyezkedő elektrodák közötti távolság.	26
2.2.	A <i>Schlumberger</i> elrendezés paraméter-érzékenység térképei a kocka x-, y-, z- komponenseire, valamint a teljes kockára három különböző mélységben. PS:paraméter-érzékenység értékek Forrás: [Szalai és Szarka, 2008b].	30
2.3.	A <i>Dipól-Dipól</i> elrendezés paraméter-érzékenység térképei a kocka x-, y-, z- komponenseire, valamint a teljes kockára három különböző mélységben. PS:paraméter-érzékenység értékek Forrás: [Szalai és Szarka, 2008b].	31
2.4.	A MAN elrendezés paraméter-érzékenység térképe a teljes térre $R=0.1$ mélységben. Forrás: [Szalai és Szarka, 2008b].	32
2.5.	A γ_{117} elrendezés paraméter-érzékenység térképei a kocka x-, y-, z- komponenseire, valamint a teljes kockára három különböző mélységben. PS:paraméter-érzékenység értékek Forrás: [Szalai és Szarka, 2008b].	33

2.6.	Mélységérzékenység karakterisztika függvények típusai néhány kiválasztott elrendezés alapján (balról jobbra: Wenner- α , aszimmetrikus Dipól-ekvatoriális, Pól-Pól, MAN elrendezés), ezek z^*/R (kutatási mélység a maximum alapján [Roy és Apparao, 1971]) és z_e/R (kutatási mélység a középérték alapján [Edwards, 1977]) értékei hipotetikus zajszinttel. A vízszintes nyilak a növekvő értékek felé mutatnak. Forrás: [Szalai és tsai., 2009]. .	35
3.1.	Az analóg és numerikus modellezés során alkalmazott konfigurációk paraméterei. Az a és n paramétereket az 1.2 és a 2.1. ábrákon definiáltam.	40
3.2.	Az analóg és numerikus modellezéssel vizsgált modellek felülnézeti és oldalnézeti képe, illetve a numerikus modellezésnél alkalmazott paraméterek. ρ_f : a féltér elektromos fajlagos ellenállása, ρ_h : a ható elektromos fajlagos ellenállása . . .	41
3.3.	Az eredeti, γ_{11n} és a tükrözött, γ_{n11} elrendezések szemléltetése az $n=3$ elrendezés példáján.	42
3.4.	A γ_{112} és a γ_{211} elrendezések, valamint az együttes alkalmazásuk numerikus és analóg modellezés esetében.	42
3.5.	A γ_{117} és a γ_{711} elrendezések, valamint az együttes alkalmazásuk numerikus és analóg modellezés esetében.	43
3.6.	A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 2 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, a 1.33 képlet szerint meghatározva.	49
3.7.	A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 3 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	50
3.8.	A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 4 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	51

3.9. A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 5 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	52
3.10. A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 6 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	53
3.11. A 0,5 cm vastag nagy elektromos vezetőképességű 7 cm-es mélységben elhelyezkedő lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	54
3.12. A 2 cm mélyen elhelyezkedő 1 m elektromos fajlagos ellenállású prizma modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	57
3.13. A 2,5 cm mélyen elhelyezkedő 1 m elektromos fajlagos ellenállású prizma modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	58
3.14. Horizontális fölbontóképesség vizsgálat: A 2 cm mélyen elhelyezkedő 3 egymással párhozamos, egymástól 5, illetve 10 cm-re elhelyezkedő nagy elektromos vezetőképességű lemez modell felett végzett numerikus vizsgálat eredménye. Az invertált szelvény. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	61
3.15. Az analóg modellezés bemutatása	62
3.16. A befoglaló közeg elektromos fajlagos ellenállás szelvénye a vizsgált elrendezésekkel, λ : az inverzió során az utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	65

3.17. A 0,5 cm vastag 2 cm-es mélységben elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	70
3.18. A 0,5 cm vastag 3 cm-es mélységben elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	71
3.19. A 0,5 cm vastag 4 cm-es mélységben elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	72
3.20. A 0,5 cm vastag 5 cm-es mélységben elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	73
3.21. A 0,5 cm vastag 6 cm-es mélységben elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	74
3.22. A 0,5 cm vastag 7 cm-es mélységben elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	75
3.23. A 2 cm mélyen elhelyezkedő a befoglaló közeghez képes kisebb elektromos fajlagos ellenállású henger modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	78

3.24. A 2,5 cm mélyen elhelyezkedő a befoglaló közeghez képes kisebb elektromos fajlagos ellenállású henger modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált kép. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	79
3.25. Horizontális fölbontóképesség vizsgálat: A 2 cm mélyen elhelyezkedő 3 egymással párhozamos, egymástól 5, illetve 10 cm-re elhelyezkedő grafit lemez modell felett végzett analóg vizsgálat eredménye. Az invertált szelvény. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	82
3.26. A modellhibák vizsgálata során tanulmányozott modellek felülnézetben .	83
3.27. Véges ható analóg vizsgálata a P-Dp, a W-Sch, a γ_{114} és a γ_{112} elrendezések esetében: 5 cm-re helyezkedik el a grafit hasáb a terítéstől λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	85
3.28. Terítési irány pozicionálási hiba analóg vizsgálata: 2 cm mélyen elhelyezkedő grafit lemez modell. $\alpha = 10^\circ$, λ : az inverzió során az utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	87
3.29. Véges ható analóg vizsgálata: 2 cm mélyen a terítéstől 3,5 cm-re elhelyezkedő grafit hasáb felett végzett vizsgálat eredménye. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	88
3.30. Véges ható analóg vizsgálata: 2 cm mélyen, a terítéstől 5 cm-re elhelyezkedő grafit hasáb felett végzett vizsgálat eredménye. λ : az inverzió során utoljára alkalmazott simító tényező, RMS: a hiba, az 1.33 képlet szerint meghatározva.	89

Táblázatok jegyzéke

1.1. Néhány közet elektromos fajlagos ellenállása. Forrás: [Szarka, 1997].	11
3.1. Nagy elektromos vezetőképességű lemez felett végzett kimutathatósági mélység numerikus vizsgálatának összefoglaló táblázata. d : a lemez modell mélysége cm-ben, 1 : az adott elrendezés visszaadta a vizsgált modellt, 0 : ugyan megjelent egy alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen, de az alapján nem lehet a modell helyére és alakjára következtetni, x : egyáltalán nem jelent meg alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen. Szürke háttérrel jelöltem az utolsó 1-es értéket.	46
3.2. $1\ \Omega m$ elektromos fajlagos ellenállású prizma modell felett végzett kimutathatósági mélység numerikus vizsgálatának összefoglaló táblázata. d : a prizma modell mélysége cm-ben, 1 : az adott elrendezés visszaadta a vizsgált modellt, x : egyáltalán nem jelent meg alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen. Szürke háttérrel jelöltem az utolsó 1-es értéket.	56
3.3. Három nagy elektromos vezetőképességű lemez modell felett végzett horizontális fölbontóképesség numerikus vizsgálatának eredménye. N : a megjelenő anomáliák száma, 1 megjelenő anomália esetében mindhárom hatót összevonta az adott elrendezés, 2 esetében csak a távolabb elhelyezkedő modellt különítette el az adott elrendezés, míg 3 esetében elkülönültek a vizsgált hatók.	60

- 3.4. Nagy elektromos vezetőképességű lemez felett végzett kimutathatósági mélység numerikus és analóg vizsgálatának összefoglaló táblázatai. **d**: a lemez modell mélysége cm-ben. **1**: az adott elrendezés visszaadta a vizsgált modellt, **0**: ugyan megjelent egy alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen, de az alapján nem lehet a modell helyére és alakjára következtetni, **x**: egyáltalán nem jelent meg alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen. Szürke háttérrel jelöltem az utolsó 1-es értéket. 68
- 3.5. Az alkalmazott elrendezésekkel a befoglaló közeghez képest kisebb elektromos fajlagos ellenállású henger modell fölött végzett kimutathatósági mélység analóg vizsgálatának összefoglaló táblázata. **d**: a henger modell mélysége cm-ben **1**: az adott elrendezés visszaadta a vizsgált modellt, **0**: ugyan megjelent egy alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen, de az alapján nem lehet a modell helyére és alakjára következtetni, **x**: egyáltalán nem jelent meg alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen. Szürke háttérrel jelöltem az utolsó 1-es értéket. 77
- 3.6. Három nagy elektromos vezetőképességű lemez modell felett végzett horizontális fölbontóképesség numerikus és analóg vizsgálatának eredménye. **N**: a megjelenő anomáliák száma. **1** megjelenő anomália esetében mindhárom hatót összevonta az adott elrendezés, **2** esetében csak a távolabb elhelyezkedő modellt különítette el az adott elrendezés, míg **3** esetében elkülönültek a vizsgált hatók. 81
- 3.7. Nagy elektromos vezetőképességű lemez felett végzett kimutathatósági mélység numerikus és analóg vizsgálatának összefoglaló táblázatai. **d**: a lemez modell mélysége cm-ben, **1**: az adott elrendezés visszaadta a vizsgált modellt, **0**: ugyan megjelent egy alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen, de az alapján nem lehet a modell helyére és alakjára következtetni, **x**: egyáltalán nem jelent meg alacsony elektromos fajlagos ellenállású anomália az EET szelvényen. Szürke háttérrel jelöltem az utolsó 1-es értéket. 91

- 3.8. Három nagy elektromos vezetőképeségű lemez modell felett végzett horizontális fölbontóképeség numerikus és analóg vizsgálatának eredménye. **N**: a megjelenő anomáliák száma, **1** megjelenő anomália esetében mindhárom hatót összevonta az adott elrendezés, **2** esetében csak a távolabb elhelyezkedő modellt különítette el az adott elrendezés, míg **3** esetében elkülönültek a vizsgált hatók. 91

Irodalomjegyzék

- [Ádám és tsai., 1981] Ádám, A., Kardeván, P., Kormos, I., Nagy, Z., Pongrácz, J., Régeni, P., Szabadváry, L., Szarka, L., és Zimányi, I. (1981). Analogue model for studying geoelectric methods in the Geodetic and Geophysical Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences. *Acta Geodetica, Geohysica et Montanistica Acad. Sci. Hung.*, 16 (2-4):359–380.
- [Bania és Cwiklik, 2013] Bania, G. és Cwiklik, M. (2013). 2D electrical resistivity tomography interpretation ambiguity-example of field studies supported with analogue and numerical modelling. *Geology, Geophysics Environment*, 39(4):331–339.
- [Barker, 1979] Barker, D. (1979). Signal contribution sections and their use in resistivity studies. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 39, 123-129.
- [Bhattacharya és Patra, 1968] Bhattacharya, P. és Patra, H. (1968). *Direct current geoelectric sounding*. Elsevier Publishing Company.
- [Dahlin, 2000] Dahlin, T. (2000). Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 48(1):181–187.
- [Dahlin és Zhou, 2004] Dahlin, T. és Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52(5):379–398.
- [Dosso, 1967] Dosso, H. V. (1967). *Analytical and analogue methods of studying electromagnetic variations at the Earth's surface*. PhD thesis, The University of British Columbia, Institute of Earth Science.

- [Drahos és tsai., 1987] Drahos, D., Kis, K., Meskó, A., és Salát, P. (1987). *Bevezetés a gyakorlati geofizikába*. Tankönyvkiadó.
- [Edwards, 1977] Edwards, L. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- [Gyulai, 1989] Gyulai, Á. (1989). Parameter sensitivity of underground DC measurements. *Geophysical Transactions*, 35, 209-225.
- [Gyulai és tsai., 2014] Gyulai, Á., Baracza, M., és Szabó, N. (2014). On the application of combined geoelectric weighted inversion in environmental exploration. *Environmental Earth Sciences*, 71(1):383–392.
- [Gyulai és Szabó, 2014] Gyulai, Á. és Szabó, N. (2014). Series expansion-based geoelectric inversion methodology used for geoenvironmental investigations. *Frontiers in Geosciences*, 2(1):11–17.
- [Hursán, 1996] Hursán, G. (1996). A laterális érzékenységek szerepe a horizontális elektromos szelvényezésben. *Magyar Geofizika*, 37, 106-117.
- [Li és Oldenburg, 1991] Li, Y. és Oldenburg, D. (1991). Aspects of charge accumulation in d. c. resistivity experiments. *Geophysical Prospecting*, 39(6):803–826.
- [Lines és Treitel, 1984] Lines, L. és Treitel, S. (1984). A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, 32(2):159–186.
- [Menke, 1984] Menke, W. (1984). *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press.
- [Nagy, 2011] Nagy, L. (2011). *Infrastruktúra földművek. jegyzet*, Budapest.
- [Noel és Xu, 1991] Noel, M. és Xu, B. (1991). Archeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophys J. Int.*, 107, 95-102.
- [Prodán, 2010] Prodán, T. (2010). *A Balfi-blokk felszínformáinak eredetéről*. PhD thesis, PTE TTK Földtudományok Doktori Iskola.

- [Prácser, 1998] Prácser, E. (1998). Pontforrás potenciáljának számítása kétdimenziós modell esetén. *Magyar Geofizika*, 39:(4), 127-132.
- [Prácser, 2015] Prácser, E. (2015). Geoelektromos és elektromágneses módszerek. kézirat.
- [Roy és Apparao, 1971] Roy, A. és Apparao, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36, 754-760.
- [Spitta, 1973] Spitta, P. (1973). Scale model experiments with solid conductors. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 7(4):445-449.
- [Steiner, 1990] Steiner, F. (1990). *A geostatisztika alapjai*. Tankönyvkiadó.
- [Stummer és tsai., 2004] Stummer, P., Maurer, H., és Green, A. (2004). Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics*, 69(1):120-139.
- [Szalai, 1993] Szalai, S. (1993). Sokelektrodás egyenáramú mérések szivárgások megfigyelésére. Master's thesis, Eötvös Lóránd Tudományegyetem.
- [Szalai, 2002] Szalai, S. (2002). Egyenáramú null elrendezések. *Magyar Geofizika*.
- [Szalai és tsai., 2007] Szalai, S., Koppán, A., és Szarka, L. (2007). Effect of positional inaccuracies on multielectrode results.
- [Szalai és tsai., 2013] Szalai, S., Koppán, A., Szokoli, K., és Szarka, L. (2013). Geoelectric imaging properties of traditional arrays and of the optimized Stummer configuration. *Near Surface Geophysics*, 11(1):51-62.
- [Szalai és tsai., 2015] Szalai, S., Lemperger, I., Metwaly, M., Kis, A., Wertztergom, V., Szokoli, K., és Novák, A. (2015). Increasing the effectiveness of electrical resistivity tomography using γ_{11n} configurations. *Geophysical Prospecting*, 63(2):508-524.
- [Szalai és tsai., 2014] Szalai, S., Lemperger, I., Metwaly, M., Kis, T., Wertztergom, V., Szokoli, K., és Novák, A. (2014). Multiplication of the depth of detectability using γ_{11n} arrays. *Journal of Applied Geophysics*, 107:195-206.

- [Szalai és tsai., 2009] Szalai, S., Novák, A., és Szarka, L. (2009). Depth of investigation and vertical resolution of surface geoelectric arrays. *Journal of Engineering and Environmental Geophysics*, 14/1, 15-23.
- [Szalai és tsai., 2011] Szalai, S., Novák, A., és Szarka, L. (2011). Which geoelectric array sees the deepest in a noisy environment? Depth of detectability values of multielectrode systems for various two-dimensional models. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(16):1398–1404.
- [Szalai és Szarka, 2000] Szalai, S. és Szarka, L. (2000). An approximate analytical approach to compute geoelectric dipole-dipole responses due to a small buried cube. *Geophysical Prospecting*, 48, 871-885.
- [Szalai és Szarka, 2008a] Szalai, S. és Szarka, L. (2008a). On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting*, 56(2):159–175.
- [Szalai és Szarka, 2008b] Szalai, S. és Szarka, L. (2008b). Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays. Part 1: Linear arrays. *Acta. Geod. et Geoph. Hung.*, Vol. 43(4), 419-437.
- [Szalai és Szarka, 2008c] Szalai, S. és Szarka, L. (2008c). Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays. Part 2: Nonlinear and focussed arrays. *Acta. Geod. et Geoph. Hung.*, Vol. 43(4), 439-447.
- [Szalai és tsai., 2002] Szalai, S., Szarka, L., Prácser, E., Bosch, F., Müller, I., és Turberg, P. (2002). Geoelectric mapping of near-surface karstic fractures by using null arrays. *Geophysics*, 67(6):1769–1778.
- [Szalai és tsai., 2006] Szalai, S., Szarka, L., Révi, G., és Varga, G. (2006). Geoelectric investigation of a pluridirectional fissure system in a karstic area. pages 287–291.
- [Szarka, 1980] Szarka, L. (1980). Potenciáltérképezés analóg modellezése. *Magyar Geofizika*, 21, 193-200.
- [Szarka, 1990] Szarka, L. (1990). A Coulomb-törvény: a geoelektromos anomáliák alapja. *Magyar Geofizika*, 31, 1-9.

- [Szarka, 1992] Szarka, L. (1992). Comment on ‘Aspects of charge-accumulation in D.C. resistivity experiment’ by Y. Li and D.W. Oldenburg. *Geophysical Prospecting*, 40(7), 823–828.
- [Szarka, 1997] Szarka, L. (1997). Környezet-geofizika. kézirat, Sopron.
- [Szűcs és tsai., 2006] Szűcs, P., Tóth, A., Zákányi, B., és Madarász, T. (2006). Inverziós módszerek a hidrogeológiában. *Magyar Geofizika*, 47(4):169–172.
- [Turai és Hursán, 2012] Turai, E. és Hursán, L. (2012). 2D inversion processing of geoelectric measurements with archaeological aim. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 47(2):245–255.
- [Ujfaludi, 1973] Ujfaludi, L. (1973). A geoelektromos mérések modellezése. *Magyar Hidrológiai Társaság, Ifjúsági Napok*.
- [Zhdanov és Keller, 1994] Zhdanov, M. és Keller, G. (1994). *The Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration*. Elsevier Science Publishing Co.