

Inhomogenitások lehatárolása elektromágneses frekvenciaszondázások alapján

(T049479. sz. OTKA-projekt, 2005–2009)

PETHŐ GÁBOR¹, TAKÁCS ERNŐ¹, FICSÓR LAJOS², SZABÓ ISTVÁN¹

¹Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék, H-3515 Miskolc-Egyetemváros

²Miskolci Egyetem, Általános Informatikai Tanszék, H-3515 Miskolc-Egyetemváros

Az elvégzett numerikus vizsgálatok és terepi mérések alapján az elektromos áram bipólus terének átmeneti zónájában a megfelelően megtervezett frekvenciaszondázási mérésekkel a szokásosnál kisebb adó–vevő távolságoknál is hasznos földtani információk nyerhetők mind a rétegződésre, mind a laterális szerkezeti változásokra. A frekvenciasáv alsó határát az a frekvencia jelenti, melynél a mért télerősség-komponens fajlagosellenállás- és frekvenciafüggése már nem szignifikáns. Bármely elektromágneses térkomponens frekvenciaszondázási görbéjéből a fajlagos ellenállásra egy effektív frekvenciaszondázási görbe határozható meg, mely átranzformálható a mélységtartományba is. A teljes frekvenciasávra vonatkozó effektív fajlagos ellenállás a mérések tervezésében, értelmezésében, a földtani szerkezeti viszonyok és az elektromágneses tér kapcsolatának tisztázásában jól alkalmazható.

A 2,5D-s FEM FD modellező rendszer vonatkozásában a számítási eredmények pontosítását, további mérési elrendezések esetén végzett modellezések elvégzését, a számítások gyorsabb előállítását és a párhuzamos számítást is lehetővé tevő fejlesztések valósultak meg. A 2,5D-s program alkalmazásával egy széles frekvenciatartományban kaptunk jó egyezést az adó–vevő felcserélhetőségi vizsgálatoknál mind a két forrás polarizációjára. Kiemelten foglalkoztunk az átmeneti zóna EM térterjedésének vizsgálatával. Az átmeneti zónát is lefedő modellezéseink során több (áramcsatornázási, galvanikus, különböző forrás) hatást megvizsgáltunk és azt tapasztaltuk, hogy a normált impedanciametszetek szerkezeti lehatárolásra alkalmazhatók még forrásáthatás esetén is.

Numerikus modellezéssel és terepi mérésekkel igazoltuk a villamos távvezetékek átmeneti zónaterében megjelenő alap- és felharmonikusok földtani információszerezésre való alkalmazhatóságát.

Pethő, G., Takács E., Ficsór L., Szabó, I.: Inhomogeneity delineation based on electromagnetic frequency sounding

Model studies and field measurements demonstrated that suitably planned EM frequency soundings in the transition zone of an electric dipole provide information both on layering and lateral changes even for less transmitter–receiver distances than the usual array. The lower boundary of the frequency interval is such a frequency value where the measured EM field component has not significant resistivity and frequency dependence. The transformation of any EM field component into effective resistivity in the frequency domain and the frequency–depth transformation of the effective resistivity were developed. These effective resistivities can be beneficial in the planning of measurements, the interpretation of the measurement in the transition zone and investigation the relationship between geological structures and EM fields.

A 2.5D FEM FD program system was developed to increase the accuracy of modelling, to perform modelling for additional arrays and to increase the computing performance using parallel processing. The reciprocity investigation for a wide frequency range was performed for the two source polarizations. Assuming HED sources current channelling, galvanic, source polarization, source overprint, shadow effect were investigated. It was demonstrated that the normalized impedance sections of the transition zone proved to be useful to delineate inhomogeneity under the receiver site even the case of source overprint effect.

To gain geological information in the transition zone of the EM fields due to the power lines we recommend to measure the ratio of the electric field components in two neighbouring sites at 50 Hz and the impedances at the upper harmonics of the 50 Hz along profiles parallel to the source.

Beérkezett: 2011. január 11.; *elfogadva:* 2011. február 20.

1. A mesterséges áramterű CSAET frekvenciaszondázás információtartalmának vizsgálata az átmeneti zónában^{a)}

A hagyományos CSAMT mérésnél – mesterséges áramterű magnetotellurika – az elektromos adó dipólus terét olyan adó–vevő távolságnál mérik, ahol az elektromágneses tér függőlegesen lefelé haladó síkhullámmá válik (távoli zóna). A megkívánt nagy adó–vevő távolság – a kutatási mélység 5–7-szerese – több szempontból hátrányos. Numerikus szimulációk és tényleges terepi mérések bizonyítják, hogy a földtani felépítésnek a síkhullámnál megjelenő indikációi csökkenten ugyan, de jóval kisebb adó–vevő távolságnál – akár a kívánt kutatási mélység 2–3-szorosánál – is felfedezhetők. Vizsgálataink ezzel a kisebb adó–vevő távolsággal – az átmeneti zónában – végzett frekvenciaszondázás lehetőségeivel foglalkoztak elsősorban a laterális földtani változások kutatása céljából. Lényegében tehát azt vizsgáltuk, hogy mi a határa az adó bipólusa megközelíthetőségének és egy hosszabb tápkábel telepítésénél a lemérhető szelvényszakasz hosszának.

1. Vizsgálatainkba bevontuk az elektromos bipólus elektromágneses terének valamennyi komponensét és a belőlük képzett térerősségarányokat. Földtani információtartalmuk és érzékenyséjük frekvenciafüggését a szokásosan használt, a távoli és közeli zónára érvényes látszólagos fajlagos ellenállás helyett a teljes frekvenciatartományra számítható látszólagos fajlagos ellenállással elemeztük, amelyet a következőkben *effektív* fajlagos ellenállásnak nevezünk majd. Kiszámítása az egyes térerősség-komponenseket a homogen feltér felszínén leíró, transzcendentális egyenletek numerikus, iterációval történő megoldásán alapszik. Ezek az egyenletek az y irányú elektromos bipólus térerősség-komponenseire az alábbiak:

$$E_\phi = \int_{y_B}^{y_A} \frac{I \rho \sin(\phi)}{2\pi R^3} [2 - e^{ikR}(1 - ikR)] dy,$$

$$H_R = \int_{y_B}^{y_A} \frac{I \sin(\phi)}{4\pi R^2} [6I_1(\frac{1}{2} ikR) K_1(\frac{1}{2} ikR) + ikR (I_1(\frac{1}{2} ikR) K_0(\frac{1}{2} ikR) - I_0(\frac{1}{2} ikR) K_1(\frac{1}{2} ikR))] dy,$$

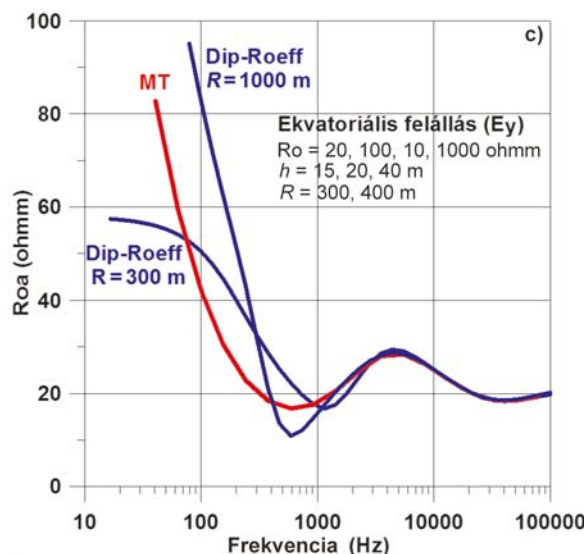
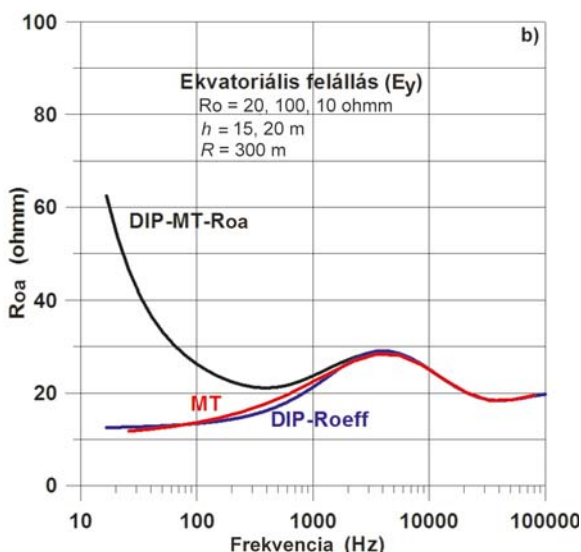
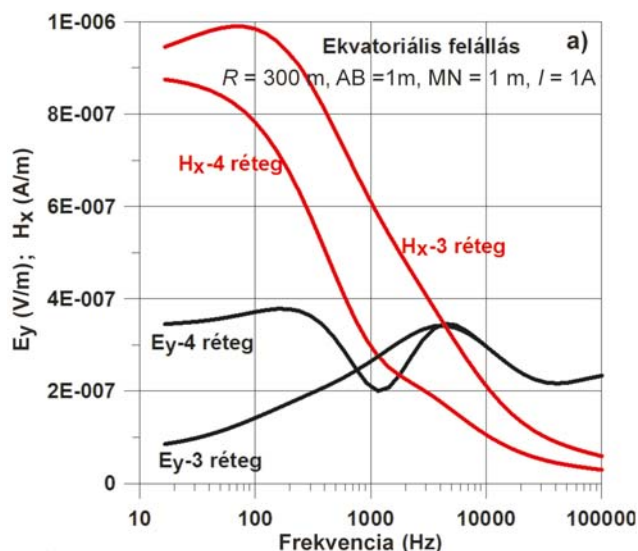
$$H_z = \int_{y_B}^{y_A} \frac{I \sin(\phi)}{4\pi R^2} \frac{-6}{k^2 R^2} [1 - e^{ikR}(1 - ikR - \frac{1}{3} k^2 R^2)] dy,$$

itt

$$k = \sqrt{i2\pi f \mu l \rho} \quad (\text{hullámszám});$$

$$\sin(\phi) = yv / \sqrt{(yv - y)^2 + xv^2};$$

$$R = \sqrt{(yv - y)^2 + xv^2}.$$



1. ábra | 3 és 4 réteges metszetek térerősség-amplitúdó és látszólagos fajlagos ellenállás frekvenciaszondázási görbéi
 Figure 1 | Frequency sounding curves of EM field component amplitudes and apparent resistivity over three- and four-layer half-spaces

E_ϕ , H_R , H_z az azimutális elektromos, valamint a radiális és vertikális mágneses komponenseket, I az áramerősséget, $(xA = 0, yA)$, és $(xB = 0, yB)$ a tápelektrodák, xv és yv vevő dipólus koordinátáit, f a frekvenciát, ρ , μ a homogén feltér fajlagos ellenállását és mágneses permeabilitását, I_0 , I_1 , K_0 és K_1 a Bessel-függvényeket jelenti.

A látszólagos fajlagos ellenállásnak ez a definíciója az elemi adó dipólusára, hosszabb tápkábelre, valamint valamennyi térerősség-komponensre és tetszőleges geometriájú mérési elrendezésre egyaránt alkalmazható.

2. Az effektív fajlagos ellenállás használhatóságát az 1. ábra szemlélteti. Az 1.a ábrán 3 és 4 réteges metszetek elektromos dipólusgerjesztésű, horizontális elektromos és mágneses amplitúdó-frekvenciaszondázási görbéi láthatók. Az 1.b ábrán a 3 réteges metszetre számított látszólagos fajlagos ellenállási görbék szerepelnek. Nevezetesen, a dipólusgerjesztésű horizontális elektromos komponensből számított effektív fajlagos ellenállás, Dip-Roeff, továbbá a Cagniard-képlettel a horizontális elektromos és mágneses komponensből számított síkhullámú magnetotellurikus (MT), valamint a dipólusgerjesztéssel kapott Dip-MT-Roa görbe.

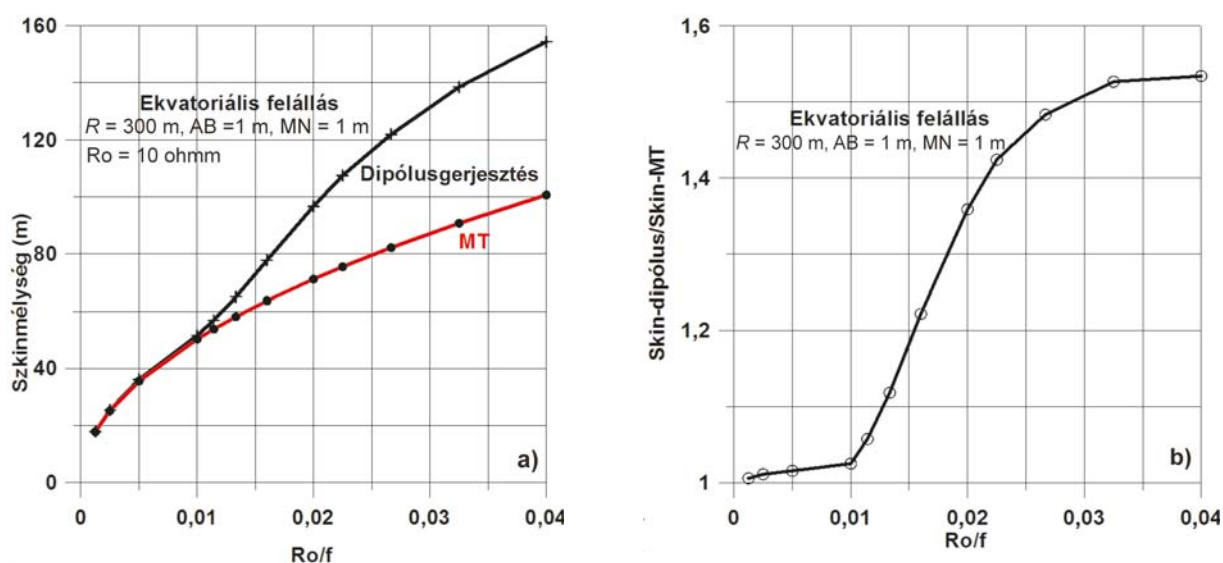
A nagyfrekvenciás szakaszon – mintegy 2000 Hz-ig – a látszólagos fajlagos ellenállási görbék gyakorlatilag együtt futnak. Látható, hogy a dipólusgerjesztésű Dip-MT-Roa görbe a kisfrekvenciás tartományban az adókábel közelsége miatt – $R = 300$ m – előálló, monoton emelkedő szakasza miatt elveszíti földtani információtartalmát. Ezzel szemben a Dip-Roeff görbe még a közbülső zónában – 2000 Hz alatt – is tükrözi a földtani felépítést, mintegy 200 Hz-ig. Ezután a legkisebb frekvenciáknál aszimptotikusan beáll a legnagyobb behatolási mélységet adó egyenáramú szintre. A csupán a horizontális elektromos összetevőt használó mérés – CSAET – tehát a kétkomponenses magnetotellurikus méréssel összhangban levő földtani információt indikál.

Erre utal az 1.c ábra példája is, ahol a négyréteges metszet esetén láthatók az említett látszólagos fajlagos ellenállások görbéi. A nagyfrekvenciás szakaszon – mintegy 2000–3000 Hz-ig – a görbék együtt futnak. Meglepő azonban, hogy az $R = 300$ m adó-vevő távolságnál a bipólusgerjesztésű tér a síkhullámúnál jóval nagyobb frekvencián – 1000 Hz környékén – kezdi érzékelni a nagy ellenállású aljzatot. Az adó-vevő távolságot növelve a rétegződés indikációinak helye a síkhullámú és bipólusgerjesztésű görbékben a frekvenciatengely mentén közeledik egymáshoz. $R = 1000$ m-nél a két görbe már azonos helyen – $f = 500$ –600 Hz – kezdi érzékelni az 1000 ohm-es alsó réteget. Az emelkedő ágak azonban nem esnek egybe és a dipólusgerjesztésnél az ilyen típusú metszetekre jellemző, határozott interferenciás minimum alakul ki.

3. Numerikus modellezéseink szerint az elektromágneses tér átmeneti zónájában egy bizonyos indukciószám – $(\text{abs}(kR))$ tartományban – vagy adott adó-vevő távolságnál a fajlagos ellenállásfrekvencia arányától függően – a dipólusgerjesztésű elektromos tér „kvázi szkinmélysége” nagyobb, mint a síkhullámú tér szkinmélysége. Ezt mutatja $R = 300$ m-es adó-vevő távolságra a 2.a ábra, ahol a mesterséges áramterű ekvatoriális felállás, valamint a síkhullámú tér szkinmélységének alakulása látható a ρ/f arány függvényében. A 2.b ábrán pedig a szkinmélységek hányadosa szerepel, szintén a ρ/f arány szerint.

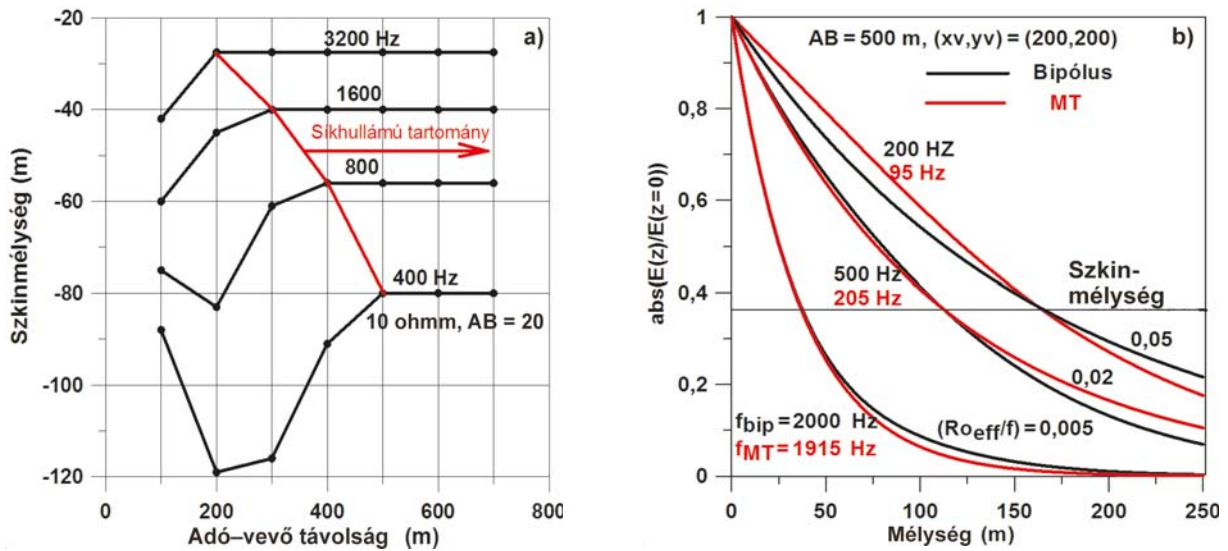
A megnövekedett szkinmélységarányú zóna kialakulását az adó-vevő távolság változásával a 10 ohm-es homogén feltérben néhány frekvenciára a 3.a ábra mutatja be. Hosszabb tápkábelnél, valamint a mérés helyét a tápkábelrel párhuzamosan eltolva, jellege alig változik.

A numerikus modellezések egy további, az átmeneti zónára vonatkozó tanulságát a 3.b ábrarészben mutatjuk be. $(xB, yB) = (0, -250)$, $(xA, yA) = (0, 250)$ és $(xv, yv) = (200, 200)$ koordinátaértékek mellett az adóbipólussal párhuz-



2. ábra | A magnetotellurikus és az átmeneti zónabeli dipólus-frekvenciaszondázás szkinmélységének alakulása

Figure 2 | Skin depth in the function of the resistivity/frequency ratio for the plane-wave field and for the transition zone of an electric dipole source



3. ábra a) A dipólus-frekvenciaszondázás átmeneti és a síkhullámú zónájának határa a 10 ohmm-es feltérben; b) A dipólusgerjesztésű és a síkhullámú elektromos komponensek mélység szerinti változása az átmeneti zónában

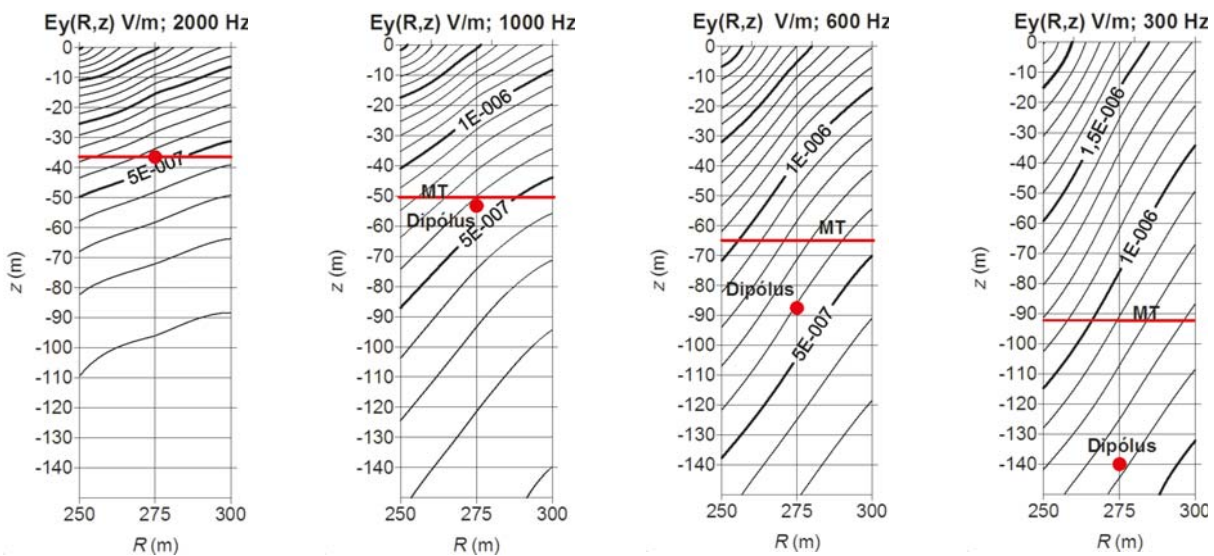
Figure 3 a) The boundary between the transition zone and far-field zone of an electric dipole source for a homogeneous half-space of 10 ohmm; b) Normalized electric field components in the function of depth for plane-wave field and for the transition zone of an electric dipole source

mos és a felszíni értékére normált elektromos komponens mélység szerinti változása látható összevetve az azonos, de eltérő frekvencián előálló szkinmélységű síkhullámú tér hasonlóan normált elektromos komponensével. A két görbe szkinmélység fölötti lefutása a $\rho/f = 0,02$ értékig jól egyezik, a nagyobb értékeknél azután a görbék egyre inkább elválnak. Az elektromos térerősségek hasonló mélységi alakulását adó frekvenciákra az

$$f_{MT} = f_{bip} [\text{szkinm}(\text{bip}) / \text{szkinm}(\text{MT})]^2$$

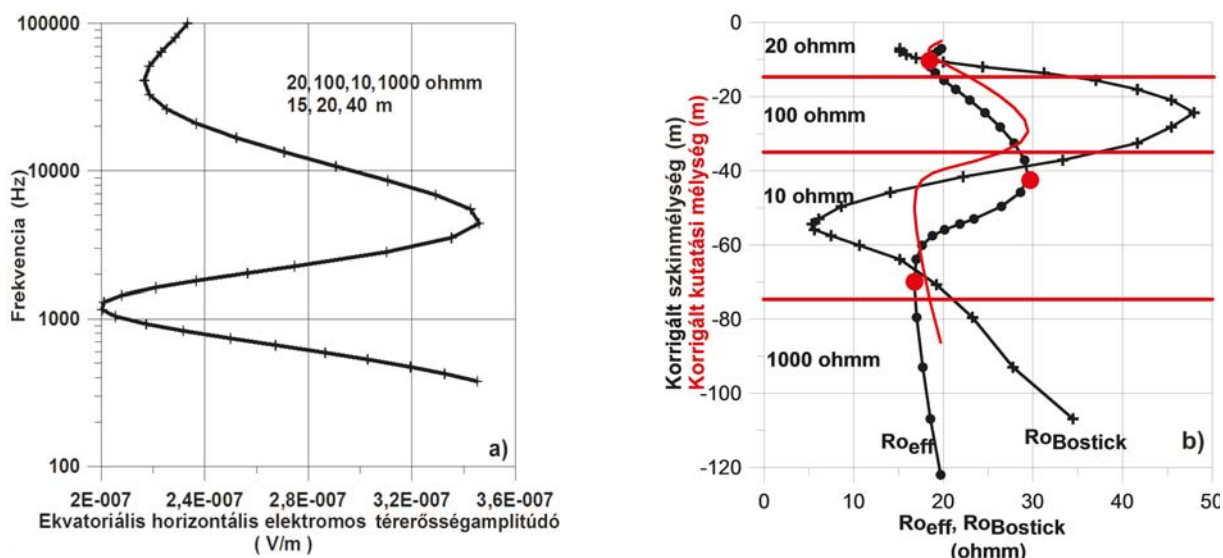
összefüggés teljesül.

Az átmeneti zónára bemutatott sajátosságok magyarázatára a közbülső zóna egy szakaszán megvizsgáltuk a 10 ohmm-es feltérben az adódipólussal párhuzamos horizontális elektromos térerősségnek a mélység és az R távolság szerinti alakulását néhány frekvenciára. A 3. ábra szerint az azonos térerősségű felületek a frekvencia csökkenésével fokozódó dőlésűvé válnak, azaz egyre jobban eltérnek a síkhullámú vízszintes helyzethez képest. A dipólusgerjesztésnél emiatt válik mérsékeltebbé a térerősség mélység szerinti csökkenése.



4. ábra A tápkábellel párhuzamos elektromos térerősség azonos amplitúdójú felületeinek metszetei néhány frekvenciára a 10 ohmm-es feltérben

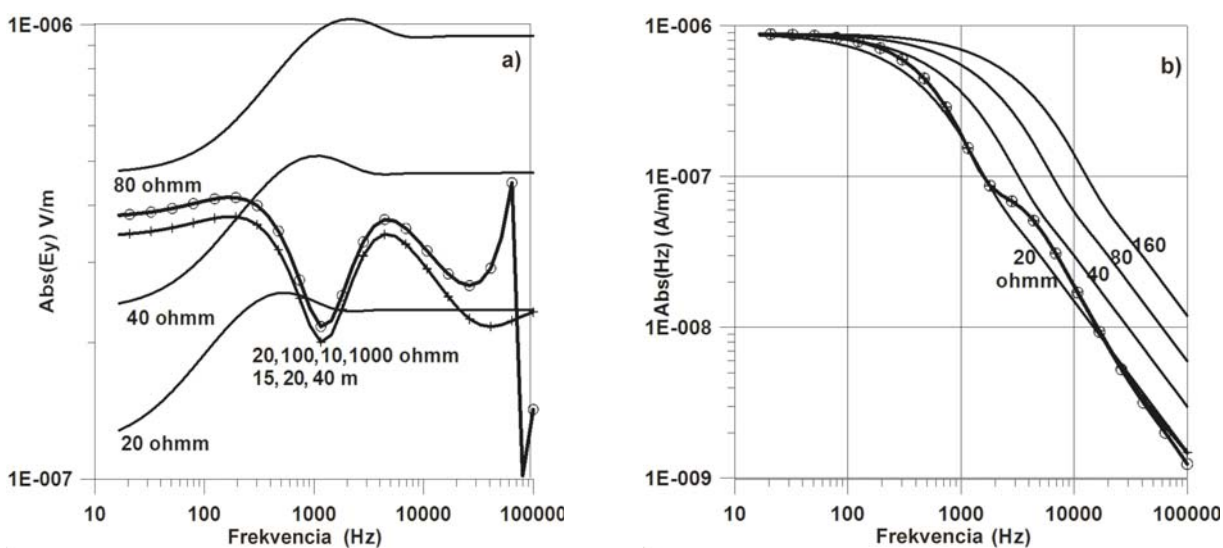
Figure 4 Vertical sections showing the attenuation of electric field component parallel to the source in the function of depth, transmitter-receiver distance and frequency



5. ábra | 4 réteges metszet horizontális elektromos frekvenciaszondázási görbéjének frekvencia–mélység transzformációja
 Figure 5 | Frequency-depth transformation of the electric field component frequency sounding curve over a four-layer half-space

4. Az átmeneti zóna mérési eredményeinek teljes értékű értelmezése természetesen csak az elektromos bipólus terének direktfeladatát használó inverzióval végezhető el. A bemutatott sajátságok alapján azonban felvetődik a kérdés, hogy első lépésként – a startmodell megadásához, a laterális változások indikálására – a teljes frekvenciasávra vonatkozó látszólagos fajlagos ellenállásokra nem végezhető-e egy becslés jellegű frekvenciámélység-transzformáció. A görbék távoli zónás szakaszára ez a magnetotellurikához hasonlóan kétségkívül megtehető. A közbülső zónában pedig – pl. a 2.b diagram alapján végzett – korrekció alkalmazásával a síkhullámú szakasz egy meghatározható $\rho_{eff}f$ értékig (2.b ábra) kiterjeszhető.

A korrekció egy bizonyos frekvenciasávban a bipólusgerjesztésű mérés effektív fajlagosellenállás-adatainak a frekvenciatengely menti áthelyezését jelenti azokhoz a kisebb frekvenciaértékekhez, amelyeknél a síkhullámú tér a bipólus terével azonos behatolási mélységű. Ezt a transzformációt az azimutális elektromos komponensből levezetett effektív fajlagos ellenállásra egy másik közleményünkben leírtuk (Takács, Pethő 2008). Ilyen transzformáció eredménye az 5.a ábra, 4 réteges, elektromos amplitúdógörbére pedig az 5.b ábra. Látható, hogy a magnetotellurikában használt $d_i \approx \sqrt{\rho_i^{eff} / 2\pi f_{kor,i} \mu_0}$ kutatási mélység függvényében ábrázolt effektív fajlagos ellenállás – piros görbe – csak a nagyfrekvenciás részen mutat reális közelítést.



6. ábra | A horizontális elektromos és vertikális mágneses amplitúdó fajlagosellenállás-érzékenységeinek szemléltetése a frekvenciatartományban
 Figure 6 | Demonstration of resistivity resolution of horizontal electric field and vertical magnetic field component frequency sounding curves

Viszont elfogadható becslésnek tekinthetők a korrigált szkinmélység – $p_i = 503 \sqrt{\rho_i^{\text{eff}} / f_{\text{kor}}}$ – függvényében felhorzolt effektív fajlagos ellenállás és egy-egy mélységsávra a Bostick-féle intervallum fajlagosellenállás-görbéinek rétegződésre vonatkozó indikációi. Az utóbbi szélsőértékei az egyes rétegek középvonala táján, az előbbi szélsőértékei pedig a réteghatárok közelében jelennek meg.

5. Az effektív fajlagos ellenállás meghatározásánál használt homogén féltér-karakterisztikák tanulmányozása más vonatkozásban is fontos felvilágosítást adhat. A 6. ábra példája azt mutatja, hogy az egyes télerősség-komponensekből levezetett effektív fajlagos ellenállás „fajlagosellenállás-érzékenysége” a frekvencia függvényében jelentősen eltérhet. Ennek ismerete a kutatások tervezésénél bír jelentőséggel, amennyiben a használt komponens megválasztását a kutatás célja szerint kell elvégezni. Számolni kell azzal is, hogy a komponensek együttes használatánál – pl. impedancia formájában – az érzékenység frekvenciafüggése is módosul. A 6. ábrán az eddig is vizsgált 4 réteges metszet frekvenciaszondázási görbéi, valamint különböző fajlagos ellenállású, homogén féltrekre az ekvatoriális elektromos és vertikális mágneses télerősségek amplitúdóinak karakterisztikái sze-

repelnek. Látható, hogy a vertikális mágneses komponenshez tartozó effektív fajlagos ellenállás felbontása a kis frekvenciáknál – mintegy 1000 Hz alatt – fokozatosan gyengül, és a legkisebb frekvenciáknál már el is tűnik. A körrel jelölt görbék olyan metszethez tartoznak, amelyben a vevő dipólusa alatt a felső rétegben egy 1000 ohm-es $10 \times 30 \times 10$ m méretű hasáb található. Figyelemre méltó, hogy a felszínhez közeli jelentős inhomogenitás hatása – *static shift* – a vertikális mágneses komponensben alig jelentkezik.

6. Összefoglalásként megállapítható, hogy a T049479 OTKA-téma keretében végzett vizsgálatok szerint az elektromos áram bipólus terének átmeneti zónájában a megfelelően megtervezett frekvenciaszondázási mérésekkel a szokásosnál kisebb adó-vevő távolságoknál is hasznos földtani információk nyerhetők a rétegződésre és a laterális szerkezeti változásokra. A frekvenciasáv alsó határát az a frekvencia jelenti, amelynél a mért télerősség-komponens fajlagosellenállás- és frekvenciafüggése már nem szignifikáns. A mérések tervezésében, értelmezésében, a földtani szerkezeti viszonyok és az elektromágneses tér kapcsolatának tisztázásában jól alkalmazható a teljes frekvenciasávra vonatkozó effektív fajlagos ellenállás.

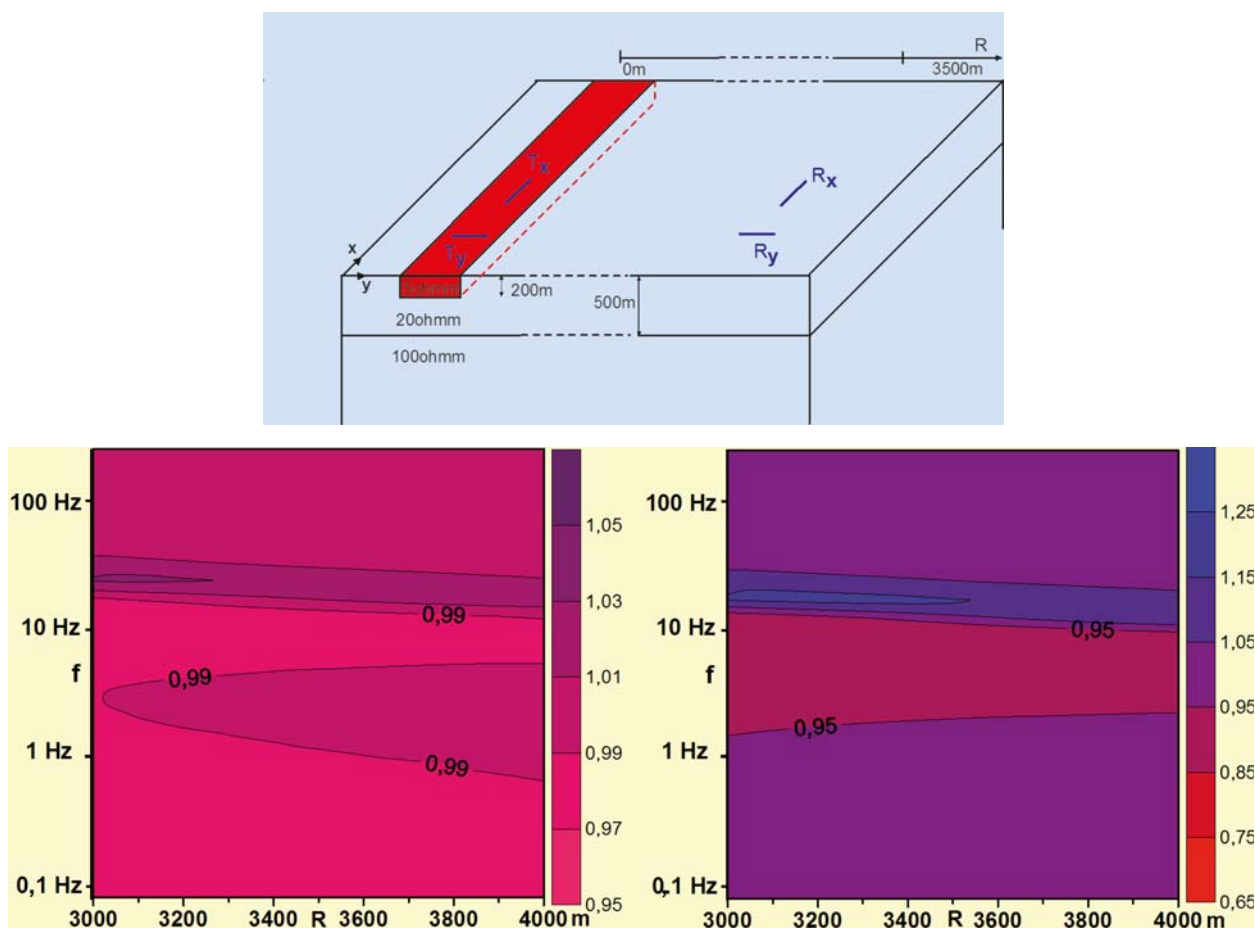
2. 2,5D-s frekvenciatartománybeli elektromágneses numerikus modellezés fejlesztése és modellezési eredmények összegzése^{b)}

A 2,5D-s FEM (frekvenciatartománybeli elektromágneses) véges különbséges programrendszer vonatkozásában algoritmus- és programfejlesztést végeztünk a modellezések pontosságának növelése érdekében, az elektromos dipólusgerjesztést alkalmazó nem csak felszíni mérések szimulációjára és az eltolási áramok figyelembevételével a felszíni mágneses dipólusforrás EM terének meghatározására. További fejlesztéseink arra irányultak, hogy a modellezéseinket PC-s környezetben végezhessük el, másrészt a számítás párhuzamosítási lehetőségeinek vizsgálatát követően a modellezéseinket párhuzamos processzálás (*parallel processing*) keretében valósítsuk meg.

1. A multifrekvenciás 2,5D-s modellezésének megkezdése előtt több *ellenőrzést* végeztünk, mely elsősorban az 1D-s modellezési eredményekkel való összehasonlítást jelentette. A 7. ábra felső részén az inhomogenitás nélküli 2 réteges (1D-s) modellre $268,3 \text{ Hz} \geq f \geq 0,1 \text{ Hz}$ frekvenciatartományban $50 \times 249, 45 \times 180, 42 \times 128$ méretű rácsokat maximum 27 db k_z értéket alkalmazva a térkomponensek amplitúdó eltérése az 1D-s és 2,5D-s kóddal számítva kisebb mint 2,5%, míg a térkomponensek fáziseltérése $1,5^\circ$ -on belüli érték volt. A térbeli hullámszám-tartománybeli mintavételezés szemléltetésére – így a modellezések pontosságnövelése érdekében is – valamennyi számítási pontban a Fourier-transzformált térkomponensek csapásirányú térbeli hullámszámfüggését megadtuk. A modellező rendszer további tesztjét jelentette egy inhomogén modell esetére, a két polarizációra elvégzett Landau-féle felcserélhetőségi vizsgálat.

A felcserélhetőségi vizsgálatot a 7. ábra felső részén látható modellre végeztük el, ugyanazt a rácsgeometriát alkalmazva, mint az 1D-s ellenőrzéseknél. A felcserélhetőségi vizsgálat elvégzése azért lényeges, mert eltérés esetén rávilágíthat többek között a belső vagy külső határfeltételek, a forráskezelési mód, a rácsgeometria és a rácslezárási távolság megválasztásának nem megfelelő voltára. A felcserélhetőségi vizsgálat mind a két módusra 0,7%-on belüli amplitúdóegyezést adott, míg az elektromos térkomponens fázisa $0,2^\circ$ -on belüli egyezést mutatott a teljes frekvenciatartományban (Pethő 2009b).

2. Numerikus modellezéseinket a távoli zónának az átmeneti zónával határos részén, a teljes átmeneti zónában és a kis frekvenciák irányában, vele határos, már frekvenciától független közeli zónában végeztük el különböző modellekre, ami a hullámszám (k) és az adó-vevő távolság (R) szorzatának három nagyságrendnyi változását eredményezte. Azt tapasztaltuk, hogy még ilyen esetben is 3 rácsgeometria használata elégséges. A *rácsgeometria tervezésében* az MT 2D-s modellezésnél szerzett tapasztalatok a mérvadók azzal a megjegyzéssel, hogy az adó dipólus környezetében finomítani kell a rácsgeometriát, másrészt a levegőben lényegesen finomabb rácsközöket kell alkalmazni, mint a síkhullámú 2D-s E-polarizáció esetében. A rácsok közti átmenetet olyan frekvenciára érdemes tervezni, amely nem esik a gerjesztés típusától és modelltől függően a térkomponensek szondázási görbéjén jelentkező *transition notch* (átmeneti zónában jelentkező alullövés) legmeredekebb részére.



7. ábra Adó alatti, jó vezetőképességű inhomogenitással jellemezhető modellre (fent) számított normált impedanciaamplitúdó metszete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)

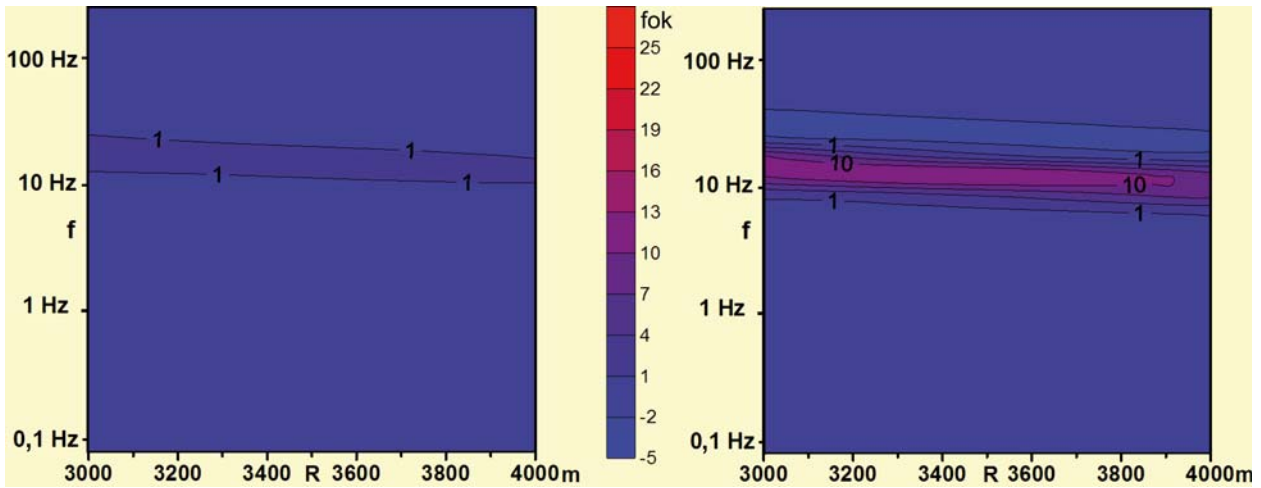
Figure 7 Normalized impedance amplitude section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model with conductive inhomogeneity under the source

A csapásirányú *térbeli hullámszám-* (k_x) tartomány és annak mintavételezésének *tervezésekor* figyelembe vettük, hogy a csapásirányú Fourier-transzformált EM komponensek viselkedése elsősorban az adó–vevő távolságtól, a vizsgált modelltől, a dipólusforrás frekvenciájától, annak típusától, a szerkezeti irányokhoz képesti irányítottságtól, az alkalmazott rács geometriától függ. Az általunk vizsgált modellek esetében 25–29 k_x érték elégségesnek bizonyult, és a logaritmikusan egyenközű mintavételezést (összehasonlító vizsgálatokat követően) preferáltuk a lineárisan egyenközűvel szemben. Ugyanazon modell esetén a nagyobb frekvenciákon elegendő kevesebb k_x értékre megoldani a lineáris egyenletrendszer.

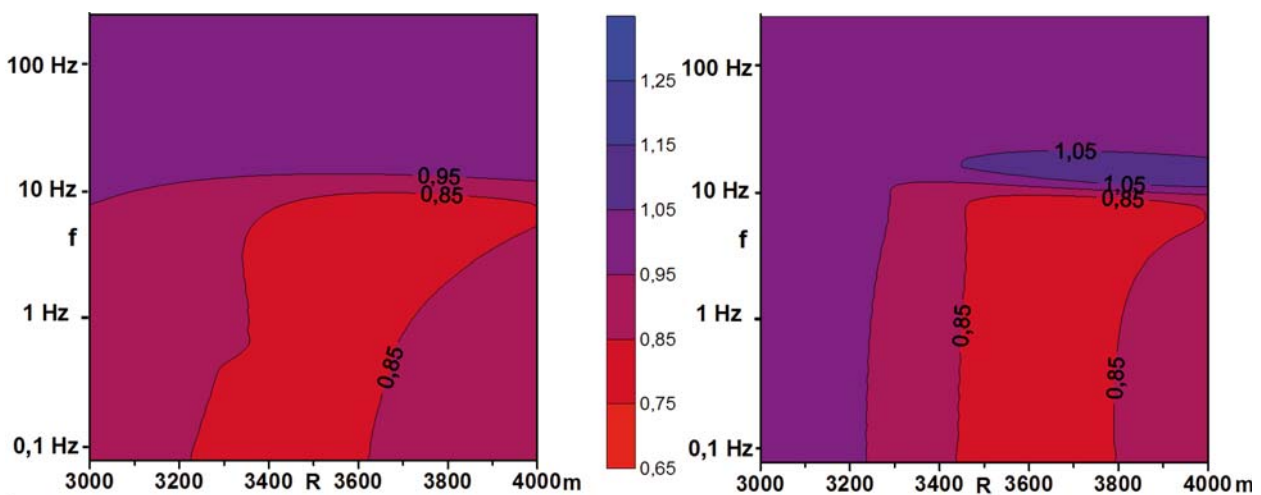
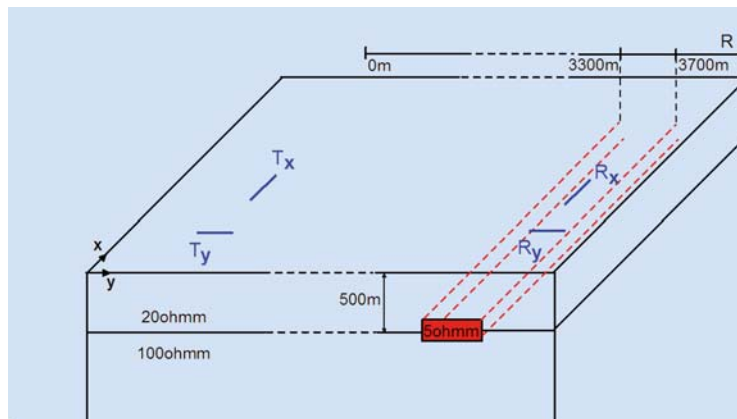
3. A legtöbb, hosszan elnyúlt konduktivitásszerkezet feletti modellezést felszíni elektromos dipólusgerjesztés esetét feltételezve végeztük el. Ezek közül megemlítjük a *távoli zóna átmeneti zónával közvetlenül határos részén* végzett modellezéseinket, melyeket összevetettük a síkhullámú gerjesztés E- és H-polarizációs eredményével egy VLF frekvencián. A modellezések alapján állítható, hogy hosszan elnyúlt szerkeze-

tek esetén a VLF fajlagos ellenállásmérés helyettesíthető elvben pontszerű dipólusgerjesztést alkalmazó CSAMT fajlagos ellenállásméréssel, ha az adó–vevő távolság 6–7 szkinmélységnél nagyobb. Modellezéseink során bemutattuk a csapásirányú elektromos tápdipólus-gerjesztés esetén kialakuló szekunder vertikális mágneses tér dőlés menti változásának szerkezeti indikációkra való felhasználhatóságát is (Pethő 2005, Pethő, Ficsór, Szabó 2006, Németh, Pethő 2009).

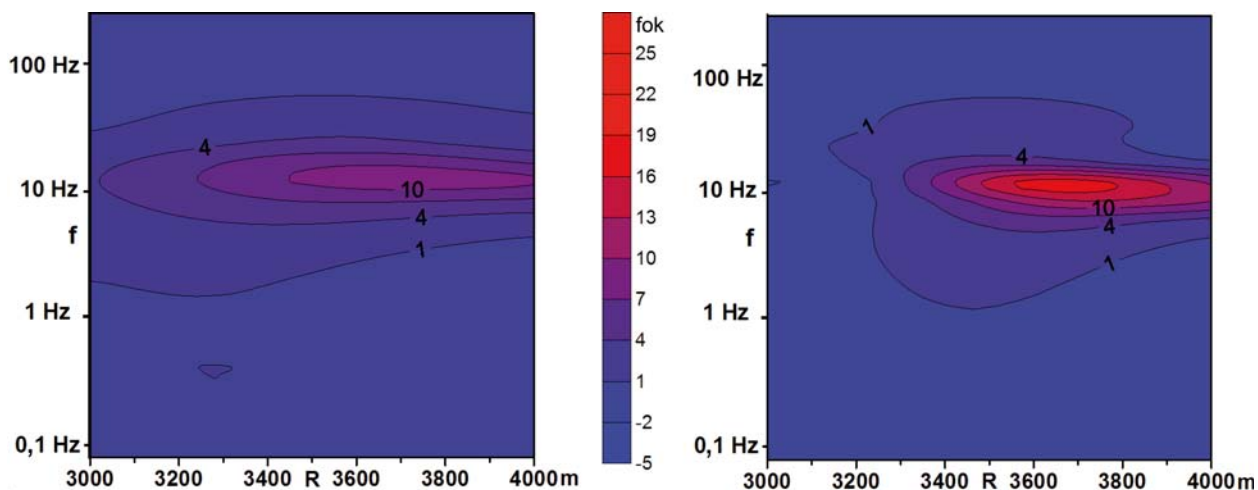
4. A 2,5D-s FEM program numerikus inverz Fourier-transzformáció révén határozza meg az adódipólust magában foglaló vertikális síkban a térkomponenseket (Pethő 2007). Ez lehetőséget ad arra, hogy minden egyes térkomponens amplitúdójára és fázisára az adó-vevő távolság és a frekvencia függvényében izovonalas térképet és adott állomásra frekvenciaszondázási görbéket adjunk meg. A mérhető fizikai paraméterek közül laterális lehatárolásra a két polarizációban a *normált impedanciaamplitúdó- és normált impedanciafázis-metszetek* alkalmazását javasoltuk. A normálás itt az inhomogenitás nélküli (1D-s) modellre számított impedanciaértékekre történt (Pethő 2009a, Pethő 2009b).



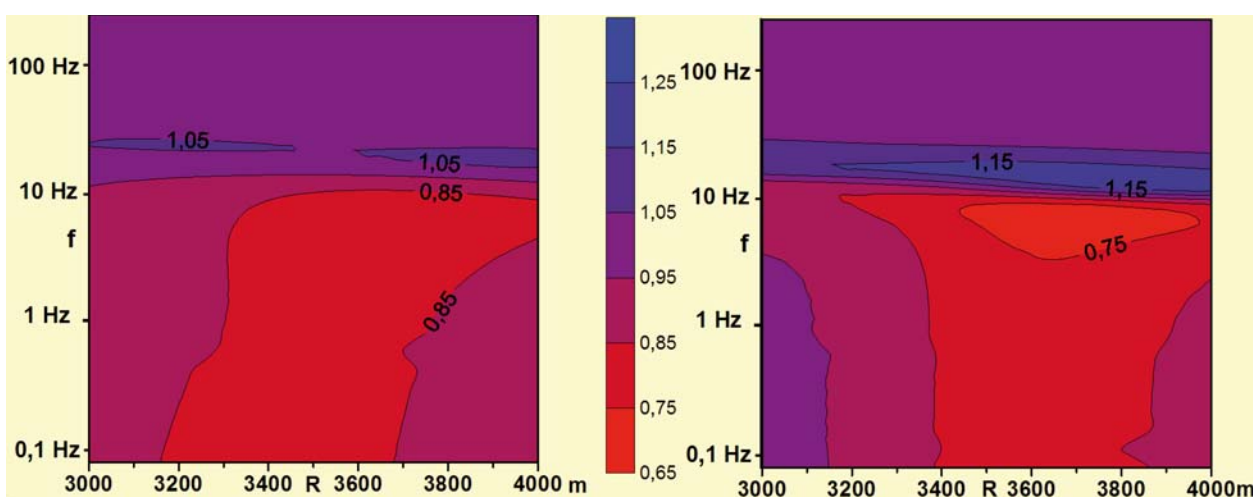
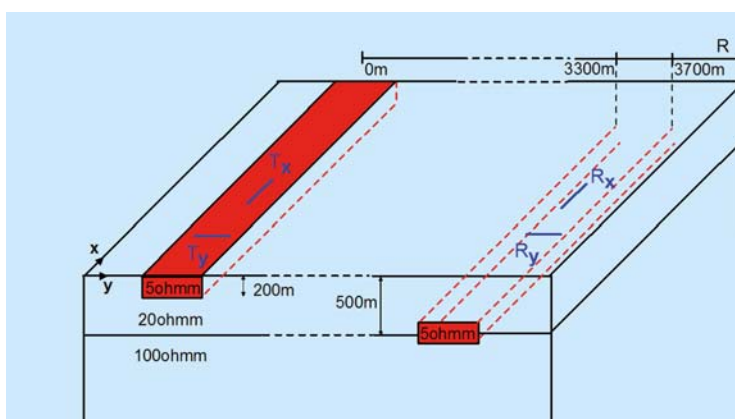
8. ábra | A 7. ábra felső részén látható modellre számított normált impedanciafázis metszete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)
 Figure 8 | Normalized impedance phase section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model of Fig. 7



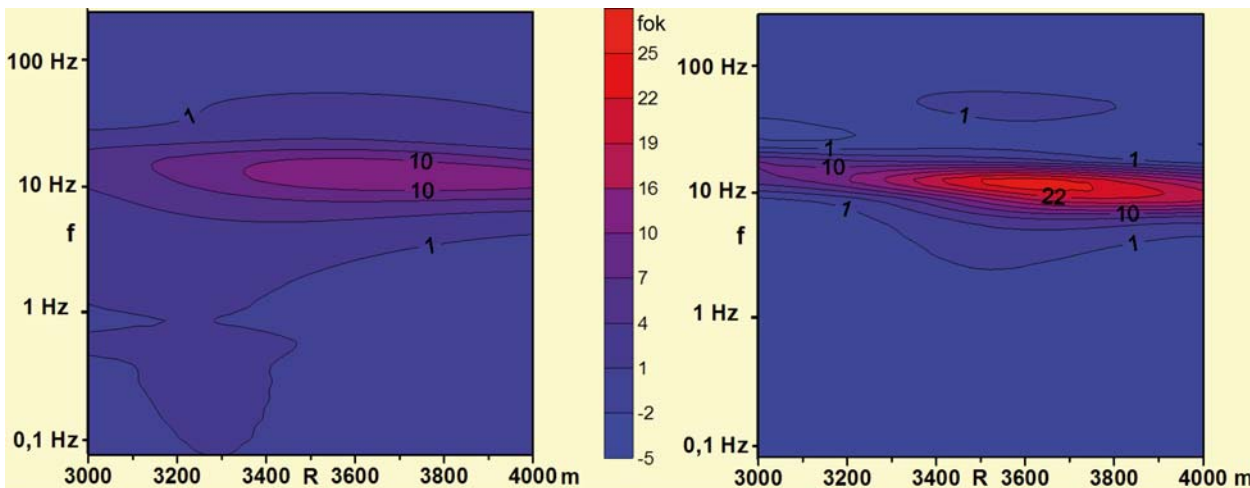
9. ábra | Vevő alatti, jó vezetőképességű inhomogenitással jellemezhető modellre (fent) számított normált impedanciaamplitúdó metszete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)
 Figure 9 | Normalized impedance amplitude section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model with conductive inhomogeneity under the receiver



10. ábra | A 9. ábra felső részén látható modellre számított normált impedanciafázis metszete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)
Figure 10 | Normalized impedance phase section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model of Fig. 9



11. ábra | Adó és vevő alatti, jó vezetőképességű inhomogenitásokkal jellemezhető modellre (fent) számított normált impedanciaamplitúdó met-
szete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)
Figure 11 | Normalized impedance amplitude section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model with conductive inhomogeneity under the source and conductive inhomogeneity under the receiver



12. ábra | A 11. ábra felső részén látható modellre számított normált impedanciafázis metszete TE (bal) és TM módusra (jobb oldal)
 Figure 12 | Normalized impedance phase section for TE mode (left) and TM mode (right) over the model of Fig. 11

A rendelkezésünkre álló MELIS frekvenciaszondázó rendszerrel is lehetőség van különböző mesterséges gerjesztések esetére az impedanciaamplitúdó és impedanciafázis meghatározására. Az átmeneti zónában végzett mérések (Kistokaj) kiértékelésére 1D-s inverziós programot fejlesztettünk ki. Az inverziós program a Melis által meghatározott mérési hibákat veszi figyelembe. Lehetőség van a két mérési elrendezés (dipól axiális és dipól ekvatoriális) impedanciaamplitúdó és impedanciafázis eredményeinek külön-külön, és együttes inverziójára is tetszőleges kombinációban. E mérések együttes inverziós kiértékelése is rávilágított a forrás környezetében lévő inhomogenitások EM térformáló hatására. Az adó környezetében elhelyezkedő felszíni és a vevő környezetében lévő felszín alatti inhomogenitás, továbbá ezek kombinációjaként jelentkező inhomogenitások EM térformáló hatását és a vevő alatti szerkezet kimutathatóságát mutatjuk be a következő részben.

A forrás polarizációs hatása (source polarization effect) abban nyilvánul meg, hogy a TE és TM módusban a galvanikus és az áramcsatornázási hatások eltérő mértéke miatt az EM térkomponensek és az azokból származtatott mennyiségek frekvenciaszondázási görbéi a két mérési elrendezésben eltérnek. Valójában az említett hatások torzítják a már 1D-s környezetben is eltérést mutató dipól ekvatoriális és dipól axiális elrendezésű EM szondázási görbéket. A forrásáthatás (source overprint) jelensége akkor jelentkezik markánsan, ha közvetlenül a gerjesztő dipólus alatt helyezkedik el a vezetőképes inhomogenitás. Ennek hatását a forrástól nagyobb távolságok mellett is érzékelni lehet, bár hatása az adó-vevő távolságával csökken. Másik jellemzője, hogy az offset növelésével ez a hatás egyre kisebb frekvencián jelenik meg. Épp ezért gyakran nem is különböztetjük meg az árnyékhatastól (shadow effect), mely a forrás és vevő által átvilágított tértartományban lévő jó vezető jelenléte miatt alakul ki, ugyanis az inhomogenitásban az EM tér csillapodása nagyobb mértékű, mint az inhomogenitáson kívül. A 7–8. ábrán a forrásáthatást szemléltetjük a két po-

larizációra vonatkozólag, a vevők alatt kétréteges feltér feltételezésével. A hatás a TM módusznál (T_y-R_y elrendezés mellett) erőteljesebben jelentkezik, mint TE módusban (T_x-R_x elrendezés). A normálás itt és a további esetekben is az inhomogenitás nélküli (1D-s) modellre számított impedanciaamplitúdó és impedanciafázis értékekre történt, az amplitúdónál hányados-, a fázisnál különbségképzést jelent.

Megvizsgáltuk a vevő alatt elhelyezkedő inhomogenitás kimutathatóságát adó alatti inhomogenitás nélküli esetben (9. és 10. ábra), továbbá source overprint feltételezésével (11. és 12. ábra) is.

A vevő alatti jó vezető beágyazódási modellje esetén (9. ábra felső részén lévő modell) a normált impedancia-metszeteken a forráspolarizációs hatás és az árnyékhatastól jelentkezik. TE módusznál az áramcsatornázás, míg TM módusznál az áramfolyás irányára merőleges felületeken kialakuló elektromos töltésfelhalmozódás miatt alakul ki a homogén, kétréteges feltér impedanciájához képest megfigyelt csökkenés. Az árnyékhatastól a normált impedanciaamplitúdó metszetein mind a két polarizációnál a nagyobb frekvenciákon szignifikánsabban jelentkezik, mint a kisebb frekvenciákon, és az árnyékhatastól még szembetűnőbb a normált impedanciafázis metszetein: a legnagyobb fáziseltérésű helyek inkább az inhomogenitásnak az adódipólussal ellentétes oldala felett alakulnak ki, mint az inhomogenitás középpontja felett. A fáziseltérések a két polarizációra nézve azonos előjelűek. A TM módus mind az amplitúdó-, mind a fázismetszeten jobban leképezi a vizsgált inhomogenitást.

Végül, a 11. ábra felső részén látható modell mutatja azt az esetet, amikor az adó alatt közvetlenül egy elsősorban forrásáthatást, míg a vevő alatt 500 m-rel egy elsősorban árnyékhatast okozó jó vezetőképes inhomogenitás található. A normált impedancia-metszeteken jól látható, hogy a vevő alatti jó vezető inhomogenitása okozta impedancia-változás a source overprint hatás miatt elkenet jelentkezik, ugyanakkor mivel mind a két inhomogenitás a környezet-

hez képest jobban vezet, ezért impedanciaamplitúdó-csökkenés és impedanciafázis-növekedés figyelhető meg a 7. és 8. ábrán látható normált metszetekhez képest. A hatások szuperpozíciója eredményeként a normált metszeteken az

inhomogenitás egyszerre nagyobb relatív változással, ugyanakkor a forrásáthatás miatt elkenetben jelentkezik. Különösen érvényes ez a TM módusra, ahol a forrásáthatás szignifikánsabb.

3. Átmeneti zónában elvégzett mérések, különös tekintettel a távvezetékek EM terének geofizikai alkalmazhatóságára^{c)}

Homogén féltér felett a három fázisvezetékű távvezeték szimmetrikus, majd aszimmetrikus terhelését feltételezve megállapítottuk, hogy a távvezeték nyomvonalától számítva 4–5, míg az aszimmetrikus esetben 5–6 szkinmélységnél nagyobb távolságoknál a Cagniard-féle formula alkalmazható a látszólagos fajlagos ellenállás meghatározására. A modellezések és a terepi mérések azt is bizonyították, hogy az ennél kisebb távolságoknál – azaz az átmeneti zónában – a bemeneti impedanciának a távoli zónához hasonlóan földtani információtartalma van. A földtani információk az egyes térerősség-komponensekben a vezetékek elrendeződésétől, a vezetékek közötti árameloszlástól és a vezetéktől mért távolságtól függően jelennek meg. Két tanulmányunkban – Takács, Pethő (2006) és Pethő, Takács (2007) – terepi példákkal is bizonyítjuk ennek az 50 Hz-s eljárásnak a földtani alkalmazhatóságát. Saját eszközeinkből többféle mérőrendszert állítottunk össze. Ezekkel kísérleti terepi méréseket végeztünk két területen. A távvezetékekkel párhuzamos elektromos térkomponens alapharmonikusának vizsgálatával az egyik esetben egy vető nyomvonalának térképezését (Múcsony környéke), a másik területen (Sajókaza mellett) az 50 Hz és annak felharmonikusainak mérésével 50–150 m-es üledékekkel fedett mészkőgerinc laterális lehatárolását végeztük el.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti az Országos Tudományos Kutatási Alapot, hogy az „Inhomogenitások lehatárolása elektromágneses frekvenciaszondázások alapján” című kutatási témát a T049479. számú pályázat keretében támogatta.

Jegyzetek

^{a)} Az 1. fejezet Takács Ernő munkája

^{b)} A 2. fejezet Pethő Gábor, Ficsor Lajos és Szabó István munkája

^{c)} A 3. fejezet Takács Ernő és Pethő Gábor munkája

Hivatkozások

- Németh N., Pethő G., 2009: Geological mapping by geobotanical and geophysical means: a case study from the Bükk Mountains (NE Hungary). *Central European Journal of Geosciences*, Versita, Warsaw 1/1 84–94
- Pethő G., 2005: Formalism comparison of 2-D MT and 2.5-D FEM using electric dipole source, *microCAD 2005 International Scientific Conference*, Section C: Geology & Mineral Resources, Miskolc, pp. 31–36

Pethő G., 2007: EM parameters of 2.5-D FEM using electric dipole source in the transition zone. Presented in Intellectual Service for Oil & Gas Industry, Analysis, solutions, perspectives. Published by MU & USPTU, Miskolc, ISBN 978-963-661-761-5, Vol. 4, pp. 110–117

Pethő G. 2009a: Numerical modelling of CSAMT source effects for elongated conductivity structures, 11th Scientific Assembly of International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Sopron, [iaga_abstract\DIV1\107-WED-O1345-0452.pdf](#)

Pethő G. 2009b: FEM source effect investigation with 2.5D numerical modelling, 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface 2009 Proceedings & Exhibitors' Catalogue, Dublin, p.59

Pethő G., Ficsor L., Szabó I., 2006: Comparison of 2-D VLF and 2.5-D HED's far field regime EM fields, *microCAD 2006 International Scientific Conference*, Section B: Geoinformatics Spatial Informatics & Mineral Resources, Miskolc, pp. 35–40

Pethő G., Takács E., 2007: Geophysical Application of Power Lines EM fields. 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul, Extended Abstract, p. 25

Takács E., Pethő G., 2006: Újabb vizsgálatok a villamos távvezetékek terének geofizikai alkalmazhatóságára. *Magyar Geofizika* 47/1 20–26

Takács E., Pethő G., 2008: Information-content of the electric bipole source frequency sounding curves in the transition zone. *Acta Geod. Geoph. Hung.* 43/4, 369–381

Az OTKA támogatásával megjelent további, a hivatkozásokban nem szereplő publikációk:

Ficsor L., Pethő G., Tóth A., 2008a: Gridification of a geophysical electromagnetic modelling system, *microCAD 2008 International Scientific Conference*, Miskolc, Section O: Applied Information Engineering, pp. 43–48

Ficsor L., Pethő G., Tóth A., 2008b: Upgrading 2.5-D FD modelling by parallelisation, *microCAD 2008 International Scientific Conference*, Miskolc, Section O: Applied Information Engineering, pp. 37–42

Takács E., 2009: Layer-discontinuity indications in the induction response of EM transillumination measurement. 11th Scientific Assembly of International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Sopron, [iaga_abstract\DIV1\104-THU-P1610-0540.pdf](#)

Tóth A., Ficsor L., Pethő G., 2007: WP4: Applications Progress Report, FEM2.5D/2.5 Dimensional Frequency Domain Electromagnetic Numerical Modeling, SEE-GRID-2, 5th PSC (Project Steering Committee) Meeting, Thessaloniki

Tóth A., Ficsor L., Pethő G., 2009: FEM 2.5-D – Egy geofizikai elektromágneses numerikus modellező rendszer megvalósítása a GRID-ben. *Networkshop 2009 Konferencia CD*, Szeged

Vass P., Dobróka, M. 2009: Sorfejtéses inverzió – Fourier-transzformáció mint inverz feladat. *Magyar Geofizika* 50/4, 141–152