

Geoelektromos kvázi null elektróda elrendezések

Szalai Sándor

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont
Geodéziai és Geofizikai Intézet

MTA Doktori értekezés
2019

Tartalom

Előszó	4
Bevezetés.....	5
I. Az MTA doktori disszertációban közölt eredmények megszületése előtt tevékenységem rövid összefoglalása.....	10
II. A geoelektromos elrendezések rendszerezése és alapvető tulajdonságaik összevetése.....	13
II.1. A valaha használt geoelektromos elrendezések bemutatása, azok rendszerezése, valamint a megtervezésük során alkalmazott stratégiák	13
II.1a. Motivációk	13
II.1b. Bevezetés	14
II.1c. Az osztályozás elve.....	14
II.1d. Az osztályozás	16
II.1e. Az egyes elrendezések megtervezése során alkalmazott stratégiák.....	27
II.1f. A null-elrendezések	30
II.2. Paraméter-érzékenység térképek	32
II.2a. Bevezetés	32
II.2b. A paraméter-érzékenység térképek számítása	33
II.2c. A paraméter-érzékenység térképek jellemzése	35
II.2d. A paraméter-érzékenység térképek gyakorlati használhatósága.....	36
II.2e. Az egyes elrendezések paraméter-érzékenység térképei	43
II.2f. Konklúziók a paraméter-érzékenységi vizsgálatokból	46
II.3. Kutatási mélység.....	49
II.3a. Bevezetés	49
II.3b. Módszer	50
II.3c. A DP elrendezések kutatási mélysége.....	50
II.3c. Minden más (nem-DP) elrendezés kutatási mélysége	52
II.3d. Az eredmények tárgyalása	54
II.3e. Konklúziók.....	56
II.4. Kimutathatósági mélység.....	57
II.4a. Bevezetés	58
II.4b. A módszer	59
II.4c. A hagyományos elrendezésekkel kapott eredmények.....	61
II.4d. A nem-hagyományos elrendezésekkel kapott eredmények	65
II.4e. Következtetések	66

II.5. A hagyományos és az azokból optimalizált elrendezések leképezési képességének összehasonlítása.....	69
II.5a. Bevezetés	69
II.5b. A módszer	69
II.5c. Eredmények	70
II.5d. Értelmezés.....	77
II.5e. Konklúziók.....	78
III. A egyvonalú null-elrendezések	79
IV. A kvázi null-elrendezések	84
IV.1. Bevezetés.....	84
IV.2. A kvázi null-elrendezések numerikus vizsgálata	85
IV.2a. Az elrendezések tükrözésének jelentősége.....	85
IV.2b. A kvázi null-, és hagyományos elrendezésekkel végrehajtott numerikus vizsgálatok eredményei	87
IV.2c. Konklúziók	94
IV.3. Kvázi null-elrendezések vizsgálata kvázi terepi analóg mérésekkel.....	96
IV.3a. A modellezés körülményei	96
IV.3b. Az analóg modellezéssel kapott eredmények.....	98
IV.3c. Terepi analóg modellezéssel kapott eredmények	104
V. Talajmechanikai vizsgálómódszerek és kisskálájú repedésrendszerek kutatása	106
V.1. Talajmechanikai vizsgálómódszerek (Szűrőpróba, Nyomáspróba).....	106
V.1a. A SzűrőPróba (SzP) módszer	106
V.1b. A NyomásPróba (NyP) módszer	112
V.2 Kisskálájú repedésrendszerek kutatása.....	113
VI. Összefoglaló a kvázi null-elrendezésekkel és kis skálájú repedésrendszerekkel kapcsolatos kutatásaimról és a dolgozatban megfogalmazott tézisek.....	123
VI.1. A valaha használt geoelektromos elrendezések és azok rendszerezése	123
VI.2. Paraméter-érzékenység	125
VI.3. Kutatási-, és Kimutathatósági mélység	127
VI.4. A hagyományos elrendezések leképezési képességének összehasonlítása	128
VI.5. Az egyvonalú null-elrendezések	130
VI.6. Numerikus vizsgálatok kvázi null-, és hagyományos elrendezésekkel.....	132
VI.7. A null-, és a hagyományos elrendezések összevetése kvázi terepi analóg mérésekkel (és numerikus modellezéssel)	135
VI.8. Talajmechanikai mérőmódszerek (SzűrőPróba, NyomásPróba).....	137

VI.9. Kis skálájú repedésrendszerek vizsgálata.....	139
VII. A jövő. Kitekintés.	142
Köszönetnyilvánítás	143
Hivatkozások	144
A. Melléklet: Felszíni geoelektromos elektróda elrendezések paraméter-érzékenység térképei	153

Előszó

Értekezésem terjedelme éppen a megengedett határon van, aminek az az oka, hogy az elvégzett kutatások bemutatásához a geoelektromos kutatás alapjain kívül nem nagyon volt mire visszanyúlnom, mivel egy teljesen új témában, az ún. null-elrendezések kutatásán keresztül haladva jutottam el a végül részletesen tárgyalt, a kvázi null-elrendezésekkel kapott eredményekig. A null-, és kvázi null-elrendezések pedig nagyon sok szempontból teljesen máshogy viselkednek, mint a megszokott, a mindennapi gyakorlatban alkalmazott geoelektromos elrendezések. Ahhoz, hogy a céloimhoz elérjek, sok alapkérdést is tárgyalnom kellett, így a *II. fejezet* még csak érinti ezeket a speciális elrendezéseket. Az ebben a fejezetben bemutatott - részben rendszerező, részben már a korábbiakon túllépő - munka azonban elengedhetetlen volt ahhoz, hogy a null- (*III. fejezet*), és elsősorban a kvázi null-elrendezéseket (*IV. fejezet*) a helyükre tehessem a geoelektromos irodalomban.

A disszertációban bemutatok két saját fejlesztésű módszert is, a Szűrőpróba és a Nyomáspróba módszereket (*V. fejezet*), amelyek rendkívül egyszerűek ugyan, de bizonyos feladatok megoldásában annál hatékonyabbak és esetenként az egyetlen célravezető eszközt jelentik a más módszerekkel kapott eredmények igazolásához.

Az értekezésben terjedelmi okokból csak **rövid áttekintést** adtam a geoelektromos kutatómódszerről, amit emellett az is indokol, hogy ezekről számos jó összefoglaló található (pl. *Alpin, 1950; Keller és Frischknecht, 1966; Ward, 1990; Zhdanov és Keller, 1994; Bhattacharya és Shalivahan, 2016*). Emiatt csak a saját kutatási tevékenységemhez közelebb eső, illetve a legutóbbi fokozatszerzést megelőzően általam kidolgozott témákat mutatom be részletesebben. Az általános szakmai bevezetést követően tehát összefoglalom a PhD dolgozatomban ismertetett eredményeimet (*I. fejezet*), hiszen nagyrészt azok szolgálnak jelen dolgozat alapjául.

A dolgozat azon része, amely a PhD értekezésem megszületését követően született szakmai eredményeket foglalja össze, alapvetően négy részre tagolódik. Az első rész (*II. fejezet*) rendszerező és alapozó munka, melyben összegyűjtöttem a szakirodalomban fellelhető minden elrendezést és ez alapján azokat összevettem az általam legalapvetőbbnek tekintett tulajdonságai, így paraméter-érzékenység térképei és különböző definíciók szerint meghatározott kutatási mélységei alapján, valamint összehasonlítottam a kétdimenziós sokelektrodás geoelektromos mérések során leggyakrabban alkalmazott elrendezések leképezési tulajdonságait néhány gyakori modell esetére.

A második részben (*III. fejezet*) az egyvonalú null-elrendezéseket tárgyalom, amik a geoelektromos elrendezések másik végletét képviselik. A hagyományos elrendezések használatával ugyanis jellemzően arra törekszenek, hogy a lehető legnagyobb jelet mérjék,

ami egyszerűen annak köszönhető, hogy ezek használata során már az alapjel, a homogén féltér felett mért jel is nagy. Ezzel szemben a null-elrendezések esetében a homogén féltér felett mért jel minimális, elméletileg nulla, következésképpen általában a mért jel is viszonylag kicsi.

A harmadik részben (IV. fejezet), a kvázi null-elrendezéseket mutatom be, melyek az előző két típus, azaz a hagyományos és a null-elrendezések között átmenetet képeznek, jóllehet inkább az utóbbiakhoz állnak közelebb. Ezek alkalmasak a null-elrendezések használata során fellépő problémák nagy részének kiküszöbölésére, és emellett – úgy tűnik – reális alternatívát, vagy kiegészítést is jelenthetnek a hagyományos elrendezések számára.

A negyedik részben (V. fejezet) széles körben alkalmazható talajmechanikai módszereket, az ún. Szűrőpróba és Nyomáspróba módszereket mutatom be konkrét gyakorlati alkalmazásokon keresztül, amely pl. a földcsuszamlások problémáját a szokásostól eltérő kontextusban vizsgálja. Gyakorlati szemszögből nézve itt a kis-skálájú repedésrendszerek vizsgálatára fókuszáltam elsősorban.

A dolgozat VI. fejezete összefoglalást ad az elért eredményekről és azok összefüggéseiről, valamint tézisek formájában összefoglalja a legfontosabb eredményeket.

Végül (VII. fejezet) felvázolom a dolgozatban szereplő és azt megelőzően kapott eredmények alapján kialakított jövőképet a null-, és kvázi null-elrendezésekkel és általában a geoelektromos kutatásokkal kapcsolatban. Ezek az elrendezések meggyőződésem szerint a jövőben fontos szerepet fognak betölteni.

Bevezetés

A geoelektromos kutatómódszer a szeizmika után a legelterjedtebb geofizikai módszer. Népszerűségét elsősorban széleskörű használhatóságának köszönheti. Míg a kezdetekben általában szerkezet-, és ércutatásra használták (Van Nostrand és Cook, 1966; Alpin et al., 1966; Zhdanov és Keller, 1993), manapság már számos probléma megoldásában használatos: hidrogeológiai- (Kirsch, 2006), környezeti- (Ward, 1990; Knödel et al., 2005), mérnöki- (Ward, 1990; Szalai et al., 2009a), biztonsági- (Metwaly et al., 2008) és régészeti (Clark, 1990) problémákban egyaránt. Magyar nyelven is elérhető számos, a geoelektromos módszer alapjait tárgyaló publikáció: pl. Takács E. (1981), Drahos et al. (1987), Szarka (1997), Prácser (1998).

A geoelektromos módszer **széleskörű használhatóságnak** az alapja, hogy a kőzetek fajlagos ellenállása nagyon széles intervallumot fog át (1. táblázat), és azt még a kőzetek víztartalmának változása is nagymértékben befolyásolja. Jóllehet a módszer a kis kutatási mélységű módszerek közé tartozik a maximum néhány száz méteres, de jellemzően inkább néhány tízméteres kutatási mélységével, mégis számos probléma megoldására ez tekinthető a legjobb, vagy az egyik legjobb eszköznek.

A **geoelektromos módszer alapelve** a felszíni módszer esetében az, hogy két elektróda, az ún. áramelektrodák között áramot bocsátanak a földbe, majd az ennek hatására a felszín két pontja között kialakuló potenciál különbséget mérik két másik elektróda, az ún. potenciálelektrodák között (1. ábra). Ennek megfelelően általában négy elektródát használnak a mérések során, bár előfordul, hogy annál többet. Az utóbbi esetben **fókuszáló elrendezésekről** beszélünk, mert ilyenkor általában az a cél, hogy az áramot tereljék,

fókuszálják valamilyen irányba. Beszélhetünk emellett **három-, illetve két elektródás elrendezésekről** is, amikor egy-, illetve két elektróda elméletileg a végtelenben, vagyis a többi elektródától nagy távolságban van.

1. táblázat: Kőzetek fajlagos elektromos ellenállása (Salát, 1975)

Nagy fajlagos ellenállású kőzetek	Fajlagos ellenállás (Ωm)
Gránit	200-10000
Andezit	200-10000
Gabbró	500-10000
Mészkö	100-5000
Kis fajlagos ellenállású kőzetek	
Agyag	2-20
Márga	5-50
Bentonit	1-10
Változó fajlagos ellenállású kőzetek	
Kavics kiszáradtan	100-10000
Kavics nedvesen	50-1000
Homok kiszáradtan	50-1000
Homok nedvesen	20-100
Konglomerátum tömörem	100-2000
Konglomerátum mállottan	5-50

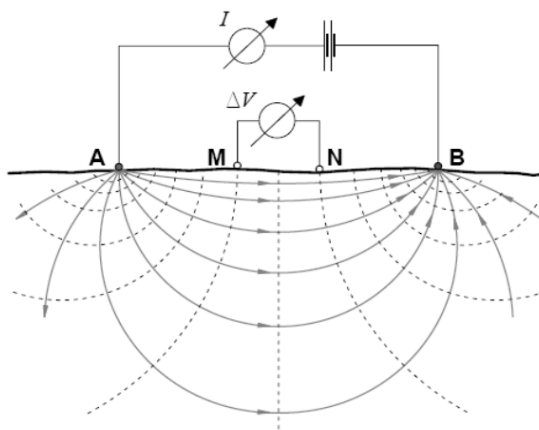
A mért potenciálkülönbség értékéből számítják a ρ_a látszólagos fajlagos ellenállás értéket, ami az elrendezést körülvevő közettartományra jellemző egyfajta átlagos érték. Ezt egy ú.n. **vonatkoztatási ponthoz** szokás **rendelni**, aminek helye elrendezésfüggő.

$$\rho_a = k \cdot (\Delta U / I) \quad (1)$$

ahol ΔU a mért potenciálkülönbség, I az áramerősség, k pedig egy elrendezésfüggő érték, a geometriai faktor, ami a következőképpen definiálható:

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \quad (2)$$

Itt r_{AM} , r_{BM} , r_{AN} és r_{BN} az adott elektródák közötti távolságok.

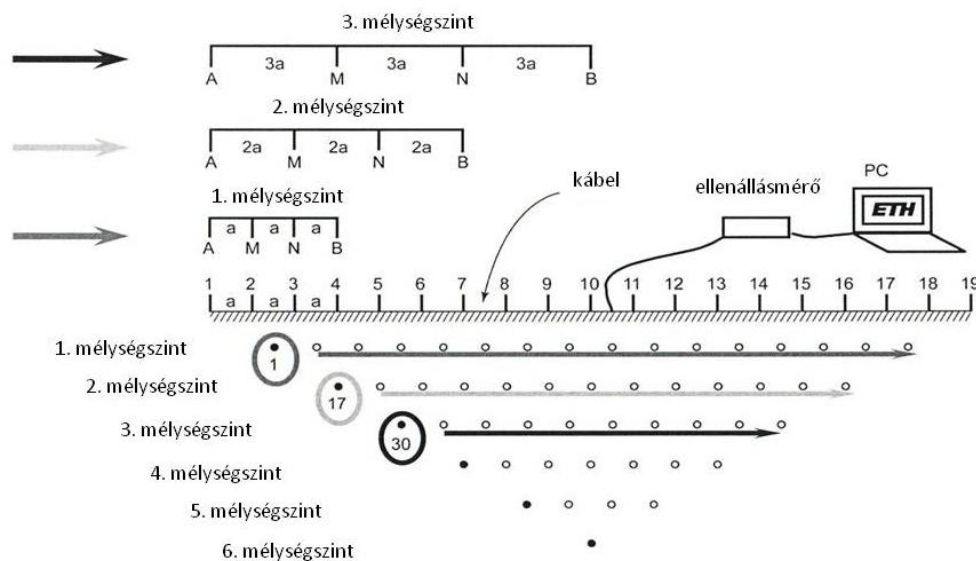


1. ábra: Az egyenáramú geoelektromos mérés alapja. A és B áram-, M és N potenciálelektrodák

Ha csak egy felszíni 4 elektródából álló rendszert képzelünk is el, az elektródák még akkor is végtelen számú pozícióban helyezkedhetnek el. Márpedig **minden, az adott elektródák pozíciójával leírható geoelektromos elrendezésnek megvannak a maga előnyei és hátrányai** (lásd pl. Ward, 1990). A geoelektromos kutatás egyik alapvető feladata **megtalálni általánosan vagy legalább adott kutatási feladat esetére a leghatékonyabb elrendezést**. Ennek az értekezésnek is az egyik fő feladata az volt, hogy egy speciális elrendezés-csoportot, az abban rejlő lehetőségeket vizsgálja.

Ez eredetileg **egy, a hagyományos elrendezésektől koncepciójában teljesen eltérő elrendezés-csoport, az ún. null-elrendezések csoportja volt**. Ezek nevüket onnan kapták, hogy esetükben **a homogén féltér felett mért jel, azaz amikor nincs a felszín alatt fajlagos ellenállás-változás, nulla lenne**. Ezek az elrendezések teljesen más megközelítést igényelnek, mint a hagyományos elrendezések, mivel ezek geometriai faktorának értéke végtelen, így **látszólagos fajlagos ellenállás számítása esetükben nem lehetséges**.

Többek között ez a jelenség is már **számos kérdést** vetett fel, ezért is indult el a kutatás egy ettől kissé eltérő irányba, olyan elrendezések felé, amelyek geometriájukat és így várhatóan viselkedésüket tekintve is **közel** vannak ugyan **a null-elrendezésekhez**, de mégsem null-elrendezések. Ezen elrendezések esetében elméletileg a homogén féltér felett mérhető jel nem nulla, de ahhoz közeli, kis érték, ezért ezeket **kvázi null-elrendezéseknek** neveztem. Esetükben **már lehetséges a látszólagos fajlagos ellenállás meghatározása**.

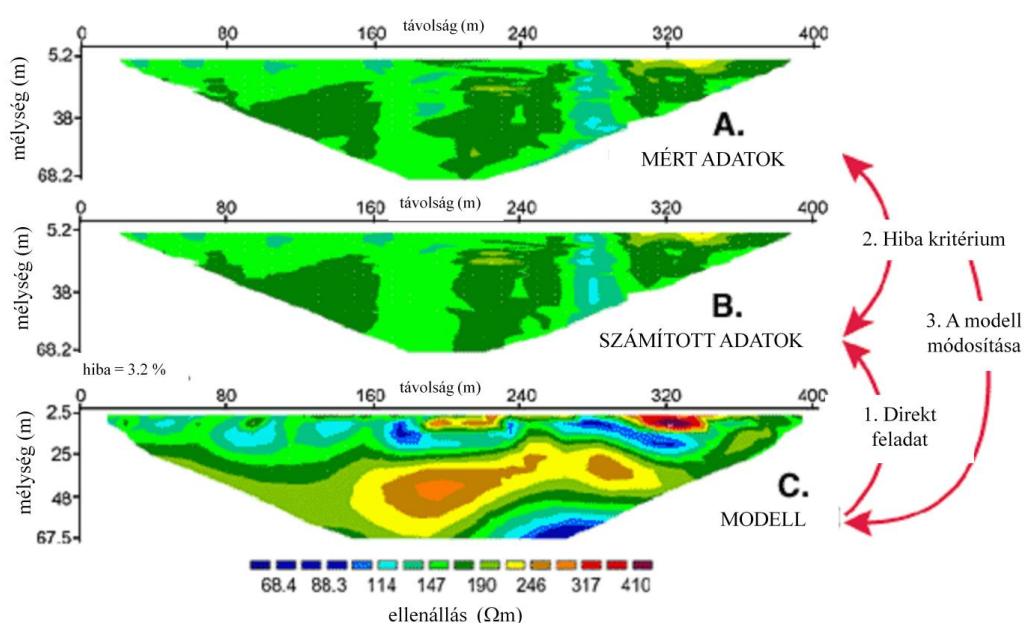


2. ábra: Egyenáramú mérés kivitelezése sokelektrodás rendszerrel

Napjainkban leggyakrabban ún. **sokelektrodás rendszerekkel** végeznek méréseket (2. ábra). Ezek annyiban térnek el a korábban különféle egyedi elrendezésekkel végrehajtott mérésektől, hogy esetükben először számos (általában 24 valamilyen többszöröse) elektródát telepítenek, majd számítógépes vezérléssel zajlik a mérés oly módon, hogy meghatározott rend szerint az egyes elektródák áram-, illetve potenciál-elektrodaként viselkednek. Leginkább a **kétdimenziós (2D) mérések** terjedtek el. Esetükben azt feltételezik, hogy a mérés profiljára merőleges irányban nincs ellenállás-változás. **Az elektródákat** ennél a mérésnél **egy vonalban**, egymástól **azonos távolságban** helyezik el. Ezzel a rendszerrel

tulajdonképpen egyszerre folytatható **szondázás**, illetve **profilmérés**, azaz a fajlagos ellenállás vertikális, illetve horizontális irányú változásainak nyomon követése. Az eredmény egy, a mérési profil vonala alá eső látszólagos fajlagos ellenállás szelvény.

A méréssel meghatározott látszólagos fajlagos ellenállás szelvényből (3A. ábra) egy **inverzió**nak nevezett eljárással állítják elő a fajlagos ellenállás szelvényt (3C. ábra) több lépésben oly módon, hogy egy kiinduló modellből számított ellenállásslévevény értékeit (3B. ábra) a mért látszólagos fajlagos ellenállás értékekkel (3A. ábra) vetik össze, majd a modellt több lépésben úgy módosítják, hogy a két szelvény adatai közötti eltérés valamilyen értelemben minimális legyen. Az így kialakuló modell tekinthető a felszín alatti régió fajlagos eloszlás szelvényének. A kapott modellt azonban **még értelmezni kell**, annál is inkább, mert több közetnek lehet ugyanakkora a fajlagos ellenállása, illetve az egyes közetek ellenállása nagymértékben függhet pl. azok víztartalmától (1. táblázat).



3. ábra: A fajlagos ellenállás szelvény előállítás (C) a mért látszólagos fajlagos ellenállás adatokból (A) az inverziónak nevezett eljárással

Értekezésem első érdemi részében (II. fejezet) a felszíni geoelektromos elrendezésekkel foglalkozom, összegyűjtöm, rendszerezem és különböző kritériumok alapján összehasonlítom őket, különös tekintettel a null- és a kvázi null-elrendezésekre.

A null- és a kvázi null-elrendezések kutatásával a **geoelektromos elrendezéseknek egy, a korábbiaktól eltérő területére nyitottam ablakot**. Meggyőződésem, hogy **ezen elrendezések megértése nélkül nem kaphatunk teljes képet a geoelektromos módszerről**. Ezt gondolnám akkor is, ha ezek a kutatások nem szolgáltatott volna a gyakorlatban is hasznosítható eredményeket, de a vizsgálatok eredményeként úgy tűnik, hogy ezek az elrendezések még **gyakorlati szempontból is jelentősek**. Sőt – véleményem szerint – ezek az elrendezések jelentik **az egyik legperspektivikusabb irányzatot a geoelektromos kutatások optimalizálása felé**, ami **jelenleg zsákutcába jutott**. A napjainkban követett trend ugyanis, amely a hagyományos elrendezések különböző kombinációval próbál egyfajta optimális konfigurációt létrehozni (Stummer et al., 2004, Wilkinson et al., 2006, Uhlemann et al., 2018),

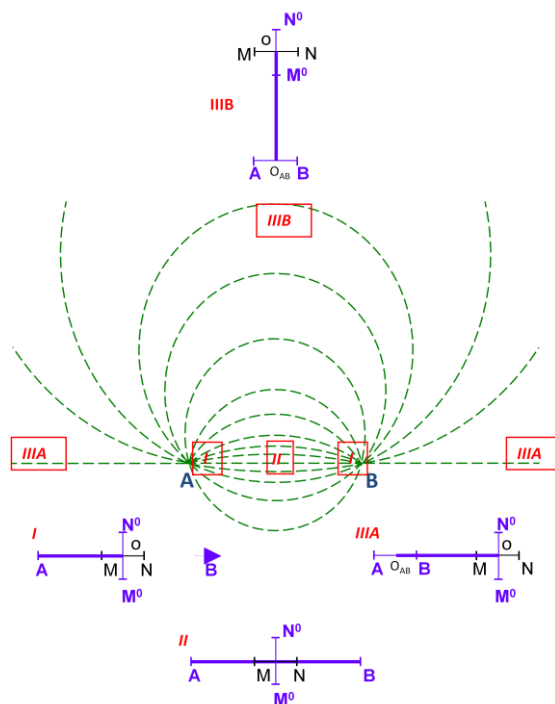
csekély javulást eredményezett. Jóllehet a *II.1 fejezetben* további lehetséges stratégiákat is összegyűjtöttem, amelyek a geoelektromos módszerrel való leképezés minőségének javulását ígérik, számomra az értekezésben felvázolt kutatási irány tűnik a legígéretesebbnek.

Az értekezés második részében egy **mechanikai elven működő módszercsoporttal, a Szűrőpróba (SzP) és a Nyomáspróba (NyP) módszerekkel** foglalkozom. Felvázolom elméleti háttérüket, működési elvüket és bemutatom néhány alkalmazásukat, illetve a kapott eredményeket. Az ezekkel a módszerekkel kapott eredményeket mindkét esetben összevetem hagyományos geoelektromos elrendezésekkel végrehajtott mérések eredményeivel is.

A SzP és a NyP módszerek egyik nagy előnye éppen egyszerűségükben rejlik. Bebizonyosodott, hogy számos esetben **nagyon jól alkalmazhatóak más módszerekkel kapott eredmények igazolására**, sőt egyes esetekben **előfordulhat, hogy az egyedüli komolyan szóba jöhető eszközt jelentik** (pl. repedésrendszer kutatása olyan területen, ahol nem áll rendelkezésre elég hely a geoelektromos mérések kivitelezéséhez, illetve a terület szélein). **Más esetekben a többi módszernél valamilyen szempontból jobb eredményt képes szolgáltatni** (pl. a földcsuszamlás repedésrendszerét más módszerek által elérhetetlen felbontással képes feltérképezni).

I. Az MTA doktori disszertációban közölt eredmények megszületése előtt tevékenységem rövid összefoglalása

A Szarka László témavezetésével készített **egyetemi diplomamunkámban** (Szalai, 1993) hulladéktároló alján különböző konfigurációkban elhelyezett elektródák alkalmazásának lehetőségeit vizsgáltam a tároló szigetelésének kiszakadása esetén esetleg bekövetkező folyadékszivárgás kimutathatóságára. E vizsgálatok során a párhuzamos dipól elrendezések **nagyon érzékenyeknek** tűntek egy bizonyos szögtartományban. Ugyanez a jelenség előkerült fúrólyukak közötti mérések *Wilkinson et al. (2008)* és elektromágneses mérések során is (*Zonge és Hughes, 1991*), de a szerzők azt **problémaként kezelték**, így tudatosan kerültek az ebbe a szögtartományba eső elrendezések használatát. Minden fenti esetben olyan elrendezésekkel állunk szemben, amelyek homogén féltér esetén nulla jelet adnának, ezért ezeknek a **null-elrendezés** nevet adtam. Jóllehet homogén féltér felett ezek az elrendezések nem adnak jelet, bizonyos inhomogenitások esetén igen. Így a null-elrendezések csak inhomogenitások jelenléte esetén fellépő jeleket detektálnak (a zajokon kívül), ezért korábban „**tiszta anomália**” módszernek (*Tarkhov, 1957*) is nevezték őket.



I.1 ábra: A három-elektrodás null- (I), Schlumberger null- (II), és a dipól axiális- (IIIA), illetve ekvatoriális null-elrendezések (IIIB) az A és B áramelektrodák által a felszínen kialakított áramvonal rendszerhez viszonyítva

A valóságban azonban **zajok** is torzítják a méréseinket. Ezek közül különösen azzal volt nehéz megbékélni, hogy **az elektródák pontatlan pozicionálása** is jelentős hatással van a mért értékekre. Ez a jelentősnek vélt hatás azonban onnan ered, hogy a homogén féltér felett mért jelhez viszonyítjuk, ahogy az a **hagyományos elrendezések** esetében szokás. (A továbbiakban minden nem null-, és kvázi null-elrendezést ezzel a névvel illetek majd.) Azaz nulla közeli értékekkel, sőt elvileg nullával kellene osztanunk. Más a helyzet azonban, ha nem az adott elrendezés homogén féltér értékével osztott értékkel, hanem pl. valamilyen hagyományos elrendezéssel vetjük a mért jeleket össze. Valójában pedig nem is ez, hanem **a**

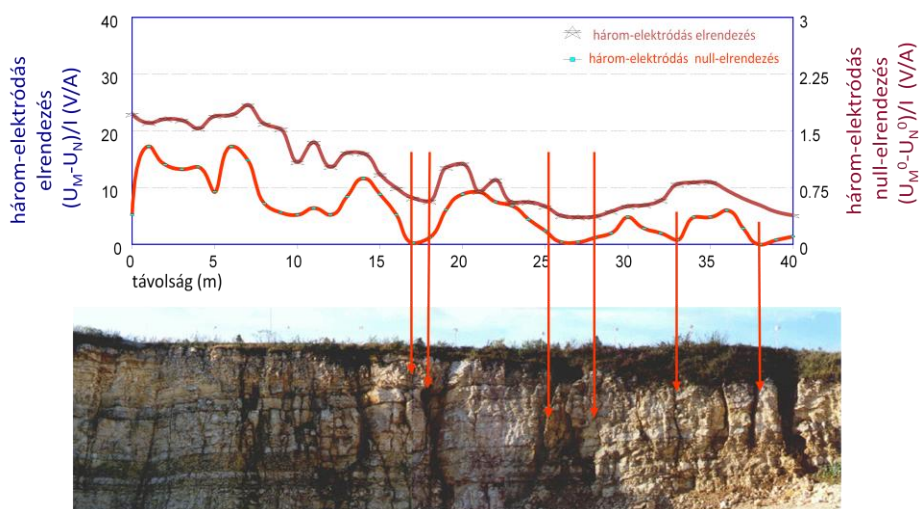
jel/zaj arány mindennek a kulcsa. Az pedig - mint majd látni fogjuk - már a null-elrendezések esetében sem különösebben problémás.

Meg kell említenem, hogy nem mindenre jellemző az **ódzkodás a nagy érzékenyséű „zónákban” történő mérések lehetőségétől.** Szarka és Menvielle (1999) magnetotellurikus, Takács és Hursán (2000) pedig elektromágneses mérések esetében utalt bizonyos érzékeny tartományokban, illetve komponensekkel történő mérések lehetőségére. Gupta et al. (1996) pedig 1D magnetotellurikus mérések során egy homogén féltér felett nulla jelet adó komponenst képzett, ami nagyon hatékonynak bizonyult vékony rétegek kimutatásában.

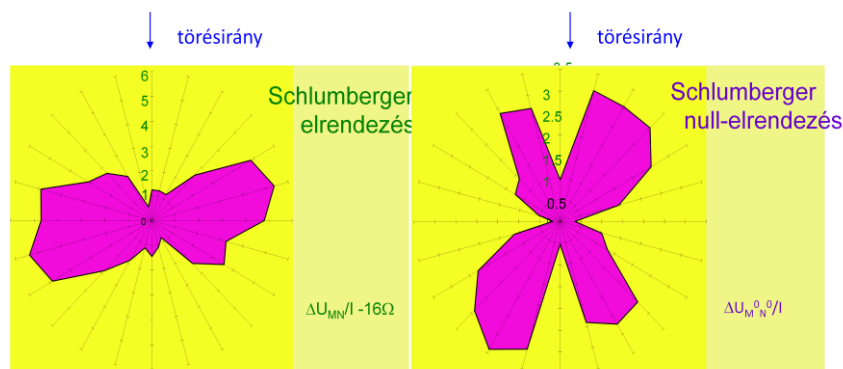
Kezdetben **a pontatlan elektróda-pozicionálásból eredő hibáktól való félelem** bennem is jelen volt, ezért az első méréseket még az **elektródák pontos pozicionálására kényszerítően figyelve** végeztem hagyományos elrendezéspárjukból könnyen előállítható null-elrendezésekkel: a Schlumberger null-, a három-elektrodás null-, és a dipól axiális, illetve ekvatoriális null-elrendezésekkel (utóbbi kettő tk. analóg; lásd I.1 ábra). Erre a célra egy falécből és műanyag csőből készítettünk segédeszközt (I.2 ábra), aminek segítségével a null-elrendezéseket repedések kimutatására (I.3 ábra) és irányuk meghatározására (I.4 ábra) használtuk (Szalai et al., 2002).



I.2 ábra: Az első, null-elrendezésekkel végrehajtott mérések esetén még kényszerítően ügyeltünk az elektródák pontos pozicionálására. Az elektródák a műanyag cső, illetve a rá rögzített faléc végeinél vannak.



I.3 ábra: Terepi tesztmérés repedések lokalizálására egy kőbánya falával párhuzamosan három elektrodás hagyományos-, illetve három elektrodás null-elrendezésekkel (Szalai et al., 2002 alapján)



I.4 ábra: Terepi tesztmérés repedések irányának meghatározására azimutális mérésekkel Schlumberger-, illetve Schlumberger null-elrendezésekkel (Szalai et al., 2002 alapján)

A későbbiekben azonban fokozatosan **kiderült, hogy nincs szükség nagyobb elektróda pozicionálási pontosságra a null-, illetve később a kvázi null-elrendezésekkel, mint a hagyományos elrendezésekkel végrehajtott mérések esetében.** Erre mutatnak majd példát a *III.1* és a *III.3* ábrák. Ezeken jól látható, hogy **a segédeszköz nélkül végrehajtott mérések esetén is nagyon jó jel/zaj arány érhető el.** Szembetűnő emellett, hogy **ennyivel élesebbek a változások a null-elrendezésekkel végrehajtott mérések során,** ami arra utal, hogy **ezek jóval érzékenyebbek a horizontális irányú ellenállás-változásokra.**

Problémának inkább az bizonyult, hogy az inverziós eljárások nem voltak képesek követni ezeket a hirtelen változásokat. Ez is azonban kisebb probléma, hiszen a geoelektromos mérés korlátját – véleményem szerint - nem annyira az inverziós módszerek elégtelensége, mint inkább a módszer fizikai korlátjai jelentik, amik adottak, azokkal nem sokat tudunk kezdeni. Tehát ha léteznek elektróda elrendezések, amik más elrendezésekkel szemben képesek információt szolgáltatni egy hatóról, az mindenképpen előremutató lehet. A jel minél pontosabb mérése és megfelelő értelmezése már a geofizikus feladata.

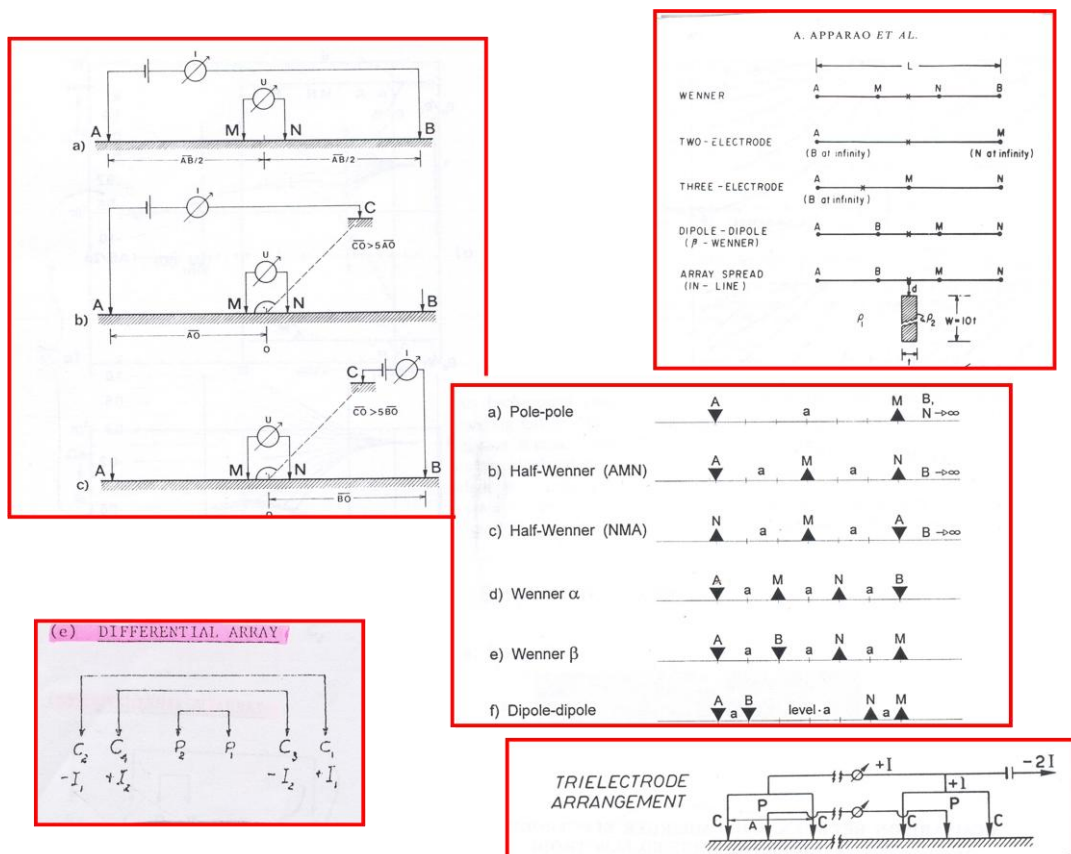
II. A geoelektromos elrendezések rendszerezése és alapvető tulajdonságaik összevetése

Szalai és Szarka (2008) alapján

II.1. A valaha használt geoelektromos elrendezések bemutatása, azok rendszerezése, valamint a megtervezésük során alkalmazott stratégiák

II.1a. Motivációk

Az I. fejezetben említett geometriai null-elrendezésekkel sikeres méréseket végrehajtva érthetetlennek tűnt, hogy ilyen elrendezésekkel korábbi tanulmányaim során nem találkoztam. Ez felkeltette bennem az igényt, hogy utánajárjak, valóban nem használtak-e soha ilyen elrendezéseket, ha pedig igen, akkor **miért nem terjedtek el a gyakorlatban**. Tervbe vettem a jelentősebb angol és orosz nyelvű folyóiratok teljes átvizsgálását ebből a szempontból. Miután azonban láttam mekkora **káosz uralkodik** a különböző cikkekben alkalmazott, az elrendezések ábrázolására alkalmazott **jelölésrendszerben** (lásd pl. **II.1 ábra**) úgy gondoltam, hogy előrevivő lenne **egységes jelölésrendszert is bevezetni** (Szalai, Szarka, 2008).



II.1.1 ábra: Néhány példa a különböző cikkekben található elrendezés megjelenítésekről

A talált nagyszámú elrendezés mindkettőnkre arra készítetett, hogy valamiféle **rendszerbe foglaljuk őket**, megkönnyítve ezzel az áttekintésüket. Az elkészült rendszer megkövetelte az egyes elrendezések **használatának megértését is**, aminek folyamányaként azt is kezdtem

tisztábban látni, **milyen céllal tervezték meg a különböző elrendezéseket** (Szalai és Szarka, 2011). A célok is **csoportokba sorolhatóak** voltak és egyben rámutattak néhány **lehetőségre** is, hogy **hogyan lehetne előrelépni** a sokelektrodás konfigurációk tervezésében. Az elrendezések rendszerezése tisztán logikai úton is megmutatott lehetőségeket, hogy milyen elrendezések létezhetnének még. Az alkalmazott koncepciók némelyike érdeklődésre tarthat még számot a jövőben.

Nagyon fontos motiváció volt az elrendezések összegyűjtésében az is, hogy legyen egy **elrendezés-készlet**, amiből a legjellegzetesebbeket kiválasztva azok különböző **tulajdonságait összevethetjük egymással**. Ez meg is történt azok paraméter-érzékenység térképeinek, kutatási és kimutathatósági mélységeinek és leképezési tulajdonságaik összevetésével. E munka időszerűségének utólagos visszaigazolása a rá kapott hivatkozások nagy száma és hogy a posztgraduális képzésben már sok helyen szerepet kapott.

II.1b. Bevezetés

Van Nostrand és Cook (1966) már összegyűjtötte az akkor létezett elrendezéseknek egy elég jelentős gyűjteményét, de az alkalmazott elrendezéseknek az első jelentős és korábban (Szalai és Szarka, 2008 előtt) **egyetlen összefoglalása Whiteley (1973)** nevéhez fűződik. Utóbbiból is **hiányzott azonban** számos, orosz nyelven közölt elrendezés (*Dachnov, 1951; Dachnov, 1953; Tarkhov, 1980; Yakubovsky és Liahov, 1982; Bogolyubov 1984; Hmelevsky és Bondarenko, 1989, stb.*) és az óta is **nagymértékben nőtt a publikált elrendezések száma**. Elérkezettnek látszott tehát az idő összegyűjteni és áttekinthetőségük érdekében egységesen megjeleníteni és csoportosítani az alkalmazott elrendezéseket.

A sokelektrodás elrendezések elterjedésével a Wenner(-Schlumberger) (W-S) és a Dipól-Dipól (Dp-Dp) elrendezések **szinte teljesen kiszorították a többi elrendezést**. Jóllehet ezeknek az elrendezéseknek **számos gyakorlati előnyük van** (pl. kompatibilitásuk a sokelektrodás elrendezésekkel, jól kidolgozott elméletük, rendelkezésre álló inverziós szoftver), **minden elrendezés rendelkezhet bizonyos speciális tulajdonságokkal**, amivel kár lenne nem élni. Már csak azért is kíváncsi lehet fenti elrendezések mellett továbbiak alkalmazása a sokelektrodás rendszerekben, mert ha már kitelepítettük a rendszert, akkor nem feltétlenül jelent jelentős többlet időt további elrendezésekkel is méréseket végrehajtani.

Ebben a fejezetben egységes ábrázolásmóddal mutatom be a szakirodalomban fellelt összes felszíni elektróda elrendezést. Az elrendezések csoportosítása kissé hasonlít a kémiai elemek Mengyelejev-féle periódusos rendszeréhez, aminek a lyukait betömve akár korábban nem használt elrendezéseket is konstruálhatunk. Átláthatóbbá válik a különböző elrendezések kapcsolata is, és jobban megérthetővé válik, hogy az egyes elrendezések megtervezése során milyen elképzelés vezette az alkotókat. A munka reményeim szerint hozzájárulhat a sokelektrodás elrendezések használata során egyre inkább megnyilvánuló igény kielégítéséhez, egy optimális elektróda konfiguráció létrehozásához (*Stummer et al., 2004; Wilkinson et al., 2006*).

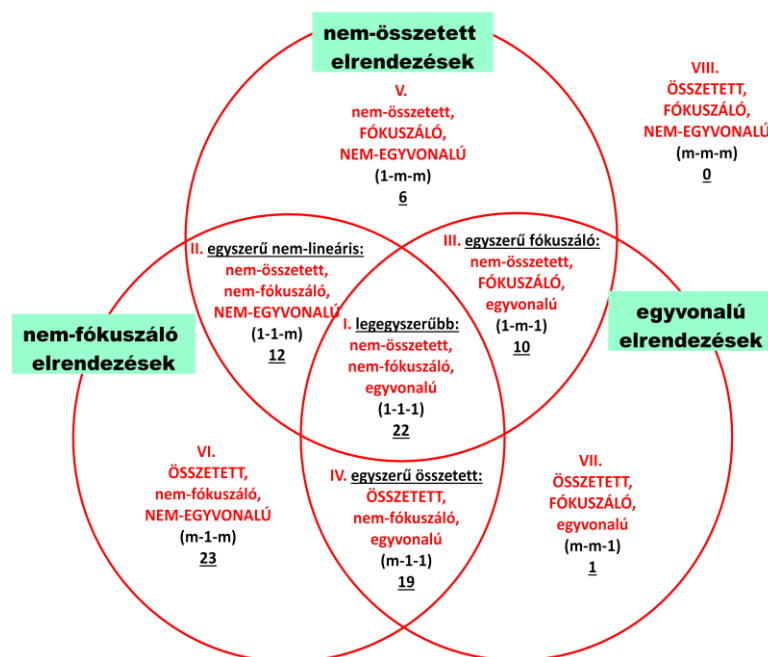
II.1c. Az osztályozás elve

A pontszerű elektródaként leírható elektródákat tartalmazó felszíni elektróda elrendezések **osztályozása három paraméter alapján történik**:

- a. **összetettség**: ha egynél több potenciálkülönbség mérés történik annak érdekében, hogy egy értelmezendő adatot kapjunk akkor összetett, egyébként egyszerű elrendezésekről beszélünk.
- b. **fókuszálás**: ha egynél több áramkört alkalmazunk, akkor fókuszáló, ellenkező esetben nem-fókuszáló elrendezésekről beszélünk.
- c. **egyvonalúság**: ha az összes elektróda egy vonalban helyezkedik el egyvonalú, ellenkező esetben nem-egyvonalú elrendezésekről van szó.

Ily módon (Szarka László akadémikus úr elképzelése alapján) összesen $2^3=8$ osztályt képeztünk, amelyeknél az egyszerűbb lehetőséget „1”-el, a bonyolultabbat „m”-el (more) jelöltem. Az II.2 ábrán látható a 8 osztály:

- I. A nem-összetett, nem-fókuszáló, egyvonalú (1-1-1) elrendezések (a „legegyszerűbb” elrendezések)
- II. A nem-összetett, nem-fókuszáló, nem-egyvonalú (1-1-m) elrendezések (az „egyszerű nem-egyvonalú” elrendezések)
- III. A nem-összetett, fókuszáló, egyvonalú (1-m-1) elrendezések (az „egyszerű fókuszáló” elrendezések)
- IV. Az összetett, nem-fókuszáló, egyvonalú (m-1-1) elrendezések (az „egyszerű összetett” elrendezések)
- V. A nem-összetett, fókuszáló, nem-egyvonalú (1-m-m) elrendezések
- VI. Az összetett, nem-fókuszáló, nem-egyvonalú (m-1-m) elrendezések
- VII. Az összetett, fókuszáló, egyvonalú (m-m-1) elrendezések
- VIII. Az összetett, fókuszáló, nem-egyvonalú (m-m-m) elrendezések



II.1.2 ábra: A felszíni elektróda elrendezések osztályozása. Az 1 és m jelentése (a) az összetettség esetében (nem-összetett, vagy összetett, azaz 1, vagy m), (b) fókuszáló (nem-fókuszáló, vagy fókuszáló, azaz 1, vagy m) és (c) egyvonalúság (egyvonalú, vagy nem-egyvonalú, azaz 1, vagy m). Ez alapján 2^3 , azaz 8 csoport képezhető a következőképpen: 1-1-1 (I. osztály), 1-1-m (II. osztály), 1-m-1 (III. osztály), 1-m-m (IV. osztály), m-1-1 (V. osztály), m-1-m (VI. osztály), m-m-1 (VII. osztály), m-m-m (VIII. osztály).

Az osztályozásból egyértelmű, hogy a geoelektromos elrendezések egy adott geometriával (pl. profilmerés esetében az elektródák egyik pozícióból a másikba ugyanazon vektornak megfelelő elmozdítással jutnak el) és adott, az áram betáplálására és a feszültség mérésére vonatkozó útmutatással jellemezhetők. Néhány, a szakirodalomban fellelt elrendezés azonban nem illeszthető bele ebbe a sémába. Ezeket egy külön csoportba, a „**vegyes**” **elrendezések** csoportjába soroltuk. Ily módon 92 elrendezés az I-VIII csoportok valamelyikébe, míg 10 elrendezés a vegyes elrendezésekébe esik.

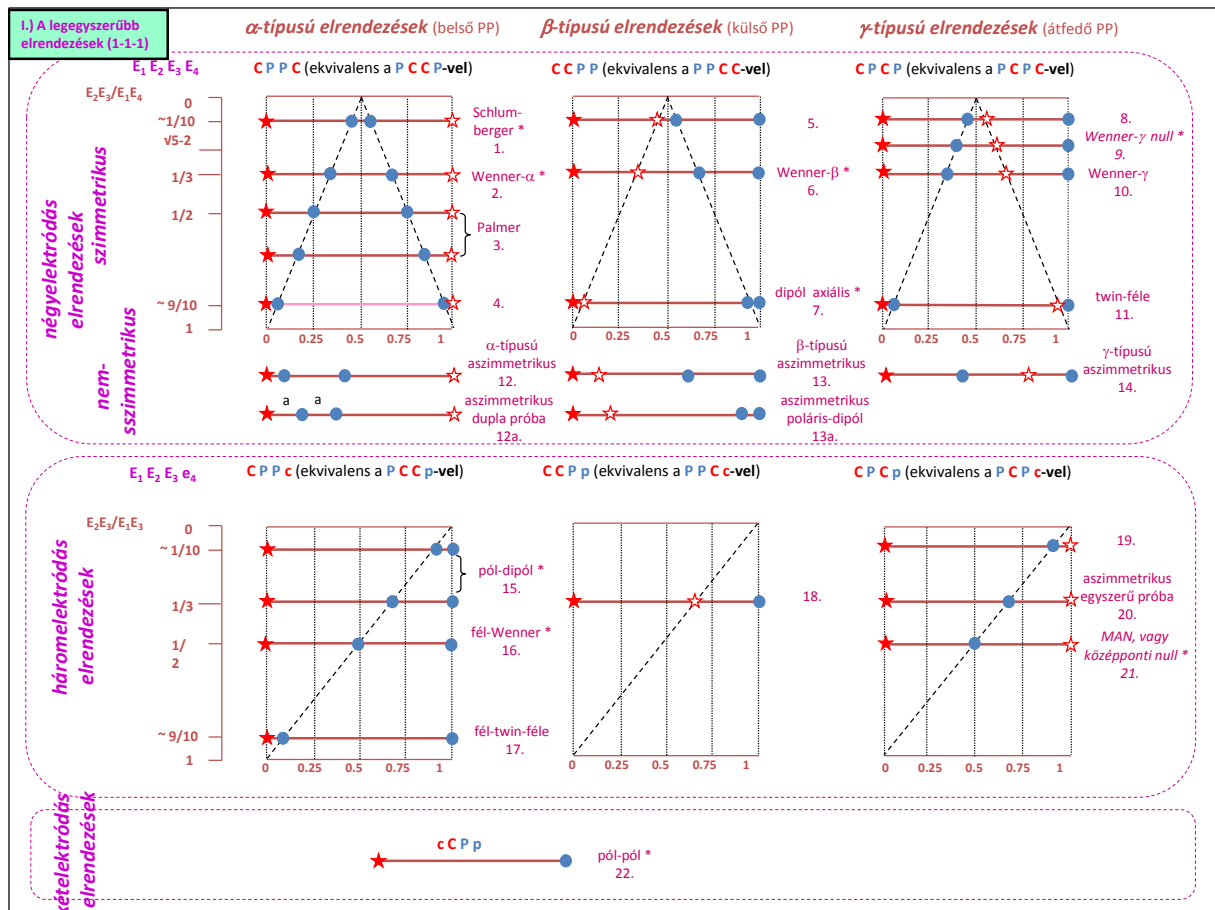
Az *II.1.3-II.1.11 ábrákon*, ahol az I-VIII osztályokba sorolt és a vegyes elrendezések láthatóak, mindenütt **egységes jelölésrendszert** alkalmaztam. A teli körök potenciál (P), a teli/üres csillagok forrás/nyelő (+I/-I) áram (C) elektródákat jelölnek. A forrás és a nyelő elektródák felcserélhetők egymással azonos áramkörben, de nem cserélhetők fel többszörös áramkör esetében. A csillag mérete az áram erősségére utal. A „végtelen” elektródák áramerőssége egységnyi ugyanúgy, ahogy azon áramelektrodáké is, amelyek esetében csak egy áramelektroda pár (+I / -I) van. A jellemző **elrendezéshossz** az egymástól legtávolabb eső elektródák távolsága, nem tekintve a végtelenben lévő elektródát. Ennek segítségével az egyes elrendezések geometriai jellemzői, mint pl. a kutatási mélység összevethetővé válnak. Az ábrákon a jellemző elrendezés hossz 1, a két szélső elektróda a 0 és az 1 pozíciókban található. Az egyes elrendezéseknek csak egy-egy neve látható az ábrákon. Amennyiben egy elrendezésnek további elnevezései is vannak, azokat a megfelelő hivatkozásokkal együtt a *II.1.1. táblázatban* találhatjuk meg. A *II.1.3-II.1.11 ábrákon*, ha további nevek is vannak, az elrendezés nevét csillaggal jelöltem. A null-elrendezések neveit dőlt betűkkel szedtem.

II.1d. Az osztályozás

Az összes elektróda elrendezés különböző nevekkal és a rájuk való hivatkozásokkal az *II.1.1. táblázatban* látható. Ez 92 elrendezést és 10 vegyes elrendezést tartalmaz. Az elrendezések osztályai a *II.1.3-II.1.10 ábrákon*, a vegyes elrendezések a *II.1.11 ábrán* láthatóak.

I. osztály (1-1-1, 1-22 elrendezések az *II.1.1. táblázatban*, *II.1.3 ábra*)

A *II.1.3 ábrán* az elektródák általános sorrendjét E1, E2, E3 és E4-el jelöltem, ahol E akár C (áram), vagy P (potenciál) elektróda is lehet. A kis betűk (*e, c, p*) **végtelenben lévő elektródákra** utalnak. Ezt az elrendezés csoportot szokás tovább tagolni az elektródák számának és az áram-, és potenciálektródák sorrendjének megfelelően. Ennek megfelelően beszélünk **4-, 3-, illetve 2 elektródás elrendezésekről** attól függően, hogy 0-, 1-, vagy 2 elektróda van elméletileg végtelen távolságban. Az elektródák sorrendje alapján pedig **α -, β - és γ típusú elrendezésekről** beszélhetünk, ahol az α típus CPPC, a β típus CCPP, a γ típus pedig CPCP elektróda sorrendet jelöl (*Carpenter és Habberjam, 1956*). Az elektródák reciprocitási elvének megfelelően (pl. *Van Nostrand és Cook, 1966*) PCCP ekvivalens CPPC-vel, PPCC CCPP-vel, PCPC pedig CPCP-vel. α -, β - és γ típusú elrendezések a három-elektrodás elrendezések esetében is léteznek (α típus: CPPc, illetve PCCp; β típus: CCPP, illetve PPCc; γ típus: CPCp, illetve PCPc). A kételektrodás elrendezés esetében csak egy lehetőség (CP) van.

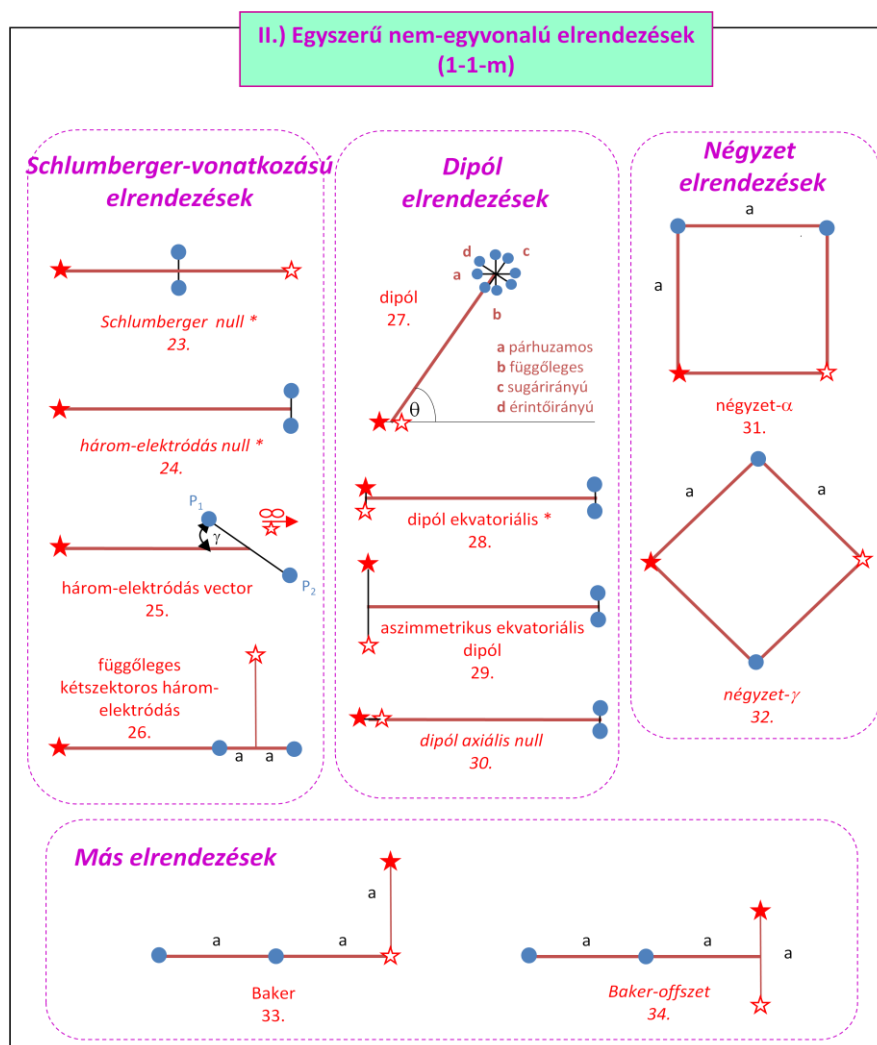


II.1.3 ábra: A „legegyszerűbb” (nem-összetett, nem-fókuszáló, egyvonalú) geoelektromos elrendezések (I. osztály: 1-1-1). Az elektródák általában E1, E2, E3, E4-el jelölve. C: áram (forrás, vagy nyelő elektróda). A forrás/nyelő elektródák teli/üres csillagok. P: potenciál-elektroda (teli körök). A kis betűk, mint e, p, c a végtelenben lévő elektródákat jelölnék. A csillagok alternatív nevek létezésére utalnak (ezeket lásd az II.1.1. táblázatban); a null-elrendezések nevei dőlt betűvel szedve.

A II.1.3 ábrán csak azokat az elrendezéseket említem név szerint, amelyek ismertek a geofizikai szakirodalomból. Ugyanakkor, ha a megfelelő elektródákat a szaggatott vonal(ak) mentén helyezük el, akkor további elrendezésekhez juthatunk. Ily módon az elrendezések listája ebben a csoportban elméletileg teljes. Hagyománytiszteletbeli és gyakorlati okokból a **szimmetrikus elrendezések a legkedveltebbek**. A szimmetria pont az elrendezés középpontja (a két szélső, nem végtelenben lévő elektróda közötti szakasz felezőpontja) és definíciószerűen ez csak az elektródák pozíciójának szimmetriáját jelenti, függetlenül azok áram, vagy potenciál-elektroda voltától. A szimmetrikus elrendezések esetében az egyetlen fennmaradó paraméter a belső elektródák távolságának a külső elektródák távolságához való viszonya, ami a baloldali skálán látható. α -, β -, illetve γ -típusúnak nevezzük Ward (1990) után azokat az elektróda elrendezéseket, melyek esetében az elektródák sorrendje rendre CPPC, CCPP, illetve CPCP, ahol C az áram-, P a potenciálektródákat jelöli. Az α -, β -, és γ -típusú nem szimmetrikus elrendezéseket 12, 13 és 14-el jelöltem. Megjegyezendő, hogy ezeknek valójában végtelen számú változatuk lehetséges, melyek közül mindössze hármat (12a, 13a és 14a) találtam meg a szakirodalomban. Kételektrodás elrendezés csak egy, a pólus-pólus elrendezés létezik.

II. osztály (1-1-m, 23-34 elrendezések az II.1.1. táblázatban, II.1.4 ábra)

Az **egyszerű** (nem összetett és nem-fókuszáló) **nem-egyvonalú elrendezések** esetében 4 elektróda van. Egy áramkört használunk, nincs minden elektróda egy vonalban, de egyetlen potenciálkülönbség mérés történik. A **dipól elrendezések** (Alpin 1950, 1966) általában nem-egyvonalú elrendezések. Az alkalmazott dipól elrendezések négy kisebb csoportba, a párhuzamos, a merőleges, a sugárirányú és az érintőirányú dipól elrendezések csoportjába sorolhatóak. Ezeket a II.1. 4 ábrán sorra 27a, 27b, 27c és 27d-vel jelöltük. Speciális dipól elrendezések a **dipól axiális elrendezés** (7. az II.1.3 ábrán) és az Alpin (1950) által bevezetett **dipól ekvatoriális elrendezés** (28. a II.1.4 ábrán).

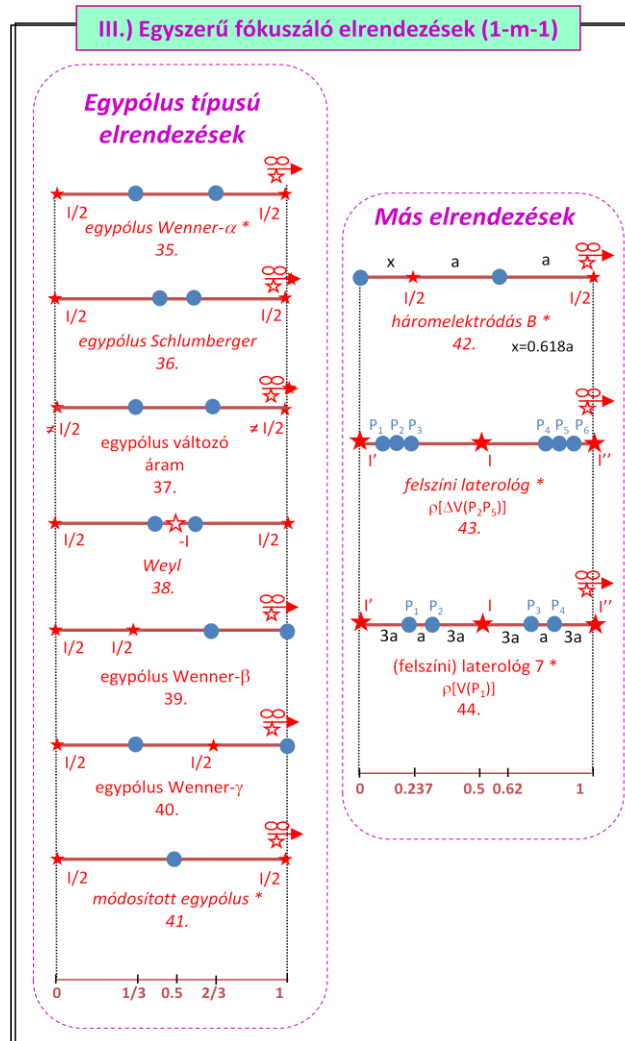


II.1.4 ábra: Egyszerű (nem-összetett és nem-fókuszáló) nem-egyvonalú elrendezések (II. osztály: 1-1-m).

III. osztály (1-m-1, 35-44 elrendezések az II.1.1. táblázatban, II.1.5 ábra)

A **fókuszálás** (amikor is az áram nagyobb része kényszerül nagyobb mélységbe, mint az a nem-fókuszáló esetben lehetséges lenne) áramelektrodák rendszerének alkalmazásával valósítható meg: több áramelektrodának azonos polaritásúnak kell lennie. A fókuszáló elrendezések között is számos null-elrendezést találunk, azonban azok – vélhetőleg

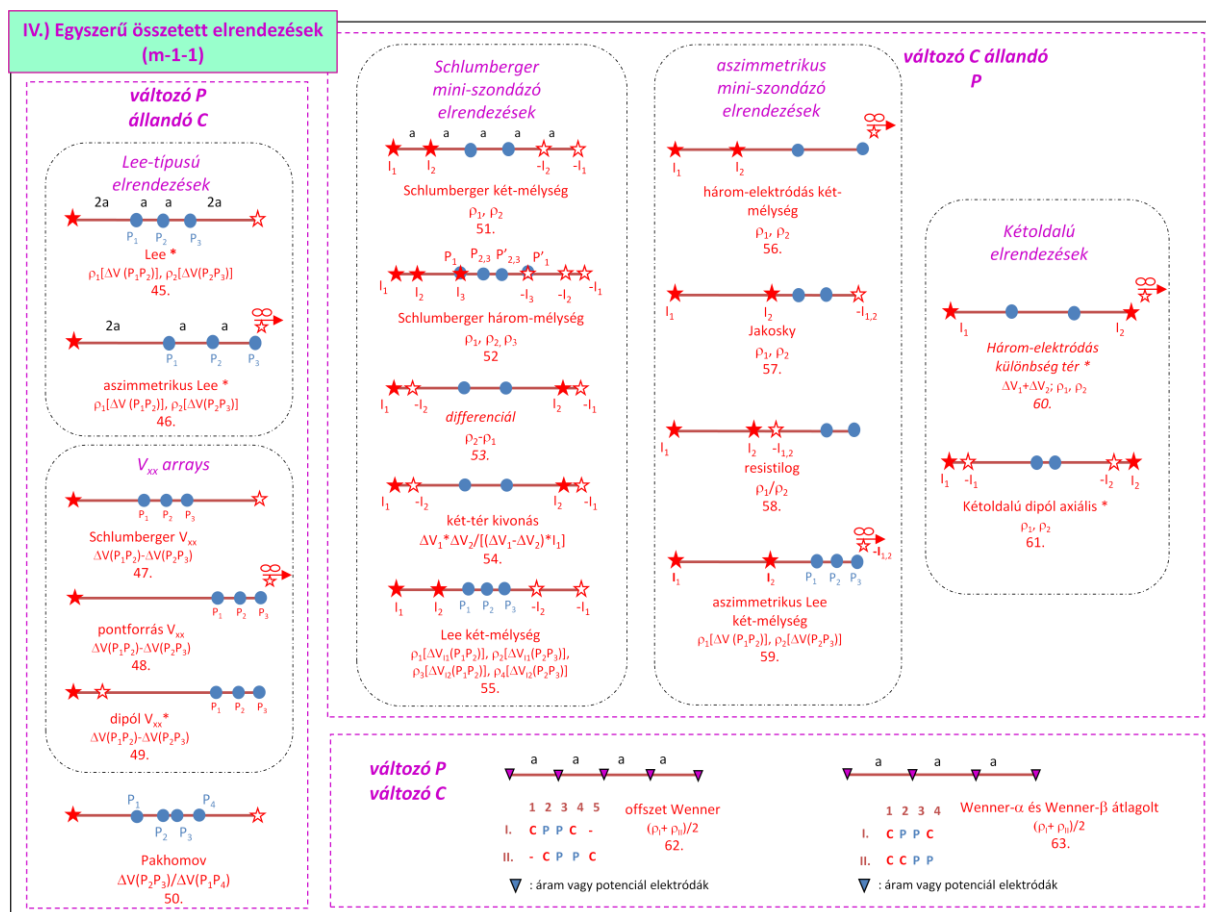
körülményes terepi használatuk miatt – nem váltak elterjedtté a felszíni geofizikai mérések gyakorlatában, pedig számos sikeres kísérletet folytattak velük.



II.1.5 ábra: Egyszerű (nem-összetett és egyvonalú) fókuszáló elrendezések (III. osztály: 1-m-1). I' -nek és I'' -nek ugyanaz az előjele.

IV. osztály (m-1-1, 45-63 elrendezések az II.1.1 táblázatban, II.1.6 ábra)

Az **összetett elrendezések** esetében több egymást követő potenciálkülönbség mérésre van szükség egyetlen adat felvételéhez. Ezek az egymást követő mérések a következő módokon kivitelezhetők: (a) rögzített áramelektrodák mellett változó potenciál-elektrodákkal; (b) rögzített potenciál-elektrodák mellett változó áramelektrodákkal; (c) mind az áram, mind a potenciál-elektrodák helyzetét változtatva. A változó helyzetű potenciál-elektrodák esetében horizontális irányú elektromos ellenállás-változásokról, vagy a terület inhomogenitásáról kaphatunk képet. A változó helyzetű áramelektrodák esetében pedig mélységfüggő információt nyerhetünk, mintegy miniszondázást hajtva végre.



II.1.6 ábra: Egyszerű (nem-fókuszáló és egyvonalú) összetett elrendezések (IV. osztály: m-1-1).

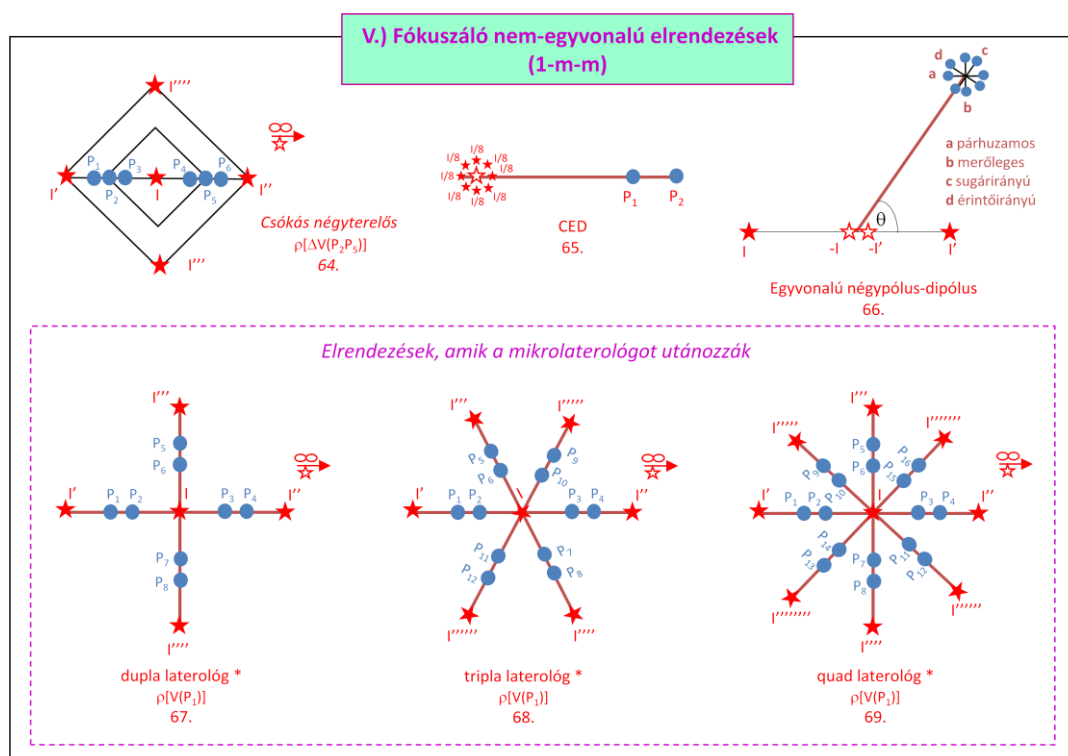
V. osztály (1-m-m, 64-69 elrendezések a II.1.1 táblázatban, II.1.7 ábra),

VI. osztály (m-1-m, 70-91 elrendezések a II.1.1 táblázatban, II.1.8a és II.1.8b ábrák),

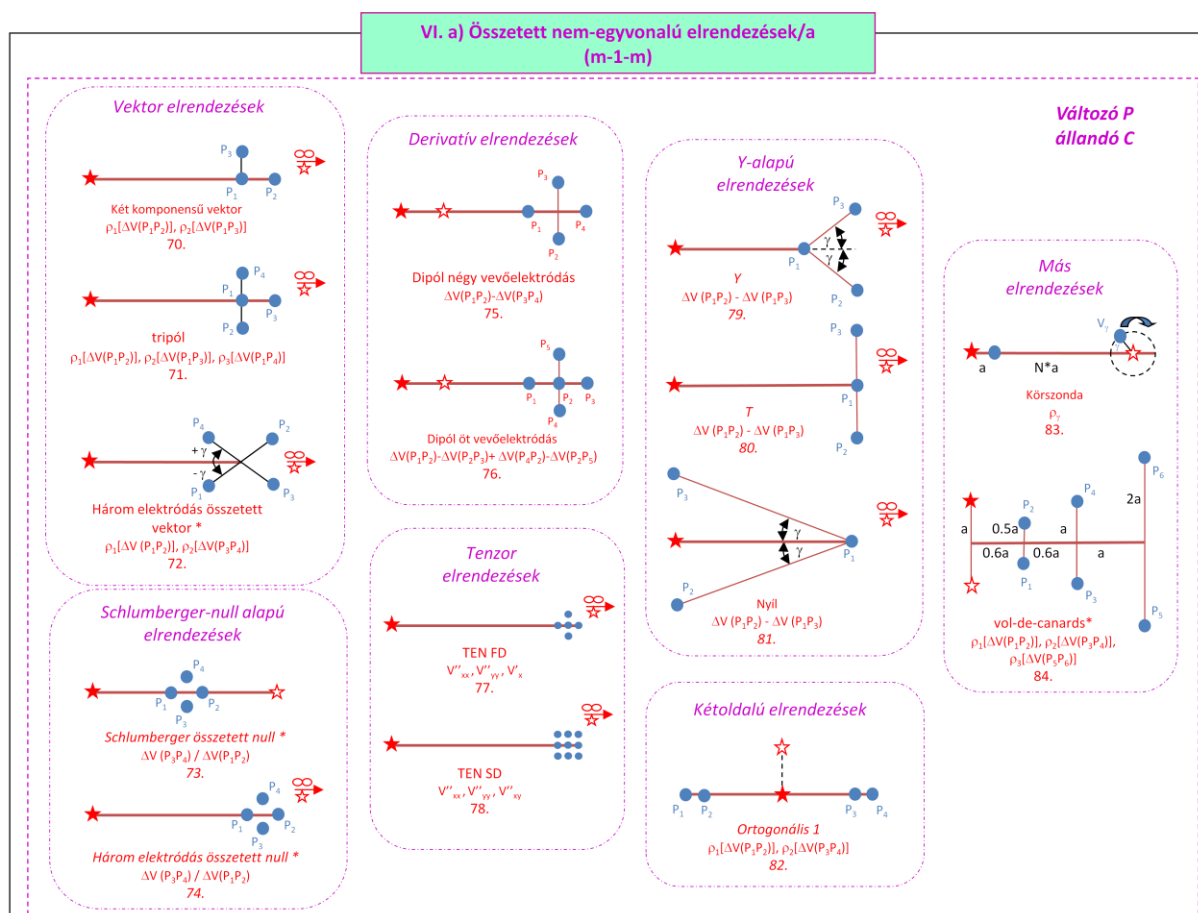
VII. osztály (m-m-1, 92-es elrendezés a II.1.1 táblázatban, II.1.9 ábra)

és VIII. osztály (m-m-m, II.1.10 ábra).

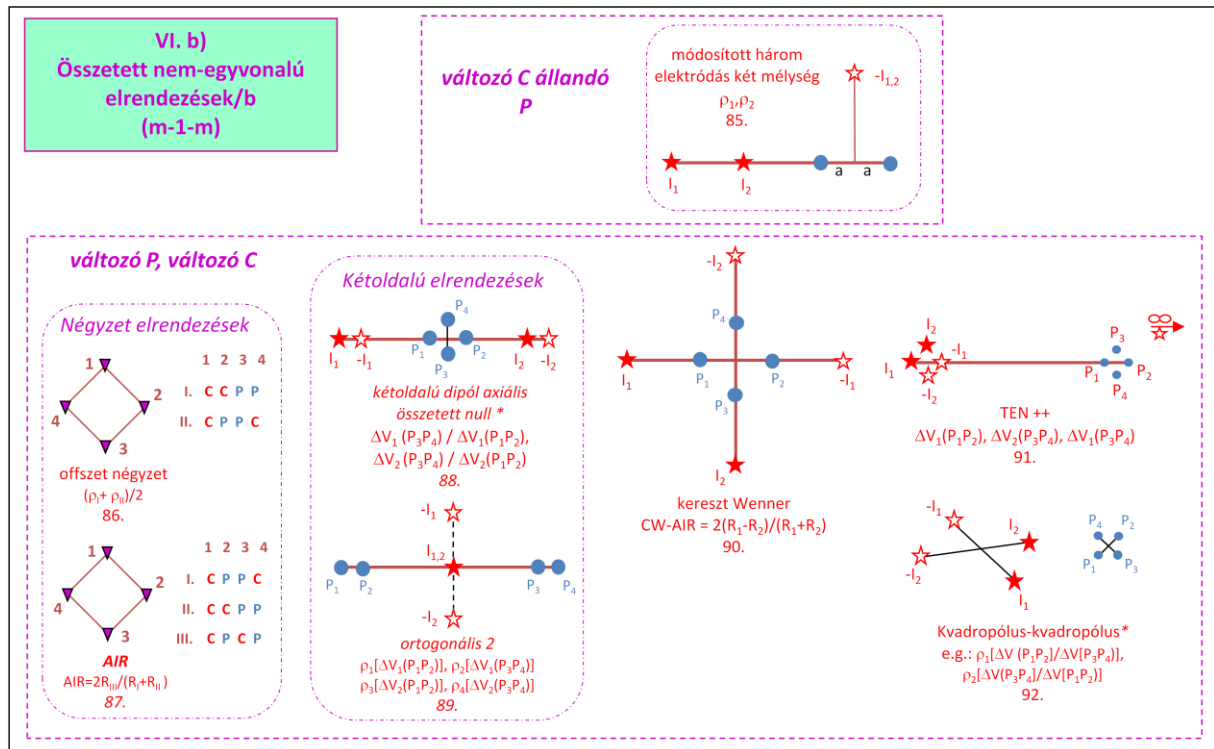
Az **V. osztályban** (nem-összetett, fókuszáló, nem-egyvonalú elrendezések; II.1.7 ábra) mindössze 6 elrendezés van. A **VI. osztályban** (összetett, nem-fókuszáló, nem-egyvonalú elrendezések; II.1.8a,b ábra) ugyanaz a három változat van, mint a IV. osztály esetében: (1) változó P és állandó C pozíciók, (2) változó C és állandó P pozíciók, (3) változó P és változó C pozíciók. Az (1) változat a II.1.8a, a (2) és (3) változatok a II.1.8b ábrán láthatóak. A geoelektromos hagyományokat követve a kétoldali és a két-hosszúságú változatok független elrendezésekként tekintendők. A **VII. osztályban** (összetett, fókuszáló, egyvonalú elrendezések) egyetlen elrendezés van (II.1.9 ábra). A **VIII. osztályba** tartozó elrendezés nem ismert a szakirodalomból, de könnyen szerkeszthető ilyen (II.1.10 ábra).



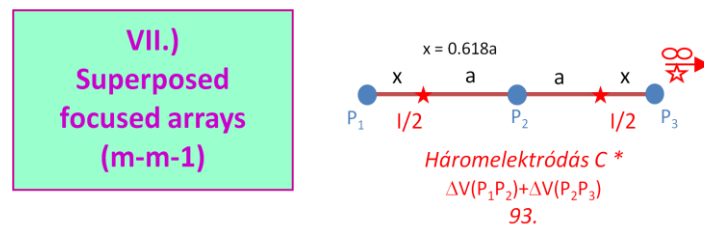
II.1.7 ábra: Nem-összetett, fókuszáló, nem-egyvonali elrendezések (V. osztály: 1-m-m).



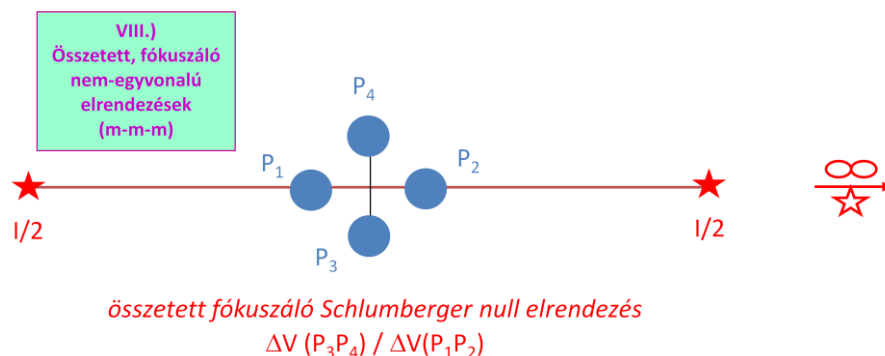
II.1.8a ábra: Összetett, nem-fókuszáló, nem-egyvonali elrendezések (VI. osztály: m-1-m, a II.1.8a és II.1.8b ábrákon).



II.1.8b ábra: Összetett, nem-fókuszáló, nem-egyvonálú elrendezések (VI. osztály: m-1-m, a II.1.8a és II.1.8b ábrákon).



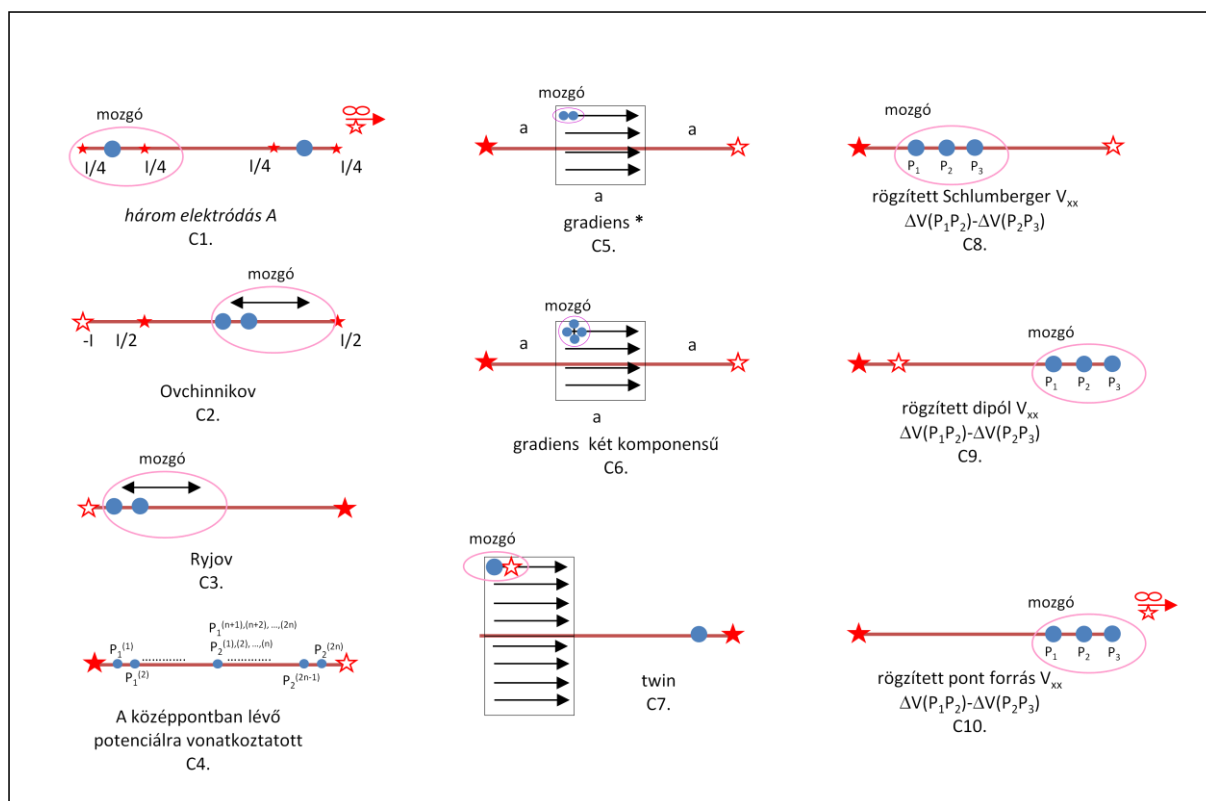
II.1.9 ábra: Összetett, fókuszáló, egyvonálú elrendezések (VII. osztály: m-m-1)



II.1.10 ábra: Egy hipotetikus elrendezés, amely a VIII. osztályba tartozna

A vegyes elrendezések (C1-C10 elrendezések: II.1.1. táblázat, II.1.11 ábra)

A vegyes elrendezések használata során profilmérést végrehajtva csak az elektródák egy részét mozgatjuk egyik helyről a másikra. 10 ilyen elrendezést találtunk.



II.1.11 ábra: 10db, úgynevezett „vegyes” elrendezés

II.1.1 táblázat: A geoelektromos elrendezések nevei, hivatkozásuk és számuk az ábrákon. A Szalai és Szarka (2008c) által javasolt elrendezés nevek vastagon, a null-elrendezések nevei dőlt betűvel szedve.

<i>ELRENDEZÉS NÉV</i>	<i>HIVATKOZÁS</i>	<i>ELRENDEZÉS SZÁMA</i>	<i>OSZTÁLY</i>
Schlumberger	Van Nostrand és Cook (1966), Kunetz (1966)	1	I (1-1-1)
symmetric four electrode	Tarkhov (1980)		
Schlumberger full	Schulz (1985)		
gradient Schlumberger	Tsokas <i>et al.</i> (1997)		
2-pole Schlumberger	Winter (1994)		
Wenner-α	Habberjam (1979)	2	
Wenner	Van Nostrand és Cook (1966)		
Wenner-Gish-Rooney	Heiland (1946)		
Palmer	Palmer (1960)	3	
?	még nem alkalmazott	4	
?	még nem alkalmazott	5	
Wenner-β	Habberjam (1979)	6	
dipole-dipole	Clark (1990)		
Eltran	Alpin <i>et al.</i> (1966)		
β -Wenner	Apparao <i>et al.</i> (1992)		
dipole axial	Alpin (1950)	7	
dipole-dipole	Kunetz (1966)		
double dipole	Kunetz (1966), Telford <i>et al.</i> (1976)		
colinear dipole-dipole	Cantwell <i>et al.</i> (1964)		
Polar	Zhdanov és Keller (1994)		
modified Eltran	Alpin <i>et al.</i> (1966)		
axial dipole	Tarkhov (1980)		

polar dipole	Alpin <i>et al.</i> (1966), Meidav (1970)		II (1-1-m)
?	még nem alkalmazott	8	
Wenner-γ null	Szalai <i>et al.</i> (2004)	9	
<i>Frolov</i>	Frolov (1989), Hmelevsky és Shevnin (1994)		
Wenner-γ	Whiteley (1973)	10	
twin-like	Szalai, Szarka (2008) (korábban nem alkalmazott)	11	
α-type nonsymmetrical	Jakosky (1950), név: Szalai, Szarka (2008), korábban nem alkalmazott	12	
asymmetrical double probe	Heiland (1946)	12a	
β-type nonsymmetrical	még nem alkalmazott; név: Szalai, Szarka (2008)	13	
asymmetrical polar dipole	Meidav (1970)	13a	
polar dipole	Alfano (1974)		
γ-type nonsymmetrical	még nem alkalmazott; név: Szalai, Szarka (2008)	14	
pole-dipole	Seigel <i>et al.</i> (1968)	15	
half-Schlumberger	Van Nostrand és Cook (1966)		
three-electrode	Van Nostrand és Cook (1966)		
Lögn	Van Nostrand és Cook (1966)		
tripole AMN	Kunetz (1966)		
tripole	Telford <i>et al.</i> (1976)		
Canadian	Zhdanov és Keller (1994)		
double probe with unequal probe spacing	Heiland (1946)		
one-electrode	Lögn (1954)		
three electrode Schlumberger	Meidav (1970)		
Schlumberger-half	Schulz (1985)		
1-pole Schlumberger	Winter (1994)		
half-Wenner	Van Nostrand és Cook (1966), Meidav (1970)	16	
three-point	Van Nostrand és Cook (1966)		
asymmetrical Wenner	Van Nostrand és Cook (1966)		
unsymmetrical	Jakosky (1950)		
double equidistant probe	Heiland (1940)		
three electrode Wenner	Meidav (1970)		
pole-dipole	Tsokas <i>et al.</i> (1997)		
half-twin like	this paper	17	
?	(még nem alkalmazott)	18	
?	(még nem alkalmazott)	19	
asymmetrical single probe	Heiland (1946)	20	
midpoint null	Szalai <i>et al.</i> (2004)	21	
<i>MAN</i>	Tarkhov (1957)		
<i>single pole</i>	Tarkhov (1957)		
pole-pole	Keller és Frischknecht (1966)	22	
two-electrode	Keller és Frischknecht (1966)		
dipole AM	Kunetz (1966)		
medium gradient	Tarkhov (1980)		
single probe	Heiland (1946)		
single-pole	Brass <i>et al.</i> (1981)		
Schlumberger null	Szalai <i>et al.</i> (2002)	23	
<i>AINS</i>	Tarkhov (1957)		
three-electrode null	Szalai <i>et al.</i> (2002)	24	
<i>half-Schlumberger null</i>	név: Szalai, Szarka (2008)		
three-electrode vector	Bogolyubov (1984)	25	
perpendicular bisector three-electrode	Dachnov (1953); név: Szalai, Szarka (2008)	26	
dipole	Alpin (1950)	27	
dipole-dipole	Keller <i>et al.</i> (1975)		
bipole-dipole	Keller <i>et al.</i> (1975)		
dipole equatorial	Alpin (1950)	28	
Eltran	West (1940)		
asymmetrical equatorial dipole	Meidav (1970)	29	
dipole axial null	Szalai <i>et al.</i> (2002)	30	
square-α	Habberjam és Watkins (1967)	31	
square-γ	Habberjam és Watkins (1967)	32	
Baker	Baker <i>et al.</i> (2001)	33	

Baker offset	Baker és Djeddi (1999), Baker <i>et al.</i> (2000)	34	III (1-m-1)
unipole Wenner- α	Militzer <i>et al.</i> (1979) (name: this paper)	35	
unipole	Tarkhov (1957), Gupta és Battacharya (1963)		
Wenner focused	Bernabini <i>et al.</i> (1988)		
unipole Schlumberger	Gupta (1961), Gupta és Bhattacharya (1963)	36	
Schlumberger focused	Bernabini <i>et al.</i> (1988)		
unipole variable current	Whiteley (1972)	37	
Wenner focused	Bernabini <i>et al.</i> (1988)		
Weyl	Weyl (1967)	38	
unipole Wenner- β	Militzer <i>et al.</i> (1979); név: Szalai, Szarka (2008)	39	
unipole Wenner- γ	Militzer <i>et al.</i> (1979); név: Szalai, Szarka (2008)	40	
modified unipole	Roy és Apparao (1971)	41	
tri-electrode	Bernabini <i>et al.</i> (1988)		
tri-electrode focused	Brizzolari és Bernabini (1979)		
trielectrode B	Grandinetti (1967)	42	
tetraelectrode	Bernabini <i>et al.</i> (1988)		
surface laterolog	Apparao <i>et al.</i> (1969)	43	
Csókás two-deflector	Csókás (1963)		
(surface) laterolog 7	Jackson (1981)	44	
single laterolog	Jackson (1981)		
Lee	Van Nostrand és Cook (1966)	45	
Lee partitioning	Heiland (1946), Jakosky (1950)		
asymmetrical Lee	Heiland (1946), Van Nostrand és Cook (1966)	46	
potential-drop-ratio	Kunetz (1966)		
Schlumberger V _{xx}	Sapuzhak (1967)	47	
point source V _{xx}	Sapuzhak (1967)	48	
dipole V _{xx}	Sapuzhak (1967)	49	
Pakhomov	Blokh (1971)	50	
Schlumberger two-depth	Dachnov (1953)	51	
Schlumberger three-depth	Dachnov (1953)	52	
differential	Zohdy (1969)	53	
two-field subtraction	Rabinovich és Kegutin (1962)	54	
Lee two-depth	Dachnov (1953)	55	
three-electrode two-depth	Dachnov (1953)	56	
Jakosky	Jakosky (1950)	57	
resistilog	West és Beacham (1944)	58	
asymmetrical Lee two-depth	Dachnov (1953)	59	
three-electrode difference field	Militzer <i>et al.</i> (1979)	60	
AMN-NMA averaged	Peschel (1967)		
two-sided pole-dipole	Semenov és Shevnin (1994)		
two-sided three-electrode	Candansayar és Basokur (2001)		
Hummel	Winter (1994)		
two-sided dipole axial	Tarkhov (1980)	61	
dipole axial difference field	Tarkhov (1980)		
offset Wenner	Barker (1981)	62	
Wenner- α és Wenner- β averaged	Kampke (1999)	63	
Csókás four-deflector	Csókás (1963)	64	
CED	Shabanov (1960), Mogilatov és Balashkov (1996), Takács (2003)	65	
linear quadripole- dipole	Yadav és Singh (1983)	66	
double laterolog	Jackson (1981)	67	
cross LL7	Jackson (1981)		
triple laterolog	Jackson (1981)	68	
triple LL7	Jackson (1981)		
quad laterolog	Jackson (1981)	69	
quad LL7	Jackson (1981)		
two-component vector	Hmelevsky és Shevnin (1994)	70	
tripole	Hmelevsky és Shevnin (1994)	71	
three-electrode superposed vector	Szalai és Szarka (2008c)	72	
three-electrode two-component	Bogolyubov (1984)		
Schlumberger superposed null	Szalai és Szarka (2008c)	73	
symmetrical two-component	Bogolyubov (1984)		

<i>three-electrode superposed null</i>	Szalai és Szarka (2008c)	74	vegyes elrendezések
<i>three-electrode two-component</i>	Bogolyubov (1984)		
dipole four electrode receiver	Sapuzhak (1967)	75	
dipole five electrode receiver	Sapuzhak (1967)	76	
V'' FD	Szalai és Szarka (2008c)	77	
TEN FD	Mousatov <i>et al.</i> (2002)		
V'' SD	Szalai és Szarka (2008c)	78	
TEN SD	Mousatov <i>et al.</i> (2002)		
Y	Bolshakov <i>et al.</i> (1998)	79	
T	Bolshakov <i>et al.</i> (1998)	80	
<i>arrow-type</i>	Bolshakov <i>et al.</i> (1998)	81	
<i>orthogonal 1</i>	Matveev (1990)	82	
Zirkelsonde	Schwarz (1961)	83	
vol-de-canards	Pannisod <i>et al.</i> (1998)	84	
MUltible Continuous Electrical Profiling, MUCEP	Pannisod <i>et al.</i> (1998)		
modified three-electrode two-depth	Dachnov (1953)	85	
offset square	Barker (1981)	86	
AIR	Habberjam (1979)	87	
<i>two-sided dipole axial superposed null</i>	this paper	88	
<i>two-sided two-components axial dipole</i>	Bogolyubov (1984)		
<i>orthogonal 2</i>	Matveev (1990)	89	
quadripole-quadripole	Doicin (1976)	90	
rotating dipole	Furgerson és Keller (1975)		
four-four superposed vector	Bogolyubov (1984)		
Schlumberger tensorial	Szalai, Szarka (2008)	90a	
2-pole TDCR	Winter (1994)		
Wenner tensorial	Szalai, Szarka (2008)	90b	
crossed Wenner	Tsokas <i>et al.</i> (1997)		
dipole tensorial	Szalai, Szarka (2008)	90c	
TEN ++	Mousatov <i>et al.</i> (2002)		
three-electrode tensorial	Szalai, Szarka (2008)	91	
1-pole TDCR	Winter (1994)		
<i>trielectrode C</i>	Grandinetti (1967)	92	VII (m-m-1)
<i>pentaelectrode</i>	Brizzolari és Bernabini (1979)		VIII (m-m-m)
nem ismert	nem ismert	nem ismert	vegyes elrendezések
trielectrode A	Grandinetti (1967)	C1	
Ovchinnikov	Ovchinnikov (1956)	C2	
Ryjov	Ryjov és Karinskaya (1981)	C3	
midpoint-potential referred (MPR)	Dahlin és Zhou (2004)	C4	
gradient	Schulz (1985), Furness (1993)	C5	
modified Schlumberger	Furness (1993)		
potential gradient	Furness (1993)		
rectangle	Kunetz (1966)		
gradient two-component	Varga et al. (2007)	C6	
twin	Clark (1990)	C7	
fixed Schlumberger V_{xx}	Sapuzhak (1977)	C8	
fixed dipole V_{xx}	Sapuzhak (1977)	C9	
fixed point source V_{xx}	Sapuzhak (1977)	C10	

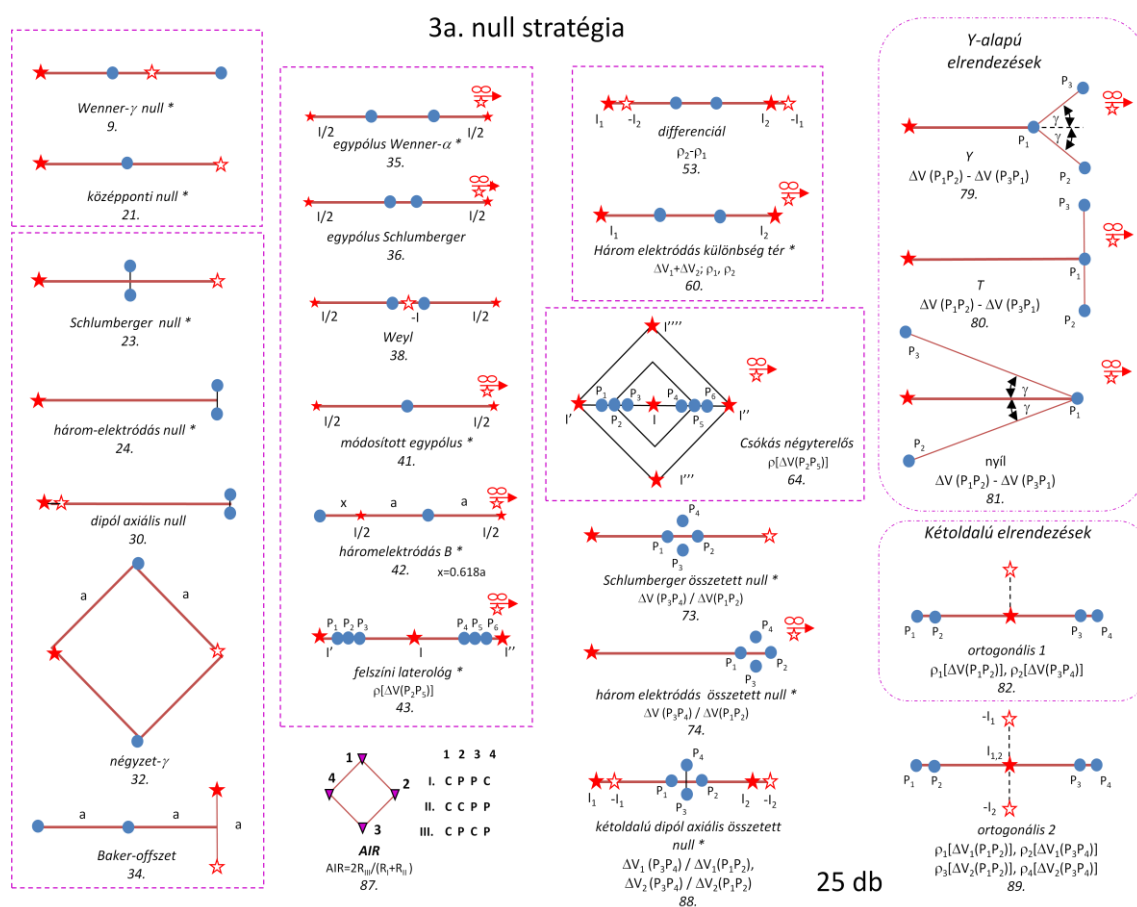
Jóllehet az alkalmazott elrendezések száma jelentős, **korábban még soha nem használták** a γ -típusú elrendezések közé tartozó γ_{11n} **elrendezéseket** (ahol n tetszőleges egész szám), **amelyekre értekezésem fókuszál**. Ezeket a *II.1.12 ábrán* mutatom be, részletesebb tárgyalásukra pedig a *IV. fejezetben* kerül sor. Ugyanígy nem használták még korábban a γ_{null} -elrendezést sem (szintén a *II.1.12 ábrán*), ami pedig szintén egy ígéretes kvázi null-elrendezés. Általában elmondhatjuk, hogy **ez a fajta stratégia, azaz olyan elrendezések használata, amik nullához közeli, de nem nulla jelet adnak homogén féltér felett, azaz a kvázi null stratégia, korábban még elméleti szinten sem merült fel.**

II.1.2 táblázat: Gyakorlati célok és az azok kielégítésére javasolt stratégiák és elrendezések

Általános megfontolás (stratégia)	Cél	Megoldás (alstratégia)	Ide tartozó elrendezések jelölő száma	Elrendezések száma	
Praktikus okok (1.)	A jel növelése	C közelíti P-t – (1a)	3, 4, 5, 8, 11, 12, 12a, 14, 19	9	61
	<i>Kevesebb elektródát kell mozgatni</i>	C és/vagy P a végtelenben – (1b)	15, 16, 17, 20, 21, 22, 25, 46, 56, 60, 70, 71, 72, 74, 79, 80, 81, 85, 91, C1, C10	21	
	<i>Kevesebb kábel szükséges</i>	Dipól – (1c)	7, 13a, 27, 28, 29, 30, 49, 61, 75, 76, 88, 90c, C9	13	
	<i>Nem kell minden elektródát mozgatni a térképezéshez</i>	Nem minden elektróda mozog – (1d)	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10	10	
	<i>Korlátozott hozzáférésű területen végrehajtandó mérés</i>	Aszimmetrikus – (1e)	12, 12a, 13, 13a, 14, 18, 20, 29	8	
<i>Az anomália „megtisztítása” magával a mérési módszerrel (2.)</i>	„Tiszta” anomáliát kapjunk	Null – (2a)	9, 21, 23, 24, 30, 32, 34, 35, 36, 38, 41, 42, 43, 53, 60, 64, 73, 74, 79, 80, 81, 82, 87, 88, 89	25	36
	A felszín közeli inhomogenitások hatásának kiküszöbölése	Offszet – (2b)	62, 86	2	
		Differencia – (2c)	53, 54	2	
		Két oldalú – (2d)	60, 61, 82, 88, 89	5	
		Az elektródák identitása változik – (2e)	63, 87	2	
<i>A helyi inhomogenitás és/vagy anizotrópia tanulmányozása (3.)</i>	x irányú (szelvény irányú) változások	Lee típusú – (3a)	45, 46, 55	3	54
		Deriváló – (3b)	1, 7, 15, 24, 30, 47, 48, 49, 75, 76, 77, 78	12	
	y irányú változások	Vektor – (3c)	25, 70, 71, 72, 83	5	
		Tenzor – (3d)	90, 90a, 90b, 90c, 91	5	
		További nem vonal elrendezések – (3e)	23, 24, 25, 26, 31, 32, 33, 34, 75, 76, 79, 80, 81, 85, 86, 89	16	
	z (függőleges) irányú változások	Mini-szondázás – (3f)	50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 84	11	
		Mélységi differenciálás – (3g)	53, 54	2	
A kutatási mélység növelése (4.)	A kutatási mélység növelése	Fókuszálás – (4)	35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 92	17	17

A II.1.2 táblázat felsorolja azokat az igényeket, amiket a terepi geofizikusok szokás szerint támasztanak az elrendezésekkel szemben: egyszerű mérési technika, lehetőség szerint már maga a mérési módszer különítse el a kutatni kívánt anomáliát, adjanak információt a helyi inhomogenitásokról és/vagy anizotrópiáról és lehetőleg nagy legyen a behatolási mélységük. A legfontosabbnak tekinthető igények kielégítését a helyi viszonyoknak megfelelően a megfelelő elrendezés kiválasztásával érhetjük el. Hogy hány, az adott követelményeknek megfelelő elrendezés létezik és mi azok száma, azt minden egyes cél esetében jelöltem. Különösen hatékony a II.1.2 táblázat azonos osztályaiban szereplő elrendezések összevetése. Így pl. a négyzet jellegű elrendezések minden más elrendezést felülmúlnak az anizotrópiával kapcsolatos kutatásokban (Tsokas et al., 1997), repedések irányának meghatározásában viszont pontosabb a Schlumberger null-elrendezés, mint a hagyományos elrendezések (Szalai et al., 2002).

A különböző elrendezések szisztematikus összevetése – pl. mélységérzékenységük, a szerkezet dőlésére, vagy az aljzat topográfiájára, a horizontális változásokra, stb. való érzékenységük szerint – csak a legnépszerűbb elrendezések esetére megoldott (Ward 1990). Jelen osztályozással ilyen összevetésekre több, mint 100 elrendezés esetében nyílik meg a lehetőség. Ez a rendszer új elrendezések megalkotását is megkönnyíti (pl. Barker, 1981; Szalai és Szarka, 2011). A rendszerből vett, vagy az által inspirált új elrendezések beépítése a sokeletródás rendszerekbe ezeknek a teljesítőképességét is megnövelheti.



II.1.13 ábra: A null-elrendezés stratégiát követő elrendezések

II.1f. A null-elrendezések

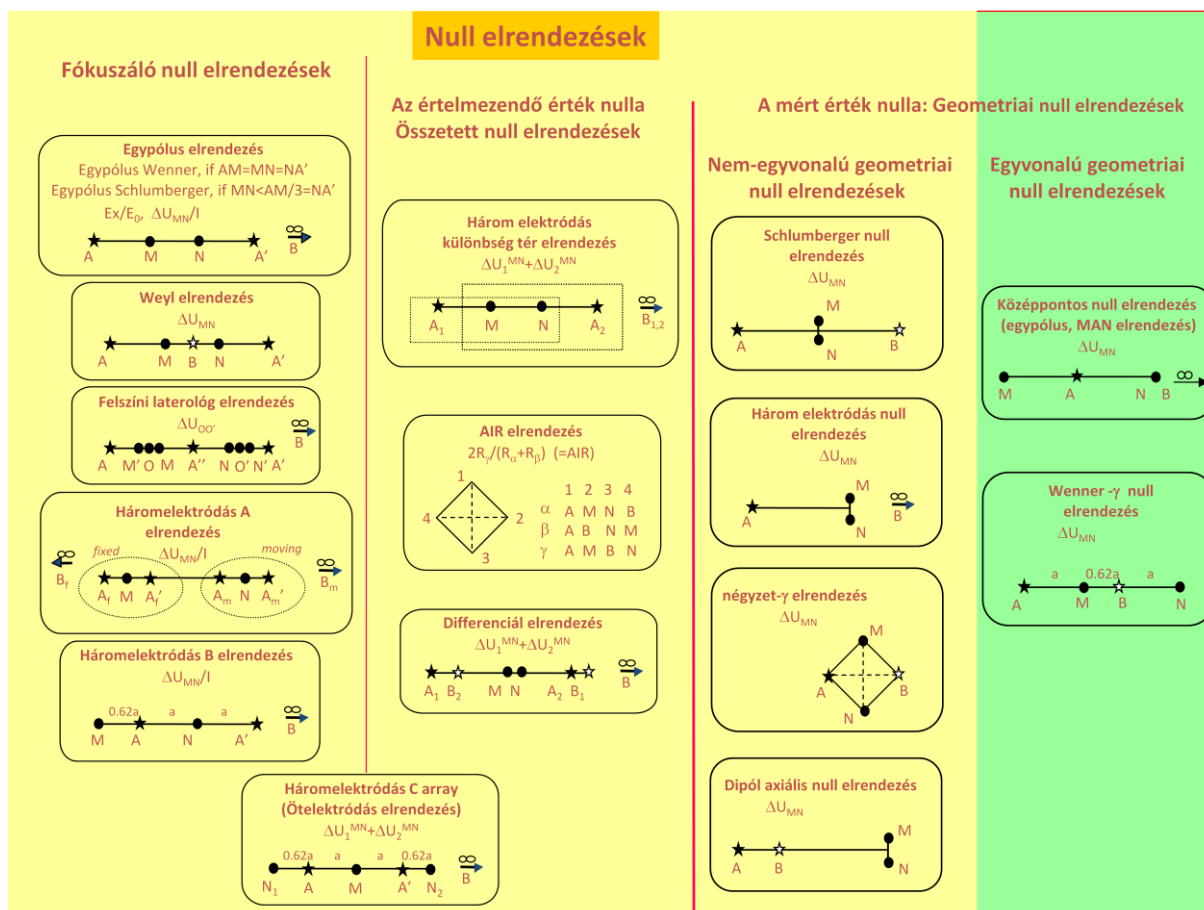
Megdöbbenő volt szembesülnöm azzal, hogy a szakirodalomban fellelt 102 elrendezés mintegy **negyede, 25 elrendezés besorolható az általam null-elrendezéseknek nevezett csoportba**, azaz a null-elrendezés stratégiát követi, még ha nem is ezzel a névvel illették őket (*II.1.13 ábra*). Emellett a szerzők ráadásul szinte kivétel nélkül arról számoltak be vizsgálataik után, hogy ezek az elrendezések **beváltották a hozzájuk fűzött reményeket**. (Az egyetlen kivétel *Tarkhov, 1957*, aki használhatatlannak találta a MAN elrendezést.) Többek között ezért is volt célszerű ezek csoportosítása is, amelyet a teljesség igénye nélkül az *II.1.13 ábra* mutat be. Ez az ábra illusztrálja azt is, hogy a **korábban alkalmazott null-elrendezések** gyakorlatilag kivétel nélkül **fókuszáló, vagy összetett elrendezések voltak**, amiknek a terepi használata meglehetősen nehézkes. Jóllehet valószínűleg nem ez volt az egyetlen ok, amiért ezek **további vizsgálata abbamaradt**, mégis úgy döntöttem, hogy - ezt elkerülendő - olyan null-elrendezéseket fogok csak vizsgálni, amelyeknek null-elrendezés jellege pusztán az elektródák megfelelő pozicionálásából származik. Az így képzett null-elrendezéseket **geometriai null-elrendezéseknek** nevezem.

A geometriai null-elrendezések közül **három nem volt ismeretlen** korábban sem. A MAN elrendezés vizsgálata azonban meglehetősen kurtára sikeredett (*Tarkhov, 1957*), hamar kimondták rá a véglegesnek tűnő ítéletet. A MAN elrendezés három különböző néven található meg a szakirodalomban: MAN (*Tarkhov, 1957*) egypólus (*Tarkhov, 1957*), illetve középpontos null-elrendezés (*Szalai et al., 2004*). A továbbiakban az egyszerűség kedvéért a MAN elnevezést fogom használni.

A többi geometriai null-elrendezés közül a **Schlumberger null-elrendezést** annál részletesebb vizsgálatoknak vetették alá, mi több egy egész könyvet (*Bogolyubov, 1984*) szenteltek neki, de az elrendezést **csak szondázási céllal** vizsgálták. A **négyzet- γ** elrendezést pedig önmagában nem szokták használni, csak a négyzet- α és/vagy négyzet- β elrendezésekkel kombinálva (*Habberjam és Watkins, 1967*). A **dipól axiális null-**, és a **három elektródás null-elrendezéseket** már *Szalai et al. (2002)* vezette be a gyakorlatba, ahogy a **Schlumberger null-elrendezés** profilmérési célú használatát is. *Szalai et al. (2009b)* megállapította a **dipól párhuzamos null-elrendezés** kutatási mélységét is.

A **(Wenner-) γ null-elrendezésnek** csak az orosz szakirodalomban akadtam nyomára (*Frolov, 1989; Hmelevsky és Shevnin, 1994*). Ez és a MAN elrendezés azért is érdekes, mert ezek a korábban alkalmazott null-elrendezésekkel szemben **egyvonalúak**, ami használatukat **jóval egyszerűbbé** és így gyorsabbá is teszi. Emiatt továbbá a MAN elrendezés és a γ_{null} elrendezésből némi módosítással kapott γ_{qnull} elrendezés is beépíthető az egyenként **sokelektrodás rendszerbe**, ami a napjainkban leginkább elterjedt kétdimenziós sokelektrodás konfigurációk alkotóelemeinek is alkalmassá teszi őket.

Az elvégzett osztályozás tehát mintegy kijelölte az utat a geometriai null-elrendezések, majd az egyvonalú geometriai null-elrendezések felé, ahonnan már csak egy lépés vezetett az **egyvonalú geometriai kvázi null-elrendezésekhez**, amelyek vizsgálata jelen értekezés fókuszában áll.



II.1.14 ábra: A geoelektromos kutatásban használható különböző elveken működő null-elrendezések

Az II.1 fejezetben tehát összegyűjtöttem a valaha használt, az angol, illetve az orosz nyelvű szakirodalomban megtalálható geoelektromos elrendezéseket, egységes formában ábrázoltam és három tulajdonság alapján 8+1 csoportba soroltam őket. Rámutattam továbbá, hogy milyen stratégiákat követve fejlesztették ki a különböző elrendezéseket, megnyitva ezzel az utat ezen, illetve hasonló stratégiát követő elrendezések sokelektrodás rendszerekbe történő beépítése előtt is. Kiderült, hogy az összegyűjtött 102 elrendezése mintegy negyede, 25 elrendezés null-elrendezés volt, amiknek terepi használata azonban meglehetősen nehézkes, mivel azok túlnyomórészt a fókuszáló, illetve az összetett stratégiákat követték. Az általam bevezetett null-elrendezések ezzel szemben az elektrodák megfelelő pozicionálásának köszönhetik null-elrendezés voltukat. Ez az elrendezés- gyűjtemény lehetővé teszi a különböző elrendezések szisztematikus összevetését is különböző tulajdonságaik alapján.

II.2. Paraméter-érzékenység térképek

Szalai és Szarka (2008a) és Szalai és Szarka (2008b) alapján

II.2a. Bevezetés

Mint a *II.1 fejezetben* bemutattam, számos geoelektromos elrendezést vizsgáltak korábban. Ezek mindegyikének eltérő vonásai vannak, amik azonban ritkán jellemezhetőek egyetlen értékkel. Ilyenek pl. a kutatási mélység, vagy a vertikális felbontóképesség értékei. Adott **elrendezés legalapvetőbb sajátosságai** közé tartozik ugyanakkor, hogy a környezetében elhelyezkedő elemi ható annak pozíciójától függően mekkora hatást gyakorol az általa mért jelre. Ezt szemléltetik az egyes elrendezések paraméter-érzékenység (PÉ) térképei.

Ebben a fejezetben bemutatom, **hogyan számítottam ki** az egyes elrendezések paraméter-érzékenység térképeit, **ábrázolom azokat az összes olyan elrendezésre**, amelyek esetére ez lehetséges és bemutatom néhány **alkalmazási lehetőségüket**, különös tekintettel a **null-elrendezésekre** vonatkozólag, amelyek viselkedésének megértésében nagy segítséget nyújtottak. A paraméter-érzékenységeket a szokásos függőleges szelvények helyett **térképek formájában** ábrázoltam, ami a probléma három-dimenziós megközelítését is lehetővé teszi. Az elemi ható teljes hatásán túl bemutatom minden elrendezés esetében a kocka alakú ható a koordinátarendszer egyes tengelyeire merőleges lappárjai által okozott hatását is, ami a geoelektromos elrendezések viselkedésének még mélyebb megértését teszi lehetővé. 14 egyvonalú, 7 nem-egyvonalú és 3 fókuszáló elrendezés paraméter-érzékenység térképeit mutatom be, melyek jelentős részének paraméter-érzékenységét **semmilyen formában nem vizsgálták korábban**.

A PÉ térképek (röviden PÉT) számításának alapját a *Roy és Apparao (1971)* kutatási mélység számításainál használt megközelítés adta. Paraméter-érzékenység térképeket több felszíni geoelektromos elrendezésre **először Barker (1979)** mutatott be, és használt értelmezési célokra. *Szarka (1994)* **analóg modell** mérések segítségével **váltóáramú dipól-dipól elrendezések** esetére készített paraméter-érzékenység jellegű térképeket.

A fenti megközelítés mellett paraméter-érzékenység értékeket **a Frechet deriváltak alapján**, azaz a többdimenziós modell paramétereinek végtelen kicsi megváltozása hatására adott válasz alapján is lehet számítani (*Zhdanov és Keller, 1994*). Ezt a második megközelítést követve megadható az **optimális elrendezés** (és annak optimális paraméterei) **adott modell esetére**. Ilyen jellegű geoelektromos tanulmányokat *Gyulai (1989)* és *Noel és Xu (1991)* is közöltek. *Hering et al. (1995)* **1D paraméter-érzékenység vizsgálatokat** végzett Schlumberger, sugárirányú (axiális) dipól és két-elektrodás elrendezésekkel. *Noel és Xu (1991)* **2D paraméter-érzékenység tanulmányokat** végzett; *Gyulai (1995)* két-elektrodás, három-elektrodás, Wenner-, Schlumberger-, és sugárirányú dipól elrendezések paraméter-érzékenységét vizsgálta **dőlő, rétegzett modellek esetére**; *Gyulai (1998)* pedig felszín alatti **üreges paraméter-érzékenységgel** kapcsolatos vizsgálatokat végzett. **Gyakorlati példaként** *Nyári és Kanli (2007)* kisméretű 3D inhomogenitásoknak a 2D értelmezésre kifejtett hatását vizsgálta különböző elrendezések esetére. *Spitzer és Kümpel (1997)* néhány 3D modell paraméter felbontóképességét határozta meg, megmutatva a modell különböző részeinek hatását a kapott értékre.

A fenti két megközelítés nagyon jól kiegészíti egymást. A második, a **Frechet derivált** szerinti definíció nagyon hasznos **adott terepi probléma esetében**, de esetében minden egyes

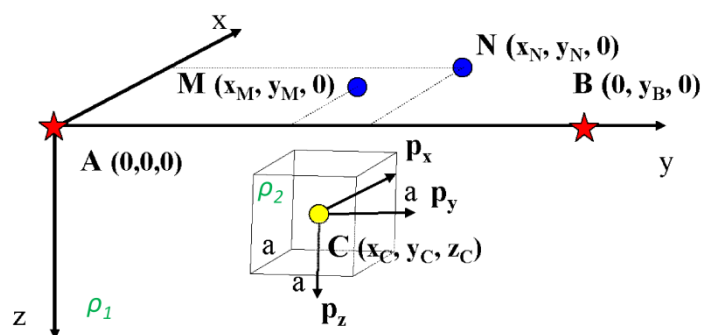
problémát külön kell kezelni. Az első („elemi test”) megközelítés ugyanakkor, amit itt bemutatok, **általános áttekintést** képes adni a felszíni elektróda elrendezések alapvető sajátosságairól.

Paraméter-érzékenység értékeit térképek formájában Hursán (1996) és Spitzer (1998) adott meg **numerikus** úton. Szalai (1997) paraméter-érzékenység térképeket egy egyszerű **analitikus formula** alapján számított dipól elrendezések esetére. Szalai és Szarka (2000) azt is kimutatta, hogy ezek az analitikus úton számított paraméter-érzékenység értékek **jól egyeznek a numerikus eredményekkel**, amennyiben a kocka alakú ható viszonylag kisméretű. Ez azt jelenti, hogy ha $a/R \leq 0.1$ (ahol a a kocka oldalhossza, R pedig az elrendezéshossz), akkor az analitikus és numerikus megoldások különbsége kisebb 5%-nál. Megjegyzem még, hogy a bemutatandó levezetés fizikai alapját az azokon az ellenállás-határfelületeken felhalmozódó elektromos töltések jelentik, amelyeken az áram áthalad (Szarka, 1990; Li és Oldenburg, 1991; Szarka, 1992).

A fejezet első részében a paraméter-érzékenység térképek **számításának** menetét mutatom be, majd áttekintjük a **térképek főbb jellegzetességeit**. Bemutatok néhány példát a térképek **gyakorlati alkalmazhatóságára**. Végül **ábrázolom az összes olyan felszíni geoelektromos elrendezés paraméter-érzékenység térképeit**, amelyek esetében ez lehetséges.

II.2b. A paraméter-érzékenység térképek számítása

Az itt közölt levezetés a Szalai és Szarka (2000) által DP-DP elrendezésekre adott levezetés általánosítása nem-dipól elrendezésekre. a oldalhosszúságú, ρ_2 elektromos fajlagos ellenállású kockát helyezünk egy egyébként homogén, izotróp, ρ_1 fajlagos ellenállású féltérbe, amint azt a II.2.1 ábra mutatja. I áram folyik a „cur” áramelektrodák (az ábrán két ilyen van: A és B) keresztül a földbe, illetve abból ki, a földfelszínen kialakuló potenciálkülönbséget pedig két, szintén a felszínen elhelyezkedő elektróda, az M és N potenciál-elektrodák között mérjük.



II.2.1 ábra: A kocka hatásának számításánál használt jelölések négyelektrodás rendszer példáján bemutatva. Ekkor A és B a szövegben és a képletekben „cur”-ként jelölt áramelektrodák I , illetve $-I$ áramerősséggel. ρ_2 az inhomogenitás-, ρ_1 a közeg fajlagos ellenállása.

A homogén féltér. Ahogy az ismert, az A és B áramelektrodák között betáplált I áram hatására kialakuló potenciálkülönbség ρ elektromos fajlagos ellenállású homogén féltér felett M és N elektródák között a következő (II.2.1 ábra):

$$\Delta U^{\text{hom}} = \frac{I\rho}{2\pi} G^{\text{hom}}, \text{ ahol } G^{\text{hom}} = \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \quad (\text{II-1})$$

Itt r az annak alsó indexében szereplő elektródák egymástól mért távolságát jelenti.

Az inhomogén fél-tér. Tételezzük fel, hogy a $C(x_C, y_C, z_C)$ pontban lévő (lásd az II.2.1 ábrát) kisméretű inhomogenitás által keltett anomália hatása ekvivalens egy, az inhomogenitás helyén lévő dipól hatásával. Az első lépésben ennek a dipólmomentumát, majd annak elektromos hatását számítjuk.

A hipotetikus dipól momentum. Az ellenállás kontraszttal jelentkező határfelületen a felületi töltéssűrűség Li és Oldenburg (1991) szerint:

$$\tau = 2\varepsilon_0 k E_b \quad (\text{II-2})$$

ahol E_b az elektromos tér normal komponense lenne az inhomogenitás hiányában,

$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ az ellenálláskontraszt, ρ_2 az inhomogenitás-, ρ_1 a közeg fajlagos ellenállása.

A Q_x , Q_y és Q_z elektromos töltések, amik az inhomogenitás megfelelő x , y és z tengelyekre merőleges oldalain halmozódnak fel:

$$Q_x = \iint 2k\varepsilon_0 E_x dydz \quad (\text{II-3a})$$

$$Q_y = \iint 2k\varepsilon_0 E_y dx dz \quad (\text{II-3b})$$

$$Q_z = \iint 2k\varepsilon_0 E_z dx dy \quad (\text{II-3c})$$

ahol E_x , E_y és E_z az elektromos tér komponensei lennének az inhomogenitás távollétében. Ekkor a p_i (ahol $i=x,y,z$) dipól momentumok alakja:

$$p_i = \iiint 2k\varepsilon_0 E_i dx dy dz \quad (\text{II-4})$$

Ha a , b és c a derékszögű test oldalhosszai, feltételezhető, hogy

$$p_i \approx 2k\varepsilon_0 E_i abc \quad (\text{II-5})$$

Ily módon bármely kisméretű test, pl. egy kis kocka helyettesíthető egy $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$ momentumú elektromos dipóllal. Esetünkben azt feltételezzük, hogy $abc=a^3$.

A dipólmomentum komponensei. Az elektromos potenciál a kocka középpontjának helyén (C pontban), de annak hiányában:

$$U^{\text{hom}}(\mathbf{r}_C) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{BC}} \right) \quad (\text{II-6})$$

ahol r_{AC} és r_{BC} az A és B áramelektrodáknak C -től való távolsága.

$$r_{AC} = \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 + (z_C - z_A)^2}, \quad r_{BC} = \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 + (z_C - z_B)^2}$$

Az elektromos tér az elektromos potenciál negatív gradiense:

$$E_i = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left(\frac{i_A - i_C}{r_{AC}^3} + \frac{i_C - i_B}{r_{BC}^3} \right), \text{ ahol } i=x, y \text{ vagy } z. \quad (\text{II-7})$$

A (II-5) és (II-7) egyenletek segítségével a helyettesítő dipól dipólmomentumai a következőképpen közelíthetők:

$$p_i = \frac{\varepsilon_0 \rho_1 I}{\pi} \cdot k a^3 G_i^{\text{cur}}, \text{ ahol } G_i^{\text{cur}} = \sum_{\text{cur}=1}^N \frac{i_{\text{cur}} - i_C}{r_{\text{cur}C}^3} \quad (\text{II-8})$$

A (II-8) egyenletben “*cur*” bármely N áramelektrodára utalhat, r_{curC} pedig azok C-től való távolságát írja le.

A kocka hatásaként kialakuló elektromos potenciál anomália. Elektrosztatikus közelítésben a $\mathbf{p}$ dipólmomentum hatásaként kialakuló elektromos potenciál a következő:

$$U(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(\mathbf{p}, \nabla \frac{1}{r} \right) \quad (\text{II-9})$$

A reciprocitási elv szerint (Dachnov, 1953), az áram- és a potenciál-elektrodák felcserélhetőek. Ily módon az M és az N elektrodák között, a kocka hatására kialakuló potenciálkülönbség:

$$\Delta U^{cube}(p_i) = \frac{p_i}{2\pi\epsilon_0} G_i^{MN} \quad (\text{II-10})$$

ahol p_i párhuzamos i -vel ($i=x, y, z$), és $\Delta U(p_i)$ az egymással szembenlévő oldalpár hatása, amely merőleges i -re, és $G_i^{MN} = \frac{i_C - i_M}{r_{CM}^3} + \frac{i_N - i_C}{r_{CN}^3}$

A kocka hatása. (II-8) és (II-10) alapján a potenciálkülönbség a következőképpen írható:

$$\Delta U^{cube}(p_i) = \frac{\rho I}{2\pi^2} k a^3 G_i^{cur} G_i^{MN} \quad (\text{II-11})$$

Bevezetve a $G_i^{cube} = G_i^{cur} \cdot G_i^{MN}$ G_i összefüggést (II-1) és (II-11) egyenletekből:

$$\Delta U^{total}(p_i) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(G^{hom} + \frac{k}{\pi} a^3 G_i \right), \text{ ahol } i = x, y, z \quad (\text{II-12})$$

A szembenlévő oldalpárok teljes hatása:

$$\Delta U^{total}(\mathbf{p}) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(G^{hom} + \frac{k}{\pi} a^3 G^{cube} \right), \text{ ahol } G^{cube} = \sum G_i \quad (\text{II-13})$$

Az x , y és z oldalpárookra összegzünk. A kocka hatása a homogén féltér értékének százalékában:

$$\frac{\Delta U^{cube}}{\Delta U^{hom}} = \frac{100}{\pi} k a^3 \frac{G^{cube}}{G^{hom}} \quad (\text{II-14})$$

II.2c. A paraméter-érzékenység térképek jellemzése

Mint láthattuk a paraméter-érzékenység térképek (PÉT) egy homogén féltérbe helyezett, attól eltérő fajlagos ellenállású, kisméretű kocka által adott választ ábrázolják a kocka pozíciójának függvényében. A kocka oldalhossza esetükben $a=0.1R$, ahol R a karakterisztikus elrendezés hossz, azaz a két egymástól legtávolabb lévő, nem a végtelenben lévő elektróda távolsága. A térképeken az adott elrendezés esetében a kocka hatására megjelenő elektromos feszültségkülönbség-értékek szerepelnek a hasonló karakterisztikus hosszúságú Wenner elrendezéssel a homogén féltér felett mérhető érték százalékában, normálva ezt még az ellenálláskontraszttal is. Három mélységben, az elrendezés karakterisztikus hosszának egy, két, illetve három tizedének megfelelő mélységekben ábrázoltam a térképeket.

A paraméter-érzékenység térképek **előnyös tulajdonságai**:

- A normálásnak köszönhetően a különböző elrendezések PÉT értékei **közvetlenül összevethetőek** egymással. A szakirodalomban olyan értékeket szokás megjeleníteni, amiket

az adott térkép maximumával normálnak, ami a különböző elrendezések paraméter-érzékenységi értékeinek mennyiségi összevetését nem teszi lehetővé.

- **Az egyes (x, y, és z) komponensek paraméter-érzékenység térképeit is** bemutatom. Ezáltal az is láthatóvá válik, hogy a kocka egyes szemben fekvő lappárjai mennyire járulnak hozzá a mért jel kialakításához. Így könnyen megmagyarázható pl., hogy az egyvonalú elrendezések miért sokkal érzékenyebbek az elrendezések vonalára merőleges irányú inhomogenitásokra.

- **Nem csak az elektródák vonalában ábrázolom** a paraméter-érzékenység értékeket, ahogy az általában szokás. Ezáltal az **oldalhatás**, azaz a nem az egyvonalú elrendezés vonala alatt lévő inhomogenitások hatása **is megjelenik**.

- Nem túl nagyméretű inhomogenitások esetén nemcsak minőségileg, de **mennyiségileg is jó megközelítést kapunk** (Szalai és Szarka 2000).

A paraméter-érzékenység térképeket a $-0.2 \leq x \leq 1.2$, $-0.5 \leq y \leq 0.5$ **tartományban** ábrázolom az *R* karakterisztikus elrendezéshossz értékét 1-nek tekintve. Ezen a tartományon kívül az értékek már nem számottevőek. A **pozitív értékek** az észlelt potenciálkülönbség (vagy látszólagos ellenállás) megnövekedésére, a **negatív értékek** annak csökkenésére utalnak a homogén féltér értékénél nagyobb ellenállású kocka esetén. A **nulla izovonalon** elhelyezkedő inhomogenitásokra az adott elrendezés gyakorlatilag **érzéketlen**.

A paraméter-érzékenység térképek **szimmetriaviszonyaik**, a **nulla izovonalak pozíciója**, az **x, y és z irányú érzékenység aránya**, az **érzékenység értékek nagysága és területi eloszlásuk alapján jellemezhetőek**.

II.2d. A paraméter-érzékenység térképek gyakorlati használhatósága

Szalai és Szarka (2006), Szalai és Szarka (2008a) és Szalai és Szarka (2008b) alapján

Itt néhány példát mutatok be a paraméter-érzékenység térképek gyakorlati alkalmazhatóságára: (1) **Hogyan érthetőek meg egyes** geoelektromos elrendezések alapvető sajátosságai. (2) **Hogyan jelezhetőek előre** új geoelektromos elrendezések alapvető sajátosságai. (3) **Hogyan lehet képezni új elrendezéseket** régiekből azok paraméter-érzékenység térképeinek ismerete alapján.

Példák az (1) esethez:

1a) Különböző elrendezések eltérő felbontóképességének megértése (a Schlumberger és a Wenner elrendezések példáján);

1b) Az áram-, illetve a potenciálektródák körüli inhomogenitások hatásának, az ú.n. C-, és P hatásnak (Shevvin *et al.*, 1999) megértése.

A példákban, amiket új elrendezések működésének megértésére (2.) mutatok be null-elrendezéseket vizsgálunk.

2a) A null-elrendezések viselkedésének előrejelzése szimmetrikus hatók felett (Szalai *et al.* 2000 alapján);

2b) Hosszú inhomogenitások felett végrehajtott azimutális mérések várható eredményének előrejelzése (Szalai *et al.* 2002 alapján).

Példák új elrendezések szerkesztésére (Barker, 1981 alapján):

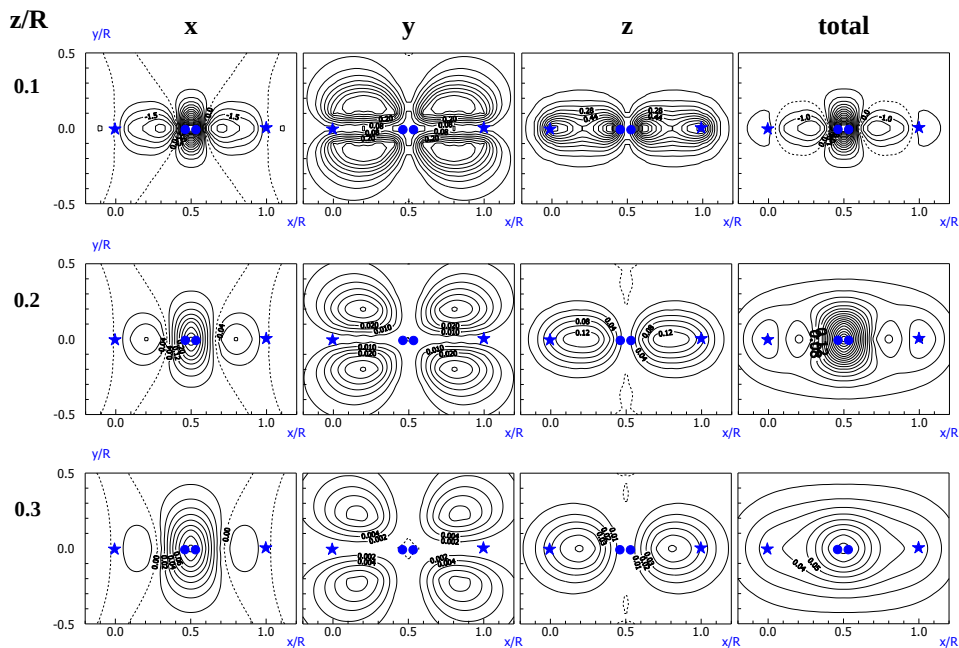
3a) az offszet-Wenner elrendezés;

3b) az offszet négyzetes elrendezés.

Lássuk részletesen a fenti **példákat**:

1a) A Schlumberger és a Wenner elrendezések eltérő felbontóképességének megértése

Összevetve a Schlumberger és a Wenner elrendezések paraméter-érzékenység térképeit (a « total » értéket, azaz a kocka teljes hatását) egyértelmű, hogy a Schlumberger elrendezésé (II.2.2 ábra) mélységtől függetlenül koncentráltabb, mint a Wenneré (II.2.3 ábra). Ennek köszönhető, hogy a Schlumberger elrendezés horizontális felbontóképessége jobb, mint a Wenneré. Ha a PÉT-eken **nagyméretű**, kiterjedt **anomália zónák** vannak csak, mint a Wenner elrendezés esetében, akkor **az adott elrendezés robusztus** lesz, mivel a ható felett áthaladva a jel csak lassan változik. Igaz, hogy ugyanakkor az is nehezen kerülhető el, hogy “észrevegye” a hatót az adott elrendezés, azaz elég lehet meglehetősen nagy mintavételezési távolság is ilyen elrendezések esetében.



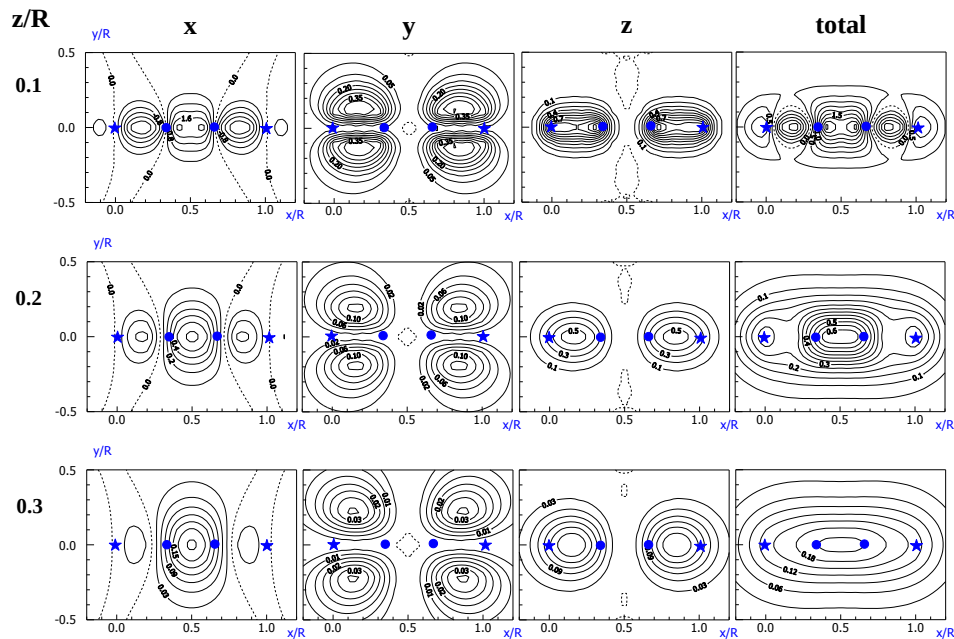
II.2.2 ábra: A Schlumberger elrendezés paraméter-érzékenység térképei (az 1. elrendezés az II.2.1. táblázatban) az áramelektroda (csillagok) és potenciál-elektroda (körök) pozíciókkal. Az x , y , és z komponensek a megfelelő irányra merőleges lappárokon felhalmozódott töltések hatását illusztrálják, míg a „total” az együttes hatásukat jelenti. A térképek három különböző mélységre, az elrendezés karakterisztikus hosszának 0.1, 0.2 és 0.3 részének megfelelő mélységekre készültek.

1b) Az áram-, illetve a potenciálelektrodák körüli inhomogenitások hatásának, az ún. C-, és P hatásnak megértése.

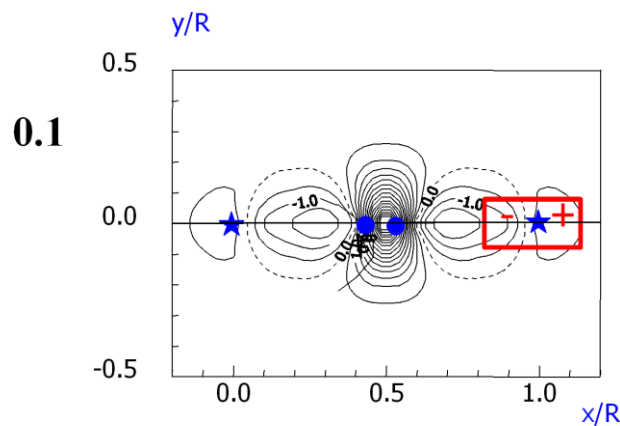
A C és a P hatások (Shevlin et al., 1999), a Schlumberger elrendezéssel végrehajtott szondázás eredményeként kapott VESZ görbék jellegzetes torzulásai jól megérthetőek az elrendezés PÉT-einek tanulmányozásával. Mivel a P elektrodák környezete nem változik a szondázás során (annak egy-egy szakaszán belül, amíg azok távolságának növelésére nem kényszerülünk az egyre csökkenő potenciálkülönbség miatt) az csak **párhuzamos eltoláshoz vezet a szondázási görbéken**. Ez a P hatás.

Ugyanakkor a mozgó C áramelektrodák környezete minden egyes lépésben változik. Ez a szondázási görbék egy karakterisztikus torzulásához vezet, **kettős anomáliát** (negatív-pozitív

anomália pár) hozva létre a **görbén**, amiatt, hogy az áramelektroda két oldalán eltérő előjelű értékek vannak a PÉT-en (II.2.4 ábra). Ez a **C hatás**.



II.2.3 ábra: A Wenner elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 2. elrendezés az II.2.1 táblázatban). Jelmagyarázatért lásd a II.2.2 ábrát.



II.2.4 ábra: A VESZ görbén megjelenő C hatás magyarázata. A Schlumberger elrendezés paraméter-érzékenység térképe mutatja, hogy az áramelektroda két oldalán a felszínközeli zavaró inhomogenitás hatása különböző előjelű, így ahogy az áramelektroda áthalad felette, kettős anomáliát hoz létre.

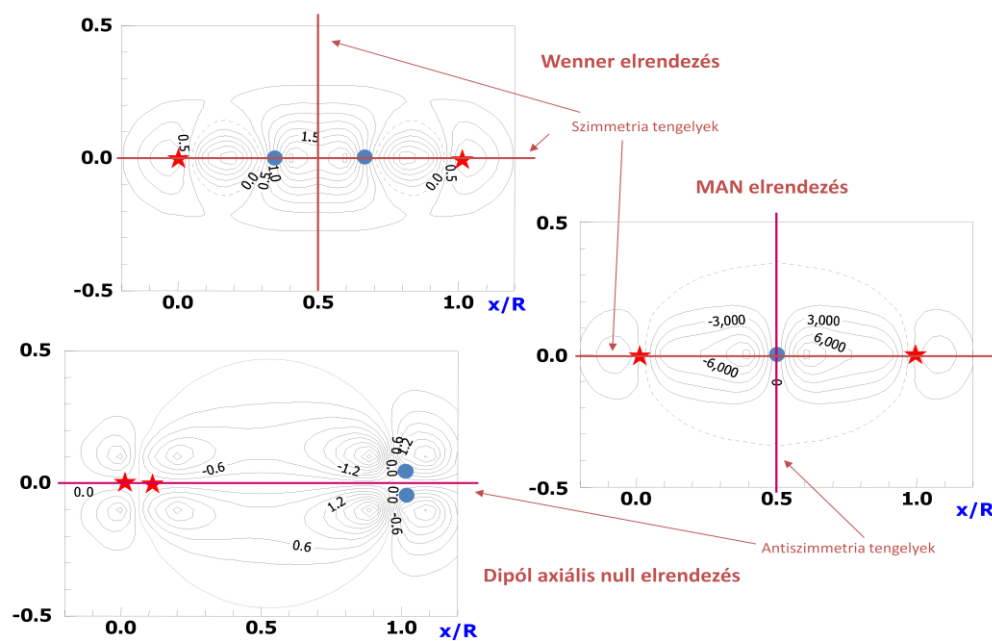
2a) A null-elrendezések viselkedésének előrejelzése szimmetrikus hatók felett

Az egyes elrendezések jellemzése szempontjából alapvető a vonatkozó PÉT-ek **szimmetria tulajdonságainak** ismerete. Vannak elrendezések, amelyek paraméter-érzékenység térképe **szimmetria-**, illetve **antiszimmetria-tengellyel** rendelkezik, illetve olyanok is, amelyek semelyikkel nem rendelkeznek. Néhány példát a II.2.5 ábrán mutatok be. A **Wenner** elrendezés paraméter-érzékenység térképének **két szimmetriatengelye** is van, a **dipól axiális null-elrendezésnek antiszimmetria tengelye van**, míg a **MAN** elrendezés

paraméter-érzékenység térképe **mind szimmetria, mind pedig antiszimmetria-tengellyel bír.**

Az **antiszimmetria-tengellyel rendelkező** paraméter-érzékenység térképű elrendezések, mint a dipól axiális null-elrendezés is, **érzéketlenek az erre a tengelyre szimmetrikus inhomogenitásokra** (Szalai *et al.*, 2000). Ez annak köszönhető, hogy az inhomogenitásnak egy antiszimmetriatengely két oldalán, attól azonos távolságokban elhelyezkedő elemei azonos, de ellenkező előjelű hatást gyakorolva a mért potenciálkülönbségre kioltják egymást (II.2.6 ábra).

Ennek következményeként **az ilyen elrendezések nem csak 1D modell, de tetszőleges 2D modellek, sőt az antiszimmetria tengelyre szimmetrikus 3D modellek felett is nulla jelet adnak.** Ez tekinthető **hátránynak** annyiban, hogy **érzéketlenek** ezek az elrendezések ezekre a hatókra, de **előnynek** is, amennyiben csak az ilyen szerkezetektől való eltérést detektálják, így mintegy **arra vannak kihegyezve**. Ugyanebből a tulajdonságukból akad az is, hogy **remek dimenzióindikátorok**, és a különböző elrendezések különböző dimenziójú szerkezetek kimutatására képesek, továbbá segítségükkel megadható az is, hogy egy szerkezet **mennyire 1D, 2D, vagy 3D jellegű.** Ez a vizsgálati lehetőség sajnos mindmáig kiaknázatlan.



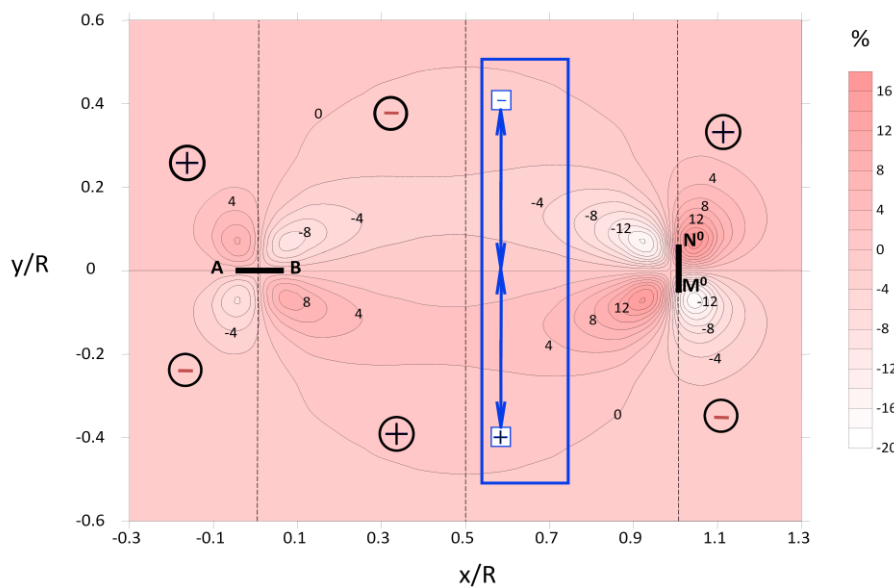
II.2.5 ábra: A paraméter-érzékenység térképek alapvető szimetriaviszonyai

2b) Hosszú inhomogenitások felett végrehajtott forgatásos mérések várható eredményének előrejelzése

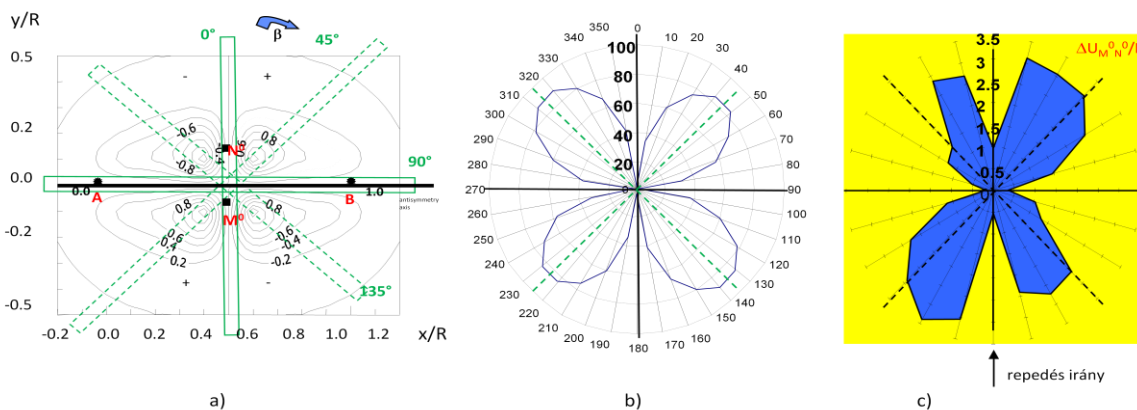
A PÉT-eket a korábban ilyen célra nem használt Schlumberger null-elrendezéssel forgatásos mérések során várható eredményének előrejelzésére használtam vertikális lemezzel modellezhető inhomogenitások fölött. A **Schlumberger null-elrendezés** (Szalai *et al.*, 2002) paraméter-érzékenység térképének **két antiszimmetria tengelye** is van: az $y/R=0$ és az $x/R=0.5$ vonalak (II.2.7a ábra). Ennek köszönhetően minden inhomogenitás (legyen az 2D, vagy 3D), ami szimmetrikus az $y/R=0$ vagy $x/R=0.5$ vonalak egyikére, érzékelhetetlen a

Schlumberger null-elrendezéssel. Ennek köszönhetően kialakítható olyan módszer, ami képes hosszan elnyúló inhomogenitások irányának meghatározására.

Elforgatva ugyanis a Schlumberger null-elrendezést annak középpontja körül a ható felett a paraméter-érzékenység nulla, amikor az elrendezés párhuzamos a hatóval, vagy merőleges rá (II.2.7a ábra). Minden más esetben viszont értéke nullától eltérő. Ily módon a ható iránya meghatározható a mért értékek sugárdiagramjából (Szalai *et al.*, 2002). Ezt a feltételezést mind analóg modellezéssel (II.2.7b ábra), mind terepi mérésekkel megerősítettük (II.2.7c ábra), jóllehet – elsősorban az utóbbi esetében – a zajoknak köszönhetően nem nulla, hanem csak jóval kisebb jeleket mértünk a vertikális lemezzel modellezhető ható csapásirányában és arra merőlegesen, mint más irányokban.

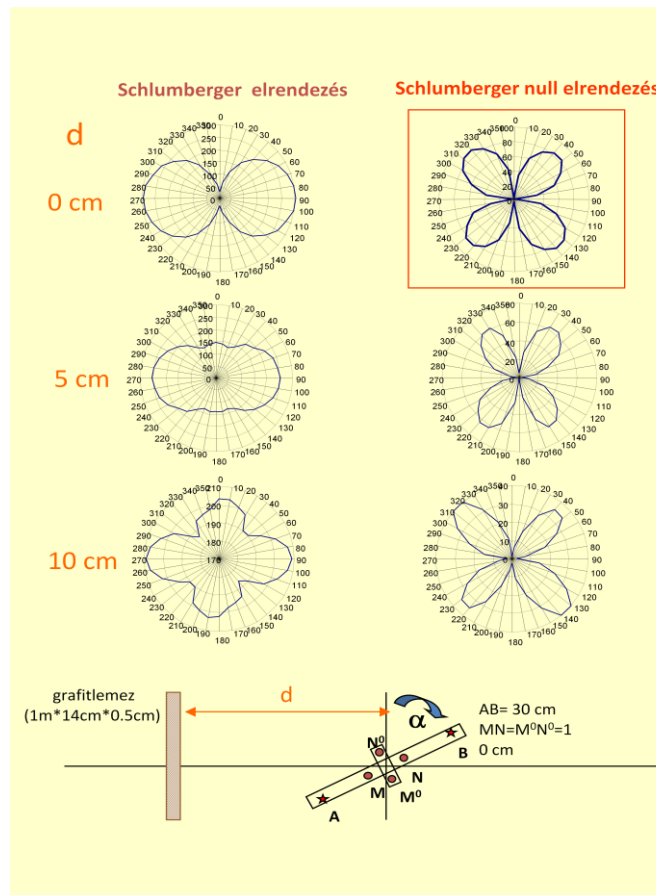


II.2.6 ábra: A dipól axiális null-elrendezés viselkedése az elrendezés vonalára szimmetrikus ható felett. A és B áram-, M^0 és N^0 potenciál-elektrodák.



II.2.7 ábra: a) A Schlumberger null-elrendezés PÉT-e a jólvezető lemez felszíni projekcióival;
b) Vertikális grafit lemez felett **analóg modellmérés** során mért sugárdiagram;
c) Agyaggal töltött repedés felett **terepen mért** sugárdiagram. A b és c ábrákon a potenciálkülönbség abszolút értéke látható

A II.2.8 ábra jobboldali oszlopa azt illusztrálja, hogy a Schlumberger null-elrendezés akkor is képes a lemez csapásirányának meghatározására, ha középpontja nem a ható felett van, tekintve hogy a sugárdiagram formája lényegesen nem változik meg. Ezzel szemben a hagyományosan erre a célra használt Schlumberger elrendezés esetében az iránymeghatározás problémássá, majd lehetetlenné válik, amint az elrendezés középpontja a hatótól távolodik (II.2.8 ábra baloldali oszlopa).

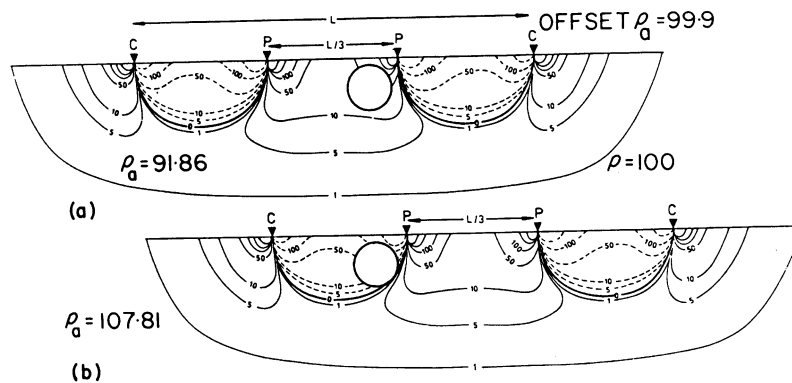


II.2.8 ábra: A Schlumberger és a Schlumberger null-elrendezésekkel analóg modellezés során vertikális grafitlemez felett mért sugárdiagramok az elrendezés középpontjának a lemez felszíni vetületétől mért távolsága (d) függvényében

3a) Az offset Wenner elrendezés (Barker, 1981)

A Wenner elrendezés esetében (II.2.3 ábra) a jel kialakításában domináns szerepet játszó elektromos dipól x-irányú és legnagyobb értékét az elrendezés közepénél veszi fel. Mélyebben fekvő hatók csak pozitív jelet produkálhatnak, de sekélyebb hatók mind pozitív, mind negatív jeleket adhatnak pozíciójuktól függően. Barker (1981) az elrendezés eme sajátosságát használta fel az offset Wenner elrendezés megalkotására a következőképpen: ugyanaz a felszínközeli ható közel hasonló nagyságú, de ellenkező előjelű jelet produkál, ha előbb mérünk egy, majd egy másik Wenner elrendezéssel, amely utóbbi az előbbihez képest a szomszédos elektródák távolságával eltolt helyzetben van (II.2.9 ábra). Ennek következtében a két elrendezéssel végrehajtott mérések eredményeinek számtani átlaga eltünteti (valójában

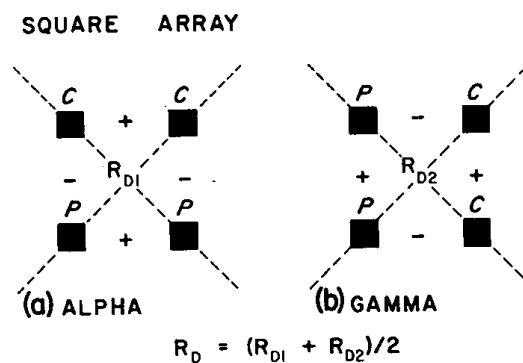
csak csökkenti) a felszíneközi zavaró inhomogenitás(ok) hatását, tisztábban megjelenítve ezzel a keresett mélyebben lévő hatókat.



II.2.9 ábra: a) A Wenner elrendezés paraméter-érzékenységének metszete egy nagy vezetőképességű kör alakú hatóval. ρ_a értéke ekkor kisebb a háttér ellenállás 100 Ωm -es értékénél. b) Az elektródák az eltolt, offset pozícióban. A kör ekkor a negatív érzékenységi zónába esik, ezáltal a látszólagos fajlagos ellenállás értéke nagyobb a háttér ellenállás értékénél. A ható jelenléte által okozott izovonal torzulásokat az ábra nem mutatja (Barker, 1981 után).

3b) Offszet négyzetes elrendezés (Barker, 1981)

A négyzetes- α és γ elrendezések esetében a pozitív és a negatív érzékenységű zónák ellentétesen helyezkednek el (II.2.10 ábra). A mérés során az α - és a γ négyzetes elrendezésekkel is mérnek, majd a mért értékek átlagát veszik (Barker, 1981).



II.2.10 ábra: A (a) négyzetes- α és a (b) négyzetes- γ elrendezések paraméter-érzékenységének sematikus képe (Barker 1981 után).

Miután láttunk néhány példát a PÉT-ek használatának lehetőségeire a továbbiakban ábrázolom az összes olyan, az II.1 fejezetben bemutatott elrendezés PÉT-ét, amelyek esetében annak számítása lehetséges.

II.2e. Az egyes elrendezések paraméter-érzékenység térképei

Elsőként 14 **egyvonalú elektróda elrendezés** paraméter-érzékenység térképeit mutatom be. A nekik megfelelő elektróda koordinátákat a II.2.1 táblázat foglalja össze. A Schlumberger és a Wenner elrendezések térképeit (II.2.2, illetve II.2.3 ábrák) már láttuk. A következőkben bemutatom még a MAN (II.2.11 ábra), a kvázi-MAN (II.2.12 ábra), a dipól ekvatoriális (II.2.13 ábra), a dipól axiális null (II.2.14 ábra) és a dipól párhuzamos 54°-os elrendezések (II.2.15 ábra) PÉT-eit. Emellett az A. mellékletben további elrendezések, úgymint az a0105 (A1 ábra), az a0304 (A2 ábra), a ght (A3 ábra), a fél-Wenner (A4 ábra), a fél-Schlumberger (A5 ábra), a két-elektrodás (A6 ábra), a Wenner- β (A7 ábra), a dipól axiális (A8 ábra), a Wenner- γ (A9 ábra), a Twin (A10 ábra), valamint **nem-egyvonalú elrendezések**, mint a négyzetes- α (A11 ábra), a négyzetes- γ (A12 ábra), a Schlumberger null (A13 ábra), a három-elektrodás null (A14 ábra) és **fókuszáló elrendezések**, mint az unipól- α (A15 ábra), az unipól- β (A16 ábra) és az unipól- γ (A17 ábra) elrendezések PÉT-jei láthatók. A nem-egyvonalú és a fókuszáló elrendezések megfelelő elektróda koordinátáit a II. 2.2 táblázat foglalja össze.

A szimmetrikus elrendezések paraméter-érzékenység térképei is **szimmetrikusak**. Az a0105- (A1 ábra az A. mellékletben), a0304- (A2 ábra), ght- (A3 ábra), fél-Wenner- (A4 ábra), fél-Schlumberger- (A5 ábra), kvázi-MAN- (II.2.12 ábra) és MAN (II.2.11 ábra) elrendezéseknek **egy szimmetria tengelye van az elektródák vonalában**. Ugyanakkor a Schlumberger- (II.2.2 ábra), a Wenner- (II.2.3 ábra), a két elektrodás- (A6 ábra), a Wenner- β - (A7 ábra), a dipól axiális- (A8 ábra), a Wenner- γ - (A9 ábra) és a Twin (A10 ábra) elrendezéseknek **két szimmetria tengelye van**. A korábban említett elrendezések közül egyedül a MAN elrendezésnek (II.2.11 ábra) van **antiszimmetria tengelye**, ami az elektródák vonalára merőleges. Ha egy elrendezésnek antiszimmetria tengelye van, akkor az minden arra szimmetrikus ható esetben nulla jelet ad, legyen az két-, vagy háromdimenziós, illetve nyilvánvalóan minden egydimenziós esetben.

Az érzékenység minden olyan elrendezés esetében **nagyon koncentrált**, ahol két elektróda közel van egymáshoz: legyen szó a két potenciál-elektrodáról (pl. a Schlumberger elrendezés a II.2.2 és a fél-Schlumberger elrendezés az A5, a dipól axiális elrendezés az A8 ábrán), vagy egy potenciál-elektroda egy áramelektrodához (a0105 az A1, ght az A3, Twin az A10, ght az A3 ábrán). Ezen elrendezések **felbontóképessége jó**. A Wenner típusú elrendezések (a Wenner- α a II.2.3, a Wenner- β az A7, a Wenner- γ az A9 és a fél-Wenner elrendezések az A4 ábrán) kisebb felbontóképességűek, viszont **megbízhatóbb** eredményeket adnak.

Néhány elrendezés **paraméter-érzékenysége erősen mélységfüggő** (pl. a dipól axiális elrendezés az A8 ábrán), míg más elrendezések esetében kevésbé gyors a változás (pl. a MAN elrendezés a II.2.11 ábrán). Általános szabály, hogy **a mélységgel az érzékenység egyre inkább elkenődik**.

Minden egyvonalú elrendezés esetében a mért jel kialakításában **az elrendezéssel párhuzamos, vízszintes irányú ellenállás-változások a döntőek**, jóllehet nagyobb mélységekben a függőleges irányú változások viszonylagosan jelentősebbekké válnak. Az ú.n. “fél” elrendezések paraméter-érzékenység térképei (pl. a fél-Schlumberger vagy a fél-

Wenner elrendezések az A5, illetve az A4 ábrákon) nagyon hasonlóak az eredeti “teljes” elrendezés paraméter-érzékenység térképeinek feléhez.

Érdemes tárgyalni azokat a pozíciókat, ahol a kis-méretű inhomogenitások **nem észlelhetők**, ahol **az érzékenység nulla**. Ezeket a helyeket szaggatott vonalak mutatják a paraméter-érzékenység térképeken. Geometriájuk tekintetében ezek a vonalak lehetnek **egyenesek** (pl. a Wenner elrendezés x komponense esetében, lásd a II.2.3 ábrát), vagy zárt görbék, pl. **kör alakúak** (pl. ugyanazon elrendezés teljes érzékenysége, lásd szintűgy a II.2.3 ábrán). Néhány elrendezés esetében ilyen null zónák egyáltalán **nem léteznek** és minden érzékenység értéknek azonos az előjele (pl. a Wenner elrendezés y komponense, II.2.3 ábra). Az egyvonalú elrendezések **fő érzékenységi zónája általában az elrendezés vonala alatt van**.

II.2.1 táblázat: Az egyvonalú elrendezések elektródáinak (R elrendezéshosszal normált) koordinátái, amiket használtam azok paraméter-érzékenység térképeinek kiszámításához

az elektródák száma	az elrendezés típusa	az elrendezés száma	az elrendezés neve	A		B		M		N	
				x	y	x	y	x	y	x	y
négy-elektrodás	egyvonalú elrendezések	1	Schlumberger	0	0	1	0	0.45	0	0.55	0
		2	Wenner- α	0	0	1	0	0.33	0	0.67	0
		3	a0105	0	0	1	0	0.1	0	0.5	0
		4	a0304	0	0	1	0	0.3	0	0.4	0
		5	ght	0	0	1	0	0.1	0	inf	0
		6	fél-Wenner	0	0	inf	0	0.5	0	1	0
		7	fél-Schlumberger	0	0	inf	0	0.9	0	1	0
		8	két-elektrodás	0	0	inf	0	1	0	inf	0
		9	Wenner- β	0	0	0.33	0	0.67	0	1	0
		10	dipól axiális	0	0	0.1	0	0.9	0	1	0
		11	Wenner- γ	0	0	0.67	0	0.33	0	1	0
		12	Twin	0	0	0.9	0	0.1	0	1	0
		13	kvázi-MAN	0	0	0.9	0	0.8	0	1	0
		14	MAN	0	0	1	0	0.5	0	inf	0

A paraméter-érzékenység térképek segítségével pl. **az áramfókuszálás hatása** is tanulmányozható. Láthatjuk, hogy míg a Wenner elrendezés (II.2.3 ábra) esetében $z/R=0.1$ mélységben határozottan az x komponens a domináns (mintegy 3-szorosa az ottani maximum érték a z komponensének), és az marad még a $z/R=0.3$ mélységben is, addig az unipól- α elrendezés (A15 ábra) esetében az x és a z értékek már a $z/R=0.1$ mélységben is összevethetők egymással. $z/R=0.3$ mélységben pedig már utóbbi a domináns, mintegy 4-szer nagyobb, mint az x komponens. **Az áramfókuszálás hatása** tehát abban nyilvánul meg, hogy **a z komponens szerepe nő a mélységgel**. Emiatt ott várom, hogy a fókuszáló elrendezések jobban használhatók legyenek a többi elrendezésnél, ahol ennek a z komponensnek a szerepe,

azaz a ható felszíni vetületének kiterjedése és alakja a fő kérdés. Így pl. talajvíz felszínén úszó olajfolt lehatárolási problémája esetén tűnik jó megoldásnak a fókuszáló elrendezések használata, de ezt az állítást még igazolni kellene. Ezzel a fentiekben a teljesség igénye nélkül néhány példát mutattam a paraméter-érzékenység térképek használatának lehetőségeire.

II.2.2 táblázat: A nem-egyvonalú és a fókuszáló elrendezések elektródáinak koordinátái, amiket használtam azok paraméter-érzékenység térképeinek kiszámításához. A * jelzés esetében a két áramelektroda egyformán forrás, vagy nyelő. A számozás a II.2.1 táblázat elemeinek folytatásaként szerepel így.

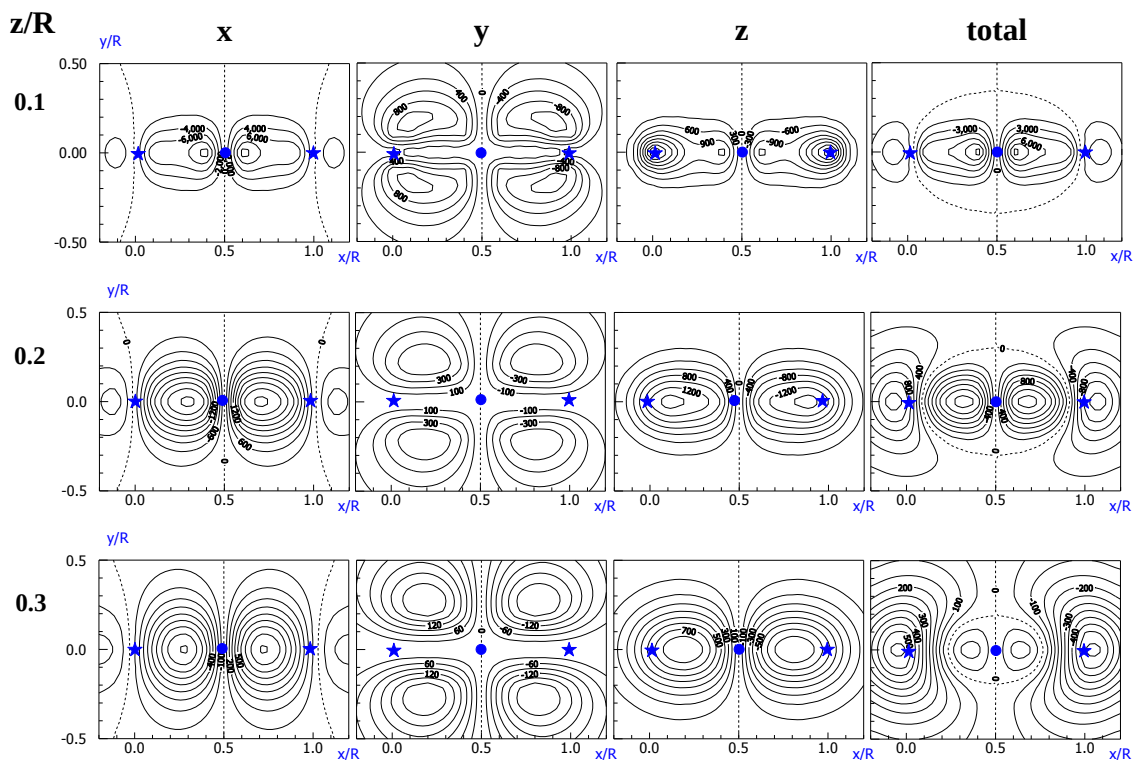
az elektródák száma	az elrendezés típusa	az elrendezés száma	az elrendezés neve	A		B		M		N	
				x	y	x	y	x	y	x	y
négy-elektrodás	nem-egyvonalú elrendezések	15	dipól ekvatoriális	0	0.05	0	-0.05	1	0.05	1	-0.05
		16	dipól axiális null	0	0	0.1	0	1	0.05	1	-0.05
		17	párhuzamos dipól 54°	0	0	0.0058	-0.0081	1	0	1.0058	-0.0081
		18	négyzetes- α	0.2	-0.3	0.8	-0.3	0.2	0.3	0.8	0.3
		19	négyzetes- γ	0	0	1	0	0.5	0.5	0.5	-0.5
		20	Schlumberger null	0	0	1	0	0.5	0.125	0.5	-0.125
több mint négy elektródás	egyvonalú elrendezések	21	három-elektrodás null	0	0	inf	0	1	0.125	1	-0.125
		22	unipól- α	0	0	1*	0	0.33	0	0.67	0
		23	unipól- β	0	0	0.33*	0	0.67	0	1	0
		24	unipól- γ	0	0	0.67*	0	0.33	0	1	0

A II.2.13-15, valamint az A11-14 ábrák hét **nem-egyvonalú**, az A15-17 ábrák három **fókuszáló elrendezés paraméter-érzékenység térképeit** mutatják. A nekik megfelelő elektróda koordinátákat a II.2.2. táblázat foglalja össze. Az II.2.13 ábra a dipól ekvatoriális elrendezés paraméter-érzékenység térképeit mutatja. Ezeknek a numerikusan számított értékeit Hursán (1996) mutatta be a teljes kockára vonatkozóan. További két nem-egyvonalú dipól elrendezés paraméter-érzékenység térképei láthatóak: az II.2.14 ábrán a dipól axiális null-elrendezése (Szalai et al. 2002), az II.2.15 ábrán az 54°-os párhuzamos dipól elrendezése (Szalai, 1993). Az A11 és A12 ábrák a négyzetes elrendezés két változatának a paraméter-érzékenység térképeit ábrázolják. Az A13 és A14 ábrákon a Szalai et al. (2002) cikkben bevezetett két elrendezés, a Schlumberger null-, és a három-elektrodás null-elrendezések paraméter-érzékenység térképei szerepelnek. Három fókuszáló elrendezés, az unipól- α , az

unipól- β és az unipól- γ elrendezések paraméter-érzékenység térképeit pedig az A15-17 ábrák mutatják.

A nem-gradiens típusú nem-egyvonalú négyzetes elrendezések (A11 és A12 ábrák) és a két dipól-dipól elrendezés esetében (II.2.13 és II.2.15 ábrák) **az y komponens szerepe jelentősebbé válik**, sőt akár jelentősebb is lehet, mint az x komponensé. A fókuszáló elrendezések esetében **a z komponens szerepe lesz egyre nagyobb** a mélységgel.

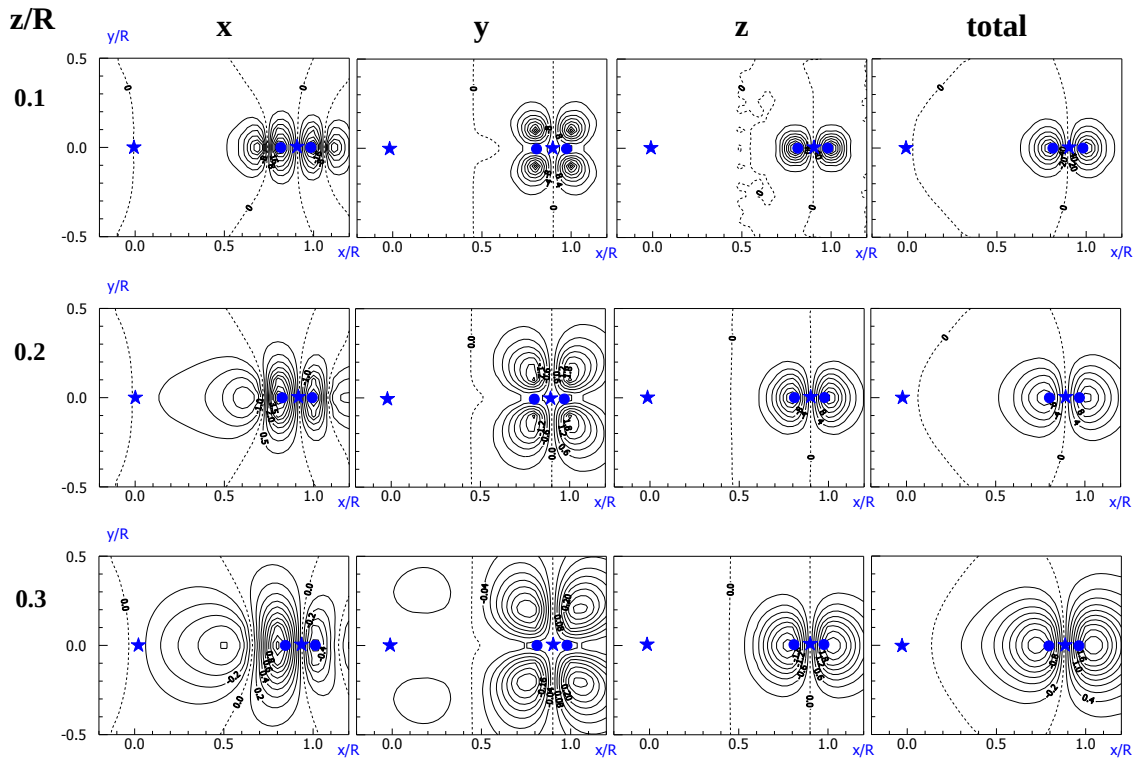
Az unipól elrendezéseknek (A15-17 ábrák) **egy szimmetria tengelyük** van, míg a dipól ekvatoriális- (II.2.13 ábra), és a négyzetes- α (A11 ábra) elrendezéseknek **kettő**. Amíg a dipól axiális null- (II.2.14 ábra), a három-elektrodás null- (A14 ábra) és az unipól- α (A15 ábra) elrendezéseknek **egy antiszimmetria tengelye**, addig a négyzetes- γ (A12 ábra) és a Schlumberger null (A13 ábra) elrendezéseknek **két antiszimmetria tengelye** is van.



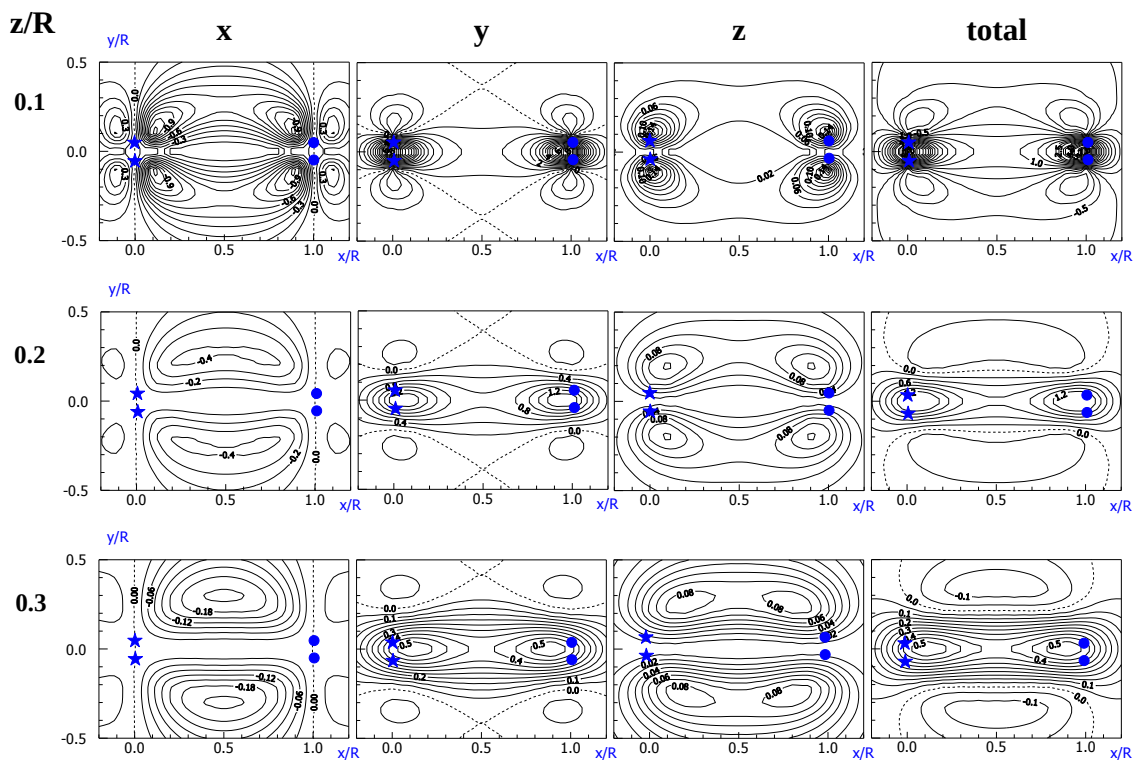
II.2.11 ábra: A MAN (középpontos-null) elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 14. elrendezés az II.2.1 táblázatban). Jelmagyarázatért lásd a II.2.2 ábrát.

II 2f. Konklúziók a paraméter-érzékenységi vizsgálatokból

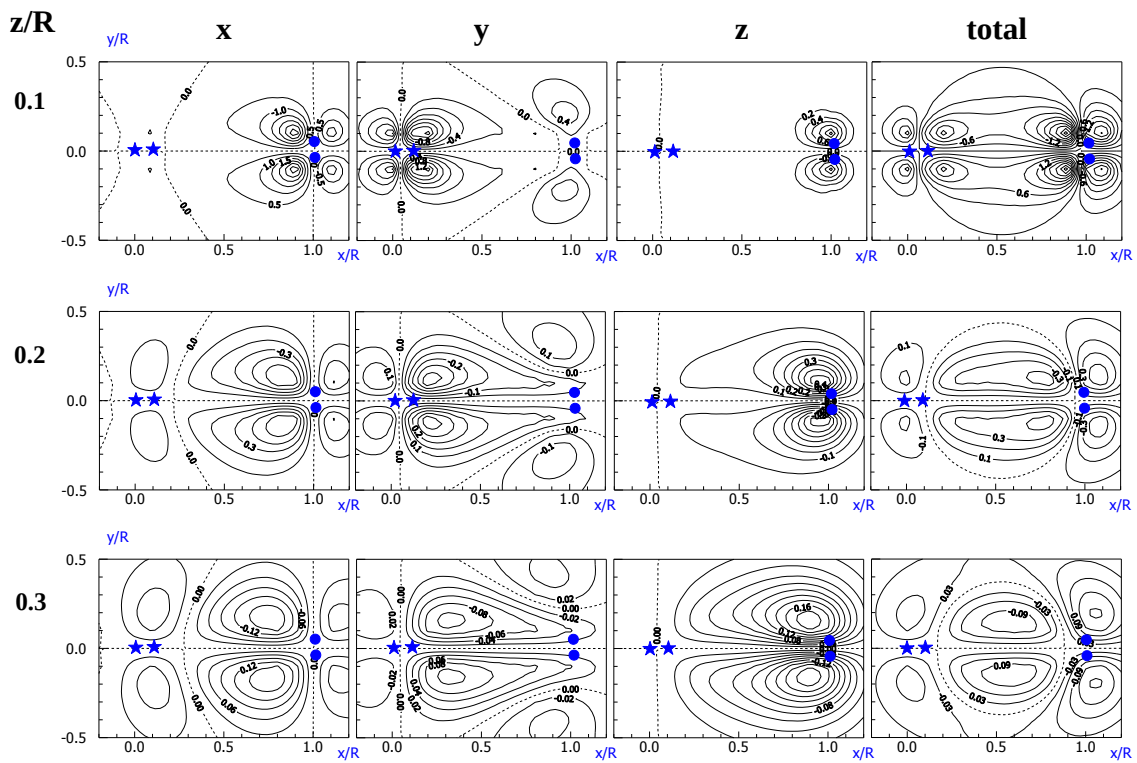
A fejezetben felszíni geoelektromos elrendezések paraméter-érzékenység térképeit mutattam be, amiket egy analitikus formula segítségével kaptam. Ily módon a különböző elrendezések paraméter-érzékenység értékei közvetlenül összevethetőek egymással. Bemutattam a PÉT-ek fő paramétereit, valamint megmutattam, hogyan érhető meg jobban a különböző elrendezések viselkedése paraméter-érzékenység térképeik segítségével, illetve hogyan lehet új elrendezéseket konstruálni azok segítségével.



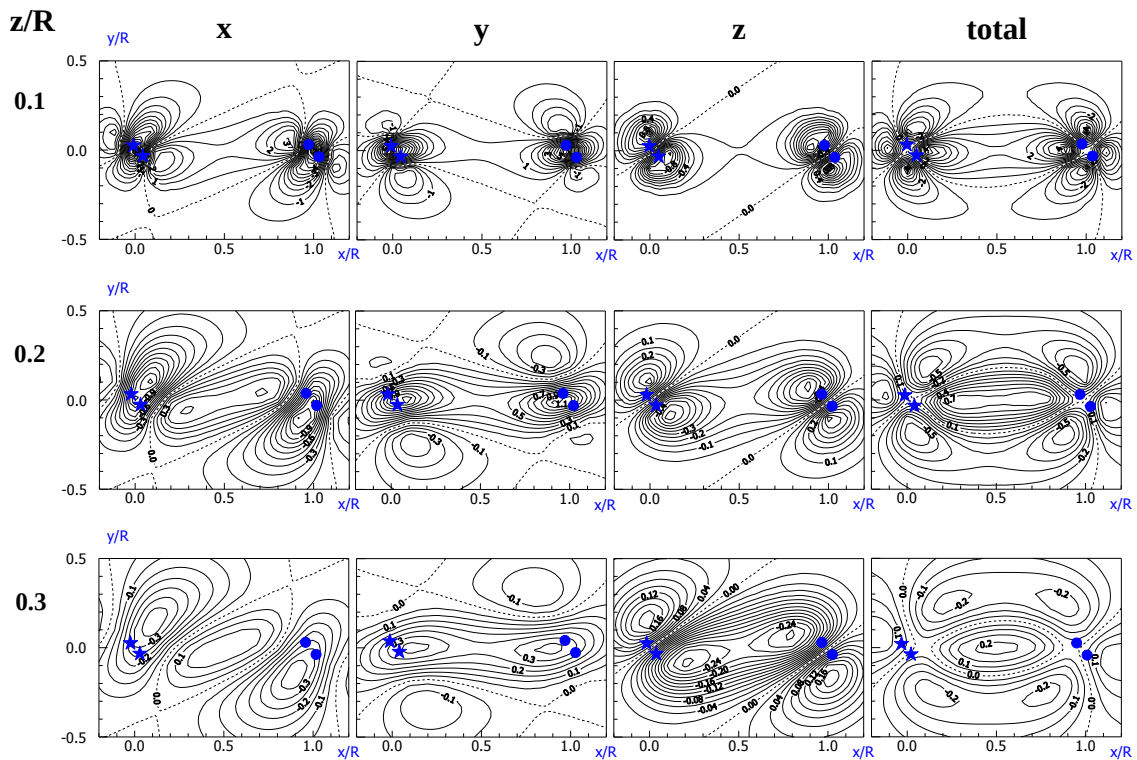
II.2.12 ábra: A kvázi-MAN elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 13. elrendezés az II.2.1 táblázatban). Jelmagyarázatért lásd a II.2.2 ábrát.



II.2.13 ábra: A dipól ekvatoriális elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 15. elrendezés a II.2.2 táblázatban). Jelmagyarázatért lásd a II.2.2 ábrát.



II.2.14 ábra: A dipól axiális null-elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 16. elrendezés a II.2.2 táblázatban). Jelmagyarázatért lásd a II.2.2 ábrát.



II.2.15 ábra: A dipól ekvatoriális 54° elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 17. elrendezés a II.2.2 táblázatban). Jelmagyarázatért lásd a II.2.2 ábrát.

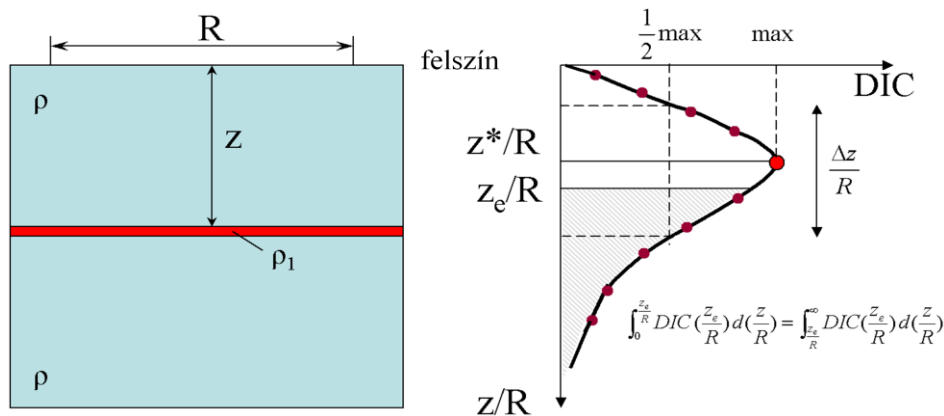
II.3. Kutatási mélység

Szalai et al. (2009b) alapján

II.3a. Bevezetés

Az egyenáramú geoelektromos elrendezések kutatási mélysége mindig is a szakemberek érdeklődésének fókuszában volt (pl. *Knödel et al., 1997*). Már a geoelektromos módszerek kutatásának kezdete óta több definíciót is javasoltak a mélység meghatározására (lásd *Barker, 1989* összefoglaló művét).

Jóllehet léteznek komplex és többdimenziós megközelítések is, ahol a kutatási mélység modellfüggő (pl. *Oldenburg és Li 1999*), még napjainkban is a Normált Mélységérzékenység Karakterisztika (NMK) függvény alapján számított kutatási mélység értékek a legelfogadottabbak. Ezeket egy nagyon egyszerű modell alapján szokás számítani: egy homogén, izotróp közegbe helyezett vízszintes, homogén vékonyréteg modell hatását számítják különböző mélységekre. *Roy és Apparao (1971, Eyjén 1938)* munkájára alapozva a kutatási mélységet azon mélységként definiálta, ahol adott elrendezése NMK függvénye felveszi a maximum értékét. *Edwards (1977)* ugyanezt a függvényt használta definíciója alapjául, de ő a függvény mediánjának mélységét tekintette a kutatási mélység értékének. (Ez annyit jelent, hogy ez alatt a mélység fölött és alatt az NMK függvény integráljának értéke megegyezik.) *Edwards (1977)* szerint ez a megközelítés jobban egyezik a terepi tapasztalatokkal. A II.3.1 ábra mindkét definíciót illusztrálja.



II.3.1 ábra: A mélységérzékenység karakterisztika (DIC, magyarul MK) számításának elvi ábrája: R – az elrendezés hossza, z – a vékonyréteg változó mélységértéke, z^*/R – a kutatási mélység a maximum alapján (*Roy és Apparao 1971*), z_e/R a kutatási mélység a középérték alapján (*Edwards, 1977*)

Roy és Apparao (1971) a kutatási mélység értékeket a pól-pól, az axiális-, és ekvatoriális dipól, a párhuzamos-, merőleges-, sugár-, és érintőirányú dipól elrendezések (ahol a dipólok egymással bezárt szöge 45° volt, lásd a II.3.2 ábrát), valamint a Schlumberger, a Wenner- α , a módosított unipól és két felszíni laterológ elrendezés esetére számította. *Roy (1972)* az α -, β -, és γ -típusú elrendezések (többek között a Wenner- β , a Wenner- γ és a fél-Wenner- α) és speciális dipól elrendezések, *Bhattacharya és Dutta (1982)* pedig a gradiens elrendezések kutatási mélység értékeit számította. A median alapján egyedül *Edwards (1977)* számított KM értéket néhány egyvonalú és a dipól ekvatoriális elrendezésre.

A legtöbb felszíni elektróda-elrendezésre azonban korábban nem számítottak **kutatási mélység értéket**, holott az **alapvető sajátosságuk**, ami **összehasonlításukat is egyszerű módon lehetővé teszi**. Ennek a hiánynak a pótlására ebben a fejezetben a MK függvények számításának módját tetszőleges felszíni elektróda elrendezés esetére és az ez alapján számított kutatási mélységeket mutatom be előbb dipól-dipól, majd nem-dipól elrendezések esetére. Minden olyan - **mintegy harminc - elrendezés kutatási mélység értékét kiszámítottam, amelyek esetében az egyáltalán lehetséges volt**. A dipól elrendezéseket itt nem tárgyalom részletesen, mert arra már PhD értekezésemben sor került. A későbbiek miatt azonban meg kell említenem, hogy egy speciális szögtartományban a párhuzamos dipól elrendezések kutatási mélysége akár jóval nagyobb lehet, mint akár a pól-pól (PP) elrendezése, amely a legnagyobb kutatási mélység értékű a nem-dipól elrendezések között. A PP elrendezések kutatási mélység értékei meghaladják a fókuszáló elrendezésekeit is. Az elrendezések kutatási mélység értékei egyfajta **ököl szabályként** használhatóak a gyakorlatban.

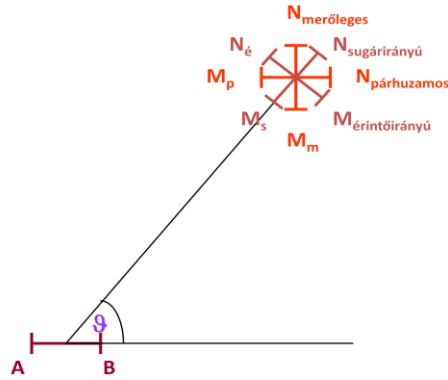
II.3b. Módszer

A kutatási mélység értékeket a *II. 1. fejezetben* bemutatott azon elrendezések közül azok esetére számítottam, amelyeknél az lehetséges. Sem az összetett (IV., VI., VII., VIII csoportok, *II.1.2 ábra*), sem a vegyes (vegyes csoport, *II.1.11 ábra*) elrendezések esetében ilyen érték nem számítható, mivel mindkét csoportban több egyedi mérés eredménye az értelmezendő érték, melyek különböző kutatási mélység értékkel rendelkeznek. MK függvények nem számíthatóak a legtöbb null-elrendezés esetére sem, pontosabban azon null-elrendezések esetére, amelyek PÉT-e antiszimmetria tengellyel rendelkezik, mert ezek esetében a vízszintes lemez hatása, annak mélységétől függetlenül, nulla. Összességében így a többi, mintegy harminc elrendezés kutatási mélység értékét adtam meg.

A dipól elrendezések MK görbéinek számítása *Szalai és Szarka (2000)* cikkében található. A nem-dipól elrendezések, azaz minden más elrendezés esetére hasonló megoldást vezettem le, ami a *II.3A Függelékben* található. Ahol lehetséges az NMK-t, azaz a normált mélység-érzékenység karakterisztika függvényt számítottam, ami a kutatási mélység értékét nem befolyásolja, csak egy konstanssal (ugyanazon elrendezés homogén féltér felett mért értékével) való normálást jelent. Olyan elrendezések esetében azonban, ahol a normáló faktor nulla lenne, az MK függvényt ábrázoltam.

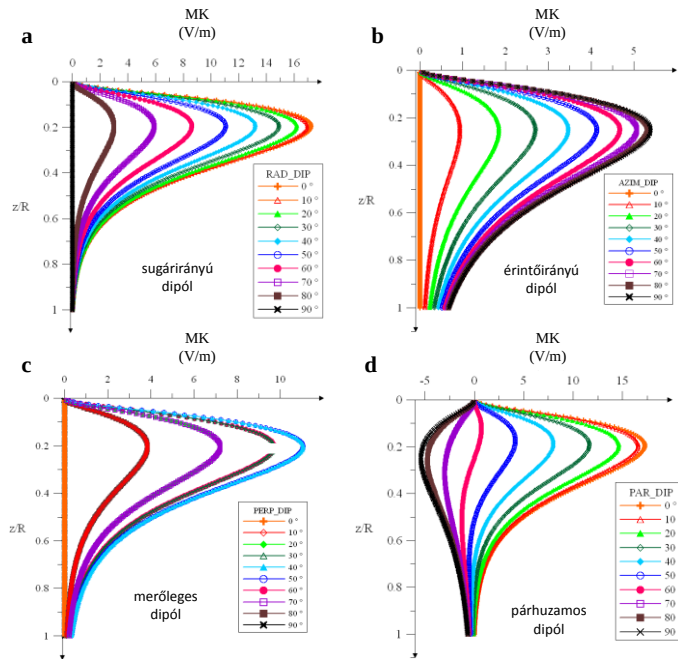
II.3c. A DP elrendezések kutatási mélysége

A DP elrendezések esetében különös figyelmet kell fordítani a ϑ szög hatására. Sugárirányú-, érintőirányú-, merőleges-, és párhuzamos DP elrendezések MK függvényét számítottam a $0^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$ intervallumra (*II.3.2 ábra*). Az eredmények a *II.3.3 ábrán* láthatóak.



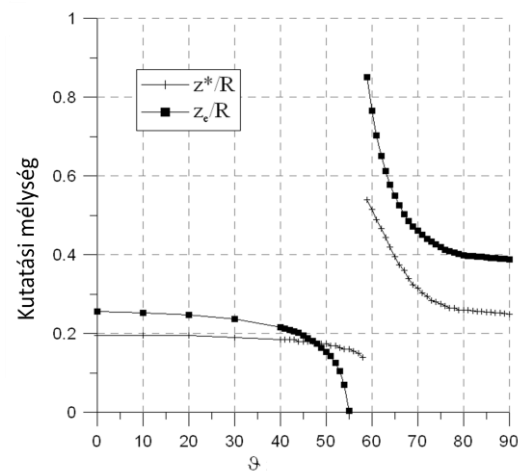
II.3.2 ábra: A vizsgált dipól elrendezések: sugárirányú-, érintőirányú, merőleges, párhuzamos

A II.3.3 ábrából evidens, hogy az első három csoport (a,b,c) esetében a csoporton belül a MK függvény hasonló. A kutatási mélység értéke alig függ ϑ -tól. A merőleges DP elrendezés Kutatási Mélység (KuM) értéke hozzávetőleg $z^*/R=0.20$ ($z_e/R=0.29$), a sugárirányú elrendezéseké mintegy $z^*/R=0.19$ ($z_e/R=0.26$), míg az érintőirányúaké $z^*/R=0.25$ ($z_e/R=0.39$), ahogy az az II.3.1 táblázatból is látható.



II.3.3 ábra: A dipól elrendezések MK (DIC) függvényei. a) sugárirányú-, b) érintőirányú-, c) merőleges-, d) párhuzamos dipól elrendezések

A **párhuzamos DP elrendezések** azonban **máshogy viselkednek**. Kutatási mélységük közel állandó, de egymástól különböző a $0^\circ \leq \vartheta \leq 40^\circ$, illetve a $80^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$ tartományokban. A köztük lévő $40^\circ < \vartheta < 80^\circ$ tartományban azonban **drasztikus, nem-monoton átmenet** figyelhető meg, ahogy az a II.3.4 ábrán, illetve az II.3.1 táblázatban is látható. A kutatási mélység $\vartheta=59^\circ$ -nál pl. már jelentős: $z^*/R=0.54$ és $z_e/R=0.85$.



II.3.4 ábra: A párhuzamos dipól elrendezések z_e és z^* kutatási mélység értékei ϑ függvényében.

A dipól-axiális null-elrendezés esetében (ami négy esetben is előkerül, mint sugárirányú-, érintőirányú-, és merőleges elrendezés meghatározott szögek esetében, ahogy az II.3.1 táblázatban látható) nem számítható az NMK függvény.

II.3.1 táblázat: A sugár- és, érintőirányú-, illetve a merőleges-, és párhuzamos dipól elrendezések Roy és Apparao (z^*/R) és Edwards (z_e/R) féle kutatási mélység értékei a dipólok ϑ szögének függvényében.

elrendezések	elrendezések jellegzetes KuM értékkel axiális- ekvatoriális- típusú		instabil KuM értékű elrendezések	KuM érték nélküli elrendezések
elrendezés helyzete	- sugárirányú elrendezés (ha $\vartheta \neq 90^\circ$) - merőleges elrendezés (ha $\vartheta \neq 0^\circ$ és $\vartheta \neq 90^\circ$) - párhuzamos elrendezés, ha ($0^\circ \leq \vartheta \leq 40^\circ$)	- érintőirányú elrendezés (ha $\vartheta \neq 0^\circ$) - párhuzamos elrendezés, ha ($\vartheta \geq 80^\circ$)	- párhuzamos elrendezés, ha $40^\circ < \vartheta < 80^\circ$	dipól axiális null-elrendezés, azaz: - sugárirányú elrendezés $\vartheta=90^\circ$ -nál - érintőirányú elrendezés $\vartheta=0^\circ$ -nál - merőleges elrendezés $\vartheta=0^\circ$ -nál - merőleges elrendezés $\vartheta=90^\circ$ -nál
z^*/R	0.19 – 0.20	0.25 – 0.26	erősen változó	---
z_e/R	0.24 – 0.26	0.38 – 0.39	erősen változó	---

II.3c. Minden más (nem-DP) elrendezés kutatási mélysége

Tetszőleges geoelektromos elrendezés kutatási mélység értéke számítható a II-14 képlet segítségével és figyelembe véve, hogy adott mélységben lévő vízszintes vékonyréteg geoelektromos válasza nem más, mint az elemi kocka vízszintes oldalpárjára vett integrált hatás:

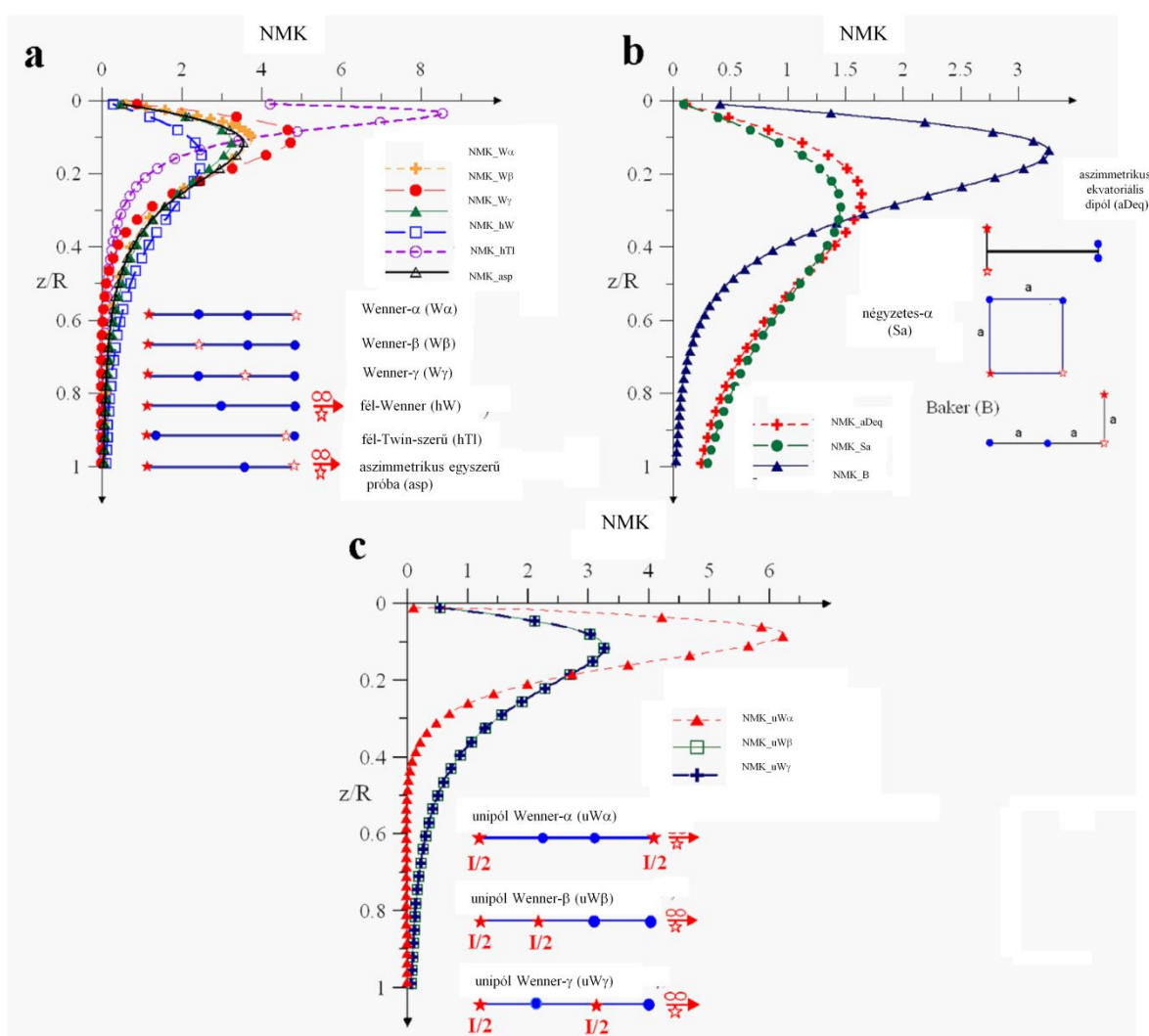
$$DIC(z_c) = \frac{100}{\pi} \frac{1}{G_{hom}} ka^3 \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} G^{cube} dx_c dy_c$$

(II-15)

DIC a Depth of Investigation Characteristic function, azaz a **Kutatási Mélység Karakterisztika függvény** rövidítése, amely tehát a vízszintes vékonyréteg hatását adja meg

mélységének függvényében. Mind a vékonyréteg, mind pedig a befoglaló közeg homogénnek és izotrópnak feltételezett.

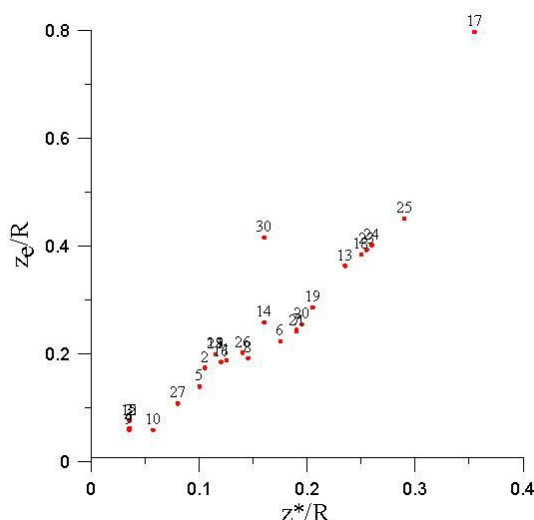
Példaként az II.3.5 ábrán néhány **egyvonalú elrendezés** (II.3.5a ábra), néhány **nem-egyvonalú elrendezés**, úgymint az aszimmetrikus ekvatoriális dipól-, a négyzetes- α és a Baker elrendezések (II.3.5b ábra), valamint három **fókuszált elrendezés**: az unipól- α , az unipól- β és az unipól- γ elrendezések (II.3.5c ábra) **normált mélység-érzékenység karakterisztika függvényeit** mutatom be. (Ilyen normált mélység-érzékenység függvény – ahol a homogén feltér felett mért értékkel normalunk – nem volt megadható a DP elrendezések esetében, mivel a dipól axiális null-elrendezés miatt több esetben is nullával kellett volna normalnunk.) A nem-dipól elrendezések kutatási mélység értékeit a II.3.2 táblázatban listáztam, együtt a DP elrendezésekéivel.



II.3.5 ábra: Néhány nem-dipól elrendezés KM függvényei. a) egyvonalú elrendezések (2, 5, 11, 14, 15, és 16 számmal a II.3.2 táblázatban). b) nem-egyvonalú elrendezések (24, 25 és 26 számmal a II.3.2 táblázatban). c) fókuszáló elrendezések (27, 28 és 29 számmal a II.3.2 táblázatban)

II.3d. Az eredmények tárgyalása

A II.3.2 táblázat az összes felszíni elektróda elrendezés kutatási mélység értékeit tartalmazza. A MK függvények aszimmetrikus voltának köszönhetően az Edwards (1977) és a Roy és Apparao (1971)-féle kutatási mélység értékek között szisztematikus eltérés van, amint azt a II.3.6 ábra is mutatja. Az összes, a II.3.2 táblázatban szereplő elrendezés kétféle kutatási mélység értékeit figyelembe véve a z_e/z^* arányra 1.65 ± 0.37 átlag adódott. Ha eltávolítjuk a két nyilvánvaló renitenst (a pól-pól és a módosított unipól elrendezéseket, amelyek esetében az MK függvény aszimmetrikusabb, mint a többi elrendezés esetében) a jellemző z_e/z^* arány 1.59 ± 0.31 . A két kutatási mélység érték között tehát jó becslés a lineáris összefüggés.



II.3.6 ábra: A z_e/z^* arányok minden elrendezésre közel azonosak: közel 1.67 ± 0.37 értékűek. (A legnagyobb az arány a pól-pól elrendezés esetében). A két kiugró értéket eltávolítva az arány 1.59 ± 0.31 .

A II.3.2 táblázatból látható, hogy a négyelektródás egyvonalú elrendezések közül a legnagyobb kutatási mélység értékkel a dipól axiális elrendezés bír: $z^*/R=0.19$. A Schlumberger esetében ez az érték 0.125, a Wenner- α elrendezés esetében 0.105, a Wenner- β esetében pedig mindössze 0.1, hogyha csak az ismert és a sokelektródás rendszerekben gyakran alkalmazott elrendezéseket tekintjük. Kiszámítva az általunk bevezetett γ_{11n} elrendezések kutatási mélység értékeit is azok értéke $n=1, 2, 3, 4, 6$ és 8 esetre sorra: 0.115, 0.16, 0.185, 0.215, 0.218 és 0.22. $n=4$ felett tehát a γ_{11n} elrendezések kutatási mélység értéke nagyobb, mint a legjobb egyéb egyvonalú négyelektródás elrendezése. Ráadásul tovább közelítve a MAN elrendezés geometriája felé ($n=98$) ez az érték: 0.245. Elmondhatjuk tehát, hogy a γ_{11n} elrendezések nagyobb n értékek esetén konzekvensen jelentősen nagyobb kutatási mélység értékkel rendelkeznek, mint a legtöbb hagyományos négyelektródás egyvonalú elrendezés, de még az azok közül a legjobb értékkel rendelkező dipól axiális elrendezésénél is jobbnak bizonyultak, amennyiben n értéke meghaladta a 4-et.

II.3.2 táblázat: A felszíni elektroda elrendezések z^*/R és z_e/R kutatási mélység értékei az A, B, M és N elektródák (x,y) pozícióival. $\alpha 10$, $\beta 45$, $\gamma 45$, $\gamma 40$, és $\gamma 10$ az elrendezés típusára (α, β, γ) és az elektródák helyzetére utalnak (lásd II.1.3 ábra). Vastagon szedve azon elrendezések kutatási mélység értékei, amelyeket újonnan számítottam. A fókuszáló elrendezés esetében a * karakter azonos előjelre utal.

	No.	Elrendezés neve	z^*/R	z_e/R	x_A	y_A	x_B	y_B	x_M	y_M	x_N	y_N
nem fókuszált vonalelrendezés	α -típusú	1 Schlumberger ($\alpha 45$)	0,125	0,19	0	0	1	0	0,45	0	0,55	0
		2 Wenner ($\alpha 33$)	0,105	0,175	0	0	1	0	0,333	0	0,666	0
		3 $\alpha 10$	0,035	0,075	0	0	1	0	0,1	0	0,9	0
	β -típusú	4 $\beta 45$	0,035	0,06	0	0	0,45	0	0,55	0	1	0
		5 Wenner- β ($\beta 33$)	0,1	0,14	0	0	0,333	0	0,666	0	1	0
		6 $\beta 10$	0,175	0,225	0	0	0,1	0	0,9	0	1	0
		7 dipól axialis ($\beta 20$)	0,19	0,245	0	0	0,02	0	0,98	0	1	0
		8 aszimmetrikus dipól axialis ($\beta 10$)	0,145	0,19	0	0	0,1	0	0,7	0	1	0
	γ -típusú	9 $\gamma 45$	0,035	0,06	0	0	0,55	0	0,45	0	1	0
		10 $\gamma 40$	0,057	0,06	0	0	0,6	0	0,4	0	1	0
		11 Wenner- γ ($\gamma 33$)	0,115	0,2	0	0	0,666	0	0,333	0	1	0
		12 $\gamma 10$	0,035	0,075	0	0	0,9	0	0,1	0	1	0
	háromelektrodás	13 pól-dipól	0,235	0,365	0	0	100	0	0,9	0	1	0
		14 fél-Wenner	0,16	0,26	0	0	100	0	0,5	0	1	0
		15 fél twin-szerű	0,035	0,075	0	0	100	0	0,1	0	1	0
		16 aszimmetrikus egyszerű szondázás	0,12	0,185	0	0	1	0	0,6	0	100	0
		17 pól-pól	0,355	0,8	0	0	-100	0	1	0	100	0
nem fókuszált nem vonalelrendezés	dipól-dipól	18 azimutális dipól $0^\circ < \vartheta \leq 90^\circ$	0,25	0,385								
		19 merőleges dipól $0^\circ < \vartheta < 90^\circ$	0,205	0,285								
		20 radiális dipól $0^\circ \leq \vartheta < 90^\circ$	0,195	0,255								
		21 párhuzamos dipól $0^\circ \leq \vartheta \leq 40^\circ$	~0,19	~0,24								
		22 párhuzamos dipól $40^\circ < \vartheta < 80^\circ$	instabil	instabil								
		23 párhuzamos dipól $80^\circ \leq \vartheta \leq 90^\circ$	~0,255	~0,395								
	nem-dipól	24 aszimmetrikus ekvatoriális bipól	0,26	0,4	0	0,1	0	-0,1	1	0,3	1	-0,3
		25 négyzetes- α	0,29	0,45	0	0	1	0	0	1	1	1
		26 Baker	0,14	0,2	0	0	0,5	0	1	0	1	0,5
fókuszált		27 unipól Wenner- α	0,08	0,11	0	0	1*	0	0,333	0	0,666	0
		28 unipól Wenner- β	0,115	0,2	0	0	0,333	0	0,666	0	1*	0
		29 unipól Wenner- γ	0,115	0,2	0	0	0,666	0	0,333	0	1*	0
		30 módosított unipól	0,16	0,415	0	0	1*	0	0,5	0	100	0

II.3e. Konklúziók

Ebben a fejezetben a különböző felszíni elektróda elrendezések kutatási mélységének kérdését tárgyaltam egydimenziós megközelítésben. Ugyan ez a kérdésnek meglehetősen egyszerű megközelítése, de mindmáig ez a leginkább elfogadott.

A mélység-érzékenység karakterisztika függvény és ennek segítségével a kutatási mélység értékek számításához **levezettem egy analitikus formulát különböző egyvonalú-, nem-egyvonalú és fókuszáló elrendezésekre és bemutattam minden olyan elrendezés esetére mind a (Roy és Apparao 1971), mind pedig az Edwards (1977)-féle értékeket, amelyek számára azok számítása lehetséges.** A kutatási mélység érték egy egyszerű, de hasznos paraméter a geoelektromos elrendezések szisztematikus jellemzésére.

A leggyakrabban alkalmazott DP elrendezések mélység-érzékenység karakterisztika függvényeit a dipólok szögének függvényében ábrázoltam. A párhuzamos DP elrendezésektől eltekintve mindhárom DP elrendezés csoport, a sugár- és, érintőirányú, illetve a merőleges DP elrendezések csoportja esetében a kutatási mélység egy konkrét, a szögtől független, specifikus érték. A kimutathatósági értékek alapján a DP elrendezések két csoportot alkotnak: (1) az axiális-szerű és az (2) ekvatoriális-szerű elrendezéseket.

Az Edwards (1977)-féle kutatási mélység értékek szisztematikusan nagyobbak, mint a Roy és Apparao (1971) féle értékek. A kiugró értékek kivételével a két érték arányára 1.59 ± 0.31 adódott, ami a KM függvények aszimmetriájára is utal.

Figyelemre méltó, hogy a pól-pól elrendezés kutatási mélysége sokkal nagyobb, mint a fókuszáló elrendezéseké. A legnagyobb kutatási mélység értékekkel azonban azok a párhuzamos DP elrendezések rendelkeznek, amelyek a null-elrendezés közeli geometriájú helyzetben vannak. Ezek az eredmények elég meglepőek, ahogy az sem evidens, hogy a fókuszálás sem tűnik olyan hatékornak, amint azt szokás gondolni. **A γ_{11n} kvázi null-elrendezések pedig nagyobb n értékek esetén konzekvensen jelentősen nagyobb kutatási mélység értékkel rendelkeznek, mint a legtöbb hagyományos négyelektródás egyvonalú elrendezés, de még az azok közül a legjobb értékkel rendelkező dipól axiális elrendezésénél is jobbnak bizonyultak, amennyiben n értéke meghaladta a 4-et.**

A II.3.2 táblázat teljes listája a különböző felszíni elektróda elrendezések kutatási mélység értékeivel lehetővé teszi azok egyszerű összevetését és egy egyszerű ökölszabály alkalmazását a gyakorlati használatban.

II.4. Kimutathatósági mélység

Szalai et al. (2011) és Szalai et al. (2014a) alapján

Jóllehet a *II.3 fejezetben* bemutatott kutatási mélység definíció széles körben elfogadott, **szükségesnek láttam** mellette **egy másik**, az információszerzés mélységével kapcsolatos **definíció bevezetését is**. Ennek **három alapvető oka** az, hogy: **1. a kutatási mélység (KuM) definíció alapvetően 1D, míg napjainkban leginkább 2D méréseket végzünk; 2. a KuM egy adott geoelektromos elrendezésre vonatkozik, míg a 2D mérések során különböző paraméterekkel rendelkező elrendezések is lehetnek a mérési konfigurációban** (pl. különböző dipóltávolságú, de azonos dipólhosszúságú DP elrendezések), sőt akár különböző elrendezéseket is elegyíthetünk egy sokelektrodás konfiguráción belül; **3. A MK függvények teljesen ellaposodhatnak** bizonyos elrendezések esetében, így hiába lenne esetleg viszonylag nagy azok kutatási mélység értéke, az **nem feltétlenül realizálható a gyakorlatban**, mivel akár a maximumnál mért érték is a zajszint alatt lehet.

Az új definíció mindhárom fenti hiányosságot képes kezelni: **1. 2D definíció; 2. bármilyen 2D elektróda konfigurációra alkalmazható; 3. magába foglalja a zajt is, sőt az a definíció alapvető paramétere. A kimutathatósági mélységnek (KimM) nevezett értéket azon mélységként definiáltam, amely mélységből adott zajszint mellett adott inhomogenitás még kimutatható az adott 2D elektróda konfigurációval. Természetesen ez a definíció 3D-re is általánosítható.**

A KimM hátránya a **Kutatási mélységgel (KuM) szemben** az, hogy amíg a **KuM egyetlen értékkel kifejezhető**, így nagyon könnyen kezelhető, és a különböző elrendezések egyszerű összevetését teszi lehetővé, addig a **KimM érték modell-, és zajfüggő**, tehát a különböző elektróda konfigurációk összevetése nehezebb. Már most megjegyzem azonban, hogy mivel **prizma modellekből minden bonyolultabb modell összerakhatóm az nagyon jó alapot szolgáltat minden összevetéshez**. Igaz ez még akkor is, ha a prizma hatása nem összegezhető egyszerűen, ahogy ezt 3D térfogatelemek esetére *Szalai és Szarka (2000)* megmutatta. A **KimM definíció létjogosultságát a II.5 és IV. fejezetek is bizonyítják majd**, mikor az invertált kép is az e definíció által várt eredményt szolgáltatja. Fontos az is, hogy **ez a definíció ad egy korlátot az információszerzés maximális mélységére**, amire a KuM nem volt képes.

A KimM értékeket **numerikus úton határoztam meg**: 5%-os, illetve 10%-os zajszintet feltételezve vizsgáltam, hogy a homogén féltérbe helyezett adott elektromos ellenállású és geometriával leírható ható milyen maximális mélységből mutatható még ki, azaz milyen maximális mélységben haladja még meg az adott hatóra előremodellezéssel számított érték a zajjal megterhelt homogén féltér értéket egy adott felszíni geoelektromos konfiguráció esetében. Első lépésben 6 különböző hagyományos elrendezésre számítottam a KimM értékeket az említett 5% és 10% zajszint mellett 3 modell, prizma, függőleges lemez és vízszintes lemez modellek esetére, melyek mindegyike nagy-, illetve kis ellenállásúnak tekintett is volt. A későbbiekben kiszámítottam egy, a hagyományos négyelektrodás elrendezésekből egy optimalizálási eljárással meghatározott konfiguráció, a Stummer elrendezés (*Stummer et al., 2004*), valamint a γ_{11n} ($n=1-6$) elrendezések és három további elrendezés KimM értékeit is.

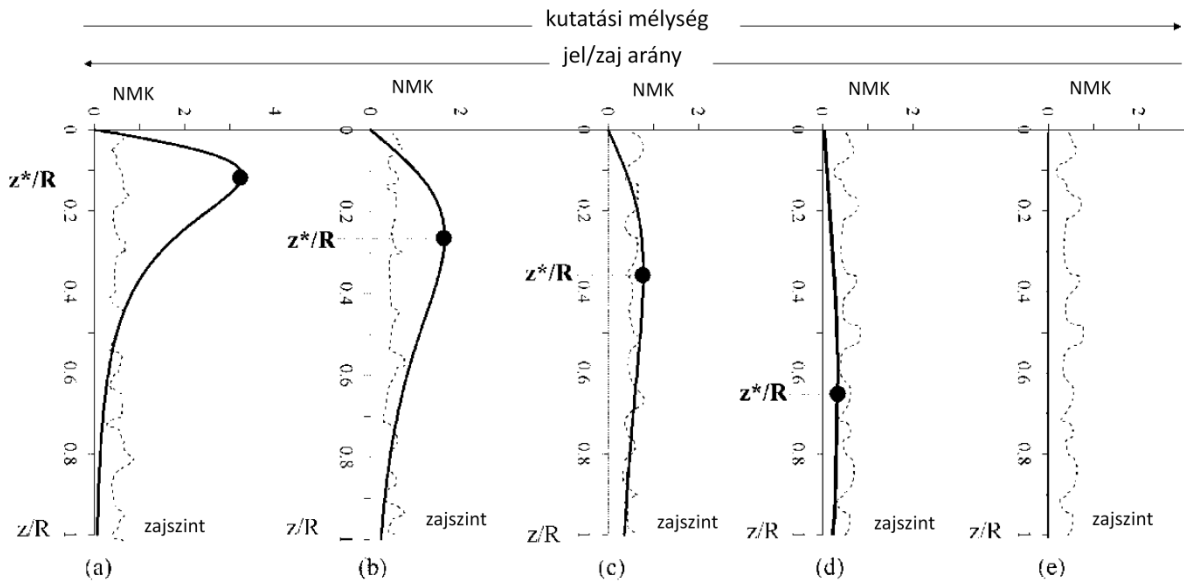
Mivel tehát a KimM mélység érték elrendezés-, modell-, és zajfüggő, a terepi mérés előkészítése során a várt modellnek, és zajszintnek megfelelő legnagyobb KimM értékű elrendezést érdemes választani.

II.4a. Bevezetés

Minden geofizikai mérés, így természetesen a geoelektromos kutatások során is alapvető paraméter a kutatás mélysége. Ennek meghatározására először *Evjen (1938)* tett kísérletet a geoelektromos kutatásban az áram mélységének mélységbeli eloszlásából kiindulva. Később nyilvánvalóvá vált, hogy a kutatás mélysége a geoelektromos mérések esetén elválaszthatatlan az alkalmazott elrendezéstől. Ahogy a *II.3 fejezetben* már megmutattam, *Roy és Apparao (1971)* olyan mélységdefiníciót vezetett be, ami egy vékonyréteg különböző mélységeiben adott hatásán alapul. *Roy (1972)* és *Bhattacharya és Dutta (1983)* további elrendezéseket is vizsgált ezzel a céllal. *Edwards (1977)* ugyanezt a kutatási mélység függvényt használta fel az egyes elrendezések kutatási mélységének meghatározásához, de ő a függvény mediánjának megfelelő mélységet tekintette kutatási mélységnek szemben *Roy és Apparao (1971)*-val, akik azt a mélységet tekintették kutatási mélységnek, ahol a függvény értéke maximális. *Edwards (1977)* szerint ez a mélység jobban egyezik a terepi tapasztalatokkal. Már tárgyaltam (*II.3 fejezet*), hogy (*Szalai et al., 2009*) kiszámította mindkét kutatási mélység értéket az összes olyan elrendezés esetére, amelyeknél ez lehetséges volt és bemutatta a két érték közötti összefüggést is. *Apparao et al. (1992, 1997)* analóg modellezéssel hasonlította össze különböző elrendezések kutatási mélység értékeit nagy-, és kisellenállású modellek esetére.

Mint már felvázoltam új definíció, a **KimM** kialakítását tartottam szükségesnek. Ez a definíció napjainkban annál is inkább releváns, mert egyre gyakrabban szükséges olyan területeken mérni, ahol a terület a beépítettségnek köszönhetően lehatárolt. Emiatt arra kényszerülünk, hogy a terítés hosszát csökkentsük, ami a kutatás mélységének csökkenésével járhat. Emiatt aztán ajánlott (1) olyan elrendezéseket alkalmazni az ismert elrendezések közül, amelyek a lehető legnagyobb mélységből képesek információt szolgáltatni; (2) olyan új elrendezéseket találni, amelyek ezeknél jobb teljesítményt nyújtanak ebből a szempontból. Hogy mennyire aktuális ez a probléma arra *Verma et al. (2009)* számos példát mutat.

A *II.4.1 ábra* (módosítva *Szalai et al., 2009*, és *Szalai és Szarka 2009* után) mutatja az egyik okát, hogy miért kellett az információszerzés mélységére vonatkozó új definíciót bevezetni. Ez öt hipotetikus görbén keresztül mutatja be, hogyan változik a kutatási mélység függvény viselkedése. Léteznek, vagy előállíthatók olyan elrendezések, amelyek viszonylag nagyobb KuM értékkel rendelkeznek, de ennek az ára, hogy azok kutatási mélység függvénye ellaposodik (lásd *II.4.1a*-tól *II.4.1e* felé haladva). Elvileg tehát kaphatunk viszonylag nagy kutatási mélységű elrendezést, de ha annak az ára, az hogy a mért jel nem haladja meg a zajszintet (*II.4.1d*), akkor az adott elrendezés alkalmazása értelmetlen. Az a helyzet is előállhat, hogy a KuM görbe minden mélységben zéróértékű. Ekkor a **KimM definíció értelmetlenné** is válik. Márpedig pl. a MAN, a Schlumberger null-, a háromelektródás null-, vagy a dipól axiális null-elrendezések esetében is (az elrendezések a *II.1.13* és *II.1.14 ábrákon* láthatóak) ez a helyzet.



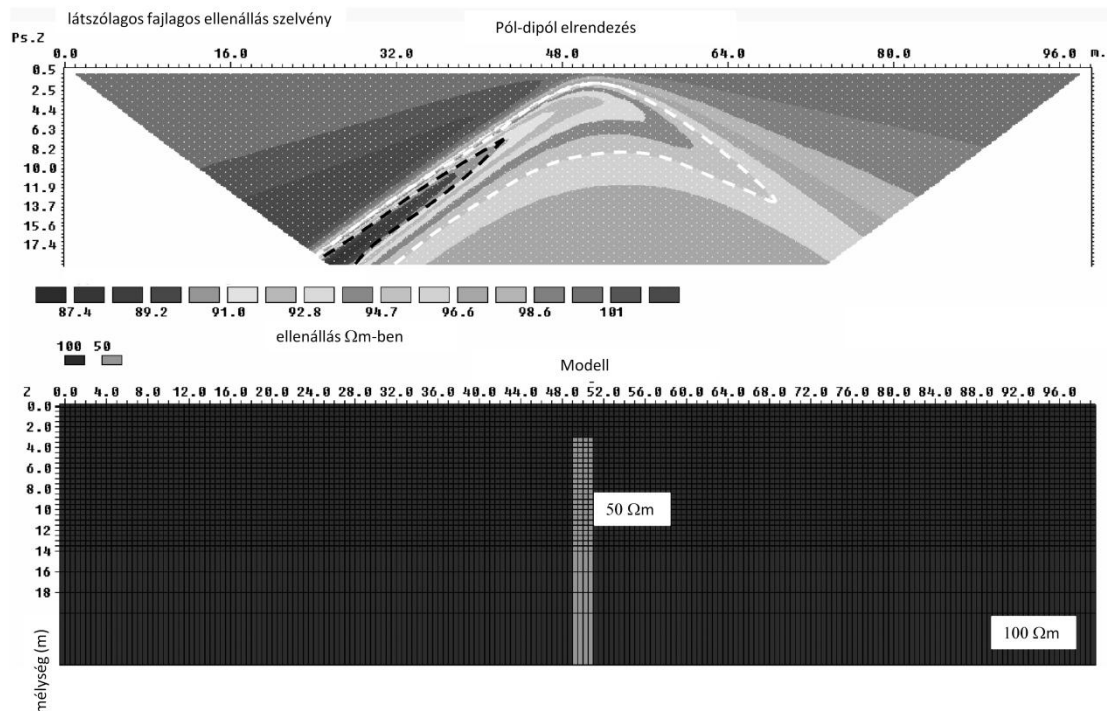
II.4.1 ábra: Különböző hipotetikus elrendezések MK görbéi. A z^*/R KimM értékeket is mutatja az ábra. Az ábra tetején lévő nyilak az adott értékek növekvő irányába mutatnak. Módosítva Szalai et al. 2009, és Szalai és Szarka 2009 után.

Fenti probléma rámutat arra, hogy olyan – **az információszerzés mélységéről** képet adó – definíció bevezetésére van **szükség, ami a zajszintet is figyelembe veszi**. Többek között ennek a követelménynek is megfelel a KuM definíció. Többé-kevésbé hasonló vizsgálatokat végzett analóg modellezést alkalmazva Apparao et al. (1992, 1997).

II.4b. A módszer

5%, illetve 10%-os zajszintet alkalmazva számítottam KimM értékeket 6 geoelektromos elrendezés és három különböző modell esetére, melyek mindegyike nagy-, illetve kis elektromos ellenállású is volt a háttér értékéhez viszonyítva. A numerikus modellezéshez a leginkább elterjedt 2D előre modellező kódot, a RES2DMOD szoftvert (Loke, 1999) használtam.

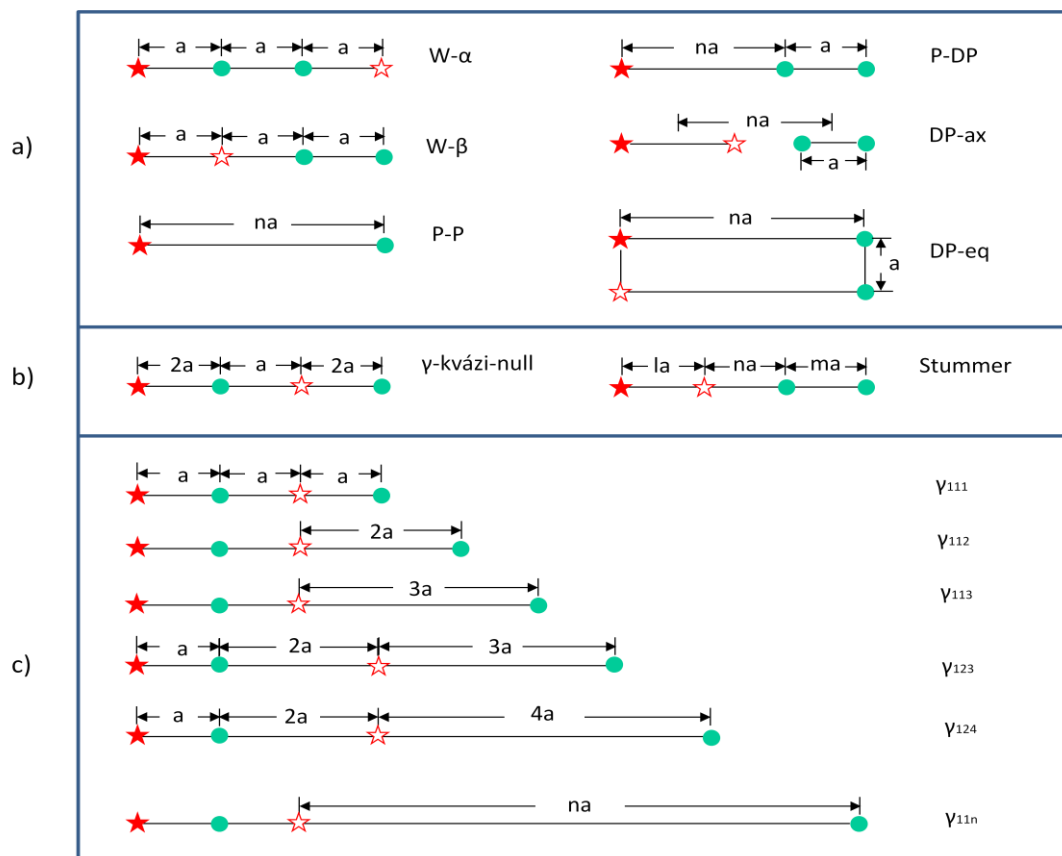
A KimM definícióját a II.4.2 ábra illusztrálja. Adott mélységben lévő inhomogenitás látszólagos ellenállás képet produkál. A számított ellenállás értékek közül egyszerűen a szélsőséges értékű ρ_{extr} -t tekintjük: nagy ellenállású modell felett a maximum, kis ellenállású modell felett a minimum értéket, és számítjuk $100|\rho_{extr}-\rho_1|/\rho_1$ értékét, ahol ρ_1 a befoglaló közeg ellenállása. A modell mélysége 1-10 m tartományban volt, ami 0.5 m-es lépésekben nőtt. A II.4.2 ábrán a fehér/fekete szaggatott vonal azt a területet határolja le, ahol a relatív anomália nagyobb, mint 5/10%. Növelve a modell mélységét a fekete/fehér vonal által lehatárolt terület mérete egyre kisebb lesz. Azt a mélységet hívjuk a 10%-os zaj melletti KutM értéknek, amelynél a fekete vonal még utóljára látszik. Valamivel nagyobb mélységben az 5%-os zajszintet jelölő fehér vonal is eltűnik. Az előtte lévő mélység felel meg az 5%-os zajszint melletti KimM értéknek. Ezen mélység alatt az 5%-os zajszint mellett az adott inhomogenitás már nem detektálható.



II.4.2 ábra: Egy modell és az annak hatására kialakuló látsszólagos fajlagos ellenállás kép, illusztrálendő a KimM definíció működését. A fekete, illetve fehér szaggatott vonalak azokat a területeket határolják le, amelyeken belül az anomália nagyobb, mint 5, illetve 10%.

Az előremodellezés során a rendszer 100 db, egymástól 1 m-re lévő elektródából állt. A Wenner- α (W- α), Wenner- β (W- β), pól-pól (P-P) és a dipól ekvatoriális (Dp-ekv) elrendezések esetében 30 különböző elektróda távolságot használtam. A pól-dipól (P-DP) és a dipól axiális (Dp-ax) elrendezések esetében a dipól hossza $a=1$, a dipólok távolsága pedig ennek 1-30-szorosa volt. Az alkalmazott rács a II.4.2 ábrán, az alkalmazott elrendezések pedig a II.4.3a ábrán láthatóak.

A későbbiekben ezek a számítások kiegészültek más elrendezésekre vonatkozó számításokkal is, amikor azok használhatósága is szóba került. Ezen elrendezések a II.4.3b és c ábrán láthatóak. Az értekezés későbbi részeiben tárgyalom, hogy miért is választottam ezeket az elrendezéseket vizsgálatom tárgyául. Ezekhez a számításokhoz a RES2DMOD program egy új (3.0) verzióját (Loke, 1994; Loke, 1999) és más ellenállás értékeket használtunk, ami a vártnál jobban megváltoztatta a hagyományos elrendezések KimM értékeit, de azok sorrendjén nem változtatott. A modellezés során a hatók felső oldalának mélysége a 0-14 m tartományban 0.5 m-enként, a 14-30 m mélység tartományban 1 m-enként, ez alatt pedig logaritmikus léptékben változott 69 m mélységig. Az egyes elrendezések adatpontjainak száma a következő volt: W- α : 1605; W- β : 1605; P-P: 2535; P-DP: 3675; DP-ekv: 2535; DP-ax: 3625; St: 669; γ_{111} : 1617; γ_{112} : 1200; γ_{113} : 950; γ_{114} : 784; γ_{115} : 665; γ_{116} : 576; γ_{123} : 784; γ_{124} : 665; γ_{qnull} : 1200. Azaz **amennyiben $n \geq 2$, a γ_{11n} elrendezések kevesebb adatponttal rendelkeznek, mint a hagyományos elrendezések, így lemérésük is kevesebb időt vesz igénybe a terepen.**



II.4.3 ábra: A tanulmányozott elrendezések. a) a hagyományos elrendezések. b) a γ -kvázi null-, és az optimalizált Stummer elrendezések. c) a γ_{11n} (itt csak $n=1-3$) és egyéb vizsgált γ elrendezések. A teli csillagok a forrás, az üres csillagok a nyelő elektródákat, a körök a potenciálelektrodákat jelölik.

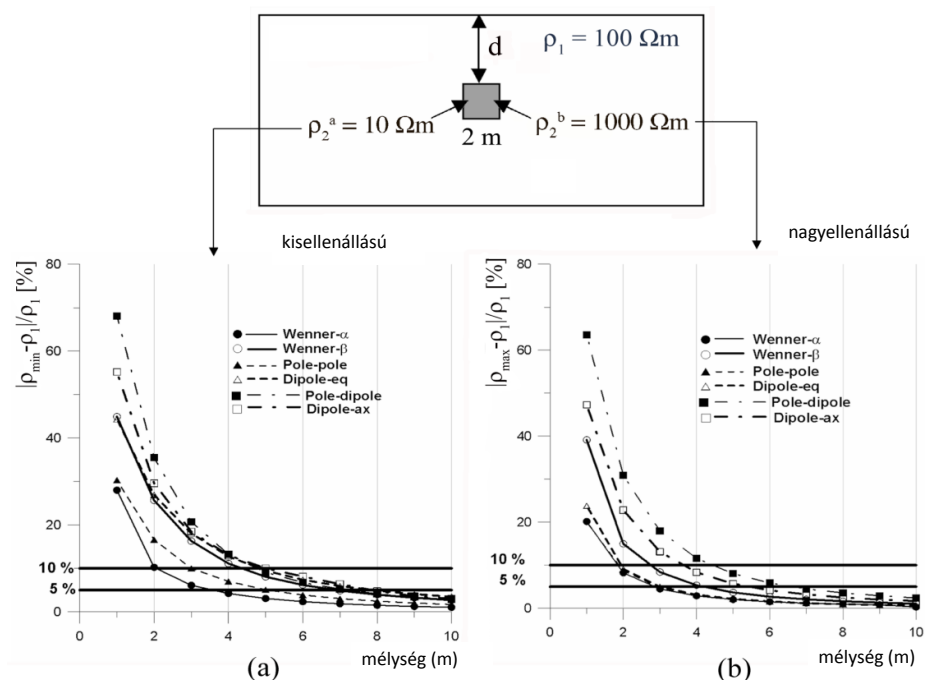
A II.4.4, II.4.5, és II.4.6 ábrákon a $100|\rho_{extr}-\rho_1|/\rho_1$ értékek láthatóak felső oldaluk mélységének függvényében a három különböző modell nagy-, és kisellenállású változataira: a négyszögletes prizma (II.4.4 ábra), a vertikális lemez (II.4.5 ábra) illetve a horizontális lemez (II.4.6 ábra) modellekre. Az adott görbéknek a 10%-ot, illetve az 5%-ot jelölő vonallal való metszéspontja közvetlenül megadja az arra a modellre és zajszintre az adott elrendezés KimM értékét.

II.4c. A hagyományos elrendezésekkel kapott eredmények

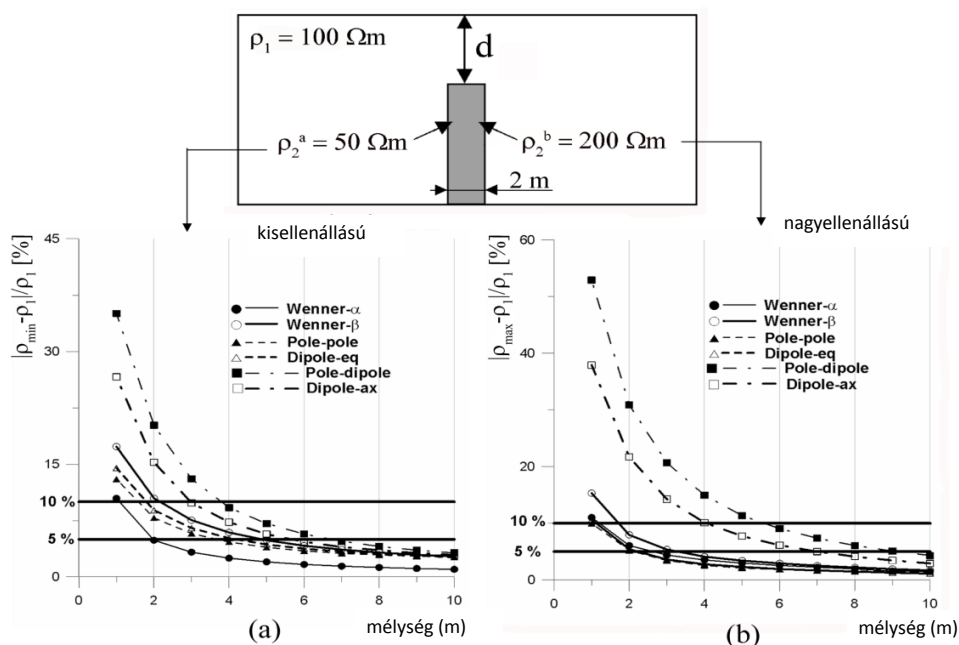
A véges szélességű modellek, a prizma és a dyke modellek esetében a P-Dp és a DP-ax elrendezések bizonyultak a legjobb hagyományos elrendezéseknek, ahogy azt a II.4.1 táblázat is mutatja. A legrosszabb eredményeket, egyetlen kivétellel, a P-P és a W- α elrendezések adták, míg a W- β és DP-eq elrendezések köztes eredményeket produkáltak.

Az egyes elrendezések KimM értékei között jelentős különbségek lehetnek, ahogy azt a II.4.7 ábra is illusztrálja a nagyellenállású dyke modell esetére: amíg a P-P elrendezés maximum 2.1 m mélységből képes kimutatni azt, addig a P-Dp elrendezés több mint háromszor akkora, 7.1 m mélységből. Ez annyit jelent, hogy egy megfelelően megválasztott elrendezés képes kimutatni egy dyke-ot olyan mélységből is, ami más elrendezése számára

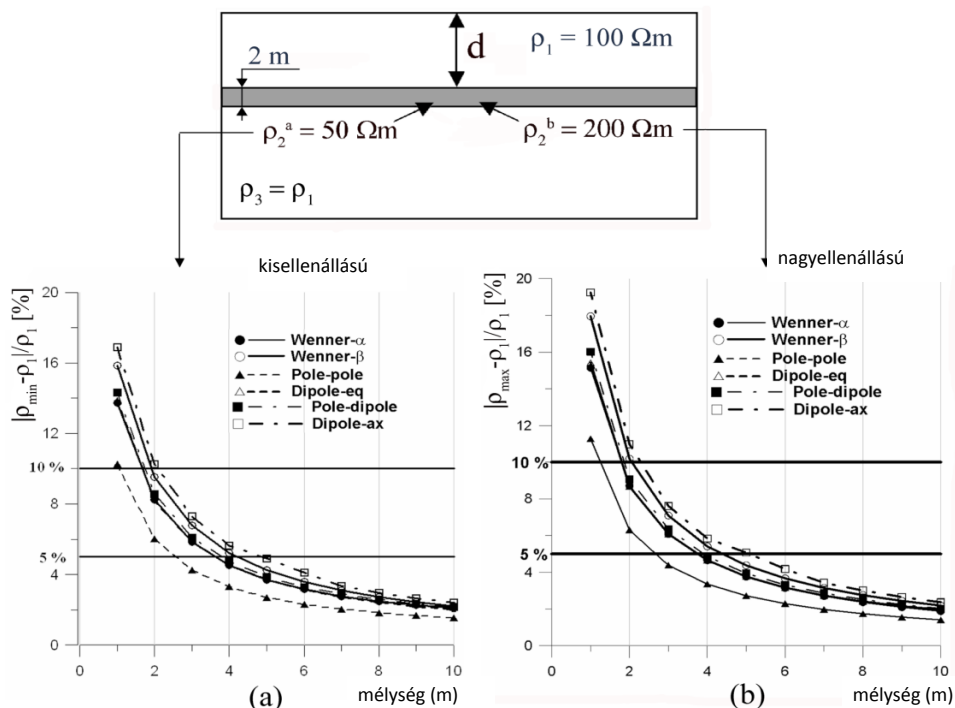
„láthatatlan”. A II.4.1 táblázatból jól látszik az is, hogy ahogy az várható, a zaj növekedésével a KimM mélység értéke csökken.



II.4.4 ábra: A négyzet keresztmetszetű prizma modell kis-, és nagyellenállású változatai és a hozzátartozó $100|\rho_{\text{extr}} - \rho_1| / \rho_1$ értékek a hat elrendezés esetére, az inhomogenitás felső oldalának d mélysége függvényében. (a) kis ellenállású-, (b) nagy ellenállású modell



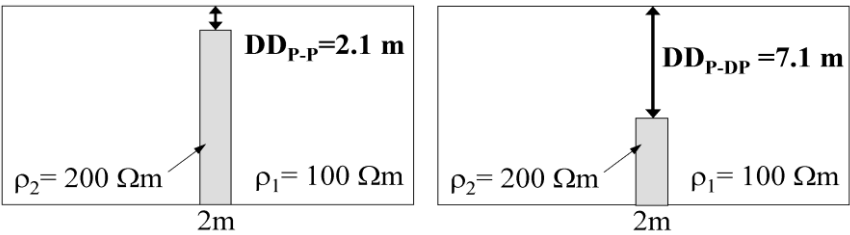
II.4.5 ábra: A vertikális lemez modell kis-, és nagyellenállású változatai és a hozzátartozó $100|\rho_{\text{extr}} - \rho_1| / \rho_1$ értékek a hat elrendezés esetére, az inhomogenitás felső oldalának d mélysége függvényében. (a) kis ellenállású-, (b) nagy ellenállású modell



II.4.6 ábra: A horizontális vékonyréteg modell kis-, és nagyellenállású változatai és a hozzátartozó $100|\rho_{\text{extr}} - \rho_1|/\rho_1$ értékek a hat elrendezés esetére, az inhomogenitás felső oldalának d mélysége függvényében. (a) kis ellenállású-, (b) nagy ellenállású modell

II.4.1 táblázat: Hat elrendezésnek 5%, illetve 10%-os zajszintre vonatkozó KimM értékei méterben mindhárom (a II.4.4, II.4.5 és a II. 4.6 ábrán látható) modell mindkét (nagy-, és kisellenállású) változatára. Pirossal szedve a nagyobb KimM értékek.

	Véges szélességű (2D) modellek								Végtelen szélességű (1D) modellek			
	négyzet alapú hasáb				dyke				1D vékonyréteg			
	modell 1 (10 Ωm)		modell 2 (1000 Ωm)		modell 3 (50 Ωm)		modell 4 (200 Ωm)		modell 5 (50 Ωm)		modell 6 (200 Ωm)	
zajszint	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5 %	10 %
P-DP	7	4,8	6,8	4,5	7	3,7	9	5,5	3,8	1,8	4	1,8
DP-ax.	8	5,2	5,6	3,7	5,6	3	7	4	4,9	2	5	2,2
W-β	7	4,5	4,3	2,9	5	2	3	1,7	4,2	1,9	4,4	2,1
W-α	3,5	2,2	3	1,8	2	1,1	2,5	1,2	3,5	1,6	3,8	1,7
DP-eq.	8	5	3	1,9	4	1,9	2	1	3,5	1,6	3,8	1,7
P-P	5	3,1	3	1,8	3,7	1,8	2	1	2,6	1	2,8	1,3



II.4.7 ábra: PP-P és P-Dp elrendezések KimM értékei nagyellenállású dyke modell felett

A különböző elrendezések KimM értékei csak ugyanazon modellek esetén vethetőek össze egymással. Egy jólvezető prizma pl. nagyobb mélységből detektálható, mint egy rossz vezető (II.4.1 táblázat). Vertikális lemezszerű modell esetén viszont (amikor is a test mélységben is kiterjedt) a P-DP, a DP-ax és a W- α elrendezések esetében a nagyellenállású lemez nagyobb mélységből detektálható, mint a kis ellenállású (II.4.2 táblázat). Míg mindkét keskeny modell esetében a KimM értéke jelentősen függ a modell kis-, vagy nagyellenállású voltától, addig a vékonyréteg modell esetében az ellenálláskontrasztnak alig van hatása a KimM értékre (II.4.2 táblázat).

II.4.2 táblázat: Az ellenálláskontraszt hatásának szemléltetése. m-ben a legnagyobb mélységértékek, ahonnan az adott modell még kimutatható volt.

elren- dezés	modell			
	dyke		1D vékony réteg	
	konduktív ($\rho_2=50 \Omega m$)	rezisztív ($\rho_2=200 \Omega m$)	konduktív ($\rho_2=50 \Omega m$)	rezisztív ($\rho_2=200 \Omega m$)
P-DP	5.8 <	7.1	3.8	3.9
DP-ax	5.6 <	6.9	4.9	5.1
W- β	4.9 >	3.2	4.2	4.3
W- α	1.9 <	2.6	3.6	3.7
DP-ekv	4.1 >	2.1	3.6	3.7
P-P	3.6 >	2.1	2.6	2.8

A KimM függ az ellenállás kontraszttól A KimM nem függ jelentősen az ellenállás kontraszttól

A vízszintesen kiterjedt modellek esetén a β -típusú elrendezések (DP-ax és W- β) a legjobbak. A legrosszabb eredményeket ismételten a P-P és a W- α elrendezések szolgáltatták (II.4.1 táblázat). Ha összevetjük a KimM értékeket a KuM értékekkel (II.3 fejezet) azt találjuk, hogy a két esetben az elrendezések rangsora majdnem teljesen ellentétes, az egyetlen W- α elrendezéssel, mint kivétellel, ami mindkét esetben a legrosszabbnak bizonyult (II.4.3 táblázat). Ez a példa megvilágítja a különbséget egy idealizált helyzet (azaz

zajmentes mérés, végtelen vékony réteg) és **egy sokkal valósabb eset** (zajos környezet és véges vastagságú lemez) **között**.

II.4.3 táblázat: A vizsgált elrendezések jósági sorrendje azok KuM és KimM mélység értékei szerint

elrendezés	MK (R: elrendezés hossz)	KimM jólvezető dyke (5 % zaj)
P-DP	3. (0.16-0.24R)	1. (5.8 m)
DP-ax	4. (0.195R)	2. (5.6 m)
W-β	6. (0.1R)	3. (4.9 m)
DP-ekv	2. (0.25R)	4. (4.1 m)
P-P	1. (0.35R)	5. (3.6 m)
W-α	5. (0.11R)	6. (1.9 m)

Jól mutatja a **“jósági sorrend” modellfüggőségét**, hogy ha a prizma nagy ellenállású a P-Dp, míg ha a prizma kis ellenállású a DP-ax elrendezés a legjobb. Megnyújtva ezt a modellt lefelé, a dyke modell esetében ismét a P-DP elrendezés lát legmélyebbre, függetlenül ezúttal az ellenálláskontraszttól is. A prizmat horizontális megnyújtva a vékonyréteg modellhez jutunk, amelynél a DP-ax elrendezés a leghatékonyabb, szintén az ellenálláskontraszttól függetlenül (II.4.1 táblázat).

Figyelemreméltó, hogy a hat $100|\rho_{extr}-\rho_I|/\rho_I$ görbe soha (egyetlen modell esetében sem) keresztezi egymást. Ez azt jelenti, hogy **az elrendezések sorrendje független az aktuális modell mélységtől**. A hat görbe között a legkisebb a vékonyréteg modell esetén a különbség, legnagyobb pedig a dyke modell esetén. Utóbbi esetben - ahogy már a prizma modell esetében is - a P-DP és a DP-ax elrendezések kiemelkednek a többi elrendezés közül.

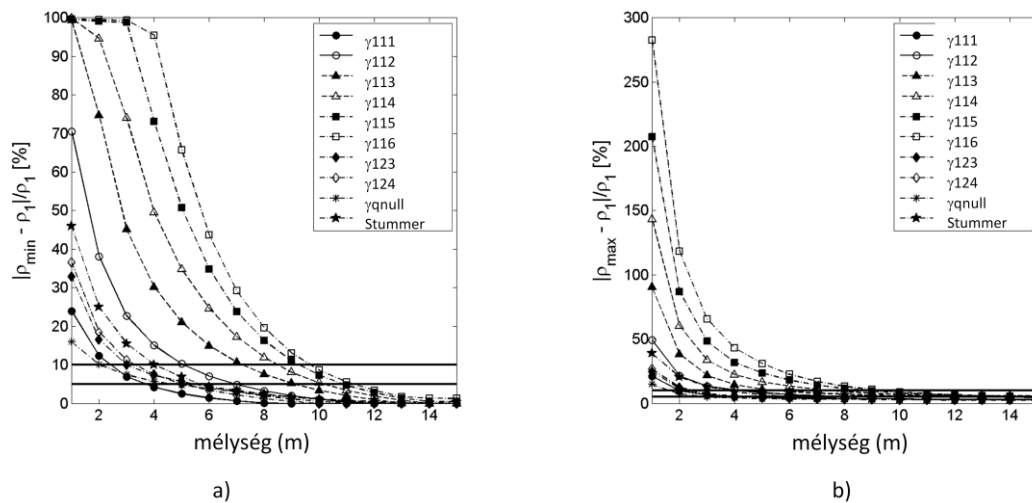
II.4d. A nem-hagyományos elrendezésekkel kapott eredmények

A II.4.8 és II.4.9 ábrák már csak az „új” elrendezések esetében mutatják a KimM értékének számításához használt görbéket a prizma és a dyke modellek esetére. A II.4.4 táblázat mutatja az összes, a II.4.3 ábrán megjelenített elrendezés újraszámított KimM értékeit. Néhány cellában azonban nincsenek értékek, aminek a következő okai lehetnek: (1) A jelek a teljes tartományban a zajszint alatt voltak (pl. jólvezető dyke, 10% zaj; a W-α és a γ_{111} és a γ_{qnull} elrendezések mindkét dyke, 10% zaj esetén). Ez azt jelenti, hogy a test az adott zajszint mellett detektálhatatlan. (2) Bizonyos esetekben a KimM értékek a tanulmányozott 25 m-es mélységnél is nagyobb értéket érnek el (minden egyéb kitöltetlen cella, pl. a γ_{114} elrendezés a nagyellenállású dyke és 5% zajszint esetére).

A vizsgált modellek esetében a γ_{11n} ($n=1,6$) elrendezések KimM értékei szisztematikusan nőnek n -el (II.4.4 táblázat) és $n \geq 2$ esetén már nagyobb értékeket adnak, mint akár a legjobb hagyományos elrendezés.

A γ_{123} - és a γ_{124} elrendezések KimM értékei viszont nem nagyobbak a legjobb hagyományos elrendezésekeinél, sőt a γ_{qnull} elrendezés KimM értéke még kisebb is. Utóbbi bizonyítja, hogy egy elrendezés kis homogén feltér értéke önmagában még nem elegendő a nagy KimM értékhez. A Summer elrendezés a Dp-ax elrendezéshez hasonló KimM értéket adott, ami nem meglepő, hiszen annak első mintegy 600 tagja bipól-bipól típusú elrendezés, ami a DP-ax-hoz hasonló (Stummer *et al.*, 2004). A Stummer-, és a DP-ax elrendezések leképezési kapacitása is hasonló (Szalai *et al.*, 2013).

Bebizonyosodott tehát, hogy a γ_{11n} elrendezések képesek a legnagyobb KimM értékeket produkálni az összes vizsgált elrendezés közül és az eltérés a legjobb hagyományos elrendezés és a γ_{11n} elrendezések KimM értékei között jelentős is lehet.

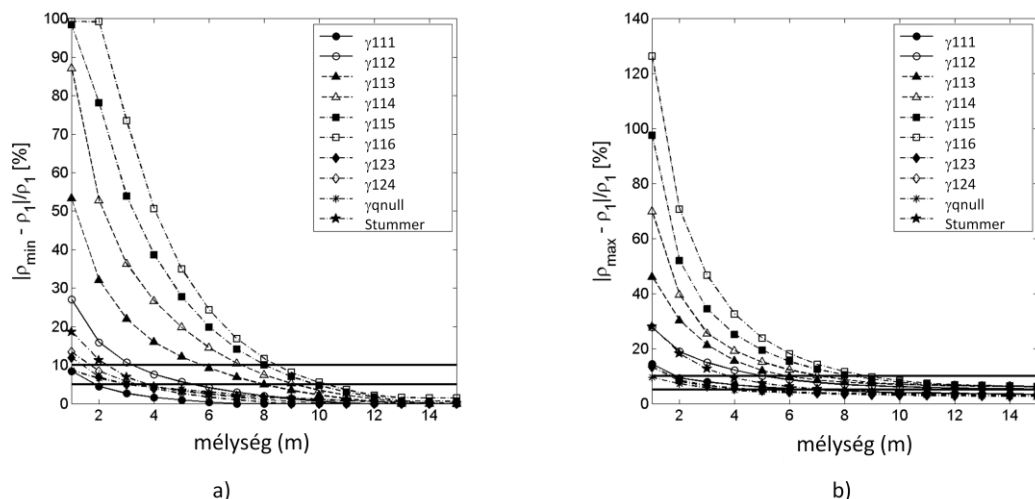


II.4.8 ábra: A prizma modell kis- (a), és nagyellenállású (b) változataihoz tartozó $100|\rho_{extr}-\rho_1|/\rho_1$ értékek a speciális, nem-hagyományos elrendezések esetére, az inhomogenitás felső oldalának d mélysége függvényében

II.4e. Következtetések

Ebben a fejezetben a különböző felszíni geoelektromos elrendezések kimutathatósági mélységéről adtam áttekintést. **A KimM definícióját azért vezettem be, hogy a KuM definíció hiányosságait kiküszöböljem.** Ez a definíció adott zajszintek esetén adja meg azt a maximális mélységet, amelyből adott 2D inhomogenitás az adott elrendezéssel még kimutatható.

A KimM érték erősen függ a modell paramétereiktől. **Kis laterális kiterjedésű inhomogenitások esetén a hagyományos elrendezések közül a P-DP és a DP-ax elrendezések bizonyultak a legjobbnak. A legrosszabb eredményeket - egyetlen kivétellel – a P-P és a W-α elrendezések produkálták.** Az ilyen keskeny inhomogenitások esetén a W-β és a DP-eq elrendezések köztes eredményeket adtak. **Laterálisan kiterjedt modellek esetén a β-típusú négy-elektrodás elrendezések (DP-ax és W-β) voltak a legjobbak,** legrosszabbaknak pedig ismételten a P-P és a W-α elrendezések bizonyultak.



II.4.9 ábra: A dyke modell kis- (a), és nagyellenállású (b) változataihoz tartozó $100|\rho_{\text{extr}}-\rho_1|/\rho_1$ értékek a speciális, nem-hagyományos elrendezések esetére, a dyke felső oldalának d mélysége függvényében

II.4.4 táblázat: A vizsgált elrendezések 5%-os és 10%-os zajszinthez tartozó KimM értékei méterben a prizma és a dyke modellek (mindkettő mind kis-, mind nagyellenállású) esetében. a) a hagyományos elrendezések és a Stummer elrendezés KimM értékei. A legnagyobb értékek adott modell és zajszint esetén boldval szedve. b) a γ elrendezések KimM értékei. Azok az értékek, amelyek meghaladják a legnagyobb hagyományos elrendezés értéket pirossal és boldval vannak szedve.

	Négyzetes prizma, konduktív (1)		Négyzetes prizma, rezisztív (2)		Dyke konduktív (3)		Dyke rezisztív (4)		Vékonyréteg konduktív (9)		Vékonyréteg rezisztív (8)	
zaj	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%
W- α	2.65	1.84	3.8	2.03	1.53	-	4.77	1.48	5.11	2.58	13.22	4.4
W- β	5.61	3.8	5.47	3.1	3.43	1.73	4.84	1.98	6.21	3.1	11.15	5.17
P-P	4.2	2.72	3.73	2.08	2.44	1.2	3.04	1.27	3.72	1.74	7.98	3
P-DP	5.37	3.67	6.62	3.9	4.03	2.44	8.63	4.43	5.62	2.81	12.84	4.8
DP-eq	6.27	4.28	4.28	2.13	2.72	1.48	4.25	1.39	5.12	2.68	14.42	4.9
DP-ax	5.91	4.05	6.6	3.9	4.13	2.47	8.56	4.45	6.52	3.38	14.74	5.88
St	5.67	4.01	6.3	3.7	3.71	2.23	7.51	3.73	6.38	3.35	14.2	5.7

	Négyzetes prizma, konduktív (1)		Négyzetes prizma, rezisztív (2)		Dyke konduktív (3)		Dyke rezisztív (4)		Vékonyréteg konduktív (9)		Vékonyréteg rezisztív (8)	
zaj	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%
W γ 111	3.65	2.33	4.4	1.97	1.8	-	6.74	1.76	4.88	2.46	14.73	4.14
W γ 112	6.93	5.1	8.64	4.13	5.4	3.18	25	5.05	5.6	2.64	-	4.41
W γ 113	9.1	7.2	14	5.42	7.98	5.72	-	5.9	6.02	2.68	-	4.51
W γ 114	10.15	8.46	-	7.47	9.1	7.13	-	7.11	6.77	2.9	-	4.44
W γ 115	10.86	9.25	-	8.71	9.84	8	-	8.25	7.86	2.81	-	4.55
W γ 116	11.23	9.64	-	9.31	10.23	8.42	-	8.82	9.71	2.83	-	8.82
W γ 123	5.46	3	4.2	2.23	2.94	1.3	4.76	1.49	5.07	2.58	10.97	4.32
W γ 124	5.04	3.28	4.45	2.36	3.36	1.61	4.47	1.62	4.65	2.58	9.16	4.3
W γ Q0	4.7	2.03	3.03	1.5	3.1	-	3.77	-	5.4	2.58	14.03	4.2

A KimM értékek alapján kapott jóági sorrend jelentősen különbözik a KuM sorrendtől: (a $W-\alpha$ elrendezés kivételével, ami mindegyik listán a legrosszabb) az elrendezések sorrendje gyakorlatilag pont fordított a két érték esetében.

Az elrendezések **KimM értékei** adott modell esetében is széles intervallumot fognak át: akár **3-4-szeres különbség** is lehet a legnagyobb és a legkisebb értékek között. Emiatt nagyon fontos, hogy a lehető legjobb elrendezést válasszuk ki, különösen kritikus terepi körülmények között: ha szűk a rendelkezésre álló terület, magas a zajszint, vagy kicsi az inhomogenitás hatása.

Ha csak a hagyományos elrendezések alkalmazásában gondolkodunk, akkor apriori információ birtokában a terepi méréshez a II.4.1 táblázat alapján javasolt legjobbnak tűnő elrendezés, apriori információ hiányában pedig a P-DP vagy a DP-ax elrendezések választása javasolt, mert a modellek többsége esetében ezek bizonyultak a leghatékonyabbnak.

Valójában azonban az optimalizált Stummer elrendezés szinte minden esetben jobb képet adott akár a legjobb hagyományos elrendezésnél is. Ez aligha véletlen, hiszen az első mintegy 600 helyén nem-standard DP-DP elrendezéseket használ, amik a DP-ax elrendezés nem feltétlenül szimmetrikus megfelelői. Ide sorolható a Wenner- β elrendezés is, ami a 3. helyet foglalja el az elrendezések KimM listáján, míg a nem β -típusú DP-eq és Wenner- α elrendezések a sor végén vannak. Megjegyzendő, hogy a három-elektrodás elrendezések beépítése a sokelektrodás rendszerekbe valószínűleg tovább javítaná az optimalizált konfigurációval kapható eredményeket, különösen a szelvény szélein. Candansayar (2008) modell és terepi tanulmányai szerint a PD-L (tk. a P-DP), a PD-R (tk. a DP-P) és a DP-ax elrendezések közös inverziója realisztikusabb képet ad, mint bármely három-, vagy négy-elektrodás elrendezése. Eredményeink megerősítik Candansayar (2008) konklúzióját.

A γ_{11n} elrendezések ($n \geq 2$ esetén) azonban szisztematikusan nagyobb KimM értékeket adtak, mint akár a legjobb hagyományos elrendezések mind a prizma, mind a dyke modell esetében függetlenül attól is, hogy azok nagy-, vagy kis fajlagos ellenállásúak. A különbség akár 2-3-szoros is lehet.

II.5. A hagyományos és az azokból optimalizált elrendezések leképezési képességének összehasonlítása

Szalai et al. (2013) alapján

II.5a. Bevezetés

Jól ismert, hogy minden geoelektromos elrendezésnek vannak bizonyos előnyei, illetve hátrányai. Ward (1990) 14 különböző aspektusból vetette össze az elrendezéseket: jel/zaj arány, elektromágneses csatolás, meredeken dőlő szerkezetek felbontása, horizontális lemezek felbontása, kutatási mélység, dőlésérzékenység, a felszíni inhomogenitásokra való érzékenység szondázás, illetve profilmérés esetén, az aljzat topográfiájára való érzékenység, a laterális hatásokra való érzékenység, a jólvezető fedő árnyékoló hatása és a topográfiára való érzékenység.

A korábbi fejezetekben már megvizsgáltuk a különböző elrendezések KuM és KimM értékeit, illetve vertikális felbontóképességét, mint nagyon fontos paramétereket. A legfontosabb azonban mégiscsak az, hogy az inverziót követően **kapott kép mennyire közelít a valósághoz**. Ebben a fejezetben ezt fogjuk megnézni, mégpedig nem egyes elrendezések, hanem különböző 2D sokeletródás mérési konfigurációk esetére. Korábban Dahlin és Zhou (2004) vetett össze 10 különböző konfigurációt 5 modell esetére. Az itt szereplő modellek attól eltérnek, emellett **bekerült az összevetésbe az optimalizált Stummer elrendezés is, és az invertált kép és a modell összehasonlítására bevezettem egy fél-empirikus rendszert**.

Időszerűnek tűnt a hagyományos elrendezések mellett egy optimalizált konfiguráció bevonása is a vizsgálatokba. Erre a célra az elsőként megtervezett optimalizált konfigurációt választottam, Stummer konfigurációnak nevezve azt (Stummer et al. 2004). Ez a konfiguráció különböző elrendezéseket tartalmaz és elvileg jobb leképezési tulajdonságokkal bír, mint a hagyományos elrendezések. Alapja egy 147 DP elrendezésből álló szett. Ehhez adnak az optimalizálási eljárás során újabb és újabb elrendezéseket oly módon, hogy az ú.n. jóság függvény maximális növekedést mutasson. Az eljárás során azonban csak négyelektrodás elrendezéseket vettek figyelembe és azok közül is csak azokat, amelyek k geometriai faktor értéke egy szintet (5000 vagy 5500) nem halad meg. Ennek a ténynek az értekezés szempontjából még komoly jelentősége van. Ezt az eljárást egyébként Wilkinson et al. (2006) továbbfejlesztette, mi azonban maradunk ennél a modelltől független Stummer-féle szettnél.

Céлом a különböző elrendezések leképezési tulajdonságainak összevetése, annak kimutatása, hogy az függ-e, és ha igen mennyire az alkalmazott modelltől, illetve a zajszinttől, illetve hogy az optimalizált Stummer elrendezése valóban jobban leképezi-e a valós helyzetet, mint a többi elrendezés.

II.5b. A módszer

Az előremodellezés eredményeként kapott szintetikus adatokhoz a “zajos” esetben 5%-os szórású Gauss eloszlású véletlen zajt adtunk. Az így kapott adatokat invertálva kaptuk azt a képet, amit aztán a modellel össze kellett vetni. Az Earthmager szoftvert használtuk minden esetben ugyanazon paraméterekkel. Ennek részleteihez lásd Szalai et al. (2013).

Az invertált kép és az adott modell (a *II.5.1-8 ábrákon*), összehasonlításához a következő **kritériumokat** használtam: 1. látszik-e anomália a modell helyén, 2. mennyire tükrözi vissza az anomália geometriája (pozíciója és alakja) a modellt, 3. milyen az invertált kép felbontása. Az **alapvető kérdés** a 1. **kimutathatóság**, hisz a nélkül minden további kérdés értelmetlen. Ez képezi nem csak a 2. és a 3. kérdés alapját, de a pozicionálás és az ellenállás korrektségét is. Amikor az anomália látható volt, akkor általában **horizontális pozíciója** is meglehetősen pontos volt. Az ellenállás értéke azonban nagyon eltérő lehet a valóságtól, főleg kisméretű inhomogenitások esetén. Mindhárom kritériumot egy 10-es skálán osztályoztam. Jóllehet ez többé-kevésbé szubjektív és nem is teljes a kapott szám (pl. a felbontóképességnek csak bizonyos modellek esetén van értelme), amit ezen értékek átlagaként kaptam, elegendően informatívnak és hasznosnak bizonyult, mivel a különböző konfigurációk teljesítőképességének **egyszerű összevetését teszi lehetővé**.

5 hagyományos elrendezés, a Wenner- α , Wenner- β , P-DP, P-P és a Dp-Dp elrendezés, valamint egy optimalizált elrendezés, a Stummer elrendezés leképezési tulajdonságait vizsgáltam. Volt tehát közöttük két-, három- és négyelektrodás elrendezés is, mivel ezek KuM és vertikális felbontóképesség értékei (*II.3 fejezet; Szalai et al. 2009*) és KimM értékei (*II.4 fejezet; Szalai et al., 2011*) jelentős változékonyságot mutattak.

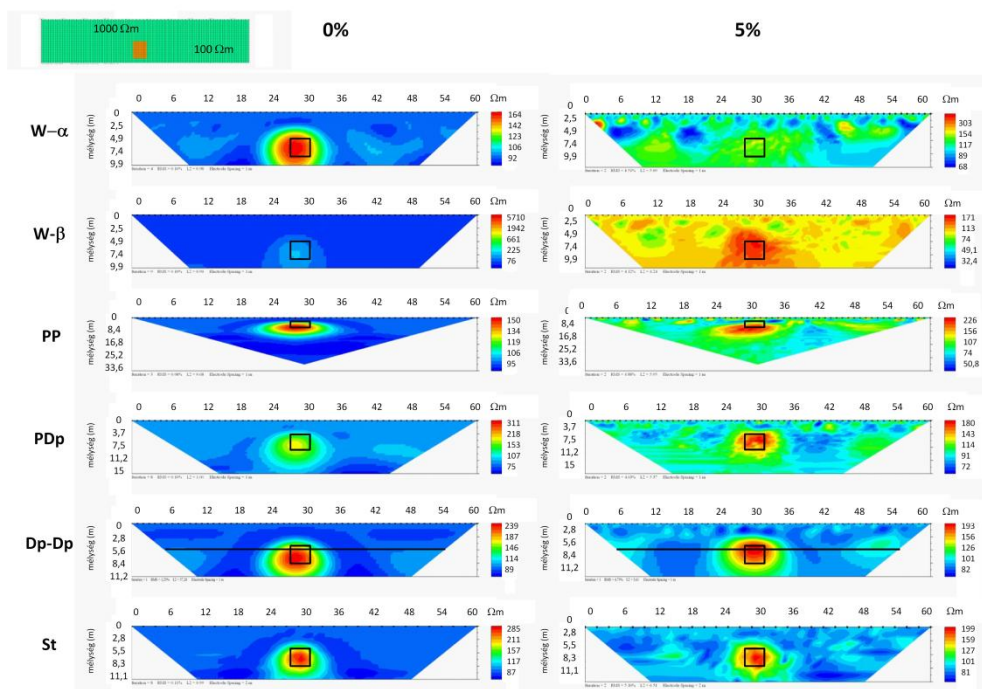
60 elektrodás rendszert használva a Wenner- α , Wenner- β , P-DP, Dp-Dp és P-P konfigurációk adatpontjainak száma rendre: 570, 570, 871, 736 és 684. A Stummer konfiguráció esetében ehhez az eredeti 30 elektrodás rendszerből úgy csináltunk 60 elektrodást, hogy csak minden második elektróda "üzemelt". Ebből a rendszerből az első 669 elemet számítottuk, miáltal az adatpontok száma hasonló volt a többi elrendezéssel számítottéhoz.

II.5c. Eredmények

Az *II.5.1-8 ábrák* mutatják a modelleket és az invertált ellenállás képeket mindkét zajszint esetére. Az értékelést az *II.5.1 táblázat* tartalmazza. A további diszkusszió az itt szereplő értékek átlagán alapul. Mivel a három paraméter elég szorosan korrelál egymással, egyedi értelmezésük csak különleges esetekben szükséges.

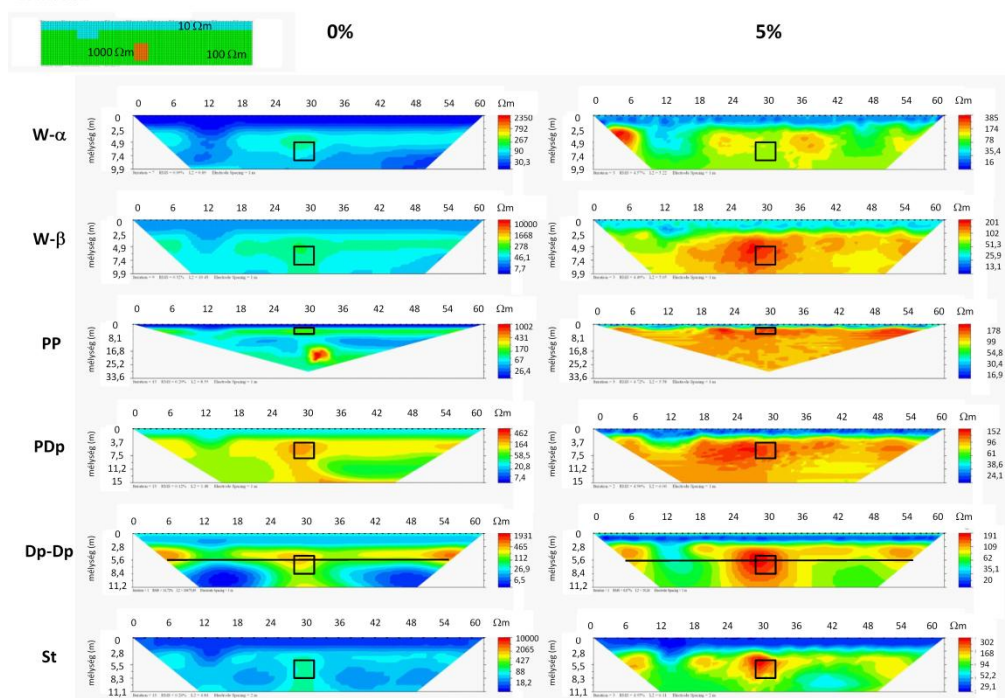
Az **1.** zajmentes **modell** esetében, amint az várható volt, minden egyes elrendezés jó eredményeket adott, mind kimutathatóság, mind modell geometria tekintetében. A zajjal terhelt eredmények esetében a képek romlottak, főleg a Wenner- α elrendezésé. A többi esetben a képek még elfogadhatóak, de a zaj felerősíti és megnagyítja az álanomáliákat. A modell valódi geometriáját legjobban a Dp-, és a Stummer elrendezések adják vissza.

1. modell



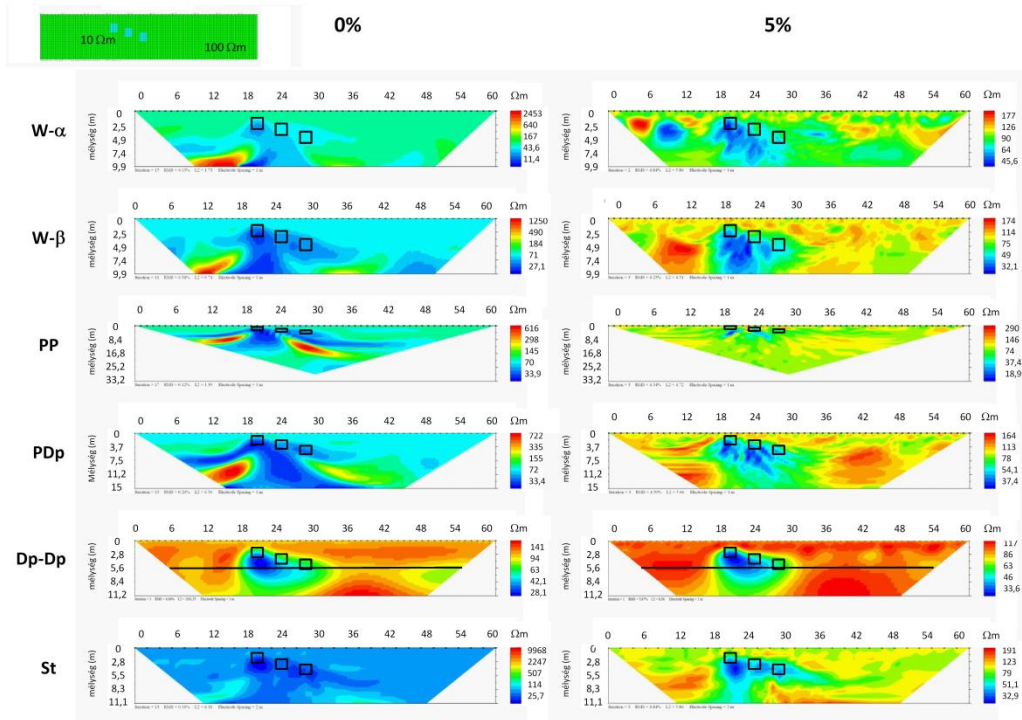
II.5.1 ábra: Az 1. modell és hozzá tartozó zajmentes és a zajjal terhelt adatokból kapott invertált képek hat elektróda konfiguráció esetére

2. modell



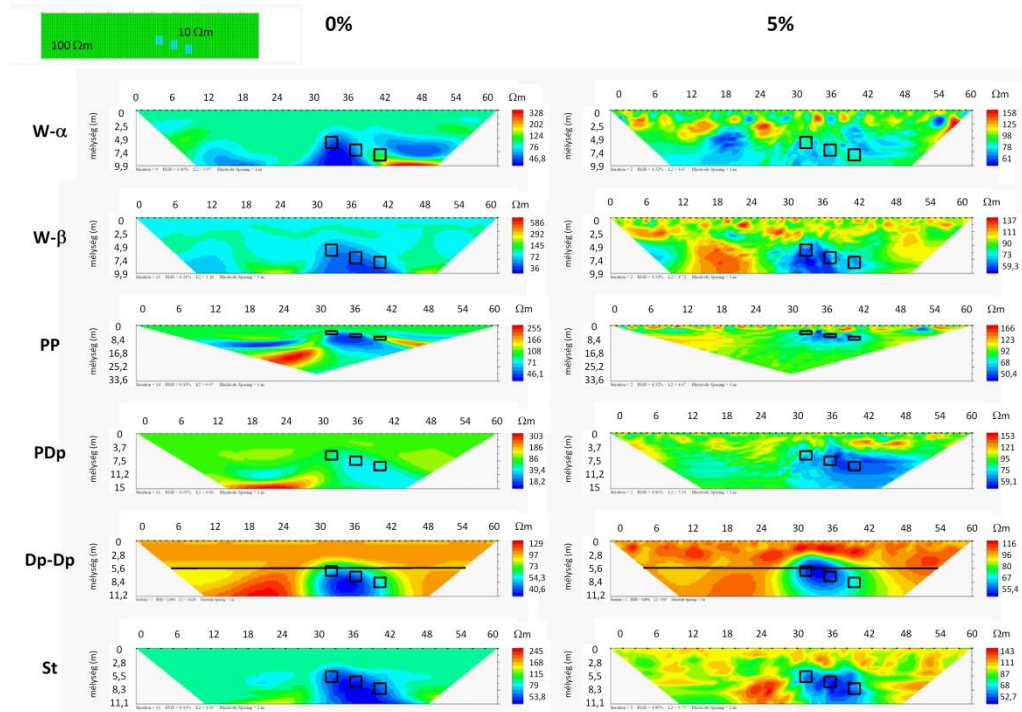
II.5.2 ábra: A 2. modell és hozzá tartozó zajmentes és a zajjal terhelt adatokból kapott invertált képek hat elektróda konfiguráció esetére

3. modell



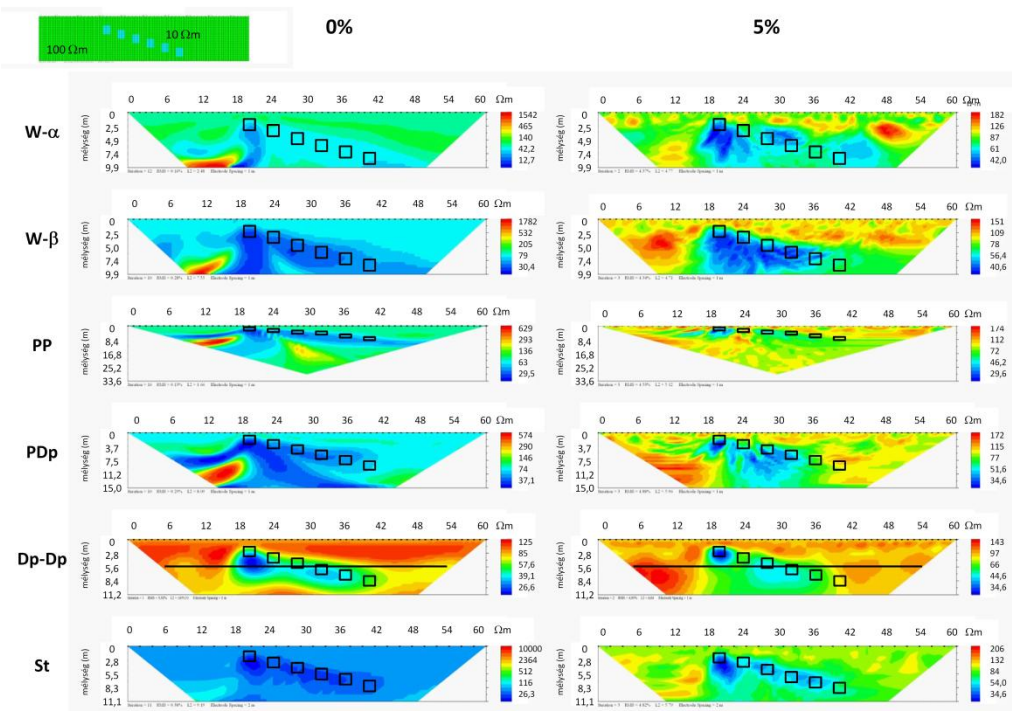
II.5.3 ábra: A 3. modell és hozzá tartozó zajmentes és a zajjal terhelt adatokból kapott invertált képek hat elektróda konfiguráció esetére

4. modell



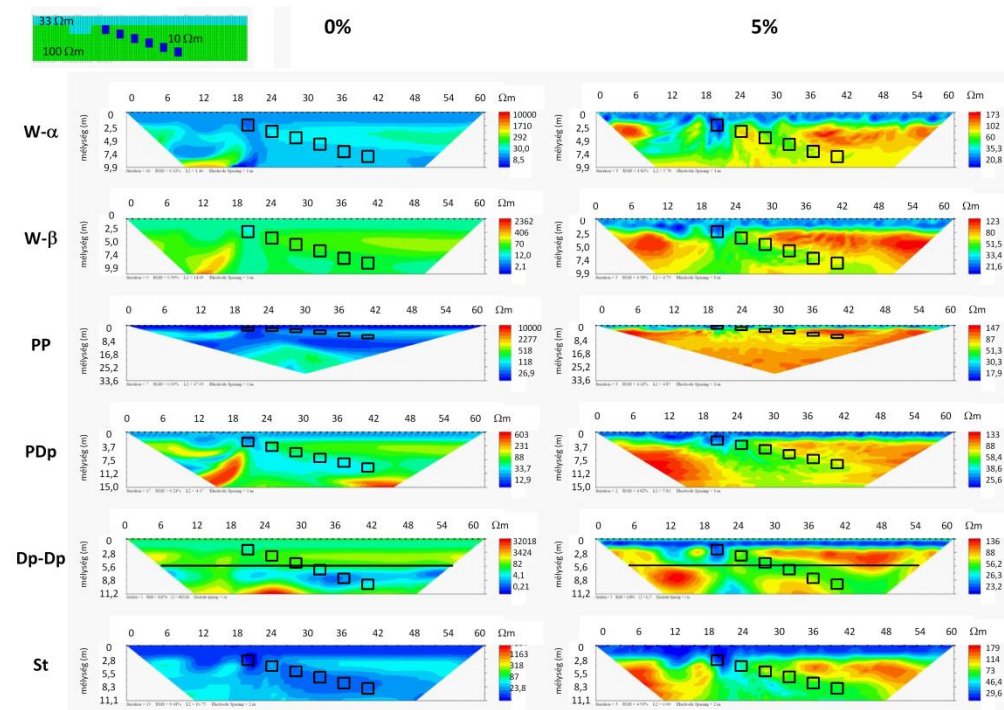
II.5.4 ábra: A 4. modell és hozzá tartozó zajmentes és a zajjal terhelt adatokból kapott invertált képek hat elektróda konfiguráció esetére

5. modell



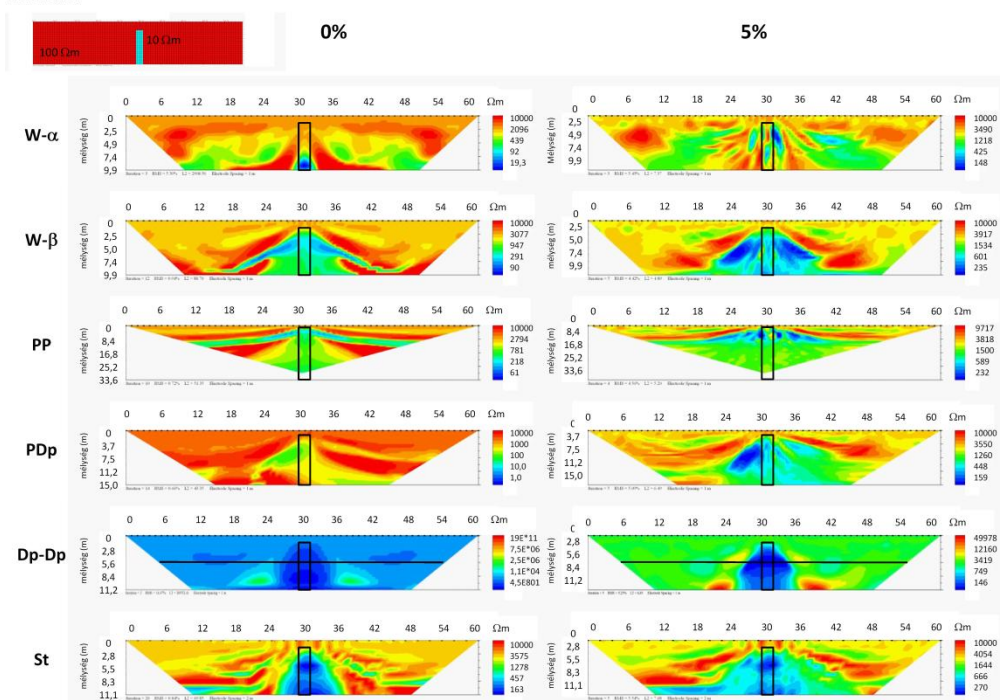
II.5.5 ábra: Az 5. modell és hozzá tartozó zajmentes és a zajjal terhelt adatokból kapott invertált képek hat elektróda konfiguráció esetére

6. modell



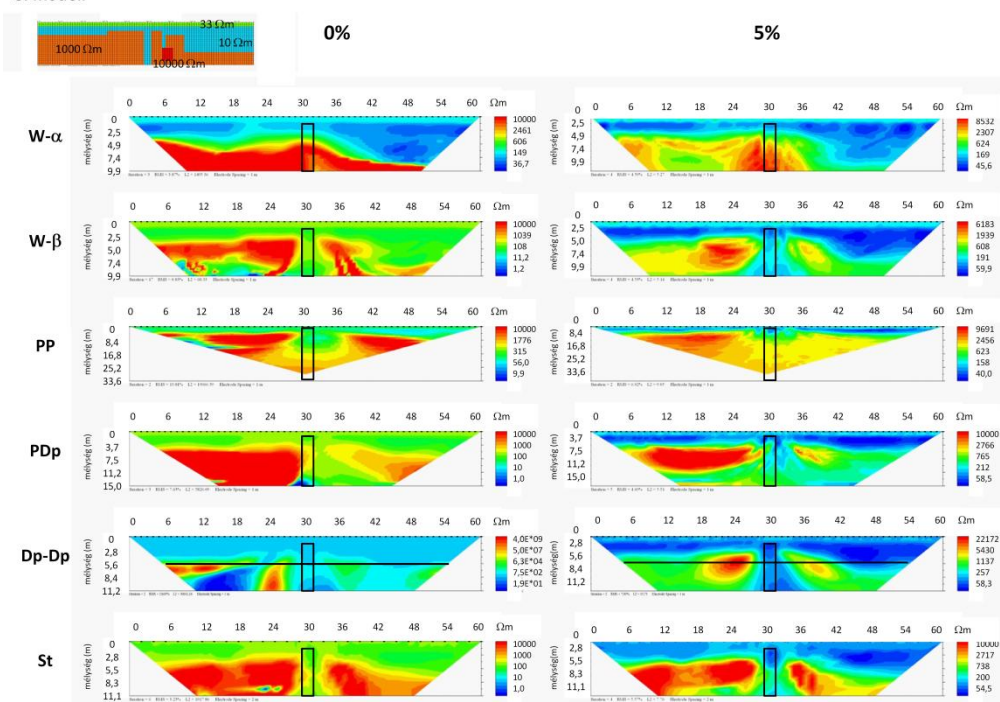
II.5.6 ábra: A 6. modell és hozzá tartozó zajmentes és a zajjal terhelt adatokból kapott invertált képek hat elektróda konfiguráció esetére

7. modell



II.5.7 ábra: A 7. modell és hozzá tartozó zajmentes és a zajjal terhelt adatokból kapott invertált képek hat elektróda konfiguráció esetére

8. modell



II.5.8 ábra: A 8. modell vizsgált része és hozzá tartozó zajmentes és a zajjal terhelt adatokból kapott invertált képek hat elektróda konfiguráció esetére

A **2. modell** esetében (mikor jólvezető felszíni lemez és felszínközeli inhomogenitás is jelen van), a zajos esetben a modelltest által okozott anomália már korántsem szeparálható el olyan jól. A P-P elrendezés gyakorlatilag használhatatlan ebben az esetben. A többi elrendezés számára a ható vertikális lehatárolása tűnik a legnagyobb problémának. A horizontális lehatárolást tekintve a Stummer és a P-DP konfigurációk a legjobbak. A Stummer elrendezés kivételével félrevezető módon, egy többé-kevésbé horizontális lemez látszik az invertált képeken. A zajmentes esetben nehéz eldönteni, hogy a Wenner- α , a P-DP vagy a Stummer konfiguráció-e a legjobb. A zajos esetben azonban a Dp-Dp és a Stummer elrendezések szolgáltatják a legjobb képeket. Itt is a Stummer elrendezést lehetne a leginkább ajánlani.

3. modell, zajmentes eset: a modellt minden elrendezés detektálta, de vertikális lehatárolásuk bizonytalansága (főleg a legkisebb mélységben lévő test alatt) bonyolulttá teheti az értelmezést. Ez a bizonytalanság a legkevésbé a Dp-Dp és a Stummer konfigurációk esetében szembetűnő; így módon ezek a legjobbak a kimutathatóságot tekintve. Felbontóképesség tekintetében a Stummer, a Wenner- β és a P-DP elrendezéseket kell megemlíteni. Meglepő, hogy a Stummer, a Dp-Dp, a P-DP és a PP konfigurációk esetében a zajos adatokból kapott kép jobbnak tűnik, mint a zajmentes: az álanomáliák kevésbé zavaróak ebben az esetben. A 3. modell esetében a Dp-Dp, a Stummer és a P-DP konfigurációk a legjobbak.

4. modell (a 3. modell “mély” változata): a kimutathatóság javul, de a felbontóképesség romlik. Zajmentes adatoknál a Stummer és a Wenner- β elrendezések által produkált kép a legjobb. A zajos adatokból nyert kép valamivel rosszabb a PP elrendezés kivételével. Ezen modell esetére a Stummer és a PP elrendezések használata ajánlható.

5. modell: ismételten a lenyúló rezisztív anomália a legproblémásabb jelenség. A Dp-Dp és a Stummer konfigurációk azonban kilógnak a sorból, mivel azok mentesek ettől a hatástól és azok vízszintes felbontóképessége is elég jó. Zajjal a Dp kép valamennyire romlik, így megint csak a Stummer elrendezés a leginkább ajánlható.

6. modell: már a zajmentes esetben is jelentősen leromlott a Wenner- α , Wenner- β és P-P kép, és a Stummer és P-Dp képek is romlottak. A Dp-Dp kép ugyanakkor még hasonló minőségű, mint az 5. modell esetében. Az utóbbi három konfigurációval könnyebb az inhomogenitások elkülönítése. A zajos adatokból nyert képek ismételten néhány esetben még némileg meggyőzőbbek is a zajmenteseknél.

7. modell: A Dp-Dp és a Stummer elrendezések kivételével a kapott képek meglehetősen félrevezetőek. A zajos Stummer kép itt kevésbé használható, mint zajmentes. Ezen modell esetében a Dp, illetve a Stummer elrendezés használata ajánlott.

8. modell: a legbonyolultabb modell esetében az aljzat topográfiáját a P-P kivételével minden elrendezés elég jól visszaadja, de a modell kis-ellenállású része (repedés, víznyelő) csak a Stummer képeken látszik. A nagy ellenállású üreg (a második “repedés” alatt balról jobbra haladva) a Stummer képen látszik a legjobban a zajjal terhelt esetben.

II.5.1 táblázat: A hat különböző elrendezéssel kapott invertált képek minősége a nyolc modell esetére.
A * arra utal, hogy az adott paraméter irreleváns (10 a legjobb, 0 a legrosszabb)

a modell száma	zajszint	elrendezés típus	1. kimutathatóság és pozicionálás	2. geometria	3. felbontás	1, 2 és 3 átlaga	ajánlott elrendezés
1. modell	0%	Wenner- α	10	8	*	9,0	Wenner-α
		Wenner- β	10	8	*	9,0	Wenner-β
		PP	10	7	*	8,5	
		P-Dp	10	8	*	9,0	P-Dp
		Dp-Dp	10	8	*	9,0	Dp-Dp
		Stummer	10	8	*	9,0	Stummer
	5%	Wenner- α	3	1	*	2,0	
		Wenner- β	8	4	*	6,0	
		PP	10	6	*	8,0	
		P-Dp	9	7	*	8,0	
		Dp-Dp	10	9	*	9,5	Dp-Dp
		Stummer	9	9	*	9,0	Stummer
2. modell	0%	Wenner- α	7	8	*	7,5	Wenner-α
		Wenner- β	6	5	*	5,5	
		PP	0	0	*	0,0	
		P-Dp	8	7	*	7,5	P-Dp
		Dp-Dp	6	6	*	6,0	
		Stummer	8	6	*	7,0	Stummer
	5%	Wenner- α	0	0	*	0,0	
		Wenner- β	7	5	*	6,0	
		PP	2	2	*	2,0	
		P-Dp	4	3	*	3,5	
		Dp-Dp	9	8	*	8,5	Dp-Dp
		Stummer	9	8	*	8,5	Stummer
3. modell	0%	Wenner- α	5	6	2	4,3	
		Wenner- β	6	6	3	5,0	
		PP	6	4	3	4,3	
		P-Dp	6	5	3	4,7	
		Dp-Dp	9	7	1	5,7	Dp-Dp
		Stummer	8	6	4	6,0	Stummer
	5%	Wenner- α	2	2	0	1,3	
		Wenner- β	4	4	3	3,7	
		PP	8	8	2	6,0	
		P-Dp	9	9	6	8,0	P-Dp
		Dp-Dp	10	8	5	7,7	Dp-Dp
		Stummer	9	9	7	8,3	Stummer
4. modell	0%	Wenner- α	8	4	0	4,0	
		Wenner- β	10	8	0	6,0	Wenner-β
		PP	7	8	0	5,0	
		P-Dp	7	9	0	5,3	
		Dp-Dp	9	7	0	5,3	
		Stummer	10	9	0	6,3	Stummer
	5%	Wenner- α	3	2	0	1,7	
		Wenner- β	9	6	0	5,0	Wenner-β
		PP	8	8	0	5,3	PP
		P-Dp	6	4	0	3,3	
		Dp-Dp	8	5	0	4,3	
		Stummer	9	8	0	5,7	Stummer

a modell száma	zajszint	elrendezés típus	1. kimutathatóság és pozicionálás	2. geometria	3. felbontás	1, 2 és 3 átlaga	ajánlott elrendezés
5. modell	0%	Wenner- α	8	7	0	5,0	
		Wenner- β	9	8	3	6,7	Wenner-β
		PP	9	8	1	6,0	
		P-Dp	8	7	1	5,3	
		Dp-Dp	10	8	3	7,0	Dp-Dp
		Stummer	10	10	5	8,3	Stummer
	5%	Wenner- α	7	6	2	5,0	
		Wenner- β	9	8	0	5,7	
		PP	6	7	0	4,3	
		P-Dp	6	6	1	4,3	
		Dp-Dp	7	5	2	4,7	
		Stummer	10	9	4	7,7	Stummer
6. modell	0%	Wenner- α	1	0	0	0,3	
		Wenner- β	0	0	0	0,0	
		PP	5	4	0	3,0	
		P-Dp	7	4	2	4,3	P-Dp
		Dp-Dp	1	1	0	0,7	
		Stummer	5	5	2	4,0	Stummer
	5%	Wenner- α	2	2	0	1,3	
		Wenner- β	5	5	0	3,3	
		PP	4	4	0	2,7	
		P-Dp	4	4	0	2,7	
		Dp-Dp	6	6	0	4,0	Dp-Dp
		Stummer	4	4	0	2,7	
7. modell	0%	Wenner- α	4	4	*	4,0	
		Wenner- β	2	2	*	2,0	
		PP	4	2	*	3,0	
		P-Dp	2	1	*	1,5	
		Dp-Dp	10	8	*	9,0	Dp-Dp
		Stummer	10	7	*	8,5	Stummer
	5%	Wenner- α	2	2	*	2,0	
		Wenner- β	7	2	*	4,5	
		PP	3	2	*	2,5	
		P-Dp	6	2	*	4,0	
		Dp-Dp	10	8	*	9,0	Dp-Dp
		Stummer	9	6	*	7,5	Stummer
8. modell	0%	Wenner- α	4	5	4	4,3	
		Wenner- β	4	4	6	4,7	
		PP	3	3	3	3,0	
		P-Dp	5	5	5	5,0	
		Dp-Dp	5	4	3	4,0	
		Stummer	7	7	7	7,0	Stummer
	5%	Wenner- α	3	3	1	2,3	
		Wenner- β	6	6	6	6,0	Wenner-β
		PP	3	3	1	2,3	
		P-Dp	5	4	2	3,7	
		Dp-Dp	10	7	5	7,3	Dp-Dp
		Stummer	6	6	6	6,0	Stummer

II.5d. Értelmezés

A β -típusú konfigurációk (Dp-Dp, Wenner- β és P-Dp) hatékonyabbnak bizonyultak, mint a Wenner- α és a PP (lásd **II.5.1 táblázat**). Ennek fényében egyáltalán nem meglepő, hogy a Stummer konfiguráció jobbnak bizonyult minden hagyományos elrendezésnél, mivel az első 669 elrendezés, amit tartalmaz β -típusú elrendezés.

A Stummer konfiguráció jobb teljesítőképessége abban is megnyilvánul, hogy nagyobb mélységekben is realisztikus képet ad. Ez egyszerű konzekvenciája annak, hogy a Stummer konfiguráció számos olyan elrendezést tartalmaz, amik KimM-e nagy. Ha azonban ez emiatt van, akkor miért ne fontolhatnánk meg a β -típusú konfigurációknál is nagyobb KimM-ű γ_{m11n} elrendezések beépítését is az optimalizált rendszerekbe (II.4 fejezet)?

Érdemes megjegyezni, hogy fenti **vizsgálatok eredményeihez** hasonlóan **a KimM vizsgálatokban is (II.3 fejezet) a Dp-Dp, a Wenner- β és a P-Dp elrendezések bizonyultak a legjobbaknak. Ez megerősíti a feltételezésem, hogy a geoelektromos leképezés kulcsparamétere a KimM.**

II.5e. Konklúziók

Nyolc 2D modellből számított majd zajjal is terhelt adatainak inverziójából nyert invertált képeket vettem össze hat különböző elektróda konfiguráció esetére. Az invertált képeknek az eredeti modellel való összehasonlítására egy minősítési rendszert hoztam létre, ami alapján a következőket állíthatjuk:

- Az inverzió minőségét meghatározó legfontosabb paraméter a modell kimutathatósága.** Minden további paraméternek ez az alapja.
- A hagyományos elrendezések közül a β -típusúak (Dp-Dp, P-Dp és Wenner- β) hatékonyabbnak bizonyultak, mint a Wenner- α és a P-P elrendezések és a DP elrendezés sokkal hatékonyabb volt, mint bármely más vizsgált hagyományos elrendezés (II.5.2 táblázat).**
- Az optimalizált Stummer konfiguráció sokkal hatékonyabb volt majdnem minden modell esetében, mint a hagyományos elrendezések mind zajmentes, mind zajos adatok esetén.** Egyedül a Dp elrendezés volt valamennyire versenyképes vele (II.5.2 táblázat). **Mivel ez még bonyolultabb modellek esetére is igaz, a Stummer elrendezés mindenféle terepi körülmények között ajánlható, szükségtelenné téve a modellfüggő elrendezés választást.**
- Kimutattam, hogy a leképezés minőségét döntően meghatározza adott elrendezés KimM értéke.**

II.5.2 táblázat: A különböző konfigurációk használhatósága a II.5.-8 ábrán látható modellek esetére

elrendezés típus	m1 0%	m1 5%	m2 0%	m2 5%	m3 0%	m3 5%	m4 0%	m4 5%	m5 0%	m5 5%	m6 0%	m6 5%	m7 0%	m7 5%	m8 0%	m8 5%	teljes szám
Wenner- α	x		x														2
Wenner- β	x						x	x	x							x	5
PP								x									1
P-Dp	x		x			x					x						4
Dp-Dp	x	x		x	x	x			x			x	x	x		x	10
Stummer	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	15

III. A egyvonalú null-elrendezések

Szalai et al. (2004) alapján

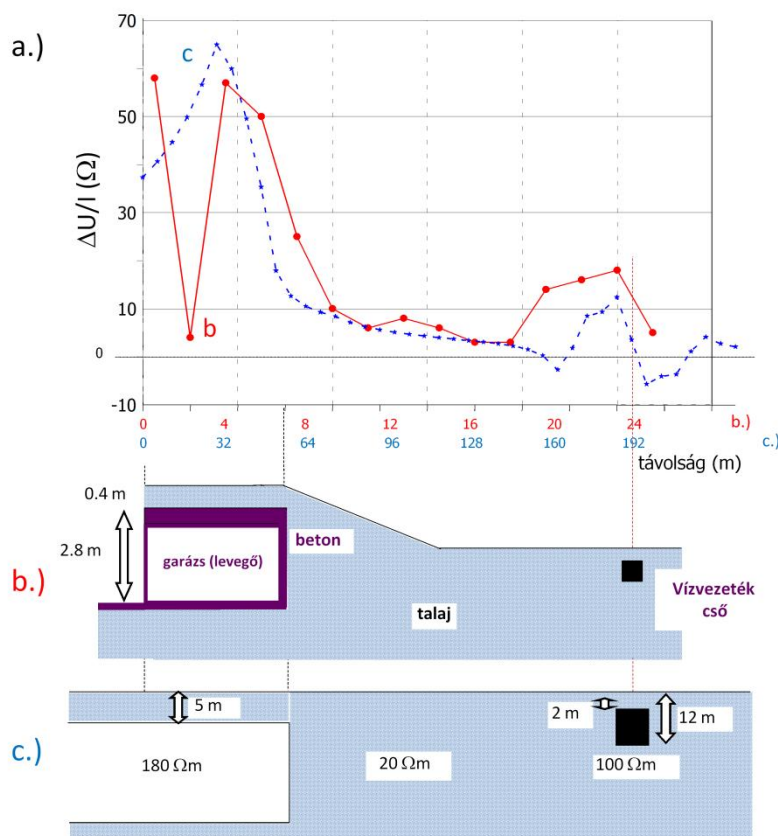
Az egyvonalú null-elrendezéseket csak annyira tárgyalom részletesen, amennyire azt az értekezés fókuszában álló γ_{11n} elrendezések tanulmányozása megkívánja. Kikerülhetetlen ugyanakkor az áttekintésük a dolgozat jelen pontján, mert **ezek az elrendezések képezték a hidat a kvázi null-elrendezések, így a γ_{11n} elrendezések megalkotása felé, és azok megértésében is kulcsszerepet játszanak.**

Amint azt a *II.1. fejezetben* tárgyaltuk, **két szimmetriatulajdonságokkal rendelkező egyvonalú null-elrendezés létezik: a MAN és a γ_{null} elrendezések.** Mindkét elrendezés többször előkerült már a korábbiakban. Az elrendezések osztályozása során a *II.1.3. ábrán* 21., illetve 9. elrendezésként láthatóak, bár ott a MAN „középpontos null-elrendezés” néven szerepel. Mint a null-elrendezés stratégiát követő elrendezések, ezek szerepelnek a *II.1.13* és a *II.1.14 ábrákon* is. A *II.1.12 ábrán* a MAN elrendezés, mint a γ_{11n} elrendezés-sorozat szélső esetévan feltüntetve. Többek között ez is indokolja a MAN elrendezés diszkusszióját. Részletesebben itt is csak a MAN elrendezéssel foglalkozom, a γ_{null} elrendezés csak érintőlegesen kerül szóba.

A MAN elrendezés PÉT-ei a *II.2.11 ábrán* láthatóak. Jól láthatóan azok a középső elektródán átmenő, az elrendezés vonalára merőleges antiszimmetria tengellyel rendelkeznek. Ennek köszönhetően a **KuM nem értelmezhető** a MAN elrendezés esetében, mivel az MK függvény értéke minden mélységben nulla ugyanúgy, ahogy azt a *II.2d fejezet 2a pontjában* a D_p -ax elrendezés kapcsán tárgyaltuk. Mivel a geometriai faktor végtelen volta miatt előremodellezés sem hajtható végre a MAN elrendezéssel, ezért annak **KimM-e sem értelmezhető.** Ugyanígy nem is invertálhatóak a MAN eredmények, így a *II. 5. fejezetben* ismerttetettnek megfelelő összehasonlításba sem volt bevehető ez az elrendezés.

Már a fentiekből is látszik, hogy **a MAN elrendezés esetében a geometriai koeficiens végtelen értéke számos problémához vezet. Ezt az elrendezést már emiatt is teljesen máshogy kell kezelni, mint a nem-null-elrendezéseket. Méréseket minden további nélkül végre lehet hajtani ezzel az elrendezéssel is, de el kell kerülni a geometriai faktorról való szorzást. Esetükben ezért a $\Delta U/I$ mennyiség meghatározása és ábrázolása ajánlott, ahogy az pl. az *III.1 ábrán* is látható, ahol a piros görbe mutatja a mért értékeket. Jóllehet az így kapott profilokból/szelvényekből **fajlagos ellenállás értékek nem számíthatóak, a $\Delta U/I$ értékek segítségével inhomogenitások kiválóan detektálhatóak lehetnek, ahogy az ezen az ábrán is látszik.** A mért profil mind a garázst, mind pedig a vízvezetékcsövet tökéletesen megjelenítette. Fel kell hívni a figyelmet arra, hogy ezeket a méréseket mindenféle különösebb elővigyázatosság nélkül, ugyanúgy hajtottam végre, mintha bármely más ET mérést végeztem volna, azaz **semmilyen külön figyelmet nem fordítottam az elektródák pontos pozicionálására.** Ezt azért kell hangsúlyozni, mert **a legtöbb aggodalom a null-elrendezések használatával kapcsolatban abból adódik, hogy az elektróda pozicionálási hibák olyannyira eltorzíthatják a mérési eredményeket, hogy azok használhatatlanok lesznek.** Ahogy azt az *III.1 ábrán* láthatjuk, **a jelek** (0-8 m és 18-25 m-en a felső, terepi skálán) **tökéletesen elkülönülnek a háttérértékektől** (8-18 m-en). Látnunk kell, hogy a vízvezeték anomália nincs elcsúszott helyzetben, csak az plusz-mínusz kettős anomáliával**

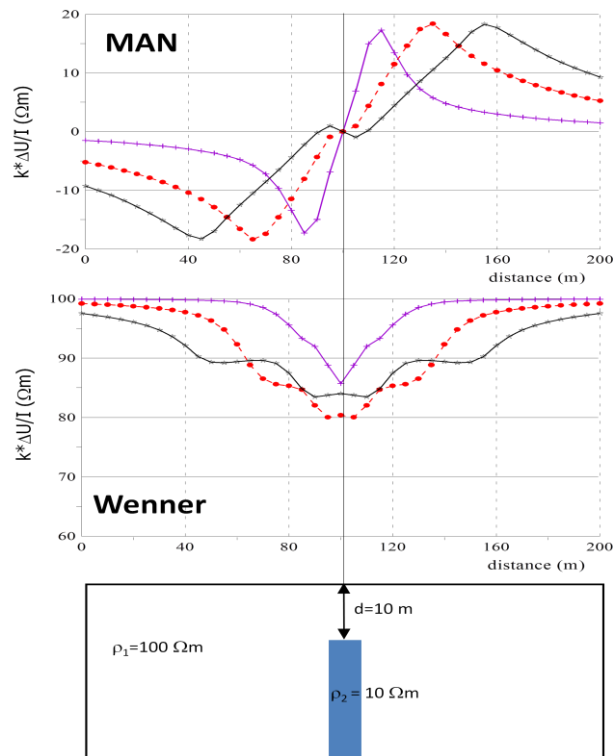
jelentkezik (hasonlóan az *III.2 ábrán* látotthoz), aminek teljes kimérését a terepi viszonyok nem tették lehetővé, így csak a pozitív fele látszik. Szintén meg kell említenem, hogy fenti méréseket egy nagyváros (Strassburg) közepén végeztük (Szalai et al., 2004), mégsem rontotta el az eredményeket a zajos környezet sem. Ennek alapján **megalapozottnak tekintem, hogy a MAN elrendezés eredményesen használható terepi mérésekre, annak segítségével pl. detektálhatóak felszín alatti ellenállás inhomogenitások.**



III.1 ábra: Földalatti garázs felett MAN elrendezéssel végrehajtott terepi tesztmérés. a.) A mért (piros folytonos görbe) és a modellezett (kék szaggatott görbe) értékek. b.) A teszt helyszínének vertikális metszete. c.) A 2D modell

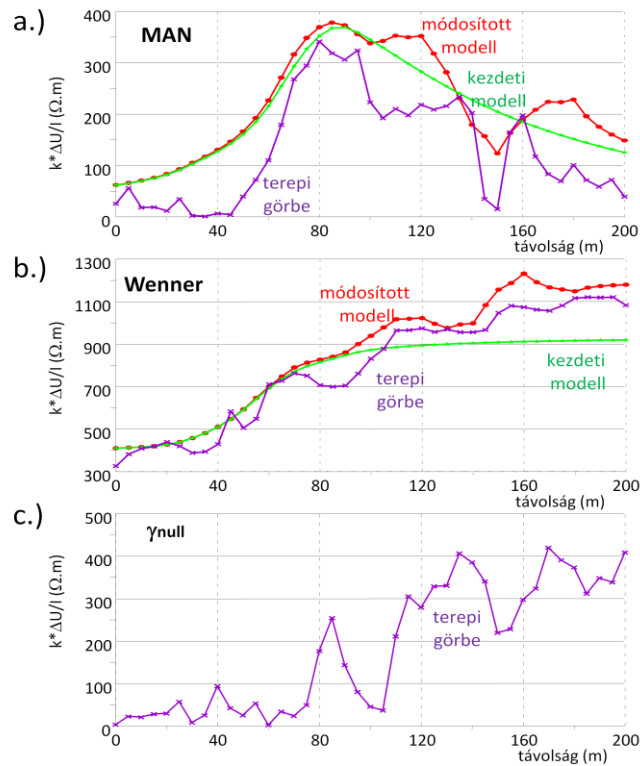
Az előző állításomat megerősítendő lássuk a *III.3 ábrát* is. Az ott bemutatott profilt egy vetődéses szerkezet felett mértem (Szalai et al., 2004). Az ellenállás-átmenet jól látható a Wenner elrendezéssel mért profilon (*III.3b ábra*; a vetődés kb. 60 m-nél van). A **MAN elrendezés** által produkált átmenet azonban annál sokkal élesebb (*III.3a ábra*), és **a jel/zaj arány ismételten nagyon jónak bizonyult**. A „zaj” nem haladja meg az 50 Ω értéket, szemben a jel 300 Ω fölötti értékével. Azért is beszélek „jelről”, mert az **a MAN elrendezés esetében nem egy fizikailag értelmezhető érték**, hiszen az a $\Delta U/I$ értéknek a Wenner elrendezés k geometriai koefficiensével való szorzatát mutatja. Célszerű viszont egy ilyen értéket képezni azért, mert így a Wenner esetében kapott (valóban) fajlagos ellenállás értékek összevethetőek a MAN elrendezéssel kapott értékekkel. **A MAN értékek láthatóan számottevően kisebbek, de ez semmiféle hátrányt nem jelent az eredményre nézve.** A zaj szót pedig azért tettem idézőjelbe, mert nyilván arra sincs garancia, hogy a 0-40 profilméter

tartományban ne lennének inhomogenitások (még ha azok számunkra nem is bírnak értékkel esetleg, s ezért zajként kezeljük), így az ott mért értékek a zaj felső becslését jelentik. Jól látható, hogy a vetőtől távolodva a profil mindkét végén közelítenek a MAN értékek a nulla felé, ahogy homogén, sőt 1D rétegsor felett is a MAN elrendezés esetében annak lennie kell. A γ_{null} elrendezés esetében (III.3c ábra) is nagyon jó jel/zaj arányt és szintén éles, a hatóhoz köthető változást kaptam. Összességében tehát a **MAN elrendezés** ezen, az előzőtől teljesen eltérő terepi viszonyok között is tökéletesen működött, sőt az éles átmenet miatt az a ható pozíciójának sokkal pontosabb becslésére alkalmas, mint a Wenner elrendezés.



III.2 ábra: Numerikus modellezés eredményei dyke ható felett 20 m, 40 m és 60 m hosszúságú (sorra lila, piros és fekete színekkel) MAN és Wenner elrendezésekkel

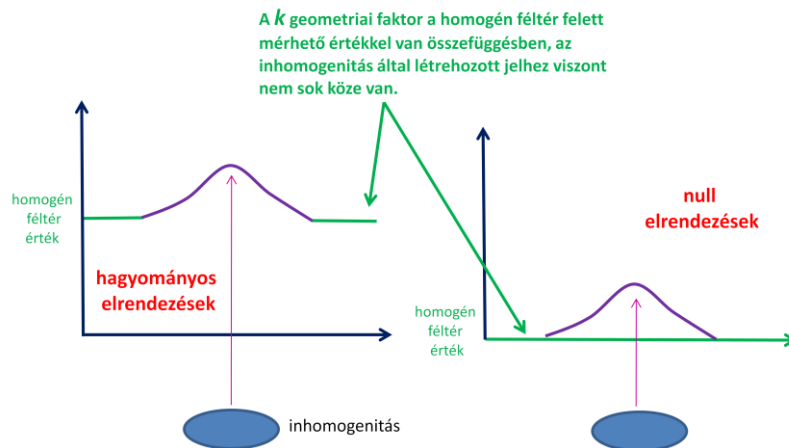
Mindezek alapján kijelenthető, hogy **indokolatlannak tekinthető az elektróda pozicionálási hibákhoz kötődő aggodalom**. Természetesen pontosabb pozicionálás – főleg kritikus helyzetekben – hasznos lehet és a MAN elrendezés hatékonyságát még tovább javíthatja, de ez a helyzet minden egyes elrendezés esetében fennáll. Az elektróda pozicionálási hibáktól való félelem elsősorban onnan fakadt, hogy a „hibás” elektróda pozíciókkal kapott értékeket a homogén feltér felett kapott értékhez szokás viszonyítani, ami a null-elrendezések esetében nullával való osztást jelent. Ennek a következményét nem kell magyarázni. Ezzel szemben, ami - véleményem szerint - **döntő, az a jel/zaj arány**, ami viszont a terepi tapasztalatok alapján egyáltalán **nem bizonyult rosszabbnak a MAN elrendezés, mint a hagyományos-, azaz nem-null-elrendezések esetében**.



III.3 ábra: Finnországban mért és modellezett görbék. a) MAN. b) Wenner. c) γ_{null} elrendezéssel mérve (Szalai et al. 2004)

A nem-null-, és a null-elrendezések működése közötti különbség megértéséhez lássuk az **III.4. ábrát!** Jól láthatóan **az alapvető különbség** az, hogy a számunkra általában érdekes, a horizontális irányú ellenállás-változásokból eredő jel előbbieket esetében a homogén feltér felett mérhető jelre tevődik rá, míg a null-elrendezés esetében az önállóan jelenik meg, mivel a homogén feltér felett elméletileg nulla jelet kell mérnünk. Ezért hívták korábban a módszert „**tiszta anomália**” (pure anomaly; Tarkhov, 1957) **módszernek** (lásd a különböző elrendezések megalkotása során használt stratégiákat, **II.1.2 ábra**). Megfelelő inhomogenitás esetén képződik olyan nem-nulla jel, ami az adott null-elrendezés számára mérhető. Azt pedig, hogy ennek milyen inhomogenitásnak kell lennie, az adott elrendezés PÉT-ének antiszimmetria viszonyai szabják meg (**II.2.5 ábra**).

Amennyiben számunkra ezek az inhomogenitások az érdekesek, akkor a null-elrendezések nagy segítségünkre lehetnek megismerésükben. Példának okáért **a MAN elrendezés alkalmasabb lehet vízszintes irányú ellenállásváltozások detektálására és azok pontos lokalizálására, mint a nem-null-elrendezések.** A fent bemutatott példák mellett Szalai et al. (2002) és Falco et al. (2012) terepi mérésekkel bizonyította, hogy a null-elrendezések jobbak például repedések lokalizálásában és azok irányának meghatározásában, mint a hagyományos elrendezések.



III.4 ábra: A hagyományos-, és a null-elrendezések jelének eredete

Fentiek alapján nem mondhatnánk, hogy értelmetlen lenne a null-elrendezések, köztük a MAN elrendezés használata, de kétségtelen, hogy az számos nehézséggel jár:

- A szimmetrikus egyvonalú null-elrendezések közül egyedül a MAN elrendezés építhető be a sokelektrodás rendszerekbe.
- A MAN elrendezés esetében komoly problémát jelent **a végtelen elektróda kezelése** mind numerikusan, mind a terepi mérések kivitelezésében.
- Komoly hátránya a null-elrendezéseknek, hogy az azokkal mért értékek nem invertálhatóak, így azok ellenállás-szelvényekké nem alakíthatóak át.

Felvetődött bennem, hogy mindezen problémák **kiküszöbölhetőek lehetnek** olyan elrendezések használatával, amik a MAN elrendezéshez hasonlóak ugyan, de amelyeknél a „végtelenben” lévő elektróda nincs a végtelenben. Ezeket az elrendezéseket ugyan *Loke* (1999) „non-viable”, azaz **életképtelen elrendezéseknek tartotta**, de erről a MAN elrendezéssel szerzett tapasztalataim birtokában egyáltalán nem voltam meggyőződve. Ezért kezdtem el tanulmányozni **a γ_{1in} elrendezéseket**. Ezeknek az elméletét és a velük kapcsolatos kutatási eredményeimet a következő fejezettől kezdve ismertetem.

IV. A kvázi null-elrendezések

IV.1. Bevezetés

A γ_{11n} elrendezésekhez úgy jutottam el, hogy **elkerülendő a „végtelenben lévő” elektródával járó gyakorlati bonyodalmakat** felvetődött bennem, miért ne lehetne azt is az ET rendszer részévé tenni. Természetesen amennyiben ezen elektróda távolsága nem végtelen, az elrendezés **nem lesz többé null-elrendezés**, de érdekesnek látszott megvizsgálni, mi történik ebben az esetben. Rendhagyó módon az ezeket ábrázoló ábrát itt még egyszer szerepeltetem fontossága miatt és azért, hogy ne kelljen hosszasan visszalapozni érte (IV.1.1, korábban II.1.12 ábra).

Ahhoz, hogy **a lehető legközelebb legyünk** az eredeti **MAN elrendezéshez** célszerű az utolsó potenciálektródát olyan **messze elhelyezni** a többi elektródától, amennyire csak az lehetséges. Ennek azonban az ET esetében a korlátozott számú elektróda miatt felső korlátot szab, hogy amennyiben a távoli elektróda túl messze van, a mérhető pontok száma nagyon kicsi lesz. **Kompromisszumként** ezért legnagyobb n értéknek maximum 6-ot, esetleg 8-at érdemes venni, utóbbit főleg akkor, ha legalább 72 elektróda alkotja a mérő rendszert. (n azt mutatja meg, hogy a legtávolabb eső elektródának a szoszédjához viszonyított távolsága hányszorosan haladja meg a többi elektróda egymástól mért távolságát.)

Mivel az így kapott elrendezés nem tekinthető már null-elrendezésnek, de homogén feltér felett ez is sokkal kisebb jelet ad, mint a hagyományos elrendezések, ezeket az elrendezéseket **kvázi-null-elrendezéseknek** neveztem. Mivel n értékének csökkentésével fokozatosan közelíthetünk egy hagyományos elrendezés, a Wenner- γ elrendezés felé, célszerűnek tűnt a MAN és a Wenner- γ , azaz **a null-, és a hagyományos elrendezések közötti teljes átmenet megvizsgálása**, amit a fokozatosan csökkenő n értékű elrendezések tesznek lehetővé. Ezeket az elektródák közötti távolságoknak megfelelően γ_{11n} elrendezéseknek neveztem, utalva arra, hogy az első két elektródátávolság megegyezően egységnyi, míg az utolsó ezek n -szerese.

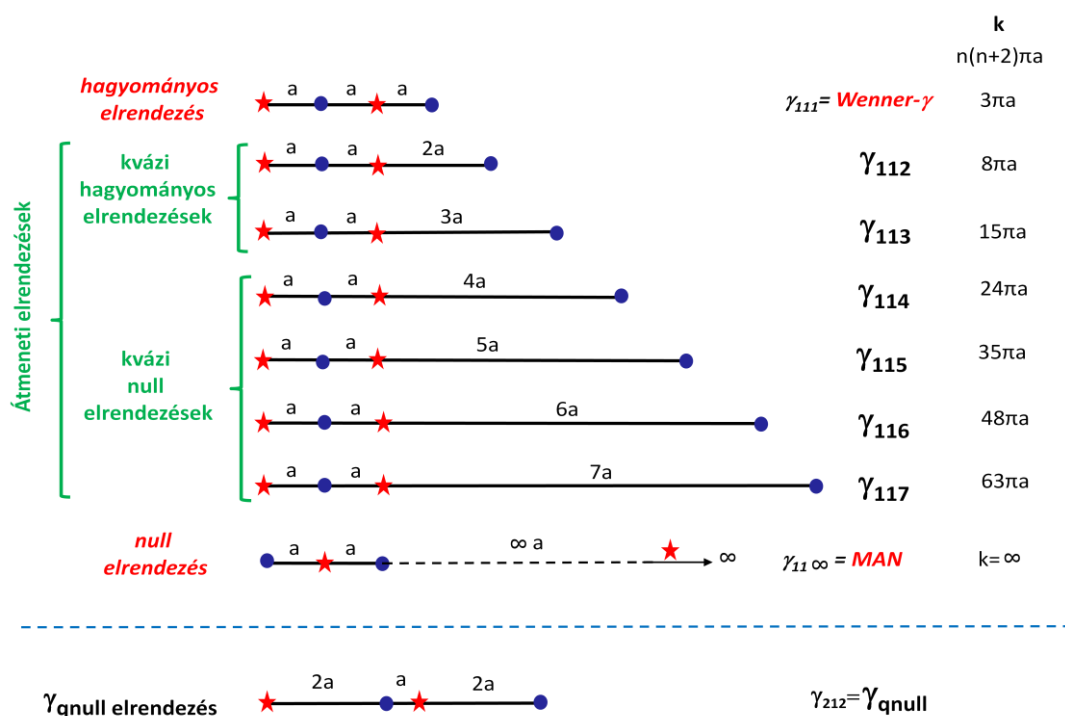
A γ_{11n} elrendezések sorozatának ($n=1-8$) vizsgálatától **azt vártam, hogy látható lesz az átmenet a hagyományos elrendezésektől a null-elrendezések felé**, ami által maguk a null-elrendezések is jobban érthetőekké válnak. Emellett reméltem azt is, hogy **ezek eredményei egymást is ki fogják egészíteni**. (Az átmenetinek tekinthető zónákban történő kutatások nem jellemzőek, de azért vannak rá példák: pl. *Takács és Pethő, 2008*)

Miután ezeknek az elrendezéseknek a használhatósága felvetődött, kézenfekvő volt, hogy a II. fejezetben elvégzett vizsgálatokat a γ_{11n} elrendezésekre is elvégezzem. A γ_{118} elrendezések **PÉT-ei** a II.2.12 ábrán láthatóak (ott még kvázi MAN néven szerepelt). Ezek természetesen nagyban hasonlítanak a MAN elrendezés PÉT-eihez (II.2.11 ábra), így várható volt, hogy a γ_{118} és így a többi nagy n értékű γ_{11n} elrendezés sok más szempontból is a MAN elrendezéshez hasonlóan fog viselkedni.

A II.3 fejezetben megmutattam, hogy γ_{11n} elrendezések **kutatási mélység értékei $n=4$ felett nagyobbak, mint a legjobb egyéb négyelektródás elrendezése**. Talán még nagyobb jelentőségű a γ_{11n} elrendezéseknek az a tulajdonsága, hogy **KimM értékük ($n \geq 2$ esetén) szisztematikusan, hatótól függetlenül nagyobb, mint akár a legjobb hagyományos elrendezéseké, és a különbség akár 2-3-szoros is lehet** (II.4 fejezet). Ezt annak fényében még jelentősebbnek vélem, hogy a II.4 fejezetben leírtak (valamint Szalai et al., 2013) szerint

általában a nagyobb KimM értékkel rendelkező elrendezések leképezési minőség tekintetében is jobbnak bizonyultak.

Magától adódott volna ezek után, hogy a *II.4 fejezetben* leírt vizsgálatokat is végezzük el a γ_{11n} elrendezésekkel is. Ezt jó lett volna mindenki által elérhető kereskedelmi szoftverrel végrehajtani, azonban a rendelkezésemre álló RES2DMOD (Version 2.2) szoftver (Loke, 1999) erre a célra egyáltalán nem volt alkalmas, az EarthImager 2D (Version 2.1.7) szoftver (Advanced Geosciences, Inc., 2006) pedig korlátozásokkal, csak bizonyos hatók numerikus vizsgálatára bizonyult alkalmazhatónak. A *IV.2 fejezetben* az így kapott eredményeket ismertetem.



IV.1.1 (korábban II.1.12) ábra: A γ_{11n} és γ_{qnull} elrendezések. Csillaggal jelölve az áram-, teli körrel a potenciál-elektrodák.

IV.2. A kvázi null-elrendezések numerikus vizsgálata

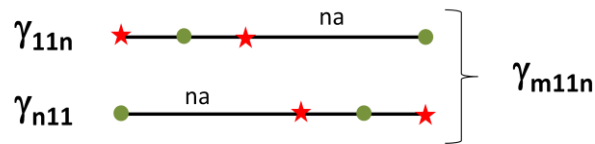
Szalai et al. (2013) és Szalai et al. (2015) alapján

IV.2a. Az elrendezések tükrözésének jelentősége

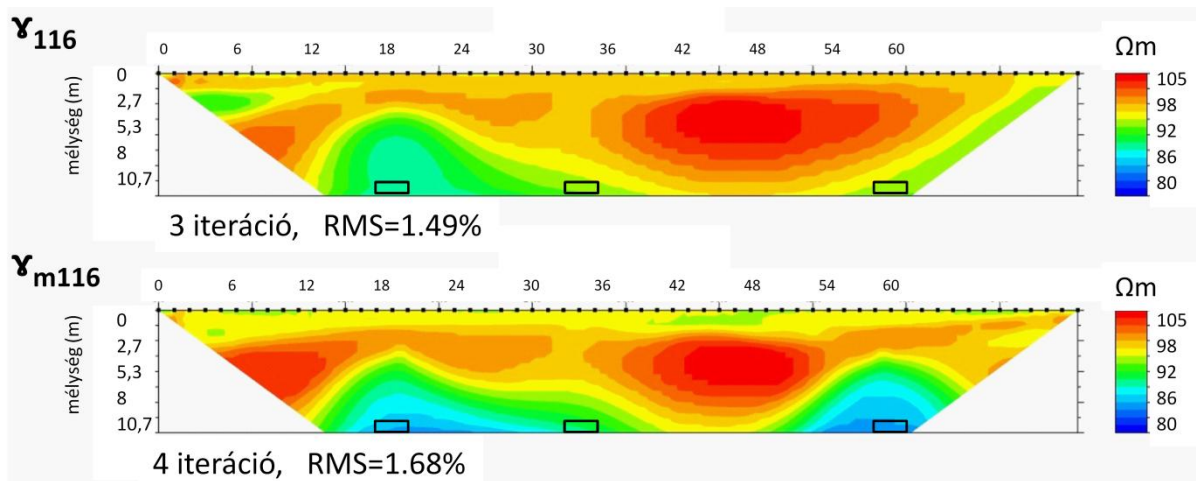
Mielőtt belevágnánk a numerikus eredmények ismertetésébe meg kell indokolnom, hogy miért fogunk a következőkben a γ_{11n} elrendezések mellett tükrözéssel kialakított párjukkal, a γ_{n11} elrendezéssel is foglalkozni. Ennek oka az, hogy a γ_{11n} - γ_{n11} elrendezéspárral végrehajtott mérések jobb eredményeket szolgáltatnak, mint ha csak az elrendezések egyikével mérnénk. Ezt a későbbiekben több példával is bizonyítom. Az egyszerűség kedvéért a továbbiakban erre az elrendezéspárra γ_{m11n} (illetve **tükrőrpár**) **elrendezésként** (*m*-mirrored) fogok hivatkozni.

Elsőként a *IV.2.3 ábrával* szándékozom illusztrálni a nyereséget, amivel a γ_{m11n} elrendezés használata jár. Az ábrán három kis keresztmetszetű, kis fajlagos ellenállású ($10 \Omega\text{m}$ a $100 \Omega\text{m}$ -es fajlagos ellenállású féltérben) hasábból álló modell felett γ_{116} , illetve γ_{m116}

elrendezésekkel kapott képeket mutatunk be. Jól látható, hogy a γ_{116} elrendezést annak tükörképével (a γ_{611} elrendezéssel) közösen alkalmazva kapott γ_{m116} elrendezéssel nyert kép sokkal jobban el tudta választani egymástól a három hatót. Különösen a jobb oldali ható különül el látványosan, de a középső ható elkülönülése is látványosabb a γ_{m116} , mint a γ_{116} elrendezéssel.



IV.2.2 ábra: A γ_{11n} elrendezés és annak tükrözött változata, a γ_{n11} együtt adják a γ_{m11n} elrendezést. A méréseket mind a γ_{11n} , mind pedig a γ_{n11} elrendezéssel végre kell hajtani, majd a mért értékeket együtt feldolgozni.

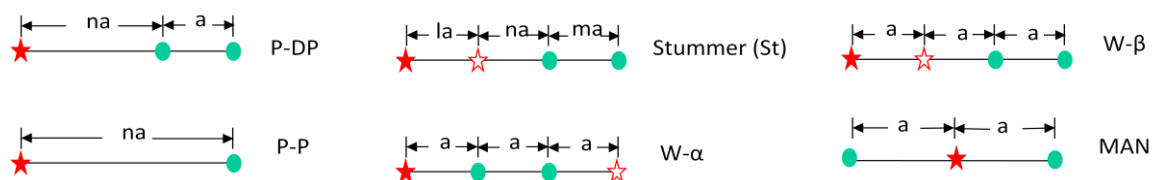


IV.2.3 ábra: A tükörpár elrendezés használatának előnye a “szimpla” elrendezéssel szemben. A kis téglalapok a 10 Ωm -es ellenállású modelltesteket jelölik a 100 Ωm -es feltérben.

A γ_{m11n} elrendezésekkel végrehajtott további **modellvizsgálatok is arra vezettek, hogy a leképezés minőségét tekintve a γ_{m11n} tükörpár elrendezés akár jelentősen jobb is lehet az eredeti γ_{11n} elrendezésnél.** Ez legszembetűnőbben a mélyebben lévő hatók esetén következett be. Fentiek ellenére a kvázi null-elrendezésekkel végzett vizsgálatok e korai fázisában a γ_{m11n} elrendezésekkel kapott eredmények mellett indokoltnak tartom az egyes modellek esetén még a γ_{11n} elrendezésekkel kapott képeket is bemutatni. Megjegyzendő továbbá, hogy Candansayar (2008) hasonló megoldást alkalmazott a P-DP elrendezések esetén. A kép minőségének javulása elsősorban annak következménye, hogy a tükrözött elrendezésekkel is végrehajtott mérések esetén a szelvény mindkét oldaláról vannak adatok. Meg kell jegyezni, hogy a tükrözés ötlete volt PhD tanítványom, Szokoli Kitti érdeme.

IV.2b. A kvázi null-, és hagyományos elrendezésekkel végrehajtott numerikus vizsgálatok eredményei

A IV.2.4 ábrán bemutatom azokat a hagyományos elrendezéseket, amiket a numerikus vizsgálatok során használtam.



IV.2.4 ábra: A numerikus vizsgálatok során használt elrendezések

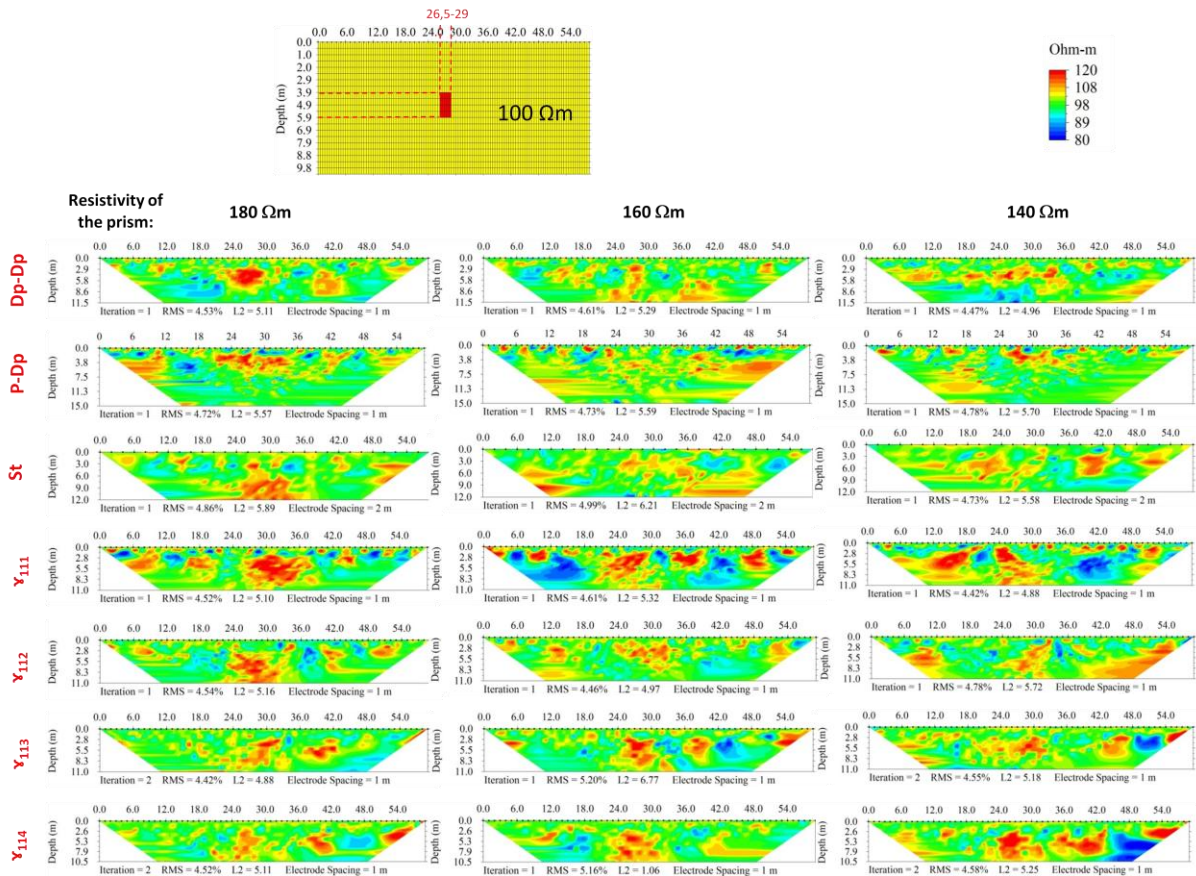
A II.4 fejezetben (és Szalai *et al.*, 2013-nál) bemutatott KimM vizsgálatok és Szalai *et al.* (2004) a MAN elrendezéssel kapcsolatos vizsgálatai is arra utalnak, hogy a γ_{11n} elrendezések elsősorban akkor lehetnek hatékonyabbak a hagyományos elrendezéseknél, ha a modelltest hatása – méretéhez viszonyítva nagy mélysége, és/vagy környezetéhez viszonyított kis ellenálláskontrasztja miatt – kicsi. Emiatt elsőként egy, a homogén feltérben elhelyezett hasáb modell esetére kapott invertált képet vetjük össze a gyakran használt Dp-Dp, a P-Dp, a hagyományos elrendezésekből optimalizálással készült Stummer (St) és a γ_{11n} elrendezések esetén $n=1-4$ tartományban (IV.2.5 ábra).

Az összes numerikus modellezést az *EarthImager program 2.1.6 Version*-jával végeztük. A modellezésnek az alapbeállításoktól eltérő paraméterei a IV.2.5 ábra esetén a következők voltak: Estimated noise: 5%, Damp és Stab factor: 10, Horizontal/vertical roughness ratio: 0,5. Az adatokat 5% véletlen zajjal terheltük. Az 1,9 m vastag prizma mélysége 3,8 m, horizontálisan a 26,5-29 m tartományban van.

A 180 Ω m-es prizma esetében (IV.2.5 ábra bal oszlopa) mindegyik elrendezés detektálja a testet, de a Dp-Dp, a γ_{112} és a γ_{114} elrendezések kivételével nagyon szétkenődve, nagy bizonytalansággal (γ_{111} , P-Dp), vagy nagy kiterjedésű álamonáliával együtt (St, γ_{113}). A 160 Ω m-es prizma esetében (IV.2.5 ábra középső oszlop) már csak az előbb is jól szerepelt elrendezések adnak elfogadható képet (jóllehet a hatóra vonatkozó gyenge indikáció a többi elrendezés esetében is van). Végül a 140 Ω m-es prizma esetében (IV.2.5 ábra jobb oszlopa) már csak a γ_{114} elrendezés ad jó, valamint a γ_{113} elrendezés elfogadható képet, jóllehet – meglepetésre a P-Dp elrendezés is ismét használhatónak tűnik. Érdekes, hogy a Stummer elrendezés kivételével minden elrendezés detektálta ezt a hatót is, jóllehet a γ_{114} elrendezés kivételével minden esetben az álamonáliák maguk is hasonló nagyságúak voltak, mint a valós anomália.

Összességében tehát **csak a γ_{114} elrendezés** volt képes **szinte minden esetben**, azaz a hasáb fajlagos ellenállásától függetlenül **detektálni**, és korrekt módon pozicionálni azt, sőt arról még meglehetősen kompakt képet is tudott adni. Amikor az ellenálláskontraszt már meglehetősen kicsire csökkent (160-180 Ω m a 100 Ω m háttérértékkel szemben), akkor emellett még valamennyire a Dp-Dp és annál meggyőzőbben, bár álamonáliáktól jelentősen terhelt a γ_{112} elrendezés adott elfogadható eredményt. A γ_{113} elrendezések esetében szintén a

nagy álanomáliák okoznak gondot az értelmezésnél. A Dp-Dp elrendezés kivételével a hagyományos elrendezések, ideértve a Stummer elrendezést is ilyen esetekben már meglehetősen gyengén teljesítettek. **Ez a vizsgálat megerősítette tehát a feltevésünket, hogy kis hatású hatók esetén a γ_{11n} elrendezések, illetve azok közül valamely(ek) (esetünkben főleg a γ_{114} elrendezések) jobbak a hagyományos elrendezéseknél.**

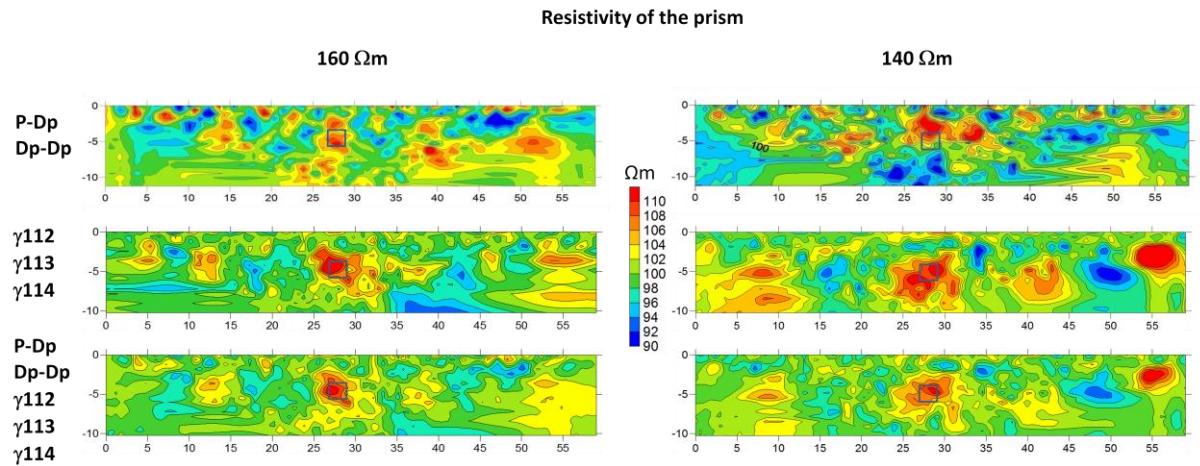


IV.2.5 ábra: Hasáb alakú hatók képe néhány hagyományos és néhány γ_{11n} elrendezés esetén 5%-os hibával terhelt adatrendszerre. Az anomália fajlagos ellenállás értékei sorra: 180, 160, illetve 140 Ωm , szemben a háttér 100 Ωm -es fajlagos ellenállásával

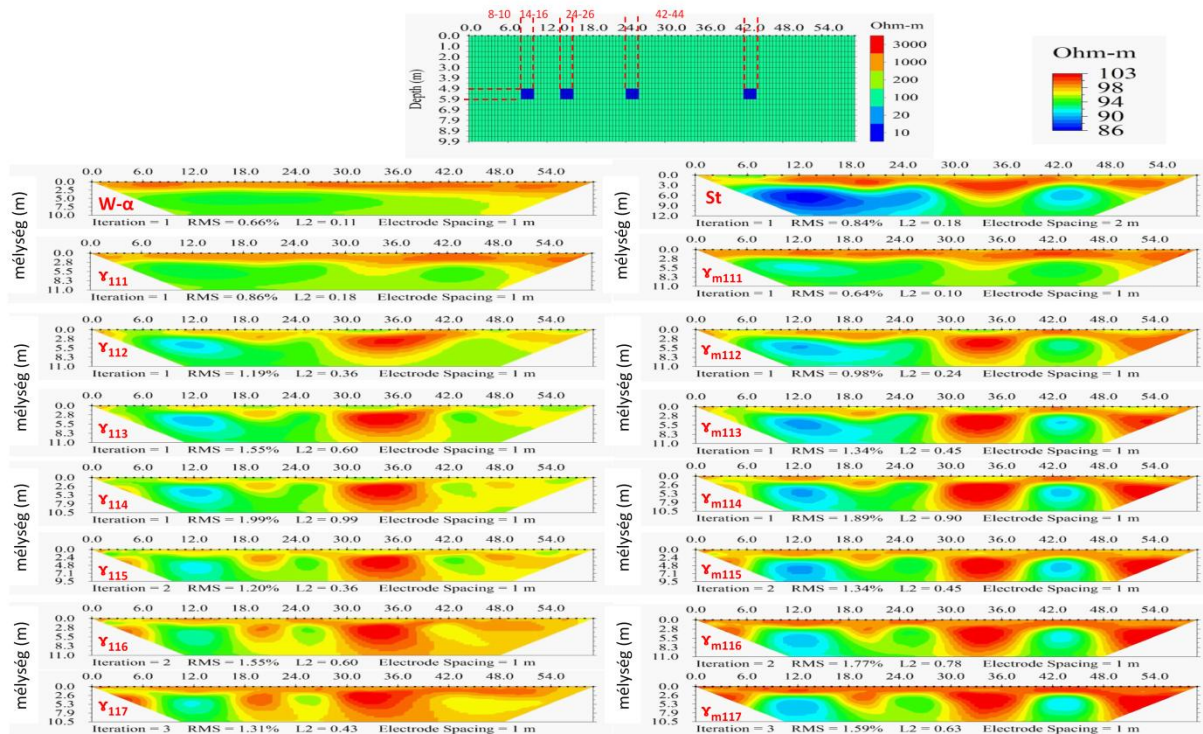
A ható által okozott anomália, még ha megjelent is, meglehetősen bizonytalan és szétfolyó volt a legtöbb modell és ható esetében. Emellett számos, vele amplitúdóban összemérhető méretű anomália is volt a szelvényeken. Egy ilyen kép számos félreértelmezésre ad lehetőséget még akkor is, ha a legfontosabb, hogy az anomália megjelenjen az inhomogenitás helyén. (Ez ugyanis az alapja egyáltalán a korrekt pozicionálásnak és korrekt értelmezésnek.)

Ilyen esetekben alkalmazható pl. a **MOST algoritmus** (Leontarakis és Apostolopoulos (2012, 2013)). Ez az algoritmus a különböző elrendezésekkel kapott fajlagos ellenállás szelvények azonos pozíciójú pontjaiban lévő értékeit átlagolja. A IV.2.6 ábra mutatja a MOST algoritmus eredményeként különböző elrendezés kombinációkból kapott szelvényeket a 160 Ωm -es és a 140 Ωm -es ellenállású hasáb esetében. Az első sorban a P-Dp és a Dp-Dp elrendezésekből nyert, 1540 adat pontot felhasználva készült kép látható. Jóllehet ezek is meggyőzőbbek az egyes elrendezésekkel szimultán kapott képeknél, a γ_{112} , γ_{113} , és γ_{114}

elrendezéseket tartalmazó kombináció sokkal meggyőzőbb (bár ez is tartalmaz még álanomáliákat), annak ellenére, hogy ehhez mintegy 30%-al kevesebb, 1020 adatpontot használtam fel. Az álanomáliák amplitúdója azonban ebben az esetben nem vethető össze a valós anomáliáéval, ami élesebbé is vált a szóló elrendezések képéhez viszonyítva. Még tovább javítható a kép, ha az összes korábbi elrendezés adatait együtt dolgozzuk fel (3. sor), de ez már elég kevésbé gazdaságos.



IV.2.6 ábra: A MOST algoritmus eredményeként különböző elrendezés kombinációkból kapott szelvények

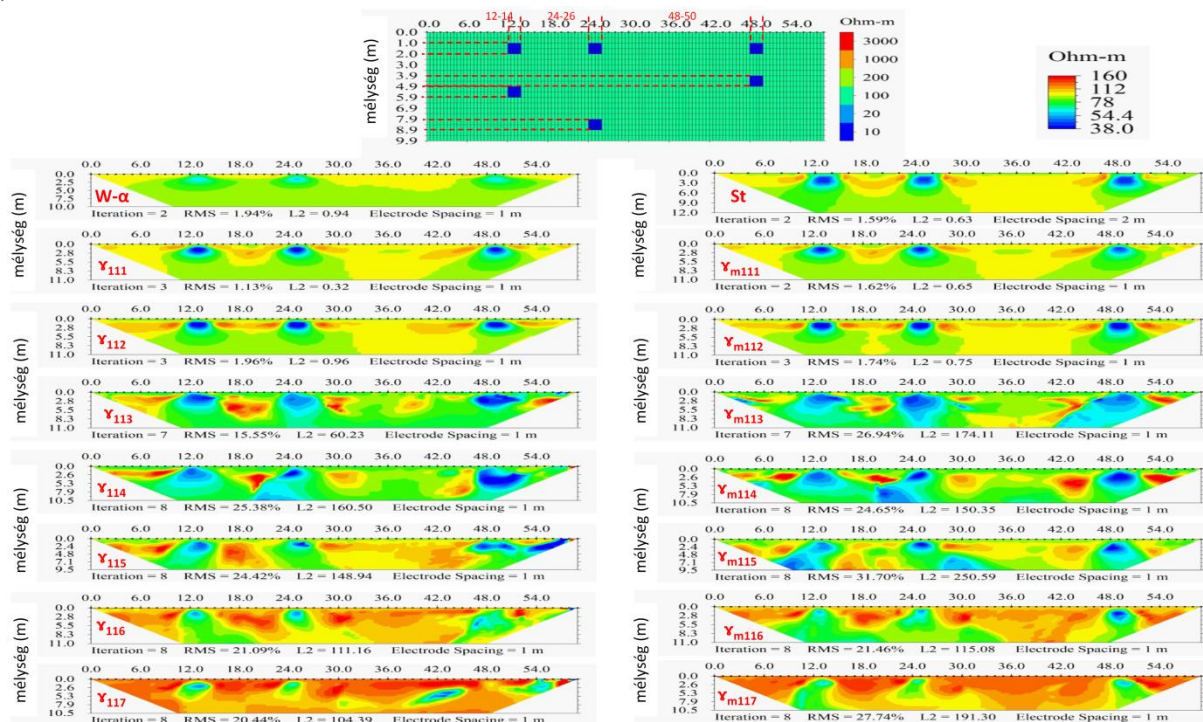


IV.2.7 ábra: Vízszintes felbontóképességi vizsgálat

A IV.2.7 ábra vízszintes felbontóképességi vizsgálatok eredményeit mutatja a Wenner- α , a Stummer, a γ_{11n} , és a γ_{m11n} elrendezések ($n=1-7$) esetére. A Wenner- α elrendezés gyakorlatilag egyáltalán nem választotta szét a kis ellenállású hatókat. A Stummer elrendezés a jobb oldali hatót egyértelműen elkülöníti a többitől, a jobbról 2. ható elkülönülését pedig

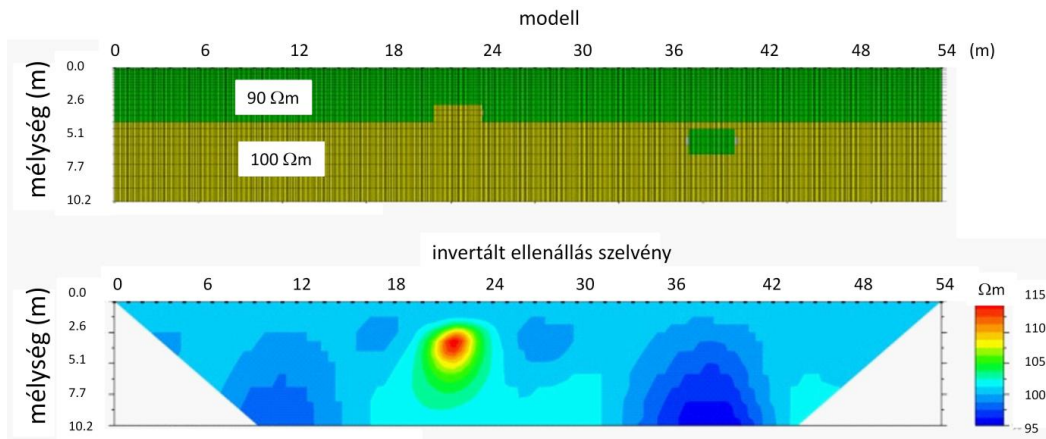
„sejteti”. Ezzel szemben az összes γ_{11n} és γ_{m11n} elrendezés $n=2$ -től a Stummer elrendezésnél is sokkal egyértelműbben elkülöníti a jobb oldali hatót a két ható között kialakuló nagy ellenállású régióval, míg n növekedésével a jobbról 2. ható is egyre egyértelműbben elkülönül a többi modelltesttől. **Vízszintes felbontóképességüket tekintve tehát a γ_{m11n} elrendezések, és a γ_{11n} elrendezések is határozottan jobbnak bizonyultak az optimalizált Stummer elrendezésnél is, nem beszélve a Wenner- α elrendezésről.**

A IV.2.8 ábra az ugyanezen elrendezések esetére elvégzett **vertikális felbontóképességi vizsgálat eredményét** mutatja be. Jóllehet az egymás alatt párokban elhelyezkedő testek közül a felsőt mindegyik elrendezés képes megfelelően kimutatni, az alsó testek közül csak a jobb oldalit mutatják ki az elrendezések (kivételem γ_{117}), amikor az egymás alatti hatók közel vannak egymáshoz és ekkor a két ható természetesen **összemosódik**. Az egymástól távolabb lévő baloldali hatók közül az alsót a Stummer elrendezés nem képes detektálni sem. A legnagyobb mélységben lévő középső hatót pedig csak a γ_{116} és a γ_{m113} , γ_{m116} , γ_{m117} elrendezések voltak képesek egyértelműen kimutatni, jóllehet az egymás alatt lévő hatókat természetesen ezek is összemosták. Összességében **az egymás alatt lévő hatók elválasztása egymástól minden elrendezés esetében lehetetlennek bizonyult, de az alsó hatók kimutatására a γ_{11n} , illetve még inkább a γ_{m11n} elrendezések némelyike, esetünkben a γ_{m113} elrendezés különösen alkalmasnak bizonyult.**



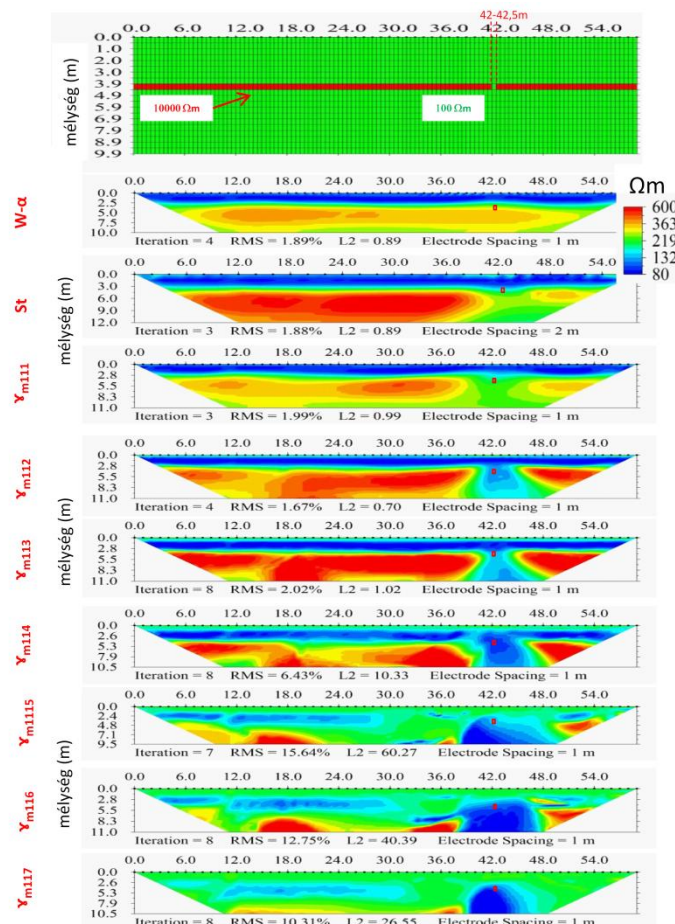
IV.2.8 ábra: Vertikális felbontóképességi vizsgálat

A IV.2.9 ábra egy perturbált 1D modell, azaz egy egydimenziós rétegsor, amin két helyen vannak kisebb az 1D szerkezettől való eltérések. Ez a példa jól **mutatja a nagy n értékű, azaz a MAN elrendezéshez közelítő elrendezések érzéketlenségét az 1D szerkezetekre, ugyanakkor pedig azok nagyon jó 2D érzékenységét.**

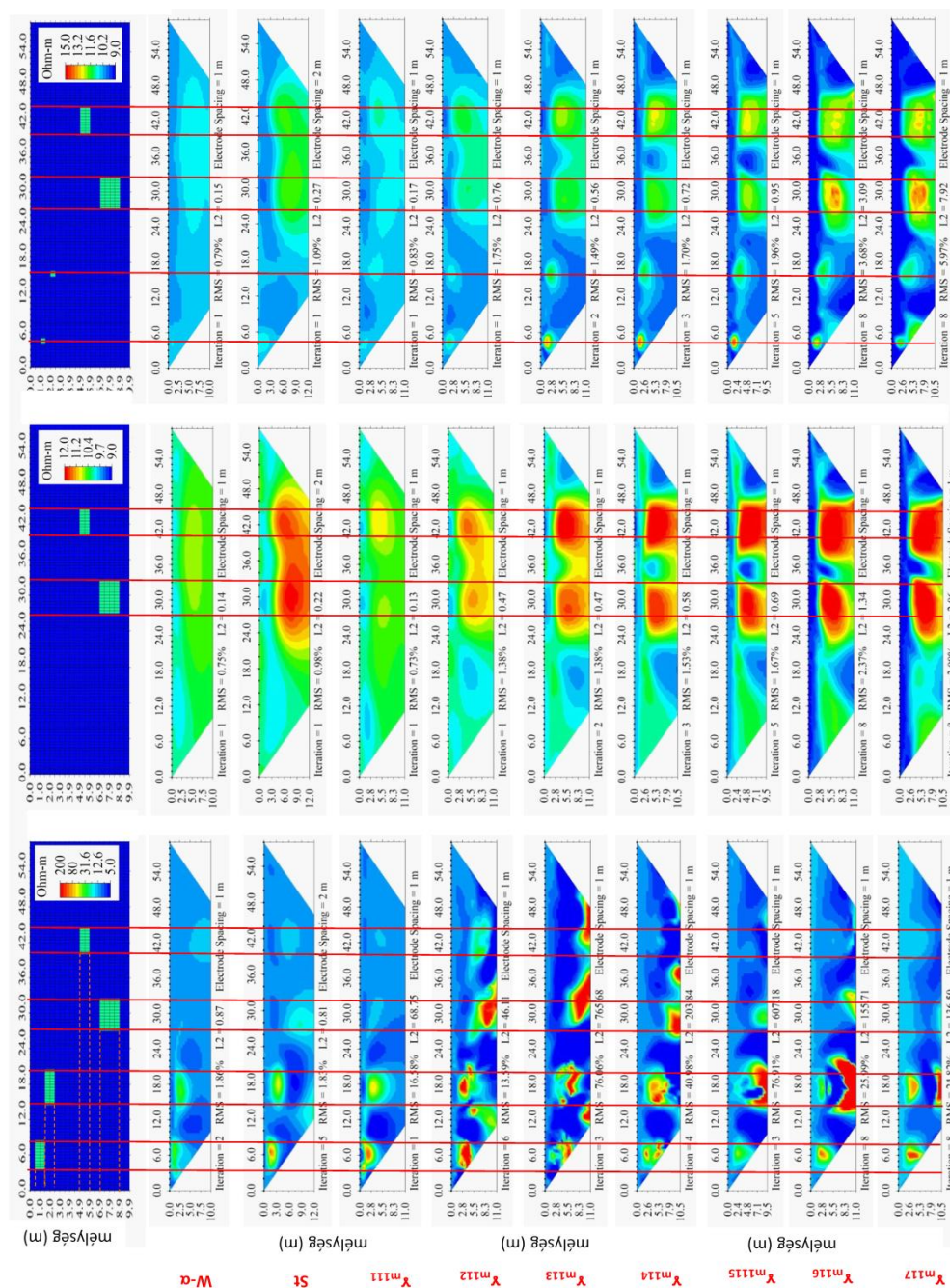


IV.2.9 ábra: Perturbált 1D modell

A IV.2.10 ábra egy valóságközelí modellt, a „Rés szigetelő aljzaton” modellt mutatja be. A W- α elrendezés gyakorlatilag alkalmatlannak bizonyult a rés kimutatására, de még a hagyományos elrendezésekből optimalizált Stummer elrendezés is csak nagyon elkenet, nagy bizonytalansággal tudta megadni a rés helyét. A γ_{m11n} elrendezések sokkal élesebb anomáliával jelezték a rést, különösen a γ_{m113} . Ebben az esetben a teljes γ_{m11n} elrendezés sorozaton megfigyelhető, hogyan jelentéktelenedik el fokozatosan az 1D hatás a nagyobb n értékű elrendezések felé haladva.



IV.2.10 ábra: „Rés szigetelő aljzaton” modell

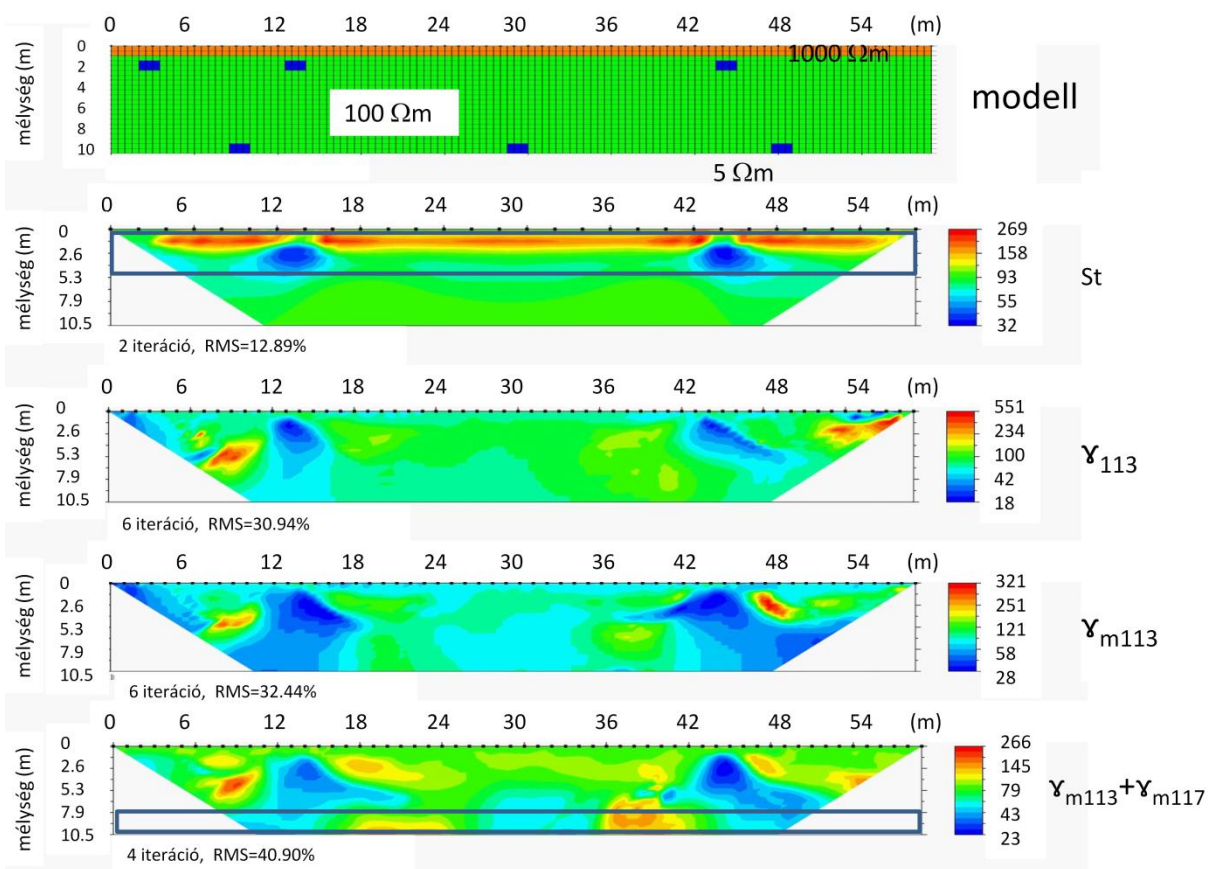


IV.2.11 ábra: Bal oszlop: A Wilkinson et al. (2006) modell képe a Wenner- α , az optimalizált Stummer és a γ_{m11n} ($n=1-7$) elrendezésekkel modellezve. Középső oszlop: az előbbi model a felszínközeli hatók nélkül. Jobb oldali oszlop: az első modell kisebb felszínközeli hatókkal.

Most egy olyan modellt vizsgálunk, ami a γ_{11n} elrendezések szempontjából kevésbé kedvezőnek tűnik (IV.2.11 ábra). A Wilkinson et al. (2006) cikkben szereplő modell esetében (IV.2.11 ábra bal oszlopa) a nagy ellenállás kontrasztú (a test ellenállása 100 Ωm , a háttér 10 Ωm) és nagy kiterjedésű anomáliák zajterhelés nélküli adatok esetében a Stummer elrendezéssel kapott képen jobban kivehetők, mint a legtöbb γ_{m11n} elrendezés esetén. Jóllehet az alsó, a kimutathatóság szempontjából legkritikusabb anomália a γ_{m11n} elrendezések nagy

résznél markánsabban jelenik meg, mint akár a Stummer elrendezésnél, de esetükben zavaró a sok megjelenő kvázi anomália.

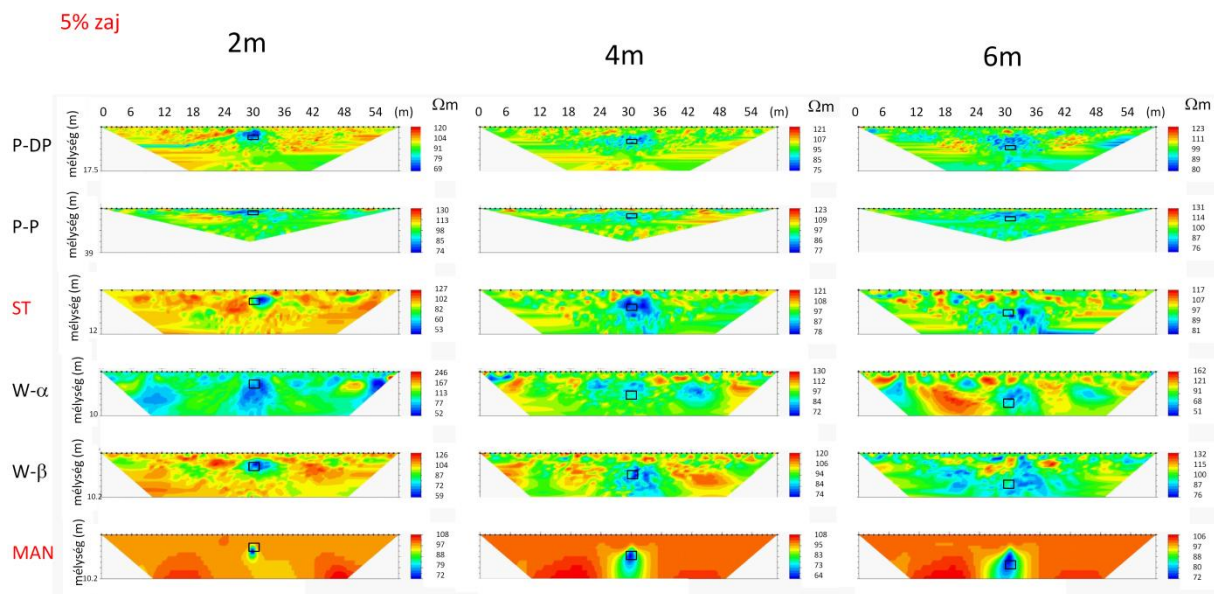
Eltávolítva azonban a felszínközeli hatókat (IV.2.11 ábra középső oszlopa) a γ_{m11n} elrendezések rendre jobb képet adnak a Stummer elrendezésnél, a két hatót sokkal markánsabban képesek voltak elkülöníteni egymástól. Különösen igaz ez, ha n értéke legalább 3. Ezt a kedvező tulajdonságukat a γ_{m11n} elrendezések ráadásul megtartják még akkor is, ha jelen vannak felszínközeli hatók, csak azok az első oszlopbeli modell hasáboknál kisebb hatással vannak a felszíni potenciálterre (IV.2.11 ábra jobb oszlopa). E modell esetében még a felszínközeli hatókat is jobban „visszaadták” a γ_{11n} elrendezések, mint a hagyományosak. A legjobb képet itt a γ_{m116} elrendezéssel kaptuk.



IV.2.12 ábra: A különböző γ_{m11n} elrendezések kombinálásában rejlő lehetőségek

A IV.2.12 ábra azt hivatott illusztrálni, **milyen lehetőségek vannak a különböző γ_{m11n} elrendezések kombinálásában**. Míg láthatóan a legjobb hagyományos elrendezés, a St elrendezés is csak a felszínhez közelebb eső testek kimutatására volt képes, addig a γ_{113} elrendezés a lefelé húzódó anomáliájával már mutat arra utaló jeleket, hogy esetleg lejjebb is lehetnek hatók, a γ_{m113} elrendezés pedig azt már markánsan mutatja az alul két szélén lévő inhomogenmitások esetén. Ebben az esetben **két γ_{m11n} elrendezés, a γ_{m113} és a γ_{m117} elrendezések kombinálása** (ami itt azok adatainak együtt történő inverzióját jelentette) **még tovább volt képes finomítani a képet: 1. az alul baloldalt lévő hatót is el tudta választani a „párjától”; 2. az alul közepén lévő hatót is észrevehetőbbé tette.**

Zárásként bemutatnék még egy ábrát, aminek azért van itt a helye, mert illusztrálja, hogy a **MAN elrendezésről sem biztos, hogy le kell mondanunk, sőt érdemes a további tanulmányozásra.** Amennyiben az ún. végtelen elektróda pl. viszonylag kisebb távolságban (pl. $n=10-15$) van a mért adatok még jó eséllyel invertálhatóak, de ez még MAN elrendezésnek tekinthető. A IV.2.13 ábra egy olyan esetet mutat be, ahol ilyen MAN elrendezéssel kapott invertált eredmények is láthatóak. E szerint az inhomogenitás okozta hatás még a legnagyobb vizsgált, 6 m-es mélységben is tökéletesen és álanomáliamentesen megjelent. Ugyanez a többi elrendezés esetében nem mondható el. **A MAN elrendezés mindhárom mélységben éles, álanomáliamentes képet adott a hatóról, mind vízszintesen, mind pedig vertikálisan megfelelően pozicionálva azt.**



IV.2.13 ábra: Különböző mélységekben lévő prizma modellek esetére kapott fajlagos ellenállás szelvények

IV.2c. Konklúziók

Numerikus vizsgálatok segítségével kimutattam, hogy a háttérhez viszonyított kisebb ellenálláskontraszt esetén is a γ_{11n} elrendezések képesek voltak detektálni a felszíni potenciál eloszlását csak kismértékben befolyásoló hatókat, szemben a vizsgált hagyományos elrendezésekkel, sőt még az azokból optimalizált Stummer elrendezéssel is. **A MOST eljárás alkalmazásával,** több elrendezéssel kapott eredmények felhasználásával az egyébként gyenge anomáliakép **jelentősen javítható volt. Különösen igaz volt ez a γ_{m11n} elrendezéseket használva.**

Vízszintes felbontóképességüket tekintve a γ_{m11n} elrendezések többsége, de még a γ_{11n} elrendezések zöme is, **különösen n nagyobb értékeinél határozottan jobbnak bizonyultak az optimalizált Stummer elrendezésnél is,** nem beszélve a Wenner- α elrendezésről.

Az egymás alatt lévő hatók elválasztása egymástól ugyan minden vizsgált elrendezés esetében lehetetlennek bizonyult, de **az alsó hatók kimutatására a γ_{11n} , illetve még inkább a γ_{m11n} elrendezések némelyike, adott modell esetében pl. a γ_{m113} elrendezés különösen alkalmasnak bizonyultak.**

Illusztráltam a **nagyobb n értékű γ_{m11n} elrendezések érzéketlenségét az 1D hatásokra**, amely így **kevert 1D-2D ható esetén kizárólag utóbbit mutatja ki**. Emellett mutattam példát arra, hogyan lehetne pl. felhasználni több γ_{m11n} elrendezéssel kapott eredményeket együtt, tovább növelve a geoelektromos módszer teljesítőképességét. Mutattam egy numerikus példát arra is, hogy nem kellene még lemondanunk a MAN elrendezés használhatóságáról, jóllehet annak kutatására még jelentős energiát kellene fordítani. A vizsgált esetben minden esetre a **MAN elrendezés mindhárom mélységben éles, álanomáliamentes képet adott a prizma modellről, mind vízszintesen, mind pedig vertikálisan megfelelően pozicionálva azt. Az általa szolgáltatott kép minősége messze meghaladta az összes hagyományos elrendezés által nyújtott képét.**

A γ_{m11n} elrendezések hatékonyságát bizonyítottuk nagyobb hatású hatók esetén is, jóllehet ilyen esetekben csak bizonyos feltételek mellett adott ezen elrendezések valamelyike jobb választ a hagyományos elrendezéseknél.

Jelen vizsgálatainkban inkább csak azokra az esetekre szorítkoztunk, amikor a γ_{m11n} elrendezések a leghatékonyabbnak várhatóak. Mégis, ezek az elrendezések a vizsgálatok alapján már így is számos geofizikai probléma megoldásában nagyon hasznosnak tűnnek, hiszen az itt bemutatotthoz hasonló jellegű anomáliákat kell kutatnunk pl. alagutak, barlangok, csövek, vezetékek, elhagyott folyómedrek, agyagrétegben lévő folytonossági hiány esetén, hogy csak néhány alkalmazási lehetőséget említsünk. Gyakorlati szempontból az sem elhanyagolható tény, hogy a $\gamma_{(m)11n}$ elrendezések a hagyományos elrendezéseknél kevesebb mérést igényelnek, ami a mérési időt is lerövidíti.

IV.3. Kvázi null-elrendezések vizsgálata kvázi terepi analóg mérésekkel

A jelölt témavezetésével készült Szokoli (2017) alapján

Az előző fejezetben bemutattam, hogy a **numerikus vizsgálatok** során a γ_{m11n} elrendezések számos modell esetében jobbnak bizonyultak, mint akár a legjobb hagyományos elrendezések. Gyakorlati szempontból azonban a döntő kérdés, hogy **ugyanez marad-e a helyzet valós terepi viszonyok között is**. A terepi vizsgálatok szempontjából azonban két alapvető nehézség merült fel. Egyrészt olyan teszterületre lett volna szükség, ahol az eredményeink teljesen kontrollálhatóak. Ilyen területet már önmagában is nehéz találni. Még nagyobb probléma azonban, hogy ennek a területnek emellett még meghatározott tulajdonságokkal is kellett volna rendelkezni. Egy adott prizma keresztmetszetű modellel modellezhető hatónak pl. egy meghatározott mélységtartományban kellene lennie. Ha e fölött van, akkor ugyanis a hagyományos elrendezésekkel is kimutatható, tehát a γ_{m11n} elrendezések előnyös oldala abból nem derülne ki. Ha pedig ez alatt a mélység alatt lenne, akkor már a γ_{m11n} elrendezésektől sem várhatnánk a ható detektálását.

Figyelembe véve mindezt úgy döntöttünk, hogy terepi tesztmérések helyett analóg modellméréseket fogunk kivitelezni, de speciális módon. A hagyományos analóg modellmérésekkel szemben, melyeknek a célja, hogy a modellezés a lehető leginkább zajmentes körülmények között legyen kivitelezhető, olyan körülményeket igyekeztünk teremteni, amelyek a lehető legközelebb vannak a terepiekhez. Mindezt úgy, hogy a számunkra fontos hatók paramétereit viszont az igényeinknek megfelelően kontrollálni tudjuk.

Ezzel a speciális, kvázi terepi modellméréssel a numerikushoz hasonló vizsgálatokat végeztünk el Szokoli Kitti volt doktoranduszommal, aki a PhD dolgozatában (Szokoli, 2017) jelen eredményeket össze is foglalta. Vizsgáltuk az egyes elrendezések kimutathatósági mélységét, horizontális felbontóképességét, dimenzióérzékenységet, azaz tulajdonképpen azt, hogy a IV.2 fejezetben kapott numerikus eredményeket mennyire sikerül visszakapni terepihez nagyon közel álló körülmények között.

A fejezetben a modellezés körülményeit, a használt szoftvert, végül pedig a kapott eredményeket ismertetem.

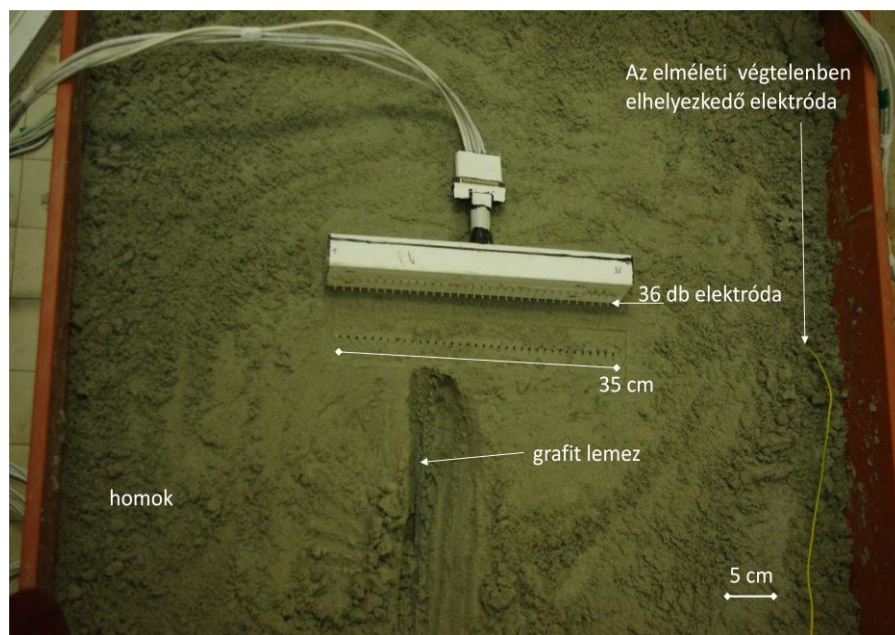
IV.3a. A modellezés körülményei

Mint említettem, olyan körülmények megteremtése volt a cél, ahol a mérések **a terepi körülményekhez a lehető legközelebb állnak, de mégis kontrolálni tudjuk** a méréseket és olyan körülményeket tudunk előállítani, amelyek esetében várható, hogy γ_{m11n} elrendezések előnyös tulajdonságai előjönnek. **Analóg modellméréseket** alapvetően **elektrolitban** szokás végrehajtani, amivel kapcsolatban az MTA CSFK GGI-ben rengeteg tapasztalat halmozódott fel (Ádám et al., 1981a, 1981b, 1983; März et al. 1986; Szarka és Nagy, 1992; Szarka, 1970; Szarka, 1980; Szarka, 1994; Szalai et al., 2009a). Ez biztosítja a befogadó közeg homogenitását, a teljesen vízszintes felszínt, miközben az elektróda pozíciók is nagyon pontosan beállíthatóak. Esetünkben **pontosan ennek az ellenkezője volt a cél**, jöllehet jelen modellezés esetében a felszín topográfiájának formálási lehetőségeivel nem éltünk, de homokot, mint befoglaló közeget használva erre is lehetőség nyílt volna elvileg. A homok

azonban még homogén szemcsemérete ellenére is nagyon változó fajlagos ellenállású, amennyiben nem száraz. A nedvességét pedig biztosítanunk kellett, hogy a megfelelő elektróda kontaktus meglegyen. Ehhez a homok felszínét permeteztük, a víz lefelé szivárgott, illetve a hajszálcsővességnek köszönhetően felfelé is mozoghatott a mindenkor viszonyoknak megfelelően. A **közeg** tehát meglehetősen **inhomogén fajlagos ellenállásának** köszönhetően még talán a kelleténél is jobban **reprezentálta a terepi körülményeket**.

Jóllehet **az elektródák pozícióját** pontosan kimértük, elkerülhetetlen volt, hogy azok a homokszemcséken kismértékben el ne hajoljanak, ami viszont a kis dimenziók következtében már nem elhanyagolható elektróda **pozicionálási hibákhoz vezetett** csakúgy, mint terepi esetben. **Az elektródák elgörbülése** általában nem haladta meg az 1 mm-t, de tekintve az 1 cm-es elektróda távolságát, ez akár 10%-os pozicionálási hibát is jelenthet. Ennél nagyobb hibák terepi körülmények között is nehezen elképzelhetők.

Adottak voltak tehát a terepihez hasonló körülmények, ezek után még a vizsgálni kívánt modell **kontrollálhatóságát** kellett biztosítanunk. Ezt grafitlemezek, illetve vascső különböző pozíciókba történő elhelyezésével értük el, melyek minden paramétere ismert volt (IV.3.1 ábra). A grafitlemez vastagsága 0.5 cm, hossza 90 cm, lefelé pedig 15 cm kiterjedésű. A grafitlemez fajlagos ellenállását a kontrollként elvégzett numerikus modellezés során $4 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$ -nek, a homogén féltérét $40 \Omega\text{m}$ -nek vettük. A numerikus vizsgálat során 3 %-os normál eloszlású véletlen zajjal terheltük a szintetikus látszólagos fajlagos ellenállás értékeket.



IV.3.1 ábra: Az analóg modellezés „kellékei”

Az **oldalhatásokat** igyekeztünk mérsékelni, hiszen azok **szisztematikus hibákat** vihettek volna a mérésekbe, ezért egy $1 \times 1 \times 0.5$ m méretű **műanyag tartályba** töltöttük a homokot. Ez a tartály már elég nagyknak bizonyult az oldalhatások jelentős csökkentésére, de a mérések során még jól kezelhető méretűnek bizonyult.

36 elektródás rendszert alkalmaztunk, ahol az elektródák távolsága 1 cm volt. Jóllehet arany bevonatú réz **elektródákat** használtunk, azokat így is rendszeresen tisztítani kellett a gyors korrózió miatt. Ugyanazokat az **elektróda elrendezéseket** használtuk, amiket a numerikus modellezés során is, azaz a $W-\alpha$ -, a W -Schlumberger-, a $W-\beta$, a $DP-DP$ -, a $P-DP$ és a γ_{m11n} ($n=2-7$) elrendezéseket, valamint még a γ_{qnull} -, és γ_{313} elrendezéseket, amiket itt nem részletezek.

A méréshez egy 10 csatornás Syscal Pro (*Iris Instruments*) műszert, a mért adatok **invertálásához** a *Prácser Ernő* által kifejlesztett **2DRes-Hu programot** használtuk (*Prácser, 2018*). Ez a program egyenáramú mérések adatainak 2D inverziójára alkalmas. Az **előremodellezést** a **véges különbségek módszerével** hajtja végre (Dey és Morrison 1979). Az **inverzió** során a **simítás** úgy történt, hogy az első inverzió egy nagy simítótényezővel történik, melynek során 3 iterációs lépésben közelíti a számított adatokat a mértekhez a modell változtatásával, majd az így kapott modellt bemeneti modellként használva egy kisebb simítófaktor alkalmazásával ismételt 3 iteráció történik. Ezeket a lépéseket ismétljük a simítófaktor fokozatos csökkentésével addig, amíg a számított és a mért adatok távolsága a 3 iteráció során szisztematikusan csökken. A simítótényezők ebben a sorrendben következtek: 100, 70, 50, 30, 20, 15, 10, 7, 5, 3, 2. A legkisebb, azaz utoljára használt λ simítótényezőt és a számított és a mért adatrendszerek távolságát mutató RMS értékét az adott fajlagos ellenállás szelvények alatt láthatjuk. Az inverzió során használt kezdeti modell minden esetben 30 Ωm fajlagos ellenállású homogén féltér modell volt.

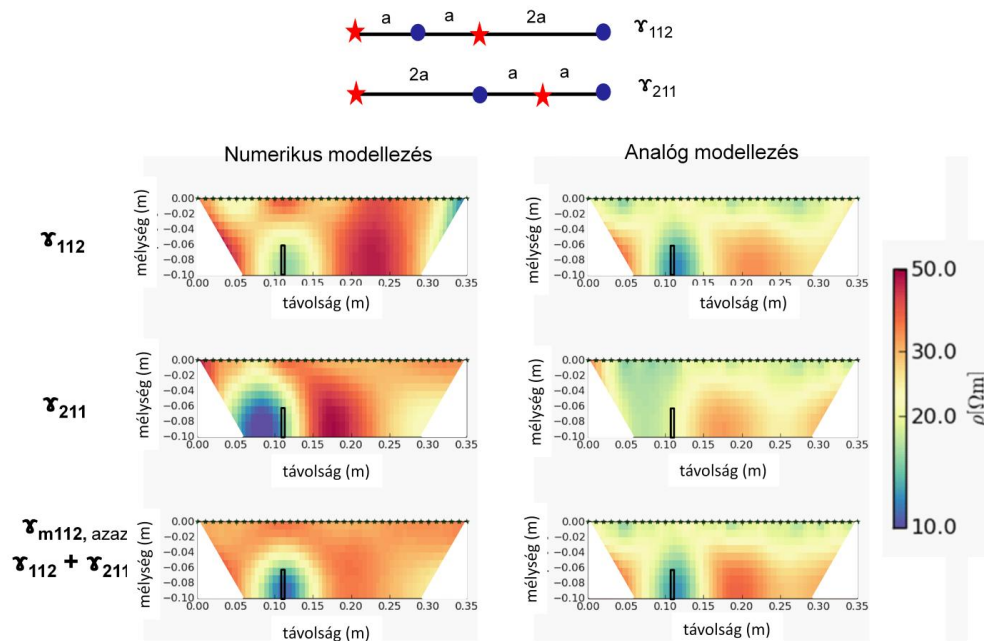
IV.3b. Az analóg modellezéssel kapott eredmények

A IV.3.2 ábra mutatja a **tükrözött elrendezések használatának célszerűségét** (ezúttal már a 2DRes-Hu programmal végezve a numerikus modellezést is) **az analóg modellezés példáján keresztül is**. Míg a γ_{112} elrendezés jól lokalizálja a hatót a numerikus modellezés esetén, addig a γ_{211} elrendezés azt félrepozicionálja. (Általában a két elrendezéssel kapott eredmények különbségének egyik fő oka, hogy az egyik a fajlagos ellenállás szelvény egyik alsó sarkában, a másik pedig a másikban adathiányos. A másik fő ok, hogy az érzékenyséjük magasabb az „elektródahármas”, mint a tőlük távol eső elektróda alatt, így a nagyobb érzékenységgel felmért jelek a két elrendezés esetében a szelvény eltérő oldalaira esnek. Ez a helyzet hasonló a pól-dipól elrendezéséhez.) A γ_{m112} elrendezés viszont teljesen helyére teszi a hatót és erősebb anomáliával, illetve szinte anomáliamentesen jeleníti meg azt. Így módon a **γ_{m112} elrendezés határozottan jobb képet ad a γ_{112} elrendezésnél és meggyőzőbbet a γ_{211} elrendezésnél is.**

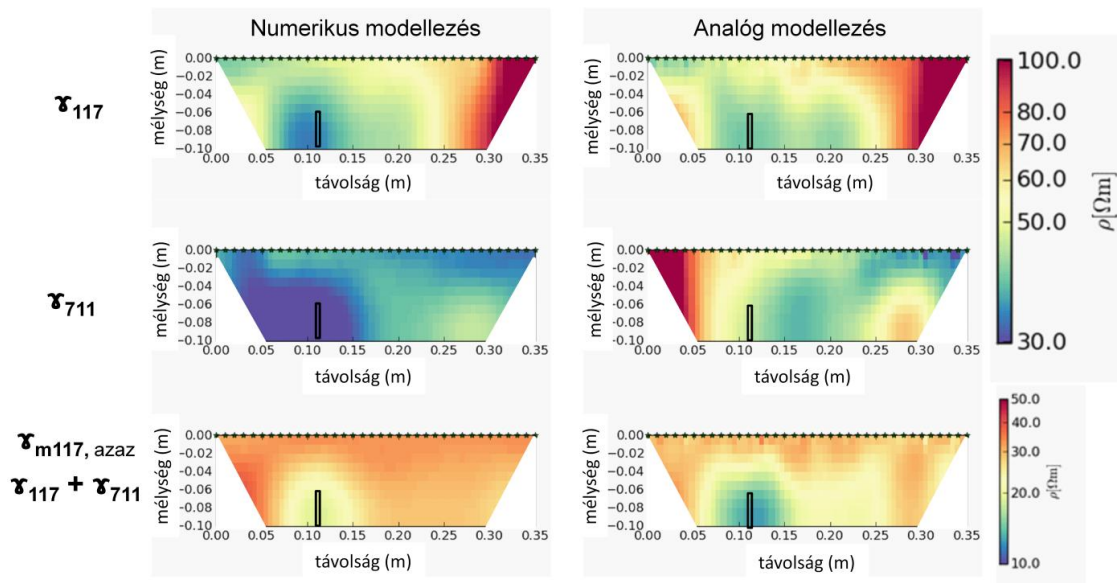
Az **analóg** modellezés során hasonló képet kaptunk annyi különbséggel, hogy a γ_{112} elrendezés esetében valamivel jobb, a γ_{211} elrendezés esetében valamivel rosszabb képet kaptunk és egy kicsivel a γ_{m112} elrendezés képe is kevésbé meggyőző. Ennek azonban nagy valószínűséggel az az oka, hogy a felszínközeli tartomány nedvesebb (az elektródák környékének permetezése miatt) és az ott megjelenő valós (csak a mi szempontunkból zavaró) anomáliák rondítanak bele az összképbe.

Hogy nem egyedi esetről van szó, azt a *IV.3.3 ábra* is illusztrálja, ami a γ_{117} elrendezés és ugyanazon modell esetére mutatja be ugyanezt a jelenséget. Az eredmény nagyjából hasonló, mint az előző esetben, de **itt az analóg modellezés esetében még sokkal nagyobb szükség volt a két adatrendszer együttes invertálására.**

A *II.3.4 fejezetben* azt állítottam, hogy a γ_{11n} elrendezések kimutathatósági mélysége nagyobb, mint a hagyományos elrendezéseké. Az volt ott a ki nem mondott feltételezés, hogy ha egy ható nagyobb relatív anomáliát okoz valamely elrendezéssel mérve, mint egy másikkal, akkor azzal az elrendezéssel az a ható jobban ki is mutatható. Máshogy kifejezve: ha előbbi elrendezés nagyobb mélységben lévő ható esetén ugyanakkora relatív anomáliát produkál, mint utóbbi kisebb mélységben lévő ható esetén, akkor előbbi azt a hatót nagyobb mélységből is képes lesz kimutatni. A *IV.3.4 ábra* igazolja ezen feltevés helyességét. Ahogy nőtt az elrendezések KimM-e (W- α -nél 1.53 m, W- β -nél 3.43 m, γ_{113} elrendezésnél 7.98 m az érték a jólvezető dyke modell, és 5% zaj esetén, lásd *II.4.4 táblázat*), úgy voltak képesek egyre jobban és jobban megjeleníteni a hatót. **Igazoltam tehát, hogy ha egy elrendezés KimM-e nagyobb, akkor az a nagyobb mélységben lévő hatót is képes detektálni, vagy azt jobban megjeleníteni, mint egy kisebb KimM értékű elrendezés.** Mindez persze akkor igaz, ha a ható hasonló paraméterekkel rendelkezik, mint amire a KimM-et számítottam.

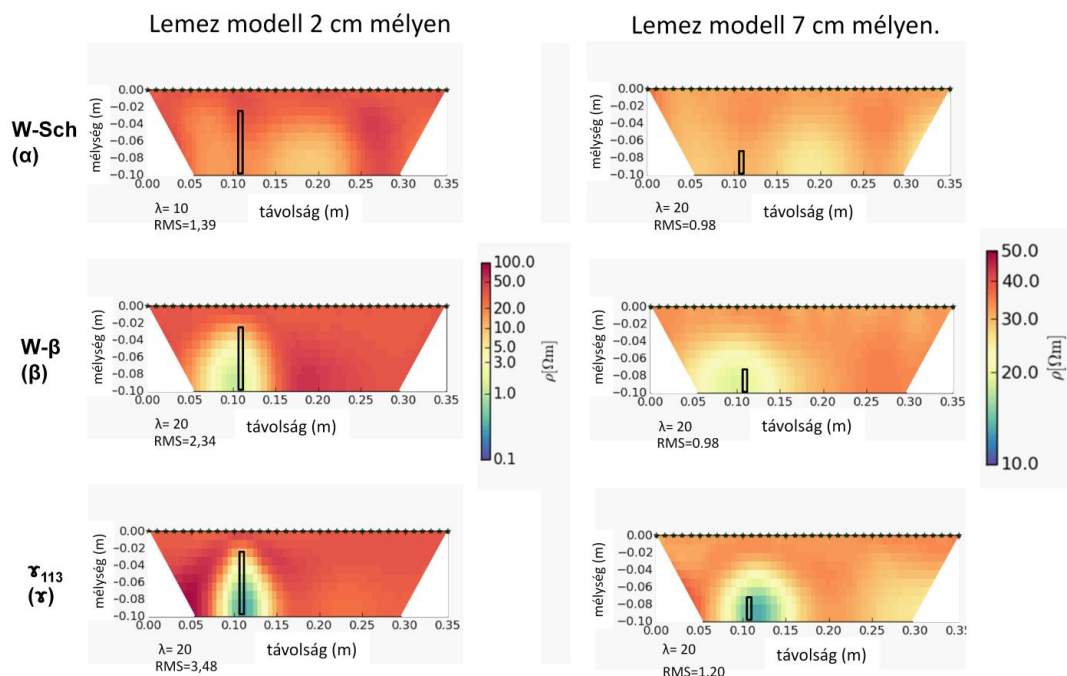


IV.3.2 ábra: A γ_{11n} és a γ_{n11} elrendezések együttes alkalmazásának jelentősége a γ_{112} és γ_{211} elrendezések példáján a numerikus és az analóg modellmérések esetén

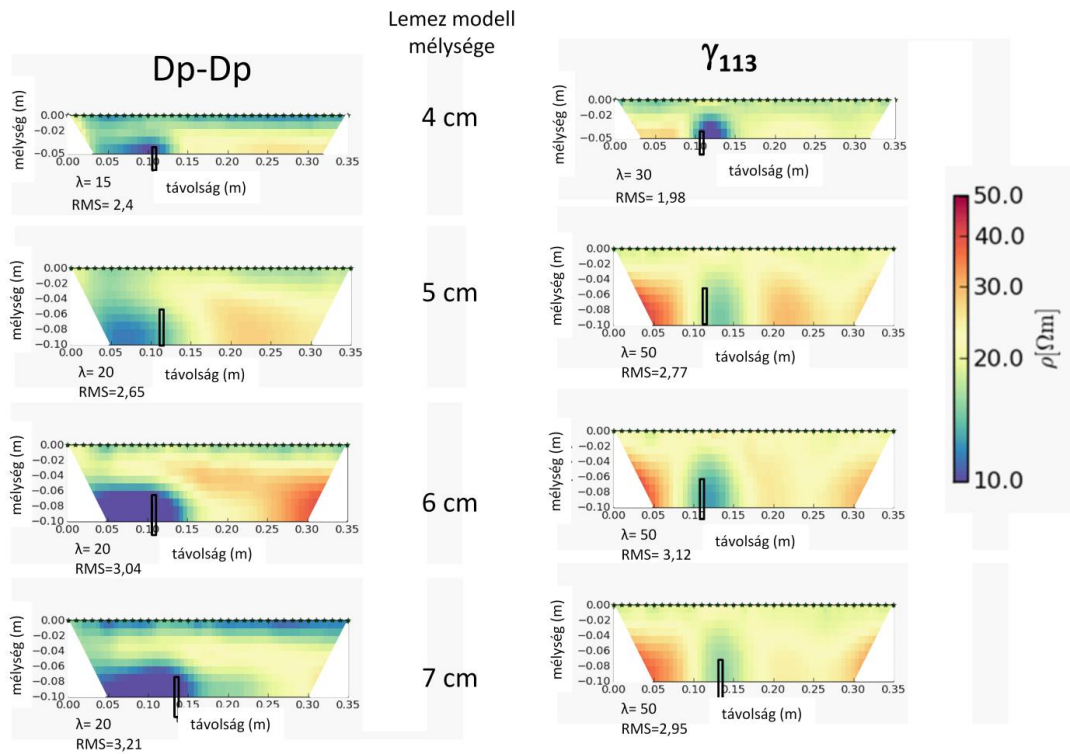


IV.3.3 ábra: A γ_{11n} és a γ_{n11} elrendezések együttes alkalmazásának jelentősége a γ_{117} és γ_{711} elrendezések példáján

A IV.3.5 ábra azt mutatja, hogyan változik a Dp-Dp és a γ_{113} elrendezések leképezési képessége a lemez modell mélységének függvényében. Jól látható hogyan **romlik az a Dp-Dp elrendezés esetében a mélységgel, a γ_{113} elrendezés esetében a romlás sokkal kevésbé látványos és még a legnagyobb vizsgált mélység esetében is egyértelmű, álanomáliamentes képet adva, jól pozicionált anomáliával jelzi a modellt.**



IV.3.4 ábra: A numerikus modellezés eredménye a kimutathatósági mélység értékével kapcsolatban



IV.3.5 ábra: A Dp-Dp és a γ_{113} elrendezések leképezési képessége a lemez modell mélységének függvényében a numerikus modellezés alapján

IV.3.1 táblázat: Milyen maximális mélységből mutatható ki egy ható numerikus, illetve analóg modellezéssel (a lemez modell példáján bemutatva)

Numerikus modellezés

Lemez modell mélysége	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	St	W- β	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}
2 cm													
3 cm													
4 cm													
5 cm													
6 cm													
7 cm													
maximum		2 cm	4 cm	4 cm	6 cm	5 cm	3 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm

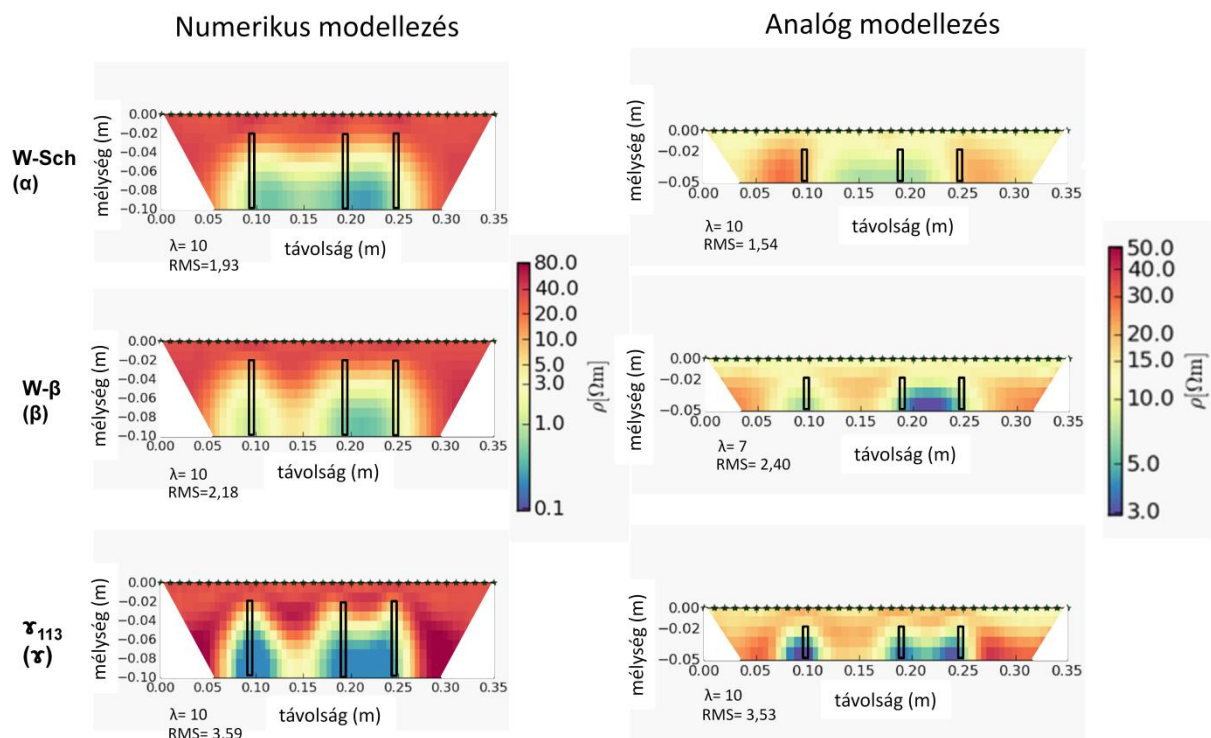
Analóg modellezés

Lemez modell mélysége	W-Sch	W- α	P-Dp	Dp-Dp	St	W- β	γ_{111}	γ_{112}	γ_{113}	γ_{114}	γ_{115}	γ_{116}	γ_{117}
2 cm													
3 cm													
4 cm													
5 cm													
6 cm													
7 cm													
maximum			3 cm	3 cm	4 cm	5 cm		7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm	7 cm

A IV.3.1 táblázat megmutatja, hogy milyen maximális mélységből látszik még egy adott ható. Tekintve először a numerikus modellezés eredményeit láthatjuk, hogy azok megerősítik a KimM eredményeket (II.4.4 táblázat), azaz a hagyományos elrendezések közül a β -típusúak (P-DP, DP-DP, Stummer, W- β) nagyobb mélységből képesek kimutatni egy hatót, de azok teljesítőképességét is jelentősen meghaladja a γ_{11n} elrendezéseké, ha n értéke legalább 2. Csak zárójelben jegyzem meg, hogy a szintén vizsgált γ_{q0} és γ_{313} elrendezések a legjobb hagyományos elrendezésekkel közel egy szinten vannak e tekintetben.

Érdekes látni, hogy az analóg modellmérések szerint a hagyományos elrendezések kisebb mélységből voltak csak képesek kimutatni a lemezt, mint ahogy azt a numerikus modellezés esetén várni lehetett. Különösen a Stummer elrendezés teljesítőképességének csökkenése szembetűnő. Ez felveti azt a kérdést is, hogy a numerikus modellezés során esetleg alábecsültük ezen elrendezések esetében a zaj mértékét.

A γ_{11n} elrendezések esetében voltaképpen el sem tudtuk érni azt a mélységet, ahonnan már ne lett volna kimutatható a lemez, és ez igaz mind a numerikus-, mind az analóg modellezés esetére.



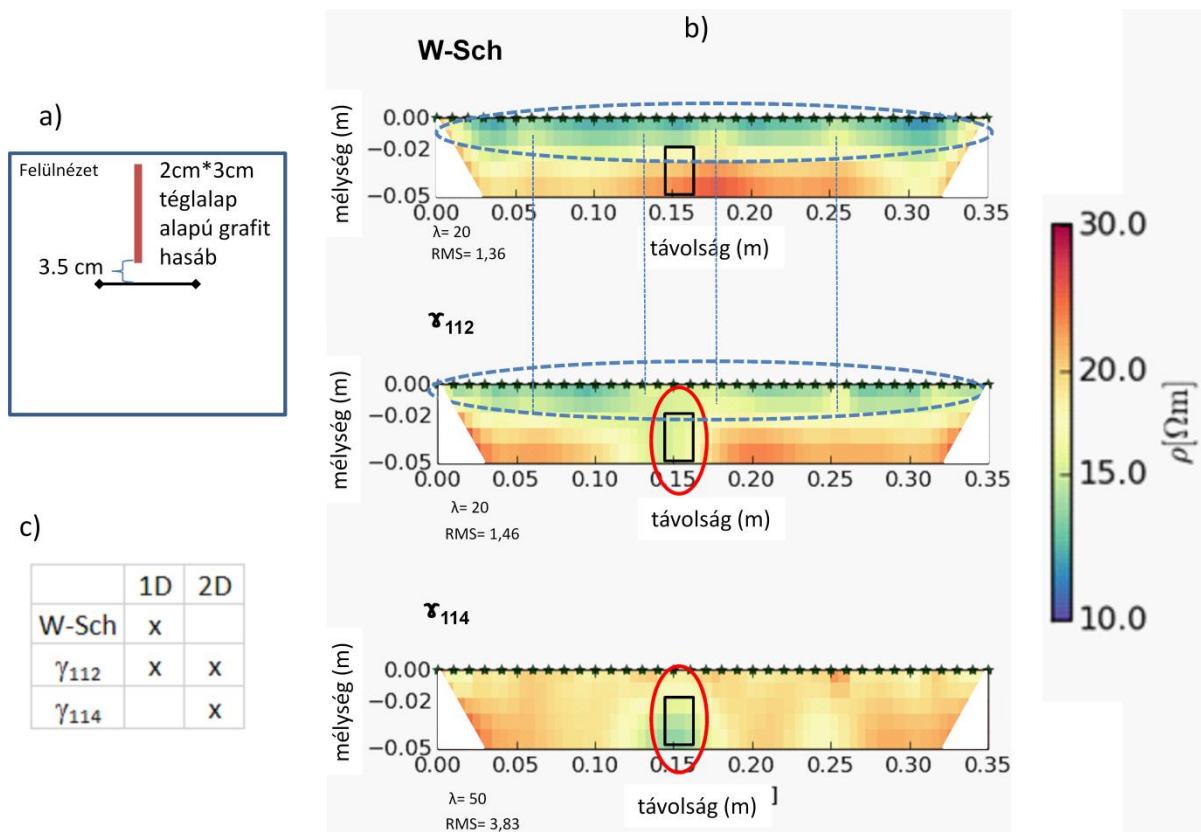
IV.3.6 ábra: A horizontális felbontóképesség numerikus modellje

A következő, IV.3.6 ábra újabb érvet ad arra, hogy – legalábbis bizonyos modellek esetében – a γ_{11n} elrendezések felbontóképessége nagyobb, mint egyes, gyakran használt hagyományos elrendezésekéi. A hagyományos elrendezések is képesek voltak ugyan a numerikus vizsgálatok során a többitől távolabb álló hatót eltávolítani, de azt is valamivel kevésbé meggyőzően tették, mint a γ_{113} elrendezés. A két, egymáshoz közelebbi

hatót pedig egyik hagyományos elrendezés sem volt képes különválasztani szemben a γ_{113} elrendezéssel.

Ismételten arra a meglepőnek tűnő következtetésre jutottunk, hogy az analóg eredmények esetében még inkább a γ_{11n} ($n=3$) elrendezés felé billen a mérleg nyelve. Az analóg eredmények esetében a $W-\alpha$ képe még gyengébb, mint a numerikus eredmény alapján várható volt, míg a $W-\beta$ kép ugyan jobb a vártnál, de a közelebbi hatók elválasztásában nincs javulás. A γ_{113} elrendezés esetében azonban – ha lehet – még meggyőzőbb a kép, mint a numerikus modellezés esetében volt.

Ha pedig most megnézzük ismételten a IV.3.2, a IV.3.3 és a IV.3.6 ábrákat, azt láthatjuk, hogy az analóg modellmérés eredményei minden esetben közel a numerikus modellezés által várt eredményeket adták vissza. Amikor pedig nem így történt, akkor az adott γ_{11n} elrendezés még jobb eredményt is produkált a vártnál. A mérés esetén előforduló zajok tehát egyáltalán nem befolyásolták negatív irányba a γ_{113} elrendezéssel kapott eredményeket, bizonyítandó azok terepi használhatóságát. Emellett ráadásul fentiek alapján úgy tűnik, hogy a γ_{113} elrendezés esetében túl is becsültük a zajt. Amennyiben tehát a valóshoz jobban közelítő eredményeket kívánunk kapni, kisebb zajszintet kell feltételeznünk, mint a hagyományos elrendezések esetében. Abban az esetben várhatjuk azt, hogy a γ_{113} elrendezéssel kapott numerikus eredmények annyira javulnak, hogy az analóg eredményekhez hasonlóak lesznek.



IV.3.7 ábra: A γ_{11n} elrendezések leképezési tulajdonságainak változása n értékének növekedésével. a) a modell. b) a fajlagos ellenállás szelvények. c) az egyes elrendezések dimenzióérzékenysége

Végül egy olyan ábrát mutatok be (IV.3.7 ábra), ami jól **illusztrálja egyrészt az átmenetet a hagyományos elrendezésektől a null-elrendezések felé, másrészt pedig azt is, hogyan haladunk az elrendezések 1D érzékenysége felől a 2D érzékenység felé.** Az alkalmazott modell a IV.3.7a ábrán látható. A **W-Sch elrendezés** egyáltalán nem volt képes megjeleníteni a jó elektromos vezetőképességű grafit modellt, ezzel szemben nagyon jól leképezte a homok víztartalmának mélységbeli változását (IV.3.7b ábra), azaz megközelítőleg egy kétréteges, azaz **1D szerkezetet mutatott.** A γ_{112} elrendezés is megjelenítette ezt a nedvesebb felszínközeli zónát, de kimutatta ugyanakkor a grafitrudat is, azaz **mind az 1D, mind a 2D hatásokra, azaz mind a függőleges, mind a vízszintes irányú fajlagos ellenállás-változásokra érzékenynek mutatkozott.** A nagyobb n értékű γ_{11n} elrendezés, a γ_{114} , ami már közelebb van a MAN null-elrendezéshez ugyanakkor **már érzéketlen volt az 1D változásokra, viszont a 2D változásnak nagyon jó indikátora volt.** A γ_{114} elrendezés tehát ebben az esetben már a MAN elrendezéstől elvártnak megfelelően viselkedett.

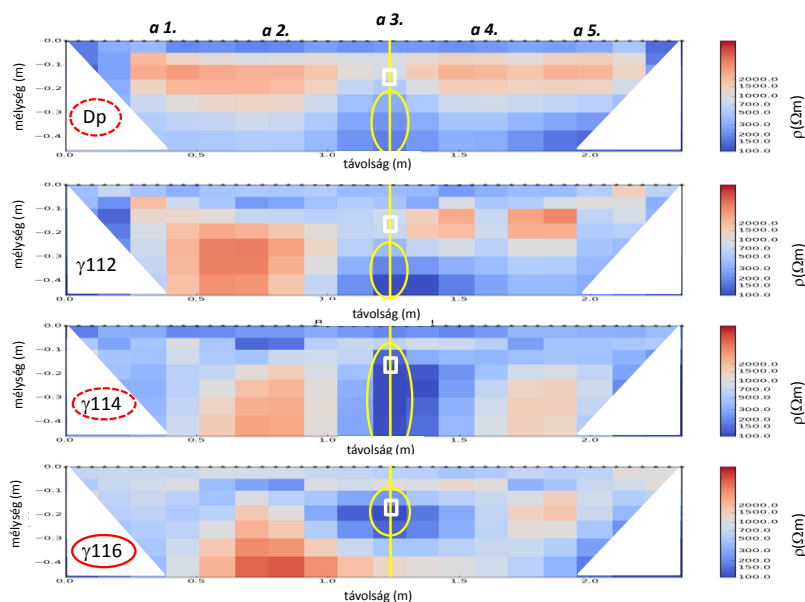
A IV.3.7 ábra tehát **nagyon szemléletes képet ad a hagyományos elrendezések és a null-elrendezések közötti átmenetről, elsősorban olyan formán, hogy bemutatja, hogyan jutunk a hagyományos elrendezések elsősorban 1D érzékenységtől a null-elrendezések elsősorban 2D érzékenységéig (IV.3.7c ábra).** Felhívnam a figyelmet arra is, hogy ezen ábra alapján is látszik, hogy **a γ_{11n} elrendezések oldalirányú érzékenysége is nagyobb,** lévén, hogy a modell ebben az esetben a mérési profiltól oldalra helyezkedett el (IV.3.7 ábra). Ezek az elrendezések tehát abban az esetben is **perspektívikusabbnak** tűnnek a hagyományos elrendezéseknél, **ha az oldalhatástól várunk hasznos információt,** pl. ha egy épület alatt kell üreget keresni úgy, hogy méréseket csak az épületen kívül lehet végezni (Bania és Cwiklik, 2013).

IV.3c. Terepi analóg modellezéssel kapott eredmények

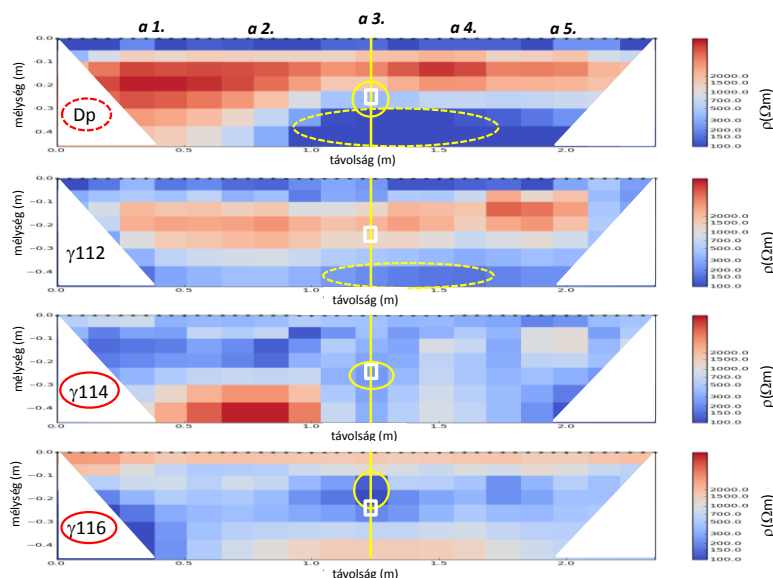
Indiai-Magyar Bilaterális együttműködés keretében, az Indian Institute of Technology-ben (Roorkee), 2017-ben mért adatok alapján

Ebben a fejezetben még egy további lépést teszünk a terepi mérések irányába, hogy a γ_{m11n} elrendezéseket még inkább a terepihez hasonló körülmények között tesztelhesük. Ezen mérések esetében a **modellező laboratóriumot már szabad téren** alakítottuk az Indian Institute of Technology területén Roorkee-ben, Indiában. Egy 2*2 m-es alapterületű, 0.5 mély gödröt ástunk, majd azt homokkal töltöttük meg. 26°-ban dőlő 5 cm oldalhosszúságú négyzetalapú hasáb alakú grafitrudat helyezve a mérési profilra merőlegesen három szelvényen mértünk felette.

Amíg a rúd felszínhez közelebbi részén mértünk, ahol a rúd keresztmetszetének felső oldala 6.3 cm mélyen volt a D_p elrendezés bizonyult a legjobbnak a vizsgált elrendezések (D_p , γ_{112} , γ_{114} és γ_{116}) közül. Amint azonban a rúd mélyebb részei felett mértünk, ahol annak felső éle 12.7, illetve 19 cm mélyen volt, már határozottan valamelyik nagy n értékű γ_{11n} elrendezés, általában a γ_{116} elrendezés produkált jobb eredményeket (IV.3.8 és IV.3.9 ábrák). A γ_{116} elrendezés mindkét ábrán határozottan megjeleníti és meglehetősen pontosan le is határolja függőlegesen is a hatót.



IV.3.8 ábra: Terepi teszteredmények DP és γ_{m11n} ($n=2,4,6$) elrendezésekkel. A rúd felső élének mélysége 12.7 cm. 48 elektródás elrendezéssel, 5 cm-es elektródaközzel mérve. Sárga ellipszissel a grafitrúdhoz kapcsolható anomáliát határoltam le. Piros ellipszissel azon elrendezések neveit jelöltem, amelyek a grafitrudat detektálni tudták. Amennyiben az ellipszis szaggatott vonalú, a detektálás bizonytalan.



IV.3.9 ábra: Terepi teszt eredmények DP és γ_{11n} ($n=2,4,6$) elrendezésekkel. A rúd felső élének mélysége 19 cm. 48 elektródás elrendezéssel, 5 cm-es elektródaközzel mérve. Sárga ellipszissel a grafitrúdhoz kapcsolható anomáliát határoltam le. Piros ellipszissel azon elrendezések neveit jelöltem, amelyek a grafitrudat detektálni tudták. Amennyiben az ellipszis szaggatott vonalú, a detektálás bizonytalan.

Szabadtéri laboratóriumban dőlő (tulajdonképpen 3D) modell felett végrehajtott méréseink is megerősítették a korábbi tapasztalatokat, mely szerint a ható nagyobb mélysége esetén a γ_{11n} elrendezések eredményesebben képesek detektálni azt, mint akár a legjobb hagyományos elrendezések.

V. Talajmechanikai vizsgálómódszerek és kiskálájú repedésrendszerek kutatása

Ezt a fejezetet két fő részre tagoltam. Az *V.1 fejezetben két új egyszerű talajmechanikai mérő módszert, a SzűrőPróba (SzP) és a NyomásPróba (NyP) módszereket ismertetem*, illetve bemutatom azok néhány eddigi **alkalmazását**. A SzP módszernek egy régészeti, illetve egy geológiai célú alkalmazásait mutatom be. Utóbbi esetében víznyelők kimutatása és lehatárolása, illetve repedések lokalizálása volt a cél. A NyP módszernek egy földcsuszamlás repedésrendszerének feltárását hivatott alkalmazását mutatom be.

Az *V.2 fejezet célja kiskálájú repedésrendszerek vizsgálata* különböző módszerekkel. Itt visszautalok majd az *V.2 fejezetben* már bemutatott hasonló célú kutatásokra, de emellett az Elektromos Tomográfia, illetve null-elrendezések ilyen célú alkalmazásait is tárgyalom, valamint a repedések irányának meghatározásra irányuló azimutális méréseket. Tárgyalom azt is, mennyire fontos lehet a terepi mérések egy részének esetében, hogy azokat milyen időjárási körülmények között hajtjuk végre.

Terjedelmi okokból az ebben a fejezetben előforduló kérdéseket csak a feltétlenül szükséges részletességgel tárgyalom, azok teljes terjedelmükben a hivatkozott publikációkban lelhetők fel.

V.1. Talajmechanikai vizsgálómódszerek (Szűrőpróba, Nyomáspróba)

Mindkét módszer ötlete onnan eredt, hogy a geoelektromos mérések kivitelezése során az elektródákat leszűrva egyes területeken bizonyos **szabályszerűségekre** figyeltem fel. **A SzP módszer** esetében azt észleltem, hogy egyes szakaszokon számos alkalommal akadt el az elektróda kődarabokban, míg más szakaszokon (szinte) egyáltalán nem. E mögött a **szabályosság mögött geológiai információt** sejtettem. A **NyP** esetében pedig az volt feltűnő, hogy egyes helyeken az elektróda nagyon könnyen fúródott a földbe, míg máshol sokkal nehezebben. A helyzet hasonló volt, mint az előző esetben: úgy gondoltam, hogy e mögött valamiféle geológiai információnak kell lennie. Innentől a kérdés az volt, hogy mi ez az információ, az mennyire hasznos, mennyire bonyolult a kinyerése, mi az elméleti háttere és milyen korlátai vannak a módszer használhatóságának. A továbbiakban ezekkel a kérdésekkel foglalkozok a módszerek különböző alkalmazásain keresztül.

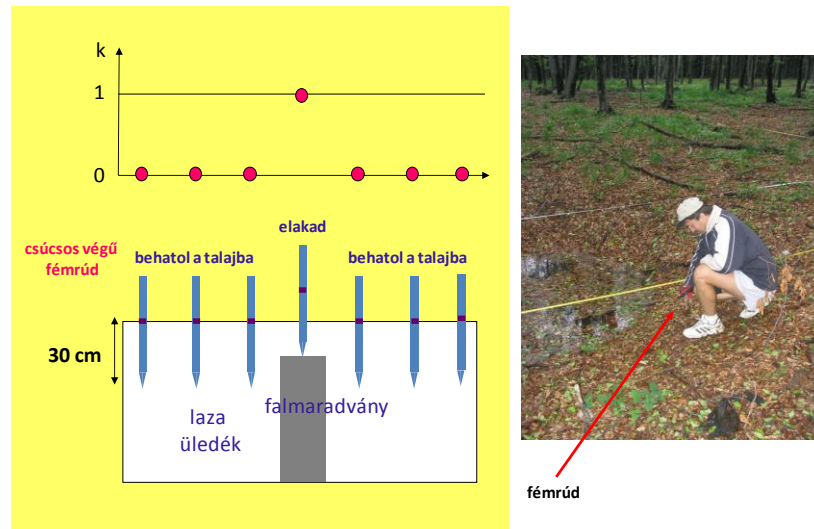
V.1a. A SzűrőPróba (SzP) módszer

Régészeti alkalmazás (Sárisáp: ókeresztény kápolna)

Szalai et al. (2011) alapján

A módszer használata során egy egyszerű T-alakú fém rudat szúrunk a földbe egy előre megadott mélységig, ami általában 30 cm, de a terepi adottságok függvényében változtatható (*V.1.1 ábra*). Amennyiben az elakad valamiben (ez az esetek többségében kötőrmelék), akkor $k=1$ értéket rendelünk az adott pozícióhoz, amennyiben nem akad el, hanem akadálytalanul le tudjuk szúrni a választott mélységbe, akkor 0 értéket rendelünk hozzá. Az adatok feldolgozása során célszerű ezekből az értékekből futóátlagot számítani. Azért egy régészeti példával kezdem a módszer bemutatását, mert esetében a módszer működése világos: amennyiben fal,

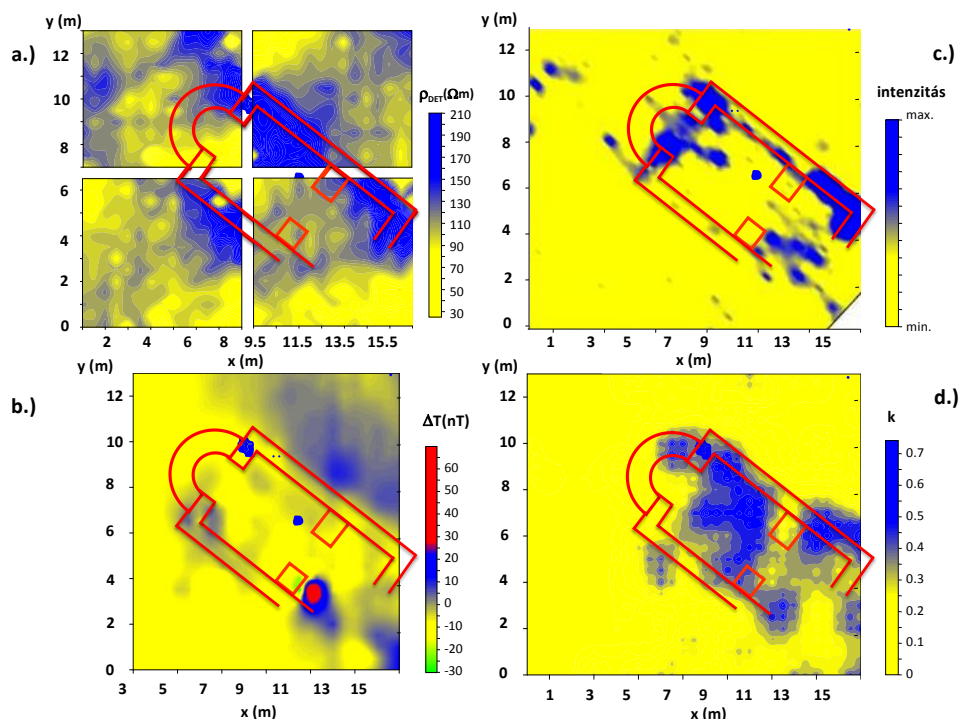
épület alap, vagy szilárd padlóburkolat van üledékkel betemetve, akkor ezeket – az adott mélységen belül ki kell tudnunk így mutatni (V.1. ábra).



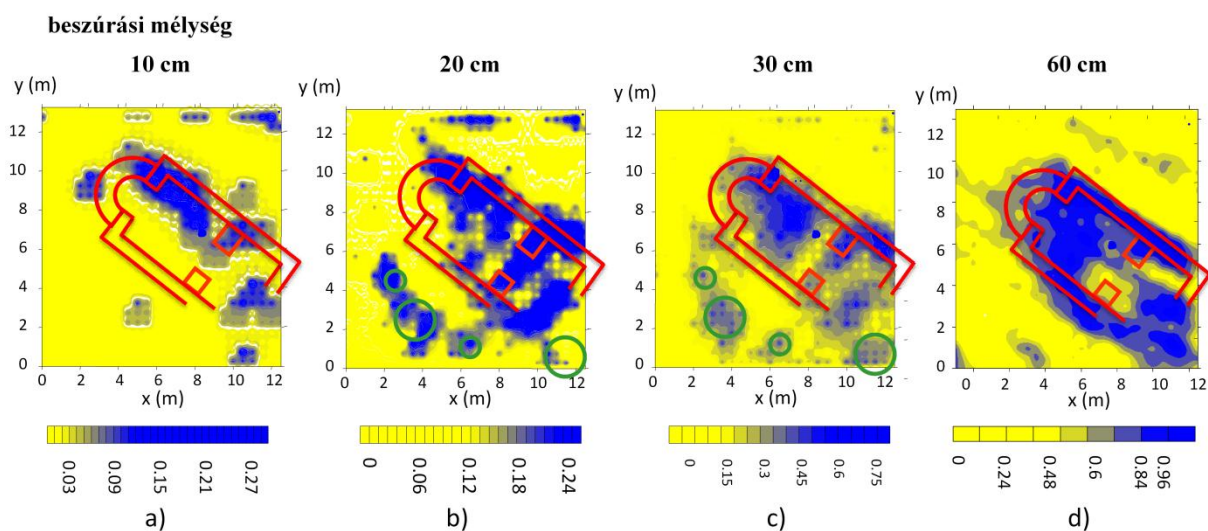
V.1.1 ábra: A SzP módszer működési elve. k értéke 1, ha kőbe ütközik a fémrúd, 0, ha nem.

A módszer részletei Szalai et al. (2010) cikkében megtalálhatóak. Az értekezésben csak a sárisápi régészeti területen kapott eredményt ismertetem, ahol egy 4. századi kápolna romjainak fellelése, majd feltérképezése volt a célunk. A romokat korábban már részben feltárták, de helyére már nem emlékeztek pontosan és kérdéses volt a romok jelenlegi állapota is. Rögtön a romok megtalálása során nagyon jó szolgálatot tett a SzP módszer, mivel a terület akkor még növényzettel sűrűn volt borítva, ahol mindenféle geofizikai módszer kivitelezése elég körülményes volt. A SzP módszerrel viszont néhány profilon felvett szelvényekkel hamar sikerült lokalizálni a romokat, lévén, hogy lényegében csak ott „talált” törmelék a módszer. **A részletes feltérképezéshez** rácshálót alkalmaztunk, majd minden pontban adott pont és a körülötte lévő 4, illetve 8 pont átlagát ábrázoltuk. Az így kapott és szűrt térképet mutatja a V.1.2d ábra, összevetve a más geofizikai módszerekkel nyert térképekkel. Ebben az esetben is meglátszik, hogy minden módszernek megvannak a maga korlátai. **A SzP módszer meglehetősen jó képet adott a romok állapotáról, nagyon jól lehatárolta azt. Esetében a padlóburkolat, illetve az épület belsejébe került, a kápolna tetőszerkezetéből és a falakból származó kőtörmelék is megjelenik a kapott képen, zömében az épület belsejében.**

Az V.1.3 ábra azt illusztrálja, hogy **a SzP módszerrel szondázni is lehet.** Fokozatosan szűrve le a fémrudat különböző mélységekbe és külön regisztrálva az adatokat különböző mélységekről is készíthetünk térképet segítségével. A legnagyobb 60 cm-es mélységben a SzP már a kápolna szinte teljes területén kőborítottságot mutatott. Érdekes a kápolna belső falával párhuzamos kőmentes zóna, ami a 20-, és 30 cm szűrési mélységgel kapott képeken látszik legjobban. Alakját tekintve valószínűnek tartom, hogy ez a régészek korábban használt feltáró árka lehet, amiből a törmelékeket eltávolították. Ez a jelenség **a SzP jó felbontóképességét is alátámasztja.**



V.1.2 ábra: Régészeti mérés eredménye Sárissáp területén. a) geoelektromos; b) mágneses; c) GPR; d) SzP mérések eredményei. A piros vonallal rajzolt alaprajz a kápolna korabeli ásatás szerint vélt alaprajza. (Szalai et al. (2010) alapján.)



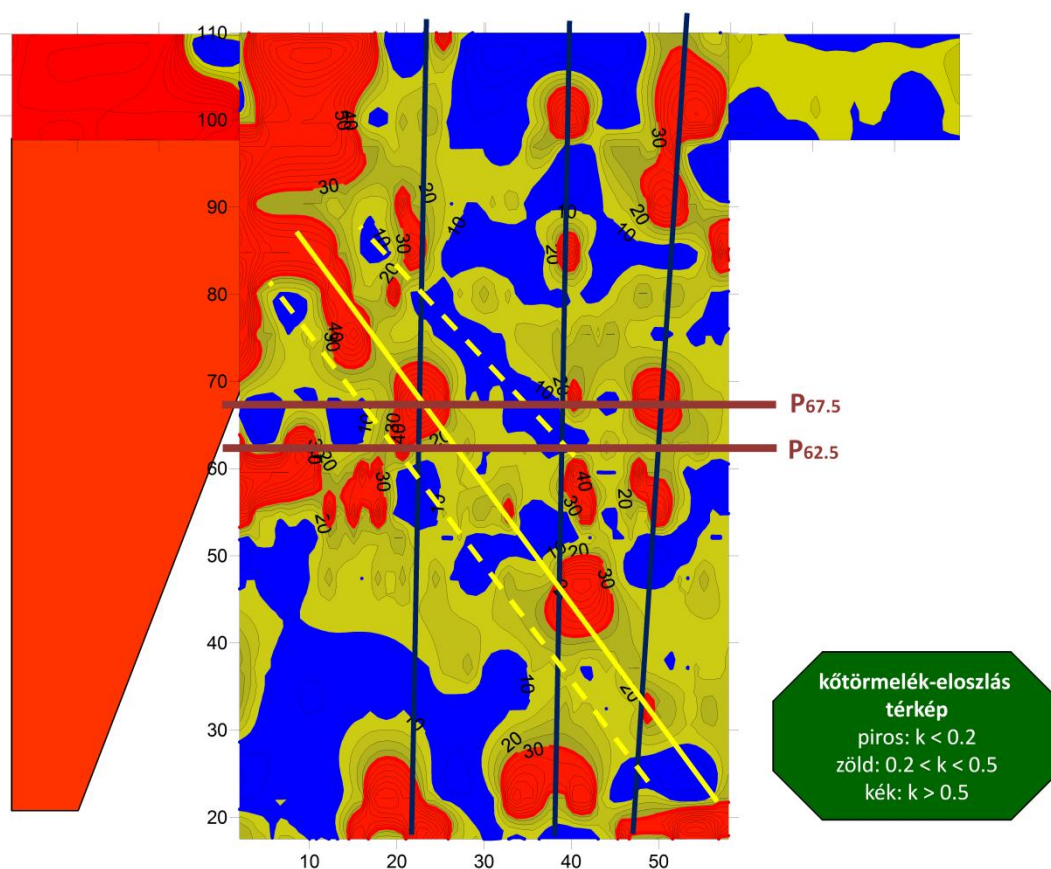
V.1.3 ábra: Szondázás SzP-val

Karszt kutatás (Homód-árok, Bakony)

Szalai et al. (2006b) alapján

Jóllehet a módszer geológiai alkalmazhatósága valószerűtlenebbnek tűnik, mint a régészeti, első alkalommal mégis arra került sor. Mint említettem a geoelektromos mérések kivitelezése során úgy tűnt, hogy az elektródák egy-egy területen nagy gyakorisággal ütköznek kőbe, míg más területeken alig, vagy egyáltalán nem. Ez a **szisztematikus viselkedés** késztetett arra, hogy elkészítsük a vizsgált karsztos terület térképét (V.1.4 ábra).

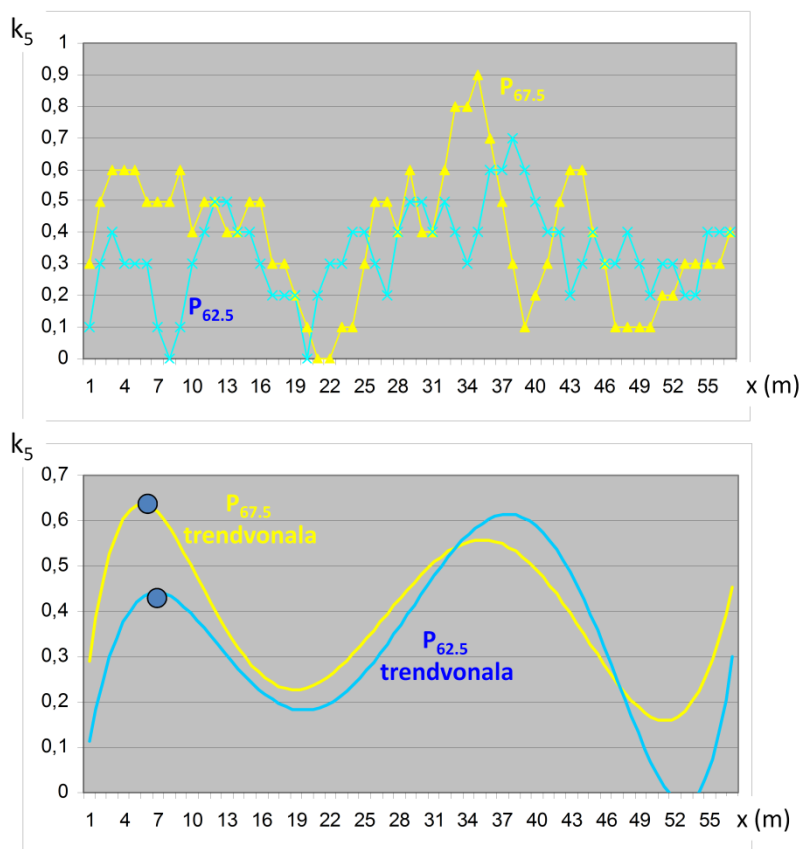
Ezen a futóátlagok alapján számított értékek három csoportban szerepelnek: a kis-, a közepes-, és a nagy kötőrmelék értékűnek tekinthető csoportokban. Már első pillantásra szembetűnő, hogy a terület alapvetően **két részre osztható**: a nyugati része alapvetően kötőrmelékmentes, míg a keletre eső részén változatos a kép. Itt is azonban jól látható piros foltok vannak, amelyek egy részét a terepen könnyen be tudtunk azonosítani **víznyelőként**. Ezek ráadásul közel É-D irányú vonalak mentén helyezkednek el (fekete vonalak a **V.1.4 ábrán**), illetve elképzelhető a térkép alapján egy ÉNY-DK irányú vonal is (sárga folytonos vonal). Ugyanígy irányúak a kék, azaz nagy k (kötőrmelék) értékű foltokat összekötő egyenesek is. Aligha képzelhető el, hogy mindezek geológiai jelentést ne hordoznának. Ez a mérés számomra igazolta, hogy **a kötőrmelék eloszlás mérése (ami SzP-val történt) képes geológiai jellegű információt szolgáltatni egy területről**.



V.1.4 ábra: Kötőrmelék-eloszlás térkép (Homód-árok, Bakony)

Egy ábrát még bemutatok annak igazolására, hogy szó nincs a k értékek véletlen eloszlásáról. Az **V.1.5 ábrán** felül két, egymástól ugyan 5 m távolságban felvett, 5 szomszédos pont értéke alapján számított futóátlag profil eredménye látható, azok mégis nagymértékben hasonlítanak egymásra. Jóllehet ezek a profilok a térkép alapján dominánsnak tűnő irányra merőlegesek, azért ne felejtjük el, hogy egyrészt nyilván nem tökéletesen 2D szerkezetről van szó, másrészt (és emiatt is) van egy másik elég jellegzetes irány is. Ennek fényében a $P_{62.5}$ és a $P_{67.5}$ profilok hasonlósága még inkább értékelendő. Ha pedig a két profil trendvonalát is összevetjük (az **V.1.5 ábrán** alul) aligha kétséges a hasonlóság, ahogy **a 2D**

szerkezet dominanciája sem. Ezen és hasonló ábrák alapján igazoltnak látom azt is, hogy a **SzP mérések eredményei megismételhetők**.



V.1.5 ábra: Két egymással párhuzamos 5 szomszédos pont értékének futóátlaga alapján számított kötőrmelék-eloszlás profil (Homód-árok, Bakony). Felül a profilok, alul a profilok trendvonala.

Repedésrendszer kutatása dolomitban (Kádárta, Bakony)

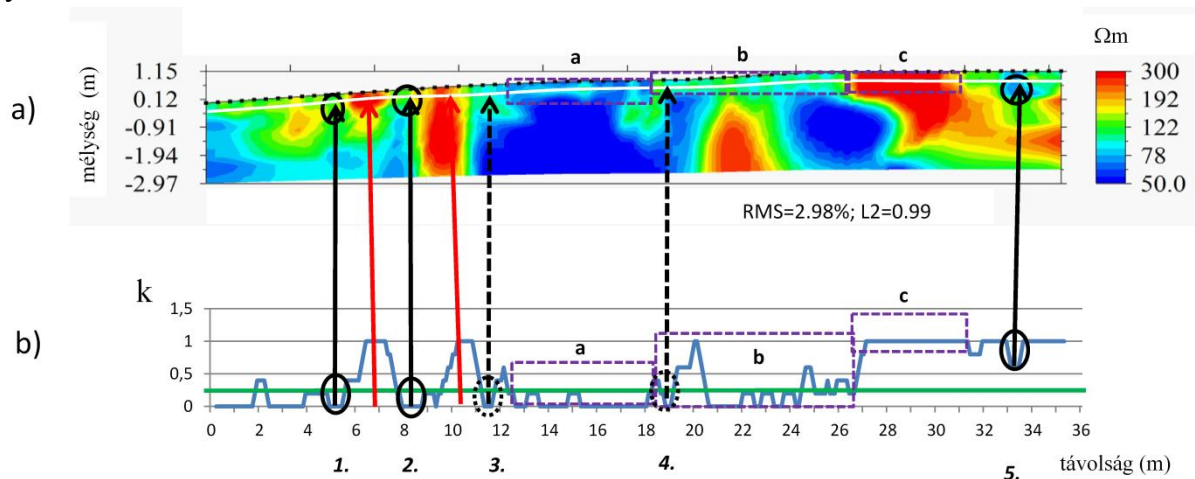
Szalai et al. (2018) alapján

Kádártán egy vízmű környékén a repedésrendszer feltérképezése volt a feladatunk. A területen **egységesen dolomit az alapkőzet a vékony talajréteg alatt**. A feladat megoldására ilyen kis skálán (néhány méteres repedéstávolság) a klasszikus geofizikai módszerek közül egyedül a geoelektromos módszer bizonyult használhatónak. Ahhoz, hogy az ezzel kapott eredményeket igazolni tudjuk, célszerűnek látszott ezért a SzP tesztelése.

A **V.1.6 ábra** mutatja a terület egyik oldalán mért profilon kapott ET és SzP eredményeket. A SzP eredmények és az ET felszínközeli értékei közötti jó korreláció nyilvánvaló. A SzP profil minimumhelyei egybeesnek az ET-ével (azaz a kis fajlagos ellenállású zónákkal), amint azt a folytonos nyilak is mutatják. Ennek megfelelően a maximumok is egybeesnek (piros nyilak). **Mindkét módszer esetén az adott körülmények között ugyanis arra utal a nagy érték, hogy ott meglehetősen konszolidált a dolomit.** Ekkor ugyanis kicsi a kőzet porozitása és így a víztartalma, emiatt pedig nagy a fajlagos ellenállása. Márpedig ha a kőzet repedezetlen, akkor gyakorlatilag biztosra vehető, hogy a SzP el fog akadni benne, azaz nagy lesz k értéke. Minél repedezettebb a dolomit, annál kevésbé igazak az itt leírtak. A szűk, kis ellenállású, kis k -értékű zónákat **repedésekként** értelmeztem.

Magyarázatra szorulnak még az *a*, *b* és *c* zónák. Ezekben fokozatosan nő mind a fajlagos ellenállás, mind pedig *k* átlagos értéke, alátámasztva a fentieket. A szaggatott nyilak helyén szintén markáns *k* minimumok vannak, ami viszont nem párosul hasonló ellenállás minimumokkal. Feltűnő ugyanakkor, hogy ezek egy a környezetüktől markánsan elütő kis ellenállású zóna két oldalán jelennek meg. Emiatt feltételezem, hogy itt vetődés történhetett a zóna két oldala mentén, ennek következtében indukálódnak ott a repedések, amiket az SzP közvetlenül megjelenít.

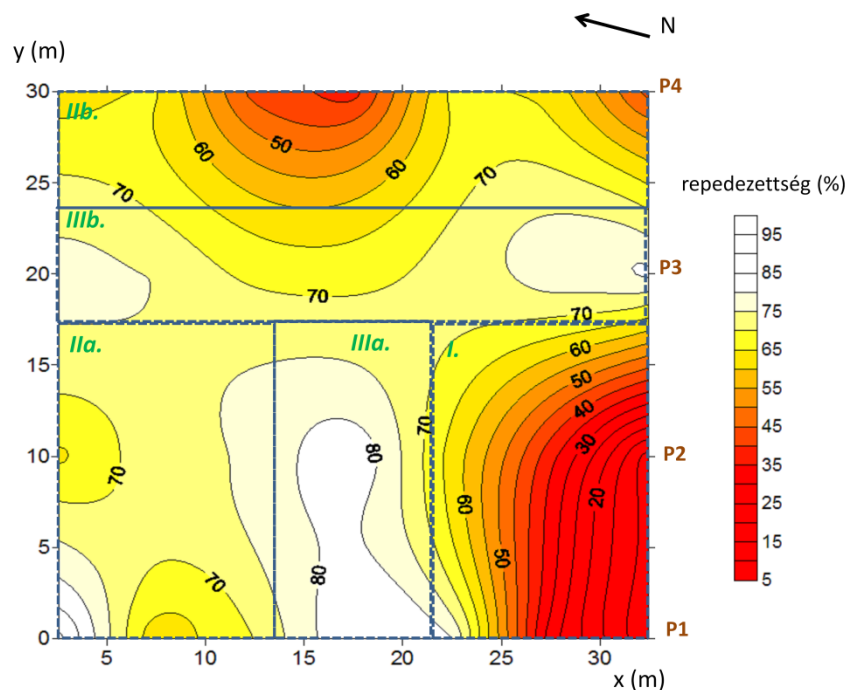
A korreláció a kétféle módszer eredményei között tehát nyilvánvaló, de nem tagadhatjuk le, hogy a helyzet nem minden esetben volt ilyen kedvező. Összesen négy profilt mérünk és ettől a szelvénytől távolodva a korreláció egyre rosszabb lett (rendre 0.59, 0.56, 0.13 és 0.07), bár a második profilon még erős volt. Ennek magyarázatát még keresni kell. Mivel a felszíni törmelékréteg bármilyen módosítása a SzP értékeket használhatatlanná teheti, ez az egyik leginkább elképzelhető ok, annál is inkább, mert a „rosszabb” profilok környezetében épület nyomait találtuk.



V.1.6 ábra: Elektromos Tomográfia és SzP eredmények a kádártai egyes számú profilon. Fekete nyilak: repedések helyei. Folytonos vonal esetében azok mindkét szelvény minimumhelyein jelennek meg. *a*, *b* és *c* zónák különböző ρ és k átlagértékű zónák.

Repedezettség térképet is készíthetünk (V.1.7 ábra) a SzP eredmények felhasználásával oly módon, hogy az $1-k$ érték 100-szorosát ábrázoljuk. Ekkor a repedezettség értéke %-ban kifejezve jelenik meg. Ez azt jelenti, hogy ha egyáltalán nincs repedés, akkor $k=1$ és így a repedezettség 0%, ahol pedig a fémrúd a nélkül hatol a kívánt mélységbe, hogy kőbe ütközne $k=0$, a repedezettség értéke pedig 100%. Minél nagyobb tehát a mállatlan közet térfogataránya, annál kisebb a valószínűsége, hogy a rúd képes elérni a kívánt mélységet, annál nagyobb a k és annál kisebb a repedezettség értéke.

Jelen esetben (V.1.7 ábra) a repedezettség térképen egyértelműen megjelenik egy nagy repedezettségű zóna (IIIa), ami az ET mérésekből is előadódott. Az I. zónában ellenben nagyon konszolidált a közet; a II. zóna átmenetet képez.

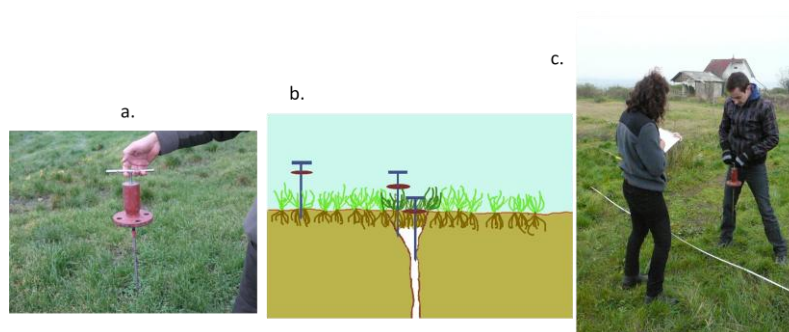


V.1.7 ábra: Repedezettség térkép (Kádárta, Bakony). P1-4 a térkép készítéséhez felhasznált profilok x tengellyel párhuzamosan

V.1.b. A NyomásPróba (NyP) módszer

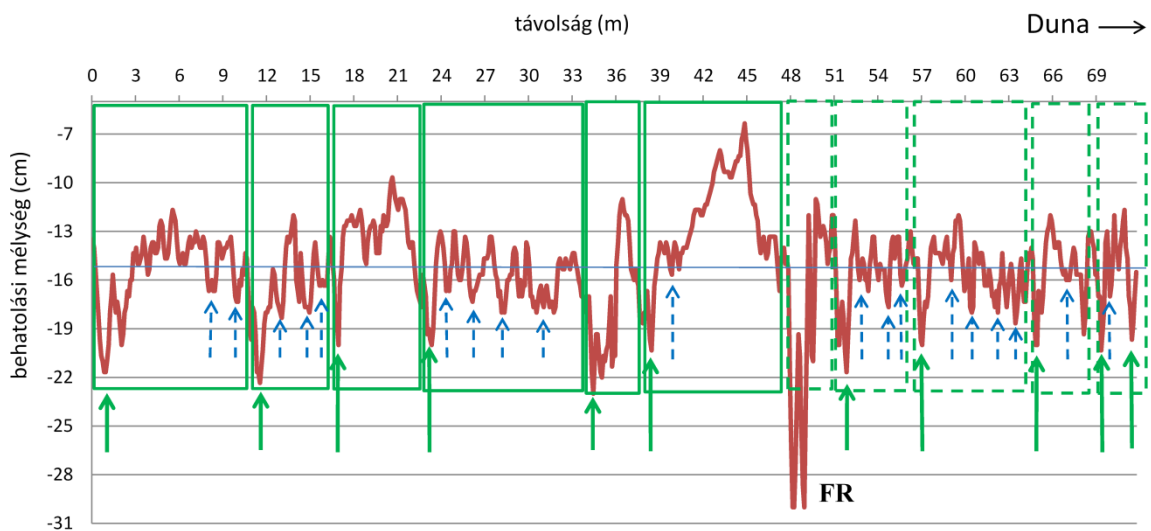
Szalai et al. (2014b) és Szokoli et al. (2018) alapján

A másik talajmechanikai módszer a talaj mechanikai ellenállását méri. Jóllehet van a piacon ilyen céllal fejlesztett műszer (pl. Hand penetrometer Eijkelkamp: <https://en.eijkelkamp.com/products/field-measurement-equipment/hand-penetrometer-eijkelkamp-set-a.html>), az általunk fejlesztett (V.1.8a ábra) alkalmasabbnak találtuk a leírt kutatásokra. Ennek a lényege, hogy egy hegyes végű T-alakú fémrúdra súlyt erősítettünk, a rudat pedig jól látható cm skálával láttuk el. A rudat mindig azonos, a személyzet ruháján jelölt 1 m-es magasságból merőlegesen leejtjük (V.1.8c ábra), majd az ujjunkat a talaj felett a rúdra szorítva a műszert felemeljük és leolvassuk a mélység értékét, amilyen mélyre a rúd belesüllyedt a talajba. Amennyiben valamilyen oknál fogva változás van a talaj mechanikai ellenállásában, az a NyP érték megváltozását eredményezi. Ilyen helyzet áll elő természetesen akkor is, ha a talajban folytonossági hiány (repedés, vagy üreg, V.1.8b ábra) van. Amennyiben ez a felszínről nem látható, de a hiány a NyP által elérhető mélységben van, akkor az ezzel a módszerrel elvileg detektálható.



V.1.8 ábra: A NyP módszer. a) a műszer. b) működési elve. c) használata

Az *V.1.9 ábra* egy példát mutat egy a NyP által kapott profilra. Mind a módszer stabilitását, mind pedig a terület homogenitását jól mutatja, hogy **a háttér értékek meglehetősen szűk tartományban, abszolút értékben 12-15 cm között találhatók**. Ez a terület a dunaszekcsői földcsuszamlás területe, ami homogén lösszel borított. Kisebb értékeket csak ott találunk (40-45 m), ahol **gépkocsikkal lejárták** a területet. A nagyobb értékek kisebb-nagyobb repedésekre utalnak, ahogy az a területen néhány **repedés közvetlen feltárásából** ki is derült. Mivel ezt a kutatást az *V.2 fejezetben* még tárgyaljuk, itt csak **a módszer nagyon jó felbontóképességére** hívom fel a figyelmet. Elméletileg akár 1 cm vastag repedések is kimutathatóak lettek volna a területen, jóllehet ahhoz hozzávetőleg 3 cm mintavételezési távolsággal kellett volna mérnünk. Ez azért elegendő, mert a repedések szélességük mintegy háromszorosának megfelelő szélességű eróziós völgyecskével rendelkeznek.



V.1.9 ábra: NyP mérés eredménye a dunaszekcsői földcsuszamláson. A folytonos nyilak a nagyobb, a szaggatottak a kisebb repedések mutatják. A téglalapok egyes repedési zónákat határolnak le. A folytonos vonalúak a mérés idején aktuális fő repedés (MF)-től balra, a stabil zóna felé esőket, míg a szaggatott vonalúak az attól jobbra, a Duna felé, az instabil zóna felé esőket.

V.2 Kiskálájú repedésrendszerek kutatása

Szalai et al. (2014b), Szokoli et al. (2018) és Szalai et al. (2017) alapján

Mint említettem, kiskálájú repedésrendszerek kutatására nem sok eszköz áll rendelkezésre. Gyakorlatilag a geoelektromos módszer az egyetlen használható geofizikai módszer, és még azzal is számos probléma akad. Attól függően, hogy mivel van kitöltve a repedés, lehet kis-, vagy nagy ellenállású a környezetéhez képest. Egymáshoz viszonylag közel lévő repedéseket sem képes elválasztani egymástól a geoelektromos módszer. A repedések irányának meghatározásában pedig – véleményem szerint – a jelenlegi alkalmazásuk (Taylor és Fleming, 1988) egyszerűen félrevezető; de erről lesz még szó.

Alternatívaként jött szóba a SzP és a NyP módszerek alkalmazása ilyen problémák önálló megoldására, vagy a geoelektromos mérésekkel kapott eredmények igazolására. A SzP egy

ilyen alkalmazásáról a kádártai mérések kapcsán már volt szó. Most a dunaszekcsői földcsuszamlás kapcsán a NyP módszer repedésrendszerek kutatására való használatát tárgyaljuk, de azt ET segítségével is vizsgáljuk.

Földcsuszamlás repedésrendszerének kutatása NyP és ET módszerekkel (Dunaszekcső)

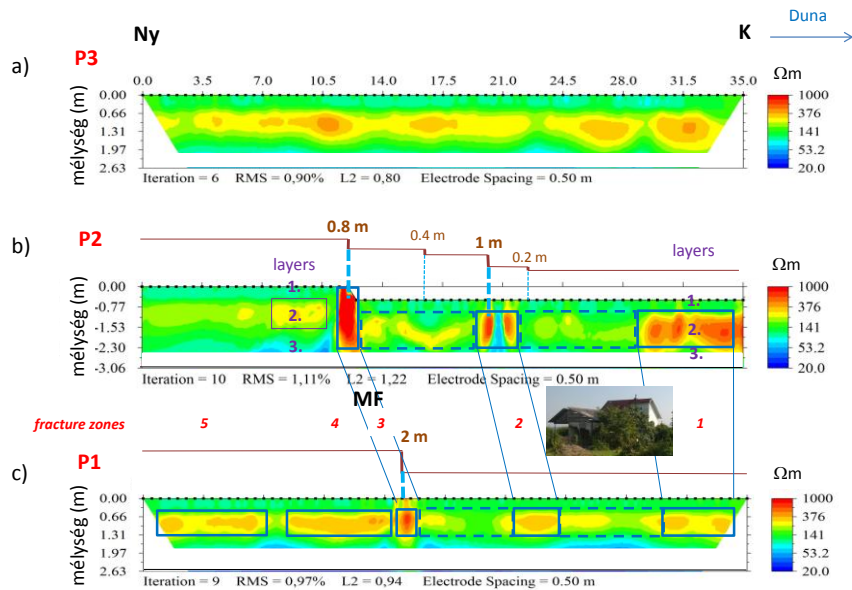
Jellemzően a földcsuszamlásokat területileg, vagy térfogatilag próbálják lehatárolni olyan alapon, hogy a csúszó tömeg fizikai tulajdonságai eltérnek környezetétől, vagy van valami csúszófelület, ami felett lévő kőzetek elmozdulását várják. A dunaszekcsői földcsuszamlás esetén egyikről sincs szó, ott egy meglehetősen egységes löszös összletet a Duna vize mos időnként alá, aminek következményeként lassú rogyás következik be. A korábban a földcsuszamlások vizsgálatára alkalmazott felszíni geofizikai megoldásoknak tehát itt nem sok hasznát vehettük.

Lassú folyamatról lévén szó azonban, elképzelhető volt, hogy az összletben már „készenléti állapotban” vannak azok a felületek, amelyek mentén fognak majd később csúszások bekövetkezni. Ezeknek **a repedéseknek a kutatását tűztem ki célul, hogy a repedésrendszer megismerésével jobban megismerhessük a csuszamlás belső szerkezetét és előrejelzést adhassunk arra vonatkozóan, mely területek fognak mozogni közeljövőben, azaz lehatároljuk a veszélyeztetett területet.**

Három, a területen mért ET profilt mutat az *V.2.1 ábra*. Tekintsük először a csuszamlás fókuszában álló területen lévő P2 profilt! A természetesen jelentős anomáliával megjelenő fő repedés mellett, ami a felszínen is látszik és topográfiai változás is kíséri, **két jelentős nagy ellenállású anomáliát** találtam. A profil jobb oldalán lévő kiterjedt anomália zóna nem meglepő, hiszen itt a Várhegy szélénél, egy szakadék peremén vagyunk. Itt húzódik néhány nagyobb repedés is, de inkább az jellemző, hogy **az egész terület meglazult**. Ezek mellett még egy jelentős anomáliát észleltünk. Ez nagyjából a már mozgásnak indult terület közepénél van. Az anomáliák előjeléből látszik, hogy ezek a repedések üresek, azaz levegővel vannak kitöltve.

A **P1** karakterisztikája hasonló a P2-éhez, sőt ugyanolyannak mondható azzal az eltéréssel, hogy mindhárom anomália kisebb amplitúdóval jelenik meg itt. Megjegyzem, hogy ezen a profilon a mérésekkor még egyetlen repedésnek sem volt szemmel látható nyoma. Az ugyanakkor jól látszik, hogy itt is a hegy oldalától legtávolabbi anomália a legerősebb, ami előrevetíti, hogy a csúszás itt fog bekövetkezni, ha az elér a P1 alatti területig. **P3** viszonylag messze van P1 és P2-től, tehát mintegy **referencia területnek** tekinthető. Minden esetre az itt megjelenő anomáliák, ha nem is a fő anomáliával, de P1 másik két anomáliájával már összemérhetek, sőt némelyek meg is haladják azokat.

Az *V.2.2 ábra* bemutatja a P1 profilon a NyP eredményeket is. Összevetve a két alsó ábrát láthatjuk, hogy ahol a az ET repedést jelzett ott a NyP is nagy értékeket produkált. Sajnos láthatjuk itt a NyP hátrányos tulajdonságát is, hogy a 21-24 m zónában az anomália nem túl látványos, a területre látogató turisták által lejárta, tömörített ösvény miatt. Ettől eltekintve a korreláció nagyon jónak mondható, bár az ET felbontóképessége számottevően kisebb, mint a NyP-é.



V.2.1 ábra: ET mérések eredményei a dunaszekcsői földcsuszamlás területén. A folytonos vonalú téglalapok a repedésnek/repedés zónának értelmezett területeket, a szaggatott vonalú téglalapok pedig a repedésmentes zónákat határolják a fő repedés Duna felőli oldalán. A kék vonalak a megfelelő repedészónákat kötik össze. A vastag szaggatott vonalak előre jelzett repedéseket jelölnek, a vékonyak olyanokat, melyeket nem jeleztem előre. P1 és P2 szelvények felett az adott profilokon a topográfia az újabb csuszamlás után 2015. 08. 31.-én. Az épület fotója az épület helyén, egy stabilnak diagnosztizált zónában látható.

Mind a P1, mind a P4 profilokon jól látszik, hogy a mérésekkor látható elmozduláson (MF) túl is a már mozgó területen észleltékhez hasonló amplitúdójú anomáliák találhatóak. Ez annyit jelent, hogy **már a mérés idején „készenlétben voltak” ezek a repedések is, hogy a jövőben majd csúszási felületként funkcionáljanak.**

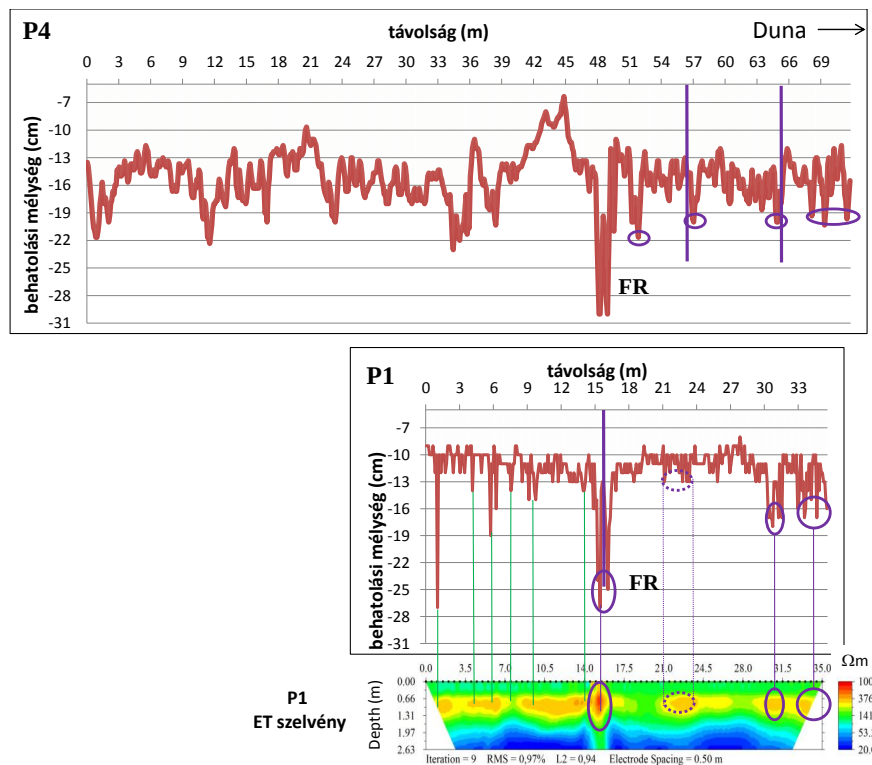
A méréseinket követően mintegy fél évvel újabb földcsuszamlásokra került sor, ami lehetőséget adott a leendő csúszófelületekre tett előrejelzések ellenőrzésére. Az **V.2.3 ábra** szerint **majdnem kivétel nélkül minden előrejelzés beigazolódott.** Jelentős új repedés jelent meg 57 m-nél P4-en, ahogy azt a nagy NyP anomália előre jelezte. Kisebb repedés jelent meg 65 m-nél, ahol szintén volt anomália. 51 m-nél szintén várható volt repedés megjelenése, de ez ott még (?) nem történt meg. A P4 végén (65-71 m) megjelenő anomáliák a földcsuszamlás széléhez köthetőek, amint azok az ET profilokon is megjelentek. Ez a zóna P1-en is jól látható. P1 viszont semmilyen más anomáliát nem mutat a fő repedés Duna felőli oldalán, ami emberi tevékenységnek (sűrűn használt, így letaposott gyalogösvény) köszönhető, ami a NyP módszert P1 ezen szakaszán használhatatlanná tette. A fő repedés ugyanakkor már ekkor világosan látszott ezen a profilon (16 m-nél), jóllehet még semmiféle felszíni indikációja nem volt.

Az ET eredmények megmutatták, hogy a repedezett és a repedésmentes területek jól elkülöníthetőek egymástól, ugyanakkor egyedi repedések külön-külön nem mindig

jeleníthetők meg. ET mérésekkel le lehetett határolni a veszélyeztetett területet, sőt a leendő csúszási frontok helyei is előre jelezhetőek voltak.

A NyP módszer akár 2-3 cm széles repedések kimutatására is képes volt, **lehetővé téve a repedésrendszer nagyon nagy felbontóképességű feltárását** ezzel a leendő csúszási frontok előrejelzését és a veszélyeztetett területek lehatárolását.

Mind az ET, mind a NyP előre tudta tehát jelezni a későbbi csúszások frontvonalát. Előre jelezték a fő törés folytatódásának irányát, valamint olyan új repedési frontok megjelenési helyeit, amiknek méréseink idején még semmiféle jele nem volt. Eredményeink alapján várható volt, hogy a csúszási front közeli blokkok bármikor leválhatnak. A veszélyes területen belül elkülöníthető volt egy biztonságos terület, aminek egy egységben való csúszása volt előre várható.

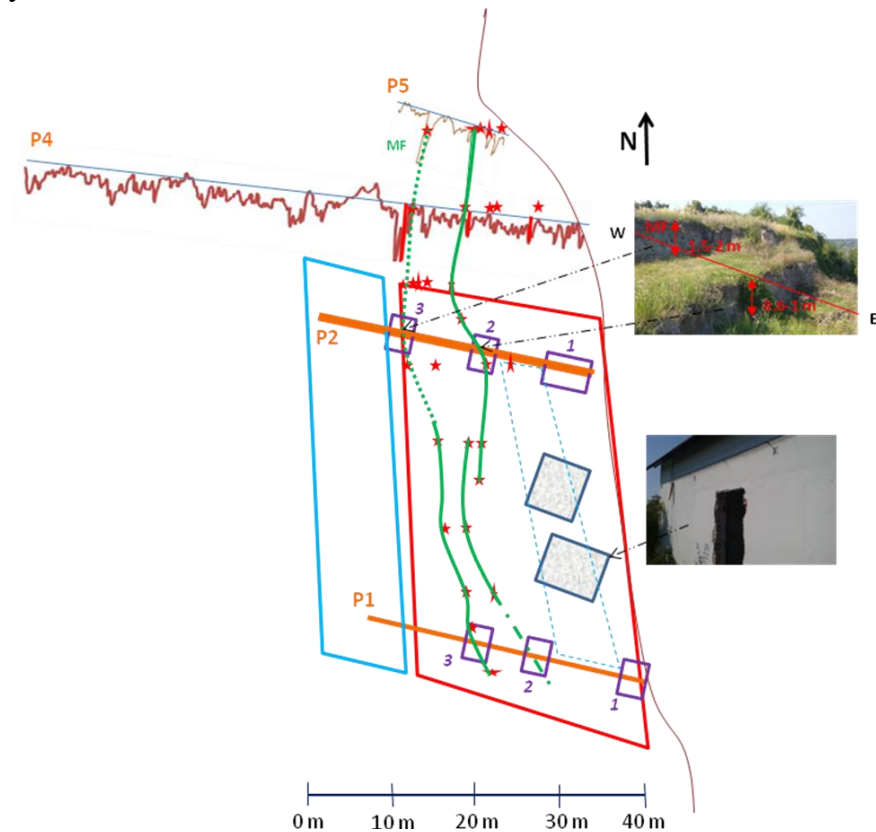


V.2.2 ábra: ET és NyP mérések eredményei a dunaszekcsői földcsuszamlás területén. A lila vastag vonalak az újonnan nyílt repedések helyét mutatják. Az ellipszisek a NyP és ET anomáliák helyeit jelzik, szaggatott vonallal, ha kevésbé jelentősek. Lila, illetve zöld vékony vonalakkal a NyP és az ET anomáliák vannak összekötve előbbiekkal az aktív, utóbbiakkal a földcsuszamlás passzív oldalán. FR: fő repedés.

A méréseinket 21 hónappal követő új tömegmozgások szinte minden előrejelzésünket **beigazolták**. Mindössze a szélső blokkok nem váltak még le. A kisebb újonnan kialakult repedéseket sem láttam előre, aminek valószínűleg az oka, hogy azok maguknak az új mozgásoknak a következményeként keletkeztek, korábban esetleg nem is lehettek jelen semmilyen formában. Az ET profilok sajnos nem nagyon nyúltak bele a még **passzív zónába**, de a NyP mérések kimutatták, hogy **már ott is jelentős repedések vannak jelen**.

Mind az ET, mind a NyP módszerek képesnek bizonyultak földcsuszamlás által veszélyeztetett területek lehatárolására és repedésrendszerük feltérképezésére, ily módon

lehetőséget adva a megfelelő időben történő riasztásra elkerülendő építmények és emberi életek veszélyeztetését.



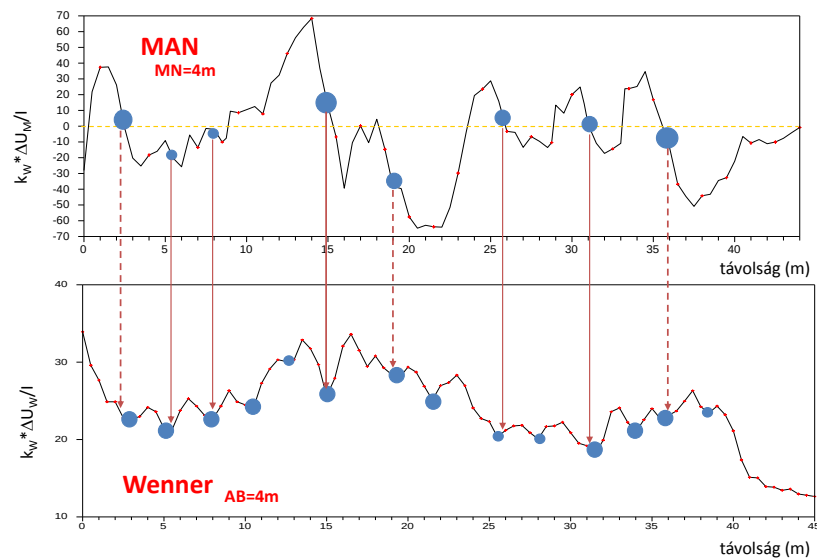
V.2.3 ábra: Az ET mérések a P1 és P2 profilon és a P4, P5 NyP profilok eredményeinek verifikálása. A zöld szaggatott vonal a mérésünkön a felszínen látható FR-t mutatja, a zöld folytonos vonal a méréseink után kifejlődött, a felszínen látható repedéseket, a zöld pontvonal az új repedés várható folytatódását. A barna vonal a földcsuszamlás frontja. A csillagok az új repedések helyei egyes profilok mentén. Lila téglalapok: az ET mérésekből értelmezett repedési zónák. Piros téglalap: veszélyesnek feltételezett területek. Kék téglalap: valószínűleg (még) nem veszélyeztetett terület. Kék szaggatott téglalap: a veszélyeztetett területen belüli vélhetően stabil terület. Kék téglalap: épületek alapterületei. A felső fotó a két legnagyobb repedést mutatja 21 hónappal a méréseink után. Az alsó fotó azt demonstrálja, hogy a kék téglalappal jelölt területen lévő ház falán egyetlen repedés sem volt az eredmények verifikálása idején. A kék vonalak P4 és P5 mentén a NyP profilok alapvonalait mutatják. A rövid piros vonalak az anomáliáknak arra való levetítésére szolgálnak. MF: fő repedés.

Repedésrendszer kutatás karsztos területen Wenner-, és MAN elrendezésekkel (Szalonna)

Szalai et al. (2006a) alapján

Repedésrendszerek kutatása esetén általában praktikusabb hagyományos profilmérést mérni, mint tomográfiát, mert utóbbiból sem származik általában sokkal több előnyünk, de kivitelezése idő-, és munkaigényesebb. A Szalonnán végzett méréseket a hagyományos Wenner elrendezéssel végeztük, és vizsgáltuk a MAN elrendezés használhatóságát is. Ebben az esetben is egymástól néhány méterre lévő repedések feltérképezése volt a cél.

Az *V.2.4 ábra* mutatja egy profilon az ezzel a két elrendezéssel felvett szelvényeket. Amint a *III. 2 ábra* is mutatta ilyen ható felett a **Wenner elrendezés** minimummal, a **MAN elrendezés** pedig pozitív-negatív kettős anomáliával fog jelentkezni (természetesen ehhez a jel előjelét is regisztrálni kell). Az *V.2.4 ábrán* jól látható, hogy ez be is következett, számos minimumot találunk a Wenner szelvényen, amelyek többsége esetében annak párját is megtaláljuk a MAN szelvényen. A 14 Wenner minimumból azonban 6-nak nem találtam párját a MAN szelvényen, ugyanakkor 3 MAN anomália helyén szinte csak alig látható anomália jelent meg a Wenner mérés esetében. Ezek az eltérések a **két elrendezés különböző behatolási mélységére, vagy különböző érzékenységére utalhat**.



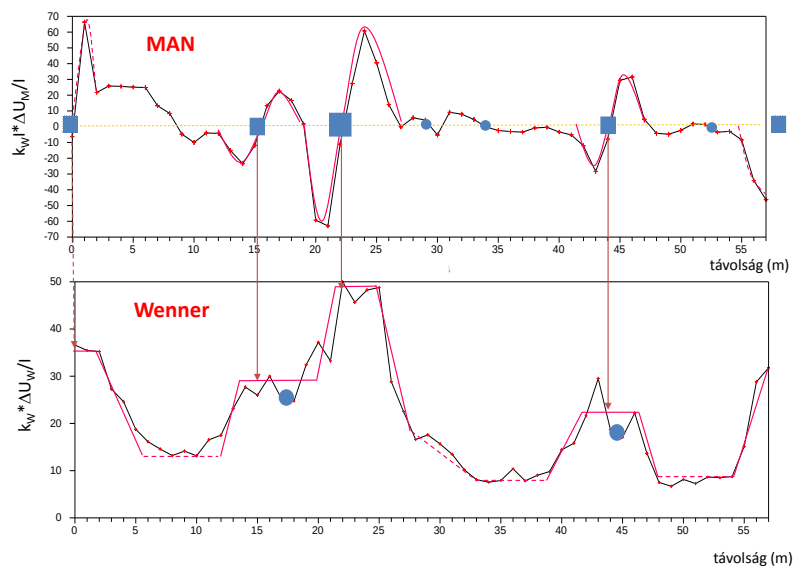
V.2.4 ábra: Csapadékos időszakot követően (áprilisban) MAN és Wenner elrendezésekkel végrehajtott geoelektromos profilmérések

Mivel a MAN elrendezés esetében ábrázolt érték kiszámításához a Wenner elrendezés geometriai faktorát használtam, a két elrendezés értékei összevethetőek egymással. Így feltűnő, hogy mennyivel nagyobb a MAN értékek dinamikatarományja: A Wenner elrendezés esetében a jelek a 20-32 Ωm tartományban mozognak (ha nem tekintjük a szelvény legelejét és legvégét), míg a MAN esetében a -70-től +70-ig tartó tartományban. Utóbbi esetben szándékosan nem írok Ωm -t, jóllehet dimenziója ez lenne, de ott egy mesterségesen kreált értékről van szó, hiszen nem a saját geometriai faktorával szorozva képeztük. Az anomáliákat nézve a legmarkánsabb a különbség a 15 m-nél lévő anomália esetében van: 7 Ωm 110 Ωm ellenében.

Jóllehet a Wenner és a MAN elrendezésekkel kapott képek különbségeinek oka még tisztázandó, az mindenképpen kiderült, hogy **mindkét módszer alkalmazható repedések detektálására és lokalizálására**. Annál nagyobb volt a meglepetés, amikor később visszatérve a területre az *V.2.5 ábrához* hasonló eredményeket kapunk. A kis hullámhosszúságú anomáliák szinte teljesen eltűntek, helyettük néhány markáns, nagy amplitúdójú anomália megjelenése lett a jellemző mindkét szelvényen. A Wenner szelvényen ezek annyira domináltak, hogy el is kellett vetni azt a feltételezést, hogy repedéseket látnánk, ehelyett sokkal inkább úgy tűnik, hogy itt **az aljzat lefutását követhetjük nyomon**. Az

emiatt bekövetkező horizontális irányú fajlagos ellenállás-változások helyén a MAN profil is jelentkezik a kettős anomáliával.

Feltételezésem szerint az történhetett, hogy míg az első típusú (áprilisi) mérés esetén a repedések **víz tartalma nagy volt**, addig a második típusú (augusztusi, hosszú szárazságot követően) mérések idejére az jelentősen lecsökkent, így a repedések fajlagos ellenállása nem tért el többé jelentősen a környezetétől, mintegy láthatatlanná téve azokat. Ily módon viszont ugyanazokkal a mérésekkel **az aljzat topográfiájáról** kaptunk zavarmentesebb képet. Megállapítható tehát, hogy a **terepi mérések kivitelezésének ideje, elsősorban a mérést megelőző időszak csapadékviszonyai nagyon nagy szerepet játszhatnak bizonyos mérések esetén. Az ideális körülmények között nagyon jól látható hatók nem megfelelő körülmények esetén akár teljesen detektálhatatlanok lehetnek. A különböző víztelítettségi viszonyok a felszín alatti térség különböző aspektusait emelhetik ki, mint ahogy a bemutatott példában a csapadékos időszakot követően végrehajtott mérés a repedések megjelenítésében teljesített nagyon jól, addig a száraz időszakot követő mérés az alapkőzet topográfiájának megjelenítésében.**



V.2.5 ábra: Száraz időszakot követően (augusztusban) MAN és Wenner elrendezésekkel végrehajtott geoelektromos profilmérések eredményei

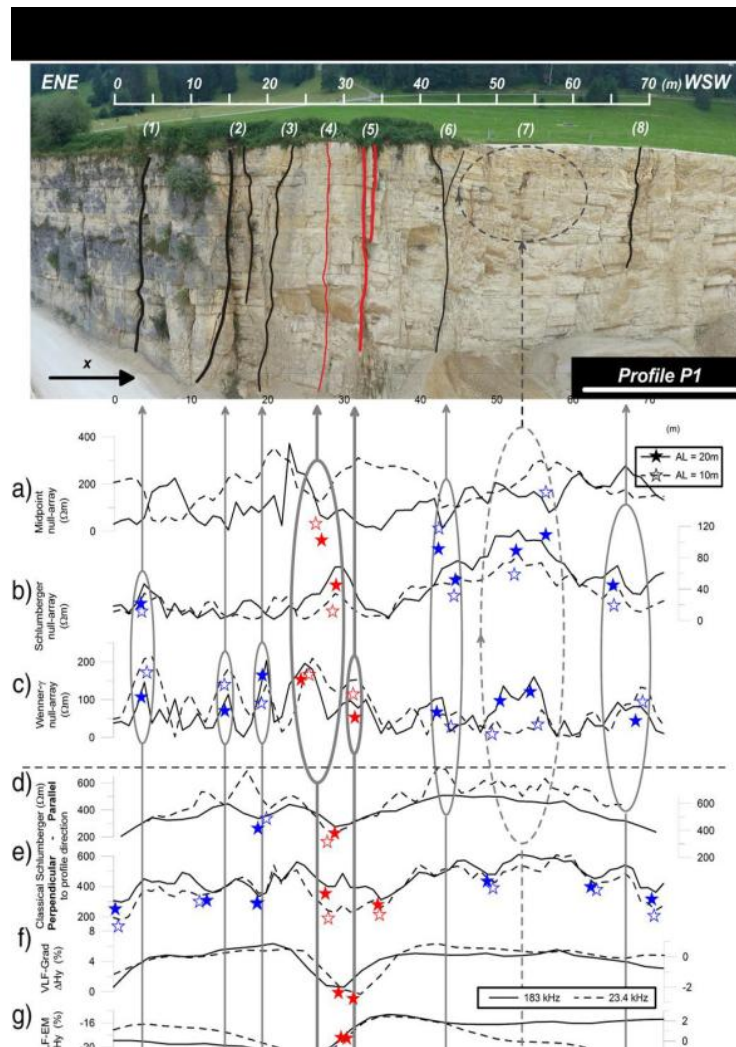
Repedésrendszer kutatása karsztos területen geoelektromos null-elrendezésekkel (Svájc) *Falco et al.(2013) alapján*

A svájci Jurában végzett mérések elsősorban P. Falco érdeme, de mind a repedésrendszerek kutatásán, mind a null-elrendezések használatán keresztül szorosan kötődik az értekezéshez. A kutatások célja kisskálájú repedésrendszer repedéseinek lokalizálása és azok irányának meghatározása volt. Erre a célra elektromágneses módszerek mellett Schlumberger elrendezést használtunk mind hagyományos, mind pedig offszet üzemmódban, azaz oly módon, hogy az elrendezés iránya merőleges volt a profiléra, azaz közel párhuzamos a repedések feltételezett csapásirányával. A mérések végső célja azonban az volt, hogy kiderüljön, milyen a null-elrendezések teljesítőképessége ilyen célú mérések esetén. Ezeket az elrendezéseket kissé szokatlan módon, a profilirányra nézve 45°-os szögben döntve helyeztük

le és ebben a szögben is maradt a profil mentén történő mozgataása során. Három null-elrendezés, a Schlumberger null-, a Wenner- γ null (γ_{null} , vagy γ_0) és a középpontos null, azaz a MAN elrendezések (II.1.13 és II.1.14 ábrák) vizsgálatára került sor.

Az összes vizsgált elrendezés közül a Schlumberger null-, és a Wenner- γ null-elrendezések adták a legjobb eredményeket a numerikus modellezés során, míg a terepi teszt során – ahol az eredményeket közvetlenül a valósággal, egy kőbánya falán látható repedésekkel validáltuk (V. 2.6 ábra) – a Wenner- γ null-elrendezés volt a legmeggyőzőbb.

Ismételten terepi tesztmérésekkel sikerült bizonyítani a null-elrendezések terepi használhatóságát, mi több azok előnyös voltát a hagyományos elrendezésekkel szemben. Kiskálájú repedésrendszerek kutatásában tehát a null-elrendezések különösen perspektivikus eszközöknek tűnnek.



V.2.6 ábra: A kőbánya fala a bejelölt, számozott kisebb (fekete vonalak) és nagyobb (piros vonalak) repedésekkel. A null-elrendezés profilok 10 m-es (szaggatott vonal), illetve 20 m-es (folytonos vonal) elrendezés hosszú elrendezésekkel készültek. A csillagok az adott elrendezésekkel detektált anomáliákat jelölik. Az ellipszisek azokat az anomáliákat kötik össze, amelyek egyazon geológiai jelenséghez rendelhetők, és hogy melyikhez, azt nyilak is mutatják. A szaggatott vonalú ellipszis a szélesebb (7)-es repedészónához kötődik. (Falco et al., 2013-ból)

Repedések irányának kutatása

Falco et al.(2013) és Szalai et al. (2009a) alapján

Repedések irányának kimutatása ismeretlen irányítottságú repedések, sőt akár többirányú repedésrendszerek esetén bevett gyakorlatnak számít elsősorban az USA-ban (*Taylor és Fleming, 1988*). A mérés során az (általában Schlumberger) elrendezést annak középpontja körül forgatják el, majd a különböző szögekben mért értékeket sugárdiagramon ábrázolják. Az eredmény az V.2.7 ábrán láthatókhoz hasonló. Erről aztán feltételezik, hogy több ellipsziszből tevődik össze, amiknek a **hossztengelyei jelölik ki az egyes repedések irányát** a területen, ami felett mérték. Ennek alapfeltétele az a feltételezés is, hogy minden esetben fellép az ú.n. **anizotrópia paradoxon** jelensége (*Maillet és Doll, 1932; Salát, 1975*).

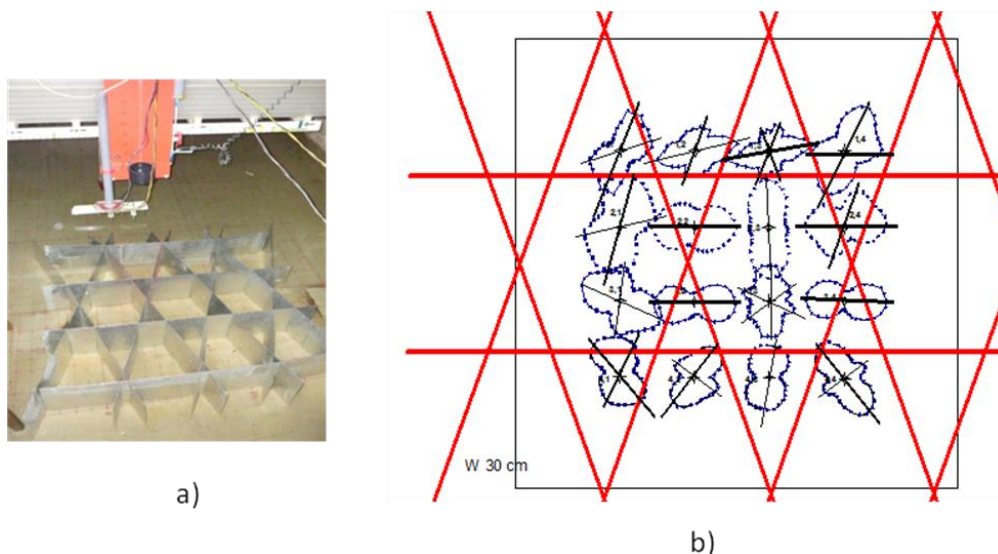
Pályám során számos alkalommal végeztem hasonló méréseket (pl. Egyiptom, Szalonna, Homód-árok) és nem szereztem túl jó tapasztalatokat többirányú repedésrendszerek esetén. Kétségeim eloszlatására analóg modellezést végeztünk (*Szalai et al., 2009a*) az V.2.7a ábrán látható modell felett, ahol a többirányú repedésrendszert alumíniumlapok reprezentálták. A V.2.7b ábra mutatja a 30 cm hosszúságú Wenner elrendezéssel kapott sugárdiagramokat, amelyek azok középpontjának megfelelő pozícióban lettek mérve. Fekete vonalakkal az értelmezett repedésirányokat is bejelöltem. Ha a vonalak vastagok, akkor azok többé-kevésbé megfelelnek valamelyik repedésiránynak a három közül. Általában, a mérés helyzetétől függetlenül elmondható, hogy a 16 diagram közül egyetlen volt képes mindhárom irányt elég pontosan kimutatni (felső sor 3.). 3 esetben 2 irányt is jól meghatározott a módszer, de a többi esetben örülhettünk, ha legalább 1 irányt sikeresen meg tudtunk határozni ily módon. A téves iránymeghatározások ráadásul nagyon félrevezethetőek lehetnek főleg kis számú mérés esetén, amire jó esély van a mérések idő-, és költségigényes volta miatt.

Arra a következtetésre jutottam ez alapján, hogy **a terepi mérések eredményeinek hiányosságai**, amit a módszer kidolgozói (*Taylor és Fleming, 1988*) sem tagadtak, **nem a terepi körülmények következményei, hanem fizikai okokból erednek**. Teljesen elvetve az anizotrópia paradoxon fellépésének feltételezését sem jutottam jobb eredményekre. Biztosra veszem azonban, hogy **az anizotrópia paradoxon jelensége egyáltalán nem lép fel minden körülmények között, de fellépésének körülményeit még tisztázni kell**. Ráadásul, ha olyan körülmények között mérünk, ahol ez a jelenség garantáltan fellép, még abban az esetben sem vagyok biztos benne, hogy a módszer valóban megfelelően működőképes lesz.

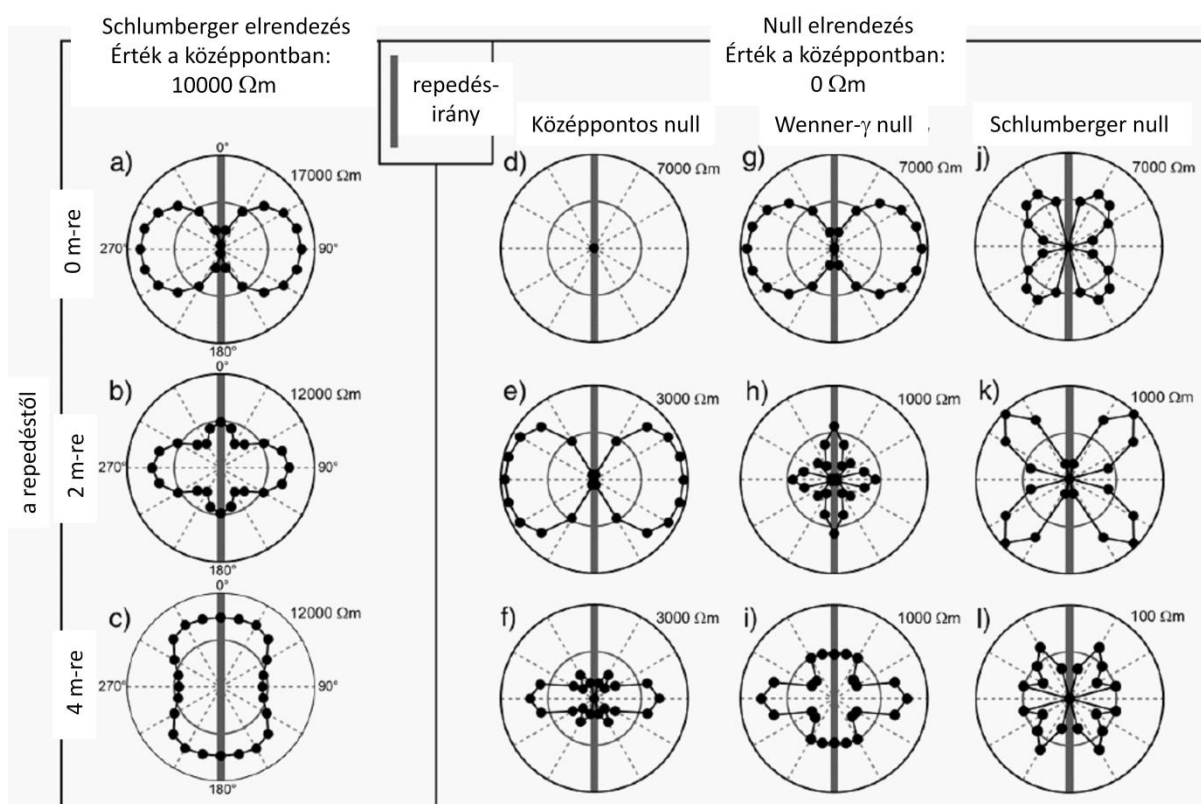
Még egy bekezdés erejéig visszakanyarodunk a svájci mérésekhez. **Egyirányú repedésrendszer esetében** az azimutális mérés életképesnek bizonyult (*Szalai et al., 2002*). Ott kimutattam azt is, hogy a vizsgált Schlumberger null-elrendezés pontosabban megadta a repedés irányát, mint a hagyományos Schlumberger elrendezés, ráadásul, ha az elrendezés középpontja eltávolodik a hatótól, akkor a kép olyannyira megváltozik, hogy a repedést akár eredeti állapotához képest 90°-ban elforgatottnak is hihetnénk. Más távolságban pedig egyetlen repedésirány helyett kettőt látszik kimutatni (V.2.8 ábra). A Schlumberger null-elrendezés azonban a repedéstől mért távolságától függetlenül képes volt a repedés irányának pontos meghatározására. Egy hiányossága volt: hogy két, egymásra merőleges lehetséges irányt adott.

Ezt a hiányosságot is kiküszöbölhetjük (ha szükség van rá, mert ennyire sem ismerjük a várható irányt), amennyiben **a Schlumberger null-, és MAN elrendezésekkel** is mérünk

(Falco et al., 2013). Ezek együttesen egyértelműen képesek kijelölni az irányt és képesek megbízhatóan meghatározni is azt (V.2.8 ábra).



V.2.7 ábra: Azimutális elektromos analóg modellmérések. a) a modell a mérőberendezéssel; b) A többirányú repedésrendszert modellező alumíniumlemez felülnézeti képe (piros vonal) az adott pozíciókban mért polárdiagramokkal a 30 cm elrendezés-hosszúságú Wenner elrendezéssel mérve



V.2.8 ábra: Azimutális mérések különböző geoelektromos elrendezésekkel (Falco, 2013-ból)

VI. Összefoglaló a kvázi null-elrendezésekkel és kis skálájú repedésrendszerekkel kapcsolatos kutatásaimról és a dolgozatban megfogalmazott tézisek

VI.1. A valaha használt geoelektromos elrendezések és azok rendszerezése (A II.1 fejezet alapján)

A geoelektromos null-elrendezésekkel korábban szerzett tapasztalataim birtokában nehezen értettem, hogy miért nem használják ezeket az elrendezéseket a geoelektromos kutatásban. Ennek eredménye lett az a munka, aminek során áttekintem az angol szakirodalom nagy részét és a hozzáférhető orosz nyelvű szakirodalmat. Jóllehet már létezett egy ilyen mű (*Whiteley, 1973*), azt nem találtam elég teljesnek, megfelelően rendszerezettnek és egységesnek sem. Ettől a céltól vezérelve ilyen munkát szerettem volna a kutatók rendelkezésére bocsátani és természetesen választ kapni a null-elrendezésekkel kapcsolatos kérdéseimre. Megdöbbenő volt látnom, hogy a MAN elrendezés **már 1957-ben** (*Tarkhov, 1957*) vizsgálatok tárgya volt, de azt is, hogy milyen **könnyen elvetették** aztán ezt az elrendezést.

Szintén rendkívül meglepő volt látni, hogy az összegyűjtött 102 elrendezés mindegy negyede, 25 elrendezés (*II.1.13 ábra*) a definícióm szerint null-elrendezés volt. Még rejtélyesebbnek találtam, hogy a cikkek ezeket az elrendezéseket ugyan jól használhatóknak mutatták be, mégis két kivétellel mindegyik mindössze egyetlen alkalommal szerepelt publikációban. Az egyik kivétel a jól ismert **négyszet- γ (square- γ) elrendezés** (*Habberjam és Watkins, 1967*), amely azonban nem önmagában használatos, hanem kombinálva más négyszet (négyszet- α , négyszet- β) elrendezésekkel. A másik elrendezés a **Schlumberger null-elrendezés**, amit korábban jómagam is használtam (*Szalai et al., 2002*). Erről ugyan egész könyv íródott (*Bogolyubov, 1984*), de számomra meglepő módon nem annak profilmérési, hanem **szondázási** célú használatáról. Meglepetésem oka az volt, hogy ez az elrendezés mondhatni **többszörösen is null-elrendezés**, mert **nem csak homogén féltér, vagy 1D, de 2D, sőt még szimmetrikus 3D szerkezetek felett is nulla jelet ad**. Elméletileg. Ma már én sem tartom kizártnak a Schlumberger null-elrendezés szondázási célra való hasznosíthatóságát, jóllehet erősen kérdéses, hogy a gyakorlatban lenne-e értelme, mivel valószínűleg jóval több mérést igényelne, mint egy hagyományos szondázás.

Ezt követően próbáltam utána járni annak, **mi lehet az oka, hogy** perspektivikusnak tűnő voltak ellenére **nem használják ezeket az elrendezéseket**. Arra a következtetésre jutottam, hogy ennek okai részben **gyakorlatiak**: a legtöbb null-elrendezés ugyanis vagy **fókuszáló**-, vagy **összetett** elrendezés volt (*II.1.14 ábra*), amelyek **használatuk idő-, és munkaigényesebb**, mint az egyszerű elrendezéseké. A null-elrendezések esetében **látszólagos ellenállás sem számítható** a k geometriai faktor végtelen volta miatt, ami szintén könnyen eltántoríthatta a kutatókat ezen elrendezések behatóbb vizsgálatától és szintén óvatosságra inthették őket a **kis jelek** mind mérés technikai szempontból, mind pedig az értelmezés nehézségei miatt. Mindemellett a null-elrendezésekkel mért **jelek előjele is válhatnak**, sőt általában váltanak is.

Fentiek alapján leszűrhetjük a következtetést, hogy itt **valami teljesen más természetű elrendezésekről van szó, mint a többi elrendezés esetében**. Emiatt aztán a null-elrendezésekkel való kutatás jóval több erőfeszítést követel, mint a nem-null-elrendezésekkel, és - úgy látszott -, hogy nem is kecsegtetnek sok sikerrel, főleg, ami a gyakorlati használhatóságukat illeti.

Mivel azonban a kétségek **ellenére** mindegyik null-elrendezés **használhatónak tűnt**, a gyakorlati irányban kerestem a megoldást. Az említett gyakorlati problémákra a **geometriai null-elrendezések** formájában sikerült megoldást találni. Ezek olyan null-elrendezések, amelyek pusztán **az elektródák megfelelő pozicionálásának köszönhetően adnak nulla jelet a homogén féltér felett**. Ilyen elrendezések nagyon könnyen kreálhatunk, hiszen ehhez mindössze az kell, hogy adott áramelektrodák esetén a homogén féltér felett, a felszínen kialakuló potenciáltér ekvipotenciális vonalain kell elhelyeznünk a két potenciál-elektrodát.

Természetesen célszerű úgy kiválasztanunk a potenciál-elektrodák helyzetét, hogy abból további előnyünk is származzon. A kezdeti mérések során ezek kiválasztásának alapja az volt, hogy azok **hasonlítsanak valamilyen hagyományos elrendezésre (I.1 ábra)**. Ennek haszna az volt, hogy **a hagyományos és annak null-elrendezés változatával könnyen lehetett egymás után mérni**, hiszen az áramelektrodákat helyben hagyva csak a potenciál-elektrodákat kellett elforgatni úgy, hogy azok összekötő vonala 90° -al elforgatott helyzetbe kerüljön. Ennek további haszna volt, hogy így a null-elrendezéssel végrehajtott profilmérés során kapott $\Delta U/I$ értékeket az adott null-elrendezésnek megfelelő hagyományos elrendezés geometriai faktorának értékével szorozhattuk meg. Ily módon a $\rho = k \cdot \Delta U/I$ képletnek megfelelően a hagyományos elrendezés esetében a megszokott látszólagos fajlagos ellenállást kaptuk, és a kapott értékek összevethetőek voltak a null-elrendezésekkel kapott értékekkel. Azt azonban ne felejtjük el, hogy ez a mennyiség a null-elrendezések esetében fizikailag nem értelmezhető.

Az így kapott **Schlumberger null-, három elektródás null-, és dipól axiális null-**, illetve az ezzel tk. analóg **dipól ekvatoriális null-elrendezések legalább olyan hatékonynak bizonyultak a repedések lokalizálásában, mint a hagyományos elrendezés párjaik**. De ahol a fedő vastagabb volt, ott a null-elrendezések **felül is múlták** hagyományos elrendezés párjaikat a repedések kimutatásában. A repedés irányának meghatározásában pedig pontosabbnak bizonyult a Schlumberger null-, mint a Schlumberger elrendezés. Azóta *Falco et al. (2012)* és *Falco (2013)* vizsgálatai is megerősítették, hogy **a null-elrendezések hatékonyabbak mind a repedések detektálásban, mind azok irányának meghatározásában**.

A befogadókészséget csökkentette, hogy a szakma időközben átállt a sokelektrodás rendszerek használatára, azon belül is elsősorban a **2D mérésekre**. Ezek esetében pedig az összes elektróda **egy vonalban kell, hogy elhelyezkedjen**. Ilyen null-elrendezés azonban **mindössze kettő létezik**, amennyiben ragaszkodunk ahhoz, hogy az elrendezést alkotó elektródák elhelyezkedésében **valami szimmetria is legyen**. Ezek egyike ráadásul éppen az **a MAN elrendezés**, ami 1957 óta teljesen feledésbe merült, a másik pedig egy olyan elrendezés (*a 9-es számú elrendezés a II. 1. 3 ábrán*), az általunk bevezetett **Wenner- γ null-elrendezés**, ami egyvonalú is ugyan és szimmetrikus is, de **nem építhető be az egyenközű elektródákból álló rendszerbe**. Ezzel hagyományos profilmérést végeztünk ugyan (*III. 3c ábra*), aminek során perspektivikusnak is tűnt, de a sokelektrodás mérőrendszerbe történő beillesztéséről le

kellett mondanunk. A MAN és a Wenner- γ null-elrendezésekkel minden esetre megteremtettem **a null-elrendezések harmadik generációját: a nem geometriai első generációs és a geometriai, de nem-egyvonalú második generációs elrendezések után az egyvonalú geometriai null-elrendezéseket.**

Már itt felvetődött a lehetőség, hogy ha a Wenner- γ null-elrendezést nem is, de annak egy kissé módosított változatát a Wenner- γ kvázi null-, vagy, ahogy a későbbiekben rövidítve neveztük γ_{null} elrendezést viszont beépíthetnénk a 2D sokelektrodás rendszerbe (*Ia I.1.12 és a IV.1.1 ábrák*). A „kvázi” null-elrendezések esetében nem null-elrendezésről van ugyan szó, de a homogén féltér felett **vele mérhető jel mégis relatíve kicsi, azaz a null-elrendezésekhez közel állónak tekinthető.** Erre utal a kvázi szó.

1.Tézis: A valaha használt geoelektromos elrendezések összegyűjtése, rendszerezése és előállítási stratégiák

1a. Összegyűjtöttem az angol és orosz nyelvű szakirodalomban megtalálható összesen 102 geoelektromos elrendezést, egységes jelölésmóddal ábrázoltam és szerzőtársammal rendszereztem őket három paraméter, az egyvonalúság, a fókuszálás és a többszörös mérés elvén, összesen 8+1 csoportot alkotva.

Az osztályozott, egységesített elrendezések gyűjteménye - az elemek Mengyelejev-táblázatahoz némileg hasonlóképpen - megkönnyíti a különböző elrendezések azonosítását, segít feltárni azok kapcsolatait és a felfedezett rések kitöltésével új elrendezések megalkotásához is vezethet, melyek hozzájárulhatnak a felszín alatti térség jobb leképezéséhez. Megkönnyíti továbbá a különböző elrendezések szisztematikus összevetését is különböző tulajdonságaik alapján.

1b. Összegyűjtöttem és rendszereztem a felszíni geoelektromos elrendezések előállításához használt stratégiákat, ami – az egyes elrendezések számára - megnyitja az utat a sokelektrodás rendszerekben történő alkalmazáshoz.

VI.2. Paraméter-érzékenység

(A II.2 fejezet alapján)

Mint már utaltam rá, még napjainkban is nagyban befolyásolja a szakemberek gondolkodását az 1D megközelítés. Ez annyiban sajnálatos, hogy ez hátráltathatja az egyes geoelektromos elrendezések között rejlő különbségek és azok leképezési tulajdonságainak megértését. Jóllehet a geoelektromos módszer esetében nem érvényes, hogy nagyobb hatók hatása részei hatásának algebrai összege lenne, mégis nagyon előrevivő a megértés szempontjából a kisméretű hatók hatásának vizsgálata annak függvényében, hogy azok adott elrendezéshez képest hol találhatók. **A II.2 fejezetben bemutatom az ezt illusztráló paraméter-érzékenység számításának módját, a segítségével készült ún. paraméter-érzékenység térképeket (PÉT) az összes elrendezés esetére, melyek esetében ez értelmezhető, a térképek értelmezésének módját, valamint használati lehetőségeiket.**

A PÉT-ek segítségével könnyen belátható, hogy vannak az egyes elrendezések közelében olyan zónák, ahol semmi hatása nincs az ott elhelyezkedő, környezetétől eltérő ellenállású kisméretű térfogategységnek, sőt olyanok is, ahol a várt hatással éppen ellentétesen jelennek meg. Ezek a **negatív paraméter-érzékenységű tartományok** szokták

produkálni az ú.n. **túllövéseket**. A térképek megmutatják azt is, **hová koncentrálnak adott elrendezés érzékenysége**. A Schlumberger elrendezés esetében pl. a potenciálelektrodák közé, azaz az elrendezés közepe alá (*II.2.2 ábra*), míg a dipól-dipól elrendezések esetében a dipólok alá (*II. 2. 13, II. 2.14, II. 2.15 és A8 ábrák*). Nyilvánvalóan az egyes elrendezésekhez rendelt ú.n. **vonatkoztatási pontok** pozíciója is ezzel van összefüggésben.

A dolgozat szempontjából a legfontosabb kérdés, hogy milyenek **a térképek szimmetria viszonyai**. Vannak **szimmetrikus** (pl. a Schlumberger, vagy a dipól axiális elrendezés: *II.2.2 és A8 ábrák*), **antiszimmetrikus** (pl. a MAN elrendezés: *II.2.11 ábra*), sőt akár **több antiszimmetria tengellyel** (pl. a Schlumberger null-elrendezés, *A13 ábra*) rendelkező PÉT-ű és nyilvánvalóan **aszimmetrikus** (pl. a pól-dipól elrendezés, *A5 ábra*) elrendezések is. Ezeknek **a tengelyeknek a helyzete ráadásul a mélységtől független**, azaz a (anti)szimmetria síkok a felszínre merőlegesek. A PÉT-ek szimmetria viszonyai az elrendezésekből következnek.

A null-elrendezések eme tulajdonsága szabja meg, hogy adott elrendezés **milyen szerkezetek felett produkál nulla jelet**. Míg az **antiszimmetriatengellyel nem rendelkező**, közel 54°-os párhuzamos null-elrendezés (*II. 2. 15 ábra*) **csak a homogén féltér felett ad nulla jelet**, addig az **egy antiszimmetriatengellyel rendelkező** MAN elrendezés emellett **minden 1D szerkezet felett is nulla jelet** ad elméletileg, sőt - amennyiben a mérés annak csapásirányában zajlik - még 2D szerkezetek felett is. A **két antiszimmetriatengellyel rendelkező** Schlumberger null-elrendezés pedig **mind homogén féltér, mind tetszőleges 1D és 2D szerkezetek felett nulla jelet ad, sőt még minden, az elrendezés áram-, vagy annak potenciál-elektrodáit összekötő egyenesre szimmetrikus 3D szerkezet esetén is**. Fenti tulajdonságaikból adódóan **az antiszimmetria tengellyel/tengelyekkel rendelkező elrendezések kiváló dimenzióindikátorok** is, hiszen minél jobban eltér a mért jel a nullától, annál kevésbé rendelkezik a vizsgált szerkezet az adott dimenzióval. **Azimutális méréssel**, azaz az **ezen** elrendezés középpontja körül körben végrehajtott méréssel az adott **szerkezet iránya is megállapítható**. Erre példa a repedések csapásirányának meghatározása a Schlumberger null-elrendezéssel (*Szalai et al. 2002*).

A PÉT-ek **tanulmányozása lehetővé teszi az egyes elrendezések leképezési tulajdonságainak megértését, a jelalak előzetes megbecsülését, de akár új mérési módszerek tervezését is** (*Barker, 1981*).

2.Tézis: Paraméter-érzékenység térképek (PÉT)

2a. **Levezettem** a geoelektromos elrendezések paraméter-érzékenység térképeinek számításához szükséges képletet a tér **mindhárom irányába** eső ellenállás-változásokra külön-külön is, **ábrázoltam ezeket minden elrendezés esetére**, amelyeknél ez lehetséges és **bemutattam néhány alkalmazási lehetőségüket**.

2b. Kimutattam, hogyan befolyásolják az elrendezések PÉT-einek **antiszimmetria tengelyei** az adott elrendezés leképezési tulajdonságait, és az hogyan vezet **a különböző dimenzionalitású hatók kimutathatóságához**, illetve kimutathatatlanságához; hogyan használhatóak ennek következményeként különböző dimenziókra vonatkozó **dimenzió-indikátorokként**; valamint, hogy miért alkalmasak földtani **szerkezetek, mesterséges objektumok irányának meghatározására**.

VI.3. Kutatási-, és Kimutathatósági mélység

(A II.3 és II.4 fejezetek alapján)

A PÉT-ek számításához használt képlet adta a lehetőséget, hogy annak felhasználásával **számítsam a különböző mélységben elhelyezkedő vékony rétegek hatását** is. Ez a fajta kutatási mélység (KuM) számítás mindmáig nagyon elterjedt *Roy és Apparao (1971)* óta, bár azóta az így számított ún. mélység-érzékenység karakterisztika függvény (ami a végtelen vékony, homogén környezetétől eltérő fajlagos ellenállású réteg hatását ábrázolja a mélység függvényében) segítségével másfajta úton is számítanak kutatási mélységet (*Edwards, 1977*). Ezeket a KuM értékeket azonban korábban csak néhány fontosabb elrendezésre határozták meg, ezért szükségesnek láttam azokat a korábban összegyűjtött elrendezések mindegyikére kiszámítani, amelyek esetében ez a mennyiség értelmezhető (*Szalai et al. 2009*). **Kiszámítottam tehát közel harminc elrendezés *Roy és Apparao (1971)* és *Edwards (1977)*-féle kutatási mélységét.** Kimutattam azt is, hogy **az *Edwards (1977)* féle kutatási mélység értékek szisztematikusan nagyobbak, mint a *Roy és Apparao (1971)* féle értékek.** Az **outlyer-ek kivételével a két érték arányára 1.59 ± 0.31 adódott.**

A KuM mélységdefiníció **nagy előnye, hogy egyetlen értékkel képes leírni egy elrendezés kutatási mélységét** és úgy tűnik, hogy a gyakorlati követelményeknek is elég jól megfelel, de több sebtől is vérzik. Nem veszi pl. figyelembe, hogy minden mérés **zajjal jár.** **Ez a definíció ráadásul egy adott elrendezésre vonatkozik,** míg a mostanában használt **sokelektrodás mérések** már lehetővé teszik különböző elrendezések kombinálását is. Emellett a felszín alatti térség alapelemének nem a vékony réteget, hanem a prizmat tekintem.

Eme okok vezettek oda, hogy **bevezessek egy új,** a kutatás mélységével kapcsolatos **definíciót,** az ún. **kimutathatósági mélységet** (KimM; depth of detectability-DD). Ez a definíció mindhárom fenti problémát kiküszöböli. Számítása különböző feltételezett zajszintek esetére történik és megadott modellek (különböző keresztmetszetű és fajlagos ellenállású prizmák, vertikális lemezek és vékony rétegek) esetére. Fokozatosan növelve az adott ható mélységét az egyébként homogén feltérben **azt a mélységet tekintjük az adott ható adott elrendezéshez tartozó kimutathatósági mélységének, amely esetében a mért jel értéke meghaladja még az adott zajszintet.**

Ezen definíciónak is vannak **hátrányai:** **a KimM függ a vizsgált modelltől és zajszinttől** és utóbbi esetében még az sem állítható, hogy helyes azt minden elrendezés esetében azonosnak tekinteni. Mindennek ellenére a kutatás mélységével kapcsolatban egy reális alternatívának tekintem ezt a definíciót és úgy gondolom, hogy a fentebb tárgyalt definíciók mellett ezt és még az *Oldenburg és Li. (1999)* által bevezetett mélységdefiníciót célszerű figyelembe venni. **A KimM definíció életképességét az is bizonyítja, hogy analóg mérések során az elrendezések széles skálájára visszakaptuk az ez alapján várt eredményeket** (IV.3b fejezet, IV.3.1 táblázat).

Ezt a definíciót használva arra a következtetésre jutottam, hogy **a hagyományos elrendezések közül a β típusúak a legjobbak,** azaz azok, amelyek esetében az áramelektrodák egymás mellett vannak az elrendezés egyik szélén (II.1.3 ábra). **A különböző elrendezések leképezésének vizsgálata során ugyanerre a következtetésre jutottunk** (IV.3b fejezet). Ugyanakkor az általunk vizsgált γ_{11n} (n egész szám) kvázi null-elrendezések (IV.1.1 ábra) már $n=2$ esetén is nagyobb KIM-el rendelkeztek, ami n

növekedésével tovább nőtt és a legjobb hagyományos KIM értéket általában 2-3-szorosan is meghaladta (IV.3.1 táblázat).

3. Tézis: Kutatási és kimutathatósági mélység

3a. A mélység-érzékenység karakterisztika függvény és ennek segítségével a kutatási mélység értékek számításához levezettem egy analitikus formulát különböző egyvonalú-, nem-egyvonalú és fókuszáló elrendezésekre és **bemutattam mind a Roy and Apparao (1971), mind pedig az Edwards (1977)-féle értékeket minden olyan elrendezés esetére, amelyeknél azok számítása egyáltalán lehetséges.**

3b. Kimutattam, hogy az Edwards (1977) féle kutatási mélység értékek szisztematikusan nagyobbak, mint a Roy és Apparao (1971) féle értékek. Az outlyer-ek kivételével a két érték hányadosára 1.59 ± 0.31 adódott.

3c. Kimutattam, hogy a γ_{m11n} kvázi null-elrendezések nagyobb n értékek esetén konzekvensen nagyobb kutatási mélység értékkel rendelkeznek, mint a legtöbb hagyományos négyelektródás egyvonalú elrendezés, sőt - amennyiben n értéke meghaladta a 4-et – jobbnak bizonyultak a legjobb értékkel rendelkező dipól axiális elrendezésénél is.

3d. Bevezettem egy új, a kutatás mélységével kapcsolatos definíciót, a kimutathatósági mélységet (KimM), amely a kutatási mélység definícióval szemben bármilyen sokelektródás mérési rendszer esetére alkalmazható és azt a maximális mélységet adja meg, amelyből adott modell, adott zajszint mellett még kimutatható. Hat különböző modell és két zajszint esetére meghatároztam a leggyakrabban használt hagyományos elrendezések és a γ_{m11n} elrendezések KimM értékeit.

3e. Megállapítottam, hogy a hagyományos elrendezések közül a β típusúak (azaz a Dipól-Dipól, a Pól-Dipól és a Wenner- β elrendezések) kimutathatósági mélysége a legnagyobb.

3f. Kimutattam, hogy a γ_{m11n} (ahol n egész szám) kvázi null-elrendezések már $n=2$ esetén is nagyobb kimutathatósági mélységgel rendelkeznek, mint az e téren legjobbnak bizonyult hagyományos elrendezések.

Nagyobb n értékek esetén a γ_{m11n} elrendezések KimM értéke a legjobb hagyományos elrendezések KimM értékeit általában 2-3-szorosan is meghaladja.

VI.4. A hagyományos elrendezések leképezési képességének összehasonlítása

(A II.5 fejezet alapján)

Ahhoz, hogy lássuk, hogy a null-, illetve kvázi null-elrendezések jobb eredményt képesek-e produkálni különböző modellek esetében, mint a legjobb hagyományos elrendezések, **először is tisztázni kellett, hogy melyek a legjobb hagyományos elrendezések.** Ehhez nyolc különböző modell esetére megvizsgáltuk az öt leggyakrabban alkalmazott hagyományos elrendezés és a hagyományos négyelektródás elrendezésekből optimalizálási eljárással keletkezett Stummer elrendezés leképezési tulajdonságait.

Az összehasonlításhoz kialakítottam egy rendszert, mivel az erre a célra számos alkalommal alkalmazott RMS értéket erre nem tartom alkalmasnak. Ez *Martinelli et al. (2018)* cikkéből nagyon jól látszik, olyannyira, hogy az általuk vizsgált esetben az RMS

értékek és a leképezés minősége között közel fordított arányosság áll fenn. A fajlagos ellenállás szelvények összehasonlítását azon elveket követve végeztem el, amit több-kevesebb tudatossággal számos szerző alkalmaz (pl. *Dahlin és Zhou, 2004*). **Három alapvető paramétert vettem figyelembe. Mindenekelőtt, hogy egyáltalán létezik-e anomália a modellünk helyén és az mennyire ott van, ahol lennie kell.** Nyilván ez alapfeltétele minden további összevetésnek. A második lépésben azt vizsgáltam, hogy **mennyire írja le az anomália a modell alakját.** A harmadikban pedig, hogy **mennyire képes elválasztani a hatókat egymástól, amennyiben több hatóról van szó.** Ebben az összevetésben a konkrét ellenállás értékekről nem is esik szó, mivel azok a modell relatív méretének csökkenésével úgyszólván egyre távolabb vannak a valóságos értéktől, így nem tartottam informatívnak, hogy a valós értéknek pl. a 10, vagy a 11-szerese az anomália területén lévő érték, miközben a 100-szorosa kellene, hogy legyen. Emiatt nem tartanám szerencsésnek, ha ez a paraméter jelentősen befolyásolná egy-egy elrendezés megítélését. Az ellenállás értéke emellett tulajdonképpen az első paraméterben egyébként is jelen van. **A fenti három jellemzőre adott minősítési érték átlagaként adódott összegzett érték szolgált az egyes elrendezésekkel kapott eredmények minősítésének alapjául.**

Összességében azt találtam, hogy **akárcsak a KiM vizsgálatok esetében, a hagyományos elrendezések közül ezúttal is a β -típusú elrendezések bizonyultak a leghatékonyabbaknak.** Ezek közül is messze a **Dp-Dp elrendezés volt a legsikeresebb,** amely a 2 különböző zajszint esetére vizsgált 8 modell, azaz összességében 16 modell közül 10 esetben is a legjobban teljesítők között szerepelt. A szintén β -típusú Wenner- β és pól-dipól elrendezések szerepeltek a rangsor 2. és 3. helyén 5, illetve 4 esettel, míg az α típusú Wenner- α elrendezés mindössze 2, a pól-pól elrendezés pedig egyetlen alkalommal szerepelt a legjobb elrendezések között.

Ezek az eredmények megerősítik a KiM alkalmazásának jogosságát is, hiszen az elrendezések sorrendjére ebben az esetben hasonló eredményeket kaptunk. Összevetve továbbá ezeket az eredményeket az optimalizált Stummer elrendezéssel kapott eredményekkel azt látjuk, hogy utóbbi még a legjobb hagyományos elrendezésnél, **a dipól-dipól elrendezésnél is számottevően jobb eredményeket szolgáltatott:** egy kivétellel minden esetben a legjobb eredményt adó elrendezések közé tartozott.

Fentiekből levonhatjuk a következtetést, hogy az új elrendezéseink által elérhető eredményeket a hagyományos elrendezések közül leginkább a Dp-Dp és a Stummer elrendezésével érdemes összevetni, ha azt szeretnénk bizonyítani, hogy ezek jobb eredményeket képesek produkálni.

4. Tézis: A hagyományos elrendezések leképezési képességének összehasonlítása

4a. Összevettem egy általam kialakított kvalitatív összehasonlítási rendszer segítségével az öt leggyakrabban alkalmazott hagyományos elrendezés és a hagyományos négyelektródás elrendezésekből optimalizálással létrehozott úgynevezett Stummer elrendezés leképezési tulajdonságait nyolc különböző modell és modellenként két különböző zajszint esetére.

Ennek segítségével kimutattam, hogy **mind a modelltől, mind a zaj szintjétől jelentősen függ, hogy melyik elrendezés adja a legjobb képet.**

4b. A hagyományos elrendezések közül messze a Dp-Dp elrendezésekkel kapott kép hasonlított a legjobban a modellhez. Az optimalizált Stummer elrendezés ugyanakkor az összes hagyományos elrendezésnél sokkal hatékonyabbnak, gyakorlatilag minden vizsgált modell esetében az egyik legjobbnak bizonyult.

4c. Az elrendezések leképezési tulajdonságai szerint is határozottan jobbnak bizonyultak a β -típusú elrendezések, ugyanúgy, ahogy a kimutathatósági mélység vizsgálatok során (3e. tézis).

Ez rámutat arra, hogy a négyzet alapú hasáb modell alapján meghatározott **kimutathatósági mélység definíció meghatározó fontosságú** az elrendezések leképezési tulajdonságainak előrejelzése szempontjából.

VI.5. Az egyvonalú null-elrendezések

(A III. fejezet alapján)

A II. fejezetben végigvettem azokat az előkészítő munkákat, amiket szükségesnek tartottam ahhoz, hogy a null-, és a kvázi null-elrendezéseket megértsük, illetve az azokkal kapott eredményeket a hagyományos elrendezésekkel kapott eredményekkel össze tudjuk vetni. A III. fejezetben aztán sor került az egyvonalú null-elrendezések vizsgálatára. Itt azonban hely szűkében csak a legfontosabb tudnivalókra koncentráltam, amelyek a kvázi null-elrendezések irányába mutattak, melyek jelenleg gyakorlati szempontból jelentősebbnek tűnnek. Ez azonban – mint látni fogjuk – korántsem jelenti azt, hogy a null-elrendezések kutatását fel kellene adnunk, mindössze azt, hogy azok esetében több bonyolalommal kell számolnunk és nincs garancia arra, hogy gyakorlati szempontból lesz a null-elrendezések használatának számottevő értéke.

Kimuttam, hogy két **szimmetriatulajdonságokkal rendelkező egyvonalú null-elrendezés van: a MAN** (a II. 1.3. ábrán a 21. elrendezés) és a γ_{null} -elrendezés (a II. 1.3. ábrán a 9. elrendezés). A MAN elrendezés a γ_{11n} elrendezés sorozat szélső esete (II. 1.12. ábra).

Kimuttam, hogy mivel a MAN elrendezés PÉT-ei (II.2.11 ábra) a középső elektródán átmenő, az elrendezés vonalára merőleges antiszimmetria tengellyel rendelkeznek (II.2.6. ábra) esetében a KuM nem értelmezhető, mivel az MK függvény értéke minden mélységben nulla. Mivel a geometriai faktor végtelen volta miatt előremodellezés sem hajtható végre a MAN elrendezéssel, annak **KimM-e sem értelmezhető.** Ugyanígy **nem is invertálhatóak a MAN eredmények,** így a MAN a II. 5. fejezetben ismertetettnek megfelelő összehasonlításba sem volt bevehető.

Már a fentiekből is látszik, hogy **a MAN elrendezés esetében a geometriai koefficiens végtelen volta számos problémához vezet és emiatt ezt az elrendezést teljesen máshogy kell kezelni, mint a nem-null-elrendezéseket.** Méréseket minden további nélkül végre lehet hajtani ezzel az elrendezéssel is, de az eredmények megjelenítése során el kell kerülni a geometriai faktorról való szorzást, ezért esetükben a $\Delta U/I$ mennyiség meghatározása és ábrázolása ajánlott. Jóllehet az így kapott profilokból/szelvényekből fajlagos ellenállás értékek nem számíthatóak, azok detektálásra kiválóan alkalmasak lehetnek.

A III. fejezetben bemutatott méréseket ráadásul mindenféle különösebb elővigyázatosság nélkül hajtottam végre, **semmilyen külön figyelmet nem fordítva az elektródák pontos pozicionálására.** A kapott eredmények bebizonyították, hogy alaptalan az aggodalom, **hogy a null-elrendezések esetében az elektróda pozicionálási hibák olyannyira eltorzíthatják a mérési eredményeket, hogy azok használhatatlanok lesznek.** Az inhomogenitások felett mért jelek tökéletesen elkülönültek a háttérértékektől még abban az esetben is, amikor a méréseket zajos környezetben, egy nagyváros közepén végeztem. Fentiek alapján **bizonyítottam, hogy a MAN elrendezés használható terepi mérésekre és annak segítségével detektálhatóak felszín alatti ellenállás inhomogenitások.**

A finnországi mérés (III. 3 ábra) azt is igazolta, hogy a **MAN elrendezés ezen, az előzőtől teljesen eltérő terepi viszonyok között is tökéletesen működött, sőt a ható pozícióját sokkal pontosabban tudta megbecsülni, mint a Wenner elrendezés.** A - véleményem szerint döntő - jel/zaj arány egyik mérés során sem bizonyult rosszabbnak a MAN elrendezés, mint a hagyományos elrendezések esetében.

Megmutattam, hogy a nem-null-, és a null-elrendezések működése között az alapvető különbség az, hogy előbbiek esetében a számunkra általában érdekes, a horizontális irányú ellenállás-változásokból eredő jel **a homogén féltér felett mérhető jelre tevődik rá, míg a null-elrendezés esetében az önállóan jelenik meg,** mivel homogén féltér felett elméletileg nulla jelet kell mérnünk. Azaz megfelelő inhomogenitás esetén képződik olyan jel, ami az adott null-elrendezés számára mérhető. Azt pedig, hogy ennek milyen inhomogenitásnak kell lennie, az adott elrendezés PÉT-ének antiszimmetria viszonyai szabják meg.

Amennyiben számunkra ezek az inhomogenitások az érdekesek, akkor a null-elrendezések ezek jellemzésében nagy segítségünkre lehetnek. Példának okáért **a MAN elrendezés kiválóan alkalmas lehet vízszintes irányú ellenállásváltozások detektálására és azok jóval pontosabb lokalizálására, mint a nem-null-elrendezések.** A null-elrendezések jobbnak bizonyultak pl. repedések lokalizálásában és azok irányának meghatározásában, mint a hagyományos elrendezések (Szalai et al., 2002; Falco et al., 2012).

A null-elrendezések 2D sokelektrodás rendszerekben történő használata azonban **számos nehézséggel jár.** Így 1. A szimmetrikus egyvonalú null-elrendezések közül **egyedül a MAN elrendezés építhető be a sokelektrodás rendszerekbe.** 2. A MAN elrendezés esetében is komoly problémát jelent azonban **a végtelen elektróda kezelése** mind numerikusan, mind terepi körülmények között. 3. Komoly hátránya a null-elrendezéseknek, hogy a mért értékek **nem invertálhatóak,** így azok ellenállás szelvényekké nem alakíthatóak át.

Ezen problémák **kiküszöbölhetőnek látszottak** a γ_{11n} elrendezések használatával, amelyek átmenetet képeznek a MAN és a hagyományos elrendezések között. Ezen gyakorlati oknál fogva, és mert ezek vizsgálata lehetővé teszi a null-elrendezés-hagyományos elrendezés átmenet vizsgálatát is, későbbi tevékenységemben ezekre az elrendezésekre koncentráltam.

5. Tézis: Az egyvonalú null-elrendezések

5a. Kimutattam, hogy mivel a MAN elrendezés paraméter-érzékenység térképei a középső elektródán átmenő, az elrendezés vonalára merőleges antiszimmetria tengellyel rendelkeznek és emiatt a MK függvény értéke minden mélységben nulla, esetében a **KuM nem értelmezhető.** Geometriai faktorának végtelen volta miatt **nem értelmezhető a MAN**

elrendezés KimM-e sem, mivel emiatt előremodellezés sem hajtható végre vele. Fenti ok miatt a MAN eredmények **nem is invertálhatóak**.

5b. A MAN elrendezés esetében geometriai koefficiensének végtelen volta miatt **a mért eredmények megjelenítésére a $\Delta U/I$ mennyiség ajánlott**. Jóllehet az így kapott profilokból/szelvényekből **fajlagos ellenállás értékek nem számíthatóak, az elrendezés inhomogenitások detektálására kiválóan alkalmas**.

5c. Terepi mérésekkel bebizonyítottam, **hogy a null-elrendezések esetében az elektróda pozicionálási hibák nem torzítják el annyira a mérési eredményeket, hogy azok használhatatlanok legyenek**. A jelek még zajos környezetben is tökéletesen elkülönültek a háttérértékektől, azaz a jel/zaj arány a terepi mérések során a jelek feldolgozásához elegendőnek bizonyult.

5d. Mivel a MAN jelek a hagyományos elrendezéseikénél sokkal gyorsabban változnak az inhomogenitás felett elhaladva, ezek az elrendezések a horizontális irányú ellenállás-változásokra érzékenyebbek.

A terepi mérések ezt megnyugtatóan alátámasztották: a MAN elrendezés használatával nemcsak detektálhatóak voltak a felszín alatti ellenállás inhomogenitások, hanem segítségükkel a ható pozícióját is pontosabban meg lehetett határozni, mint a Wenner elrendezéssel.

5e. Megmutattam, **hogy a nem-null-, és a null-elrendezések működése között az alapvető különbség, hogy előbbieket esetében a számunkra általában érdekes, a horizontális irányú ellenállás-változásokból eredő jel a homogén féltér felett mérhető jelre tevődik rá, míg a null-elrendezés esetében az önállóan jelenik meg**, hiszen a homogén féltér felett nulla jelet kell mérnünk. Azaz megfelelő inhomogenitás esetén képződik olyan nem-nulla jel, ami az adott null-elrendezés számára mérhető. Azt pedig, hogy ennek **milyen inhomogenitásnak kell lennie, az adott elrendezés PÉT-ének antiszimmetria viszonyai szabják meg**.

5f. A null-elrendezések jobbnak bizonyultak repedések lokalizálásában és azok irányának meghatározásában, mint a hagyományos elrendezések.

VI.6. Numerikus vizsgálatok kvázi null-, és hagyományos elrendezésekkel

(A IV.1 fejezet alapján)

Az I. fejezetben eljutottunk odáig, hogy a modern igényekhez alkalmazkodva bevezettük az egyvonalú null-elrendezéseket, úgymint a MAN és a Wenner- γ null-elrendezéseket. Utóbbit azonban egyvonalú volta ellenére sem lehet beépíteni közvetlenül a használt 2D sokelektrodás rendszerekbe, mivel ott az elektródák távolsága állandó. Hogy ezt mégis elérhessük, kissé módosítva az elektródák távolságán a γ_{null} -nak nevezett **kvázi null-elrendezést** kaptuk.

A MAN elrendezés ugyan beépíthető volt közvetlenül is ebbe a rendszerbe, de a **végtelen elektróda kezelésével** (elsősorban annak elhelyezésével) kapcsolatban **rengeteg probléma** merült fel mind a numerikus szimulációk, mind a terepi mérések során. Így merült fel annak lehetősége, hogy **ne vigyük azt az elméleti végtelenbe**, hanem képezze az is a sokelektrodás rendszer részét. Ezzel a „végtelen” (B) elektróda távolságát természetesen erősen korlátozni kell, hiszen minél távolabbra visszük azt a másik három elektródától, annál kisebb lesz a

mérhető adatok száma. Így aztán a B elektróda távolságát a hozzá legközelebb eső elektródától a többi elektróda egymástól mért távolságának 6-7-szeresében maximalizáltam. Ezt a számot csökkentve a mérési pontok száma növelhető és így fokozatosan eljuthatunk a hagyományos Wenner- γ elrendezéshez, ami azzal az előnnyel is jár, hogy így láthatjuk, hogyan változik az ilyen típusú elrendezések viselkedése a hagyományos elrendezésektől a null-elrendezés felé haladva (*IV.1. ábra*). E célból **vizsgáltam a γ_{11n} típusú elrendezéseket** az $n=1-6$ tartományban.

Kezdetben a kereskedelmi forgalomban található szoftvereket szerettem volna felhasználni a kvázi null-elrendezések tesztelésére, de „lehetséges, de nem életképes” („possible, but non-viable”) megjegyzést kaptam a RES2DMOD ver. 2.2. szoftvertől (Loke, 1999), ami valóban használhatatlannak is bizonyult erre a célra. Az *EarthImager 2D (Version 2.1.7: Advanced Geosciences, Inc., 2006)* esetében szintén kilátástalannak tűnt a helyzet, amikor a kezdeti tesztelések során nagy-hatású modellekkel próbálkoztam. Az ilyen modellek felett kialakuló teret ez a szoftver sem volt képes megfelelően kezelni, viszont ez legalább a kis-hatású (azaz környezetével kis ellenállás kontrasztú és/vagy mélységéhez képest kisméretű) modellek felett kapott adatokat képes volt megfelelően invertálni. Előljáróban megjegyzem, hogy a terepi adatok inverziójára egyik fenti szoftver sem volt képes.

Aszimmetrikus elrendezések esetében – minél aszimmetrikusabb, annál inkább – **javasolt azok párjával együtt történő alkalmazása**. Ezáltal a szelvény mindkét oldalán jó adatlefedettség biztosítható és a kép is sokkal jobb minőségű lesz, amit numerikus vizsgálatokkal bizonyítottam is. Kimutattam, hogy a γ_{11n} elrendezésekkel kapott képnél **az azok párjával, a γ_{n11} elrendezésekkel kapott kép sokkal korrektebb képet ad a modellről**. Az elrendezéspárokat γ_{m11n} elrendezéseknek neveztam.

A kis-hatású modellek vizsgálata esetében a γ_{m11n} elrendezések hatékonyabbnak bizonyultak minden hagyományos elrendezésnél, beleértve az ezekből optimalizált Stummer elrendezést is. Bizonyos γ_{11n} elrendezések – elsősorban a γ_{112} , γ_{113} és a γ_{114} – mind a horizontális, mind a vertikális felbontóképesség vizsgálatokban jobb eredményeket adtak, mint akár az optimalizált Stummer elrendezés.

A numerikus vizsgálatok során bebizonyosodott, hogy kis hatású modellek esetén a **Model Stacking néven ismert eljárás számottevően javíthat a képen**, ha pedig ez sem, akkor a γ_{11n} elrendezések eredményeinek más elrendezések eredményeivel való kombinálása.

A horizontális felbontóképesség vizsgálatok során a legtöbb γ_{11n} elrendezés (főleg nagyobb n értékeknél) határozottan jobb eredményt adott, mint a hagyományos elrendezések.

Jóllehet a **vertikális felbontóképesség vizsgálatokban egyik elrendezés esetében sem volt képes az egymás alatt elhelyezkedő hatók szétválasztására, bizonyos γ_{11n} elrendezések, elsősorban a γ_{113} , a mélyebben fekvő hatókat is kimutatta, sőt a hagyományos elrendezésekkel szemben vertikális pozícióikat is képes volt megadni**. Ez szintén összhangban van a különböző elrendezések KimM-ével kapcsolatos eredményeinkkel.

Bizonyos modellek esetében a γ_{m11n} elrendezések még nagy-hatású modellek esetében is jobbnak bizonyultak.

Fenti eredményeket a γ_{11n} elrendezések ráadásul kevesebb adatból produkálják, ami n értékével még jelentősen tovább is csökken. A Dp-Dp elrendezés esetében ez a szám 736, a

Stummer esetében 669, míg a γ_{11n} elrendezések esetében $n=2$ -től 7-ig sorra 840, 660, 540, 448, 392 és 342, tehát már $n=3$ -tól kevesebb, mint a hagyományos elrendezések esetében. Ezzel a mérési idő is csökkenthető.

Az elvégzett numerikus vizsgálatok alapján **az várható, hogy ezek az elrendezések hatékonyabbnak bizonyulnak a modellezetthez hasonló problémák megoldásában, így alagutak, barlangok, üregek, csövek, elhagyott folyómedrek, vagy akár agyagréteg, vagy hulladéktároló alján lévő szigetelő réteg folytonossági hiányának detektálásában, lokalizálásában és esetlegesen annak részletes leírásában.** A különböző γ_{11n} elrendezések egymással, illetve hagyományos elrendezésekkel valamiféle módon történő együttműködésében is látok még számos lehetőséget.

A γ_{m11n} elrendezések használata szintén **nagyon perspektivikus lehet** olyan esetekben, amikor érdemes a „jobb félni, mint megijedni” elvet követni. **Amikor érdemes inkább téves riasztást kiadni, mint felvállalni egy nagyobb probléma, akár katasztrófa kockázatát.** Ily módon célszerű lehet ilyen mérések folytatása pl. **gátakon, vagy hulladéktárolók aljának monitorozása során.** Ilyen esetekben azt várom, hogy ezek az elrendezések korábban reagálnak a változásokra, így több idő marad felkészülni a védekezésre. A riasztás kiadása előtt esetlegesen további ellenőrző vizsgálatok végezhetőek még más módszerek bevetésével is.

A numerikus eredmények alapján további perspektivikus kutatási terület lehet a γ_{m11n} elrendezések számára **nagy elektromos ellenállású, vagy nagy vezetőképességű rétegek alatt lévő hatók detektálása, vagy akár leírása,** melyek a hagyományos elrendezések számára problémásabbak lehetnek. Ilyen rétegek alatt ugyanis az áramsűrűség csökkenésének következtében nagyobb méretű hatók hatása is nagymértékben leeredukálódhat, így kishatásúakká válnak.

Nagyobb KimM-üknek köszönhetően **olyan helyeken is előtérbe kerülhet az alkalmazásuk, ahol a mérés számára hozzáférhető hely korlátozott, elsősorban beépített területeken.**

6. Tézis: Numerikus vizsgálatok kvázi null-, és hagyományos elrendezésekkel

6a. Numerikus vizsgálatokkal kimutattam, hogy a γ_{11n} elrendezéseket azok **tükrözött változatával, a γ_{n11} elrendezésekkel együtt célszerű használni. Az így kapott γ_{m11n} elrendezések minden vizsgált esetben jobb eredményeket adtak a γ_{11n} elrendezéseknél.**

6b. **A legtöbb γ_{m11n} elrendezés (főleg nagyobb n értékek esetén) határozottan jobb eredményt adott a horizontális felbontóképesség vizsgálatok során,** mint a hagyományos elrendezések, beleértve az ezekből optimalizált Stummer elrendezést is.

A **vertikális felbontóképesség** vizsgálatokban ugyan egyik elrendezés sem volt képes az egymás alatt elhelyezkedő hatók szétválasztására, **bizonyos γ_{m11n} elrendezések, elsősorban a γ_{m113} , a mélyebben fekvő hatókat is kimutatták, sőt vertikális pozíciójukat is képesek voltak megadni, szemben a hagyományos elrendezésekkel.** Ez az eredmény is összhangban van a különböző elrendezések kimutathatósági mélységével kapcsolatban kapott eredményeimmel.

6c. **Kis-hatású modellek** esetében következetesen **jobbnak** bizonyultak a γ_{m11n} elrendezések minden hagyományos elrendezésnél, de még egyes **nagy-hatású modellek** esetében is **jobb eredményeket adtak**.

Szintén alkalmasabbnak bizonyultak a γ_{m11n} elrendezések a hagyományos elrendezéseknél **nagy elektromos ellenállású, vagy nagy vezetőképességű rétegek alatt lévő hatók leírására**. Ez az eset az előbbire vezethető vissza, mivel ilyen rétegek alatt az áramsűrűség csökkenésének következtében nagyobb méretű hatók hatása is jelentősen lecsökkenhet, ami által kis-hatásúakká válnak.

VI.7. A null-, és a hagyományos elrendezések összevetése kvázi terepi analóg mérésekkel (és numerikus modellezéssel)

(A IV.2 fejezet alapján)

Analóg modellezések példáján keresztül is bemutattam a γ_{m11n} tükörpár használatának célszerűségét.

Numerikus modellezéssel igazoltam, hogy ha egy elrendezés KimM-e nagyobb, akkor az a nagyobb mélységben lévő hatót is képes detektálni, vagy azt jobban megjeleníteni, mint egy kisebb KimM értékű elrendezés.

Bemutattam hogyan változik az egyes elrendezések leképezési képessége a lemez modell mélységének függvényében. Míg az **a Dp-Dp elrendezés esetében** határozottan romlott **a mélységgel, a γ_{m113} elrendezés esetében a romlás sokkal kevésbé látványos és még a legnagyobb vizsgált mélység esetében is egyértelmű, álanomáliamentes képet adva, jól pozicionált anomáliával jelezte a modellt.**

Az annak vizsgálatára elvégzett numerikus vizsgálatok, hogy milyen maximális mélységből látszik még egy adott ható, **megerősítik a KimM eredményeket (II.4.4 táblázat).** **Azaz a hagyományos elrendezések közül a β -típusúak (P-DP, DP-DP, Stummer, W- β) nagyobb mélységből képesek kimutatni egy hatót, de azok teljesítőképességét is jelentősen meghaladja a γ_{11n} elrendezéseké, ha n értéke legalább 2.**

Az analóg modellmérések szerint a hagyományos elrendezések kisebb mélységből voltak csak kimutatni a lemezt, mint ahogy azt a numerikus modellezés esetén várni lehetett. Különösen a Stummer elrendezés teljesítőképességének csökkenése szembetűnő.

Ezúttal a Res2D-Hu program alkalmazásával újabb bizonyítékot adtam arra, hogy – legalábbis bizonyos modellek esetében – **a γ_{m11n} elrendezések horizontális felbontóképessége nagyobb, mint a hagyományos elrendezésekéi. Utóbbiak is képesek voltak ugyan a numerikus vizsgálatok során a többitől távolabb álló hatót eltávolítani, de azt valamivel kevésbé meggyőzően tették, mint a γ_{113} elrendezés. A két, egymáshoz közelebbi hatót pedig egyik hagyományos elrendezés sem volt képes különválasztani, szemben a γ_{113} elrendezéssel.**

Ráadásul **az analóg eredmények esetében még inkább a γ_{m113} elrendezés felé billen a mérleg nyelve, mint a numerikus vizsgálatok eredményei alapján.** Az analóg eredmények esetében a W- α képe még gyengébb, mint a numerikus eredmény alapján várható volt, míg a W- β kép jobb ugyan a vártnál, de a közelebbi hatók elválasztásában nincs javulás. A γ_{113}

elrendezés esetében azonban – ha lehet – még jobb a kép, mint az volt a numerikus modellezés esetében.

Az analóg modellmérés eredményei minden esetben közel a numerikus modellezés által várt eredményeket adták vissza (IV.3.2, a IV.3.3 és a IV.3.6 ábra). Amikor pedig nem így történt, akkor az adott γ_{11n} elrendezés még jobb eredményt is produkált a vártnál. A mérés esetén előforduló zajok tehát egyáltalán nem befolyásolták negatív irányba a γ_{113} elrendezéssel kapott eredményeket, bizonyítandó azok terepi használhatóságát.

A IV.3.7 ábra segítségével nagyon szemléletes képet kaptunk a hagyományos elrendezések és a null-elrendezések közötti átmenetről. Nagyon jól látható pl., hogyan jutunk a hagyományos elrendezések elsősorban 1D érzékenységtől a null-elrendezések elsősorban 2D érzékenyséig. Kiderült az is, hogy a γ_{m11n} elrendezések oldal irányú érzékenysége is nagyobb. A γ_{m11n} elrendezések tehát abban az esetben is perspektívikusabbnak tűnnek a hagyományos elrendezéseknél, ha nem a mérési profil alól, hanem attól oldalra eső tartományról szeretnénk információt nyerni.

Szabadtéri laboratóriumban dőlő (tulajdonképpen 3D) modell felett végrehajtott méréseink is megerősítették a korábbi tapasztalatokat, mely szerint a ható nagyobb mélysége esetén a γ_{m11n} elrendezések eredményesebben képesek detektálni azt, mint akár a legjobb hagyományos elrendezések.

7. Tézis: A null-, és a hagyományos elrendezések összevetése kvázi terepi analóg mérésekkel

7a. Analóg modellezési eredmények segítségével is alátámasztottam, hogy a γ_{11n} elrendezést annak párjával, a γ_{m11} elrendezéssel együtt célszerű használni.

7b. Az analóg modellmérések eredményei szerint a hagyományos elrendezések közül a β -típusú elrendezések (P-DP, DP-DP, Stummer, W- β) képesek kimutatni a hatókat a legnagyobb mélységből. Az ezekkel elért maximális mélységet is jelentősen meghaladta azonban a γ_{m11n} elrendezéseké, amennyiben n értéke legalább 2 volt.

Ezzel kvázi terepi mérésekkel is visszaigazoltam a 3e. és 3f. tézisekben bemutatott numerikus eredményeket, ami azt is jelenti, hogy a numerikus eredmények a γ_{m11n} elrendezések esetében is képesek előre jelezni a terepen várható eredményeket.

7c. Kimutattam, hogy a függőleges lemez modellnek a γ_{m113} elrendezéssel kapott képe sokkal kevésbé gyengül a modell mélységével, mint a Dp-Dp elrendezése. A γ_{m113} elrendezés még a legnagyobb vizsgált mélységben is egyértelmű, álnomália-mentes képet adott, jól pozicionálva a hatót.

7d. Az analóg modellmérések során a hagyományos elrendezések a numerikus modellezés alapján vártnál kisebb mélységekből tudták csak kimutatni a függőleges lemezt. Különösen a Stummer elrendezés teljesítőképességének csökkenése szembetűnő.

Ugyanígy a horizontális felbontóképesség vizsgálatok esetén is a hagyományos elrendezések esetében inkább romlás tapasztalható a numerikus eredmények alapján várthoz képest, míg a γ_{m113} elrendezés esetében talán még jobb is a kép, mint a numerikus modellezés esetében.

7e. Fizikai modellezéssel is megerősítettem azt a PÉ vizsgálatok alapján alkotott elméleti feltevést, mely szerint a hagyományos elrendezésektől a MAN null-elrendezés felé történő átmenet a γ_{m11n} elrendezésekben n értékének növekedésével többek között az 1D érzékenységtől a 2D érzékenység felé való átmenettel jár.

Fizikai modellezés révén is megerősítést nyert tehát, hogy a nagy n értékű γ_{m11n} elrendezések számára az 1D szerkezetek átlátszóak, azok csak a nagyobb dimenziójú szerkezetekre érzékenyek. Ebből pedig az is következik, hogy ezek az elrendezések jó dimenzióindikátorok is.

VI.8. Talajmechanikai mérőmódszerek (SzűrőPróba, NyomásPróba)

(Az V.1 fejezet alapján)

Mindkét módszer ötlete onnan eredt, hogy a geoelektromos mérések kivitelezése során az elektródákat leszűrva egyes területeken bizonyos **szabályszerűségekre** figyeltem fel, melyek mögött a terület **geológiájával kapcsolatos információt** sejtettem. A SzP esetében a fémrúd (az elektróda) egyes zónákban sűrűn kőbe ütközött, míg más zónákban csak ritkán, vagy egyáltalán nem, a NyP esetében pedig az elektróda helyenként sokkal könnyebben fúródott a földbe. Ezért kidolgoztam a két mérőmódszert és vizsgáltam azok teljesítőképességét és alkalmazhatóságukat különböző terepi viszonyok között.

VI. 8a. A SzűrőPróba (SzP) módszer

(Az V.1a fejezet alapján)

A SzűrőPróba módszer alkalmazását egy könnyen megérthető **régészeti** példán keresztül mutattam be. A módszer alkalmasnak bizonyult a kápolna eltemetődött romjainak fellelésére és részletes feltérképezésére is. **Jó képet adott a romok állapotáról is és nagyon jól lehatárolta a kápolna területét. Esetében a padlózat, illetve a tető és a falak törmeléke is megjelent a kapott képen**, amennyiben azt a fém rúd elérte, ezért nem csak a falak helyén, hanem az épületen belül is anomáliát mutatott.

A SzP módszer szondázásra is alkalmasnak bizonyult. Segítségével különböző mélységekről is készíthetünk térképet a fém rudat fokozatosan szűrva le ezekben a mélységekbe és minden mélységben regisztrálva az adatokat. **A SzP jó felbontóképességét igazolja, hogy** a régészek által korábban használt feltáró árkot is képes volt kimutatni.

A kötőrmelék szabályosnak tűnő eloszlásába karsztkutatás (Homód-árok, Bakony) során találkoztam első ízben. Ott **több SzP anomália víznyelőként volt azonosítható, melyek ráadásul szabályos, a térségben jellemző földtani irányba eső vonalak mentén látszódtak elrendeződni.** Nem kétséges, hogy **a SzP módszerrel kapott térkép geológiai tartalmú információval szolgál.** Párhuzamos profilokon felvett adatokkal **igazoltam azt is, hogy a kötőrmelék eloszlása korántsem véletlenszerű.**

Repedésrendszer feltérképezésében is hatékonynak bizonyult a SzP olyan területen (Kádárta, Bakony), ahol a vékony talajréteg alatt egységesen dolomit az alkotó kőzet, holott a feladat megoldására ilyen kis skálán (néhány méteres repedéstávolság) a klasszikus geofizikai módszerek közül egyedül a geoelektromos módszer bizonyult használhatónak. Ahhoz pedig, hogy az ezzel kapott eredményeket verifikálni tudjuk, célszerűnek látszott a SzP tesztelése.

A SzP eredmények és az Elektromos Tomográfia (ET) felszínközeli értékei között jó korrelációt kaptam. A SzP profil minimumhelyei egybeesnek az ET-ével (azaz a kis fajlagos ellenállású zónákkal). Ez annak köszönhető, hogy **mindkét módszer esetén az adott**

körülmények között ott van nagy érték, ahol kevésbé mállott a dolomit. A szűk kis ellenállású/*k*-értékű zónákat **repedésekként** azonosítottam.

Mivel azonban a korreláció a vizsgált négy profilból csak kettő esetében volt ilyen kedvező, a nem megfelelő korreláció okait a másik két profil esetében még keresni kell. Tekintve, hogy a felszíni törmelékréteg bármilyen (akár mesterséges eredetű) módosulása a SzP értékeket kevésbé használhatóvá teheti, ez a leginkább elképzelhető ok.

A SzP eredmények felhasználásával repedezettség térképet is készíthetünk, ami jó szolgálatot tehet a hidrogeológusoknak.

VI. 8b. A NyomásPróba (NyP) módszer

(Az V.1b fejezet alapján)

A talaj mechanikai ellenállásának mérése céljából egy egyszerű eszközt fejlesztettünk. Amennyiben valamilyen oknál fogva változás van a talaj mechanikai ellenállásában, az az ezzel mért NyP érték megváltozását eredményezi. Ilyen helyzet áll elő természetesen akkor is, ha a talajban folytonossági hiány (repedés, vagy üreg) van. Amennyiben ez a felszínről nem látható, de a hiány a NyP által elérhető mélységben van, akkor az a NyP módszerrel detektálható.

A Dunaszekcsői földcsuszamlás repedés rendszerének tanulmányozása bizonyította a NyP nagyon jó felbontóképességét. A mintavételezési távolság mintegy harmadrészének megfelelő szélességű repedés már észlelhető a segítségével köszönhetően a repedések felső végénél kialakuló kisméretű eróziós völgynek.

8. Tézis: Talajmechanikai mérőmódszerek (Szűrőpróba, Nyomáspróba)

8a. Kidolgoztam a talaj kötőrmelék-eloszlásának, illetve mechanikai ellenállás-változásának mérésére alkalmas **SzűrőPróba (SzP) és NyomásPróba (NyP) módszereket.**

Bebizonyítottam, hogy **a SzP alkalmas eltemetett falmaradványok, épületalapok, utak fellelérésére és jó felbontóképességű feltérképezésére akár különböző (de felszínközeli) mélységekben.**

8b. SzP méréseim szerint a kötőrmelék eloszlása bizonyos terepi körülmények között nem véletlenszerű. **Igazoltam a SzP geológiai célú alkalmazhatóságát víznyelők, repedések detektálásában.**

Kimutattam az összefüggést a vékony talajjal fedett alapkőzet repedezettség értéke és SzP értéke között. Ennek alapján a SzP adatok felhasználásával **repedezettség térképet is készítettem.**

8c. Egy földcsuszamlás repedésrendszerének példáján keresztül megmutattam, hogy a Nyomáspróba (NyP) módszer alkalmas a talaj mechanikai ellenállása változásainak, így a benne bekövetkező folytonossági hiánynak (pl. repedés, vagy üreg miatt bekövetkező) feltérképezésére is, amennyiben a változás a NyP által elérhető mélységben van.

Megmutattam a NyP nagyon jó felbontóképességét, miszerint elegendő, ha a mintavételezési távolság nem haladja meg a repedés szélességének mintegy háromszorosát.

VI.9. Kis skálájú repedésrendszerek vizsgálata

(Az V.2 fejezet alapján)

Kisskálájú repedésrendszerek kutatására a geoelektromos módszer gyakorlatilag az egyetlen használható geofizikai módszer és még azzal is számos probléma van. Alternatívaként a SzP és a NyP módszerek alkalmazása jöhet még szóba.

Földcsuszamlás repedésrendszerének kutatása NyP és ET módszerekkel (Dunaszekcső)

A bevett gyakorlattal szemben, mikor a földcsuszamlásokat területileg, vagy térfogatiilag próbálták lehatárolni - és ami a dunaszekcsői földcsuszamlás esetében nem is volt lehetséges - annak repedésrendszerét térképeztem fel. Ettől azt vártam, hogy **a földcsuszamlás által veszélyeztetett terület lehatárolhatóvá válik, megismerhető a földcsuszamlás belső struktúrája és esetlegesen előre jelezhetőek lesznek a később aktivizálódó csúszási frontok.**

Mind az ET, mind a NyP képes volt ezen elvárások teljesítésére, jöllehet utóbbi sokkal részletgazdagabb képet képes adni a repedésrendszerről. Előre jeleztem a későbbi csúszások frontvonalát, egyben elmozduló, egységes blokkokat, valamint azt is, **hogy már a földcsuszamlás addig passzív oldalán is jelentős repedések vannak jelen. A méréseinket 21 hónappal követő új tömegmozgások szinte minden előrejelzésünket beigazolták.**

Ahol a NyP nem az elvárásoknak megfelelően viselkedett, annak oka emberi tevékenységnek volt köszönhető, ami a talaj tömörítésével megváltoztatta a természetes körülményeket.

Mind az ET, mind a NyP módszerek képesnek bizonyultak földcsuszamlás által veszélyeztetett területek lehatárolására és repedésrendszerük feltérképezésére, ily módon lehetőséget adva a megfelelő időben történő riasztásra elkerülendő építmények és emberi életek veszélyeztetését.

VI. 9a. Repedésrendszer kutatás karsztos területen Wenner és MAN elrendezésekkel (Szalonna)

Repedésrendszerek kutatása esetén általában praktikusabb **hagyományos profilmerést** mérni, mint tomográfiát, mert utóbbiból sem származik általában sokkal több előnyünk, de kivitelezése idő-, és munkaigényesebb. Szalonnán a hagyományos **Wenner elrendezéssel** végeztük a méréseket és vizsgáltuk a **MAN elrendezés** használhatóságát is. **Mindkét elrendezés alkalmasnak bizonyult repedések detektálására és lokalizálására.**

Amikor azonban hónapokkal később folytattuk a méréseket, a korábbiaktól teljesen eltérő jellegű eredményeket kaptunk. A kis hullámhosszúságú anomáliák szinte teljesen eltűntek, helyettük néhány markáns, nagy amplitúdójú anomália megjelenése lett a jellemző mindkét szelvényen, melyek valószínűleg az aljzat lefutását követték. A két különböző eredményekkel zárult mérésorozat arra utal, hogy **a terepi mérések kivitelezésének ideje, elsősorban a mérést megelőző időszak csapadékviszonyai nagyon nagy szerepet játszhatnak bizonyos mérések esetén. Az ideális körülmények között nagyon jól látható hatók nem megfelelő**

körülmények esetén akár teljesen detektálhatatlanok lehetnek. A különböző víztelítettségi viszonyok a felszín alatti térség különböző aspektusait emelhetik ki, mint ahogy a bemutatott példában a csapadékos időszakot követően végrehajtott mérés a repedések megjelenítésében teljesített nagyon jól, addig a száraz időszakot követő mérés az alapkőzet topográfiájának megjelenítésében.

VI. 9b. Repedésrendszer kutatása karsztos területen geoelektromos null-elrendezésekkel (Svájc)

Svájcban karsztos területen Schlumberger elrendezést használtunk mind hagyományos, mind pedig offszet üzemmódban repedések vizsgálatára. Emellett három null-elrendezést, a Schlumberger null-, a Wenner- γ null- (γ_{null} , vagy γ_0) és a középpontos null-, azaz a MAN elrendezést teszteltük, a profilirányra nézve 45° -os szögben döntött helyzetben tartva az adott elrendezést, ami ebben a szögben is maradt a profil mentén történő mozgása során.

A vizsgált elrendezések közül a Schlumberger null-, és a Wenner- γ null-elrendezések adták a legjobb eredményeket a numerikus modellezés során, míg a terepi teszt során – ahol az eredményeket közvetlenül a valósággal, egy kőbánya falán látható repedésekkel validáltuk – a Wenner- γ null-elrendezés volt a legmeggyőzőbb. Ismételten terepi tesztmérésekkel sikerült tehát bizonyítani a null-elrendezések terepi használhatóságát, mi több azok előnyös voltát a hagyományos elrendezésekkel szemben. Kisskálájú repedésrendszerek kutatásában tehát a null-elrendezések különösen perspektivikus eszközöknek tűnnek.

VI. 9c. Repedések irányának kutatása

Repedések irányának kimutatása azimutális mérések segítségével lehetséges. A mért sugárdiagramok értelmezése során azt feltételezik, hogy minden esetben fellép az anizotrópia paradoxon jelensége. Miután korábban nem szereztem túl jó tapasztalatokat többirányú repedésrendszerek repedésirányának meghatározásában, analóg modellezést végeztünk a módszer működőképességének bizonyítására.

Miután az analóg modellmérés során a módszer eredményessége hasonló volt a terepi körülmények között megszokotthoz, arra a következtetésre jutottam, hogy a terepi mérések eredményeinek hiányosságai nem a terepi körülmények következménye, hanem azoknak fizikai oka van. Vélhető, hogy az anizotrópia paradoxon jelensége nem lép fel minden körülmények között.

A korábban már ismertetett svájci mérések során azimutális mérésekre is sor került. Ezek megerősítették, hogy repedések irányának meghatározásában – egyirányú repedésrendszer esetén – a Schlumberger null-elrendezés adja a legpontosabb eredményt. Mivel azonban az két, egymásra merőleges lehetséges irányt ad, ha apriori ismeretek hiányában ezek közül nem tudunk választani a MAN elrendezéssel is végrehajtott mérés ezt lehetővé teszi, ezért ilyen esetekben a két elrendezés szimultán használata javasolt.

9. Tézis: Kis skálájú repedésrendszerek vizsgálata

9a. A bevett gyakorlattal szemben – mely a csúszó felület, illetve a várhatóan lecsúszó közettömeg megismerését célozza - a dunaszekcsői **földcsuszamlás** tanulmányozásához annak **repedésrendszerét térképeztem fel**.

Ezzel a megoldással **le tudtam határolni a fölcuszamlás által veszélyeztetett területet olyan földcsuszamlás esetében is, amelyik nem rendelkezik csúszófelülettel és az elmozduló tömeg sem tér el a helyben maradótól közettani szempontból**.

9b. A repedésrendszer feltérképezésére mind az Elektromos Tomográfia, mind a NyP képesnek bizonyult, de a NyP sokkal részletgazdagabb képet adott róla.

9c. A repedésrendszer ismerete lehetővé tette a későbbi csúszások frontvonalának, valamint egyben elmozduló, egységes blokkok előrejelzését. Előre jelezhetőnek bizonyult az is, hogy jelentős repedések vannak már jelen a földcsuszamlás passzív oldalán is.

A méréseket a 21 hónappal követő **új tömegmozgások minden fontosabb előrejelzést beigazoltak**.

9d. Karsztterületen (Szalonna; Les-Breleux, Svájc) végrehajtott terepi mérések példáján keresztül bemutattam, hogy a Wenner elrendezés mellett **a null-elrendezések is képesek repedések detektálására, lokalizálására és irányának meghatározására, sőt mindezen célokra a null-elrendezések a hagyományos elrendezéseknél jobban megfelelnek**.

9e. Kimutattam, hogy a terepi méréseket megelőző időszak csapadékviszonyai nagyon **jelentős szerepet játszhatnak bizonyos mérések esetén**. Az ideális körülmények között nagyon jól észlelhető hatók nem megfelelő körülmények esetén akár teljesen detektálhatatlanok lehetnek.

A különböző víztelítettségi viszonyok a felszín alatti térség különböző aspektusait **emelhetik ki**. A szalonnai mérés esetében pl. a csapadékos időszakot követően végrehajtott mérés az aljzatban lévő repedéseket jelenítette meg nagyon jól, a száraz időszakot követő mérés pedig az alapkőzet topográfiáját.

9f. Analóg modellezést végeztem többirányú repedésrendszer repedési irányainak meghatározása céljából. Mivel az **analóg modellmérés során a módszer eredményessége hasonló volt a terepi körülmények között megszokotthoz**, arra a következtetésre jutottam, hogy **a terepi mérések eredményeinek hiányosságai nem a terepi körülmények következménye**.

VII. A jövő. Kitekintés.

Jövőbeni tevékenységem során is elsősorban a dolgozatban tárgyalt kérdésekre szeretnék fókuszálni, mivel ezekkel kapcsolatban is **még sok minden tisztázásra vár**. A teljesség igénye nélkül megemlítek itt néhányat, megjegyezve azt is, hogy a kutatások során könnyen előkerülhetnek olyan kérdések, amelyek adott pillanatban érdekesebbnek, vagy fontosabbnak tűnnek, ezért azok előtérbe kerülhetnek anélkül, hogy jelenleg számolhatnék velük.

A paraméter-érzékenységek 2D metszeteit is szeretném megjeleníteni minden egyes elrendezés esetére. Keresem a módját az egyes elrendezésekkel végrehajtott méréseket befolyásoló **zajok megbecsülésének** és azokat össze szándékozom vetni **különböző elrendezések esetére**. **Új kvantitatív minőségbecslési paramétereket vezetek be**, melyek közelebb állnak a kvalitatív becslés gondolkodásmódjához. Ezeknek csak egy része fogja a teljes kapott képet vizsgálni, a többi a kép egyes tartományaira, vagy egyes tulajdonságaira fog fókuszálni.

Dimenzionalitási paramétereket fogok bevezetni azzal a céllal, hogy látható legyen, egyes szerkezetek mennyire felelnek meg a várt dimenziójuknak, illetve az attól való eltérésük mennyire befolyásolja a kapott eredményeket. Tervezem **2.2D és 2.3D mérési elrendezések vizsgálatát**, melyek a 2D méréseknél alig bonyolultabb módon azoknál várhatóan számottevően több információt lesznek képesek szolgáltatni. **Tisztázni** szeretném **az anizotrópia paradoxon elméleti háttérét és létezésének feltételeit**, ami elsősorban az azimutális mérések tervezésében és eredményeinek kiértékelésében kulcsfontosságú.

Folytatni szeretném **a null-, de elsősorban a kvázi null-elrendezések vizsgálatát**, most már elsősorban azok **terepi tesztjeivel**. Megvizsgálom annak lehetőségét, hogyan lehetne ezeket a lehető leghatékonyabban bevonni a geofizikai vizsgálatokba. Megvizsgálom, **hogyan lehetne azokat egymással kombinálva, illetve a hagyományos geoelektromos elrendezések kiegészítéseként használni**. Ezen mérésektől azt várom, hogy sikerül tisztázni a null-, és a kvázi null-elrendezések **lehetséges alkalmazási területeit**.

Az elmúlt mintegy két évtizedben sikerült tisztázni **a null- és a kvázi null elrendezésekkel** kapcsolatos alapvető kérdéseket. Ennek során kiderült, hogy ezek vizsgálata **nem csak elméleti szempontból jelentős**. Amellett ugyanis, hogy ezzel egy olyan geoelektromos elrendezéscsoport **elméleti háttérét** sikerült megvilágítani, aminek működése a korábban használt elrendezésektől nagymértékben eltérő elveken alapul, egyre inkább körvonalazódik ezen elrendezések **gyakorlati hasznossága, hasznosíthatósága** is. Ráadásul mivel **a hagyományos geoelektromos elrendezések nagyon hasznosak ugyan 1D-, és robusztus 2D szerkezetek vizsgálatában, a null-, és a kvázi null elrendezések pedig éppen a finomabb hatók és változások kimutatásában tűnnek eredményesebbnek, a kétféle stratégiát követő módszer egymás nagyon jó kiegészítője lehet** a majdani geoelektromos kutatások során. Ezzel sikerülhet megfelelni annak az állandó és egyre erősödő **kihívásnak**, amely a geoelektromos módszerrel kapott **kép finomítását, érzékenyebbé tételét** várja el. Most már az elsődleges cél **a null-, és a kvázi null elrendezések rutinszerű alkalmazásának bevezetése**.

Ugyancsak az **alkalmazási területeit** keresem a SzP, az értekezésben nem tárgyalt módosított SzP és a NyP módszereknek és azok technikai fejlesztésére is sor kerülhet.

Köszönetnyilvánítás

Különösen szeretném megköszönni Szarka László akadémikus úr támogatását, aki elindított pályámon és ösztönözve és felbecsülhetetlen értékű segítséget nyújtva mindaddig végig is kísérte azt.

Volt PhD hallgatómnak, Szokoli Kittinek, hogy hatékonyan segítette munkámat és tette ezt nagyon kellemes, baráti légkörben.

Prácsér Ernőnek, akitől rengeteg segítséget kaptam az inverzióval és a programozással kapcsolatos szakmai kérdésekben.

A további kollégák listája a teljesség igénye nélkül, akiknek szintén szeretném kifejezeni köszönetemet: Varga Péter, Závoti József, Wesztergom Viktor, Ádám Antal, Verő József, Novák Attila, Müller Imre, Hatos Gábor, Nagy Tamás, Takács Ernő, Gyulai Ákos, Törös Endre, Tildy Péter, Prónay Zsolt, Koppán András, Kiss János, Verő László, Pongrácz János, März Győző, Turi János, Molnár Csaba, Fleischacker Imréné, Németh Erzsébet, és még sokan mások...

A külföldi kollégák közül elsősorban Vladimir Shevnin, Torleif Dahlin, Ahmet Basokur, Guy Marquis, Helmut Wilhelm, Piotr Tucholka, Mohamed Israil, P. K. Gupta, Mohamed Metwaly, Mohamed Zubair és Pierik Falco uraknak szeretném kifejezni köszönetemet.

TDK-, BsC-, és MsC-s tanítványaimnak, akiket taníthattam, és akiktől tanulhattam: Gombás Gábor, Frigy Andrea, Kósa Ildikó.

A számtalan kollégának és diáknak, aki a terepi mérések során nyújtott segítséget.

A következő pályázatok szíves támogatását is köszönöm: KAAD Németország, Francia Oktatási Minisztérium, OTKA (T049604, T037694, TS408048 és NI61013ILO) projektek, Bolyai János Ösztöndíj (2007-2010 és 2011-2014), TÁMOP-4.2.2.C–11/1/KONV-2012-0015, Miskolci Egyetem Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Programja 2018/2019.

Cikkeim számos ismert és ismeretlen bírálójának, hogy segítették azok minőségének javítását.

És végül, de nem utolsósorban szüleimnek anyagi és erkölcsi támogatásukért, példamutatásukért; V. L.-nak, akiben megtaláltam testi-lelki társam; és gyermekeimnek, Szonjának, Benedeknek és Barnabásnak, akik munkámhoz számos módon motivációt adtak.

Hivatkozások

Ádám, A., Kardeván, P., Kormos, I., Nagy, Z., Pongrácz, J., Régeni, P., Szabadváry, L., Szarka, L., és Zimányi, I. 1981a. Analogue model for studying geoelectric methods in the Geodetic and Geophysical Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences. *Acta Geodetica, Geophysica et Montanistica Acad. Sci. Hung.* 16/2-4, 359-380.

Ádám, A., Kardeván, P., Kormos, I., Nagy, Z., Pongrácz, J., Régeni, P., Szabadváry, L., Szarka, L., és Zimányi, I. 1981b. Analóg modell a geoelektromos módszerek tanulmányozására az MTA GGI-ben. *Magyar Geofizika* 22, 41-61.

Ádám A., Szarka L., Varga M. 1983. Physical and mathematical modelling of crustal anomalies in the Pannonian Basin. *Acta Geodaetica Geophysica et Montanistica Hungarica* 18/4, 467-488.

Advanced Geosciences, Inc. (2006). Instruction manual for EarthImager 2D, Version 2.1.7. *Resistivity and IP inversion software*

Alfano L. 1974. A modified geoelectrical procedure using polar-dipole arrays – An example of application to deep exploration. *Geophysical Prospecting* 22, 510–525.

Alpin L.M. 1950. The Theory of Dipole Sounding. *Gostoptekhizdat*, Monograph (In Russian)

Alpin L.M. 1966. The theory of dipole sounding. In: *Dipole Methods for Measuring Earth Conductivity*, pp. 1–60. Consult Bureau, New York.

Alpin L.M., Berdichevsky M.N., Vedrintsev G.A. és Zagarmistr A.M. 1966. Dipole Methods for Measuring Earth Conductivity (Selected and translated from Russian by G.V. Keller). *Colorado School of Mines, Golden, CO.*

Apparao A.T., Gangadhara Rao T., Sivarama Sastry és Subrahmanya Sarma V. 1992. Depth of detection of buried conductive targets with different electrode arrays in resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting* 40, 749–760.

Apparao A., Roy A., Mallik K. 1969. Resistivity model experiments. *Geoexploration* 7, 45–52.

Apparao A., Subrahmanya S. V., 1997. Depth of detection of buried resistive targets with some electrode arrays in electrical prospecting. *Geophysical Prospecting* 45/3, 365-375.

Baker H.A., Boudjadja A.G., Benhamam K. 2000. Le Dispositif Baker – Application et comparaison. Memoire. *Département de Géologie, FSTGAT-ISTHB, Algiers.*

Baker H.A. és Djeddi M. 1999. Une nouvelle technique d'interprétation des données électriques et électromagnétiques. *Project de Recherche 1602/09/98.* Faculté des Sciences de la Terre, USZHB, Algiers.

Baker H.A., Djeddi M., Boudjadha A.G. és Benhamam K. 2001. A different approach in delineating near-surface buried structures. *63rd EAGE meeting*, Amsterdam, the Netherlands, Expanded Abstracts, M-17.

Bania G. és Ćwiklik 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 R.D. 1979. Signal contribution sections and their use in resistivity studies. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 39. 123-129.

Barker R.D. 1981. The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable. *Geophysical Prospecting* 29, 128–143.

Bernabini M., Brizzolari E. és Piro S. 1988. Improvement of signal-to-noise ratio in resistivity profiles. *Geophysical Prospecting* 36, 559–570.

Bhattacharya B.B., Dutta I. 1983. Depth of investigation studies for gradient arrays over homogeneous isotropic half space. *Geophysics* 48, 1248–1251.

Bhattacharya B.B., Shalivahan. 2016. Geoelectric methods. Theory and applications. *McGraw Hill Education (india) Private Limited*, New Delhi

Blokh I.M. 1971. Electrical Profiling of Resistivity Method. *Nedra*, Moscow (In Russian)

Bogolyubov N.P. 1984. Guide to Interpreting Two-component modified VES. *Stroyizdat*, Moscow. (In Russian)

Bolshakov D.K., Modin I.N., Pervago E.V., Shevnin V.A. 1998. New step in anisotropy studies: Arrow type arrays. *Proceedings of the 4th EEGS-European Section Meeting*, Barcelona, Spain.

Brass G., Flathé H., Schulz R. 1981. Resistivity profiling with different electrode arrays over a graphite deposit. *Geophysical Prospecting* 29, 589–600.

Brizzolari E. és Bernabini M. 1979. Comparison between Schlumberger electrode arrangement and some focused electrode arrangements in resistivity profiles. *Geophysical Prospecting* 27, 233–244.

Candansayar M.E. 2008. Two-dimensional individual and joint inversion of three- and four-electrode array dc resistivity data. *J. Geophys. Eng.* 5, 290–300.

Candansayar M.E., Basokur A.T. 2001. Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: Application to an archaeological survey. *Geophysical Prospecting* 49, 13–25.

Cantwell T., Galbraith J.N., Nelson P. 1964. Deep resistivity results from New York and Virginia. *Journal of Geophysical Research* 69, 4367–4376.

Carpenter E.W., Habberjam G.M. 1956. A tri-potential method of resistivity prospecting. *Geophysics* 21, 455–469.

Clark A.J. 1990. Seeing Beneath the Soil. *B.T. Batshford Ltd, London*, p. 176.

Csókás J. 1963. A focused-field geoelectric method. *Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae* 43, 437–451.

Dachnov V.N. 1951. *Electrical Prospecting of Oil and Gas Deposits*. State Scientific-Technical Publishing of Oil and Gas Literature, Moscow and Leningrad

Dachnov V.N. 1953. Electrical Prospecting of Oil and Gas deposits. *2nd State Scientific-Technical Publishing of Oil and Gas Literature*, Moscow and Leningrad

Dahlin T., Zhou B. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 52, 379–398.

Dey A., Morrison H. F. 1979. Resistivity Modelling for Arbitrary Shaped Two-Dimensional Structures. *Geophysical Prospecting* 27, 106–136.

Doicin D. 1976. Quadripole-quadripole arrays for direct current resistivity measurements – model studies. *Geophysics* 41, 79–95.

Drahoš D., Kis K., Meskó A., Salát P. 1987. Bevezetés a gyakorlati geofizikába. *Egyetemi jegyzet*, ELTE, Tankönyvkiadó

- Edwards L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics* 42, 1020-1036.
- Evjen H.M. 1938. Depth factors and resolving power of electrical measurements. *Geophysics* 3, 78-95.
- Falco P. 2013. Sondages géoélectriques "null-arrays" pour la caractérisation des structures de subsurface. *PhD értekezés*, Université de Neuchâtel, Faculté des sciences, p. 146.
- Falco P., Negro F., Szalai S., Milnes E. 2013. Fracture characterisation using geoelectric null-arrays. *Journal of Applied Geophysics* 93, 33–42.
- Frolov V.X. 1989. The possibility to increase the geological efficiency of electrical surveys. *Izvestia VUZ-ov, series Geologia y Razvedka* 1, 100–108. (In Russian)
- Furgerson R.B., Keller G.V. 1975. Rotating dipole methods for measuring earth resistivity. *Geophysics* 45, 129–177.
- Furness P. 1993. Gradient array profiles over thin sensitive veins. *Geophysical Prospecting* 41, 113–130.
- Grandinetti M. 1967. Una nuova disposizione elettrodica per la ricerca di corpe di limitate dimensioni. *Boll. Di Geof. Teor. Ed. Appl.* 9, 219–234.
- Gupta P.K., Nivas S., Gaur V.K. 1996. Straightforward inversion scheme (SIS) for one-dimensional magnetotelluric data. *Journal of Earth System Science* 105/4, 413-429.
- Gupta R.N. 1961. Some studies on the unipole method (a new method electrical prospecting). *PhD thesis*, Indian Institute of Technology, Kharagpur.
- Gupta R.N., Bhattacharya P.K. 1963. Unipole method of electrical profiling. *Geophysics* 28, 608–616.
- Gyulai Á. 1989. Parameter sensitivity of underground DC measurements. *Geophysical Transactions* 35, 209-225.
- Gyulai Á. 1998. A geoelektromos üregkutatás néhány kérdése. *Magyar Geofizika* 39/2, 43-50.
- Gyulai, Á. 1995. Dőlt réteges földtani szerkezetek geoelektromos kutatási lehetőségének vizsgálata analitikus előremodellezéssel. *Magyar Geofizika* 36/1, 40-67.
- Habberjam G.M. 1979. Apparent Resistivity Observations and the Use of Square Array Techniques. *Geoexploration Monographs*, Geopublication Associates, Gebrüder Borntraeger.
- Habberjam G.M., Watkins G.E. 1967. The use of the square configuration in resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting* 5, 445–467.
- Heiland C.A. 1940. Geophysical Exploration. *Prentice-Hall, New York*.
- Heiland C.A. 1946. Geophysical Exploration. *Prentice-Hall, New York*.
- Hering A., Misiek R., Gyulai Á., Ormos T., Dobróka M., Dresen, L. 1995. A joint inversion algorithm to process geoelectric and surface wave seismic data. Part I: basic ideas. *Geophysical Prospecting* 43/2, 135-156.
- Hmelevsky V.K., Bondarenko B.M. 1989. Electrical prospecting. In: *Geophysical Handbook*, Vol. 1 (eds V.K. Hmelevsky and B.M. Bondarenko), pp. 173–177. Nyedra, Moscow.
- Hmelevsky V.K., Shevnin V.A. 1994. Electrical Prospecting Using Resistivity Methods. *Moscow State University*. (In Russian)
- Hursán G. 1996. On the role of lateral sensitivities in the horizontal electric profiling (in Hungarian). *Magyar Geofizika* 37, 106-117.

- Jackson P.D. 1981. Focused electrical resistivity arrays: Some theoretical and practical experiments. *Geophysical Prospecting* 29, 601–626.
- Jakosky J.J. 1950. Exploration Geophysics, 2 edn. *Trija Publishing Co.*
- Kampke A. 1999. Focused imaging of electrical resistivity data in archeological prospecting. *Journal of Applied Geophysics* 41, 215–227.
- Keller G.V., Frischknecht F.C. 1966. Electrical Methods in Geophysical Prospecting. *Pergamon*.
- Keller G.V., Furgerson R., Lee C.Y.N., Jacobson J.J. 1975. The dipole mapping method. *Geophysics* 40, 451–472.
- Kirsch R. 2006. Groundwater Geophysics. *Springer*, p. 493.
- Knödel K., Krummel H., Lange G. 1997. Geophysik. (Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten): Band 3. *Springer Verlag*.
- Knödel K., Krummel H., Lange G. 2005. Band 3. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, 2nd ed. *Springer*, p. 128.
- Kunetz G. 1966. Principles of Direct Current Resistivity Prospecting. Geoexploration monographs, No. 1, *Gebrüder Borntraeger*, Berlin-Nikolassee.
- Li Y., Oldenburg, D.W. 1991. Aspects of charge accumulation in DC resistivity. Experiments: *Geophysical Prospecting* 39, 803–826.
- Loke M.H. 1994. The inversion of two-dimensional apparent resistivity data. *Unpubl. Ph. D. thesis*, University of Birmingham (U.K.).
- Loke M.H. 1999. RES2DMOD ver. 2.2. Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite difference and finite-element methods. Wenner (alpha, beta, gamma), inline & equatorial dipole-dipole, pole-pole, pole-dipole and Wenner-Schlumberger. *Freeware courtesy of M. H. Loke*
- Lögn Ö. 1954. Mapping nearly vertical discontinuities by earth resistivities. *Geophysics* 19, 739–760.
- Maillet R., Doll H.G. 1932. Sur un Théorème Relatif aux Milieux Électriquement Anisotropes et ses Applications à la Prospection Electrique en Courant Continu: *Ergänzungshefte für Angewandte Geophysik*, 109–124.
- Martinelli H.P., Osella A., De la Vega M., Pinio, A. 2018. Different techniques for the assessment of geoelectrical data errors to improve the electrical images obtained at an industrial plant. *Near Surface Geophysics* 16/3, 238–256.
- März Gy., Pongrácz J., Szarka L. 1986. Electromagnetic scale modelling instrument for geophysical prospecting. *Scientific instrumentation* 1, 119–133.
- Matveev B.K. 1990. Electrical Prospecting. *Nedra, Moscow*. (In Russian)
- Meidav T.S.V.I. 1970. Arrays and nomograms for electrical resistivity exploration. *Geophysical Prospecting* 18, 550–563.
- Metwaly M., El-Qady G., Matsushima J., Szalai S., Al-Arifi N.S., Taha A. 2008. Contribution of 3-D electrical resistivity tomography for landmines detection. *Nonlin. Processes Geophys.* 15, 977–986.
- Militzer H., Rösler R., Losch W. 1979. Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods. *Geophysical Prospecting* 27, 640–652.
- Mogilatov V., Balashkov D. 1996. A new method of geoelectrical prospecting by vertical electric soundings. *Journal of Applied Geophysics* 36, 31–44.

Mousatov A., Pervago E., Shevnin V. 2002. Anisotropy determination in inhomogeneous media by tensor measurements of the electric field. *72nd SEG Meeting*, Salt-Lake City, Nevada, USA

Noel M., Xu B. 1991. Archeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophys. J. Int.* 107, 95-102.

Nyári Zs., Kanli A.I. 2007. Imaging of buried 3D objects using electrical profiling methods with GPR and 3D geoelectrical measurements. *Journal of Geophysics and Engineering* 4, 83-93.

Oldenburg D.W., Li Y. 1999. Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys. *Geophysics* 64, 403-416.

Ovchinnikov I.K. 1956. On the Theory of the Distribution of Current from Point and Linear Earthings or on Inhomogeneous Halfspace. *Izv. Akad. Nauk. USSR. Ser. Geofiz.* No. 4.

Palmer L.S. 1960. Geoelectrical surveying of archeological sites. *Proceedings of the Prehistoric Society* 26, 64-75.

Panissod C., Dabas M., Hesse A., Jolivet A., Tabbagh J. and Tabbagh A. 1998. Recent developments in shallow-depth electrical and electrostatic prospecting using mobile arrays. *Geophysics* 63, 1542-1550.

Peschel G. 1967. A new favourable combination of resistivity sounding and profiling in archeological surveying. *Prospezione Archeologica* 2, 23-28.

Prácser E. 1998. Pontforrás potenciáljának számítása kétdimenziós modell esetén. *Magyar Geofizika* 39/4, 127-132.

Prácser E. 2018. Geoelektromos és elektromágneses módszerek. *Kézirat*.

Rabinovich B.I., Kegutin P.G. 1962. Electrical sounding by field subtraction method. *Geology and Geophysics* 5, 107-119. (In Russian)

Roy A., 1972. Depth of investigation in Wenner, three electrode and dipole-dipole dc resistivity methods. *Geophysical Prospecting* 20, 329-340.

Roy A., Apparao A. 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics* 36, 943-959.

Rylov A.A., Karinskaya I.D. 1981. Programs for Forward and Inverse Problem Solution for VES and IP-VES for Computers. *ES series. Moscow*. (In Russian)

Salát P. 1975. Elektromos geofizikai kutatómódszerek. *Egyetemi jegyzet*. Tankönyvkiadó Budapest

Sapuzhak J.S. 1967. Higher Derivatives of the Electrical Potential in Geophysical Prospecting. *Naukova Dumka, Kiev*. (In Russian)

Sapuzhak J.S. 1977. Divergent Electrical Prospecting. *Naukova Dumka, Kiev*. (In Russian)

Shevnin V.A., Bobachev A.A., Modin I. N., Pervago E.V. 1999. Interpretation of resistivity sounding data-distorted by geological noise. *61st EAGE Meeting 1999*. P027

Schulz R. 1985. Interpretation and depth of investigation of gradient measurements in direct current geoelectrics. *Geophysical Prospecting* 33, 1240-1253.

Schwarz G.T. 1961. The Zirkelsonde, a new technique for resistivity surveying. *Archeometry* 4, 67-70.

Seigel H.O., Hill H.L. and Baird J.G. 1968. Discovery case history of the pyramid ore bodies pine point northwest territories Canada. *Geophysics* 33, 645-656.

Semenov A.S., Shevnin V. 1994. Electrical Prospecting by Resistivity Method. *Moscow State University, Moscow*. (In Russian)

Shabanov B.A. 1960. Circular array for direct current electrical sounding. *Prikladnaya Geofizika* 26, 70–77. (In Russian)

Spitzer K. 1998. The three-dimensional DC sensitivity for surface and subsurface sources. *Geophys. J. Int.* 134, 734-746.

Spitzer K., Kümpel H.J. 1997. 3D FD resistivity modelling and sensitivity analyses applied to a highly resistive phonolitic body. *Geophysical Prospecting* 45, 963-982.

Stummer P., Maurer H., Green A.G. 2004. Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics* 69/1, 120–139.

Szalai S. 1993. Sokelektródás egyenáramú mérések szivárgások megfigyelésére. *Diplomamunka*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

Szalai S. 1997. 3D parameter-sensitivity of d.c. dipole arrays. *EAGE 59th Meeting 1997*. P136

Szalai S., Kis Á., Metwaly M., Lemperger I., Szokoli K. 2015. Increasing the Effectiveness of Electrical Resistivity Tomography Using γ_{11n} Arrays. *Geophysical Prospecting* 63/2, 508-524.

Szalai S., Koppán A., Szokoli K., Szarka L. 2013. Geoelectric imaging properties of traditional arrays and of the optimized Stummer configuration. *Near-Surface Geophysics* 11, 51-62.

Szalai S., Kósa I., Nagy T., Szarka L. 2009a. Effectivity enhancement of azimuthal geoelectric measurements in determination of multiple directions of subsurface fissures, on basis of analogue modelling experiments. *15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Proceedings & Exhibitors' Catalogue Near Surface 2009, P25.

Szalai S., Kovács L., Kuslits L., Facskó G., Gribovszki K., Kalmár J., Szarka L. 2018. Characterisation of fractures and fracture zones in a carbonate aquifer using Electrical Resistivity Tomography and Pricking Probe methods. *Journal of Geoscience and Environment Protection* 6, 1-21.

Szalai S., Lemperger I., Metwaly, M., Kis Á., Wesztérgom V., Szokoli K., Novák A. 2014a. Multiplication of the depth of detectability using γ_{11n} arrays. *Journal of Applied Geophysics* 107, 195-206.

Szalai S., Lemperger I., Pattantyús-Ábrahám M., Szarka L. 2011. The standardized pricking probe surveying and its use in Archaeology. *Journal of Archaeological Science* 38, 175-182.

Szalai S., Novák A., Szarka L. 2009b. Depth of Investigation and vertical resolution of surface geoelectric arrays. *Journal of Engineering and Environmental Geophysics* 14, 15-23.

Szalai S., Novák A., 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, 1398-1404.

Szalai S., Szarka L. 2000. An approximate analytical approach for computing geoelectric response due to a small buried cube. *Geophysical Prospecting* 48, 871-885.

Szalai S., Szarka L. 2006. Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays. *ICEEG, Wuhan, Chine*, Geophysical solutions for environment and engineering, Vol. 1. Science Press USA, Inc., 260-264.

Szalai S., Szarka L. 2008a. Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays, I. linear arrays. *Acta Geod. Geoph. Hung.* 43/4, 419–437.

Szalai S., Szarka L. 2008b. Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays, II. Nonlinear and focussed arrays. *Acta Geod. Geoph. Hung.* 43/4, 439–447.

Szalai S., Szarka L. 2008c. On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting* 56/2, 159–175.

Szalai S., Szarka L. 2011. New perspectives for two-dimensional multielectrode measurements, on basis of once-developed geoelectric arrays. *Journal of Applied Geophysics* 75, 1–8.

Szalai S., Szarka L., Marquis G., Sailhac P., Kaikkonen P., Lahti I. 2004. Colinear null arrays in geoelectrics. *Proceedings of the 17th S.3-P.3 IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth Workshop*, Hyderabad, India.

Szalai S., Szarka L., Prácser E., Bosch F., Müller I., Turberg P. 2002. Geoelectric mapping of near-surface karstic fractures by using null arrays. *Geophysics* 67, 1769–1778.

Szalai S., Szarka L., Révi G., Varga, M. 2006a. Geoelectric investigation of a pluridirectional fissure system in a karstic area. *ICEEG, Wuhan, China*, Geophysical solutions for environment and engineering, Vol. 1. Science Press USA Inc. 287-291.

Szalai S., Szokoli K., Metwaly M. 2014b. Delineation of landslide endangered areas and mapping their fracture systems by the pressure probe method. *Landslides* 11/5, 923-932.

Szalai S., Szokoli K., Metwaly M., Gribovszki Z., Prácser E. 2017. Prediction of the location of future rupture surfaces of a slowly moving loess landslide by electrical resistivity tomography. *Geophysical Prospecting* 65, 596–616

Szalai S., Veress M., Novák A., Szarka L. 2006. Geofizikai vizsgálatok fedett karszton (Homód-árok, Bakony). *Karsztfelődés XI*. Szombathely, 153-170

Szarka L. 1980. Analog modelling of the potential mapping method (in Hungarian). *Magyar Geofizika* 21/5, 193-200.

Szarka L. 1978. Potenciáltérképezés analóg modellezése. *Magyar Geofizika* 21, 193-200

Szarka L. 1990. A Coulomb-törvény: a geoelektromos anomáliák alapja. *Magyar Geofizika* 31, 1-10.

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 L. 1994. Possibilities of three-dimensional geological structures by using electromagnetic geophysical methods. *Thesis for the degree of Doctor of Science*. Hungarian Academy of Sciences, Budapest

Szarka, L. 1997. Környezet-geofizika. *Egyetemi jegyzet*, NYME, Sopron.

Szarka L., Menvielle M. 1999. A possibility for an enhanced 3D parameter-sensitivity - the keyhole imaging. *Geophysical Prospecting* 47, 59-71.

Szarka L., Nagy Z. 1992, A possibility of an electromagnetic technique to locate oil reservoir boundaries on basis of analogue modelling experiments. *Acta Geod. Geoph. Mont. Hung.* 27, 131-138.

Szokoli K. 2017. Egyenáramú geoelektromos elrendezések kétdimenziós leképezési tulajdonságainak vizsgálata analóg és numerikus modellezéssel. *Doktori értekezés*, NYME, Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola

Szokoli K., Szarka L., Metwaly M., Kalmár J., Prácser E., Szalai S. 2018. Characterisation of a landslide by its fracture system using Electric Resistivity Tomography and Pressure Probe methods. *Acta Geod Geophys.* 53/1, 15-30.

Takács E. 1981. Geoelektromos kutatómódszerek I. és II.. *Egyetemi jegyzet*. Tankönyvkiadó Bp, 1979. (p. 208) és (p. 271)

Takács E. 2003. Possibilities of electric sounding by vertical electric dipole at the earth's surface. "*Earth electromagnetism*", Sopron, June 20–21 (in Hungarian)

Takács E., Hursán G. 2000. Háromdimenziós inhomogenitások indikációi a béléscső-elektroda elektromágneses terének szekunder komponenseiben. *Magyar Geofizika* 41.

Tarkhov A.G. 1957. On electric geophysical exploration methods of the pure anomaly. *Bull. Izv. Akad. Sc. USSR*, 8, 11.

Tarkhov A.G. 1980. Electrical Prospecting. *Nyedra, Moscow*.

Taylor R.W., Fleming, A.H. 1988. Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. *Ground Water* 26, 464–474.

Telford W.M., Geldart L.P.R.E., Keys D.A. 1976. Applied Geophysics. *Cambridge University Press*.

Tsokas G.N., Tsourlos P.I., Szymanski J.E. 1997. Square array resistivity anomalies and inhomogeneity ratio calculated by the finite element method. *Geophysics* 62, 426–435.

Uhlemann S., Wilkinson P.B., Maurer H., Wagner F.M., Johnson T. C., Chambers J. E. 2018. Optimized survey design for electrical resistivity tomography: combined optimization of measurement configuration and electrode placement. *Geophysical Journal International* 214/1, 108–121.

Van Nostrand R.G., Cook K.L. 1966. Interpretation of Resistivity Data. *Geological Survey professional paper 499. US Government Printing Office, Washington DC*

Varga M., Novák A., Szarka L. 2008. Application of tensorial electrical resistivity mapping to archaeological prospection. *Near Surf. Geophys.* 1, 39–48.

Verma S.K., Manglik A., Krishna Murthy N., Ananda Rao V., Bhatt K.M., Chandra S., Tezkan, B., Harinarayana, T., Scholl, C., Patro, P.K., Dutta, S. 2009. Comparative efficiency of various electrical and electromagnetic methods in mapping shallow 3-D conductors encountered in urban geophysical problems. *Eos Trans. AGU 90 (52), Fall Meet. Suppl.*, Abstract NS22A-04.

Ward S.H. 1990. Resistivity and induced polarization methods. In: *Geotechnical and Environmental Geophysics. Volume I: Review and Tutorial* 147–190. SEG, Tulsa, OK.

West S.S. 1940. Three-layer resistivity curves for the Eltran electrode configuration. *Geophysics* 5, 43–46.

West T.S., Beacham C.C. 1944. Precise measurement of deep electrical anomalies. *Geophysics* 9, 494–539.

Weyl F.G. 1967. Das tripol field: Eine neue geoelektrische Messtechnik. *Geoexploration* 5, 145–155.

Whiteley R.J. 1972. The resistivity method of geophysical prospecting. *M.Sc. thesis*, University of Sydney.

Whiteley R.J. 1973. Electrode arrays in resistivity and IP prospecting: A review. *Bulletin of the Australian Society of Exploration. Geophysicists* 4, 1–29.

Wilkinson P.B., Chambers J., Lelliott M., Wealthall G.P., Ogilvy R.D. 2008. Extreme sensitivity of crosshole electrical resistivity tomography measurements to geometric errors. *Geophysical Journal International* 173(1), 49-62.

Wilkinson P.B., Meldrum P.I., Chambers J.E., Kuras O., Ogilvy R.D. 2006. Improved strategies for the automatic selection of optimised sets of electrical resistivity tomography measurement configurations. *Geophys. J. Int.*, 1119-1126.

Winter H. 1994. Tensor-Geoelektrik an der Kontinentalen Tiefbohrung. Dissertation, Universitaet Frankfurt am Main, *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8* “Meß-, Steuerungs- und Regeltechnik”, Nr.379, VDI-Verlag, Düsseldorf.

Yadav G.S., Singh C.L. 1983. The linear quadripole-dipole array in geoelectrical prospecting. *Geophysics* 48, 1135–1139.

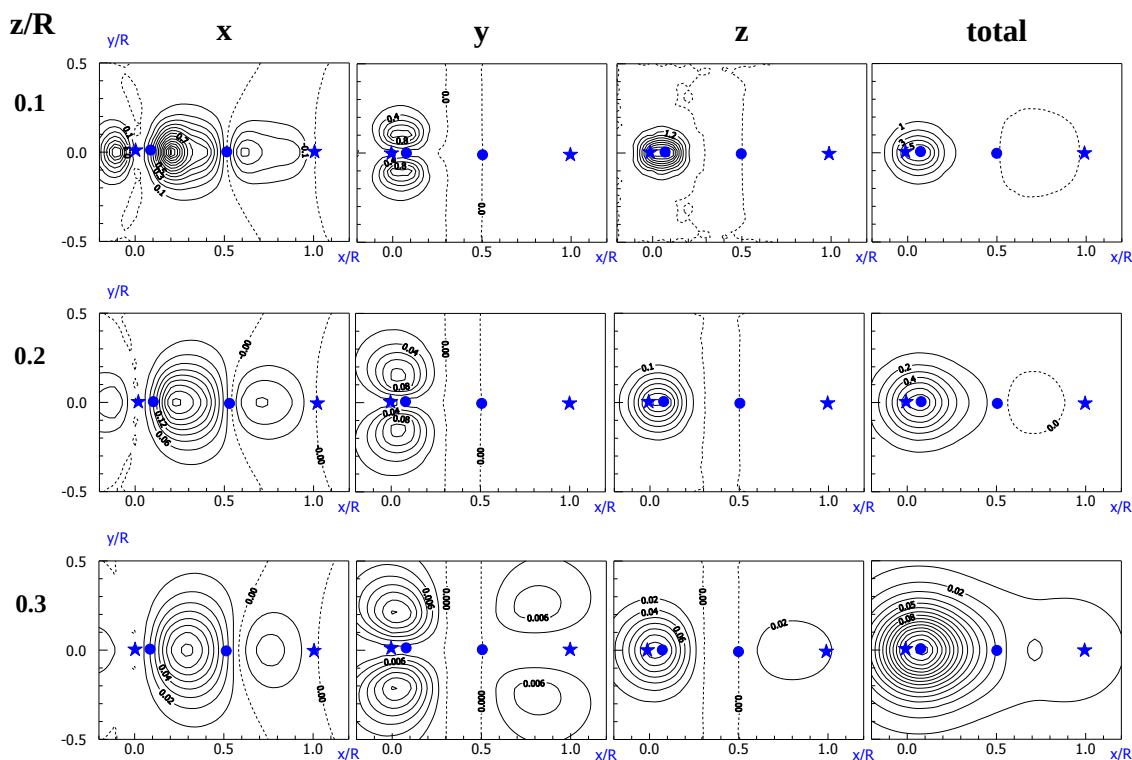
Yakubovsky J.V., Liahov L.L. 1982. Electrical Prospecting. *Nyedra, Moscow*.

Zhdanov M.S., Keller G.V. 1994. The Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration. *Elsevier*. p. 873.

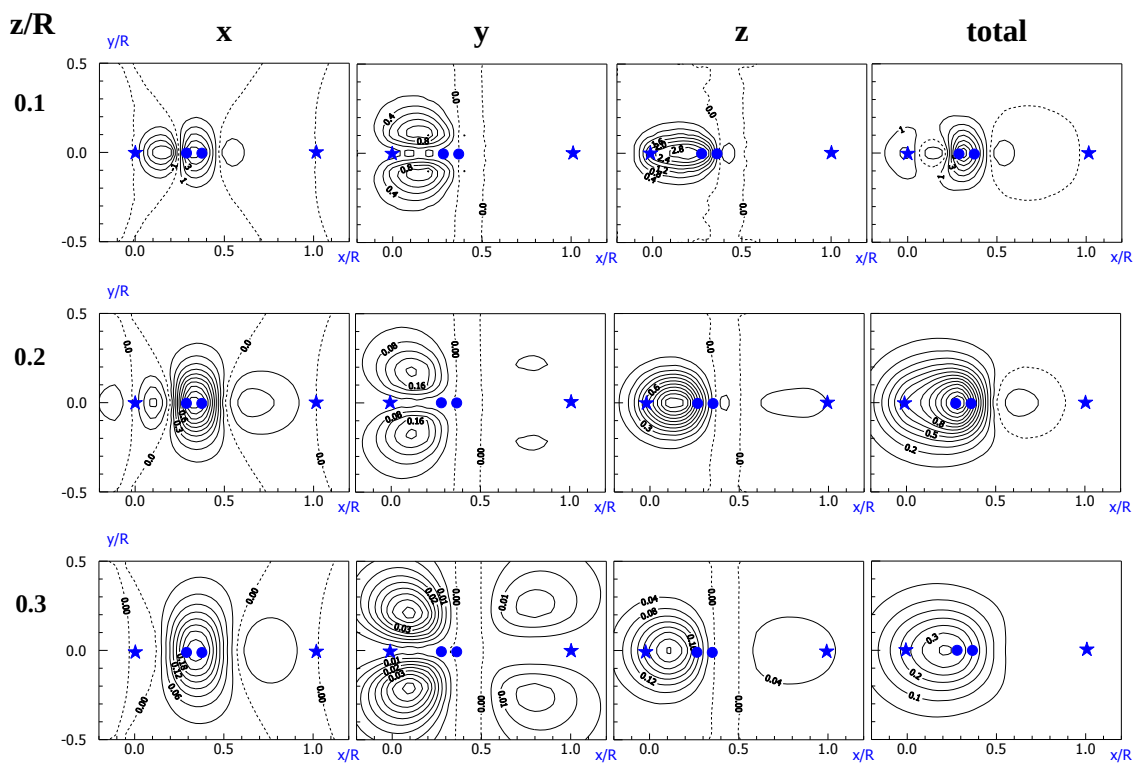
Zohdy A. 1969. The use of Schlumberger and equatorial soundings in groundwater investigations near El Paso. *Geophysics* 34, 713–728.

Zonge K.L., Hughes, L.J. 1991. Controlled source audio-frequency magnetotellurics. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Vol.2, edited by Nabighian, M.N., 713-809. Society of Exploration Geophysicists.

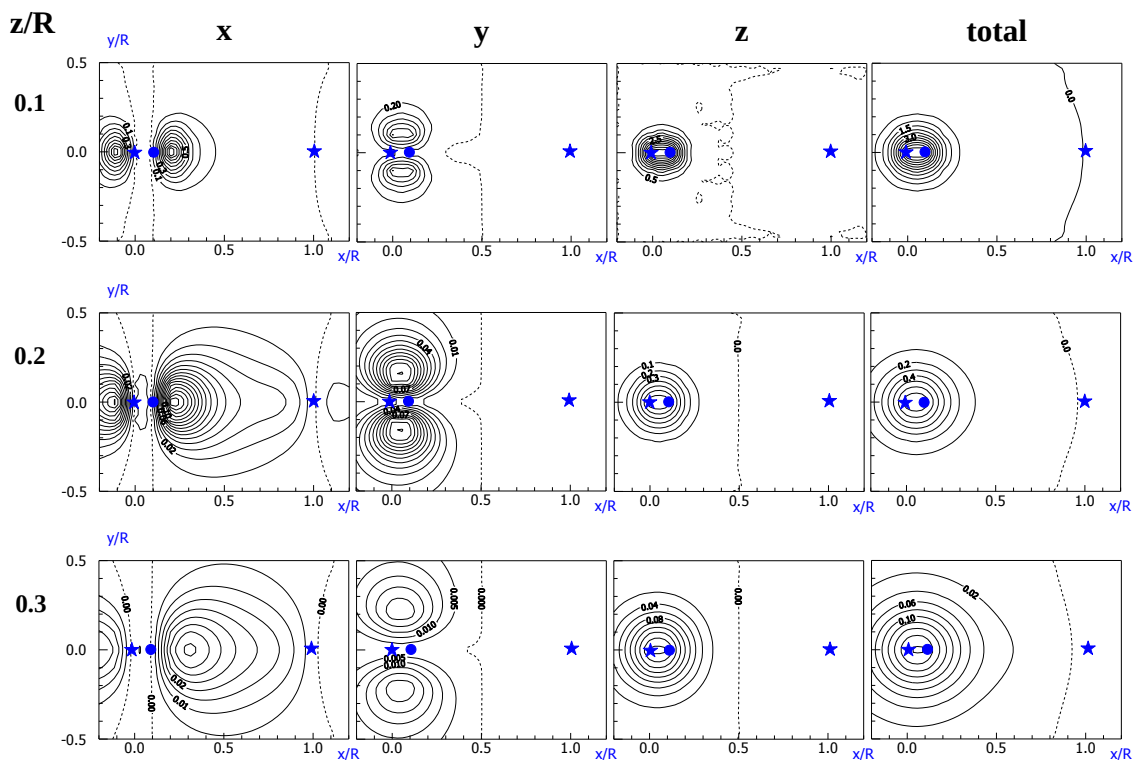
A. Melléklet: Felszíni geoelektromos elektróda elrendezések paraméter-érzékenység térképei



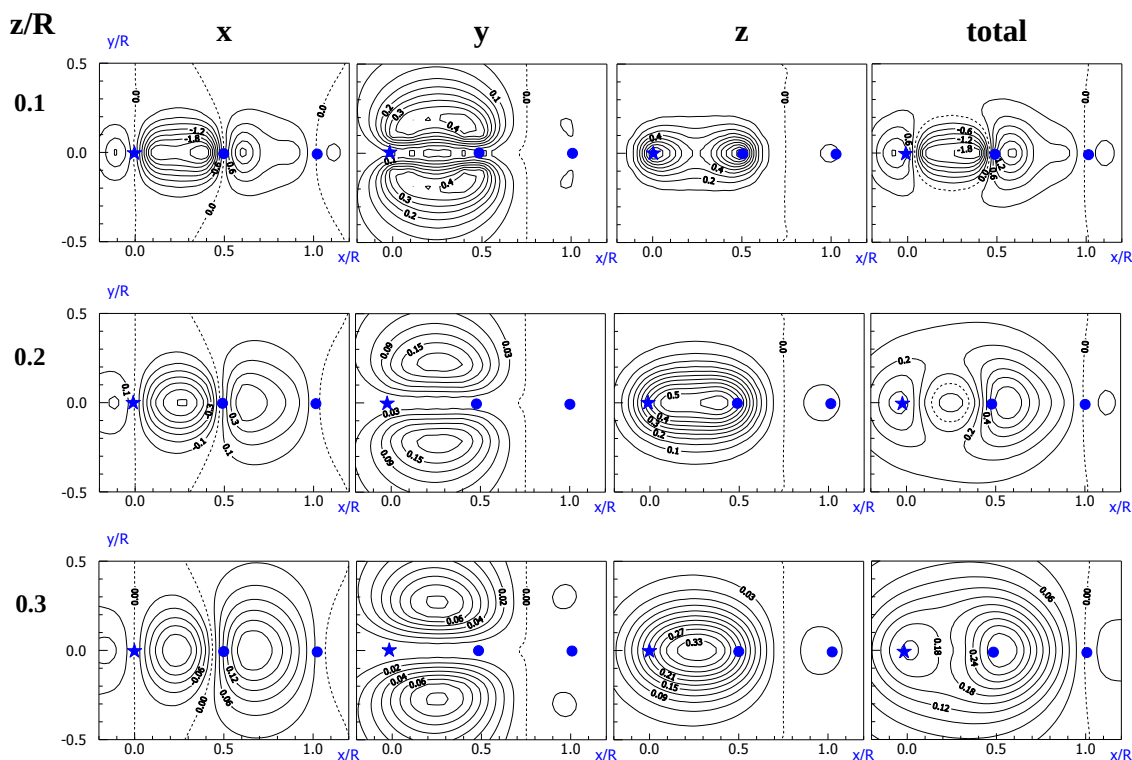
A1 ábra: Az a0105 elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 3. elrendezés a II.2.1 táblázatban). Az áramelektroda (csillagok) és potenciál-elektroda (körök) pozíciókkal. Az x , y , és z komponensek a megfelelő irányra merőleges lappárokon felhalmozódott töltések hatását illusztrálják, míg a „total” az együttes hatásukat jelenti. A térképek három különböző mélységre, az elrendezés karakterisztikus hosszának 0.1, 0.2 és 0.3 részére készültek.



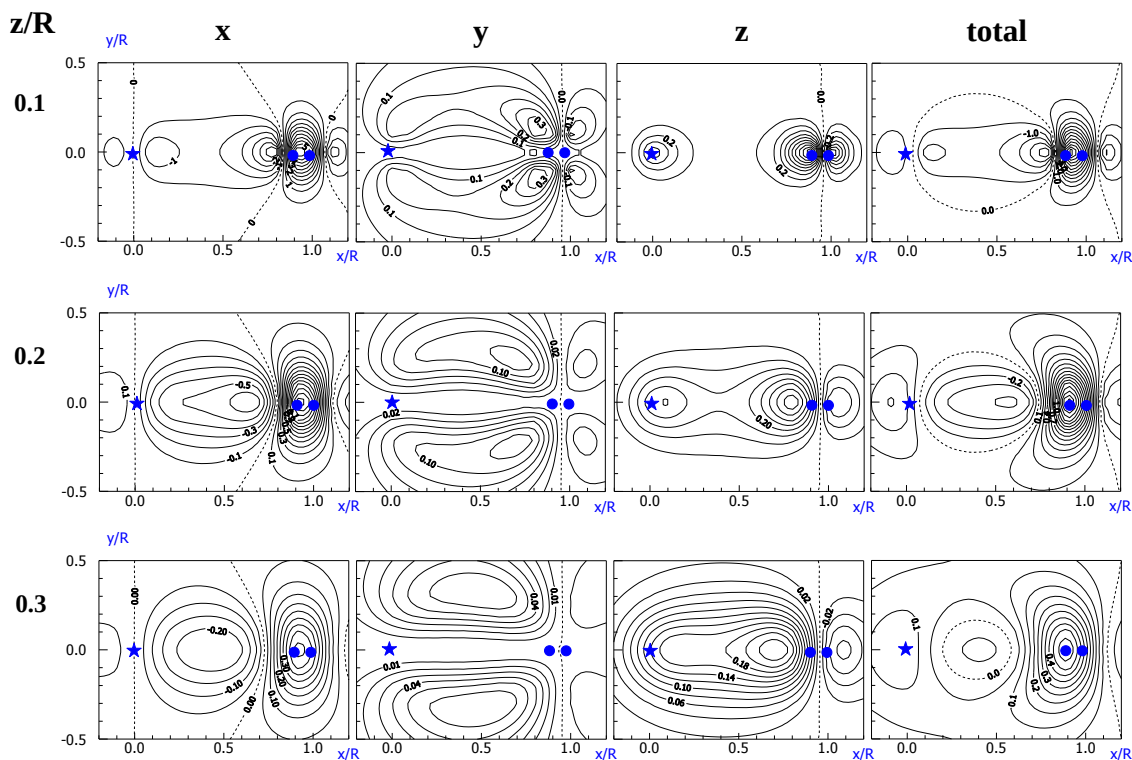
A2 ábra: Az a0304 elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 4. elrendezés a II.2.1 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



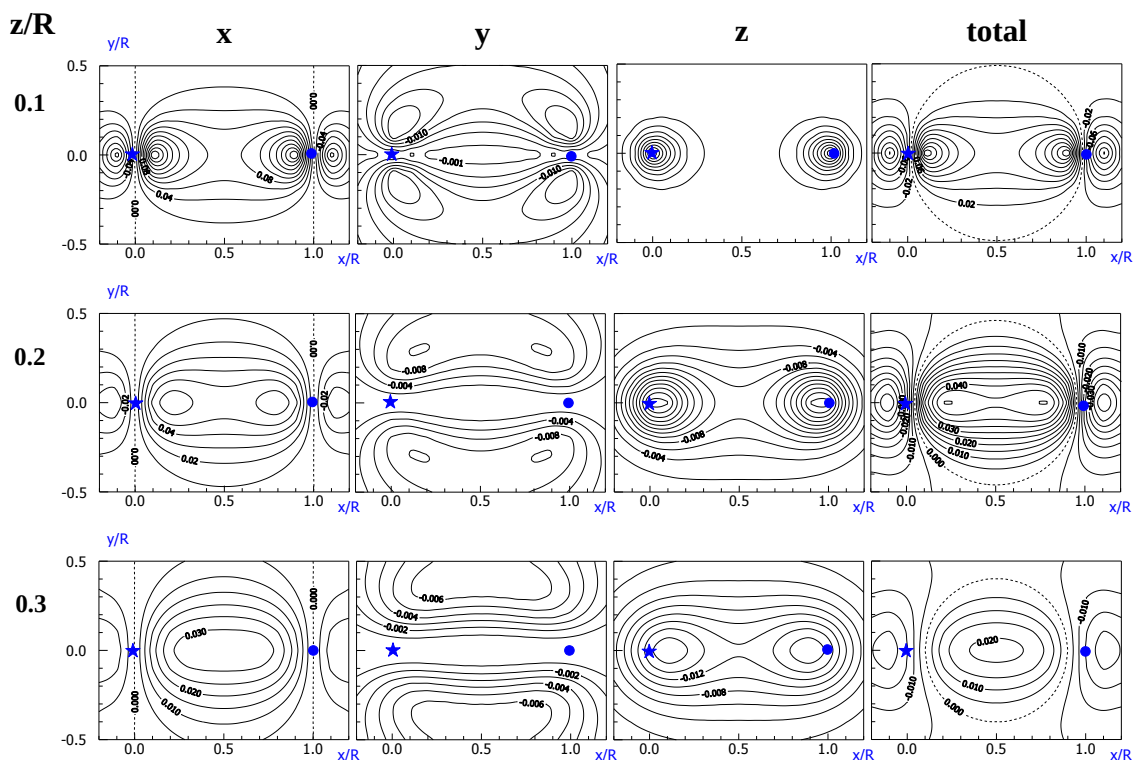
A3 ábra: A ght (γ -típusú fél-Twin) elrendezés paraméter-érzékenység térképei (az 5. elrendezés a II.2.1 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



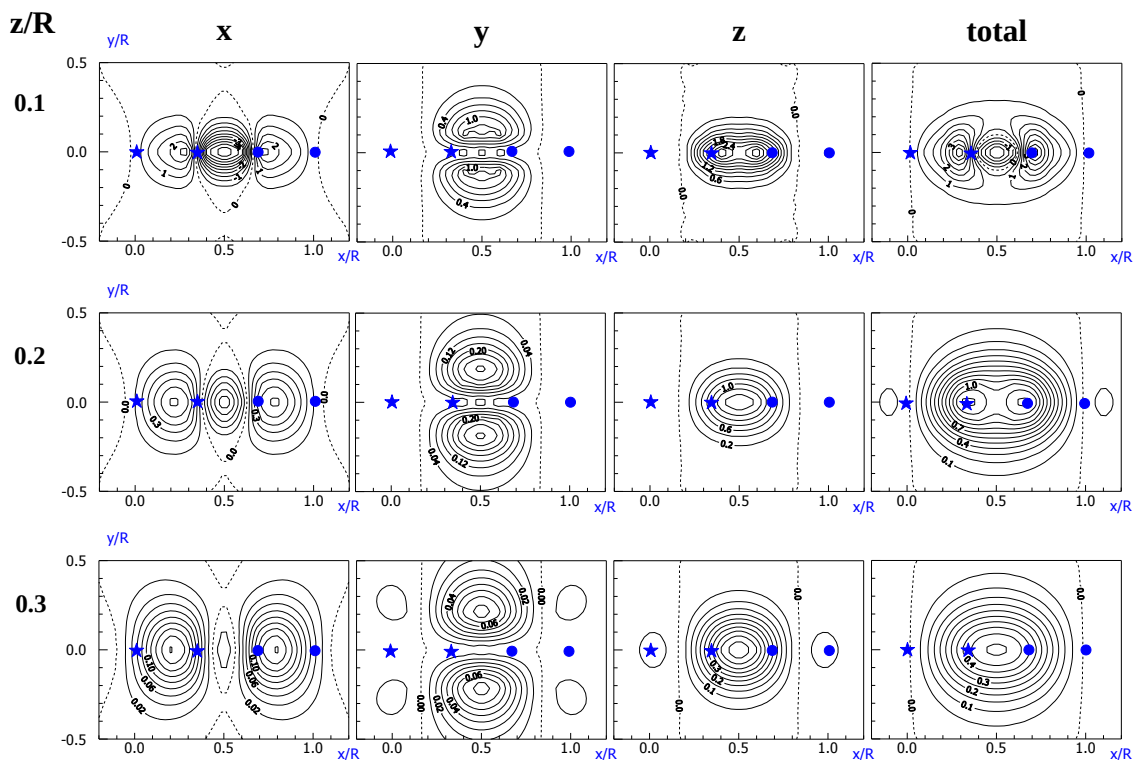
A4 ábra: A fél-Wenner (pól-dipól) elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 6. elrendezés a II.2.1 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



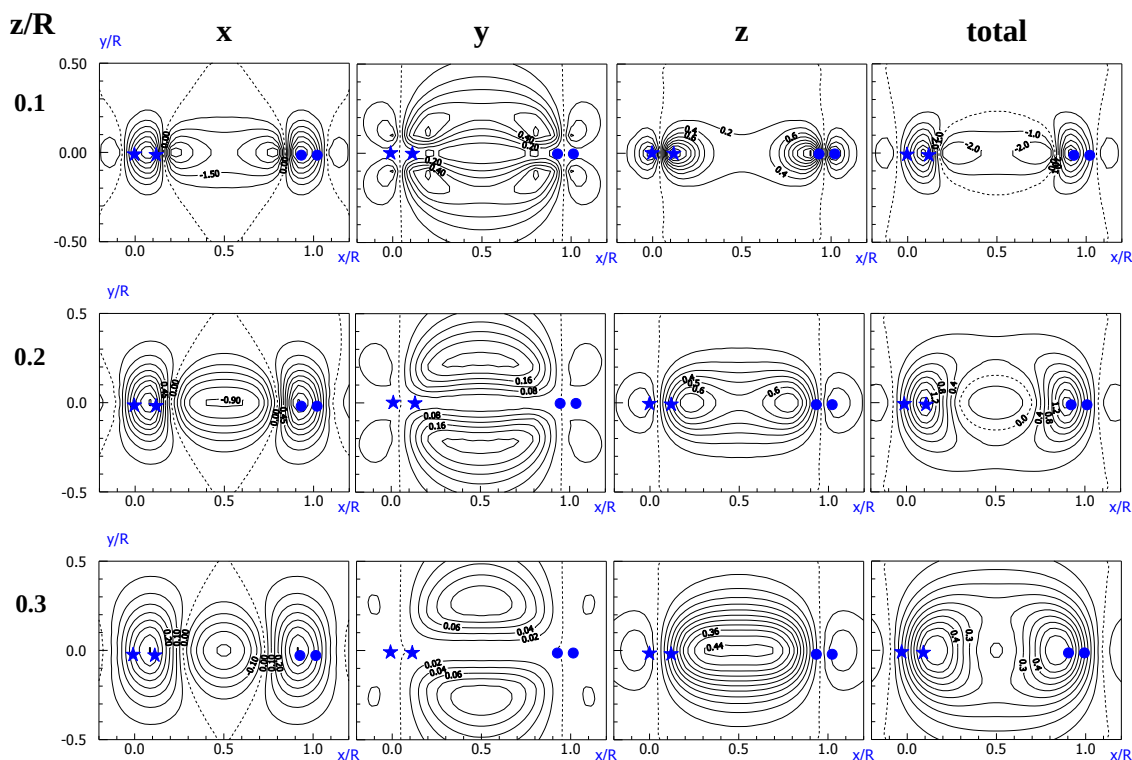
A5 ábra: A fél-Schlumberger elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 7. elrendezés a II.2.1 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



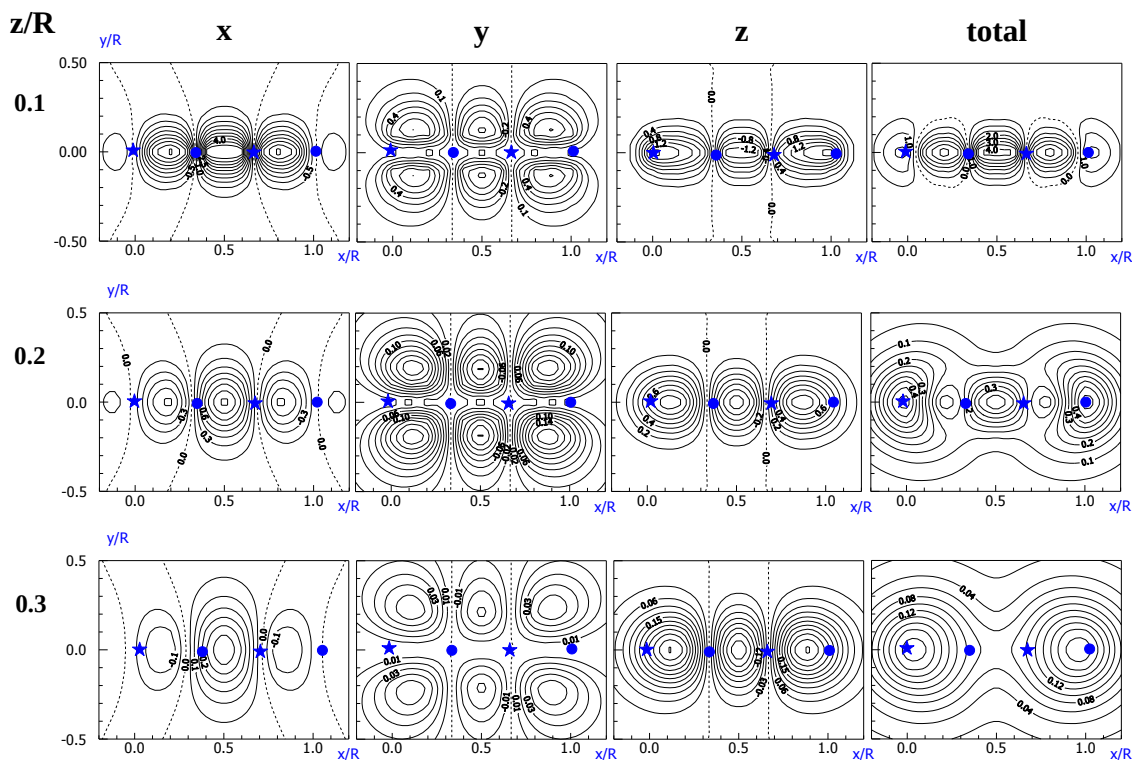
A6 ábra: A két-elektrodás (pól-pól) elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 8. elrendezés a II.2.1 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



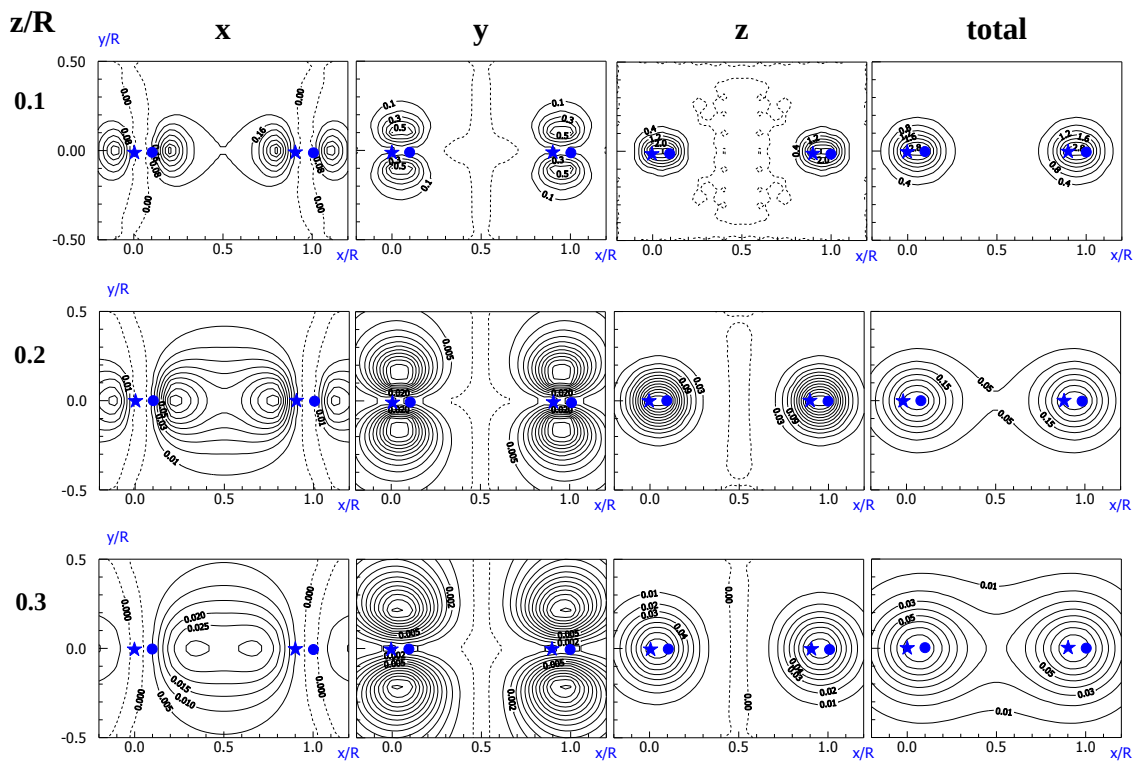
A7 ábra: A Wenner- β elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 9. elrendezés a II.2.1 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



A8 ábra: A dipól axiális elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 10. elrendezés a II.2.1 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.

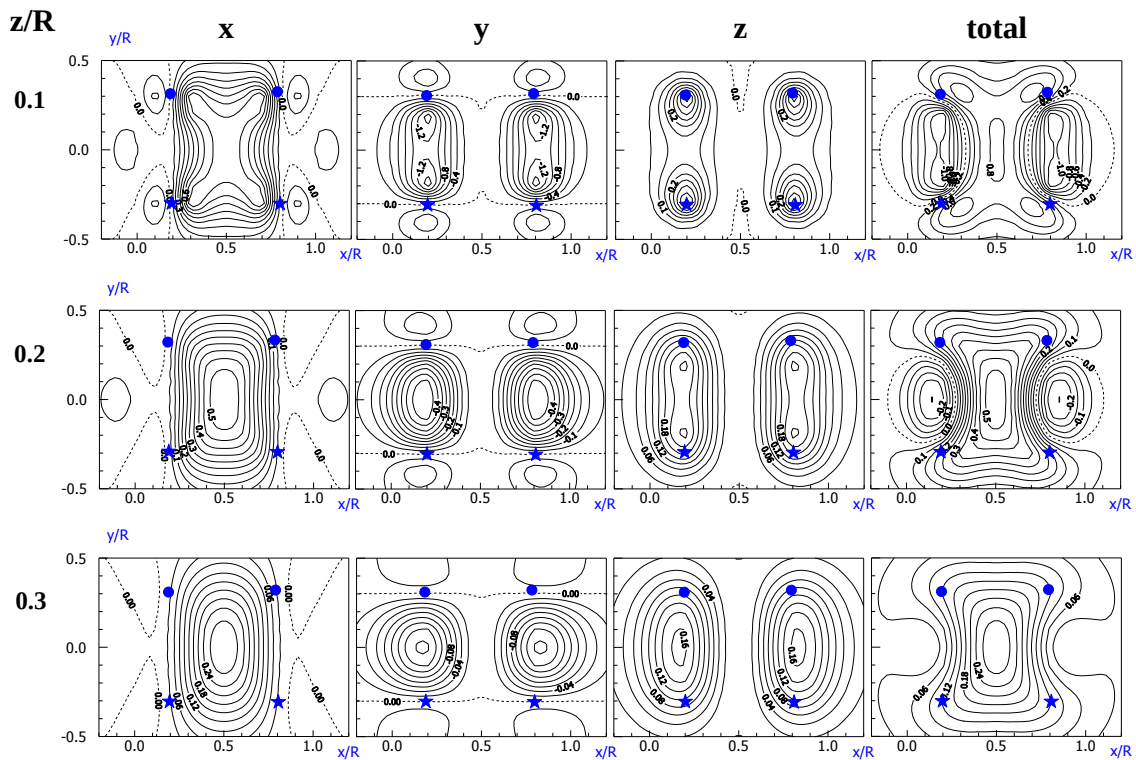


A9 ábra: A Wenner- γ elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 11. elrendezés a II.2.1 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.

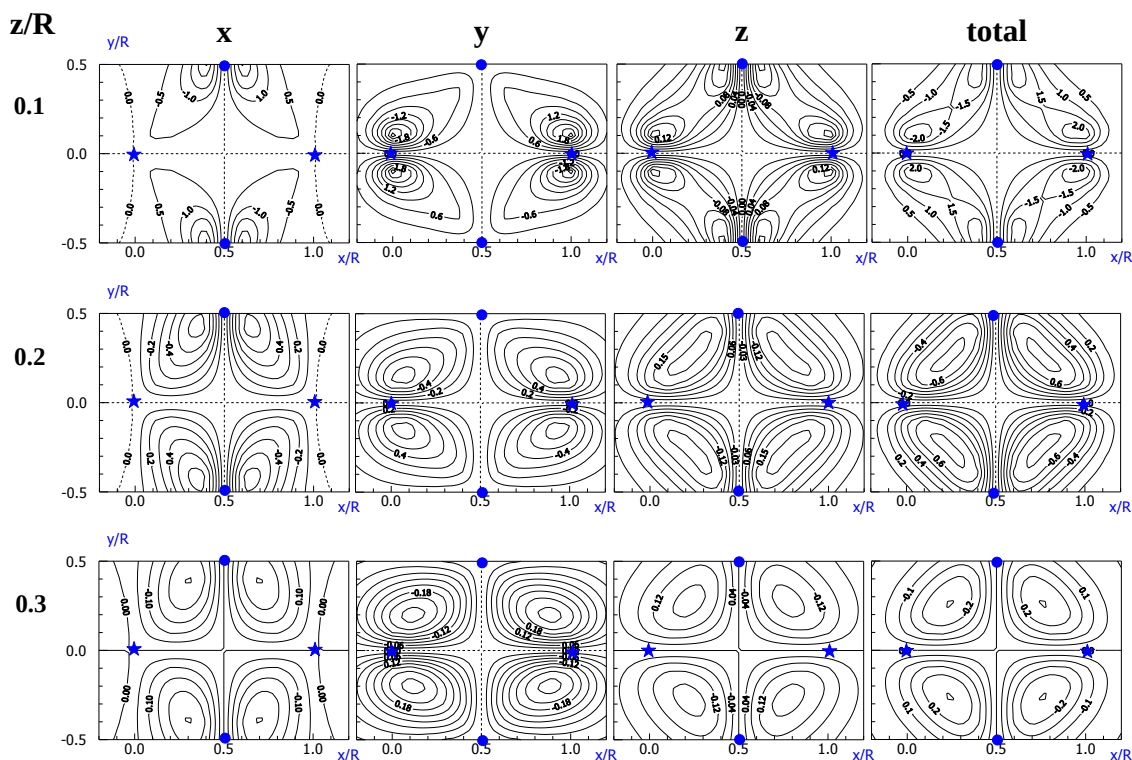


A10 ábra: A Twin elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 12. elrendezés a II.2.1 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.

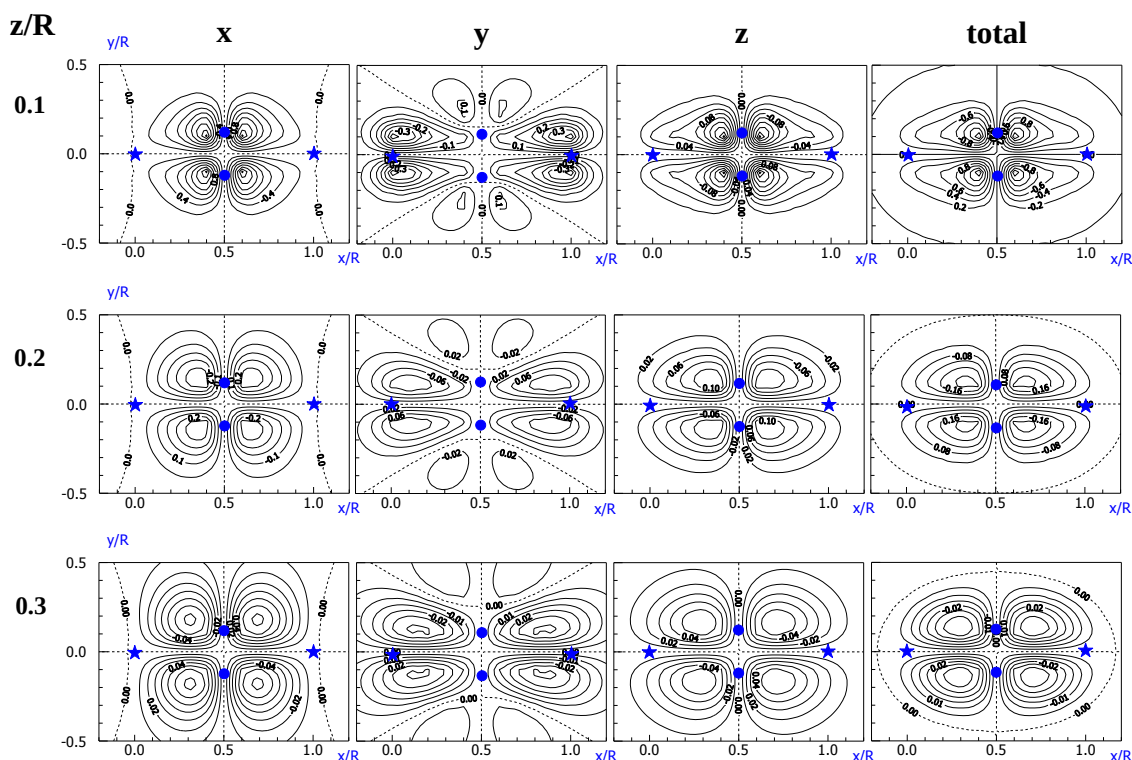
Nem-egyvonalú



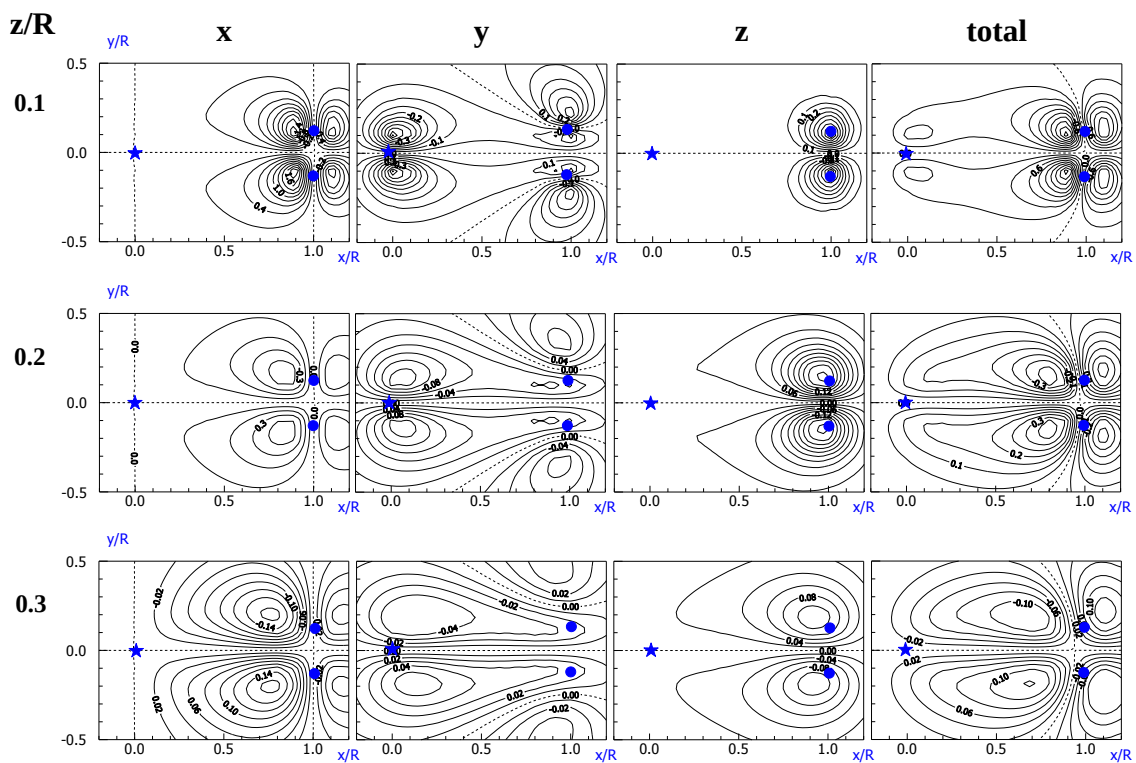
A11 ábra: A négyzetes- α elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 18. elrendezés a II.2.2 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



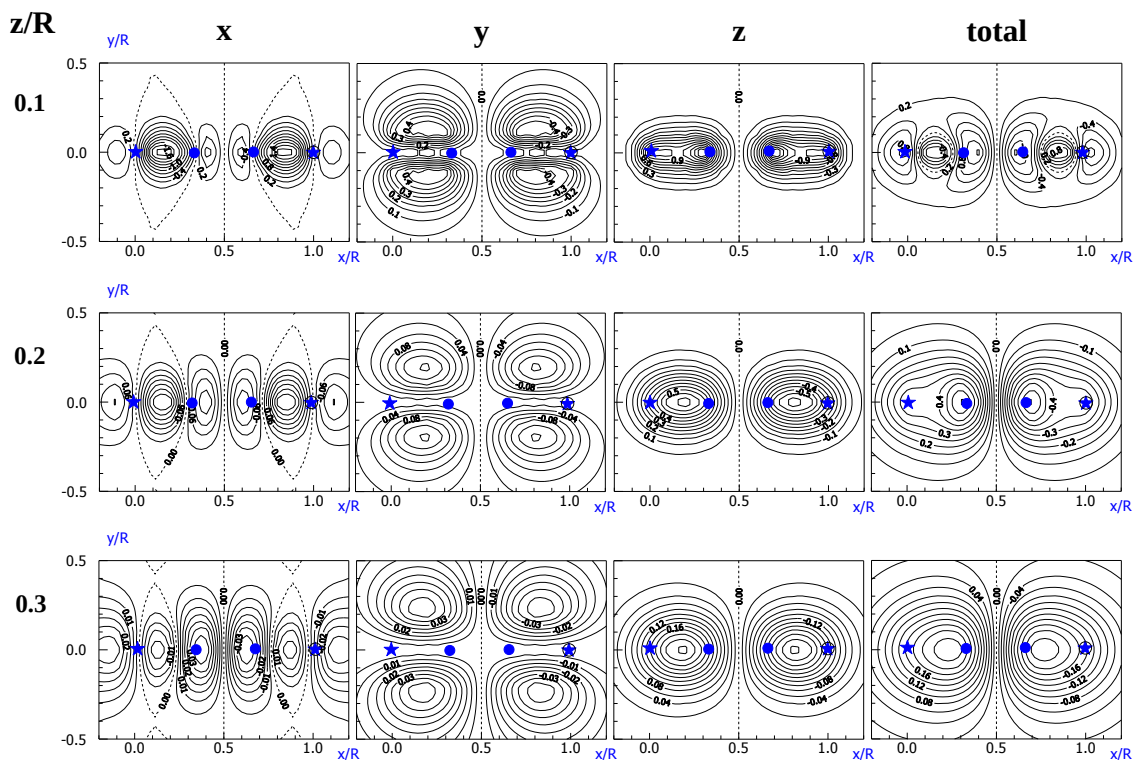
A12 ábra: A négyzetes- γ elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 19. elrendezés a II.2.2 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



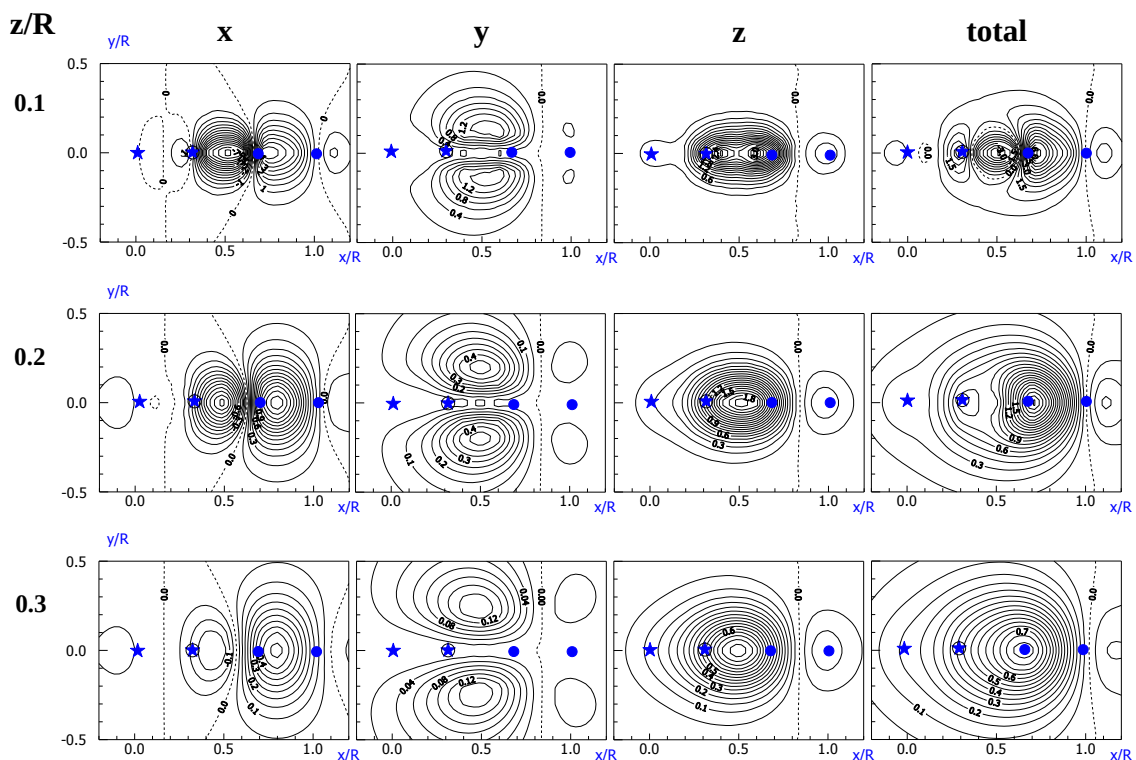
A13 ábra: A Schlumberger null-elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 20. elrendezés a II.2.2 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



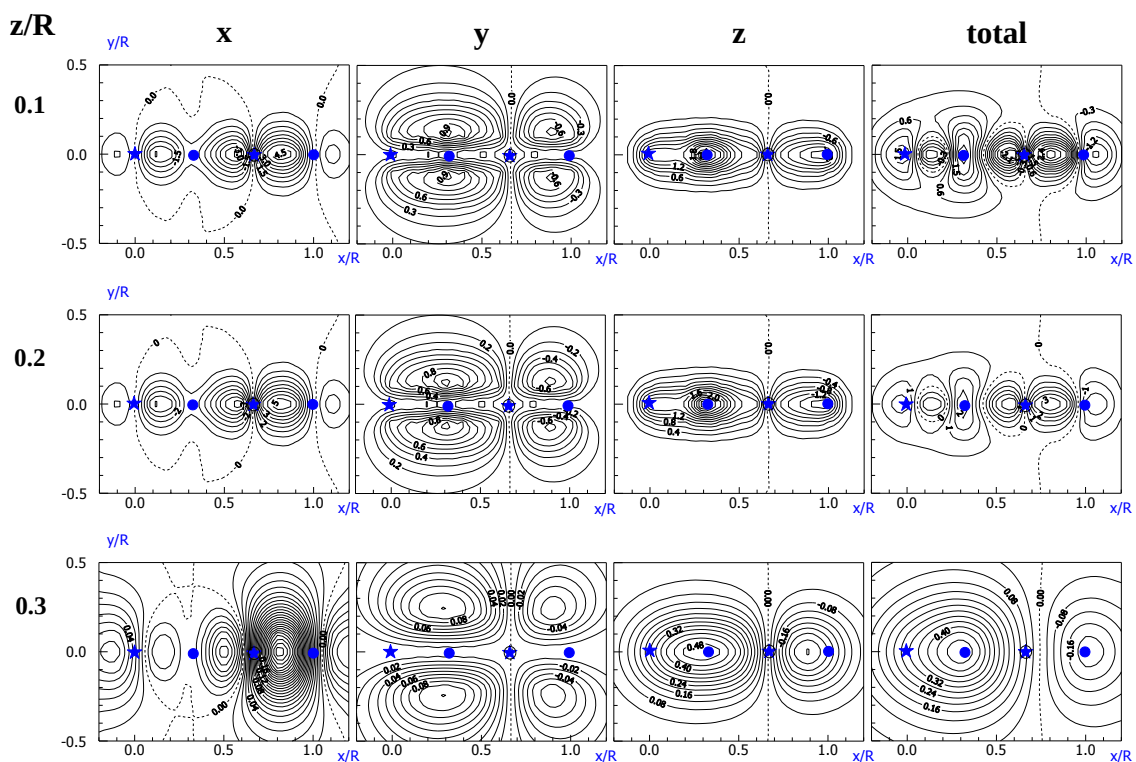
A14 ábra: A három-elektrodás null-elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 21. elrendezés a II.2.2 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



A15 ábra: Az unipól- α elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 22. elrendezés a II.2.2 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



A16 ábra: Az unipól- β négyzetes- α elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 23. elrendezés a II.2.2 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.



A17 ábra: Az unipól- γ elrendezés paraméter-érzékenység térképei (a 24. elrendezés a II.2.2 táblázatban). Jelölésmagyarázathoz lásd az A1 ábrát.