XXIII

# GEOMATIKAI közlemények

Publications in Geomatics

FŐSZERKESZTŐ Editor in Chief PAPP G

TANÁCSADÓ TESTÜLET Advisory board ÁDÁM J (elnök/chair) BIRÓ P BOZÓ L MÁRTON P



HU ISSN 1419-6492

MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai intézet Sopron

## Geomatikai Közlemények

Publications in Geomatics

kiadja a

### CSFK GEODÉZIAI ÉS GEOFIZIKAI INTÉZETE

9400 Sopron, Csatkai E. u. 6-8. tel.: +36 99 / 508-350 e-mail: geomatika@ggki.hu web: www.geomatika.ggki.hu web programozó: Lovranits Tamás

felelős kiadó:

Wesztergom Viktor mb.igazgató

főszerkesztő:

Papp Gábor

angol nyelvi szerkesztő:

#### Papp Gábor

technikai szerkesztő:

#### Szlávy Anna

készült a

LŐVÉR PRINT Kft. nyomdájában 9400 Sopron, Ady Endre u. 5. tel.: 99 / 329-977

megjelent 60 példányban

Sopron, 2020

HU ISSN 1419-6492

# GEOMATIKAI Közlemények

# XXIII.

"Minden nemzet a maga nyelvén lett tudós, de idegenen sohasem."

(Bessenyei György)

# ÁLTALÁNOS INFORMÁCIÓK ÉS ÚTMUTATÓ

A Geomatikai Közlemények 1998 óta rendszeresen, általában évenként egy alkalommal megjelenő folyóirat. A kiadvány célja, hogy elsősorban magyar és esetenként angol nyelvű fórumot biztosítson a hazai, ill. külföldi kutatóknak és szakembereknek, akik a geodézia, fotogrammetria, térinformatika, fizikai geodézia, geofizika, földmágnesség, geodinamika, a Föld belső szerkezete és a Föld körüli térség fizikája, tágabb értelemben véve a geomatika szakterületén elért tudományos eredményeiket szeretnék közzétenni. A kiadványban megjelenő cikkek és tanulmányok a mai normáknak megfelelő lektorálási folyamaton mennek keresztül, azaz mielőtt publikálásra kerülnek legalább kettő független bíráló véleményt alkot a közlésre benyújtott kéziratról. A bírálók nevét alaphelyzetben csak a szerkesztőbizottság ismeri, de a bírálók kérhetik anonimitásuk felfüggesztését. A bírálatok alapján a szerkesztőbizottság dönti el, hogy az adott kézirat megfelel-e a Geomatikai Közlemények formai és tartalmi követelmény-rendszerének, illetve, hogy az esetlegesen felmerülő hibák és hiányosságok kijavíthatók- és pótolhatók-e a kézirat kisebb-nagyobb átdolgozásával.

A Geomatikai Közlemények szerkesztését – amelyet 2011-től már egy, az Interneten keresztül elérhető és működtethető web felület is támogat (www.geomatika.ggki.hu/ kozlemenyek ©Lovranits Tamás és Papp Gábor) – társadalmi munkában végző szer-kesztőség nagy hangsúlyt fektet a lehető leggyorsabb minőségi munkára. Ez mind a szerzőktől, mind a bírálóktól erőfeszítéseket és fegyelmet kíván, amit a szerkesztőség előre is tisztelettel megköszön. Ennek biztosításához javasoljuk áttanulmányozni a következő anyagokat:

formai\_es\_tartalmi\_kovetelmenyek.docx, geomatikai\_kozlemenyek\_utmutato\_biraloknak.pdf,

amelyek a már fent megadott címre belépve letölthetők a megfelelő linkekről. A regisztrált felhasználók ugyanezen a címen keresztül végezhetik el a rendszer által koordinált aktuális feladataikat, akár szerzői, akár bírálói szerepkörben. Az új felhasználók ugyanitt regisztrálhatnak, felhasználói név és e-mail cím megadásával.

A feltöltött kéziratokat a szerkesztőség előbírálja, elsősorban az instrukciókban megfogalmazott formai szempontok szerint. Ha a kézirat formailag kielégítőnek bizonyul, akkor elindul a bírálati folyamat, amely általában több ciklust is képez, és egészen addig tart, ameddig a bírálók, ill. a szerkesztőség ezt tartalmi-formai indokok miatt szükségesnek tartják. A bírálati fázisokról és az aktuális teendőkről mind a szerzők mind a bírálók automatikus üzenetekben értesülnek.

A Geomatikai Közleményeket a CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézete adja ki. A kiadás anyagi hátterét egyrészt a kétévente Sopronban megrendezésre kerülő Geomatika Szeminárium, másrészt különböző pályázatok és tudományos szervezetek (pl. Soproni Tudós Társaság) támogatásai biztosítják. A XXIII. kötet megjelenését a Soproni Tudós Társaság tette lehetővé.

A Geomatikai Közlemények jelen kötetének felelős szerkesztői:

Kalmár János, Papp Gábor, Bányai László.

# ELŐSZÓ

A Geomatikai Közlemények ezen kötete két tudományos cikk mellett, helyet adott egy MTA Doktora disszertáció utánnyomásának is. Szalai Sándor 2020. szeptember 23-án sikerrel védte meg dolgozatát, amelyet Dr Gyulai Ákos az MTA Doktora, Dr. Timár Gábor az MTA doktora és Dr. Drahos Dezső a műszaki tudomány kandidátusa bíráltak és amelynek digitális változata elérhető itt:

http://real-d.mtak.hu/1176/7/dc\_1591\_18\_doktori\_mu.pdf.

# A KÖTETBEN MEGJELENT CIKKEK BÍRÁLÓI

Benedek Judit Forgácsné Dajka Emese Hegedüs Tibor Kenyeres Ambrus

## TARTALOMJEGYZÉK CONTENTS

| Deme Lívia, Sárneczky Krisztián, Igaz Antal, Opitz Nándor, Egei Nóra, Csák Balázs,<br>Vinkó József                                                                 | . 7 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Meteortevékenység Magyarország felett automata meteorkamera-rendszerek adataiból<br>Meteor activity over Hungary from data taken by automatic meteorcamera systems |     |
| Lupsic Balázs, Takács Bence<br>Ionoszféra modellezése gauss-folyamat regresszióval<br>Modelling the ionosphere using Gauss process regression                      | 15  |
| Szalai Sándor - MTA Doktori értekezés 2019<br>Geoelektromos kvázi null elektróda elrendezések<br>Geoelectric quasi null electrode arrays                           | 25  |

# METEORTEVÉKENYSÉG MAGYARORSZÁG FELETT AUTOMATA METEORKAMERA-RENDSZEREK ADATAIBÓL

## Deme Lívia<sup>\*</sup>, Sárneczky Krisztián<sup>\*</sup>, Igaz Antal<sup>\*</sup>, Opitz Nándor<sup>\*</sup>, Egei Nóra<sup>\*</sup>, Csák Balázs<sup>\*\*</sup>, Vinkó József<sup>\*</sup>

**Meteor activity over Hungary from data taken by automatic meteorcamera systems** – The extended and modernized meteorcamera system, funded by the GINOP project entitled "Cosmic effects and risks" of the ELKH Research Center for Astronomy and Earth Sciences (CSFK), is continuously monitoring the meteor activity in the upper atmosphere above Hungary. In this paper we introduce the system stations and present some statistical results based on data obtained during the first year, focusing on meteor shower membership and the frequency of fireballs.

Keywords: meteors, digital image processing, statistical analysis

A CSFK "Kozmikus Hatások és Kockázatok" című GINOP projektjének keretében kibővített és modernizált országos meteorkamera-rendszer folyamatosan monitorozza a Magyarország feletti légkörben történő meteortevékenységet. Közleményünkben bemutatjuk a mérőrendszer állomásait, valamint az első egy év során gyűjtött adatok statisztikáját, különös tekintettel a rajtagságra és a tűzgömbök gyakoriságára vonatkozó információkra.

Kulcsszavak: meteorok, digitális képfeldolgozás, statisztikai elemzés

#### 1 Bevezetés

A köznyelvben hullócsillagként emlegetett meteorjelenségre már az ókorban felfigyeltek, mint rövid idő alatt lejátszódó, látványos égi fényjelenségre. Az akkor uralkodó paradigma értelmében ilyen változásokra úgy tekintettek, mint kizárólag a földi légkörben lejátszódó jelenségre, hiszen erősen tartotta magát az Arisztotelésztől származó, az égbolt változatlan örökkévalóságába vetett hit. Habár Diogenész már Kr. e. 467-ben egy akkori meteorhullás után talált szikladarabról úgy vélte, hogy az a légkörön kívüli űrből származott, Arisztotelész Kr.e. 300 körül a "meteor" (jelentése "ég és föld között lebegő") elnevezéssel már deklarálta, hogy légköri jelenségről van szó (Csizmadia 2004). A kozmikus eredet újbóli felismerése egészen a 19. század közepéig váratott magára, amikor sikerült feltárni az üstökösök és a meteorrajok kapcsolatát. Ebben jelentős szerepet játszott Konkoly Thege Miklós is, aki az ógyallai csillagvizsgálóból készített meteorszínképek elemzéséből egyértelműen kimutatta, hogy ezek üstökösökből származnak (Bartha és Tepliczky 1992).

A meteorjelenséget előidéző, 1 m-nél kisebb (többnyire milliméteres, vagy centiméteres nagyságrendbe eső), Naprendszerben keringő részecskék hivatalos elnevezése *meteoroid*. Ezek anyaga vagy szilikátos kőzet, vagy vas, esetleg vas-nikkel kompozit. *Meteor*tól akkor beszélünk, amikor a meteoroid a Földdel találkozik, és a földi felsőlégkörben a súrlódás miatt felizzik, ezáltal látványos fényjelenséget produkál. Erre általában 80 - 120 km magasságban kerül sor. A folyamat során a magas hőmérsékletűre felhevült meteoroid egyrészt pályája mentén ionizálja a légkör molekuláit, másrészt folyamatosan tömeget veszít, míg végül elég a légkörben. A maximális fényesség a meteoroid kezdeti tömegével és Földhöz viszonyított relatív sebességével arányos (Nagy 2018, Hegedüs 1989a, 1989b).

A spektroszkópiai vizsgálatok alapján a fényesség sokkal inkább az elégő meteoroidból származik, és csak kisebb mértékben a légkör ionizált részecskéinek rekombinációjából (Csizmadia 2004). A legfényesebb, -4 magnitúdót meghaladó meteorokat *tűzgömbök*nek nevezzük. Az erős hőhatás miatt a nagyobb tömegű meteoroidok gyakran robbanásszerűen esnek darabokra, amelyek a légkörben terjedő hanghullámokat, időnként erős lökéshullámokat keltenek. Az ilyen jelenséget



produkáló meteorok a *bolidák*. Ennek látványos esete volt a 2013-ban Cseljabinszk felett felrobbanó meteoroid, amely jelentős földfelszíni károkat és személyi sérüléseket okozott.

A nagyobb térbeli sűrűségű, eredetileg üstökösökből, vagy ritkábban kisbolygókból származó meteoroidok *meteorrajokat* alkotnak. Ezek elnevezése ahhoz a csillagképhez kötődik, amelynek irányából látszólag érkeznek. Így az Leo (Oroszlán) csillagkép irányából érkezők a Leonidák, az Orion irányából az Orionidák, stb. A rajokhoz tartozó, jól lokalizált égi pozíció a *radiánspont*. A meteorrajok észlelhetőségi ideje általában pár nap, amikor a Föld áthalad a raj Nap körüli pályáján. A rajokhoz nem tartozó, lényegében véletlenszerű irányokból és -időben érkező meteorokat *sporadikus* meteoroknak nevezzük.

A légköri utazást túlélő, földfelszínt elérő meteoroid elnevezése *meteorit*. Felszíni becsapódásuk gyakran krátert eredményez, mint például a híres arizonai Barringer-kráter, amelyet egy kb. 50 m átmérőjű vas-nikkel meteorit okozott. A továbbiakban nem ezekkel, hanem a légkörben elégő meteorok detektálásával és az adatok elemzésével foglalkozunk.

#### 2 Meteorok észlelése meteorkamerákkal

A meteorok legtöbbször igen gyors (0.1 s - 10 s közötti) lefolyású fényjelenségek, melyek véletlenszerű időpontban és irányban tűnnek fel. Észlelésükkel általában amatőrcsillagászok foglalkoznak, túlnyomórészt vizuális megfigyeléseken keresztül. Az utóbbi évtizedekben lezajlott technológiai fejlődésnek köszönhetően azonban egyre elterjedtebbé váltak az égboltot folyamatosan figyelő elektronikus kamerákkal történő detektálások. Ezek mellett a meteor légköri pályája mentén keltett ioncsatornát is lehet rádiós mérésekkel (pl. radarral) detektálni, valamint a lökéshullámok is észlelhetők speciális infrahang-detektorokkal. Ez utóbbi technikák azonban jóval költségesebbek, mint a relatíve olcsón beszerezhető optikai kamerák (Nagy 2018, Tepliczky 1994).

A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, valamint az Eötvös Loránd Tudományegyetem konzorciuma 2016-ban nyerte el a "Kozmikus hatások és kockázatok" (KHK, GINOP 2.3.2-15-2016-00003) című kutatási program támogatását az akkori Nemzetgazdasági Minisztérium (NGM), továbbá a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) által felügyelt, EU-s forrásokra épülő Gazdaságfejlesztési és Innovációs Operatív Program (GINOP) keretein belül. A projekt fő célkitűzése a Föld közvetlen kozmikus környezetében lejátszódó, kozmikus eredetű jelenségek széleskörű felderítése, vizsgálata, és az ezekből származó esetleges kockázatok elemzése. Ennek részét képezi a Magyarországon működő meteorkamera-hálózat bővítése, műszakitechnológiai fejlesztése és az ezekből származó adatok feldolgozása. Jelen cikkünkben ezen kutatás-fejlesztési folyamat aktuális helyzetét, illetve az adatokból származó első eredményeket mutatjuk be.

A magyarországi meteorkamera-rendszer a 2000-es évek elejétől kezdve folyamatos bővülésen és általában amatőrcsillagászok magánpénzből fejlesztésen ment keresztül, finanszírozott kezdeményezéseként. Ebben a jelen cikk egyik szerzője (I.A.) vezető szerepet játszott. Ezek a rendszerek az akkoriban elérhető ipari videokamerák alkalmazásán alapulnak (http://videometeor.hu). A meteorok automatikus detektálását a kimondottan ezekre a kamerákra kifejlesztett "Meteor Recognizer" (MetRec, http://www.metrec.org) szoftver teszi lehetővé. A videokamera másodpercenként 25-30 monokróm, 8 bites képet készít (PAL rendszerben 384×288, NTSC rendszerben 320×240 pixel felbontással), amelyeket a kamerával összekapcsolt számítógépben lévő Matrox frame-grabber grafikus kártya folyamatosan rögzít. Az egyedi képeken az átlagkép levonása után az állandó fényességű források (csillagok) eltűnnek és csak a változó fényforrások maradnak meg. Amennyiben a levont képen detektált változás egy kritikus fényességértéket meghalad és az egymást követő felvételeken elmozdul, a szoftver meteornak tekinti a jelet. A soron következő képeken a meteor nyomon követésével megpróbálja meghatározni annak égi pályáját. Végezetül a meteort tartalmazó felvételeket eltárolja, míg a többi felvételt, amelyeken nem látszik meteor, törli.

A KHK projekt egyik jelentős kutatás-fejlesztési (K+F) célkitűzése volt ezen analóg videokamerákra épülő mérőrendszernek a bővítése és modernizálása. Ennek keretében jött létre az új, digitális tükörreflexes fényképezőgépekre (DSLR) épülő meteorkamera-rendszer, amelyet jelen tanulmányunkban mutatunk be (Konkoly Meteor Observatory Network, KoMON).



1. ábra: A DSLR-rendszer (bal oldal) és a videokamera-rendszer (jobb oldal) által készített meteorfelvétel

A fejlesztés igénye és elsődleges motivációja arra vezethető vissza, hogy az analóg meteorkamerák a legfényesebb meteorokra, főként a potenciálisan földfelszínt elérő tűzgömbökre már telítésbe mennek, így nem érzékelik őket. Fejlesztésünk fő célkitűzése így az volt, hogy az új meteorkamera-rendszer képes legyen a legfényesebb tűzgömbök detektálására, még olyan áron is, hogy a halványabb meteorokat nem érzékeli.

Az 1. táblázat tartalmazza az új kamerák telepítési helyszíneinek és technikai jellemzőinek adatait. A korábbi videokamera-rendszertől eltérően az új DSLR-kamerák egységes technikai jellemzőkkel bíró eszközök. Ezek legfontosabb adatai az alábbiak:

- Videokamerák típusa: NET GmbH GigEPRO GP2239M-75-1
  - Paraméterek: Frame=1920x1200, Mono8, GAIN=1, FrameRate=25 fps
- DSLR kamerák típusa: Nikon D5300
  - Paraméterek: Frame=6000x4000, Color, ISO=3200, ExpTime=10 sec

A digitális kamerák érzékenysége az utóbbi években nagyon sokat fejlődött, ennek köszönhetően ma már lehetőség van relatíve olcsón beszerezni olyan kamerákat, amelyeket egymás mellé telepítve csaknem a teljes égbolt megfigyelhető, szemben a régebbi egyedi videokamerák által elérhető kb. 25%-30%-os lefedettséggel. A KHK-projektben fejlesztett kamerarendszer újdonsága, hogy egy digitális videokamerát kombinál egy DSLR-fényképezőgéppel. A digitális kamerával történik a meteor első detektálása, majd ennek hatására – amennyiben a detektált fényfolt fényessége és sebessége egy előre megadott tartományba esik – a rendszer elektronikája aktiválja a DSLR-kamerát, amely egy 10 sec expozíciós idejű felvételt készít a jelenségről. Az expozíció alatt a kamera CMOS chipje elé helyezett LCD panel egy GPS alapú időjellel vezérelve megszaggatja a fényjelet, annak érdekében, hogy a detektált képen a meteorok pozíciója és sebessége ezredmásodperces pontossággal azonosítható legyen. A gyorsan mozgó meteorok így szaggatott fénycsíkként jelennek meg a felvételeken, míg a lassú objektumok folyamatos vonalként (1. ábra), ami a meteorok felismerhetőségét segíti a lassan mozgó fényforrásokkal (repülőgép, műhold, stb.) szemben. A szaggatás időfüggvényének generálására de Bruijn-szekvenciát használtunk, Howie et al. (2017) cikkében közölt algoritmus alapján.

#### 3 Eredmények

Az alábbiakban röviden bemutatjuk az 1. táblázatban felsorolt kamerákkal 2019. december - 2020. október közötti időszakban észlelt meteorok adataiból levonható első következtetéseket. Hangsúlyozzuk, hogy az itt közölt eredmények csak előzetesnek tekintendők, az adatok alaposabb vizsgálata folyamatban van.

| Telephely                                | Kamera<br>neve        | Kamera<br>típusa | Hosszúság<br>(fok) | Szélesség<br>(fok) | Látóirány             | Látómező<br>méret (fok) |
|------------------------------------------|-----------------------|------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| Konkoly<br>Obszervatórium                | HUKON                 | Video*           | 18.9643            | +47.4997           | K                     | 89 × 68                 |
| Piszkéstetői<br>Obszervatórium           | HUPIS                 | Video*           | 19.8956            | +47.9178           | É - ÉNy               | 89 × 68                 |
| Geofizikai<br>Obszervatórium<br>Fertőboz | HUPOL                 | Video*           | 16.7179            | +47.6337           | Zenit                 | 72 × 55                 |
| Hódmezővásárhely                         | HUHOD                 | Video*           | 20.3315            | +46.3587           | É - ÉNy               | 89 × 68                 |
| Konkoly<br>Obszervatórium                | KW                    | DSLR             | 18.9643            | +47.4997           | Ny                    | $110 \times 90$         |
| Piszkéstetői<br>Obszervatórium           | PZ, PN, PE,<br>PS, PW | DSLR             | 19.8956            | +47.9178           | Zenit, É, K,<br>D, Ny | 360 × 180               |
| Gothard<br>Obszervatórium<br>Szombathely | SZ, SN, SE,<br>SS     | DSLR             | 16.6031            | +47.2578           | Zenit, É, K,<br>D     | 270 × 135               |
| Dévaványa                                | DN, DE,<br>DS, DW     | DSLR             | 20.9356            | +47.0814           | É, K, D,<br>Ny        | 360 × 170               |

| 1. táblázat: Meteorkamer | ák adatai |
|--------------------------|-----------|
|--------------------------|-----------|

\*az analóg videokamerák technikai adatai az interneten megtalálhatók (<u>www.videometeor.hu</u>, 2021-04-15).

#### 3.1 Detektált meteorok száma a DSLR-kamerákkal

Az új fejlesztésű DSLR-kamerarendszer egyik legfontosabb jellemzője az érzékenysége, ami legkönnyebben a detektált meteorok napi számával jellemezhető. A 2. ábra mutatja a vizsgált 11 hónap során az összes DSLR-kamera által detektált meteorok számát napi bontásban (a jobb láthatóság kedvéért a függőleges tengelyen logaritmikus skálázást alkalmaztunk). Azok az esetek, amikor több kamera is ugyanazt a meteort rögzítette (erre a detektálás idejének 1 s-on belüli egyezése utal a meteor vizuális megjelenésének hasonlósága mellett), csak egyszer szerepelnek az adatsorban. Sajnos a rendszer jelen állapotában fényességeket és égi koordinátákat (még) nem tud automatikusan rögzíteni, így csupán a detektálás ideje és a kamera pozícója áll rendelkezésre. A rendszer folyamatosan fejlesztés alatt áll, így remélhetőleg a jelenleg még hiányzó funkciók is hamarosan implementálva lesznek.

A 2. ábrán jól látható, hogy a legtöbb napon a detektált meteorok száma 1-2 körül van. Ez sok tényező együttes hatásának köszönhető. A kamerák általában csak napnyugta után képesek meteort detektálni (kivéve a legfényesebb tűzgömböket, amelyek azonban igen ritkák). A felhőkkel takart égbolt szintén megnehezíti a detektálást, bár nemegyszer előfordult, hogy a képen csillagok már nem látszottak a felhők miatt, a meteor viszont igen. Ezenkívül az éjszaka időben változó hossza szintén szerepet játszik, mivel a rövidebb nyári éjszakák alatt kevesebb meteort detektáltunk.



2. ábra: A DSLR-kamerákkal detektált meteorok száma napi bontásban 2019. december és 2020. október között

A 2. ábrán megjelenő két nagyobb csúcs ismert meteorrajoknak tulajdonítható. Az ábra elején látható csúcs, a 2019. december 14-én detektált nagyszámú meteor a Geminidák rajhoz tartozott, amely a legnagyobb aktivitású ismert meteorraj, a (3200) Phaethon nevű aktív aszteroidához kötődik. A másik csúcs a 2020. augusztus 11-12-én jelentkező Perseidák rajhoz kapcsolódott; sajnos ekkor az aktivitás maximuma nappalra esett, ezért a szokásosnál kevesebb meteort detektált a rendszer.

A 3. ábra a tűzgömbök relatív gyakoriságát mutatja a DSLR-kamerák képein, havi bontásban. Mivel a rendszer még nem szolgáltat mért fényességadatokat, a tűzgömböket vizuálisan azonosítottuk az egyes felvételeken. Tűzgömbnek minősítettünk minden olyan meteort, amely az összes képen látszó csillagnál fényesebb volt. Mivel a legfényesebb csillagok 0 és -1 magnitúdó közöttiek, ez a definíció kicsit eltér a tűzgömbök eredeti, m < -4 mag kritériumától. Azonban tapasztalatunk szerint a legtöbb szóban forgó meteor sokkal fényesebb volt, mint az adott képen látszó csillagok, tehát az ilyen módon tűzgömbnek minősített meteorok túlnyomó többsége valóban az lehetett. Megjegyezzük, hogy a fenti vizuális klasszifikáció semmiképpen nem tekinthető egzakt, valódi fotometrián alapuló, teljesen objektív mérésnek. Arra azonban jól használható, hogy becslést adjunk a legfényesebb objektumok gyakoriságára (tehát amikor pusztán a jelenség bekövetkezését rögzítjük), az emberi szem azon tulajdonságát kihasználva, amely alapján az eltérő fényességű objektumokat nagy biztonsággal képes észrevenni. Hasonló módszert régóta használnak amatőrcsillagászok a változócsillagok vizuális fényességmérésére. A kétes esetek minimalizálása érdekében konzervatív becslést alkalmaztunk: csak azokat a meteorokat választottuk tűzgömbnek, amelyeknél a meteornyom felületi fényessége egyértelműen nagyobb volt, mint a látómező legfényesebb csillagainak fényessége.

A 3. ábrából az a következtetés vonható le, hogy a DSLR-kamerák felvételein a tűzgömbök gyakorisága havi átlagban stabilan 40% körüli. A 2020. májusi adatokban megjelenő hirtelen csökkenés oka valószínűleg a kevés detektált meteor (mindössze 11). A teljes vizsgált időszakra vonatkozó átlagérték 0.379, a szórás 0.077 . Megállapítható, hogy a DSLR-kamerák felvételein havonta megjelenő meteorok kb. 35-45%-a tűzgömb, legalábbis a fenti, módosított definíció értelmében. Ezen eredményünk összhangban van a DSLR-rendszer kifejlesztésének céljaival, és megerősíti, hogy a mérőrendszer hatékonyan képes a legfényesebb tűzgömbök detektálására.



3. ábra: Tűzgömbök aránya a DSLR-kamerák adataiban 2019. december és 2020. augusztus között

#### 3.2 Video- és DSLR-kamerák detektálási küszöbének összehasonlítása

Mivel a teljes (analóg + digitális) mérőrendszerben a különböző típusú kamerák különböző beállításokkal, látómezőméretekkel, érzékenységgel és észlelési stratégiával működnek, ezért különbőző számú meteort fognak detektálni. A kétféle, video- és DSLR-kamerák által detektált meteorok számának összehasonlítása így fontos információkat szolgáltathat a rendszer működéséről.

A 4. ábrán a CSFK Konkoly Obszervatórium budapesti és piszkéstetői telephelyein működő kétféle kamerarendszer detektálási számainak összehasonlítása látható. Csak az azonos helyszínen lévő kamerák adatait vetettük össze, hogy az égbolt derültségével összefüggő tényezők ne befolyásolják az összehasonlítást. Mivel Piszkéstetőn a DSLR-rendszer 5 kamerája a teljes látszó égboltot lefedi, a budapesti egyetlen kamerával való összehasonlíthatóság érdekében a piszkéstetői DSLR-rendszer meteorszámait 1 kamerára normáltuk.



4.ábra: Video- és DSLR-kamerák detektálási arányainak összehasonlítása

Azonnal látható, hogy a várakozásnak megfelelően a kétféle rendszer nagyon eltérő számú meteort detektál: az analóg videokamera körülbelül egy nagyságrenddel több meteort észlel átlagosan egy hónapban, mint a DSLR-kamerarendszer. A 4. ábra bal oldali paneljén az figyelhető meg, hogy a két különböző helyszínen lévő videokamera (HUKON és HUPIS, kék görbék) körülbelül hasonló detektálási hatékonysággal bír; a HUKON adatokban május-júniusban bekövetkezett relatív csökkenést feltehetően a borultabb, csapadékosabb időjárásnak köszönhető lokális körülmények közti

13

különbségek eredményezték. Sajnos a HUPIS kamera vezérlő számítógépe egy elektromos zárlat (villámcsapás) következtében augusztusban meghibásodott, ezért csak júliusig szerepelnek az ebből származó adatok az ábrán. Szintén rendszerhiba következtében hiányoznak a HUKON kamera januári adatai. Hasonlóan jó egyezés figyelhető meg a két helyszínről származó DSLR-adatokban is (piros görbék).

A jobb oldali panelen az azonos telephelyen észlelt meteorszámok aránya van feltüntetve havi bontásban. Látható, hogy a kétféle helyszínen mért számarányok hasonló időbeli trendeket mutatnak. Megfigyelhető, hogy a DSLR-kamerák detektálási aránya a videokamerákhoz képest mindig 10% alatti. A budapesti telephelyen a digitális / analóg meteorszámok aránya 1-2% között ingadozik: az átlagérték 1.6%, 1%-os szórással. Eszerint az itt üzemelő DSLR-kamera a beállított kisebb érzékenységi küszöb miatt a videokamera által detektált meteorok mindössze 1-2%-át rögzíti. Ezzel teljesen összhangban vannak a piszkéstetői DSLR-kamerarendszer 1 kamerára normált detektálási arányai.

A detektálási arány hónapról-hónapra történő ingadozása a két helyszínen korrelál: a decemberben és áprilisban tapasztalt növekedés mindkét telephely adataiban egyaránt látszik. Ez arra utal, hogy valószínűleg nem véletlen fluktuáció okozza, hanem valódi effektus: feltehetően az adott időszakban a fényesebb meteorok aránya az összes detektált meteoron belül nagyobb volt, ezért a DSLR-kamerák relatíve nagyobb arányban érzékelték a fényes meteorokat. Sajnos a HUPIS kamera augusztusi meghibásodása miatt nem tudtuk ellenőrizni, hogy a korreláció az augusztus-októberi időszakban is fennállt-e.

#### 3.3 Meteorrajok

A 2. ábránál már volt szó arról, hogy a meteorrajok megjelenése jól megfigyelhető már akár a DSLRkamerák adataiban is. A decemberi Geminidák és az augusztusi Perseidák egyértelműen egy-egy jól látható kiugró csúcsot okoztak az aktuális meteorszámokban.

Az analóg videokamerákat vezérlő MetRec szoftver képes a trajektóriák automatikus meghatározására, így az irányok ismeretében becslést tud adni egy-egy detektált meteor valószínű rajtagságára: amennyiben a detektált meteor pályája a szezonálisan aktuális meteorraj radiánsa felé mutat, a szoftver rajmeteornak azonosítja, sőt, még az adott rajhoz is besorolja (természetesen ez csak statisztikailag ad többé-kevésbé helyes klasszifikációt, hiszen kis valószínűséggel sporadikus meteor is érkezhet a radiáns irányából). Ezt kihasználva, a HUPIS és HUKON kamerák adataiban megvizsgáltuk és összehasonlítottuk a rajmeteorok és sporadikus meteorok számát havi bontásban. Annak érdekében, hogy a havonta változó észlelési időtartamok (amelyeket a derültség és az éjszaka változó hossza egyaránt befolyásol) ne torzítsák a becsléseket, a havonta észlelt meteorszámokat leosztottuk az adott hónapban történt mérések időtartamával, így havi átlagos meteorszám/óra értékeket kaptunk.

Eredményeinket az 5. ábra mutatja, ahol a konkrét számok az egyes kamerák látómezejében történt detektálásokra vonatkoznak. Szembetűnő, hogy a sporadikus meteorok óránkénti száma havi átlagban általában felülmúlja a rajmeteorok óránkénti számát. Ez a meteorrajok idején (a mi adatainkban december és augusztus) változik, amikor látható módon a rajmeteorok óránkénti száma valamivel a sporadikus szint fölé kerül. Fontos megjegyezni, hogy mivel itt havi átlagok szerepelnek, a meteorrajok aktivitás-maximuma viszont általában kevesebb, mint egy napig tart, a rajmeteorok száma nem lesz sokkal magasabb az egész hónapban körülbelül állandó értéket mutató sporadikus szinttől. Lényeges eltérést csak a napi bontású meteorszámokban tapasztalnánk, viszont az erre vonatkozó vizsgálat jelenleg még folyamatban van.

A hosszabb időszakot átfogó HÚKON kamera adatai alapján a detektált sporadikus meteorok óránkénti átlagos száma **a** kamera látómezejében 2,61  $\pm$  0,84 meteor/óra a teljes 11 hónap hosszúságú adatsorra. Mivel a látómező az égbolt látszó félgömbjének 23%-a (1. táblázat), így a teljes látszó égboltra vonatkozó sporadikus meteorráta átlagosan 11.34  $\pm$  3.65 meteor/óra. Ez hibahatáron belül megegyezik Dubietis és Arlt (2010) eredményével (9.83  $\pm$  1.52), akik egy jóval nagyobb mintából vizsgálták a sporadikus aktivitást 1984-2006 között. Hasonló kutatást mi is tervezünk a későbbiekben, amint több adat áll majd rendelkezésünkre.



5.ábra: Sporadikus (szaggatott vonal) és rajmeteorok (folytonos vonal) óránkénti száma a vizsgált időszakban

#### 4 Összefoglalás

A CSFK "Kozmikus Hatások és Kockázatok" című GINOP projektjében az országos meteorkamerarendszer modernizálása és bővítése valósult meg 2017 és 2020 között. Tanulmányunkban bemutattuk a digitális kamerákkal kibővített új rendszer állomásait, valamint a 2019. december 1 - 2020. október 31. között született mérési adatokból leszűrhető első következtetéseket. Megállapítottuk, hogy a DSLR-kamerákból álló új rendszer képes a meteorrajok idején nagyobb számban jelentkező fényes meteorokat detektálni. Ezen meteorokon belül a tűzgömbök gyakoriságára átlagosan  $40 \pm 5\%$ -os értéket kaptunk, a detektált sporadikus meteorok óránkénti átlagos számát pedig 11.34  $\pm$  3.65 meteor/óra értékűnek mértük. Az adathalmaz folyamatosan bővül, ezek további vizsgálata még tart, így hamarosan újabb érdekes eredmények várhatók.

Köszönetnyilvánítás. Munkánkat a "Kozmikus Hatások és Kockázatok" című, GINOP 2.3.2-15-2016-00003 számú pályázat támogatta.

#### Hivatkozások

Bartha L, Tepliczky I (1992): Konkoly Thege Miklós emlékezete. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest. 31.

- Csizmadia Sz (2004): Meteorcsillagászat. In: Mizser A., Szabados L., Taracsák G. (szerk.) Meteor Csillagászati Évkönyv 2004, 249-273.
- Dubietis A, Arlt R (2010): Periodic Variability of Visual Sporadic Meteor Rates. Earth, Moon, Planets 106, 105-111.

Hegedüs T (1989a): A meteorok fizikája I, Meteor, 1989(2), 34-36.

Hegedüs T (1989b): A meteorok fizikája II, Meteor, 1989(3) 33-34.

Howie RM, Paxman J, Bland PA, Towner MC, Sansom EK, Devillepoix AR (2017): Submillisecond fireball timing using de Bruijn timecodes, Meteoritics & Planetary Science 52(8), 1669-1682.

Nagy H (2018): Meteorok tömegének meghatározása videometeoros megfigyelések elemzésével. Fizika alapképzés szakdolgozat, Szegedi Tudományegyetem, 54.

Tepliczky I (1994): Meteorészlelések. Meteor, 1994(6), 36-39.

# IONOSZFÉRA MODELLEZÉSE GAUSS-FOLYAMAT REGRESSZIÓVAL

### Lupsic Balázs\*, Takács Bence\*

**Modelling the ionosphere using Gauss process regression** – The number of devices equipped with global satellite positioning has exceeded seven billion recently. There are wide variety of units regarding their accuracy and reliability; however, the number of single frequency receivers providing lower accuracy are still significant. Since their measurements are considerably influenced by ionospheric delay, adequate ionosphere models as well as maps are of utmost importance to reduce the effect. This paper summarises how Gauss process regression can be applied to derive ionosphere maps using raw measurements of satellites in real time. Gauss process is widely used in machine learning; hence the established methods can contribute to develop high quality ionosphere models. One of the major advantages of Gauss process regression against classical methods is the capacity to handle not normally distributed noises as well.

Keywords: satellite positioning, GNSS, ionosphere, model, Gauss-process regression

A globális helymeghatározásra képes készülékek száma 2019-ben elérte a 7 milliárdot. A termékek a pontosság és a robusztusság tekintetében széles skálán mozognak, de az alacsonyabb pontosságú egyfrekvenciás vevők aránya még mindig igen jelentős. Mivel ezek a készülékek méréseit fokozottan terheli az ionoszféra jelkésleltető hatása, ezért a hatás csökkentése érdekében különböző ionoszféra modelleket, illetve térképeket használnak. A cikk bemutatja, hogy Gauss-folyamat regresszió segítségével, hogyan lehet ionoszféra térképet valós időben, műholdakra végzett távolságmérések alapján előállítani. A Gauss-folyamat széles körben elterjedt a gépi tanulás területén, így az ott bevált módszereket felhasználva jó minőségű ionoszféra térképek készíthetők. A Gauss-folyamat regresszió további nagy előnye a klasszikus megoldásokkal szemben, hogy képes nem normál eloszlású zajt is kezelni.

Kulcsszavak: műholdas helymeghatározás, GNSS, ionoszféra modell, Gauss-folyamat, regresszió

#### 1 Bevezetés

Ismert, hogy a GNSS-műholdakra (*Global Navigation Satellite System*) végzett távolságméréseket terhelő egyik legjelentősebb szabályos hibát a Föld külső légkörének, az ionoszférának a jelkésleltető hatása okozza. A hatás többfrekvencián végzett mérések megfelelő lineáris kombinációjával csaknem teljes mértékben kiküszöbölhető. Egyfrekvencián végzett mérések esetén a hatást modellek alapján vesszük figyelembe. Legegyszerűbb modell a Klobuchar-modell, amelynek paramétereit maguk a műholdak sugározzák. Sajnos a Klobuchar-modell átlagosan a késés mintegy 60-70%-át képes leírni (Ádám et al. 2004). Az európai Galileo műholdas navigációs rendszerben már valamivel összetetteb és pontosabb modellt, a Nequick-modell thasználnak. Permanens GNSS állomások mérései alapján, utófeldolgozással jóval pontosabb globális és regionális modellek vezethetők le (Schaer et al. 1999). A modellek tulajdonképpen az ionoszféra teljes elektrontartalmát írják le a hely és az idő függvényében. A klasszikus megoldás során ehhez gömbfüggvényeket alkalmaznak. Cikkünkben ezen a területen egy újszerűnek tekinthető módszert, a Gauss-folyamat regressziót (*Gauss Process Regression* - GPR) használjuk, amely a gépi tanulás területén mára széles körben elterjedt. Meg kell jegyezzük, hogy a geostatisztikában népszerűségnek örvendő krigelés és az általunk használt GPR matematikai alapjai azonosak (Stein 1999).

A számítástechnika fejlődésnek köszönhetően a feldolgozás ma már lényegesen gyorsabban is elvégezhető, melynek eredményeként lokális, regionális és globális modellek közel valós időben szolgáltathatók (Anghel et al. 2009 vagy Bergeot et al. 2014, Hernandez-Pajares et al. 2008).



Az élet és vagyonbiztonság szempontjából kritikus alkalmazások területén a pontosság mellett a megbízhatóságnak is szigorú követelményei vannak, amelyek rendszerint valamilyen kiegészítő rendszerek alkalmazásával teljesíthetők. Az európai kontinens területén az EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) rendszer biztosítja ehhez valós időben a megfelelő korrekciókat (Takács et al. 2017), amelyeket az úgynevezett RIMS-állomások (*Ranging and Integrity Monitoring Stations*) méréseiből vezetnek le. Az EGNOS korrekciókkal elérhető pontosságot és azon belül az ionoszféra modellt számos tanulmány vizsgálja (pl. Grunwald et al. 2018).

Kutatásaink során tehát egy új, Gauss-folyamat regresszión alapuló módszert dolgoztunk ki, RIMS-állomások mérései alapján vezetünk le az európai kontinens területére érvényes, valós idejű, pontos és megbízható ionoszféra modelleket.

#### 2 Gauss-folyamat regresszió

Egy f függvény Gauss-folyamat (*Gauss Process* - GP), amennyiben bármely tetszőlegesen kiválasztott  $\mathbf{f} = (f(\mathbf{x}_1), ..., f(\mathbf{x}_n))$  eleme többváltozós Gauss-eloszlást követ, ahol  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 ... \mathbf{x}_n, \in \mathbb{R}^m$ . A Gauss-folyamatot meghatározza az  $m(\mathbf{x})$  átlagfüggvény és a  $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  kovariancia függvény. A Gauss-folyamat regresszió egy nemparaméteres kernel függvény alapú valószínűségi modell, amely a Gauss-folyamaton alapul (Rasmussen et al. 2006).

A regresszió során egy tanító minta alapján meghatározzuk a Gauss-folyamat paramétereit úgy, hogy egy feltételes eloszlás segítségével tetszőleges új bemeneti mintára már kiszámítható legyen a vizsgált függvény értéke. Ehhez vegyünk egy n elemű és d dimenziójú bemeneti mintát és a hozzájuk tartozó ismert függvény értékeket. A legegyszerűbb esetben az átlagfüggvényt vegyük nullának és az f értékeket hiba mentesnek. A k(x, x') kovariancia függvényt a  $\theta$  hiperparaméterek vagy másnéven kernel paraméterek írják le. Vizsgálataink során a geostatisztika és a gépi tanulás területén is népszerű stacionárius *Matern5/2* magfüggvényt használtuk, amely a következő alakú.

$$k(\boldsymbol{x}_{i}, \boldsymbol{x}_{j}) = \sigma_{f}^{2} \left( 1 + \frac{\sqrt{5}r}{\sigma_{l}} + \frac{5r^{2}}{3\sigma_{l}^{2}} \right) exp\left( -\frac{\sqrt{5}r}{\sigma_{l}} \right) , \qquad (1)$$

ahol *r* az eukledészi távolság az  $x_i$  és  $x_j$  pontok között. A  $\theta = (\sigma_f, \sigma_l)$  hiperparamétereket a *Matern5/2* kernel esetében a  $\sigma_f$  és  $\sigma_l$  paraméterek adják meg. A magfüggvény stacionaritása azt jelenti, hogy a pontok közötti kovariancia csak a pontok távolságából adódik, és független a pontok térbeli helyétől. Későbbi vizsgálatok tárgyát képezheti az egyéb magfüggvények illetve a nem stacionárius és periodikus magfüggvényekkel való kombináció hatása a cikkben bemutatott ionoszféra modell minőségére.

Amennyiben új  $\mathbf{X}' = (\mathbf{x}'_1, \dots, \mathbf{x}'_m) m$  darab tesztértékhez szeretnénk becsülni az ismeretlen  $f' \in \mathbb{R}^m$  értékeket, szükségünk lesz a  $K_{XX'}, K_{X'X}$  és  $K_{X'X'}$  kovariancia mátrixokra, melynek elemeit a fenti kovariancia függvény alapján számíthatjuk a tanító minta  $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_n)$  és az új bemeneti minta  $\mathbf{X}' = (\mathbf{x}'_1 \dots \mathbf{x}'_m)$  alapján:

$$\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{X}\boldsymbol{X}'} \equiv \boldsymbol{K}(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}') = \begin{pmatrix} \mathrm{k}(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_1') & \dots & \mathrm{k}(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_m') \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathrm{k}(\boldsymbol{x}_n, \boldsymbol{x}_1') & \dots & \mathrm{k}(\boldsymbol{x}_n, \boldsymbol{x}_m') \end{pmatrix} \in R^{n \times m},$$
(2a)

$$\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{X}\boldsymbol{X}} \equiv \boldsymbol{K}(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}) = \begin{pmatrix} \mathbf{k}(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_1) & \dots & \mathbf{k}(\boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{x}_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{k}(\boldsymbol{x}_n, \boldsymbol{x}_1) & \dots & \mathbf{k}(\boldsymbol{x}_n, \boldsymbol{x}_n) \end{pmatrix} \in R^{n \times n},$$
(2b)

$$\boldsymbol{K}_{\boldsymbol{X}'\boldsymbol{X}'} \equiv \boldsymbol{K}(\boldsymbol{X}',\boldsymbol{X}') = \begin{pmatrix} \mathbf{k}(\boldsymbol{x}_1',\boldsymbol{x}_1') & \dots & \mathbf{k}(\boldsymbol{x}_1',\boldsymbol{x}_m') \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{k}(\boldsymbol{x}_m',\boldsymbol{x}_1') & \dots & \mathbf{k}(\boldsymbol{x}_m',\boldsymbol{x}_m') \end{pmatrix} \in R^{m \times m} .$$
(2c)

A többváltozós Gauss-eloszlás tulajdonságait felhasználva becsülhetjük az  $f' = (f(x'_1), ..., f(x'_m))$  feltételes valószínűségét a következő képlettel:

$$P(f'|X', X, f, \theta) = \mathcal{N}(K_{X'X}K_{XX}^{-1}f, K_{X'X'} - K_{X'X}K_{XX}^{-1}K_{XX'})$$
(3)

Ezt *prediktív eloszlásnak* is nevezik, és megadja az új bemeneti adatokhoz tartozó eloszlást. Az ismeretlen függvényértékeket megkaphatjuk, ha vesszük a prediktív eloszlás várható értékét. Az új értékek kovarianciája természetes módon adódik.

A gyakorlatban a függvényértékeket nem lehet közvetlenül megfigyelni, mivel hibával terheltek. A mérési egyenlet az alábbi alakot veszi fel:

$$y_i = f(\boldsymbol{x}_i) + \epsilon_i, i = 1, \dots, n \quad (4)$$

ahol  $\epsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ . A megfígyeléseket terhelő hibát egybe lehet vonni a kernel függvénnyel, ha a bemeneti adatokból képzett  $K_{X'X'}$  kovariancia mátrix főátlójában szereplő elemekhez hozzáadjuk a  $\sigma^2$  értéket:

$$cov(y) \coloneqq K_y = K_{XX} + \sigma^2 I$$
, (5)

ahol I az egységmátrix. Az új X' bemeneti adatokhoz tartozó y' függvényérték prediktív eloszlása hasonló alakot vesz fel:

$$P(\mathbf{y}'|\mathbf{X}',\mathbf{X},\mathbf{y},\boldsymbol{\theta}) = \mathcal{N}\left(\mathbf{K}_{\mathbf{X}'\mathbf{X}}\mathbf{K}_{\mathbf{y}}^{-1}\mathbf{y},\mathbf{K}_{\mathbf{X}'\mathbf{X}'} - \mathbf{K}_{\mathbf{X}'\mathbf{X}}\mathbf{K}_{\mathbf{y}}^{-1}\mathbf{K}_{\mathbf{X}\mathbf{X}'}\right)$$
(6)

Az új alakban a  $\boldsymbol{\theta}$  hiperparaméter a magfüggvény paraméterei mellett a  $\sigma$  megfigyelési szórást is magában foglalja, azaz a *Matern5/2* esetén,  $\boldsymbol{\theta} = (\sigma_f, \sigma_l, \sigma)$ .

#### 3 Ionoszféra modellezés GNSS mérésekből

Az ionoszférikus késés egyenesen arányos az ún. teljes elektrontartalommal (*Total Electron Content*, TEC):

$$I = \frac{40.3}{f^2} \cdot \text{TEC} \quad , \tag{7}$$

ahol *I* az ionoszférikus késés és az *f* ebben a fejezetben a vivőjel frekvenciáját jelöli. Továbbá a TEC a teljes elektrontartalom, azaz a vevő-műhold irányában elképzelt és a teljes ionoszférán átmenő 1 m<sup>2</sup> keresztmetszetű hengerben található szabad elektronok száma. A könnyebb kezelhetőség kedvéért a TEC értéket  $10^{16}$  egységben (TEC Unit, TECU) szokás megadni. Megjegyezzük, hogy 1 TECU 0.163 m távolsághibát okoz az L1 vivőjelen.

Az ionoszféra a GNSS-jelek szempontjából diszperzív közeg, azaz az ionoszféra jelkésleltető hatása frekvenciafüggő. Ezt a tulajdonságot kihasználva több frekvencián végzett mérések megfelelő lineáris kombinációjával a hatás csaknem teljes mértékben kiküszöbölhető, de meg is határozható (Ádám et al. 2004). Ehhez a geometria hatásától mentes, ún.  $L_4$  lineáris kombinációt használjuk:

$$L_4 = L_1 - L_2 \ , \tag{8}$$

$$P_4 = P_1 - P_2 \ , \tag{9}$$

ahol  $L_1, L_2$ illetve,  $P_1, P_2$  az L1 és L2 frekvencián végzett fázis és kódmérés. A geometriai hatásától mentes lineáris kombináció tartalmazza az ionoszféra hatását, a vevőben és a műholdban fellépő hardver késéseket, a többutas terjedés hatását, a mérési zajt, valamint fázismérések esetén a ciklustöbbértelműséget.

Ismert, hogy a kódmérés meglehetősen zajos a fázisméréshez képest, ugyanakkor a fázismérés a ciklustöbbértelműség miatt nem egyértelmű. Folytonos fázismérés esetén a ciklustöbbértelműség értéke állandó és a kódmérések alapján jól becsülhető, ha a kódméréseket fázismérésekkel simítjuk (1. ábra).



 ábra. Geometria hatásától mentes lineáris kombináció az eredeti fázis- és kódmérés, valamint a fázismérésekkel simított kódmérések alapján

A fenti egyenleteket átrendezve, a gyakorlat számára megengedhető elhanyagolásokkal kapjuk a következő összefüggéseket:

$$\tilde{L}_4 = \alpha_f T E \mathcal{C} + b_r + b^s + \epsilon_{L4} \quad , \tag{10}$$

ahol  $\tilde{L}_4$  a kódmérések fázismérésekkel simított értéke,  $\alpha_f = 1 - \frac{f_2^2}{f_1^2}$ ,  $b_r$  és  $b^s$ a vevőben és a műholdban fellépő hardver késés, valamint  $\epsilon_{L4}$ .a mérési zaj, illetve többutas terjedés együttes hatása.

A teljes elektrontartalom modellezése során feltételezzük, hogy az ionoszféra összes szabad elektronja egyetlen gömbhéjon sűrűsödik össze, melynek felszín feletti magasságát H = 350 km-500 km magasságban szokás felvenni. Mivel a fenti képletek az elektrontartalmat a vevő-műhold, azaz ferde irányban tartalmazzák, a ferdeségi szorzó segítségével át kell térnünk a függőleges elektrontartalomra (*Vertical Total Electron Content*, VTEC):

$$VTEC = \frac{1}{\sin E_B} TEC \quad , \tag{11}$$

ahol  $E_B$  a műhold magassági szöge az ún. ionoszférikus pontban (*Ionospheric Pierce Point*, IPP), amely a vevőt és a műholdat összekötő egyenes, illetve az ionoszféra összes szabad elektronját képzeletben tartalmazó végtelen kis vastagságú réteg metszéspontja (Klobuchar 1987). Az ionoszférikus pontban és a vevőnél értelmezett magassági szög ( $E_A$ ) összefüggése a következő:

$$\cos E_B = \frac{R}{R+H} \cos E_A \quad , \tag{12}$$

ahol R a Föld átlagos sugara.

Az ionoszféra modelleket permanens állomások méréseiből vezetjük le. A mérési időpontokban (epochában), minden állomásról minden mért műholdra a fenti képletek segítségével kiszámítjuk a függőleges elektrontartalom értékét az ionoszférikus pontban. A modellezéssel valamilyen idő és térbeli felbontásban illesztünk felületeket az ionoszférikus pontokban számított függőleges elektrontartalom értékekre. Az illesztéshez használhatók polinomok, gömbfüggvények vagy B-spline függvények. A felületeket gyakran térkép formájában mutatják be, a térképek színezése arányos az elektrontartalommal. A gyakorlatban nehézséget jelent a hardver késések becslése, illetve a ciklustöbbértelműség feloldása. Ennek részleteire most nem térünk ki, de megtalálhatók a szakirodalomban (Krypiak-Gregorczyk et al. 2018)

#### 4 Teljes elektrontartalom térkép létrehozása Gauss-folyamat regresszióval

A GPR bemeneti adatsora a permanens állomások méréseiből, az ionoszférikus pontokban számított függőleges elektrontartalom értékek lesznek. A kétdimenziós x vektor tartalmazza az ionoszférikus pontok földrajzi koordinátáit, az ismert függvényértékek a kétfrekvencián végzett kód és fázismérésekből levezetett függőleges elektrontartalom értékek lesznek. Az új bemeneti adatsor egy szabályos rácshálót kifeszítő pontok halmaza lesz, ezekben keressük a teljes elektrontartalom becsült értékét.

Ha a problémát Gauss-folyamat regresszióval akarjuk megoldani, akkor az alábbi modellből indulunk ki:

$$y = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})^T \boldsymbol{\beta} + f(\boldsymbol{x}) \quad , \tag{13}$$

ahol  $f(\mathbf{x})$  egy nulla átlagú és  $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$  kovariancia függvénnyel rendelkező Gauss-folyamat. A  $h(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^p$  bázisfüggvény az eredeti  $\mathbf{x}$  vektort a bemeneti térből, az  $\mathbb{R}^p$  jellemző térbe képezi le. A p számú elemet tartalmazó  $\boldsymbol{\beta}$ , a bázis vektor koefficienseit tartalmazza. A GPR modell válaszfüggvénye egy adott  $(y_i, \mathbf{x}_i)$  esetén a következő lesz:

$$P(y_i|f(\boldsymbol{x}_i),\boldsymbol{x}_i) \sim \mathcal{N}(y_i|\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_i)^T\boldsymbol{\beta} + f(\boldsymbol{x}_i),\sigma^2) \quad .$$
(14)

A GPR nemparaméteres természete, abban nyilvánul meg, hogy minden egyes bemeneti  $x_i$  paraméterhez hozzá rendel egy  $f(x_i)$  látens változót. A vektoros formája a modellnek a következő:

$$P(\mathbf{y}|\mathbf{f}, \mathbf{X}) \sim \mathcal{N}(\mathbf{y}|\mathbf{H}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{f}, \sigma^2 \mathbf{I}) , \qquad (15)$$

ahol

$$\boldsymbol{X} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{x}_1^T \\ \boldsymbol{x}_2^T \\ \vdots \\ \boldsymbol{x}_n^T \end{pmatrix}, \boldsymbol{y} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{y}_1 \\ \boldsymbol{y}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{y}_n \end{pmatrix}, \boldsymbol{H} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_1^T) \\ \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_2^T) \\ \vdots \\ \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_n^T) \end{pmatrix}, \boldsymbol{f} = \begin{pmatrix} f(\boldsymbol{x}_1) \\ f(\boldsymbol{x}_2) \\ \vdots \\ f(\boldsymbol{x}_n) \end{pmatrix} .$$
(16)

A **H** bázis mátrix dimenziója  $n \times p$ , ahol n a mérések száma, egyben a tréning adat hossza és p a jellemzőtér dimenziója. A legegyszerűbb esetekben a **H** bázis mátrix állhat konstans, lineáris és kvadratikus bázisfüggvényekből. Esetünkben a bemeneti adatsor  $x_i^T = (\varphi_i, \lambda_i)$  az ionoszférikus pontok koordinátáit tartalmazza. A **H** bázis mátrix lineáris bázisfüggvények esetén a következő lesz:

$$\boldsymbol{H} = [\boldsymbol{1}, \boldsymbol{X}] = \begin{pmatrix} 1 & \varphi_1 & \lambda_1 \\ 1 & \varphi_2 & \lambda_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \varphi_n & \lambda_n \end{pmatrix} .$$
(17)

Kvadratikus alakban pedig:

$$\boldsymbol{H} = [\mathbf{1}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}^2] = \begin{pmatrix} 1 & \varphi_1 & \lambda_1 & \varphi_1^2 & \lambda_1^2 \\ 1 & \varphi_2 & \lambda_2 & \varphi_2^2 & \lambda_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \varphi_n & \lambda_n & \varphi_n^2 & \lambda_n^2 \end{pmatrix} .$$
(18)

A cikkben tárgyalt eredmények konstans bázis függvénnyel készültek. Lineáris és polinomos bázisfüggvények használata is indokolt lehet, de az előzetes eredmények alapján a legegyszerűbb konstans esetnél maradtunk, mivel nem tapasztaltunk érdemi különbséget a végeredményben a vizsgált mérési adatsor esetén. Ebben az esetben **H**, egy *n* dimenziójú, egyesekből álló vektorrá redukálódik.

A (13) egyenletben található f látens változónak definíció szerint együttes eloszlása van az alábbi alakkal:

$$P(\boldsymbol{f}|\boldsymbol{X}) \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{f}|\boldsymbol{0}, \boldsymbol{K}_{\boldsymbol{X}\boldsymbol{X}}) \quad . \tag{19}$$

Ahhoz, hogy az ionoszféra térképet elő lehessen állítani, először meg kell határozni a  $\beta$  bázis együtthatókat,  $\theta$  kernel hiperparamétereket és  $\sigma^2$  varianciát, a megadott (X, y) tanító adatokból. Ehhez az alábbi (a szakirodalomban loglikehoodnak nevezett) függvény maximum értékét keressük:

$$\log P(\boldsymbol{y}|\boldsymbol{X},\boldsymbol{\beta},\boldsymbol{\theta},\sigma^2) = -\frac{1}{2}(\boldsymbol{y}-\boldsymbol{H}\boldsymbol{\beta})^T \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{y}-\boldsymbol{H}\boldsymbol{\beta}) - \frac{n}{2}\log 2\pi - \frac{1}{2}\log|\boldsymbol{M}| \quad ,$$
(20)

ahol

$$\boldsymbol{M} = K(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X} | \boldsymbol{\theta}) + \sigma^2 \boldsymbol{I}_n \quad . \tag{21}$$

Először adjunk becslést a  $\boldsymbol{\beta}$  koefficiens vektorra adott  $\boldsymbol{\theta}, \sigma^2$  esetén:

$$\widehat{\boldsymbol{\beta}}(\boldsymbol{\theta},\sigma^2) = [\boldsymbol{H}^T \boldsymbol{M}^{-1} \boldsymbol{H}]^{-1} \boldsymbol{H}^T \boldsymbol{M}^{-1} \boldsymbol{y} \ . \tag{22}$$

A kapott  $\hat{\beta}(\theta, \sigma^2)$  alakot behelyettesítve a (20) egyenletbe, az alábbi alakhoz jutunk:

$$\log P(\mathbf{y}|\mathbf{X}, \widehat{\boldsymbol{\beta}}(\boldsymbol{\theta}, \sigma^2), \boldsymbol{\theta}, \sigma^2) = -\frac{1}{2} \left( \mathbf{y} - \mathbf{H} \widehat{\boldsymbol{\beta}}(\boldsymbol{\theta}, \sigma^2) \right)^T \mathbf{M}^{-1} \left( \mathbf{y} - \mathbf{H} \widehat{\boldsymbol{\beta}}(\boldsymbol{\theta}, \sigma^2) \right) - \frac{n}{2} \log 2\pi - \frac{1}{2} \log |\mathbf{M}|.$$
(23)

Ezután meghatározzuk a fenti egyenletet maximum értékét, majd a kapott  $\theta$ ,  $\sigma^2$  értékeket visszahelyettesítjük (22) egyenletbe, hogy a  $\beta$  koefficiens értékét is megkapjuk.

Az utolsó lépésben már megalkothatjuk az ionoszféra térképet. Az új  $X' = (x'_1, x'_2, ..., x'_n)$  bemenet azoknak a rácspontoknak a koordinátáit tartalmazza, amelyekre ki akarjuk számolni a  $y_g \sim VTEC$  értékeket. A megfigyelési zaj nélküli becslés a következő alakot veszi fel:

$$P(\mathbf{y}_g | \mathbf{y}, \mathbf{X}, \mathbf{X}') \sim \mathcal{N}(\mathbf{y}_g | \mathbf{H}_{\mathbf{X}'} \boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) \quad , \tag{24}$$

ahol

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{K}(\boldsymbol{X}', \boldsymbol{X})(\boldsymbol{K}(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}) + \sigma^2 \boldsymbol{I}_n)^{-1}(\boldsymbol{y} - \boldsymbol{H}\boldsymbol{\beta})$$
(25)

$$\Sigma = K(X', X') - K(X', X)(K(X, X) + \sigma^2 \mathbf{I}_n)^{-1} K(X, X') \quad .$$
(26)

Végül a (24) egyenletből meghatározható a  $y_g \sim VTEC$  várható értéke és szórásnégyzete, amely az alábbi képletekből számolható:

$$E(\mathbf{y}_g|\mathbf{y}, \mathbf{X}, \mathbf{X}', \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\theta}, \sigma^2) = H_{\mathbf{X}'}\boldsymbol{\beta} + K(\mathbf{X}', \mathbf{X}|\boldsymbol{\theta})((K(\mathbf{X}, \mathbf{X}) + \sigma^2 I_n)^{-1}(\mathbf{y} - H\boldsymbol{\beta}) , \quad (27)$$

$$Var(\mathbf{y}_g|\mathbf{y}, \mathbf{X}, \mathbf{X}', \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\theta}, \sigma^2) = \mathbf{K}(\mathbf{X}', \mathbf{X}') - \mathbf{K}(\mathbf{X}', \mathbf{X})(\mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}) + \sigma^2 \mathbf{I}_n)^{-1} \mathbf{K}(\mathbf{X}, \mathbf{X}') \quad .$$
(28)

#### 5 Eredmények

Vizsgálatainkhoz az EGNOS rendszer 38 RIMS állomásának NAVSTAR GPS-műholdakra végzett méréseit használtuk fel (2. ábra). Képeztük az L1 és L2 frekvencián végzett mérések geometria hatásától mentes L4 lineáris kombinációját, majd a kódméréseket fázismérési adatokkal simítottuk. A műholdak hardver késéseit a Nemzetközi GNSS Szolgálat (International GNSS Service, IGS) által közétett paraméterekből számítottuk, a vevők hardver késéseit (Yu et al. 2015) alapján, a szerzők közzétett programjával kaptuk meg. A hardver késések értékét egy napra vonatkozóan állandónak tekintettük.

Egy-egy epochában jellemzően néhány száz adatból vezettük le az ionoszféra térképeket Gaussfolyamat regresszióval, a többi mérési időpontban kapott adatoktól és térképektől függetlenül. Ennek megvalósítását a szerzők egy saját készítésű Pythonban írt program segítségével oldották meg, külön kiemelve a nyílt forráskódú *GPflow* könyvtárat (G de G Matthews et al. 2017). Így térképeink valós időben írják le az ionoszféra állapotát, jóllehet a szakirodalomban eddig közölt ionoszféra térképek döntő többségét hosszabb-rövidebb időtartam alatt gyűjtött adatok együttes kiértékeléséből vezetik le.

Ionoszféra térképeinket összevetettük a szakirodalomban sokat hivatkozott és referenciának is tekinthető ionoszféra térképekkel. Ehhez egyrész Belga Királyi Obszervatórium (*Royal Obervatory* of Belgium, ROB), másrészt a Berni Műszaki Egyetemen működő CODE (*Center for Orbit* Determination) feldolgozó központ ionoszféra térképeit használtuk fel. A ROB modelljeit több, mint 200 permanens állomásból álló hálózat méréseiből állítják elő 15 perces időbeli és 0.5 fokos térbeli felbontásban, mintegy ±1 TECU pontossággal Európa területére (Bergeot et al. 2014). A CODE globális ionoszféra modelljeit nagyjából 200 permanens állomás méréseiből vezetik le, 2 órás időbeli felbontásban. Közölnek utófeldolgozással, mintegy egy hetes késéssel levezetett ±1 TECU pontos térképeket, illetve közel valós idejű és előre jelzett térképeket is.



2. ábra. Vizsgálatainkhoz felhasznált 38 RIMS állomás elhelyezkedése

Ionoszféra térképeinkből levezettük a ROB modelljében szereplő rácsot és a rácspontokban kivonva a GPR és ROB modellek értékeit kapjuk az eltéréseket. A cikkben a RIMS állomások 2020. január 23-án rögzített méréseivel dolgoztunk, GPR bemeneti adatsora több mint 20 000 adatot tartalmaz. A főbb statisztikai jellemzők alapján a GPR-rel levezetett modell nem éri el a ROB és a CODE modellek pontosságát, de azt jól megközelíti (1. táblázat).

Az eredmények értelmezéséhez bemutatjuk a rácspontokban kapott eltérések átlagát (3. ábra) és az eltérések szórását (4. ábra). A vizsgált terület nagy részén az átlagos eltérés 1 TECU, tehát a GPR modell kellően pontos. Valamivel nagyobb eltérések figyelhetők meg a Földközi-tenger térségében, illetve Észak-Afrika területén. Ezeken a területeken a referencia modelltől való eltérés jól érzékelhetően pozitív előjelű, azaz a GPR rendre alul becsüli az ionoszférikus késést. Ennek több oka is lehet, egyrészt a déli területeken jellemzően aktívabb az ionoszféra, másrészt a permanens állomások ritkábban helyezkednek el. A rácspontokban az eltérések szórása 0.4 és 1.1 TECU között van. A már tárgyalt Földközi-tenger térségében, illetve Észak-Afrika területén, ahol a legerőteljesebb a GPR eltérése a ROB modelltől, jellemzően az eltérések szórása is megemelkedik.

A hatás jól látható, ha néhány rácspontban ábrázoljuk egy-egy rácspontban a modellekből vett függőleges teljes elektrontartalom időbeli változását a vizsgált nap során (5. ábra).

1. táblázat. GPR-rel kapott és a ROB, valamint a CODE és ROB ionoszféra térképek eltéréseinek statisztikai jellemzői a 2020.01.23-ai vizsgált nap összes rácspontjában vett különbségek átlaga, azok szórása, és a nap során rácspontok összeségét tekintve előforduló maximális és minimális eltérés. A ROB-GPR esetén ez 11 × 17, míg a ROB-CODE 11 × 8 rácspontot jelent. Az adatok TECU-ban értendők

|         | ROB-GPR | ROB-CODE  |
|---------|---------|-----------|
| átlag   | +0.2    | -0.2      |
| szórás  | ±1.3    | $\pm 0.7$ |
| maximum | +4.2    | +1.8      |
| minimum | -3.1    | -3.0      |



3. ábra. A GPR és ROB modellből származtatott rácspontokban vett teljes elektrontartalom különbségek a napi átlaga



4. ábra. A GPR és ROB modellből származtatott rácspontokban vett teljes elektrontartalom különbségek a napi szórása



5. ábra. Négy rácspontban az egyes modellekből kapott függőleges elektrontartalom napi változása

Kiválasztottuk azokat a rácspontokat, ahol a GPR modell leginkább felül becsülte a ROB modellt (5a, b ábra). Továbbá kiemeltünk egy-egy olyan rácspontot (5c és 5d ábra), ahol a napi átlagos eltérés 0.5 TECU alatt van. Megállapítható, hogy a napi változás karakterisztikáját a GPR modell minden esetben elvárható mértékben leköveti.

A kivágó pontok szemléltetéséhez kétdimenziós hisztogram segítségével ábrázoltuk az egyes mérési pontokban a GPR, illetve CODE modell abszolút eltérését a ROB modelltől (6. ábra). Látható, hogy a GPR modellel előállított ionoszféra modellek eltérése összhangban van a CODE modellből származó eltérésekkel alacsony elektron tartalom esetén. Magasabb elektron tartalom esetén a kivágó pontok gyakorisága és eltérése is nő valamelyest, esetenként eléri a 4 TECU értéket is. Ezek az eltérések a Földközi-tengeri és Észak-Afrikai területeken jelentkeznek.



6. ábra. GPR és ROB, illetve a ROB és a CODE modellek alapján előállított függőleges elektrontartalom abszolút eltéréseinek a ROB modellhez viszonyított 2D hisztogramjai

#### 6 Összefoglalás

A cikkben bemutatott Gauss-folyamat regresszió újszerű és ígéretes módszer az ionoszféra modellezésére. Előnye, hogy kevés számú permanens mérési állomás alapján is pontosan lehet a légkör elektrontartalmát becsülni. A szakirodalomban közölt ionoszféra modellek nagyjából ±1 TECU pontosságát lényegében az általunk kidolgozott algoritmussal is sikerült elérni, egyelőre 38 RIMS állomás egy napi méréseinek feldolgozása alapján.

A bemutatott algoritmusban a vevők és műholdak hardver késéseit ismertnek tekintettük, de lehetőség van ezeket is valós időben, az ionoszféra modellekkel egyidőben becsülni, például Kálmán szűréssel. Az általunk kidolgozott algoritmus egyelőre minden mérési időpontban a többi megfigyeléstől független eredményt ad. Amennyiben figyelembe vennénk a többi mérési időpontban kapott eredményeket is, akkor statisztikai próbák segítségével integritási paramétereket is a modellhez lehetne rendelni.

*Köszönetnyilvánítás.* A kutatás a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a TKP2020 pályázati program finanszírozásában, a BME IKP-VÍZ tématerület keretében valósult meg.

#### Hivatkozások

- Anghel A, Carrano C, Komjathy A, Astilean A, and Letia T (2009): Kalman filter-based algorithms for monitoring the ionosphere and plasmasphere with GPS in near-real time, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 71, 158–174, doi:10.1016/j.jastp.2008.10.006
- Ádám J, Bányai L, Borza T, Busics Gy, Kenyeres A, Krauter A, Takács B (2004): Műholdas helymeghatározás. Műegyetemi Kiadó, Budapest. 458.
- Bergeot N, Chevalier J-M, Bruyninx C, Pottiaux E, Aerts W, Baire Q, Legrand J, Defraigne P and Huang W (2014): Near real-time ionospheric monitoring over Europe at the Royal Observatory of Belgium using GNSS data. J. Space Weather Space Clim., 2014 (4) A31, doi: http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2014028
- G de G Matthews A, Mark van der W, Nickson T, Fujii K, Boukouvalas A, León-Villagrá P, Ghahramani Z, Hensma J (2017): GPflow: A Gaussian Process Library using TensorFlow. Journal of Machine Learning Research 18(40), 1–6.
- Grunwald G, Bakuła M, Ciećko A, Kaźmierczak R (2018): Examination of GPS/EGNOS integrity in north-eastern Poland. IET Radar, Sonar & Navigation. 10(1), 114-121. https://doi.org/10.1049/iet-rsn. 2015.0053
- Hernandez-Pajares M, Juan JM, Sanz J, Orus R, Garcia-Rigo A, Feltens J, Komjathy A, Schaer SC, Krankowski A (2008): The IGS VTEC maps: A reliable source of ionospheric information since 1998. Journal of Geodesy. 83. 263-275. doi: 10.1007/s00190-008-0266-1.
- Klobuchar J (1987): Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 3, 325-331.
- Krypiak-Gregorczyk A, Wielgosz P (2018): Carrier phase bias estimation of geometry-free linear combination of GNSS signals for ionospheric TEC modeling. GPS Solution 22, 45 https://doi.org/10.1007/s10291-018-0711-4

Rasmussen CE, Williams CKI (2006): Gaussian Processes for Machine Learning, the MIT Press, 2006, 13-16.

- Schaer S, Beutler G, Rothacher M (1999): Mapping and predicting the ionosphere, Proceedings of the IGS Analysis Center Workshop, Int. GNSS Serv., Darmstadt, Germany, February 9–11, 307–318.
- Stein ML (1999): Statistical Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging, Springer, 109-143.
- Takács B, Markovits-Somogyi R (2017): GNSS-monitoring légi navigációs alkalmazások szempontjából. Geomatikai Közlemények 20, 47-54.
- Yu V, Yasyukevich A, Mylnikova A, Polyakova AS (2015): Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data. Results in Physics, 5, 32–33. doi:10.1016/j.rinp.2014.12.006.0

# 9GEOELEKTROMOS KVÁZI NULL ELEKTRÓDA ELRENDEZÉSEK - MTA Doktori értekezés 2019

## Szalai Sándor\*

**Geoelectric quasi null electrode arrays** - The application of geoelectric null arrays (arrays which give zero signal over homogeneous half-space) was sentenced problematic thus to be avoided. The author has different experiences using these configurations. Following successful studies by non-linear null arrays, the author investigated the MAN array and its modified versions (the  $\gamma l \ln (n=1-7)$  arrays) which can easily build in the nowadays widespread two-dimensional Electric Resistivity Tomography acquisition systems. These so-called quasi null arrays produce very small signals (close to zero) over homogeneous half-space. According to the dissertation, their imaging capacity is at least as good as the ones of the best traditional arrays.

According to the results, the quasi null arrays may be very important complements of the conventional arrays in the future. While the traditional arrays give robust image of the subsurface, the quasi null arrays may provide a more detailed image. Their application is worth full in spite of that they do not always produce perfect results; in certain situations it is worthwhile to take the risk.

Well-applicable completive methods are the by the author introduced Pricking-Probe and Pressure-Probe methods, as well, in the first line in studies of small-scale fracture systems. They can be applied to verify the results of other geophysical methods and even individually.

Keywords: quasi null arrays, geoelectric arrays, null arrays, fractures, monitoring

A geoelektromos null-elrendezések használatát (az olyan geoelektromos elrendezésekét, amelyek homogén féltér felett nulla jelet adnak) problémásnak és kerülendőnek ítélték. A szerző e konfigurációkról eltérő tapasztalatokat szerzett. Nem-lineáris null elrendezésekkel végrehajtott sikeres kísérleteket követően a szerző elvégezte a manapság elterjedt két-dimenziós Elektromos Ellenállás Tomográfia mérő rendszerbe könnyen beépíthető MAN elrendezés és a MAN módosított változatai (a y11n (n=1-7) elrendezések) vizsgálatát. Ezek a mindeddig csak elméletben létező elrendezések (ún. kvázi null elrendezések), homogén féltér felett nullától alig eltérő, nagyon kis jelet adnak. Amint a dolgozat kimutatja, képezési tulajdonságaik helyenként a legjobb hagyományos elrendezések megfelelő sajátosságaival vetekednek.

Az eredmények szerint a kvázi null elrendezések a jövőben a hagyományos konfigurációk mellett fontos kiegészítő szerepet játszhatnak. Míg a hagyományos elrendezések a felszín alatti elektromos ellenállás-eloszlásról robusztus képet adnak, a kvázi null elrendezések a részletekbe engednek bepillantást. Nem mindig adnak tökéletes eredményt, de adódnak olyan helyzetek, amikor érdemes a kockázatot felvállalni.

Jól alkalmazható kiegészítő eljárások a szerző által bevezetett Szúrás-Próba és a Nyomás-Próba módszerek is, mindenekelőtt kis léptékű repedésrendszerek kutatásában. Egyéb geofizikai módszerekkel kapott eredmények igazolására, de akár önállóan is használhatók.

Kulcsszavak: kvázi null elrendezések, geoelektromos elrendezések, null elrendezések, repedések, monitorozás

| Tartalon | l |
|----------|---|
|----------|---|

| Előszó                                                                                                                     |                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Bevezetés                                                                                                                  | 29                   |
| I. Az MTA doktori disszertációban közölt eredmények megszületése előtt tevéken összefoglalása                              | iységem rövid<br>32  |
| II. A geoelektromos elrendezések rendszerezése és alapvető tulajdonságaik összevetés                                       | e34                  |
| II.1. A valaha használt geoelektromos elrendezések bemutatása, azok rendszerezé megtervezésük során alkalmazott stratégiák | se, valamint a<br>35 |
| II.1a. Motivációk                                                                                                          | 35                   |
| II.1b. Bevezetés                                                                                                           | 36                   |
| II.1c. Az osztályozás elve                                                                                                 | 36                   |
| II.1d. Az osztályozás                                                                                                      |                      |
| II.1e. Az egyes elrendezések megtervezése során alkalmazott stratégiák                                                     | 49                   |
| II.1f. A null-elrendezések                                                                                                 | 52                   |
| II.2. Paraméter-érzékenység térképek                                                                                       | 54                   |
| II.2a. Bevezetés                                                                                                           | 54                   |
| II.2b. A paraméter-érzékenység térképek számítása                                                                          | 55                   |
| II.2c. A paraméter-érzékenység térképek jellemzése                                                                         | 58                   |
| II.2d. A paraméter-érzékenység térképek gyakorlati használhatósága                                                         | 58                   |
| II.2e. Az egyes elrendezések paraméter-érzékenység térképei                                                                | 65                   |
| II 2f. Konklúziók a paraméter-érzékenységi vizsgálatokból                                                                  | 68                   |
| II.3. Kutatási mélység                                                                                                     | 71                   |
| II.3a. Bevezetés                                                                                                           | 71                   |
| II.3b. Módszer                                                                                                             | 72                   |
| II.3c. A DP elrendezések kutatási mélysége                                                                                 | 72                   |
| II.3c. Minden más (nem-DP) elrendezés kutatási mélysége                                                                    | 74                   |
| II.3d. Az eredmények tárgyalása                                                                                            | 75                   |
| II.3e. Konklúziók                                                                                                          | 78                   |
| II.4. Kimutathatósági mélység                                                                                              | 78                   |
| II.4a. Bevezetés                                                                                                           | 79                   |
| II.4b. A módszer                                                                                                           | 80                   |
| II.4c. A hagyományos elrendezésekkel kapott eredmények                                                                     | 82                   |
| II.4d. A nem-hagyományos elrendezésekkel kapott eredmények                                                                 | 86                   |
| II.4e. Következtetések                                                                                                     | 87                   |
| II.5. A hagyományos és az azokból optimalizált elrendezések leképezési<br>összehasonlítása                                 | képességének<br>89   |
| II.5a. Bevezetés                                                                                                           | 89                   |
| II.5b. A módszer                                                                                                           |                      |

| II.5c. Eredmények90                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| II.5d. Értelmezés                                                                                                                                   |
| II.5e. Konklúziók97                                                                                                                                 |
| III. A egyvonalú null-elrendezések                                                                                                                  |
| IV. A kvázi null-elrendezések                                                                                                                       |
| IV.1. Bevezetés                                                                                                                                     |
| IV.2. A kvázi null-elrendezések numerikus vizsgálata103                                                                                             |
| IV.2a. Az elrendezések tükrözésének jelentősége103                                                                                                  |
| IV.2b. A kvázi null-, és hagyományos elrendezésekkel végrehajtott numerikus vizsgálatok eredményei104                                               |
| IV.2c. Konklúziók112                                                                                                                                |
| IV.3. Kvázi null-elrendezések vizsgálata kvázi terepi analóg mérésekkel113                                                                          |
| IV.3a. A modellezés körülményei113                                                                                                                  |
| IV.3b. Az analóg modellezéssel kapott eredmények115                                                                                                 |
| IV.3c. Terepi analóg modellezéssel kapott eredmények120                                                                                             |
| V. Talajmechanikai vizsgálómódszerek és kisskálájú repedésrendszerek kutatása122                                                                    |
| V.1. Talajmechanikai vizsgálómódszerek (Szúrópróba, Nyomáspróba)122                                                                                 |
| V.1a. A SzúróPróba (SzP) módszer                                                                                                                    |
| V.1b. A NyomásPróba (NyP) módszer127                                                                                                                |
| V.2 Kisskálájú repedésrendszerek kutatása128                                                                                                        |
| 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 rendszerezése137                                                                         |
| VI.2. Paraméter-érzékenység139                                                                                                                      |
| VI.3. Kutatási-, és Kimutathatósági mélység140                                                                                                      |
| VI.4. A hagyományos elrendezések leképezési képességének összehasonlítása141                                                                        |
| VI.5. Az egyvonalú null-elrendezések142                                                                                                             |
| VI.6. Numerikus vizsgálatok kvázi null-, és hagyományos elrendezésekkel144                                                                          |
| VI.7. A null-, és a hagyományos elrendezések összevetése kvázi terepi analóg mérésekkel (és numerikus modellezéssel)                                |
| VI.8. Talajmechanikai mérőmódszerek (SzúróPróba, NyomásPróba)148                                                                                    |
| VI.9. Kis skálájú repedésrendszerek vizsgálata149                                                                                                   |
| VII. A jövő. Kitekintés                                                                                                                             |
| Köszönetnyilvánítás                                                                                                                                 |
| Hivatkozások                                                                                                                                        |
| A. Melléklet: Felszíni geoelektromos elektróda elrendezések paraméter-érzékenység térképei158                                                       |

#### 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 célomhoz 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 Szúrópróba 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 összevetettem az általam legalapvetőbbnek tekintett tulajdonságai, így paraméterérzékenység térképei és különböző definíciók szerint meghatározott kutatási mélységei alapján, valamint összehasonlítottam a kétdimenziós sokelektródás 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. Szúrópróba 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 viszgálatára 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 jövőképemet 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 érckutatásra 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 geoelelektromos módszer alapelve a felszíni módszer esetében az, hogy két elektróda, az ú.n. áramelektródák között áramot bocsátanak a földbe, majd az ennek hatására a felszín két pontja között kialakuló potenciál különbséget mérik két másik elektróda, az ú.n. potenciál-elektródák 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.

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

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

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

$$\rho_a = k * (\Delta U/I) , \tag{1}$$

ahol  $\Delta U$  a mért potenciálkülönbség, *I* az áramerősség, *k* pedig egy elrendezésfüggő érték, a geometriai faktor, ami a következőképpen definiálható:

SZALAI S

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{rAM} - \frac{1}{rBM} - \frac{1}{rAN} + \frac{1}{rBN}}$$
 (2)

Itt *r*<sub>AM</sub>, *r*<sub>BM</sub>, *r*<sub>AN</sub> és *r*<sub>BN</sub> az adott elektródák közötti távolságok.



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

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 elrendezéscsoport, az ú.n. 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 nullelrendezések. 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.

Napjainkban leggyakrabban ú.n. sokelektródás 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-elektródaként 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.



2. ábra. Egyenáramú mérés kivitelezése sokelektródás rendszerrel

A méréssel meghatározott látszólagos fajlagos ellenállás szelvényből (*3A. ábra*) egy **inverziónak** nevezett eljárással állítják elő a fajlagos ellenállás szelvényt (*3C. ábra*) több lépésben oly módon, hogy egy kiinduló modellből számított ellenállásszelvény 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 kőzetnek lehet ugyanakkora a fajlagos ellenállása, illetve az egyes kőzetek ellenállása nagymértékben függhet pl. azok víztartalmától (*1. táblázat*).



3. ábra. A fajlagos ellenállás szelvény előállítása (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 szolgáltattak 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 geolektromos 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 Szúrópróba (SzP) és a Nyomáspróba (NyP) módszerekkel** foglalkozom. Felvázolom elméleti hátterüket, 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 kerülték 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.

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 elrendezésével 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.



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

Meg kell említenem, hogy nem mindenkire jellemző az ódzkodás a nagy érzékenységű "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 kínosan figyelve** végeztem hagyományos elrendezéspárjukból könnyen előállítható null-elrendezésekkel: a Schlumberger null-, a három-elektródás null-, és a dipól axiális, illetve ekvatoriális nullelrendezésekkel (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 kínosan 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 elektródás hagyományos-, illetve három elektródás 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 mennyivel 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.1.1 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 mindkettőnket arra késztetett, hogy valamiféle **rendszerbe foglaljuk** őket, megkönnyítve ezzel az áttekintésüket. Az elkészült rendszer megkövetelte az egyes elrendezések **használatának megértését is**, aminek folyományaként 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 sokelektródás 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 sokelektródás 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 sokelektródás elrendezésekkel, jól kidolgozott elméletük, rendelkezésre álló inverziós szoftver), minden elrendezés rendelkezhet bizonyos speciális tulajdonságokkal, amivel kár lenne nem élni. Már csak azért is kívánatos lehet fenti elrendezések mellett továbbiak alkalmazása a sokeletródás 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 sokelektródás 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 nemfókuszáló 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<sup>3</sup>=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 23, 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. profilmérés 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 felcserélhetőek egymással azonos áramkörben, de nem cserélhetőek fel többszörös áramkör esetében. A csillag mérete az áram erősségére utal. A "végtelen" elektródák áramerőssége egységnyi ugyanúgy, ahogy azon áramelektródáké is, amelyek esetében csak egy áramelektróda 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 elrendezések 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 nevekkel 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 potenciálelektródák 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  $\alpha$ -,  $\beta$ - és  $\gamma$  típusú elrendezésekről beszélhetünk, ahol az  $\alpha$  típus CPPC, a  $\beta$  típus CCPP, a  $\gamma$  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.  $\alpha$ -,  $\beta$ - és  $\gamma$  típusú elrendezések a három-elektródás elrendezések esetében is léteznek ( $\alpha$  típus: CPPc, illetve PPCc;  $\gamma$  típus: CPCp, illetve PCPc). A kételektródás 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-elektróda (teli körök). A kis betűk, mint e, p, c a végtelenben lévő elektródákat jelölnek. 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 helyezzük 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-elektróda voltától. A szimmetrikus elrendezések esetében az egyetlen fennmaradó paraméter a belső elektródák távolságának a külső elektródák távolságához való viszonya, ami a baloldali skálán látható.  $\alpha$ -,  $\beta$ - illetve  $\gamma$ -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 potenciálelektródákat jelöli. Az  $\alpha$ -,  $\beta$ - és  $\gamma$ -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. Két-elektródás 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 27*a*, 27*b*, 27*c* és 27*d*-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** (amikoris az áram nagyobb része kényszerül nagyobb mélységbe, mint az a nemfókuszáló esetben lehetséges lenne) áramelektródák rendszerének alkalmazásával valósítható meg: több áramelektródának 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) főkuszáló elrendezések (III. osztály: 1-m-1). l'-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 kivitelezhetőek: (a) rögzített áramelektródák mellett változó potenciál-elektródákkal; (b) rögzített potenciál-elektródák mellett változó áramelektródákkal; (c) mind az áram, mind a potenciál-elektródák helyzetét változtatva. A változó helyzetű potenciál-elektródák esetében horizontális irányú elektromos ellenállás-változásokról, vagy a terület inhomogenitásáról kaphatunk képet. A változó helyzetű áramelektródák esetében pedig mélységfüggő információt nyerhetünk, mintegy miniszondázást hajtva végre.

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



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



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



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



II.1.9 ábra. Összetett, fókuszáló, egyvonalú 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                                  |         |

| ELRENDEZÉS NÉV                          | HIVATKOZÁS                                    | ELRENDEZÉS<br>SZÁMA | OSZTÁLY  |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|----------|
| Schlumberger                            | Van Nostrand és Cook (1966), Kunetz<br>(1966) |                     |          |
| symmetric four electrode                | Tarkhov (1980)                                | 1                   |          |
| Schlumberger full                       | Schulz (1985)                                 | 1                   |          |
| gradient Schlumberger                   | Tsokas et al. (1997)                          |                     |          |
| 2-pole Schlumberger                     | Winter (1994)                                 |                     |          |
| Wenner- <i>a</i>                        | Habberjam (1979)                              |                     |          |
| Wenner                                  | Van Nostrand és Cook (1966)                   | 2                   |          |
| Wenner-Gish-Rooney                      | Heiland (1946)                                |                     |          |
| Palmer Palmer (1960)                    |                                               | 3                   | 1-1      |
| PalmerPalmer (1960)?még nem alkalmazott |                                               | 4                   | <b>.</b> |
| ?                                       | még nem alkalmazott                           | 5                   | I        |
| Wenner-β                                | Habberjam (1979)                              |                     |          |
| dipole-dipole                           | Clark (1990)                                  | 6                   |          |
| Eltran                                  | Alpin et al. (1966)                           | 0                   |          |
| β-Wenner                                | Apparao et al. (1992)                         |                     |          |
| dipole axial                            | Alpin (1950)                                  |                     |          |
| dipole-dipole                           | Kunetz (1966)                                 | 7                   |          |
| double dipole                           | Kunetz (1966), Telford et al. (1976)          |                     |          |
| colinear dipole-dipole                  | Cantwell et al. (1964)                        | ]                   |          |

| Polar                         | Zhdanov és Keller (1994)            |              |     |
|-------------------------------|-------------------------------------|--------------|-----|
| modified Eltran               | Alpin et al. (1966)                 |              |     |
| axial dipole                  | Tarkhov (1980)                      |              |     |
| polar dipole                  | Alpin et al. (1966), Meidav (1970)  |              |     |
| ?                             | még nem alkalmazott                 | 8            |     |
| Wenner-y null                 | Szalai et al. (2004)                |              |     |
| Frolov                        | Frolov (1989), Hmelevsky és Shevnin | 9            |     |
| 170107                        | (1994)                              |              |     |
| Wenner <i>y</i>               | Whiteley (1973)                     | 10           |     |
| twin-like                     | Szalai, Szarka (2008) (korábban nem | 11           |     |
| twm-mkc                       | alkalmazott)                        | 11           |     |
| $\alpha$ -type nonsymmetrical | Jakosky (1950), név: Szalai, Szarka | 12           |     |
|                               | (2008), korábban nem alkalmazott    | 12           |     |
| asymmetrical double probe     | Heiland (1946)                      | 12a          |     |
| <i>B</i> -type nonsymmetrical | még nem alkalmazott; név: Szalai,   | 13           |     |
| <i>p</i> type nonsymmetrical  | Szarka (2008)                       | 15           |     |
| asymmetrical polar dipole     | Meidav (1970)                       | 1 <b>3</b> a |     |
| polar dipole                  | Alfano (1974)                       | 154          |     |
| v-type nonsymmetrical         | még nem alkalmazott; név: Szalai,   | 14           |     |
|                               | Szarka (2008)                       |              | 1)  |
| pole-dipole                   | Seigel et al. (1968)                |              | -1- |
| half-Schlumberger             | Van Nostrand és Cook (1966)         |              | IJ  |
| three-electrode               | Van Nostrand és Cook (1966)         |              |     |
| Lögn                          | Van Nostrand és Cook (1966)         |              |     |
| tripole AMN                   | Kunetz (1966)                       |              |     |
| tripole                       | Telford et al. (1976)               |              |     |
| Canadian                      | Zhdanov és Keller (1994)            | 15           |     |
| double probe with unequal     | Heiland (1946)                      | 15           |     |
| probe spacing                 | fichand (1940)                      |              |     |
| one-electrode                 | Lögn (1954)                         |              |     |
| three electrode               | Meiday (1970)                       |              |     |
| Schlumberger                  | Weidav (1970)                       |              |     |
| Schlumberger-half             | Schulz (1985)                       |              |     |
| 1-pole Schlumberger           | Winter (1994)                       |              |     |
| half-Wenner                   | Van Nostrand és Cook (1966), Meidav |              |     |
|                               | (1970)                              |              |     |
| three-point                   | Van Nostrand és Cook (1966)         |              |     |
| asymmetrical Wenner           | Van Nostrand és Cook (1966)         | 16           |     |
| unsymmetrical                 | Jakosky (1950)                      | 10           |     |
| double equidistant probe      | Heiland (1940)                      |              |     |
| three electrode Wenner        | Meidav (1970)                       |              |     |
| pole-dipole                   | Tsokas et al. (1997)                |              |     |
| half-twin like                | this paper                          | 17           |     |
| ?                             | (még nem alkalmazott)               | 18           |     |
| ?                             | (még nem alkalmazott)               | 19           |     |

| asymmetrical single probe                        | Heiland (1946)                                                           | 20 |         |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----|---------|
| midpoint null                                    | Szalai et al. (2004)                                                     | 21 |         |
| MAN                                              | Tarkhov (1957)                                                           |    | 7.45.85 |
| single pole                                      | Tarkhov (1957)                                                           |    | ([-]    |
| pole-pole                                        | Keller és Frischknecht (1966)                                            |    | [-]     |
| two-electrode                                    | Keller és Frischknecht (1966)                                            |    | Ι       |
| dipole AM                                        | Kunetz (1966)                                                            | 22 |         |
| medium gradient                                  | Tarkhov (1980)                                                           | 22 |         |
| single probe                                     | Heiland (1946)                                                           |    |         |
| single-pole                                      | Brass et al. (1981)                                                      |    |         |
| Schlumberger null                                | Szalai et al. (2002)                                                     | 22 |         |
| AINS                                             | Tarkhov (1957)                                                           | 25 |         |
| <i>three-electrode null</i> Szalai et al. (2002) |                                                                          | 24 |         |
| half-Schlumberger null                           | név: Szalai, Szarka (2008)                                               | 24 |         |
| three-electrode vector                           | Bogolyubov (1984)                                                        | 25 |         |
| perpendicular bisector                           | Dachnov (1953); név: Szalai, Szarka                                      | 26 |         |
| three-electrode                                  | (2008)                                                                   | 20 |         |
| dipole                                           | Alpin (1950)                                                             |    |         |
| dipole-dipole                                    | Keller et al. (1975)                                                     | 27 | Ĩ       |
| bipole-dipole                                    | Keller et al. (1975)                                                     |    | 1-n     |
| dipole equatorial Alpin (1950)                   |                                                                          | 20 | (1-     |
| Eltran West (1940)                               |                                                                          | 28 | Π       |
| asymmetrical equatorial                          | Maiday (1070)                                                            | 20 |         |
| dipole                                           | Meldav (1970)                                                            | 29 |         |
| dipole axial null                                | Szalai et al. (2002)                                                     | 30 |         |
| square-α                                         | Habberjam és Watkins (1967)                                              | 31 |         |
| square- γ                                        | Habberjam és Watkins (1967)                                              | 32 |         |
| Baker                                            | Baker et al. (2001)                                                      | 33 |         |
| Dalvar offact                                    | Baker és Djeddi (1999), Baker et al.                                     | 24 |         |
| Daker onset                                      | (2000)                                                                   | 54 |         |
| unipole Wenner-α                                 | Militzer et al. (1979) (name: this paper)                                |    |         |
| uninala                                          | Tarkhov (1957), Gupta és Battacharya                                     | 25 |         |
| unipole                                          | (1963)                                                                   | 55 |         |
| Wenner focused                                   | Bernabini et al. (1988)                                                  |    |         |
| uninala Sahlumhanaan                             | Gupta (1961), Gupta és Bhattacharya                                      |    |         |
| unipole schlumberger                             | (1963)                                                                   | 36 | 1)      |
| Schlumberger focused                             | Bernabini et al. (1988)                                                  |    | ė.      |
| unipole variable current                         | oole variable current     Whiteley (1972)                                |    | [ (1    |
| Wenner focused                                   | Ole variable currentWhiteley (1972)Wenner focusedBernabini et al. (1988) |    | Π       |
| Weyl                                             | Weyl (1967)                                                              | 38 |         |
| uninala Warman O                                 | Militzer et al. (1979); név: Szalai, Szarka                              | 20 |         |
| umpoie wenner- p                                 | (2008) 39                                                                |    |         |
| uningle Wonner y                                 | Militzer et al. (1979); név: Szalai, Szarka                              | 40 |         |
| umpore wenner-y                                  | (2008)                                                                   | +0 |         |

| modified unipole                                                  | Roy és Apparao (1971)                | 41 |               |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----|---------------|
| tri-electrode                                                     | Bernabini et al. (1988)              |    | -             |
| tri-electrode focused                                             | Brizzolari és Bernabini (1979)       |    | ( <b>1</b> -ı |
| trielectrode B                                                    | Grandinetti (1967)                   | 42 | 1-n           |
| tetraelectrode                                                    | Bernabini et al. (1988)              | 42 | ш (           |
| surface laterolog                                                 | Apparao et al. (1969)                | 43 | -             |
| Csókás two-deflector                                              | Csókás (1963)                        | 45 |               |
| (surface) laterolog 7                                             | Jackson (1981)                       | 44 |               |
| single laterolog                                                  | Jackson (1981)                       |    |               |
| Lee                                                               | Van Nostrand és Cook (1966)          | 45 |               |
| Lee partitioning                                                  | Heiland (1946), Jakosky (1950)       | +3 |               |
| asymmetrical Lag                                                  | Heiland (1946), Van Nostrand és Cook |    |               |
| asymmetrical Lee                                                  | (1966)                               | 46 |               |
| potential-drop-ratio                                              | Kunetz (1966)                        |    |               |
| Schlumberger Vxx Sapuzhak (1967)   noint source V Sapuzhak (1967) |                                      | 47 |               |
| point source V <sub>xx</sub>                                      | Sapuzhak (1967)                      | 48 |               |
| dipole V <sub>xx</sub>                                            | Sapuzhak (1967)                      | 49 |               |
| Pakhomov                                                          | Blokh (1971)                         | 50 |               |
| Schlumberger two-depth                                            | Dachnov (1953)                       | 51 |               |
| Schlumberger three-depthDachnov (1953)                            |                                      | 52 |               |
| differential Zohdy (1969)                                         |                                      | 53 |               |
| two-field substraction                                            | Rabinovich és Kegutin (1962)         | 54 |               |
| Lee two-depth                                                     | Dachnov (1953)                       | 55 | <b>F</b>      |
| three-electrode two-depth                                         | Dachnov (1953)                       | 56 | ÷             |
| Jakosky                                                           | Jakosky (1950)                       | 57 | ( <b>n</b>    |
| resistilog                                                        | West és Beacham (1944)               | 58 | 4             |
| asymmetrical Lee two-                                             | Dachnov(1953)                        | 59 |               |
| depth                                                             | Daemiov (1953)                       | 57 |               |
| three-electrode difference                                        | Militzer et al. (1979)               |    |               |
| field                                                             | Wintzer et al. (1979)                |    |               |
| AMN-NMA averaged                                                  | Peschel (1967)                       | 60 |               |
| two-sided pole-dipole                                             | Semenov és Shevnin (1994)            | 00 |               |
| two-sided three-electrode                                         | Candansayar és Basokur (2001)        |    |               |
| Hummel                                                            | Winter (1994)                        |    |               |
| two-sided dipole axial                                            | Tarkhov (1980)                       | 61 |               |
| dipole axial difference field                                     | Tarkhov (1980)                       | 01 |               |
| offset Wenner                                                     | Barker (1981)                        | 62 |               |
| Wenner- $\alpha$ és Wenner- $\beta$ Kampke (1999)                 |                                      | 63 |               |
| averaged                                                          |                                      | 05 |               |
| Csókás four-deflector                                             | Csókás (1963)                        | 64 |               |
| CED                                                               | Shabanov (1960), Mogilatov és        | 65 | Ĩ.            |
|                                                                   | Balashkov (1996), Takács (2003)      | 00 | 1-m           |
| linear quadripole- dipole                                         | Yadav és Singh (1983)                | 66 |               |
| double laterolog                                                  | Jackson (1981)                       | 67 |               |

| cross LL7                             | Jackson (1981)              |      | ~        |
|---------------------------------------|-----------------------------|------|----------|
| triple laterolog                      | Jackson (1981)              | 68   | Ē        |
| triple LL7                            | Jackson (1981)              | 08   |          |
| quad laterolog                        | Jackson (1981)              | 60   | N C      |
| quad LL7                              | Jackson (1981)              | 09   |          |
| two-component vector                  | Hmelevsky és Shevnin (1994) | 70   |          |
| tripole                               | Hmelevsky és Shevnin (1994) | 71   |          |
| three-electrode                       | Szalaj ás Szarka (2008c)    |      |          |
| superposed vector                     | Szalal CS Szalka (2008C)    | 72   |          |
| three-electrode two-                  | Bogolyuboy (1984)           | 12   |          |
| component                             | Dogoly0000 (1904)           |      |          |
| Schlumberger superposed               | Szalai és Szarka (2008c)    |      |          |
| null                                  | Szului es Szulku (2000e)    | 73   |          |
| symmetrical two-component             | Bogolyubov (1984)           |      |          |
| three-electrode superposed            | Szalai és Szarka (2008c)    |      |          |
| null                                  | 524141 C5 5241K4 (2000C)    | 74   |          |
| three-electrode two-                  | Bogolyuboy (1984)           | , .  |          |
| component                             |                             |      | _        |
| dipole four electrode Sapuzhak (1967) |                             | 75   |          |
| receiver                              |                             |      | _        |
| dipole five electrode                 | Sapuzhak (1967)             | 76   |          |
| receiver                              |                             |      |          |
| V" FD                                 | Szalai és Szarka (2008c)    | 77   |          |
| TEN FD                                | Mousatov et al. (2002)      |      | , î      |
| V'' SD                                | Szalai és Szarka (2008c)    | - 78 | -1-      |
| TEN SD                                | Mousatov et al. (2002)      |      |          |
| Y                                     | Bolshakov et al. (1998)     | 79   | <b>F</b> |
| Т                                     | Bolshakov et al. (1998)     | 80   | _        |
| arrow-type                            | Bolshakov et al. (1998)     | 81   | _        |
| orthogonal 1                          | Matveev (1990)              | 82   |          |
| Zirkelsonde                           | Schwarz (1961)              | 83   |          |
| vol-de-canards                        | Pannisod et al. (1998)      | _    |          |
| MUltible Continuous                   |                             | 84   |          |
| Electrical Profiling,                 | Pannisod et al. (1998)      |      |          |
| MUCEP                                 |                             |      | _        |
| modified three-electrode              | Dachnov (1953)              | 85   |          |
| two-depth                             |                             |      | _        |
| offset square                         | Barker (1981)               | 86   | _        |
| AIR                                   | Habberjam (1979)            | 87   | _        |
| two-sided dipole axial                | this paper                  |      |          |
| superposed null                       | <b>r r r</b>                | 88   |          |
| two-sided two-components              | Bogolyubov (1984)           |      |          |
| axial dipole                          |                             |      | 4        |
| orthogonal 2                          | Matveev (1990)              | 89   | 4        |
| quadripole-quadripole                 | Doicin (1976)               |      |          |

48

|                                    | $E_{1} = \frac{1075}{100}$     | 00              | T                |
|------------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|
| rotating dipole                    | Furgerson es Keller (1975)     | 90              |                  |
| four-four superposed vector        | Bogolyubov (1984)              |                 | -                |
| Schlumberger tensorial             | Szalai, Szarka (2008)          |                 | ()               |
| 2-pole TDCR                        | Winter (1994)                  | 00.             | 1-n              |
| Wenner tensorial                   | Szalai, Szarka (2008)          | 90a<br>00b      | ±                |
| crossed Wenner                     | Tsokas et al. (1997)           | 900             | 1(               |
| dipole tensorial                   | Szalai, Szarka (2008)          | 900             | -                |
| TEN ++                             | Mousatov et al. (2002)         |                 |                  |
| three-electrode tensorial          | Szalai, Szarka (2008)          | 01              |                  |
| 1-pole TDCR                        | Winter (1994)                  | 91              |                  |
| trielectrode C                     | Grandinetti (1967)             | 02              | VII              |
| pentaelectrode                     | Brizzolari és Bernabini (1979) | 92              | ( <b>m-m-1</b> ) |
| nem ismert                         | nem ismert                     | nem ismert      | VIII             |
| ile in isinert                     | nem ismert                     | licili isilicit | ( <b>m-m-m</b> ) |
| trielectrode A                     | Grandinetti (1967)             | C1              |                  |
| Ovchinnikov                        | Ovchinnikov (1956)             | C2              |                  |
| Ryjov                              | Ryjov és Karinskaya (1981)     | C3              |                  |
| midpoint-potential                 | Deblin és Zhau (2004)          | C4              |                  |
| referred (MPR)                     | Danni es Zhou (2004)           | C4              | sek              |
| gradient                           | Schulz (1985), Furness (1993)  |                 | ezé              |
| modified Schlumberger              | Furness (1993)                 | C5              | pua              |
| potential gradient                 | Furness (1993)                 |                 | elra             |
| rectangle                          | Kunetz (1966)                  |                 | səd              |
| gradient two-component             | Varga et al. (2007)            | C6              | veg.             |
| twin                               | Clark (1990)                   | C7              |                  |
| fixed Schlumberger V <sub>xx</sub> | Sapuzhak (1977)                | C8              |                  |
| fixed dipole V <sub>xx</sub>       | Sapuzhak (1977)                | C9              |                  |
| fixed point source V <sub>xx</sub> | Sapuzhak (1977)                | C10             |                  |

Jóllehet az alkalmazott elrendezések száma jelentős, korábban még soha nem használták a  $\gamma$ típusú elrendezések közé tartozó  $\gamma_{11n}$  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  $\gamma_{qnull-elrendezés}$ t 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.1e. Az egyes elrendezések megtervezése során alkalmazott stratégiák

#### Szalai és Szarka (2011) alapján

Amellett, hogy a bemutatott elrendezés-gyűjtemény lehetővé teszi akár az összes elrendezés egymással való összevetését különböző tulajdonságaik alapján, lehetőséget teremt arra is, hogy megértsük milyen koncepció vezette az egyes elrendezések megalkotóit. Ez pedig a sokeletródás mérési módszer javításához is elvezethet. A különböző elrendezés osztályoknak pl. különböző speciális sajátosságaik vannak. Az I. osztály elrendezései egy egyszerű ellenállás értéket szolgáltatnak a felszín alatti kőzettartományról. Ha elsősorban vektoriális, vagy anizotrópiával



**II.1.12 ábra.** A  $\gamma_{11n}$  (n=1-7 és inf) és a  $\gamma_{qnull}$  elrendezések. Csillaggal jelölve az áram-, teli körrel a potenciál-elektródák

kapcsolatos információra van szükségünk, akkor a II. osztály elrendezéseinek használata javasolható. A III. osztály tagjai, a fókuszáló elrendezések nagyobb behatolóképességűnek véltek, míg az összetett elrendezések (IV. osztály) lehetővé teszik a lokális vízszintes, illetve függőleges irányú ellenállás-változások tanulmányozását. Az V-VII csoportok a II. és a III. csoport képességeit ötvözik: nagyobb behatolási mélység érhető el velük és alkalmasak az ellenállás helyi változásának kutatására. A VIII. osztály tagjai, legalábbis elméletben, magában hordozzák a vektoriális/anizotróp jellegű mellett a lokális vízszintes/függőleges információ kinyerésének lehetőségét is.

| II.1.2 táblázat. | Gyakorlati célok | és az azok kielégítéséi | re javasolt stratég | giák és elrendezések |
|------------------|------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|
|------------------|------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|

| Általános<br>megfontolás<br>(stratégia) | Cél                                  | Megoldás<br>(alstratégia)                       | Ide tartozó<br>elrendezések<br>jelölő száma                                                           | Elrende-<br>zések<br>száma |    |  |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----|--|
| Praktikus okok<br>(1.)                  | A jel növelése                       | C közelíti P-t –<br>(1a)                        | 3, 4, 5, 8, 11,<br>12, 12a,<br>14, 19                                                                 | 9                          |    |  |
|                                         | Kevesebb elektródát<br>kell mozgatni | C és/vagy P a<br>végtelenben –<br>( <i>1b</i> ) | 15, 16, 17, 20,<br>21, 22,<br>25, 46, 56, 60,<br>70, 71,<br>72, 74, 79, 80,<br>81, 85,<br>91, C1, C10 | 21                         | 61 |  |
|                                         | Kevesebb kábel<br>szükséges          | Dipól – ( <i>1c</i> )                           | 7, 13a, 27, 28,<br>29, 30,<br>49, 61, 75, 76,<br>88, 90c,<br>C9                                       | 13                         |    |  |

|                                                   | Nem kell minden<br>elektródát mozgatni<br>a térképezéshez         | Nem minden<br>elektróda mozog<br>– (1d)       | C1, C2, C3,<br>C4, C5,<br>C6, C7, C8,<br>C9, C10                                                                          | 10 | 61 |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|
|                                                   | Korlátozott<br>hozzáférésű területen<br>végrehajtandó mérés       | Aszimmetrikus –<br>(1e)                       | 12, 12a, 13,<br>13a, 14,<br>18, 20, 29                                                                                    | 8  |    |
| Az anomália                                       | "Tiszta" anomáliát<br>kapjunk Null – (2a)                         |                                               | 9, 21, 23, 24,<br>30, 32,<br>34, 35, 36, 38,<br>41, 42,<br>43, 53, 60, 64,<br>73, 74,<br>79, 80, 81, 82,<br>87, 88,<br>89 | 25 |    |
| "megtisztítása"<br>magával a mérési<br>módszerrel |                                                                   | Offszet – $(2b)$                              | 62, 86                                                                                                                    | 2  | 36 |
| (2.)                                              | A felszín közeli<br>inhomogenitások<br>hatásának<br>kiküszöbölése | Differencia – (2c)                            | 53, 54                                                                                                                    | 2  |    |
|                                                   |                                                                   | Két oldalú– (2 <i>d</i> )                     | 60, 61, 82, 88,<br>89                                                                                                     | 5  |    |
|                                                   |                                                                   | Az elektródák<br>identitása<br>változik– (2e) | 63, 87                                                                                                                    | 2  |    |
|                                                   |                                                                   | Lee típusú – (3a)                             | 45, 46, 55                                                                                                                | 3  |    |
|                                                   | x irányú (szelvény<br>irányú) változások                          | Deriváló– ( <i>3b</i> )                       | 1, 7, 15, 24,<br>30, 47, 48,<br>49, 75, 76, 77,<br>78                                                                     | 12 |    |
| A helvi                                           |                                                                   | Vektor – (3c)                                 | 25, 70, 71, 72,<br>83                                                                                                     | 5  |    |
| inhomogenitás<br>és/vagy anizotrópia              |                                                                   | Tenzor – (3d)                                 | 90, 90a, 90b,<br>90c, 91                                                                                                  | 5  | 54 |
| tanulmányozása<br>(3.)                            | y iranyu valtozasok                                               | További nem<br>vonal<br>elrendezések–<br>(3e) | 23, 24, 25, 26,<br>31, 32,<br>33, 34, 75, 76,<br>79, 80,<br>81, 85, 86, 89                                                | 16 |    |
|                                                   | z (függőleges)<br>irányú változások                               | Mini-szondázás<br>– ( <i>3f</i> )             | 50, 51, 52, 53,<br>54, 55,<br>56, 57, 58, 59,<br>84                                                                       | 11 |    |

|                                     |                                | Mélységi<br>differenciálás–<br>(3g) | 53, 54                                                                            | 2  | 54 |
|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| A kutatási mélység<br>növelése (4.) | A kutatási mélység<br>növelése | Fókuszálás – (4)                    | 35, 36, 37, 38,<br>39, 40,<br>41, 42, 43, 44,<br>64, 65,<br>66, 67, 68, 69,<br>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.1f. A null-elrendezések

Megdöbbentő 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-elrendezések 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 nullelrendezés (*Szalai et al. 2004*). A továbbiakban az egyszerűség kedvéért a MAN elnevezést fogom használni.



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

A többi geometriai null-elrendezés közül a **Schlumberger null-elrendezés**t annál részletesebb vizsgálatoknak vetették alá, mi több egy egész könyvet (*Bogolyubov 1984*)\_szenteltek neki, de az elrendezést **csak szondázási céllal** vizsgálták. A **négyzet**- $\gamma$  elrendezést pedig önmagában nem szokták használni, csak a négyzet- $\alpha$  és/vagy négyzet- $\beta$  elrendezésekkel kombinálva (*Habberjam és Watkins 1967*). A **dipól axiális null-**, és a **három elektródás null-elrendezés**eket 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.



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

A (Wenner-) $\gamma$  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  $\gamma_{null}$  elrendezésből némi módosítással kapott  $\gamma_{null}$  elrendezés is beépíthető az egyenközű sokelektródás rendszerbe, ami a napjainkban leginkább elterjedt kétdimenziós sokeletródás 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.

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 sokelektródás 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 főkuszáló, illetve az összetett stratégiákat követték. Az általam bevezetett null-elrendezések ezzel szemben az elektródák megfelő 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 paraméterérzékenység térképeit, ábrázolom azokat az összes olyan elrendezésre, amelyek esetére ez lehetséges és bemutatom néhány alkalmazási lehetőségüket, különös tekintettel a nullelrendezésekre 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-elektródás elrendezésekkel. *Noel és Xu (1991)* **2D paraméter-érzékenység tanulmányokat** végzett; *Gyulai (1995)* két-elektródás, három-elektródás, Wenner-, Schlumberger-, és sugárirányú dipól elrendezések paraméter-érzékenységét vizsgálat **dőlő, rétegzett modellek esetére**; *Gyulai (1998)* pedig felszín alatti **üregek paraméter-érzékenységével** 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 értékeket 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  $a/R \le 0.1$  (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,  $\rho_2$  elektromos fajlagos ellenállású kockát helyezünk egy egyébként homogén, izotróp,  $\rho_1$  fajlagos ellenállású féltérbe, amint azt a *II.2.1 ábra* mutatja. *I* áram folyik a "cur" áramelektródákon (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-elektródák között mérjük.



**II.2.1 ábra.** A kocka hatásának számításánál használt jelölések négyelektródás rendszer példáján bemutatva. Ekkor A és B a szövegben és a képletekben "cur"-ként jelölt áramelektródák I, illetve –I áramerősséggel.  $\rho_2$  az inhomogenitás-,  $\rho_1$  a közeg fajlagos ellenállása

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

$$\Delta U^{\text{hom}} = \frac{I\rho}{2\pi} G^{\text{hom}}, \text{ alo } G^{\text{hom}} = \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}.$$
 (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:

$$\tau = 2\varepsilon_0 k E_b , \qquad (II-2)$$

ahol  $E_b$  az elektromos tér normal komponense lenne az inhomogenitás hiányában,  $k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$  az

ellenálláskontraszt,  $\rho_2$  az inhomogenitás-,  $\rho_1$  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:

$$Q_x = \iint 2k\varepsilon_0 E_x dy dz , \qquad (\text{II-3a})$$

$$Q_{y} = \iint 2k\varepsilon_{0}E_{y}dxdz , \qquad (\text{II-3b})$$

$$Q_z = \int \int 2k\varepsilon_0 E_z dx dy$$
, (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:

$$p_i = \iiint 2k\varepsilon_0 E_i dx dy dz . \tag{II-4}$$

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

$$p_i \approx 2k\varepsilon_0 E_i abc$$
. (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:

$$U^{\text{hom}}(\mathbf{r}_{C}) = \frac{\rho_{1}I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{BC}} \right), \qquad (\text{II-6})$$

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

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

$$r_{BC} = \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 + (z_C - z_B)^2}$$

Az elektromos tér az elektromos potenciál negatív gradiense:

$$E_{i} = \frac{\rho_{1}I}{2\pi} \left( \frac{i_{A} - i_{C}}{r_{AC}^{3}} + \frac{i_{C} - i_{B}}{r_{BC}^{3}} \right), \text{ abol } i = x, y \text{ vagy } z$$
(II-7)

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

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

A (II-8) egyenletben "*cur*" bármely N áramelektródára utalhat,  $r_{curc}$  pedig azok C-től való távolságát írja le.

A kocka hatásaként kialakuló elektromos potenciál anomália. Elektrosztatikus közelítésben a p dipólmomentum hatásaként kialakuló elektromos potenciál a következő:

$$U(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \left( \mathbf{p}, \nabla \frac{1}{r} \right).$$
(II-9)

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

$$\Delta U^{cube}(p_i) = \frac{p_i}{2\pi\varepsilon_0} G_i^{MN}, \qquad (\text{II-10})$$

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:

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

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

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

A szembenlévő oldalpárok teljes hatása:

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

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

$$\frac{\Delta U^{cube}}{\Delta U^{\text{hom}}} = \frac{100}{\pi} ka^3 \frac{G^{cube}}{G^{\text{hom}}} . \tag{II-14}$$

### 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  $-2.0 \le x \le 1.2$ ,  $-0.5 \le y \le 0.5$  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 izovonal**on 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, 2008a, 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 potenciálelektródák körüli inhomogenitások hatásának, az ú.n. C-, és P hatásnak (Shevnin et al. 1999) megértése.
- A példákban, amiket új elrendezések működésének megértésére (2.) mutatok be nullelrendezéseket 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 elrendezéske esetében.



**II.2.2 ábra.** A Schlumberger elrendezés paraméter-érzékenység térképei (az 1. elrendezés az II.2.1. táblázatban) az áramelektróda (csillagok) és potenciál-elektróda (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 mélységre készültek

# 1b) Az áram-, illetve a potenciálelektródák körüli inhomogenitások hatásának, az ú.n. C-, és P hatásnak megértése

A *C* és a *P* hatások (*Shevnin et al. 1999*), a Schlumberger elrendezéssel végrehajtott szondázás eredményeként kapott VESZ görbék jellegzetes torzulásai jól megérthetőek az elrendezés PÉTeinek tanulmányozásával. Mivel a *P* elektródák 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* áramelektródák 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 áramelektróda 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 áramelektróda két oldalán a felszínközeli zavaró inhomogenitás hatása különböző előjelű, így ahogy az áramelektróda 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 térképének is van, míg a MAN elrendezés paraméter-érzékenység térképének két szimmetria-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 szimmetriaviszonyai

## 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*) paraméterérzékenység 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-, M0 és N0 potenciál-elektródák



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



**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

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).

#### 3a) Az offszet 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 offszet Wenner elrendezés megalkotására a következőképpen: ugyanaz a felszínközeli ható közel



**II.2.9 ábra.** a) A Wenner elrendezés paraméter-érzékenységének metszete egy nagy vezetőképességű kör alakú hatóval.  $\rho_{\alpha}$  értéke ekkor kisebb a háttér ellenállás 100  $\Omega$ m-es értékénél. b) Az elektródák az eltolt, offszet pozícióban. A kör ekkor a negatív érzékenységű 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)

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

#### 3b) Offszet négyzetes elrendezés (Barker 1981)

A négyzetes- $\alpha$  és  $\gamma$  elrendezések esetében a pozitív és a negatív érzékenységű zónák ellentétesen helyezkednek el (*II.2.10 ábra*). A mérés során az  $\alpha$  – és a  $\gamma$  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-elektródás (*A6 ábra*), a Wenner- $\beta$  (*A7 ábra*), a dipól axiális (*A8 ábra*), a Wenner- $\gamma$  (*A9 ábra*), a Twin (*A10 ábra*), valamint **nem-egyvonalú elrendezések**, mint a négyzetes- $\alpha$  (*A11 ábra*) és **fókuszáló elrendezések**, mint az unipól- $\alpha$  (*A15 ábra*), az unipól- $\beta$  (*A16 ábra*) és az unipól- $\gamma$  (*A17 ábra*) elrendezések PÉTjei 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 elektródás- (A6 ábra), a Wenner- $\beta$ - (A7 ábra), a dipól axiális- (A8 ábra), a Wenner- $\gamma$ - (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 esetében 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-elektródáról (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-elektróda egy áramelektródához (a0105 az *A1*, ght az *A3*, Twin az *A10*, ght az *A3 ábrán*). Ezen elrendezések **felbontóképessége jó.** A Wenner típusú elrendezések (a Wenner- $\alpha$  a *II.2.3*, a Wenner- $\beta$  az *A7*, a Wenner- $\gamma$  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 paraméterérzékenység 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.

#### SZALAI S

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

| dák                 | ezés                | az                  | az                 |   | ł    | В    |      | Μ    |     | Ν    |   |
|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---|------|------|------|------|-----|------|---|
| az elektró<br>száma | az elrend<br>típusa | elrendezés<br>száma | elrendezés<br>neve | x | у    | X    | у    | X    | у   | X    | y |
|                     |                     | 1                   | Schlumberger       | 0 | 0    | 1    | 0    | 0.45 | 0   | 0.55 | 0 |
|                     |                     | 2                   | Wenner-a           | 0 | 0    | 1    | 0    | 0.33 | 0   | 0.67 | 0 |
|                     |                     | 3                   | a0105              | 0 | 0    | 1    | 0    | 0.1  | 0   | 0.5  | 0 |
| lás<br>ezések       | 4                   | a0304               | 0                  | 0 | 1    | 0    | 0.3  | 0    | 0.4 | 0    |   |
|                     | 5                   | ght                 | 0                  | 0 | 1    | 0    | 0.1  | 0    | inf | 0    |   |
|                     | lezés               | 6                   | fél-Wenner         | 0 | 0    | inf  | 0    | 0.5  | 0   | 1    | 0 |
| ktró                | Irend               | 7                   | fél-Schlumberger   | 0 | 0    | inf  | 0    | 0.9  | 0   | 1    | 0 |
| y-ele               | alú el              | 8                   | két-elektródás     | 0 | 0    | inf  | 0    | 1    | 0   | inf  | 0 |
| nég                 | von                 | 9                   | Wenner- <b>β</b>   | 0 | 0    | 0.33 | 0    | 0.67 | 0   | 1    | 0 |
|                     | egy                 | 10                  | dipól axiális      | 0 | 0    | 0.1  | 0    | 0.9  | 0   | 1    | 0 |
|                     | 11                  | Wenner-y            | 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 |

Érdemes tárgyalni azokat a pozíciókat, ahol a kis-méretű inhomogenitások **nem észlelhetőek**, 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 szintúgy 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.** 

A paraméter-érzékenység térképek segítségével pl. az áramfókuszálás hatása is tanulmányozható. Láthatjuk, hogy míg a Wenner elrendezés (*II.2.3 ábra*) esetében z/R = 0.1mélységben 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- $\alpha$  elrendezés (*A15 ábra*) esetében az x és a z értékek már a z/R = 0.1 mélységben is összevethetőek 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

| az elektródák<br>száma       | az elrendezés<br>típusa    | az<br>elrendezés<br>száma | az elrendezés<br>neve     | Α   |      | В      |       | М    |       | N      |        |
|------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-----|------|--------|-------|------|-------|--------|--------|
|                              |                            |                           |                           | X   | у    | х      | у     | x    | у     | x      | у      |
| négy-elektródás              | nem-egyvonalú elrendezések | 15                        | dipól<br>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<br>dipól 54°   | 0   | 0    | 0.0058 | 0081  | 1    | 0     | 1.0058 | 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<br>null      | 0   | 0    | 1      | 0     | 0.5  | 0.125 | 0.5    | -0.125 |
|                              |                            | 21                        | három-<br>elektródás null | 0   | 0    | inf    | 0     | 1    | 0.125 | 1      | -0.125 |
| több mint négy<br>elektródás | egyvonalú<br>elrendezések  | 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-y                  | 0   | 0    | 0.67*  | 0     | 0.33 | 0     | 1      | 0      |

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

esetén tűnik jó megoldásnak a fókuszáló elrendezések használata, de ezt az állításomat még igazolni kellene. Ezzel a fentiekben a teljesség igénye nélkül néhány példát mutattam a paraméterérzékenység térképek használatának lehetőségeire.

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 paraméterérzékenység 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-elrendezésé (*Szalai et al. 2002*), az *II.2.15 ábrán* az 54°-os párhuzamos dipól elrendezés (*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-elektródás null-elrendezések paraméter-érzékenység térképei szerepelnek. Három fókuszáló elrendezés, az unipól- $\alpha$ , az unipól- $\beta$  és az unipól- $\gamma$  elrendezések paraméter-érzékenység térképeit pedig az *A15-17 ábrák* mutatják.



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

A nem-gradiens típusú nem-egyvonalú négyzetes elrendezések (A11 és A12 ábrák) és a két dipóldipól 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- $\alpha$  (A11 ábra) elrendezéseknek kettő. Amíg a dipól axiális null- (II.2.14 ábra), a három-elektródás null- (A14 ábra) és az unipól- $\alpha$  (A15 ábra) elrendezéseknek egy antiszimmetria tengelye, addig a négyzetes- $\gamma$  (A12 ábra) és a Schlumberger null (A13 ábra) elrendezéseknek két antiszimmetria tengelye is van.

#### 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 paraméterérzékenység értékei közvetlenül összevethetőek egymással. Bemutattam a PÉT-ek fő paramétereit, valamint megmutattam, hogyan érthető 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 e 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, Evjen 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 értékenek. (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<sub>e</sub>/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- $\alpha$ , a módosított unipól és két felszíni laterológ elrendezés esetére számította. *Roy (1972)* az  $\alpha$ -,  $\beta$ -, és  $\gamma$ -típusú elrendezések (többek között a Wenner- $\beta$ , a Wenner- $\gamma$  és a fél-Wenner- $\alpha$ ) 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) elrendezésé, amely a legnagyobb kutatási mélység értékű a nem-dipól elrendezések között. A PP elrendezések kutatási mélység értékei meghaladják a fókuszáló elrendezésekkéit is. Az elrendezések kutatási mélység értékei egyfajta ökölszabályként 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  $\vartheta$  szög hatására. Sugárirányú-, érintőirányú-, merőleges-, és párhuzamos DP elrendezések MK függvényét számítottam a  $0^{\circ} \le \vartheta \le$ 90° 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  $\vartheta$ -tól. A merőleges DP elrendezés Kutatási Mélység (KuM) értéke hozzávetőleg  $z^*/R = 0.20$  (ze/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  $0^{\circ} \le \vartheta \le 40^{\circ}$ , illetve a  $80^{\circ} \le \vartheta \le 90^{\circ}$  tartományokban. A köztük lévő  $0^{\circ} < \vartheta < 80^{\circ}$  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  $\mathcal{G}$  függvényében

**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  $\mathcal{P}$  szögének függvényében

| elrende-               | elrendezések je<br>értél                                                                                                                                                                   | llegzetes KuM<br>kkel                                                                                                   | instabil KuM<br>értékű                          | KuM érték nélküli elrendezések                                                                                                                                                                                            |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| zések                  | axiális-<br>típu                                                                                                                                                                           | ekvatoriális-<br>Isú                                                                                                    | elrendezések                                    |                                                                                                                                                                                                                           |
| elrendezés<br>helyzete | <ul> <li>sugárirányú<br/>elrendezés<br/>(ha 𝔅 ≠ 90°)</li> <li>merőleges<br/>elrendezés<br/>(ha 𝔅 ≠ 0° és<br/>𝔅 ≠ 90°)</li> <li>párhuzamos<br/>elrendezés, ha<br/>(0° ≤ 𝔅 ≤ 40°)</li> </ul> | <ul> <li>- érintőirányú<br/>elrendezés<br/>(ha θ ≠ 0°)</li> <li>- párhuzamos<br/>elrendezés, ha<br/>(θ≥ 80°)</li> </ul> | - párhuzamos<br>elrendezés, ha<br>40° < θ < 80° | dipól axiális null-elrendezés,<br>azaz:<br>- sugárirányú elrendezés <i>9</i> =90°-nál<br>- érintőirányú elrendezés <i>9</i> =0°-nál<br>- merőleges elrendezés <i>9</i> =0°-nál<br>- merőleges elrendezés <i>9</i> =90-nál |
| z*/R                   | 0.19 - 0.20                                                                                                                                                                                | $0.25 - 0.2\overline{6}$                                                                                                | erősen változó                                  |                                                                                                                                                                                                                           |
| ze/R                   | 0.24 - 0.26                                                                                                                                                                                | 0.38 - 0.39                                                                                                             | erősen változó                                  |                                                                                                                                                                                                                           |

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.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:

$$\operatorname{DIC}(z_{C}) = \frac{100}{\pi} \frac{1}{G^{\text{hom}}} k a^{3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G^{cube} dx_{c} dy_{c}$$
(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- $\alpha$  és a Baker elrendezések (*II.3.5b ábra*), valamint három **fókuszált elrendezés**: az unipól- $\alpha$ , az unipól- $\beta$  és az unipól- $\gamma$  elrendezések (*II.3.5c ábra*) **normált mélység-érzékenység karakterisztika függvényeit** mutatom be. (Ilyen normált mélység-érzékenység függvény – ahol a homogén féltér felett mért értékkel normálunk – nem volt megadható a DP elrendezések esetében, mivel a dipól axiális null-elrendezés miatt több esetben is nullával kellett volna normálnunk.) 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 ze/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- $\alpha$  elrendezés esetében 0.105, a Wenner- $\beta$  esetében pedig mindössze 0.1, hogyha csak az ismert és a sokelektródás rendszerekben gyakran alkalmazott elrendezéseket tekintjük. Kiszámítva az általunk bevezetett  $\gamma_{11n}$  elrendezések kutatási mélység értékeit is azok értéke n = 1, 2, 3, 4, 6 és 8 esetére sorra: 0.115, 0.16, 0.185, 0.215, 0,218 és 0.22. n = 4 felett tehát a  $\gamma_{11n}$  elrendezések kutatási mélység értéke nagyobb, mint a legjobb egyéb egyvonalú négyelektródás elrendezésé. Ráadásul tovább közelítve a MAN elrendezés geometriája felé (n =98) ez az érték: 0.245. Elmondhatjuk tehát, hogy a  $\gamma_{11n}$  elrendezések nagyobb n értékek esetén konzekvensen jelentősen nagyobb kutatási mélység értékkel rendelkeznek, mint a legtöbb hagyományos négyelektródás elrendezésénél is jobbnak bizonyultak, amennyiben n értékke rendelkező dipól axiális elrendezésénél is jobbnak bizonyultak, amennyiben n értéke

| <b>II.3.2 táblázat.</b> A felszíni elektróda elrendezések $z^*/R$ és $z_e/R$ kutatási mélység értékei az A, B, M és N elektródák $(x, y)$                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| pozícióival. $\alpha 10, \beta 45, \gamma 45, \gamma 40, \text{ és } \gamma 10$ az elrendezés típusára ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) és az elektródák helyzetére utalnak (lásd II.1.3 |
| ábra). Vastagon szedve azon elrendezések kutatási mélység értékei, amelyeket újonnan számítottam. A főkuszáló elrendezés                                                            |
| esetében a * karakter azonos előjelre utal                                                                                                                                          |

|          |         |        | No. | Elrendezés neve                                           | z*/R     | z <sub>e</sub> /R | XA | УА  | X <sub>B</sub> | Ув   | x <sub>M</sub> | Ум  | x <sub>N</sub> | УN   |
|----------|---------|--------|-----|-----------------------------------------------------------|----------|-------------------|----|-----|----------------|------|----------------|-----|----------------|------|
|          |         | sú     | 1   | Schlumberger (a45)                                        | 0,125    | 0,19              | 0  | 0   | 1              | 0    | 0,45           | 0   | 0,55           | 0    |
|          |         | típus  | 2   | Wenner (a33)                                              | 0,105    | 0,175             | 0  | 0   | 1              | 0    | 0,333          | 0   | 0,666          | 0    |
|          |         | -10    | 3   | α10                                                       | 0,035    | 0,075             | 0  | 0   | 1              | 0    | 0,1            | 0   | 0,9            | 0    |
|          |         |        | 4   | β45                                                       | 0,035    | 0,06              | 0  | 0   | 0,45           | 0    | 0,55           | 0   | 1              | 0    |
|          | s       |        | 5   | Wenner-ß (ß33)                                            | 0,1      | 0,14              | 0  | 0   | 0,333          | 0    | 0,666          | 0   | 1              | 0    |
|          | ródá    | ousú   | 6   | β10                                                       | 0,175    | 0,225             | 0  | 0   | 0,1            | 0    | 0,9            | 0   | 1              | 0    |
| és       | lekt    | β-tí   | 7   | dipól axialis (β20)                                       | 0,19     | 0,245             | 0  | 0   | 0,02           | 0    | 0,98           | 0   | 1              | 0    |
| elrendez | négye   |        | 8   | aszimmetrikus dipól<br>axialis (β10)                      | 0,145    | 0,19              | 0  | 0   | 0,1            | 0    | 0,7            | 0   | 1              | 0    |
| onale    |         |        | 9   | γ45                                                       | 0,035    | 0,06              | 0  | 0   | 0,55           | 0    | 0,45           | 0   | 1              | 0    |
| ált ve   |         | usú    | 10  | γ40                                                       | 0,057    | 0,06              | 0  | 0   | 0,6            | 0    | 0,4            | 0   | 1              | 0    |
| zsny     |         | γ-típ  | 11  | Wenner-y (y33)                                            | 0,115    | 0,2               | 0  | 0   | 0,666          | 0    | 0,333          | 0   | 1              | 0    |
| n fól    |         |        | 12  | γ10                                                       | 0,035    | 0,075             | 0  | 0   | 0,9            | 0    | 0,1            | 0   | 1              | 0    |
| nen      | Åe      | SP     | 13  | pól-dipól                                                 | 0,235    | 0,365             | 0  | 0   | 100            | 0    | 0.9            | 0   | 1              | 0    |
|          | by-t    |        | 14  | fél-Wenner                                                | 0,16     | 0,26              | 0  | 0   | 100            | 0    | 0,5            | 0   | 1              | 0    |
|          | Jolo    |        | 15  | fél twin-szerű                                            | 0,035    | 0,075             | 0  | 0   | 100            | 0    | 0,1            | 0   | 1              | 0    |
|          | 16 hất  |        |     | aszimmetrikus<br>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    |
| 2        |         |        | 18  | azimutális dipól $^{\circ} < \vartheta \leq 90^{\circ}$   | 0,25     | 0,385             |    |     |                |      |                |     | /              |      |
| zés      |         |        | 19  | merőleges dipól<br>0° < θ < 90°                           | 0,205    | 0,285             |    |     |                |      |                | /   |                |      |
| elrende  | lành    | Iodin- | 20  | radiális dipól<br>0° ≤ 9 < 90°                            | 0,195    | 0,255             |    |     |                |      | $\checkmark$   |     |                |      |
| ı vonalı | lànih   | odin   | 21  | párhuzamos dipól $0^{\circ} \le \vartheta \le 40^{\circ}$ | ~0,19    | ~0,24             |    |     |                | /    |                |     |                |      |
| cált nen |         |        | 22  | párhuzamos dipól<br>40° < 9 < 80°                         | instabil | instabil          |    | /   |                |      |                |     |                |      |
| ı fókusz |         |        | 23  | párhuzamos dipól $80^\circ \le \vartheta \le 90^\circ$    | ~0,255   | ~0,395            | /  | /   |                |      |                |     |                |      |
| nen      | làn     |        | 24  | aszimmetrikus<br>ekvatoriális bipól                       | 0,26     | 0,4               | 0  | 0,1 | 0              | -0,1 | 1              | 0,3 | 1              | -0,3 |
|          | j.<br>K |        | 25  | négyzetes-a                                               | 0,29     | 0,45              | 0  | 0   | 1              | 0    | 0              | 1   | 1              | 1    |
|          | 101     |        | 26  | Baker                                                     | 0,14     | 0,2               | 0  | 0   | 0,5            | 0    | 1              | 0   | 1              | 0,5  |
|          |         |        | 27  | unipól Wenner-α                                           | 0,08     | 0,11              | 0  | 0   | 1•             | 0    | 0,333          | 0   | 0,666          | 0    |
|          | zált    |        | 28  | unipól Wenner-β                                           | 0,115    | 0,2               | 0  | 0   | 0,333          | 0    | 0,666          | 0   | 1•             | 0    |
|          | ókus    |        | 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  $1.59 \pm 0.31$  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 hatékonynak, amint azt szokás gondolni. A  $\gamma_{11n}$  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 sokelektródás 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 nehézkesebb. 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 prizmák 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 szolgáltatta. 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 geoelktromos 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 ellenállásónak tekintett is volt. A későbbiekben kiszámítottam egy, a hagyományos négyelektródás elrendezésekből egy optimalizálási eljárással meghatározott konfiguráció, a Stummer elrendezés (*Stummer et al. 2004*), valamint a  $\gamma_{11n}$  (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 mélységekben 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.



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

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 előállíthatóak 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.

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  $\rho_{extr}$ -t tekintjük: nagy ellenállású model felett a maximum, kis ellenállású modell felett a minimum értéket, és számítjuk  $100|\rho_{extr} - \rho_1|/\rho_1$  értékét, ahol  $\rho_1$  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 model mélységét a fekete/fehér vonaláltal 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 látszólagos fajlagos ellenállás kép, illusztrálandó 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- $\alpha$  (W- $\alpha$ ), Wenner- $\beta$  (W- $\beta$ ), 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- $\alpha$ : 1605; W- $\beta$ : 1605; P-P: 2535; P-DP: 3675; DP-eq: 2535; DP-ax: 3625; St: 669;  $\gamma_{111}$ : 1617;  $\gamma_{112}$ : 1200;  $\gamma_{113}$ : 950;  $\gamma_{114}$ : 784;  $\gamma_{115}$ : 665;  $\gamma_{116}$ : 576;  $\gamma_{123}$ : 784;  $\gamma_{124}$ : 665;  $\gamma_{qnull}$ : 1200. Azaz **amennyiben**  $n \ge 2$ , **a**  $\gamma_{11n}$  **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  $\gamma$ -kvázi null-, és az optimalizált Stummer elrendezések. c) a  $\gamma_{11n}$  (itt csak n = 1 - 3) és egyéb vizsgált  $\gamma$  elrendezések. A teli csillagok a forrás, az üres csillagok a nyelő elektródákat, a körök a potenciálelektródákat 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- $\alpha$  elrendezések adták, míg a W- $\beta$  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** $|\rho_{extr}-\rho_1|/\rho_1$  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** $|\rho_{extr}-\rho_1|/\rho_1$  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** $|\rho_{extr} - \rho_1|/\rho_1$  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

|          | V                                                 | véges sz | élesség | ű (2D) 1 | nodelle    | k                   | Végtelen szélességű (1D) modellek |                      |     |               |                      |      |  |  |
|----------|---------------------------------------------------|----------|---------|----------|------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------|-----|---------------|----------------------|------|--|--|
|          | né                                                | gyzet al | apú ha  | sáb      |            | dy                  | dyke 1D vékonyréteg               |                      |     |               |                      |      |  |  |
|          | modell 1<br>(10 Ωm)         modell 2<br>(1000 Ωm) |          |         |          | mod<br>(50 | modell 3<br>(50 Ωm) |                                   | modell 4<br>(200 Ωm) |     | lell 5<br>Ωm) | modell 6<br>(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-a      | 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- $\alpha$  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*).

A vízszintesen kiterjedt modellek esetén a  $\beta$ -típusú elrendezések (DP-ax és W- $\beta$ ) a legjobbak. A legrosszabb eredményeket ismételten a P-P és a W- $\alpha$  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- $\alpha$  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.

|                 |                            | moo                         | dell                       |                             |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|                 | dy                         | yke                         | 1D vék                     | ony réteg                   |
| elren-<br>dezés | konduktív<br>(ρ2=50<br>Ωm) | rezisztív<br>(ρ2=200<br>Ωm) | konduktív<br>(ρ2=50<br>Ωm) | rezisztív<br>(ρ2=200<br>Ωm) |
| 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 f<br>ellenál        | ügg az<br>lás               | A KimM ı<br>→ ielentő      | nem függ<br>sen az          |

kontraszttól

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

ellenállás kontraszttól

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

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

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 prizmát 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  $100|\rho extr - \rho 1|/\rho 1$  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- $\alpha$  és a  $\gamma_{111}$  és a  $\gamma_{qnull}$  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  $\gamma_{114}$  elrendezés a nagyellenállású dyke és 5% zajszint esetére).

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

A  $\gamma_{123}$ -, és a  $\gamma_{124}$  elrendezések KimM értékei viszont nem nagyobbak a legjobb hagyományos elrendezésekéinél, sőt a  $\gamma_{qnull}$  elrendezés KimM értéke még kisebb is. Utóbbi bizonyítja, hogy egy elrendezés kis homogén féltér 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  $\gamma_{11n}$  elrendezések képesek a legnagyobb KimM értékeket produkálni az összes vizsgált elrendezés közül és az eltérés a legjobb hagyományos elrendezés és a  $\gamma_{11n}$  elrendezések KimM értékei között jelentős is lehet.



II.4.8 ábra. A prizma modell kis- (a), és nagyellenállású (b) változataihoz tartozó 100|ρ<sub>extr</sub> - ρ<sub>1</sub>|/ρ<sub>1</sub> 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 paraméterektől. 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 aW- $\alpha$  elrendezések produkálták. Az ilyen keskeny inhomogenitások esetén a W- $\beta$  és a DP-eq elrendezések köztes eredményeket adtak. Laterálisan kiterjedt modellek esetén a  $\beta$ -típusú négy-elektródás elrendezések (DP-ax és W- $\beta$ ) voltak a legjobbak, legrosszabbaknak pedig ismételten a P-P és a W- $\alpha$  elrendezések bizonyultak.



**II.4.9 ábra.** A dyke modell kis- (a), és nagyellenállású (b) változataihoz tartozó  $100|\rho_{extr} - \rho_1|/\rho_1$ értékek a speciális, nemhagyományos 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 bolddal szedve. b) a γ elrendezések KimM értékei. Azok az értékek, amelyek meghaladják a legnagyobb hagyományos elrendezés értéket pirossal és bolddal vannak szedve.

|       | Négyzetes<br>prizma,<br>konduktív (1) |      | Végyzetes Négyzetes<br>prizma, prizma,<br>nduktív (1) rezisztív (2) |      | Dyke<br>konduktív (3) |      | Dyke<br>rezisztív (4) |      | Vékonyréteg<br>konduktív (9) |      | Vékonyréteg<br>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<br>prizma,<br>konduktív (1) |      | Négyzetes Négyzetes<br>prizma, prizma,<br>konduktív (1) rezisztív (2) |      | Dy<br>kondul | Dyke<br>konduktív (3) |      | Dyke<br>rezisztív (4) |      | iyréteg<br>ktív (9) | Vékonyréteg<br>rezisztív (8) |      |
|-------|---------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------|------|--------------|-----------------------|------|-----------------------|------|---------------------|------------------------------|------|
| zaj   | 5%                                    | 10%  | 5%                                                                    | 10%  | 5%           | 10%                   | 5%   | 10%                   | 5%   | 10%                 | 5%                           | 10%  |
| Wγ111 | 3.65                                  | 2.33 | 4.4                                                                   | 1.97 | 1.8          | -                     | 6.74 | 1.76                  | 4.88 | 2.46                | 14.73                        | 4.14 |
| Wγ112 | 6.93                                  | 5.1  | 8.64                                                                  | 4.13 | 5.4          | 3.18                  | 25   | 5.05                  | 5.6  | 2.64                | -                            | 4.41 |
| Wγ113 | 9.1                                   | 7.2  | 14                                                                    | 5.42 | 7.98         | 5.72                  | -    | 5.9                   | 6.02 | 2.68                | -                            | 4.51 |
| Wγ114 | 10.15                                 | 8.46 | -                                                                     | 7.47 | 9.1          | 7.13                  | -    | 7.11                  | 6.77 | 2.9                 | -                            | 4.44 |
| Wγ115 | 10.86                                 | 9.25 | -                                                                     | 8.71 | <b>9.84</b>  | 8                     | -    | 8.25                  | 7.86 | 2.81                | -                            | 4.55 |
| Wγ116 | 11.23                                 | 9.64 | -                                                                     | 9.31 | 10.23        | 8.42                  | -    | 8.82                  | 9.71 | 2.83                | -                            | 8.82 |
| Wγ123 | 5.46                                  | 3    | 4.2                                                                   | 2.23 | 2.94         | 1.3                   | 4.76 | 1.49                  | 5.07 | 2.58                | 10.97                        | 4.32 |
| Wγ124 | 5.04                                  | 3.28 | 4.45                                                                  | 2.36 | 3.36         | 1.61                  | 4.47 | 1.62                  | 4.65 | 2.58                | 9.16                         | 4.3  |
| WyQ0  | 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 jósági 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- $\beta$  elrendezés is, ami a 3. helyet foglalja el az elrendezések KimM listáján, míg a nem  $\beta$ -típusú DP-eq és Wenner- $\alpha$  elrendezések a sor végén vannak. Megjegyzendő, hogy a három-elektródás elrendezések beépítése a sokelektródás 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-elektródás elrendezésé. Eredményeink megerősítik *Candansayar* (2008) konklúzióját.

A  $\gamma_{11n}$  elrendezések ( $n \ge 2$  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 négyelektródás 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.

Célom 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 Earthlmager 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 valóságostól, 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- $\alpha$ , Wenner- $\beta$ , 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 négyelektródás 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 elektródás rendszert használva a Wenner- $\alpha$ , Wenner- $\beta$ , 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 elektródás rendszerből úgy csináltunk 60 elektródást, 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- $\alpha$  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.



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





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



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



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



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



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



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



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- $\alpha$ , 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; ily módon ezek a legjobbak a kimutathatóságot tekintve. Felbontóképesség tekintetében a Stummer, a Wenner- $\beta$  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- $\beta$  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- $\alpha$ , Wenner- $\beta$  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.

| a modell<br>száma | zajszint | elrendezés<br>típus | 1. kimutathatóság<br>és pozicionálás | 2.<br>geometria | 3.<br>felbontás | 1, 2 és 3<br>átlaga | ajánlott<br>elrendezés |
|-------------------|----------|---------------------|--------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|------------------------|
|                   |          | Wenner- $\alpha$    | 10                                   | 8               | *               | 9,0                 | Wenner- $\alpha$       |
|                   |          | Wenner- $\beta$     | 10                                   | 8               | *               | 9,0                 | Wenner- $\beta$        |
|                   | 00/      | PP                  | 10                                   | 7               | *               | 8,5                 |                        |
|                   | 0%       | P-Dp                | 10                                   | 8               | *               | 9,0                 | P-Dp                   |
| -                 |          | Dp-Dp               | 10                                   | 8               | *               | 9,0                 | Dp-Dp                  |
| ode               |          | Stummer             | 10                                   | 8               | *               | 9,0                 | Stummer                |
| Ë                 |          | Wenner- $\alpha$    | 3                                    | 1               | *               | 2,0                 |                        |
| 1.                |          | Wenner- $\beta$     | 8                                    | 4               | *               | 6,0                 |                        |
|                   | 50/      | PP                  | 10                                   | 6               | *               | 8,0                 |                        |
|                   | 3%       | P-Dp                | 9                                    | 7               | *               | 8,0                 |                        |
|                   |          | Dp-Dp               | 10                                   | 9               | *               | 9,5                 | Dp-Dp                  |
|                   |          | Stummer             | 9                                    | 9               | *               | 9,0                 | Stummer                |
|                   | 0%       | Wenner- $\alpha$    | 7                                    | 8               | *               | 7,5                 | Wenner- $\alpha$       |
|                   |          | Wenner- $\beta$     | 6                                    | 5               | *               | 5,5                 |                        |
|                   |          | PP                  | 0                                    | 0               | *               | 0,0                 |                        |
|                   |          | P-Dp                | 8                                    | 7               | *               | 7,5                 | P-Dp                   |
| I                 |          | Dp-Dp               | 6                                    | 6               | *               | 6,0                 |                        |
| ode               |          | Stummer             | 8                                    | 6               | *               | 7,0                 | Stummer                |
| B                 |          | Wenner- $\alpha$    | 0                                    | 0               | *               | 0,0                 |                        |
| 6                 |          | Wenner- $\beta$     | 7                                    | 5               | *               | 6,0                 |                        |
|                   | 5%       | PP                  | 2                                    | 2               | *               | 2,0                 |                        |
|                   | 570      | P-Dp                | 4                                    | 3               | *               | 3,5                 |                        |
|                   |          | Dp-Dp               | 9                                    | 8               | *               | 8,5                 | Dp-Dp                  |
|                   |          | Stummer             | 9                                    | 8               | *               | 8,5                 | Stummer                |
|                   |          | Wenner- $\alpha$    | 5                                    | 6               | 2               | 4,3                 |                        |
|                   |          | Wenner- $\beta$     | 6                                    | 6               | 3               | 5,0                 |                        |
| _                 | 0%       | PP                  | 6                                    | 4               | 3               | 4,3                 |                        |
| del               | 070      | P-Dp                | 6                                    | 5               | 3               | 4,7                 |                        |
| mo                |          | Dp-Dp               | 9                                    | 7               | 1               | 5,7                 | Dp-Dp                  |
| ŝ                 |          | Stummer             | 8                                    | 6               | 4               | 6,0                 | Stummer                |
|                   |          | Wenner-α            | 2                                    | 2               | 0               | 1,3                 |                        |
|                   | 5%       | Wenner- $\beta$     | 4                                    | 4               | 3               | 3,7                 |                        |
|                   |          | PP                  | 8                                    | 8               | 2               | 6,0                 |                        |

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) SZALAI S

|      |      | 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         |
|      |      | Wenner-α         | 8  | 4  | 0 | 4,0 |                 |
|      |      | Wenner-β         | 10 | 8  | 0 | 6,0 | Wenner-β        |
|      | 00/  | PP               | 7  | 8  | 0 | 5,0 |                 |
|      | 0%   | P-Dp             | 7  | 9  | 0 | 5,3 |                 |
| II   |      | Dp-Dp            | 9  | 7  | 0 | 5,3 |                 |
| ode  |      | Stummer          | 10 | 9  | 0 | 6,3 | Stummer         |
| ш    |      | Wenner-α         | 3  | 2  | 0 | 1,7 |                 |
| 4.   |      | Wenner-β         | 9  | 6  | 0 | 5,0 | Wenner- $\beta$ |
|      | 504  | PP               | 8  | 8  | 0 | 5,3 | PP              |
|      | J 70 | P-Dp             | 6  | 4  | 0 | 3,3 |                 |
|      |      | Dp-Dp            | 8  | 5  | 0 | 4,3 |                 |
|      |      | Stummer          | 9  | 8  | 0 | 5,7 | Stummer         |
|      |      | Wenner-α         | 8  | 7  | 0 | 5,0 |                 |
|      |      | Wenner-β         | 9  | 8  | 3 | 6,7 | Wenner- $\beta$ |
|      | 004  | PP               | 9  | 8  | 1 | 6,0 |                 |
|      | 070  | P-Dp             | 8  | 7  | 1 | 5,3 |                 |
| II   |      | Dp-Dp            | 10 | 8  | 3 | 7,0 | Dp-Dp           |
| ode  |      | Stummer          | 10 | 10 | 5 | 8,3 | Stummer         |
| 5. m |      | Wenner-α         | 7  | 6  | 2 | 5,0 |                 |
|      |      | Wenner-β         | 9  | 8  | 0 | 5,7 |                 |
|      | 5%   | PP               | 6  | 7  | 0 | 4,3 |                 |
|      | 570  | P-Dp             | 6  | 6  | 1 | 4,3 |                 |
|      |      | Dp-Dp            | 7  | 5  | 2 | 4,7 |                 |
|      |      | Stummer          | 10 | 9  | 4 | 7,7 | Stummer         |
|      |      | Wenner-α         | 1  | 0  | 0 | 0,3 |                 |
|      |      | Wenner-β         | 0  | 0  | 0 | 0,0 |                 |
|      | 0%   | PP               | 5  | 4  | 0 | 3,0 |                 |
|      | 070  | P-Dp             | 7  | 4  | 2 | 4,3 | P-Dp            |
| ell  |      | Dp-Dp            | 1  | 1  | 0 | 0,7 |                 |
| lode |      | Stummer          | 5  | 5  | 2 | 4,0 | Stummer         |
| m .  |      | Wenner- $\alpha$ | 2  | 2  | 0 | 1,3 |                 |
| 9    |      | Wenner-β         | 5  | 5  | 0 | 3,3 |                 |
|      | 5%   | PP               | 4  | 4  | 0 | 2,7 |                 |
|      | 570  | P-Dp             | 4  | 4  | 0 | 2,7 |                 |
|      |      | Dp-Dp            | 6  | 6  | 0 | 4,0 | Dp-Dp           |
|      |      | Stummer          | 4  | 4  | 0 | 2,7 |                 |
|      |      | Wenner-α         | 4  | 4  | * | 4,0 |                 |
|      |      | Wenner-β         | 2  | 2  | * | 2,0 |                 |
| _    | 0%   | PP               | 4  | 2  | * | 3,0 |                 |
| del  | 070  | P-Dp             | 2  | 1  | * | 1,5 |                 |
| mo   |      | Dp-Dp            | 10 | 8  | * | 9,0 | Dp-Dp           |
| 7.   |      | Stummer          | 10 | 7  | * | 8,5 | Stummer         |
| ,    |      | Wenner-α         | 2  | 2  | * | 2,0 |                 |
|      | 5%   | 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         |
|     |     | Wenner-α         | 4  | 5 | 4 | 4,3 |                 |
|     |     | Wenner-β         | 4  | 4 | 6 | 4,7 |                 |
|     | 004 | PP               | 3  | 3 | 3 | 3,0 |                 |
|     | 0%  | P-Dp             | 5  | 5 | 5 | 5,0 |                 |
| IF  |     | Dp-Dp            | 5  | 4 | 3 | 4,0 |                 |
| ode |     | Stummer          | 7  | 7 | 7 | 7,0 | Stummer         |
| m   |     | Wenner- $\alpha$ | 3  | 3 | 1 | 2,3 |                 |
| 8.  |     | Wenner-β         | 6  | 6 | 6 | 6,0 | Wenner- $\beta$ |
|     | 50/ | PP               | 3  | 3 | 1 | 2,3 |                 |
|     | 5%  | 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  $\beta$ -típusú konfigurációk (Dp-Dp, Wenner- $\beta$  és P-Dp) hatékonyabbnak bizonyultak, mint a Wenner- $\alpha$  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  $\beta$ -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  $\beta$ -típusú konfigurációknál is nagyobb KimM-ű  $\gamma_{m11n}$  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 vetettem össze hat különböző elektróda konfiguráció esetére. Az invertált képeknek az eredeti modellel való összehasonlítására egy minősítési rendszert hoztam létre, ami alapján a következőket állíthatjuk:

a) Az inverzió minőségét meghatározó legfontosabb paraméter a modell kimutathatósága. Minden további paraméternek ez az alapja.

b) A hagyományos elrendezések közül a  $\beta$ -típusúak (Dp-Dp, P-Dp és Wenner- $\beta$ ) hatékonyabbnak bizonyultak, mint a Wenner- $\alpha$  és a P-P elrendezések és a DP elrendezés sokkal hatékonyabb volt, mint bármely más vizsgált hagyományos elrendezés (*II.5.2 táblázat*).

c) 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.

d) Kimutattam, hogy a leképezés minőségét döntően meghatározza adott elrendezés KimM értéke.

#### Szalai S

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

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

### III. A egyvonalú null-elrendezések

### Szalai et al. (2004) alapján

Az egyvonalú null-elrendezéseket csak annyira tárgyalom részletesen, amennyire azt az értekezés fókuszában álló  $\gamma_{11n}$  elrendezések tanulmányozása megkívánja. Kikerülhetetlen ugyanakkor az áttekintésük a dolgozat jelen pontján, mert ezek az elrendezések képezték a hidat a kvázi nullelrendezések, így a  $\gamma_{11n}$  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  $\gamma_{null}$  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  $\gamma_{11n}$  elrendezés-sorozat szélső esetevan feltüntetve. Többek között ez is indokolja a MAN elrendezés diszkusszióját. Részletesebben itt is csak a MAN 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 Dp-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* ismertetettnek megfelelő összehasonlításba sem volt bevehető ez az elrendezés.

Már a fentiekből is látszik, hogy a MAN elrendezés esetében a geometriai koefficiens végtelen értéke számos problémához vezet. Ezt az elrendezést már emiatt is teljesen máshogy kell kezelni, mint a nem-null-elrendezéseket. Méréseket minden további nékül végre lehet hajtani ezzel az elrendezéssel is, de el kell kerülni a geometriai faktorral 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 semmiféle 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



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

(0-8 m és 18-25 m-en a felső, terepi skálán) tökéletesen elkülönülnek a háttérértékektől (8-18 men). 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.

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  $\Omega$  értéket, szemben a jel 300  $\Omega$  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  $\gamma_{null}$  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



III.3 ábra. Finnországban mért és modellezett görbék. a) MAN. b) Wenner. c)  $\gamma_{nul}$  elrendezéssel mérve (Szalai et al. 2004)

Mindezek alapján kijelenthető, hogy indokolatlannak tekinthető az elektróda pozicionálási hibákhoz kötődő aggodalom. Természetesen pontosabb pozícionálás – 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 féltér 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.

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 előbbiek esetében a homogén féltér felett mérhető jelre tevődik rá, míg a null-elrendezés esetében az önállóan jelenik meg, mivel a homogén féltér 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 nemnull-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 sokelektródás 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** γ11n **elrendezéseket**. Ezeknek az elméletét és a velük kapcsolatos kutatási eredményeimet a következő fejezettől kezdve ismertetem.

### IV. A kvázi null-elrendezések

### IV.1. Bevezetés

A  $\gamma_{11n}$  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 potenciálelektródát 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 féltér 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- $\gamma$  elrendezés felé, célszerűnek tűnt a MAN és a Wenner- $3\gamma$ , azaz a null-, és a hagyományos elrendezések kösjzötti teljes átmenet mevizsgálása, amit a fokozatosan csökkenő *n* értékű elrendezések tesznek lehetővé. Ezeket az elektródák közötti távolságoknak megfelelően  $\gamma_{11n}$  elrendezéseknek neveztem, utalva arra, hogy az első két elektródatávolság megegyezően egységnyi, míg az utolsó ezek *n*-szerese.

A  $\gamma_{11n}$  elrendezések sorozatának (n = 1 - 8) vizsgálatától azt vártam, hogy látható lesz az átmenet a hagyományos elrendezésektől a null-elrendezések felé, ami által maguk a nullelrendezések 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  $\gamma_{11n}$  elrendezésekre is elvégezzem. A  $\gamma_{118}$  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  $\gamma_{118}$  és így a többi nagy *n* értékű  $\gamma_{11n}$  elrendezés sok más szempontból is a MAN elrendezéshez hasonlóan fog viselkedni.

A *II.3 fejezetben* megmutattam, hogy  $\gamma_{11n}$  elrendezések kutatási mélység értékei n = 4 felett nagyobbak, mint a legjobb egyéb négyelektródás elrendezésé. Talán még nagyobb jelentőségű a  $\gamma_{11n}$  elrendezéseknek az a tulajdonsága, hogy KimM értékük ( $n \ge 2$  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.



IV.1.1 (korábban II.1.12) ábra. A y<sub>11n</sub> és y<sub>null</sub> elrendezések. Csillaggal jelölve az áram-, teli körrel a potenciál-elektródák

Magától adódott volna ezek után, hogy a *II.4 fejezetben* leírt vizsgálatokat is végezzük el a  $\gamma_{11n}$  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.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  $\gamma_{11n}$  elrendezések mellett tükrözéssel kialakított párjukkal, a  $\gamma_{11n}$ elrendezéssel is foglalkozni. Ennek oka az, hogy a  $\gamma_{11n} - \gamma_{11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  (illetve **tükörpár**) elrendezésként (*m*-mirrored) fogok hivatkozni.

Elsőként a *IV.2.3 ábrával* szándékozom illuszrálni a nyereséget, amivel a  $\gamma_{m11n}$  elrendezés használata jár. Az ábrán három kis keresztmetszetű, kis fajlagos ellenállású (10  $\Omega$ m a 100  $\Omega$ m-es fajlagos ellenállású féltérben) hasábból álló modell felett  $\gamma_{116}$ , illetve  $\gamma_{m116}$  elrendezésekkel kapott képeket mutatunk be. Jól látható, hogy a  $\gamma_{116}$  elrendezést annak tükörképével (a  $\gamma_{116}$  elrendezéssel) közösen alkalmazva kapott  $\gamma_{m116}$  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  $\gamma_{m116}$ , mint a  $\gamma_{116}$  elrendezéssel.



IV.2.2 ábra. A y<sub>11n</sub> elrendezés és annak tükrözött változata, a y<sub>11n</sub> együtt adják a y<sub>m11n</sub> elrendezést. A méréseket mind a y<sub>11n</sub>, mind pedig a y<sub>11n</sub> 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 féltérben

A  $\gamma_{m11n}$  elrendezésekkel végrehajtott további **modellvizsgálatok is arra vezettek, hogy a** leképezés minőségét tekintve a  $\gamma_{m11n}$  tükörpár elrendezés akár jelentősen jobb is lehet az eredeti  $\gamma_{11n}$  elrendezésnél. Ez legszembetűnőbben a mélyebben lévő hatók esetén következett be. Fentiek ellenére a kvázi null-elrendezésekkel végzett vizsgálatok e korai fázisában a  $\gamma_{m11n}$ elrendezésekkel kapott eredmények mellett indokoltnak tartom az egyes modellek esetén még a  $\gamma_{11n}$ 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 jegyeznem, 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.

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  $\gamma_{11n}$  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 féltérben 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  $\gamma_{11n}$  elrendezések esetén n = 1 - 4 tartományban (*IV.2.5 ábra*).



IV.2.4 ábra. A numerikus vizsgálatok során használt elrendezések

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  $\Omega$ m-es prizma esetében (*IV.2.5 ábra* bal oszlopa) mindegyik elrendezés detektálja a testet, de a Dp-Dp, a  $\gamma_{112}$  és a  $\gamma_{112}$  elrendezések kivételével nagyon szétkenődve, nagy bizonytalansággal ( $\gamma_{111}$ , P-Dp), vagy nagy kiterjedésű álamonáliával együtt (St,  $\gamma_{113}$ ). A 160  $\Omega$ 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  $\Omega$ m-es prizma esetében (*IV.2.5 ábra* jobb oszlopa) már csak a  $\gamma_{114}$  elrendezés ad jó, valamint a  $\gamma_{113}$  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  $\gamma_{114}$  elrendezés kivételével minden esetben az álanomáliák maguk is hasonló nagyságúak voltak, mint a valós anomália.

Összességében tehát **csak a**  $\gamma_{114}$  **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  $\Omega$ m a 100  $\Omega$ m háttérértékkel szemben), akkor emellett még valamennyire a Dp-Dp és annál meggyőzőbben, bár álanomáliáktól jelentősen terhelten a  $\gamma_{112}$  elrendezés adott elfogadható eredményt. A  $\gamma_{113}$  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**  $\gamma_{11n}$  elrendezések, illetve azok közül **valamely(ek) (esetünkben főleg a**  $\gamma_{114}$  elrendezések) jobbak a hagyományos elrendezéseknél.



IV.2.5 ábra. Hasáb alakú hatók képe néhány hagyományos és néhány γ<sub>11n</sub> elrendezés esetén 5%-os hibával terhelt adatrendszerekre. 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  $\gamma_{112}$ ,  $\gamma_{113}$ , és  $\gamma_{112}$  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 vethetőek 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 kevéssé gazdaságos.



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

A *IV.2.7 ábra* vízszintes felbontóképességi vizsgálatok eredményeit mutatja a Wenner- $\alpha$ , a Stummer, a  $\gamma_{11n}$ , és a  $\gamma_{m11n}$  elrendezések (n = 1 - 7) esetére. A Wenner- $\alpha$  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  $\gamma_{11n}$  és  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  elrendezések, és a  $\gamma_{11n}$  elrendezések is határozottan jobbnak bizonyultak az optimalizált Stummer elrendezésnél is, nem beszélve a Wenner- $\alpha$  elrendezésről.


IV.2.7 ábra. Vízszintes felbontóképességi vizsgálat



IV.2.8 ábra. Vertikális felbontóképességi vizsgálat

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 (kivétel  $\gamma_{117}$ ), 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  $\gamma_{116}$  és a  $\gamma_{m113}$ ,  $\gamma_{m116}$ ,  $\gamma_{m117}$  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**  $\gamma_{11n}$ , illetve még inkább a  $\gamma_{m11n}$  elrendezések némelyike, esetünkben a  $\gamma_{m113}$  elrendezés különösen alkalmasnak bizonyult.

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 valóságközeli modellt, a "Rés szigetelő aljzaton" modellt mutatja be. A W- $\alpha$  elrendezés gyakorlatilag alkalmatlannak bizonyult a rés kimutatására, de még a hagyományos elrendezésekből optimalizált Stummer elrendezés is csak nagyon elkenten, nagy bizonytalansággal tudta megadni a rés helyét. A  $\gamma_{m11n}$  elrendezések sokkal élesebb anomáliával jelezték a rést, különösen a  $\gamma_{m113}$ . Ebben az esetben a teljes  $\gamma_{m11n}$  elrendezés sorozaton megfigyelhető, hogyan jelentéktelenedik el fokozatosan az 1D hatás a nagyobb *n* értékű elrendezések felé haladva.

Most egy olyan modellt vizsgálunk, ami a  $\gamma_{11n}$  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 háttéré 10 Ωm) és nagy kiterjedésű anomáliák zajterhelés nélküli adatok esetében a Stummer elrendezéssel kapott képen jobban kivehetők, mint a legtöbb  $\gamma_{m11n}$  elrendezés esetén. Jóllehet az alsó, a kimutathatóság szempontjából legkritikusabb anomália a  $\gamma_{m11n}$  elrendezések nagy részénél 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  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  elrendezések ráadásul megtartják még akkor is, ha jelen vannak felszínközeli hatók, csak azok az első oszlopbeli modell hasáboknál kisebb hatással vannak a felszíni potenciáltérre (*IV.2.11 ábra jobb oszlopa*). E modell esetében még a felszínközeli hatókat is jobban "visszaadták" a  $\gamma_{11n}$ elrendezések, mint a hagyományosak. A legjobb képet itt a  $\gamma_{m116}$  elrendezéssel kaptuk.



IV.2.10 ábra. "Rés szigetelő aljzaton" modell



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



IV.2.12 ábra. A különböző  $\gamma_{m11n}$  elrendezések kombinálásában rejlő lehetőségek

A *IV.2.12 ábra* azt hivatott illusztrálni, **milyen lehetőségek vannak a különböző**  $\gamma_{m11n}$ elrendezések kombinálásában. Míg láthatóan a legjobb hagyományos elrendezés, a St elrendezés is csak a felszínhez közelebb eső testek kimutatására volt képes, addig a  $\gamma_{113}$  elrendezés a lefelé húzódó anomáliájával már mutat arra utaló jeleket, hogy esetleg lejjebb is lehetnek hatók, a  $\gamma_{m113}$ elrendezés pedig azt már markánsan mutatja az alul két szélen lévő inhomogenmitások esetén. Ebben az esetben két  $\gamma_{m11n}$  elrendezés, a  $\gamma_{m113}$  és a  $\gamma_{m117}$  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 középen 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 eredmének 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 pozícionálva 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  $\gamma_{11n}$  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 procedúra alkalmazásával, több elrendezéssel kapott eredmények felhasználásával az egyébként gyenge anomáliakép jelentősen javítható volt. Különösen igaz volt ez a  $\gamma_{m11n}$  elrendezéseket használva.

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

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

Illusztráltam a nagyobb n értékű  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  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 pozícionálva azt. Az általa szolgáltatott kép minősége messze meghaladta az összes hagyományos elrendezés által nyújtott képét.

A  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  elrendezések előnyös oldala abból nem derülne ki. Ha pedig ez alatt a mélység alatt lenne, akkor már a  $\gamma_{m11n}$  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, dimenzióérzékenységét, 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  $\gamma_{m11n}$  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, jóllehet 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 hajszálcsövességnek köszönhetően felfelé is mozoghatott a mindenkori 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

#### Szalai S

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 elképzelhetőek.

Adottak voltak tehát a terepihez hasonló körülmények, ezek után még a vizsgálni kívánt modell **kontrollálhatósságát** 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  $4*10^{-5} \Omega$ m-nek, a homogén féltérét 40  $\Omega$ 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 \* 1 \* 0.5 m méretű műanyag tartályba töltöttük a homokot. Ez a tartály már elég nagynak 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  $\gamma_{m11n}$  (n = 2 - 7) elrendezéseket, valamint még a  $\gamma_{qnul}$ -, és  $\gamma_{313}$  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 ismételten 3 iteráció történik. Ezeket a lépéseket ismételjük 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  $\lambda$  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 esettben 30  $\Omega$ m 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  $\gamma_{112}$  elrendezés jól lokalizálja a hatót a numerikus modellezés esetén, addig a  $\gamma_{211}$  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 érzékenységük 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  $\gamma_{m112}$  elrendezés viszont teljesen helyére teszi a hatót és erősebb anomáliával, illetve szinte anomáliamentesen jeleníti meg azt. Ily módon a  $\gamma_{m112}$  elrendezés határozottan jobb képet ad a  $\gamma_{112}$  elrendezésnél és meggyőzőbbet a  $\gamma_{211}$  elrendezésnél is.

Az **analóg** modellezés során hasonló képet kaptunk annyi különbséggel, hogy a  $\gamma_{112}$  elrendezés esetében valamivel jobb, a  $\gamma_{211}$  elrendezés esetében valamivel rosszabb képet kaptunk és egy kicsivel a  $\gamma_{m112}$  elrendezés képe is kevéssé meggyőző. Ennek azonban nagy valószínűséggel az az oka, hogy a felszínközeli tartomány nedvesebb (az elekródák 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  $\gamma_{117}$  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  $\gamma_{11n}$  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- $\alpha$ -nél 135 m, W- $\beta$ -nél 3.43 m,  $\gamma_{113}$  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.

A *IV.3.5 ábra* azt mutatja, hogyan változik a Dp-Dp és a  $\gamma_{113}$  elrendezések leképezési képessége a lemez modell mélységének függvényében. Jól látható hogyan **romlik az a Dp-Dp elrendezés** esetében a mélységgel, a  $\gamma_{113}$  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.3.2 ábra.** A  $\gamma_{11n}$  és a  $\gamma_{n11}$  elrendezések együttes alkalmazásának jelentősége a  $\gamma_{112}$  és  $\gamma_{211}$  elrendezések példáján a numerikus és az analóg modellmérések esetén



**IV.3.3 ábra.** A  $\gamma_{11n}$  és a  $\gamma_{n11}$  elrendezések együttes alkalmazásának jelentősége a  $\gamma_{117}$  és  $\gamma_{711}$  elrendezések példáján



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



**IV.3.5 ábra.** A Dp-Dp és a γ<sub>113</sub> 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)

| Lemez modell<br>mélysége | W-Sch | W-α  | P-Dp | Dp-Dp | St   | w-β  | <b>Y</b> 111 | Y112 | <b>Y</b> 113 | Y114 | <b>Y</b> 115 | <b>Y116</b> | Y117 |
|--------------------------|-------|------|------|-------|------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|-------------|------|
| 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 |

# Numerikus modellezés

# Analóg modellezés

| Lemez modell<br>mélysége | W-Sch | W-a | P-Dp | Dp-Dp | St   | W-β  | γ <sub>111</sub> | γ <sub>112</sub> | <b>Y</b> 113 | Y114 | Y115 | Y116 | <b>γ</b> 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 | 7cm          |

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 \beta-típusúak** (P-DP, DP-DP, Stummer, W- $\beta$ ) nagyobb mélységből képesek kimutatni egy hatót, de azok teljesítőképességét is jelentősen meghaladja a  $\gamma_{11n}$  elrendezéseké, ha *n* értéke legalább 2. Csak zárójelben jegyzem meg, hogy a szintén vizsgált  $\gamma_{q0}$  és  $\gamma_{313}$  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  $\gamma_{11n}$  elrendezések esetében voltaképpen el sem tudtuk érni azt a mélységet, ahonnét már ne lett volna kimutatható a lemez, és ez igaz mind a numerikus-, mind az analóg modellezés esetére.

A következő, *IV.3.6 ábra* újabb érvet ad arra, hogy – legalábbis bizonyos modellek esetében – a  $\gamma_{11n}$  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  $\gamma_{113}$  elrendezés. A két, egymáshoz közelebbi hatót pedig egyik hagyományos elrendezés sem volt képes különválasztani szemben a  $\gamma_{113}$  elrendezéssel.

Ismételten arra a meglepőnek tűnő következtetésre jutottunk, hogy **az analóg eredmények** esetében még inkább a  $\gamma_{11n}$  (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  $\gamma_{113}$ elrendezés esetében azonban – ha lehet – még meggyőzőbb a kép, mint a numerikus modellezés esetében volt.



IV.3.6 ábra. A horizontális felbontóképesség numerikus modellje

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  $\gamma_{11n}$  elrendezés még jobb eredményt is produkált a vártnál. A mérés esetén előforduló zajok tehát egyáltalán nem befolyásolták negatív irányba a  $\gamma_{113}$  elrendezéssel kapott eredményeket, bizonyítandó azok terepi használhatóságát. Emellett ráadásul fentiek alapján úgy tűnik, hogy a  $\gamma_{113}$  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  $\gamma_{113}$  elrendezéssel kapott numerikus eredményeket annyira javulnak, hogy az analóg eredményekhez hasonlóak lesznek.



IV.3.7 ábra. A y<sub>11n</sub> elrendezések leképezési tulajdonságainak változása n értékének növekedésével. a) a modell. b) a fajlagos ellenállás szelvények. c) az egyes elrendeezések 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  $\gamma_{112}$  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  $\gamma_{11n}$  elrendezés, a  $\gamma_{114}$ , ami már közelebb van a MAN null-elrendezéshez ugyanakkor már érzéketlen volt az 1D változásokra, viszont a 2D változásnak nagyon jó indikátora volt. A  $\gamma_{114}$ 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 nullelrendezések közötti átmenetről, elsősorban olyan formán, hogy bemutatja, hogyan jutunk a hagyományos elrendezések elsősorban 1D érzékenységétől a null-elrendezések elsősorban 2D érzékenységéig (IV.3.7c ábra). Felhívnám a figyelmet arra is, hogy ezen ábra alapján is látszik, hogy a  $\gamma_{11n}$  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 Ćwiklik 2013*).

#### IV.3c. Terepi analóg modellezéssel kapott eredmények

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

Ebben a fejezetben még egy további lépést teszünk a terepi mérések irányába, hogy a  $\gamma_{m11n}$  elrendezéseket még inkább a terepihez hasonló körülmények között tesztelhessük. 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 Dp elrendezés bizonyult a legjobbnak a vizsgált elrendezések (Dp,  $\gamma_{112}$ ,  $\gamma_{114}$  és  $\gamma_{116}$ ) 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  $\gamma_{11n}$  elrendezés, általában a  $\gamma_{116}$ elrendezés produkált jobb eredményeket (*IV.3.8 és IV.3.9 ábrák*). A  $\gamma_{116}$  elrendezés mindkét ábrán határozottan megjeleníti és meglehetősen pontosan le is határolja függőlegesen is a hatót.

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



**IV.3.8 ábra.** Terepi teszteredmények DP és  $\gamma_{m11n}$  (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  $\gamma_{11n}$  (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

## V. Talajmechanikai vizsgálómódszerek és kisskálájú repedésrendszerek kutatása

Ezt a fejezetet két fő részre tagoltam. Az *V.1 fejezetben* két új egyszerű talajmechanikai mérőmódszert, a SzúróPróba (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 kisskálájú 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 lelhetőek fel.

#### V.1. Talajmechanikai vizsgálómódszerek (Szúrópróba, Nyomáspróba)

Mindkét módszer ötlete onnan eredt, hogy a geoelektromos mérések kivitelezése során az elektródákat leszúrva 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 fűródott 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 SzúróPróba (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 kőtörmelék), 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.1.1 ábra*).

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" törmeléket 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 szúrva 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 szúrási 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.1.1 ábra. A SzP módszer működési elve. k értéke 1, ha kőbe ütközik a fémrúd, 0, ha nem



**V.1.2 ábra.** Régészeti mérés eredménye Sárisáp 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)





# Karsztkutatás (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 kőtörmelék értékűnek tekinthető csoportokban. Már első pillantásra szembetűnő, hogy a terület al.apvetően **két részre osztható**: a nyugati része alapvetően kőtörmelék-mentes, 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). Ugyanilyen irányúak a kék, azaz nagy k (kőtörmelék) értékű foltokat összekötő egyenesek is. Aligha képzelhető el, hogy mindezek geológiai jelentést ne hordoznának. Ez a mérés számomra igazolta, hogy a **kőtörmelék eloszlás mérése (ami SzP-val történt) képes geológiai jellegű információt szolgáltatni egy területről.** 

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 felejtsük 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<sub>62.5</sub> és a P<sub>67.5</sub> 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 megismételhetőek**.



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



V.1.5 ábra. Két egymással párhuzamos 5 szomszédos pont értékének futóátlaga alapján számított kőtörmelék-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-éval (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  $\rho$  és k átlagértékű zónák



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

**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 kőzet 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 kőzet; a II. zóna átmenetet képez.

# V.1b. 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 fejlesztettet (*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,/8 az a NyP érték megváltozását eredményezi. Ilyen helyzet áll elő természetszerűen 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



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

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.2 Kisskálájú repedésrendszerek kutatása

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

Mint említettem, kisskálájú 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 lejárt, tömörített ösvény miatt. Ettől eltekintve a korreláció nagyon jónak mondható, bár az ET felbontóképessége számottevően kisebb, mint a NyP-é.

Mind a P1, mind a P4 profilokon jól látszik, hogy a mérésekkor látható elmozduláson (MF) túl is a már mozgó területen észleltekhez 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



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

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 jeleníthetőek 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.

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 valószínűlegaz 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.2.2 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 előbbiekkel az aktív, utóbbiakkal a földcsuszamlás passzív oldalán. FR: fő repedés



V.2.3 ábra. Az ET mérések a Plés P2 profilon és a P4, P5 NyP profilok eredményeinek verifikálása. A zöld szaggatott vonal a mérésünkkor 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 dinamikatartománya: A Wenner elrendezés esetében a jelek a 20-32  $\Omega$ m 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  $\Omega$ m-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  $\Omega$ m 110  $\Omega$ m 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* 



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

*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 ellenállásváltozások helyén a MAN profil is jelentkezik a kettős anomáliával.

Feltételezésem szerint az történhetett, hogy míg az első típusú (áprilisi) mérés esetén a repedések víztartalma 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 mérések esetén. Az ideális körülmények között nagyon nagy szerepet játszhatnak bizonyos mérések 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

#### 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 mozgatása során. Három null-elrendezés, a Schlumberger null-, a Wenner- $\gamma$  null ( $\gamma_{null}$ , vagy  $\gamma_0$ ) 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- $\gamma$  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- $\gamma$  null-elrendezés volt a legmeggyőzőbb.

Ismételten terepi tesztmérésekkel sikerült 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.



V.2.6 ábra. A kőbánya fala a bejelölt, számozott kisebb (fekete vonalak) és nagyobb (piros vonalak) repedésekkel. A nullelrendezés 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 ellipszisből tevődik össze, amiknek a **hossztengelyei jelölik ki az egyes repedések irányát** a területen, ami felett mértek. 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 megfelelősen 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*).

SZALAI S



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. Megdöbbentő volt látnom, hogy a MAN elrendezés **már 1957-be**n (*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 **négyzet-** $\gamma$  (square- $\gamma$ ) elrendezés (*Habberjam és Watkins 1967*), amely azonban nem önmagában használatos, hanem kombinálva más négyzet (négyzet- $\alpha$ , négyzet- $\beta$ ) 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 voltuk 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 **használata 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 méréstechnikai szempontból, mind pedig az értelmezés nehézségei miatt. Mindemellett a null-elrendezésekkel mért **jelek előjelet is válthatnak**, 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 nullelrendezések** 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 áramelektródák esetén a homogén féltér felett, a felszínen kialakuló potenciáltér ekvipotenciális vonalain kell elhelyeznünk a két potenciál-elektródát.

Természetesen célszerű úgy kiválasztanunk a potenciál-elektródák 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 áramelektródákat helyben hagyva csak a potenciál-elektródákat 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 nullelrendezésnek megfelelő hagyományos elrendezés geometriai faktorának értékével szorozhattuk meg. Ily módon a  $\rho = k * \Delta U/I$  képletnek megfelelően a hagyományos elrendezés esetében a megszokott látszólagos fajlagos ellenállást kaptuk, és a kapott értékek összevethetőek voltak a nullelrendezésekkel kapott értékekkel. Azt azonban ne felejtsük el, hogy ez a mennyiség a nullelrendezések 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 elrendezések hatékonyabbak mind a repedések detektálásban, mind azok irányának meghatározásában.

A befogadókészséget csökkentette, hogy a szakma időközben átállt a sokelektródás 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-\gamma 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 sokelektródás mérőrendszerbe történő beillesztéséről le kellett mondanunk. A MAN és a Wenner- $\gamma$  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-elrendezésekét.** 

Már itt felvetődött a lehetőség, hogy ha a Wenner- $\gamma$  null-elrendezést nem is, de annak egy kissé módosított változatát a Wenner- $\gamma$  kvázi null-, vagy, ahogy a későbbiekben rövidítve neveztük  $\gamma_{qnull}$  elrendezést viszont beépíthetnénk a 2D sokelektródás 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 stratégiáik

# *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-táblázatához 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.

*lb.* Összegyűjtöttem és rendszereztem a felszíni geoelektromos elrendezések előállításához használt stratégiákat, ami – az egyes elrendezések számára - megnyitja az utat a sokelektródás 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 ú.n. 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 koncentrálódik adott elrendezés érzékenysége. A Schlumberger elrendezés esetében pl. a potenciálelektródák 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 elrendezésekéből 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 <b>minden, az elrendezés áram-, vagy annak potenciál-elektródáit 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.

#### Szalai S

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 fehasználásával 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 ú.n. 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  $\pm$  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 **sokelektródás mérések** már lehetővé teszik különböző elrendezések kombinálását is. Emellett a felszín alatti térség alapelemének nem a vékony réteget, hanem a prizmát tekintem.

Eme okok vezetettek oda, hogy bevezessek egy új, a kutatás mélységével kapcsolatos definíciót, az ú.n. 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 féltérben 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  $\beta$  típusúak a legjobbak, azaz azok, amelyek esetében az áramelektródák 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  $\gamma_{11n}$  (*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-, nemegyvonalú és fókuszáló elrendezésekre és bemutattam mind a *Roy és 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  $1.59 \pm 0.31$  adódott.

*3c.* Kimuttam, hogy a  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  elrendezések KimM értékeit.

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

3f. Kimutattam, hogy a  $\gamma_{m11n}$  (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  $\gamma_{m11n}$  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 úgyis 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 értékek 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 \beta-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  $\beta$ -típusú Wenner- $\beta$  és pól-dipól elrendezések szerepeltek a rangsor 2. és 3. helyén 5, illetve 4 esettel, míg az  $\alpha$  típusú Wenner- $\alpha$  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. Összevetettem 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 bonyoldalommal kell számolnunk és nincs garancia arra, hogy gyakorlati szempontból lesz a null-elrendezések használatának számottévő értéke.
Kimuttam, hogy két szimmetriatulajdonságokkal rendelkező egyvonalú null-elrendezés van: a MAN (a *II. 1.3. ábrán* a 21. elrendezés) és a  $\gamma_{null-elrendezés}$  (a *II. 1.3. ábrán* a 9. elrendezés). A MAN elrendezés a  $\gamma_{11n}$  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 faktorral 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, semmiféle 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 bizonyítottnak tekintem, 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 sokelektródás rendszerekben történő használata azonban számos nehézséggel jár. Így 1. A szimmetrikus egyvonalú null-elrendezések közül egyedül a MAN elrendezés építhető be a sokelektródás 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  $\gamma_{11n}$  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 viszgálatát 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.

5*d*. Mivel a MAN jelek a hagyományos elrendezésekéinél 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 előbbiek esetében a számunkra általában érdekes, a horizontális irányú ellenállás-változásokból eredő jel a homogén féltér felett mérhető jelre tevődik rá, míg a nullelrendezés 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 nullelrendezés 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- $\gamma$  null-elrendezéseket. Utóbbit azonban egyvonalú volta ellenére sem lehet beépíteni közvetlenül a használt 2D sokelektródás rendszerekbe, mivel ott az elektródák távolsága állandó. Hogy ezt mégis elérhessük, kissé módosítva az elektródák távolságán a  $\gamma_{anull}$ -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 sokelektródás 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- $\gamma$  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  $\gamma_{11n}$  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  $\gamma_{11n}$  elrendezésekkel kapott képnél az azok párjával, a  $\gamma_{11n}$ elrendezésekkel kapott kép sokkal korrektebb képet ad a modellről. Az elrendezéspárokat  $\gamma_{m11n}$  elrendezéseknek neveztem.

A kis-hatású modellek vizsgálata esetében a  $\gamma_{m11n}$  elrendezések hatékonyabbnak bizonyultak minden hagyományos elrendezésnél, beleértve az ezekből optimalizált Stummer elrendezést is. Bizonyos  $\gamma_{11n}$  elrendezések – elsősorban a  $\gamma_{112}$ ,  $\gamma_{113}$  és a  $\gamma_{114}$  – 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  $\gamma_{11n}$ elrendezések eredményeinek más elrendezések eredményeivel való kombinálása.

A horizontális felbontóképesség vizsgálatok során a legtöbb  $\gamma_{11n}$  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  $\gamma_{11n}$  elrendezések, elsősorban a  $\gamma_{113}$ , 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  $\gamma_{m11n}$  elrendezések még nagy-hatású modellek esetében is jobbnak bizonyultak.

Fenti eredményeket a  $\gamma_{11n}$  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  $\gamma_{11n}$  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  $\gamma_{11n}$  elrendezések egymással, illetve hagyományos elrendezésekkel valamiféle módon történő együttműködésében is látok még számos lehetőséget.

A  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  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 leredukálódhat, így kis-hatásúakká 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  $\gamma_{11n}$  elrendezéseket azok tükrözött változatával, a  $\gamma_{11n}$  elrendezésekkel együtt célszerű használni. Az így kapott  $\gamma$  elrendezések minden vizsgált esetben jobb eredményeket adtak a  $\gamma_{11n}$  elrendezéseknél.

6b. A legtöbb  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma$  elrendezések, elsősorban a  $\gamma_{m113}$ , 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  $\gamma_{m11n}$  elrendezések minden hagyományos elrendezésnél, de még egyes nagy-hatású modellek esetében is jobb eredményeket adtak.

Szintén alkalmasabbnak bizonyultak a  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  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.

Bemuttam hogyan változik az egyes elrendezések leképezési képessége a lemez modell mélységének függvényében. Míg az a Dp-Dp elrendezés esetében határozottan romlott a mélységgel, a  $\gamma_{m113}$  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  $\beta$ -típusúak (P-DP, DP-DP, Stummer, W- $\beta$ ) nagyobb mélységből képesek kimutatni egy hatót, de azok teljesítőképességét is jelentősen meghaladja a  $\gamma_{11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{113}$  elrendezés. A két, egymáshoz közelebbi hatót pedig egyik hagyományos elrendezés sem volt képes különválasztani, szemben a  $\gamma_{113}$  elrendezéssel.

Ráadásul az analóg eredmények esetében még inkább a  $\gamma_{m113}$  elrendezés felé billen a mérleg nyelve, mint a numerikus vizsgálatok eredményei alapján. Az analóg eredmények esetében a W- $\alpha$  képe még gyengébb, mint a numerikus eredmény alapján várható volt, míg a W- $\beta$  kép jobb ugyan a vártnál, de a közelebbi hatók elválasztásában nincs javulás. A  $\gamma_{113}$  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  $\gamma_{11n}$  elrendezés még jobb eredményt is produkált a vártnál. A mérés esetén előforduló zajok tehát egyáltalán nem befolyásolták negatív irányba a  $\gamma_{113}$ 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 érzékenységétől a null-elrendezések elsősorban 2D érzékenységéig. Kiderült az is, hogy a  $\gamma_{m11n}$  elrendezések oldal irányú érzékenysége is nagyobb. A  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  elrendezések eredményesebben képesek detektálni azt, mint akár a legjobb hagyományos elrendezések.

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

7*a.* Analóg modellezési eredmények segítségével is alátámasztottam, hogy a  $\gamma_{11n}$  elrendezést annak párjával, a  $\gamma_{n11}$  elrendezéssel együtt célszerű használni.

7b. Az analóg modellmérések eredményei szerint a hagyományos elrendezések közül a  $\beta$ típusú elrendezések (P-DP, DP-DP, Stummer, W- $\beta$ ) képesek kimutatni a hatókat a legnagyobb mélységből. Az ezekkel elért maximális mélységet is jelentősen meghaladta azonban a  $\gamma_{m11n}$ 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  $\gamma_{m11n}$  elrendezések esetében is képesek előre jelezni a terepen várható eredményeket.

7c. Kimutattam, hogy a függőleges lemez modellnek a  $\gamma_{m113}$  elrendezéssel kapott képe sokkal kevésbé gyengül a modell mélységével, mint a Dp-Dp elrendezésé. A  $\gamma_{m113}$  elrendezés még a legnagyobb vizsgált mélységben is egyértelmű, álanomália-mentes képet adott, jól pozícionálva 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  $\gamma_{m113}$  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  $\gamma_{m11n}$  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  $\gamma_{m11n}$  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 (SzúróPróba, NyomásPróba)

#### (Az V.1 fejezet alapján)

Mindkét módszer ötlete onnan eredt, hogy a geoelektromos mérések kivitelezése során az elektródákat leszúrva 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 SzúróPróba (SzP) módszer

#### (Az V.1a fejezet alapján)

A SzúróPróba 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 szúrva le ezekbe 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 kötörmelék 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 kőtörmelék 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 e 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-éval (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 természetszerűen 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 (Szúrópróba, Nyomáspróba)

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

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

8b. SzP méréseim szerint a kőtörmelék 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 térfogatilag próbálták lehatárolni - és ami a dunaszekcsői földcsuszamlás esetében nem is volt lehetséges - annak repedésrendszerét térképeztem fel. Ettől azt vártam, hogy a fölcsuszamlás 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, jóllehet 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 profilmérést 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 méréssorozat 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- $\gamma$  null- ( $\gamma_{null}$ , vagy  $\gamma_0$ ) 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 mozgatása során.

A vizsgált elrendezések közül a Schlumberger null-, és a Wenner- $\gamma$  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- $\gamma$  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 kőzettömeg megismerését célozza - a dunaszekcsői **földcsuszamlás** tanulmányozásához annak **repedésrendszerét térképeztem fel.** 

Ezzel a megoldással le tudtam határolni a fölcsuszamlás által veszélyeztetett területet olyan földcsuszamlás esetében is, amelyik nem rendelkezik csúszófelülettel és az elmozduló tömeg sem tér el a helyben maradótól kőzettani 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 hátterét 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 hátterét sikerült megvilágítani, aminek működése a korábban használt elrendezésekétől 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 mindeddig végig is kísérte azt.

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

Prácser 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 LM (1950): The Theory of Dipole Sounding. Gostoptekhizdat, Monograph (In Russian)
- Alpin LM (1966): The theory of dipole sounding. In: Dipole Methods for Measuring Earth Conductivity, 1–60. Consult Bureau, New York

Alpin LM, Berdichevsky MN, Vedrintsev GA és Zagarmistr AM (1966): Dipole Methods for Measuring Earth Conductivity (Selected and translated from Russian by G.V. Keller). Colorado School of Mines, Golden, CO

Apparao AT, Gangadhara Rao T, Sivarama S és Subrahmanya SV (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 SV (1997): Depth of detection of buried resistive targets with some electrode arrays in electrical prospecting. Geophysical Prospecting 45(3), 365-375.

Baker HA, Boudjadja AG, Benhamam K (2000): Le Dispositif Baker – Application et comparaison. Memoire. Départment de Géologie, FSTGAT-ISTHB, Algiers

Baker HA 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 HA, Djeddi M, Boudjadha AG 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 RD (1979): Signal contribution sections and their use in resistivity studies. Geophys. J. R. astr. Soc. 39. 123-129.
- Barker RD (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 signalto- noise ratio in resistivity profiles. Geophysical Prospecting 36, 559–570.
- Bhattacharya BB, Dutta I (1983): Depth of investigation studies for gradient arrays over homogeneous isotropic half space. Geophysics 48, 1248–1251.
- Bhattacharya BB, Shalivahan (2016): Geoelectric methods. Theory and applications. McGraw Hill Education (india) Private Limited, New Delhi
- Blokh IM (1971): Electrical Profiling of Resistivity Method. Nedra, Moscow (In Russian)
- Bogolyubov NP (1984): Guide to Interpreting Two-component modified VES. Stroyizdat, Moscow (In Russian)
- Bolshakov DK, Modin IN, Pervago EV és Shevnin VA (1998): New step in anisotropy studies: Arrow type arrays. Proceedings of the 4th EEGS-European Section Meeting, Barcelona, Spain
- Brass G, Flathe 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): C omparison between Schlumberger electrode arrangement and some focused electrode arrangements in resistivity profiles. Geophysical Prospecting 27, 233–244.
- Candansayar ME (2008): Two-dimensional individual and joint inversion of three- and four-electrode array dc resistivity data. J. Geophys. Eng. 5, 290–300.
- Candansayar ME, Basokur AT (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 JN, Nelson P (1964): Deep resistivity results from New York and Virginia. Journal of Geophysical Research 69, 4367–4376.
- Carpenter EW, Habberjam GM (1956): A tri-potential method of resistivity prospecting. Geophysics 21, 455-469.
- Clark AJ (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 VN (1951): Electrical Prospecting of Oil and Gas Deposits. State Scientific-Technical Publishing of Oil and Gas Literature, Moscow and Leningrad
- Dachnov VN (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 HF (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.
- Drahos D, Kis K, Meskó A és Salát P (1987): Bevezetés a gyakorlati geofizikába. Egyetemi jegyzet, ELTE, Tankönyvkiadó
- Edwards LS (1977): A modified pseudosection for resistivity and IP. Geophysics 42, 1020-1036.
- Evjen HM (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 és Milnes E (2013): Fracture characterisation using geoelectric null-arrays. Journal of Applied Geophysics 93, 33–42.
- Frolov VX (1989): The possibility to increase the geological efficiency of electrical surveys. Izvestia VUZ-ov, series Geologia y Razvedka 1, 100–108. (In Russian)
- Furgerson RB, Keller GV (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 dispozicione elettrodica per la ricercia di corpe di limitate dimensioni. Boll. Di Geof. Teor. Ed. Appl. 9, 219–234.
- Gupta PK, Nivas S es Gaur VK (1996): Straightforward inversion scheme (SIS) for one-dimensional magnetotelluric data. Journal of Earth System Science 105(4), 413-429.
- Gupta RN (1961) Some studies on the unipole method (a new method electrical prospecting). PhD thesis, Indian Institute of Technology, Kharagpur
- Gupta RN, Bhattacharya PK (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 GM (1979): Apparent Resistivity Observations and the Use of Square Array Techniques. Geoexploration Monographs, Geopublication Associates, Gebrüder Borntraeger.
- Habberjam GM, Watkins GE (1967): The use of the square configuration in resistivity prospecting. Geophysical Prospecting 5, 445–467.
- Heiland CA (1940): Geophysical Exploration. Prentice-Hall, New York

Heiland CA (1946): Geophysical Exploration. Prentice-Hall, New York

- Hering A, Misiek R, Gyulai Á, Ormos T, Dobróka M és 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 VK, Bondarenko BM (1989): Electrical prospecting. In: Geophysical Handbook, 1 (eds V.K. Hmelevsky and B.M. Bondarenko), 173–177. Nyedra, Moscow
- Hmelevsky VK, Shevnin VA (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 PD (1981): Focused electrical resistivity arrays: Some theoretical and practical experiments. Geophysical Prospecting 29, 601–626.
- Jakosky JJ (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 GV, Frischknecht FC (1966): Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Pergamon.
- Keller GV, Furgerson R, Lee CYN és Jacobson JJ (1975): The dipole mapping method. Geophysics 40, 451–472.
- Kirsch R (2006): Groundwater Geophysics. Springer, p. 493.
- Knödel K, Krummel H és Lange G (1997): Geophysik. (Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten): Band 3. Springer Verlag.
- Knödel K, Krummel H és 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 DW (1991): Aspects of charge accumulation in DC resistivity. Experiments: Geophysical Prospecting 39, 803-826.
- Loke MH (1994): The inversion of two-dimensional apparent resistivity data. Unpubl. Ph. D. thesis, University of Birmingham (U.K.)
- Loke MH (1999): RES2DMOD ver. 2.2. Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite difference and finiteelement 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 HG (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 HP, Osella A, De la Vega M és 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 BK (1990): Electrical Prospecting. Nedra, Moscow (In Russian)
- Meidav TSVI (1970): Arrays and nomograms for electrical resistivity exploration. Geophysical Prospecting 18, 550-563.
- Metwaly M, El-Qady G, Matsushima J, Szalai S, Al-Arifi NS és Taha A (2008): Contribution of 3-D electrical resistivity tomography for landmines detection. Nonlin. Processes Geophys. 15, 977-986.
- Militzer H, Rösler R és 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 és 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 AI (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 DW, Li Y (1999): Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys. Geophysics 64, 403-416.
- **Ovchinnikov IK** (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 LS (1960): Geoelectrical surveying of archeological sites. Proceedings of the Prehistoric Society 26, 64–75.
- Panissod C, Dabas M, Hesse A, Jolivet A, Tabbagh J és 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 Acheologiche 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 BI, Kegutin PG (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.

- Ryjov AA, Karinskaya ID 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 JS (1967): Higher Derivatives of the Electrical Potential in Geophysical Prospecting. Naukova Dumka, Kiev (In Russian)
- Sapuzhak JS (1977): Divergent Electrical Prospecting. Naukova Dumka, Kiev (In Russian)
- Shevnin VA, Bobachev AA, Modin IN és Pervago EV (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 GT (1961): The Zirkelsonde, a new technique for resistivity surveying. Archeometry 4, 67–70.
- Seigel HO, Hill HL és Baird JG (1968): Discovery case history of the pyramid ore bodies pine point northwest territories Canada. Geophysics 33, 645–656.
- Semenov AS, Shevnin V (1994): Electrical Prospecting by Resistivity Method. Moscow State University, Moscow (In Russian)
- Shabanov BA (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 HJ (1997): 3D FD resistivity modelling and sensitivity analyses applied to a highly resistive phonolitic body. Geophysical Prospecting 45, 963-982.
- Stummer P, Maurer H és Green AG (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 A, Metwaly M, Lemperger I és Szokoli K (2015): Increasing the Effectiveness of Electrical Resistivity Tomography Using γ<sub>11n</sub> Arrays. Geophysical Prospecting 63(2), 508-524.
- Szalai S, Koppán A, Szokoli K és Szarka L (2013): Geoelectric imaging properties of traditional arrays and of the optimized Stummer configuration. Near-Surface Geophysics 11, 51-62.
- Szalai S, Kósa I, Nagy T és 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 és 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, Wesztergom V, Szokoli K és Novák A (2014a): Multiplication of the depth of detectability using 11n arrays. Journal of Applied Geophysics 107, 195-206.
- Szalai S, Lemperger I, Pattantyús-Ábrahám M és Szarka L (2011): The standardized pricking probe surveying and its use in Archaeology. Journal of Archaeological Science 38, 175-182.
- Szalai S, Novák A és 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 és Szarka L (2011): Which geoelectric array sees the deepest in a noisy environment? Depth of detectability values of multielectrode systems for various two-dimensional models. Physics and Chemistry of the Earth 36, 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 és 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 és Turberg P (2002): Geoelectric mapping of near-surface karstic fractures by using null arrays. Geophysics 67, 1769–1778.
- Szalai S, Szarka L, Révi G és 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 és 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 és 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 és Szarka L (2006): Geofizikai vizsgálatok fedett karszton (Homód-árok, Bakony). Karsztfejlődés 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(5), 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 és 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-elektróda elektromágneses terének szekunder komponenseiben. Magyar Geofizika 41.
- Tarkhov AG (957): On electric geophysical exploration methods of the pure anomaly. Bull. Izv. Akad. Sc. USSR, 8, 11.
- Tarkhov AG (1980): Electrical Prospecting. Nyedra, Moscow
- **Taylor RW, Fleming AH** (1988): Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. Ground Water 26, 464–474.
- Telford WM, Geldart LPRE és Keys DA (1976): Applied Geophysics. Cambridge University Press
- Tsokas GN, Tsourlos PI, Szymanski JE (1997): Square array resistivity anomalies and inhomogeneity ratio calculated by the finite element method. Geophysics 62, 426–435.
- Uhlemann S, Wilkinson PB, Maurer H, Wagner FM, Johnson TC és Chambers JE (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 RG és, Cook KL.(1966): Interpretation of Resistivity Data. Geological Survey professional paper 499. US Government Printing Office, Washington DC
- Varga M, Novák A és Szarka L (2008): Application of tensorial electrical resistivity mapping to archaeological prospection. Near Surf. Geophys. 1, 39–48.
- Verma ŠK, Manglik A, Krishna MurthyN, Ananda RV, Bhatt KM, Chandra S, Tezkan B, Harinarayana T, Scholl C, Patro PK és 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 SH (1990): Resistivity and induced polarization methods. In: Geotechnical and Environmental Geophysics. Volume I: Review and Tutorial 147–190. SEG, Tulsa, OK
- West SS (1940): Three-layer resistivity curves for the Eltran electrode configuration. Geophysics 5, 43-46.
- West TS, Beacham CC (1944): Precise measurement of deep electrical anomalies. Geophysics 9, 494–539.
- Weyl FG (1967): Das tripol field: Eine neue geoelektrische Messtechnik. Geoexploration 5, 145–155.
- Whiteley RJ (1972): The resistivity method of geophysical prospecting. M.Sc. thesis, University of Sydney
- Whiteley RJ (1973): Electrode arrays in resistivity and IP prospecting: A review. Bulletin of the Australian Society of Exploration. Geophysicists 4, 1–29.
- Wilkinson PB, Chambers J, Lelliott M, Wealthall GP és Ogilvy RD (2008): Extreme sensitivity of crosshole electrical resistivity tomography measurements to geometric errors. Geophysical Journal International 173(1), 49-62.
- Wilkinson PB, Meldrum PI, Chambers JE, Kuras O, és Ogilvy RD (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 GS, Singh CL (1983): The linear quadripole-dipole array in geoelectrical prospecting. Geophysics 48, 1135–1139.
- Yakubovsky JV, Liahov LL (1982): Electrical Prospecting. Nyedra, Moscow
- Zhdanov MS, Keller GV (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 KL, Hughes LJ (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 áramelektróda (csillagok) és potenciál-elektróda (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-elektródás (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- $\alpha$  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-elektródás 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