

Mágneses torzulások a magnetotellurikában

A klasszikus MT feldolgozási eljárások várható torzulásai mágneses közeg megjelenése esetén, 2D direkt modellezés eredményei extrém nagy mágneses permeabilitás esetén

KISS J.^{1,@}, SZARKA L.², PRÁCSER E.²

¹Szabályzott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (SZTFH), Földtani Igazgatóság,
H-1051 Budapest, Sas utca 20–22.

²Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (ELKH FI),
H-9400 Sopron, Csatkai E. u. 6–8.

@E-mail: janos.kiss@sztfh.hu

Amint korábbi tanulmányok rámutattak arra, hogy a magnetotellurikus méréseknél az elektromos vezetőképesség mellett változóként megjelenik a mágneses permeabilitás is, amire a meglévő magnetotellurikus feldolgozási eszköztár nincs felkészítve. E tanulmányban kétdimenziós numerikus modell segítségével szemléltetjük, hogy az erősen mágneses közeg jelenléte a klasszikus magnetotellurikus feldolgozási formulák használata során milyen típusú torzulásokat okoz.

Kulcsszavak: magnetotellurika, elektromos vezetőképesség, mágneses permeabilitás, kétdimenziós modell

Kiss, J., Szarka, L., Prácser, E.: Magnetic distortions in magnetotellurics. *Predictable distortions in classical processing MT procedures, in presence of a magnetic medium, based on 2D direct modeling results*

As previous studies have pointed out, the existing set of tools for processing magnetotelluric data is not prepared for the fact that, in addition to electrical conductivity, magnetic permeability also appears as a variable in magnetotelluric measurements. In this study, we use a two-dimensional numerical model to illustrate the type of distortions caused by the presence of a strongly magnetic medium in using classical magnetotelluric processing formulas.

Keywords: magnetotellurics, electrical conductivity, magnetic permeability, two-dimensional numerical model

Beérkezett: 2023. március 29.; *elfogadva:* 2023. május 2.

Bevezetés

Több cikkben is elemeztük a mágneses közeg hatását a magnetotellurikus mérésekre, és megállapítottuk a lehetséges mágneses hatás következményeit. Először csak egydimenziós esetben (homogén féltér, horizontálisan rétegzett féltér esetén, Szarka et al. 2010, Kiss et al. 2010), később már kétdimenziós esetben is (Kiss et al. 2020, Kiss, Prácser 2021).

Kutatásaink a Curie-hőmérséklet tartományában megjelenő mágneses Hopkinson-effektus nagy behatolási mélységű magnetotellurikus elektromágneses mérésekre gyakorolt lehetséges hatásának (Kiss et al. 2005) vizsgálatával kezdődtek. Később – gyakorlati terepi mérési tapasztalataink (tranziens és magnetotellurikus) alapján – a felszínközeli mágneses testek lehetséges hatásának vizsgálata is bekerült a vizsgálati körbe (Kiss et al. 2020, Kiss, Prácser 2021).

A hatások elemzése céljából a valóságban tapasztalható mágnesezettségnél egy-két nagyságrenddel nagyobb értékeket alkalmaztunk. Ez valójában csak a Curie-hőmérséklet mélységében elfogadható, a felszíni mágneses testek esetén eltúlzottnak tűnik.¹⁾ Erre most is fel kell hívnunk a figyelmet, mert sokkal erősebb hatásokat mutatunk be felszínközelségben, mint amelyeket a valóságban általában észlelhetünk. A mágnesezettség okozta hatások jellege, viselkedése azonban ugyanolyan lesz kicsi és nagy mágnesezettségi értékek esetén is, csak a torzulások mértéke

(amplitúdója) lesz különböző. Megőriztük tehát a nagy mágneses permeabilitás-értékeket a jelenségek pontos azonosítása és láthatóbbá tétele érdekében.

A korábbi cikkünkben (Kiss, Prácsér 2021) bemutatott modellezési eredményeket, szondázási görbéket és az E-polarizációs²⁾ látszólagos fajlagos ellenállás-értékeket frekvenciatartományban jelenítettük meg. (Az MT szondázási görbéket – a nagy mélységek irányában történő ritkuló mintázás és a fajlagos ellenállás általános változási trendje miatt – log-log skála mentén szokás ábrázolni.)

A mágneses határfelület által okozott korántsem egyszerű hatás E-polarizációban jól azonosíthatóan megjelent a látszólagos fajlagos ellenállás frekvenciafüggő ábrázolásában (Kiss, Prácsér 2021). Ezzel azonban csak azt bizonyítottuk, hogy a közeg elektromos vezetőképessége mellett a közeg mágneses tulajdonságait is érdemes figyelembe venni, mert határfelületek esetén a mágnesezettség és a mágneses tér megjelenése módosítja, torzítja az elektromos vezetőképesség változásaira fókuszáló értelmezési eredményeinket. Ráadásul csak az E-polarizációs eredményeket mutattuk be szelvény mentén, noha H-polarizációban³⁾ is jelentkezhet a mágneses közeg hatása, csak másképpen. Jelen cikkben ezt a hiányosságot pótoljuk.

Az MT mérések időtartományban történnek, majd az adatokat frekvenciatartományba transzformálják, a földtani értelmezésnél azonban már mélységtartományban kell megjeleníteni a származtatott eredményeket. Az idő-frekvencia átalakítás korrekt, egyértelmű eljárás, de a frekvencia-mélység transzformáció során már figyelembe kell vennünk az elektromágneses hullám terjedési sebességét, ami viszont nemcsak az elektromos vezetőképességtől, hanem a mágneses tulajdonságoktól is függ (Kiss et al. 2020). Hogy tisztán értsük, miről is van szó, érdemes megismételni a korábban megállapított egydimenziós törvényszerűségeket!

„A hatások összegzése *homogén feltér* esetén:

- Az elektromos vezetőképesség növekedése csökkenti az impedanciát, a skinmélységet és a hullámsebességet – ezt nevezzük vezetőképesség-hatásnak! (1)
- A mágneses permeabilitás növekedése növeli az impedanciát, viszont csökkenti a skinmélységet és a hullámsebességet – ezt nevezzük mágnesezettség-hatásnak!” (2)

(Kiss et al. 2010, Kiss et al. 2020)

„*Horizontális rétegzett modell* esetén:

A réteg két változó fizikai paramétere kizárja, hogy a közegek elektromos vezetőképessége, mágneses permeabilitása és a vastagsága külön-külön meghatározható legyen. Az inverzió során meghatározható:

- a relatív mágneses permeabilitás és a fajlagos ellenállás szorzata (3)
- a relatív mágneses permeabilitás és a rétegvastagság szorzata.” (4)

(Kiss et al. 2010)

Rijo (2003) cikkében az egydimenziós mágnesezettségi hatásokkal csak a „static shift” jelenség keretében foglalkozik (a periódusidő függvényében, log-log skála mentén),

nem vizsgálja a mágnesezettség hatását teljes egészében, azaz például eltemetett helyzetű vagy rétegszerű mágneses modelleket és azok mélységi hatását egy egyszerű modellben, például homogén feltérben elhelyezve.

A mágneses test mérete kicsi, 200 m vastag és 600 m széles 2D testről van szó. Az általa alkalmazott mágneses permeabilitásérték kicsi, emiatt a látszólagos fajlagos ellenállás-érték növekedése – mivel a test a felszínene van – csak „mágneses static shift”-ként jelenik meg, és a mágneses réteg vastagságának megnövekedése a periódusidőben történt megjelenítés miatt nem is látszik (pontosabban nem ismerhető fel egyértelműen). Pedig a fajlagos ellenállás és a vastagság növekedése is μ_r -szeresre nő (azaz a $\rho_2 = \rho_1 \mu_r$, illetve $h_2 = h_1 \mu_r$). A relatív kis méret miatt a határfelületi jelenségek megjelenésével, azok hatástávolságával is számolni kellene, továbbá az eredeti Rijo-féle modellkísérletben a mágneses test vezetőképessége is változott, ennek következtében az együttes hatásból nagyon nehéz a mágneses hatást szétválasztani. A Rijo-féle cikkben nincs definiálva a szelvény iránya, így a modell alapján meghatározható E-polarizáció (TE) és a H-polarizáció (TM) iránya sem egyértelmű!

A mi modellünkben az elektromos vezetőképesség szempontjából homogén feltérben extrém nagy mágneses permeabilitást és közel végtelen horizontális kiterjedésű 2D testet használtunk azért, hogy a hatás kizárólagosan és egyértelműen jelentkezzen.

Mivel most kétdimenziós direkt modellezési eredményeket fogunk elemezni, ezért az erre vonatkozó törvényszerűségeket is megismételjük olyan modellek esetében, ahol az elektromos vezetőképesség szempontjából a közeg homogén, a permittivitás (dielektromos állandó) vagy a mágneses permeabilitás értéke a határfelületen áthaladva viszont megváltozik.

„Az impedancia változásai *kétdimenziós modell* függőleges határfelülete esetén:

H-polarizációban:

$$Z_{yx} = [E_y (\epsilon_1 / \epsilon_2)] / H_x = (E_y / H_x) (\epsilon_1 / \epsilon_2) = Z_0 (\epsilon_1 / \epsilon_2), \quad (5)$$

ahol Z_0 az első közeg impedanciája.

A második közeg dielektromos permittivitásának megnövekedése impedanciacsökkenést, csökkenése impedancianövekedést okoz.

E-polarizációban:

$$Z_{xy} = E_x / [H_y (\mu_1 / \mu_2)] = (E_x / H_y) (\mu_2 / \mu_1) = Z_0 (\mu_2 / \mu_1), \quad (6)$$

ahol Z_0 az első közeg impedanciája.

A második közeg mágneses permeabilitásának növekedése impedancianövekedést, csökkenése impedanciacsökkenést okoz.”

(Kiss et al. 2020)

H- és E-polarizációban tehát eltérő módon jelentkezik a mágneses permeabilitás hatása. Ez viszont irányanizotrópiát jelent, illetve okoz a terepi mérések esetén. Erre fókuszáltunk az anizotrópia maximumok (*AniMax*) vizsgálatánál (Kiss et al. 2020).

A klasszikus magnetotellurikus adatfeldolgozásban csak elektromos vezetőképesség-változást tételezzük fel, és az impedanciából a fajlagos ellenállást és az elektromágneses hullámsebességet arra az esetre számítjuk ki, amikor $\mu_r = 1$. Az elvégzett 2D direkt modellezés során azonban figyelembe vettük a közeg mágneses tulajdonságát is (Prácser 2010). Ennek viszont hatása lesz a klasszikus feldolgozás után megjelenített eredményekre, azaz a fajlagos ellenállás értékére, a hullámsebességre, a behatolási mélységre, és ebből adódóan a frekvencia–mélység konverzió is torzulást fog szenvedni. Ami azt jelenti, hogy a mágneses közeg megjelenése miatt a klasszikus magnetotellurikus paraméterek és paramétermeghatározások torzulnak, mivel az ismeretlen mágnesezettségi paramétert figyelmen kívül hagyjuk.

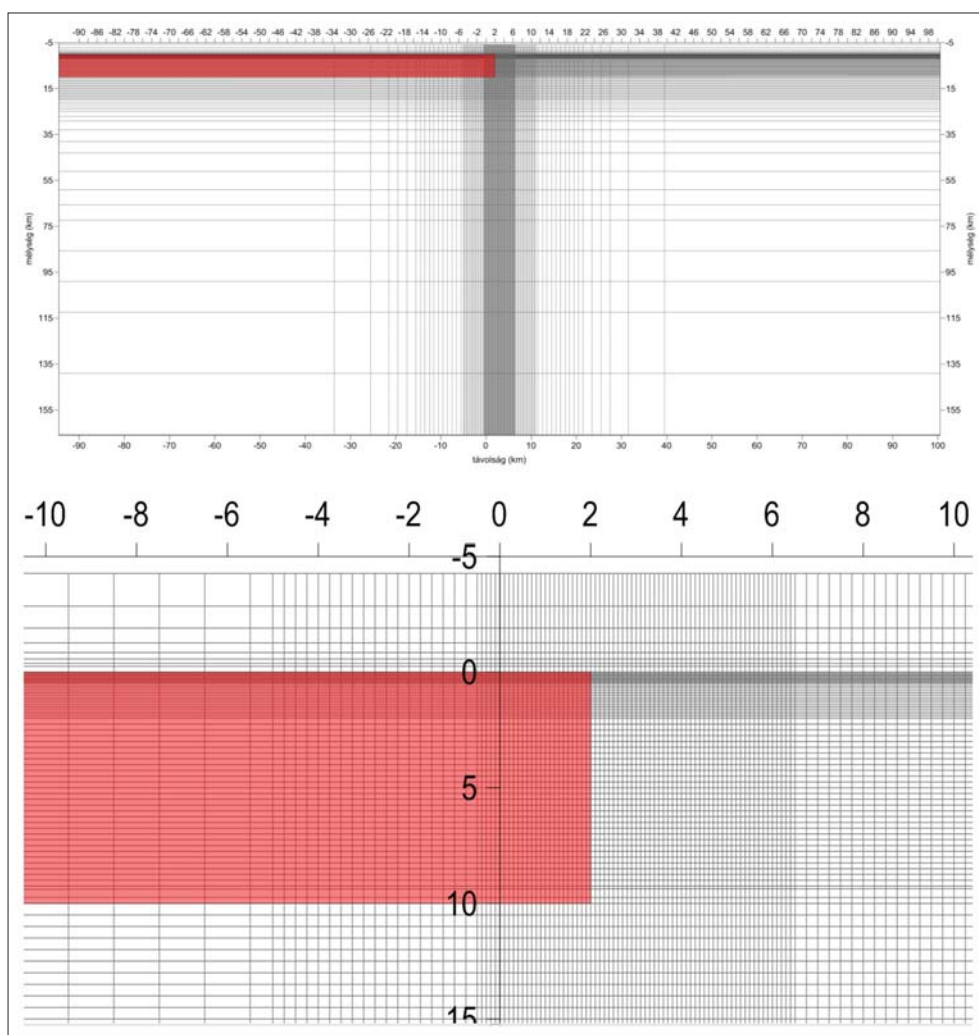
2D modellezés és eredményei

A 2D modellezés előtt el kellett készíteni a modellrácsot, amelyet táblázatszerűen már korábban is közzétettünk

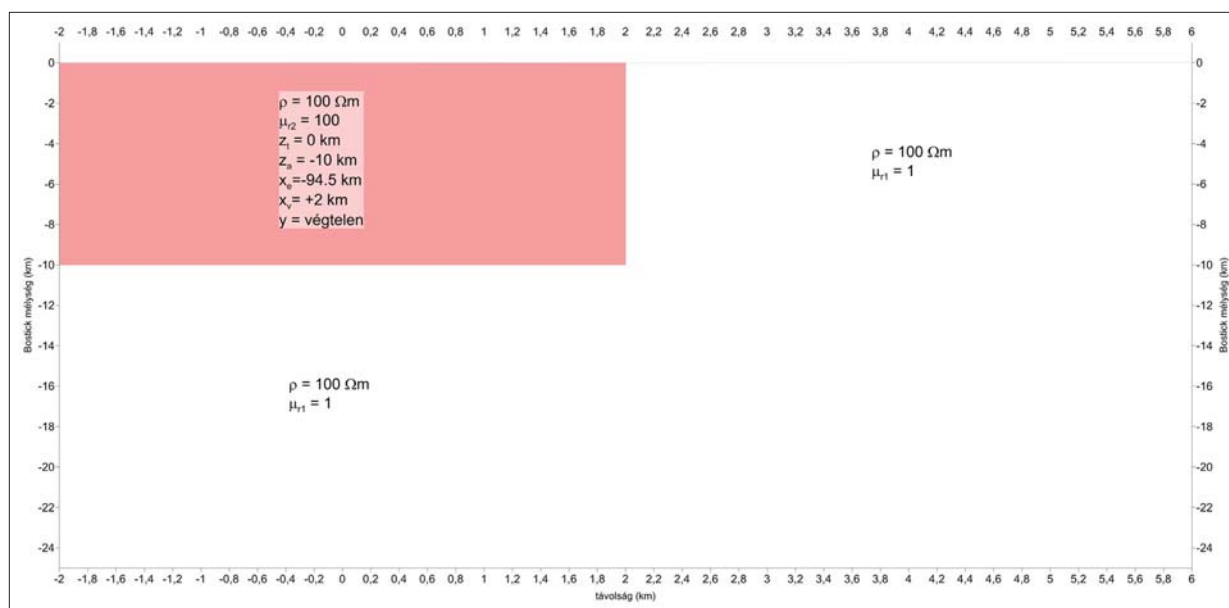
(Kiss, Prácser 2021). A rácsot a homogén féltér modellen, az adott frekvenciatartományban inverzióval teszteltünk, az eredményeket korábbi cikkünk (Kiss, Prácser 2021) bemutatta. Ebben a kiindulási rácsmodellbe helyeztük el a mágneses testet, amely piros „félréteg”-ként jelenik meg (1. ábra). A piros terület összes rácshálóobjektumának (pixeljének) az elektromos (σ) és mágneses (μ_r) paramétereit grafikus úton állítottuk be (2. ábra) egy segédprogram segítségével.

A direkt modellezésnél ebből a mágneses modellből indultunk ki (1., 2. ábra). Az elektromos vezetőképesség szerint homogén modellben a felszínen megjelenik egy erősen mágneses test, és a direkt modellezési eredményeket vesszük szemügyre.

A 3. ábra a látszólagos fajlagos ellenállás távolság- és frekvenciafüggő metszetét láthatjuk E-polarizáció esetén, rajta a mágneses test határfelülete miatt megjelenő változásokat, anomáliákat. A 4. ábra a fázisszög távolság- és frekvenciafüggő változásait mutatja a szelvény mentén, E-polarizáció esetén. Mindkét ábrán jól látható az elektromos vezetőképesség szempontjából homogén féltérben



1. ábra Inverziós modell $-100 \div +100$ km között (felül) és $-10 \div +10$ km között (alul) a mágneses modell (piros színnel) elhelyezkedésével
Figure 1 Inversion model between $-10 \div +10$ km (above) and $-10 \div +10$ km (below) with the location of the magnetic model (in red)

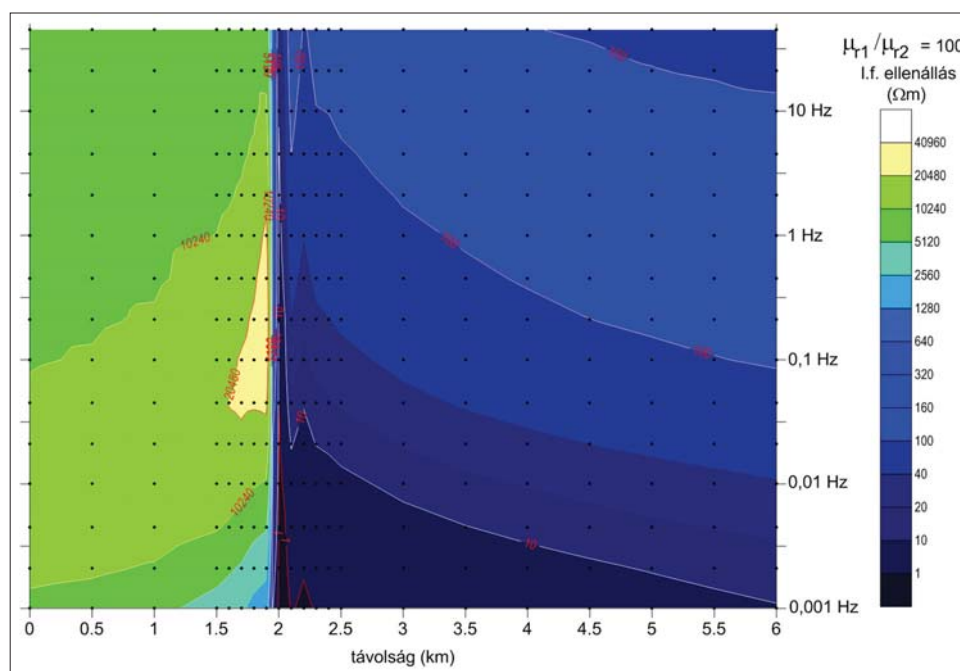


2. ábra Magnetotellurikus 2D direkt modellezés; a kiindulási mágneses modell (távolság–mélység). (Elektromos vezetőképesség szerint homogén modellben a felszínen megjelenik egy erősen mágneses test, a modellezés során 500 m-es állomástávolságot használtunk, amelyet a kontaktus közelében 100 m-re besűríttünk; további részletek Kiss Pácser (2021) cikkében)

Figure 2 Magnetotelluric 2D direct modeling; the starting magnetic model (distance–depth). (In a homogeneous model, in electric sense, a strong magnetic body appears on the surface. In the modeling a station distance of 500 m was used, reduced to 100 m near the contact. For more details see Kiss, Pácser (2021))

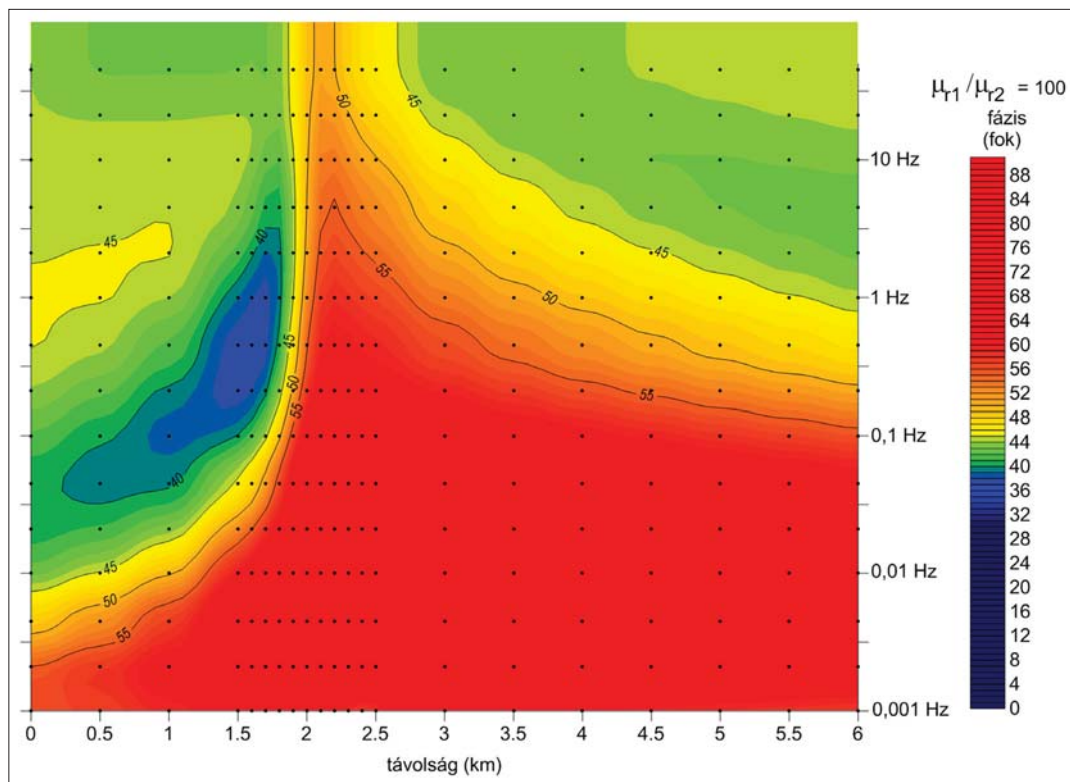
megjelenő mágneses test által okozott hatás. A 2021. évi cikkben csak a látszólagos fajlagosellenállás-értékekből készítettünk távolság–frekvencia szelvényt (3. ábra), pedig az egyedi szondázási görbék alapján jól látszott, hogy a fázis is hasonló torzulásokat mutat, mint amit a 4. ábra mutat.

Meg kell azonban vizsgálnunk a H-polarizációt is (5., 6. ábra), noha a határátmeneti feltételek alapján ott elvileg semmi furcsaságra nem számíthatunk, de a mágneses test a mágneses terével azonban ott van, és hatása nem zárható ki ebben a polarizációban sem.



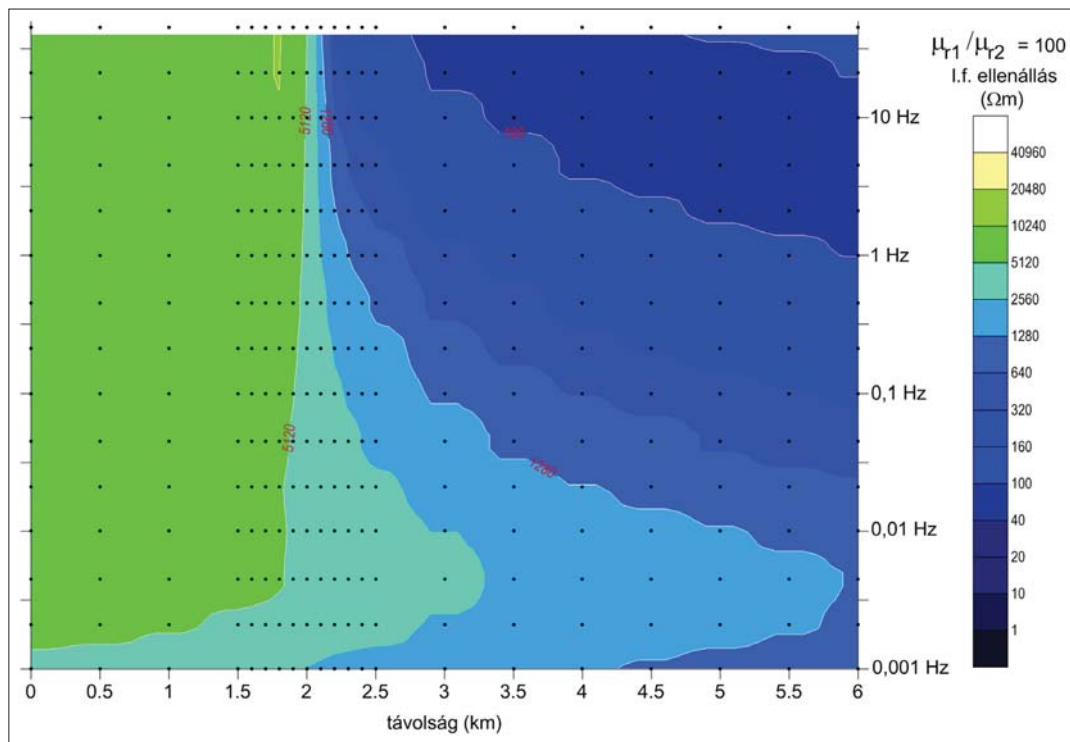
3. ábra A direkt modellezésből kapott E-polarizációs látszólagos fajlagosellenállás-szelvény (távolság–frekvencia). (A mintázást fekete pontok jelzik, amelyek a frekvencia szerint egységesen mintázzák meg a frekvenciateret.)

Figure 3 E-polarization apparent resistivity profile obtained from direct modeling (distance–frequency). (The sampling is indicated by black dots, showing a uniform frequency pattern in terms of the frequency.)



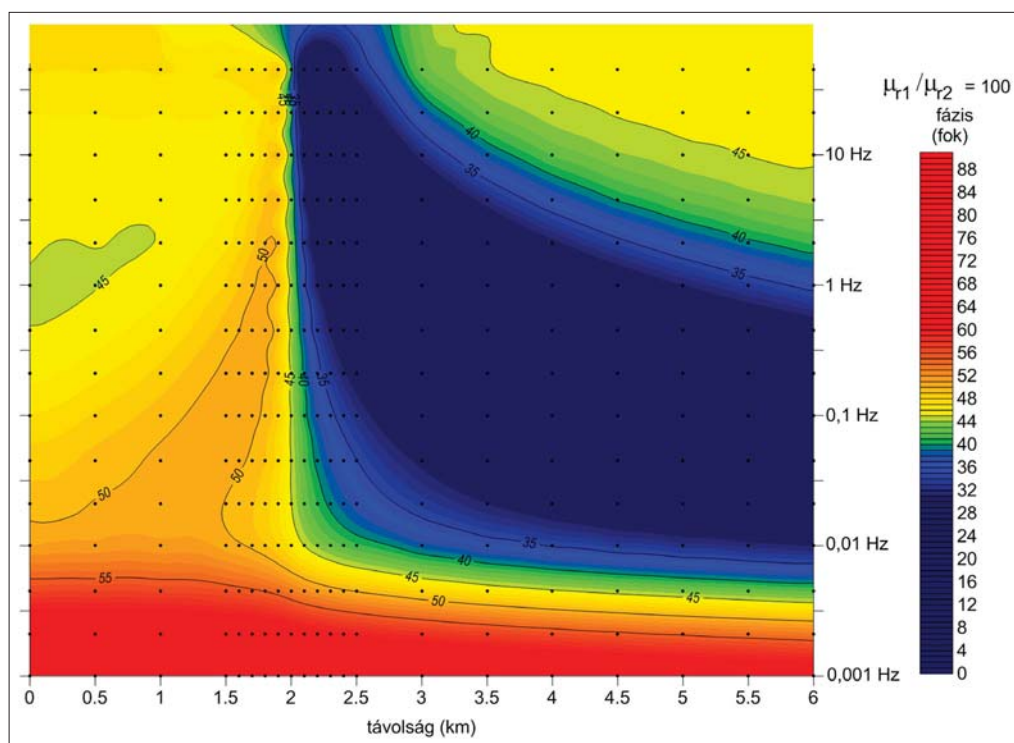
4. ábra A direkt modellezésből kapott E-polarizációs fázisszelvény (távolság–frekvencia). (A mintázást fekete pontok jelzik, amelyek a frekvencia szerint egységesen mintázzák meg a frekvenciateret.)

Figure 4 E-polarization phase profile obtained from direct modeling (distance–frequency). (The sampling is indicated by black dots, showing a uniform frequency pattern in terms of the frequency.)



5. ábra A direkt modellezésből kapott H-polarizációs látszólagos fajlagosellenállás-szelvény (távolság–frekvencia). (A mintázást fekete pontok jelzik, amelyek a frekvencia szerint egységesen mintázzák meg a frekvenciateret.)

Figure 5 The H-polarization apparent resistivity profile obtained from direct modeling (distance–frequency). (The sampling is indicated by black dots, showing a uniform frequency pattern in terms of the frequency.)



6. ábra A direkt modellezésből kapott H-polarizációs fázisszelvény (távolság-frekvencia). (A mintázást fekete pontok jelzik, amelyek a frekvencia szerint egységesen mintázzák meg a frekvenciateret.)

Figure 6 The H-polarization phase profile obtained from direct modeling (distance-frequency). (The sampling is indicated by black dots, showing a uniform frequency pattern in terms of the frequency.)

Ezekkel az ábrákkal csak azt elemeztük, hogy okozhat-e például a mágneses test látszólagos fajlagosellenállás-csökkenést? Látszott, hogy E-polarizációban a kontaktus mellett számolnunk kell ezzel a hatással. Később jött a felismerés, hogy a klasszikus frekvencia-mélység konverzióban (a Bostick-mélység⁴⁾ meghatározása) a mágneses hatás jelentős torzulásokat okoz a mélységértékekben.

Mélységi mintázás E- és H-polarizációban

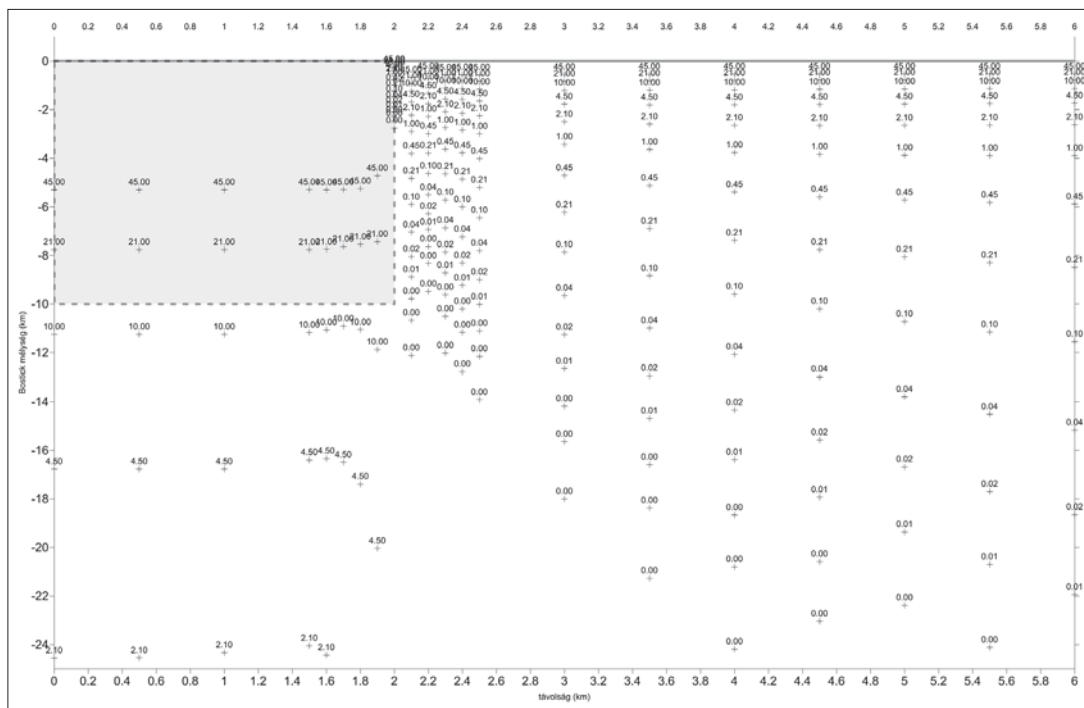
A mágneses test hatásának szemléltetése céljából megjelentettük az azonos frekvenciákon elvégzett szondázások mintázását a klasszikus képletek alapján, azaz adott fix frekvenciák esetén, adott fajlagos ellenállásra és adott mágneses permeabilitásra kiszámított Bostick-mélységekkel (7., 8. ábra).

A legnagyobb eltérés a két mintázási pontfelhő között az, hogy amíg E-polarizációban (7. ábra) ugrásszerű a hatása van a határfelületnek, addig H-polarizációban (8. ábra) folyamatos az átmenet – lásd az azonos mintavételi frekvenciák elhelyezkedését a határfelületnél! A szondázási pontok alatti mintázásokból látszik, hogy a legnagyobb frekvencián mért pontok mélységi helyzete más és más. Mivel a közeg elektromos szempontból homogén, így a hatás (a változó mélységek) csak a mágneses testnek köszönhetően áll elő.

Az egydimenziós modellezésből tudjuk, hogy az n -szeres mágneses permeabilitás-növekedés n -szeres impedancia ($Z = [\omega\mu\rho]^{1/2}$), és ennek következtében fiktív látszólagos fajlagosellenállás⁵⁾-növekedést ($\rho_L = |Z|^2 / [\omega\mu_0]^{1/2}$) okoz (3), ami az első réteg vastagságát is n -szeresre növeli (4). A (2) alapján tudjuk, hogy homogén feltér esetén a mágneses permeabilitás csökkenti a skinmélységet ($\delta_s = 2 / [\omega\mu\rho]^{1/2}$), azaz a behatolási mélységet, amivel szintén számolni kell. A mágneses hatás tehát a fiktív fajlagos ellenállás miatt növeli a behatolási mélységet, de eközben a mágneses permeabilitás valódi hatása ellentétes, azaz csökkenti a skinmélységet, s ezen keresztül a hullámsebességet. Ezek pedig hatással lesznek a feldolgozási eredményekre is.

Látszik, hogy a szelvény végén, az első frekvencián megjelenő mintázások mélysége 225 m körüli, ezzel szemben a szelvény elején, ahol a mágneses test található, ott 5000 m lesz az első frekvencián megjelenő szondázási pont mélysége. Ennek az az oka, hogy (3) szerint a 100-szorosra megnövekedett mágneses permeabilitás növeli a számolt impedanciát ($Z = 100 Z_0$), ami a látszólagos fajlagos ellenállás értékét is megnöveli ($\rho = 100 \rho_0$), ez viszont a rétegvastagságra is hatással van ($h_1 = 100 h_0$). Tudjuk viszont, hogy a mágneses permeabilitás csökkenti a skinmélységet, így az első mintázások közötti mélységkülönbség nem n -szeres lesz, hanem annál kisebb.

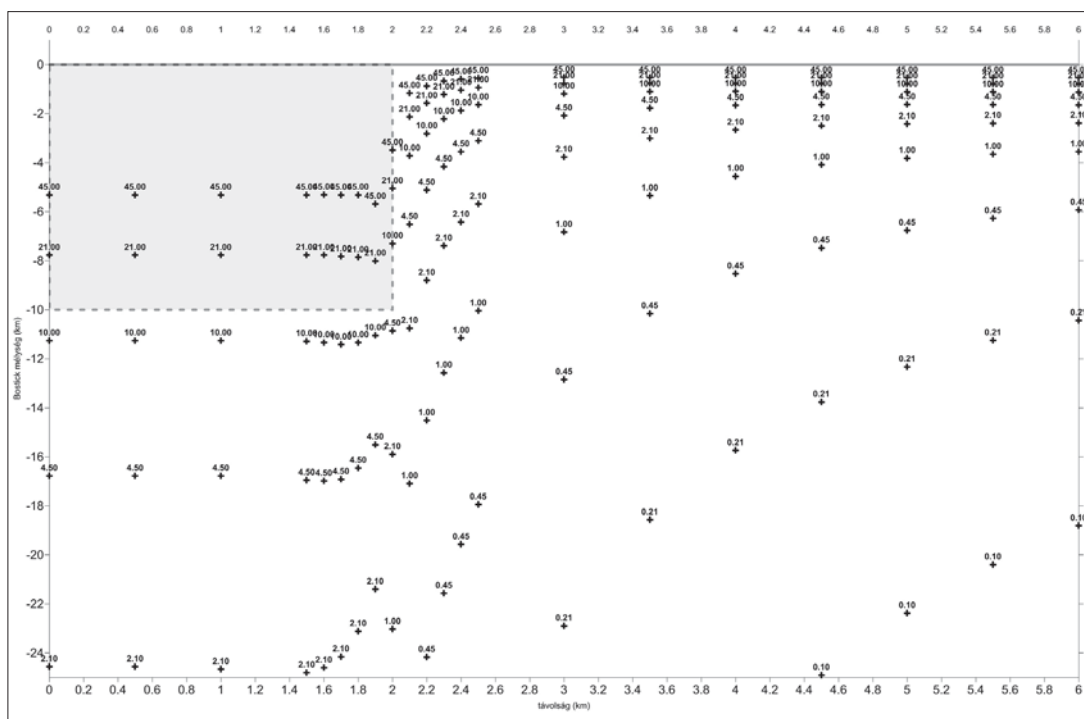
A két közeg határa között, közvetlenül a kontaktuson, $x = 2$ vkm-nél a szondázási görbe összes mintázása a felső



7. ábra A direkt modellezésből kapott mintázások E-polarizációban, a frekvencia értékével, Bostick-mélység szerinti megjelenítésben. (A behatolási mélységet a modell, illetve annak paraméterei határozzák meg.)

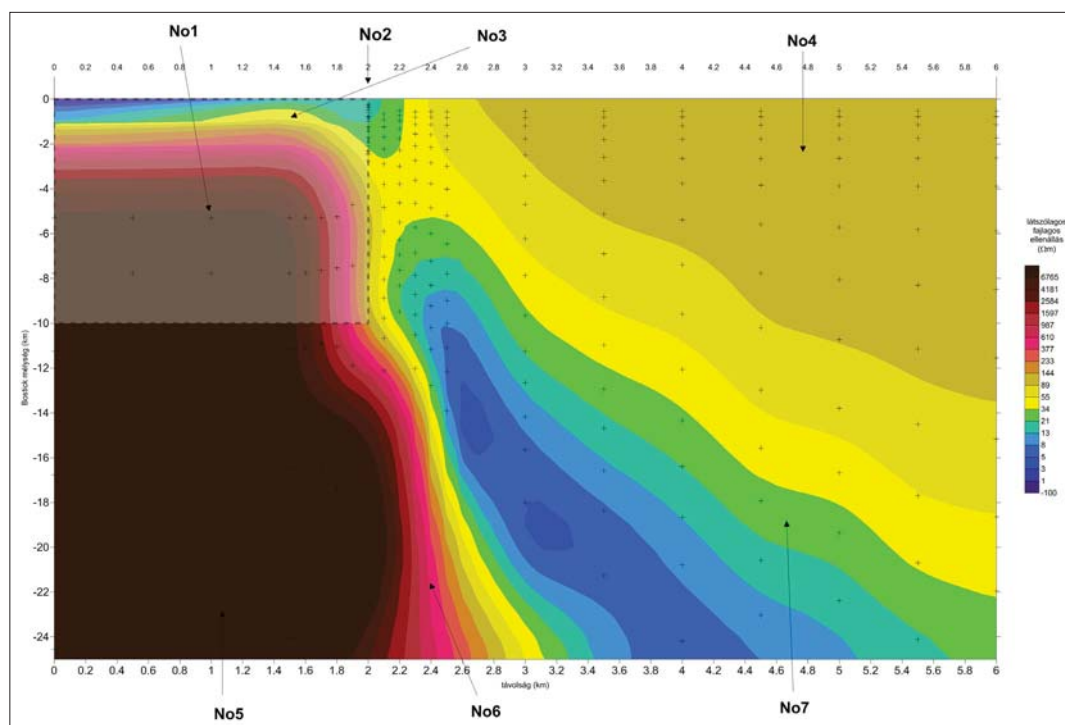
Figure 7 The patterns obtained from samplings in E-polarization direct modeling, with the frequency values, displayed in terms of the Bostick depth. (The penetration depth is determined by the model and its parameters.)

0,25–3,0 km tartományban jelenik meg („szupravezető” (0, 2 és 4 vk) is szemléltetjük a frekvencia és a mélység hatást mutatva, 7. ábra). Ezt egyedi szondázási görbéken függvényében a Függelékben.



8. ábra A direkt modellezésből kapott mintázások H-polarizációban, a frekvencia értékével, Bostick-mélység szerinti megjelenítésben. (A behatolási mélységet a modell, illetve annak paraméterei határozzák meg.)

Figure 8 The patterns obtained from samplings in H-polarization direct modeling, with the frequency values, displayed in terms of the Bostick depth. (The penetration depth is determined by the model and its parameters.)



9. ábra | A direkt modellezésből kapott látszólagos fajlagosellenállás–mélység metszet E-polarizációban (távolság–mélység szelvény, No1–No7 torzulások)

Figure 9 | Apparent resistivity versus depth cross section, obtained from E-polarization. Direct modeling (distance–depth profile, distortions No1–No7)

A szelvény tisztán elektromos tartományában a 0,5–35 km mélységek között, a mágneses test tartományában az 5,0–1000,0 km-es mélységek között vannak a mintázások. Ebből is látszik, hogy milyen komplex hatást idéz elő a mágneses test, a mágneses anomália-tér megjelenése a klasszikus MT E-polarizációs feldolgozásában.

A frekvenciatartományban szabályos és egységes mintázás a mélységtartományban – a frekvencia–mélység transzformáció és a mágneses test hatása miatt – jelentősen megváltozik. A mágneses test környezetében a szabályos mintázás helyett egy torzult és szabálytalan mintázás alakul ki, ami megnehezíti az adatok további feldolgozását, megjelenítését és földtani interpretációját.

H-polarizációban egyszerűbb a helyzet: a szelvény két szélét, ha kellően távol lennének, akkor felfoghatnánk homogén féltereknek. A szelvény vége ρ fajlagos ellenállású, míg az elejének, ahol a közeg mágneses, ott nem ρ , hanem μ_r -szeres, azaz $(\mu_r \rho)$ virtuális fajlagos ellenállású lesz (3), és a behatolási mélység is μ_r -szeresre nő (4). Ahogy közeledünk a határfelülethez, úgy megy át folyamatosan az egyik típusra jellemző eloszlásból a másik típusnak megfelelő fajlagosellenállás-eloszlásba. Ez jól követhető a mintázási képekből (7., 8. ábra).

A behatolási mélység (mintázás) vizsgálata után érdemes megnézni a mágneses közeg hatását a mért (modellezett) látszólagos fajlagosellenállás- és fázisparaméterekre a szelvény függőleges síkjában.

A 9. ábra mutatja a kiszámított látszólagos ellenállásokból interpolált ellenállás–mélység metszetet, a 10. ábra

pedig, a fázisértékek mélységmetszetét E-polarizáció esetén. Átlátszó formában a mágneses testet is megjelenítettük.

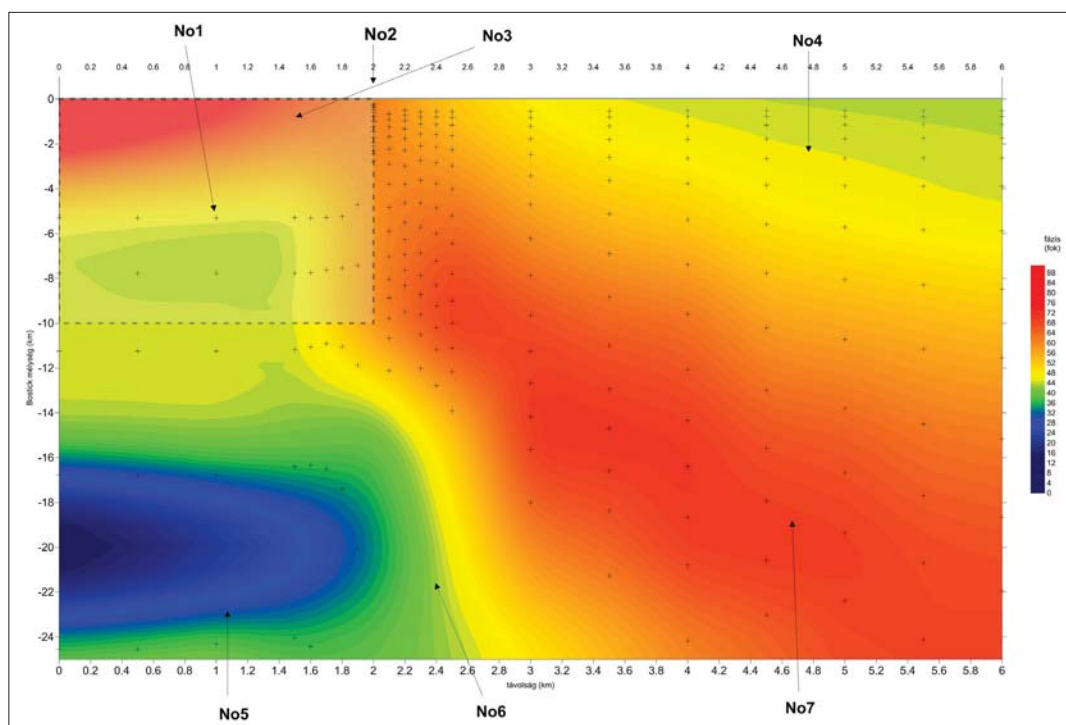
A mágneses hatás miatt bekövetkező szabálytalan mintázás miatt több probléma/hiba is előjön, amit a látszólagos fajlagos ellenállás mélységmetszeten (9. ábra) mutatunk be, de jelöljük azokat a többi mélységmetszeten is.

Megjegyzések:

No1) A mágnesszettség megjelenése miatt megnövekedett látszólagos fajlagos ellenállás megnöveli a Bostick-mélységet, az első minta sokkal mélyebben jelentkezik, ahogy ezt a mintázások vizsgálatánál is megállapítottuk.

No2) A kontaktus felett kétoldalú torzulás van a mintázásban, ebben a pontban az összes mintavétel látszólag a felső 3 km-es mélységtartományra koncentrálódik. Ez minden szempontból anomális, mondhatnánk irreális hatás, mert sem az elektromos közeg, sem pedig a mágneses és elektromos közeg ezt nem indokolja. Ez egyértelműen a határfelület (vagy kontaktus) extrém hatása. Az interpolálás ezt a kiugró hatást elkeni, gyakorlatilag nem látszik.

No3) Adathiány miatt interpolációs álanomáliák mutatkoznak a mágneses test tetején. Nincs mintavételi pont (azaz adat) az interpoláláshoz, így nem valós értékeket tükröz. A dolog azonban elgondolkodtató, mert ez azt is jelentheti, hogy egy eltemetett

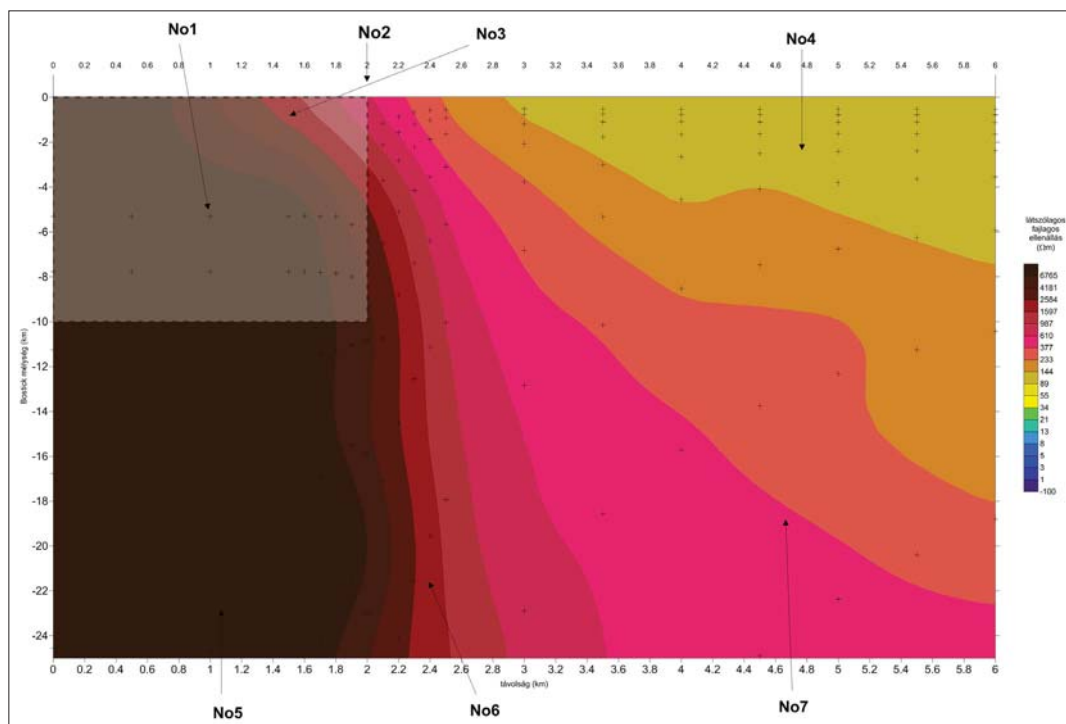


10. ábra | A direkt modellezésből kapott fázis–mélység metszet E-polarizációban (távolság–mélység szelvény, No1–No7 torzulások)

Figure 10 | Phase versus depth cross section, obtained from E-polarization direct modeling (distance–depth profile, distortions No1–No7)

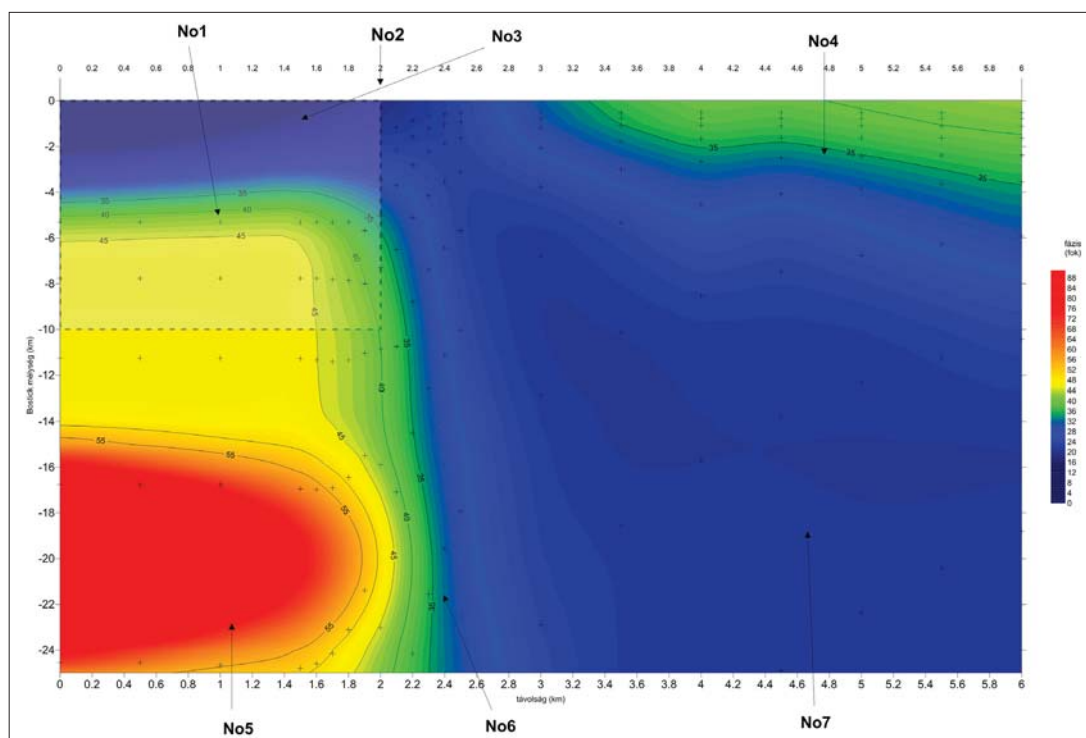
mágneses ható tetején ehhez hasonló kontakthatás várható. amelyet mintavételezéssel szerencsés eset-

ben ki tudunk mérni, de az is lehet, hogy simán „át-ugrunk” rajta anélkül, hogy észlelnénk.



11. ábra | A direkt modellezésből kapott látszólagos fajlagosellenállás–mélységmetszet H-polarizációban (távolság–mélység szelvény, No1–No7 torzulások)

Figure 11 | Apparent resistivity versus depth cross section, obtained from H-polarization direct modeling (distance–depth profile, distortions No1–No7)

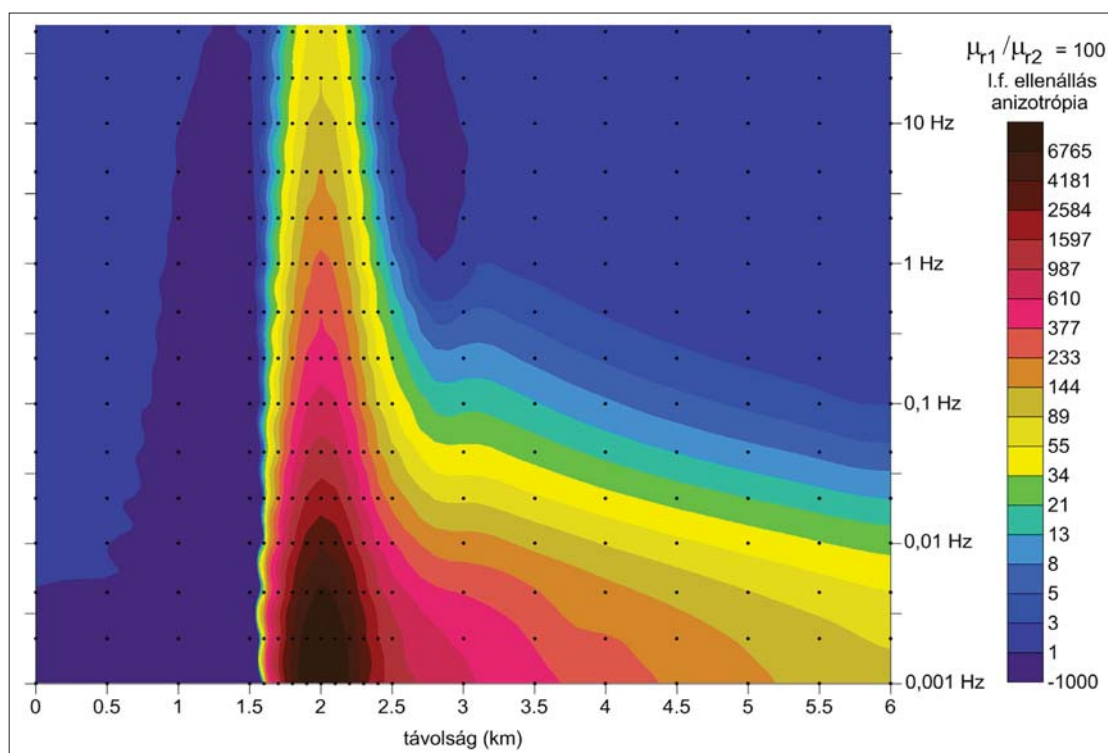


12. ábra | A direkt modellezésből kapott fázis–mélység metszet H-polarizációban (távolság–mélység szelvény, No1–No7 torzulások)

Figure 12 | Phase versus depth cross section, obtained from H-polarization direct modeling (distance–depth profile, distortions No1–No7)

No4) A mágnesezettség nélküli közeg látszólagos fajlagos-ellenállás-értéke, ha kellően eltávolodunk, megfelel a

közeg elektromos vezetőképességének (ami meg-nyugtató).



13. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-anizotrópia a frekvenciatartományban (távolság–frekvencia szelvény)

Figure 13 | Apparent resistivity anisotropy in the frequency range (distance–frequency profile)

- No5) A mágneses fedő miatt a közeg látszólagos fajlagosellenállás-értéke nem áll vissza a valódi elektromos vezetőképesség értékére, vagy – mivel a szondázások behatolási mélysége jelentősen megnő („minta-hiány”), amely változást az elektromos paraméterek nem indokolnának – a közeg valódi fizikai paraméterértéke csak jóval később áll vissza.
- No6) Nagyobb mélységben a kontaktus környezetében adathiány miatt interpolációs álanomáliák alakulhatnak ki, mivel nincs mintavételi pont.
- No7) A mágnesezettség oldalirányú hatása miatt a mélységgel arányosan csökken a látszólagos fajlagos ellenállás értéke a homogén közegben is, és a kontaktustól eredeztethetően egy ferde, jól vezető zóna (9. ábra, kék sáv) alakul ki (a kontaktus oldalhatása). Távolodva a határfelülettől a zóna egyre mélyebben jelentkezik. A távolság és a mélység korrelál, de nem azonos, mivel az elektromos közegben a mágneses paraméter hatása egyre kevésbé játszik szerepet.

A fenti megjegyzések jelentős része E-polarizációban a fázis mélységmetszetére is igazak.

H-polarizációban az átmenet a paraméterszelvény alapján is folyamatos (10. ábra). Szembetűnő, hogy a mágneses közeg alatt az ellenállás látszólag nem áll be a mágnesezettség nélküli homogén féltér értékére – valószínűleg beáll, csak sokkal mélyebben, méghozzá a mágneses hatásra bekövetkező rétegvastagodás miatt.

Ilyen szempontból úgy tűnik, hogy a fázis (12. ábra) sokkal érzékenyebben reagál. A mágneses test alatt megje-

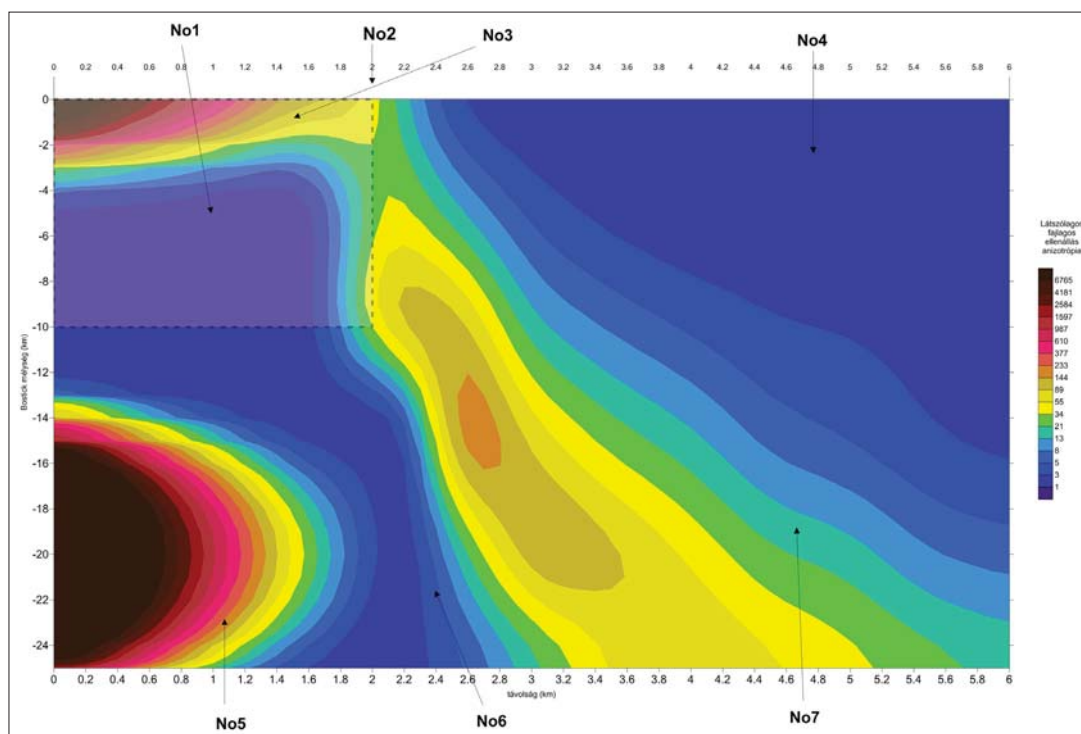
lenő 45 foknál nagyobb fázisértékek a fajlagos ellenállás mélységgel való csökkenését jelzik. A szelvény végén a mélységgel arányosan, 45 fok alá csökkenő fázisértékek a fajlagos ellenállás növekedését jelzik, azaz minél mélyebben vizsgálódunk, oldalhatásként annál jobban érezni a mágneses közeget. Ez törvényszerűen megjelenik, ha mágneses közeg esik a magnetotellurikus mérések vonalába.

A különböző polarizációk esetén az anizotrópia meghatározására két lehetőség adódik: az egyik frekvenciatartományban (az azonos frekvenciák mentén), a másik tértartományban (az azonos mélységek mentén).

A 13. ábra mutatja az azonos frekvenciák alapján számított látszólagos fajlagos ellenállás anizotrópiáját a modellszelvény mentén. Az anizotrópia értéke a vertikális határfelülettől távol 10 alatti, de a mágneses testen kívül, a határfelület mentén nagyságrendekkel megnövekedett anizotrópiaértéket azonosíthatunk. Ez a fajta rendellenesség a kis frekvenciák irányában egyre nagyobb távolságokra kiterjed.

Itt a mintázás szabályos, ritkuló rács szerint történik, amit egyszerű kezelni. Amikor azonban áttérünk tértartományba, akkor már a szabálytalan mintázás és a nagyobb adat nélküli foltok miatt vagy csak egy durva rácsba lehet interpolálni az adatokat, vagy számolnunk kell álanomáliák kialakulásával (No3 és No5 pont).

A 14. ábra mutatja az azonos mélységek alapján meghatározott látszólagos fajlagos ellenállás anizotrópiáját a modellszelvény mentén. Ez azért érdekes, mert a különböző polarizációkban a mágneses közeg a behatolási mélységre is hatással van, ezért az azonos frekvenciájú mintázások



14. ábra | Látszólagos fajlagosellenállás-anizotrópia tértartományban (távolság–frekvencia szelvény)

Figure 14 | Apparent resistivity anisotropy in space domain (distance–frequency profile)

eltérő mélységekre vonatkoznak. Ebben az esetben tehát az E- és H-polarizációban elkészült rácok adatai alapján tudjuk meghatározni az azonos mélységek látszólagos fajlagos ellenállás értékét és a két polarizáció közötti anizotrópiát. Adódik tehát, hogy itt egy másmilyen – a 13. ábra frekvenciatartományú ábrázolásától eltérő – anizotrópia-eloszlásképet fogunk kapni.

Joggal merül fel a kérdés, hogy vajon a klasszikus két-dimenziós inverzió (E-, H- és közös inverzió) során a mágneses közeg hatása hasonló torzulásokat fog eredményezni?

A 14. ábra No3 pontjában jelzett torzulás (anizotrópia) egyértelműen interpolálásból származik (lásd 9. ábra), és a No5 anomália is ilyen szempontból gyanús – a nagyon ritka mintázás miatt álanomáliák jelennek meg. Nem lehet azonban mesterséges hatásnak kezelni a kontaktustól ferdén lefelé húzódó anizotrópiamaximumot, mert itt egy sűrűbben mintázott térrészről van szó. A No3 és No5 pontok környéki torzulásoktól meg lehet szabadulni, de a kontaktus mellett megjelenő anizotrópia egy mérési pontokkal (valós adatokkal) is alátámasztott hatás.

Összegzés

A magnetotellurikus méréseknél megjelenhet az elektromos vezetőképesség mellett egy másik, ismeretlen közeget jellemző is, a mágneses permeabilitás. Ez az anomális mágneses vektortér és az elektromágneses vektortér bonyolult kölcsönhatását eredményezi, amire a meglévő feldolgozási eszköztárunk nincs felkészítve.

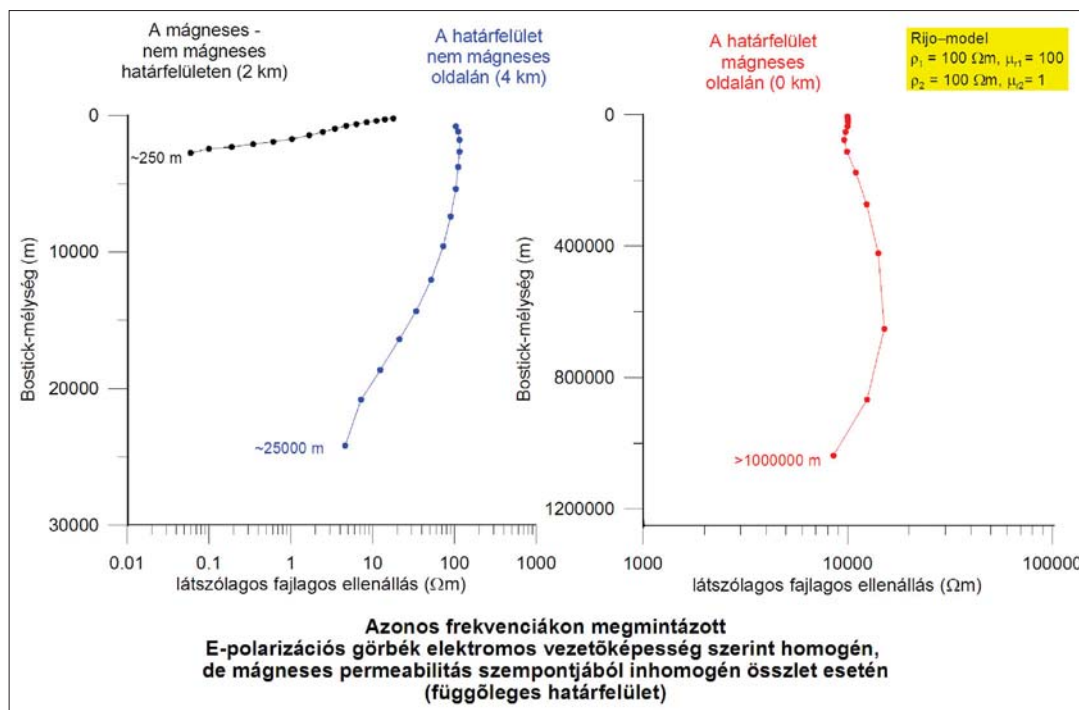
Jó lenne ezektől a hatásoktól megszabadulni, de mivel sem a mágneses közeg geometriájáról, sem a mágnesezettség eloszlásáról, illetve annak nagyságáról nem tudunk, így nem is tudjuk figyelembe venni azokat.

A cikk annak szemléltetése céljából készült, hogy milyen torzulásokkal kell számolni a mágneses közeg megjelenése esetén a magnetotellurikus méréseknél, a klasszikus feldolgozási formulák használata során. A homogén feltérben elhelyezett extrém mágnesezettségű test modelljén keresztül láthatjuk a mágneses paramétertől származó hatásokat, torzulásokat „kendőzetlenül”.

Függelék: Egyedi szondázási görbék a határfelület 2 km-es környezetében

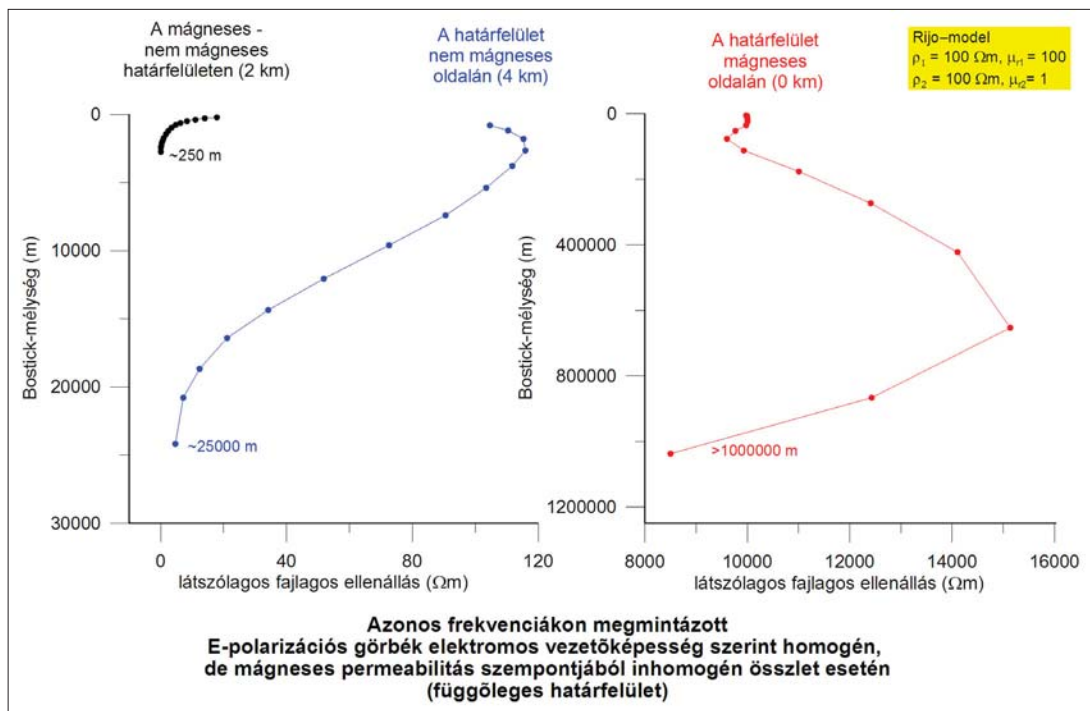
A Rijo-modell (2. ábra) felett kapott 2D magnetotellurikus modellezési eredményeket itt érdemes újra elővenni és a fontosabb szondázási pontok egyedi görbéit megvizsgálni.

A mágneses határfelület (drasztikus átmenet) környezetében a szondázásokat külön-külön is megjelenítettük, mert a fajlagosellenállás-mélységmetszetben a szabálytalan mintázásból és a bizonytalan interpolálási paraméter meg-



15. ábra Homogén vezetőképességű összetételben egy erősen mágneses test hatása a határfelület előtt, a határfelületen és a határfelület után E-polarizációban (logaritmus x tengely mentén, modell: 2. ábra)

Figure 15 Effect of a strongly magnetic body in a homogeneous conductivity ensemble before, at and after the interface in E-polarization (along the logarithmic x axis, model: Fig. 2)

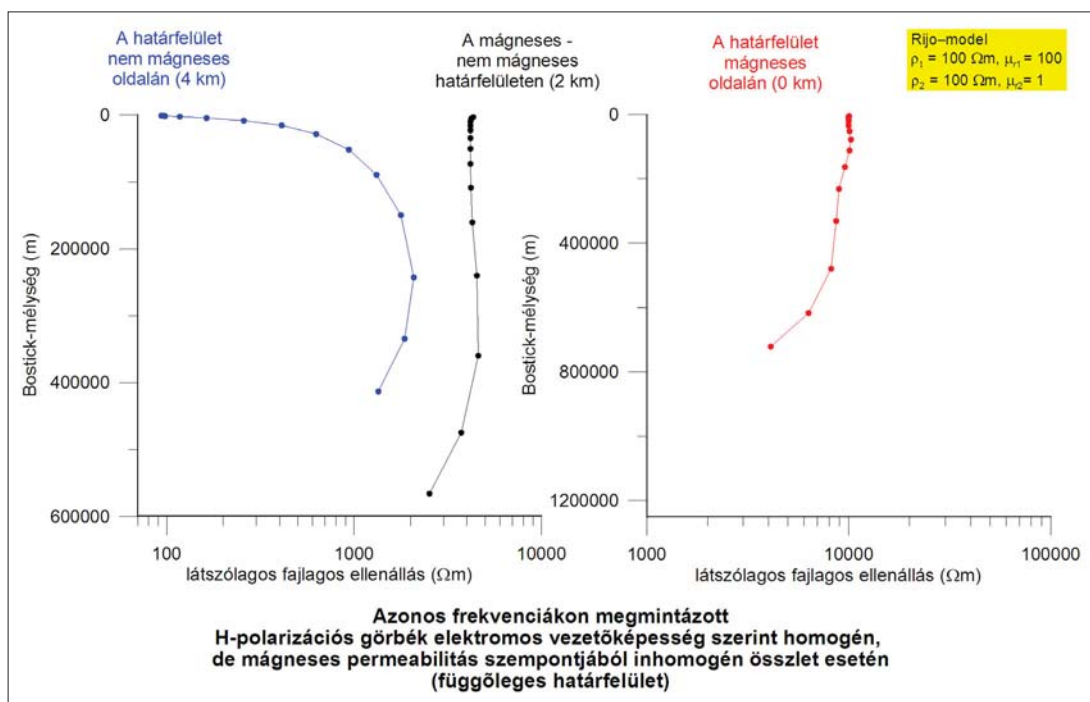


16. ábra Homogén vezetőképességű összetételben egy erősen mágneses test hatása a határfelület előtt, a határfelületen és a határfelület után E-polarizációban (lineáris x tengely mentén, modell: 2. ábra)

Figure 16 Effect of a strongly magnetic body in a homogeneous conductivity ensemble before, at and after the interface in E-polarization (along the linear x axis, model: Fig. 2)

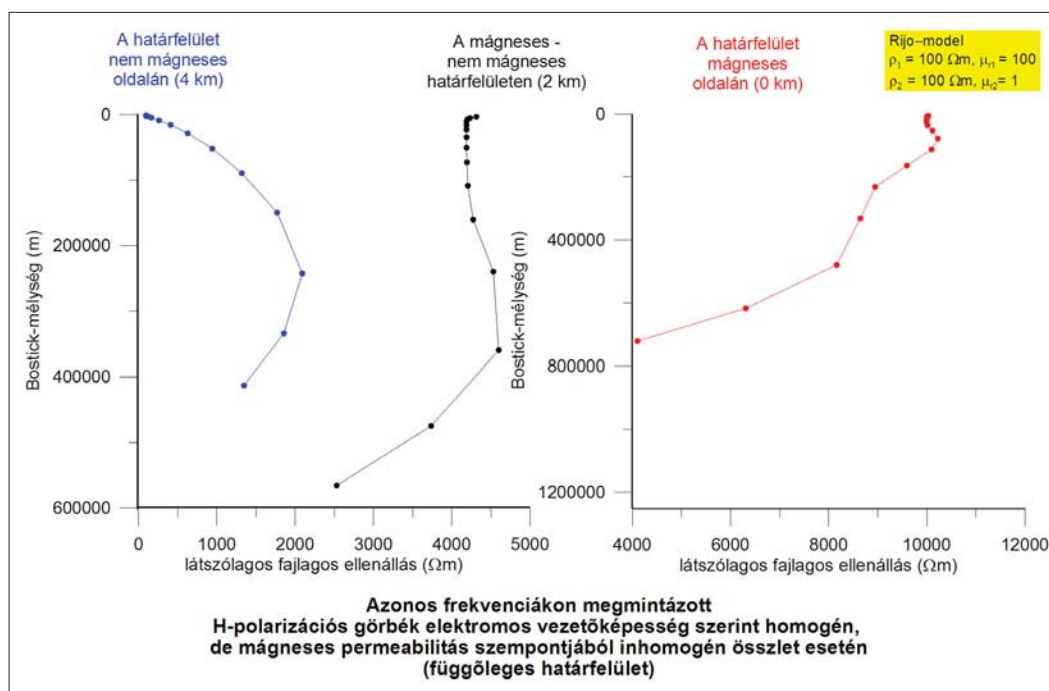
választásból adódóan csak robusztusan jelennek meg a változások.

Tulajdonképpen azokat az egyedi görbéket emeltünk ki, amelyeket Kiss és Prácsér (2021) publikációjában egyszer



17. ábra Homogén vezetőképességű összetételben egy erősen mágneses test hatása a határfelület előtt, a határfelületen és a határfelület után H-polarizációban (logaritmus x tengely mentén, modell: 2. ábra)

Figure 17 The effect of a strongly magnetic body in a homogeneous conductivity ensemble, before, at and after the interface in H-polarization (along the logarithmic x axis, model: Fig. 2)



18. ábra Homogén vezetőképességű összetételben egy erősen mágneses test hatása a határfelület előtt, a határfelületen és a határfelület után H-polarizációban (lineáris x tengely mentén, modell: 2. ábra)

Figure 18 The effect of a strongly magnetic body in a homogeneous conductivity ensemble, before, at and after the interface in H-polarization (along the logarithmic x axis, model: Fig. 2)

már közzétettünk, akkor több görbével összevont formában bemutatva. Itt most a határfelület (2 vkm), valamint annak két oldalán, 2 km távolságban lévő „félterek” szondázási görbéit mutatjuk be logaritmikus (15., 17. ábra) és lineáris fajlagosellenállás-skála mentén (16., 18. ábra).

Ezeket tudjuk legjobban felmérni a mágnesezettség által okozott hatásokat. Itt ismét meg kell jegyeznünk, hogy nagyon nagy relatív mágnesespermeabilitás-értékkel dolgoztunk, amelyek a természetben valószínűleg nem léteznek, de a torzulások jellegének megértéséhez erre feltétlen szükség volt.

Az ábrákról röviden a következő olvasható le:

E-polarizáció (15., 16. ábra):

- Közeledve a mágneses testhez, annak hatása látszólagos fajlagosellenállás-csökkenést idéz elő, 4 vkm-nél a kezdő 100 Ωm -ról a behatolás (közeledés) növekedésével ~5 Ωm -re csökken le a látszólagos fajlagos ellenállás.
- A mágneses test felett a kezdő ellenállás értéke 10 000 Ωm ($\rho_1\mu_{r1} = 100 \times 100$), majd a mélységgel először kicsit nő, majd elkezdi csökkeni ~8500 Ωm -ig.
- A határfelületen drasztikus a hatás, 20 Ωm -ról 0,1 Ωm alá csökken a látszólagos fajlagos ellenállás.

H-polarizáció (17., 18. ábra):

- Közeledve a mágneses testhez, annak hatása látszólagos fajlagosellenállás-növekedést idéz elő, 100 Ωm -ról 2000 Ωm -ig nő az ellenállás.

- A mágneses test felett a kezdő ellenállás értéke 10 000 Ωm ($\rho_1\mu_{r1} = 100 \times 100$), majd a mélységgel kezd csökkeni ~4000 Ωm -ig.
- A határfelületen 4000 Ωm -ról 2500 Ωm -ig csökken a látszólagos fajlagos ellenállás.

A mágneses permeabilitás okozta változások a határfelület környékén meglehetősen változatosak és drasztikusak. A mafikus földtani képződmények⁶⁾ jelenléte durva változásokat idéz elő a magnetotellurikus elektromágneses forrásterben, amit csak a fajlagos ellenállás változásokkal leírni hibás földtani értelmezésekhez vezet.

A tanulmány szerzői

Kiss János, Szarka László, Prácser Ernő

Jegyzet

- ¹⁾ A nagy Königsberger-arányú, azaz erős remanens mágnesezettségű képződményeknél várható!
- ²⁾ E-polarizáció (TE) — az elektromos vezetés (télerősség) iránya — szerkezeti csapásiránnyal azonos
- ³⁾ H-polarizáció (TM) — a mágneses télerősség iránya — szerkezeti csapásirányra merőleges
- ⁴⁾ Bostick-mélység: $H_{\text{Bostick}} = [\rho_a / (\omega\mu_0)]^{1/2}$, ahol
 ρ_a — a látszólagos fajlagos ellenállás,
 ω — a körfrekvencia,
 μ_0 — a mágneses permeabilitás.

⁵⁾ Fiktív látszólagos fajlagos ellenállás – értsd, nem valódi látszólagos fajlagosellenállás-érték, amely csak az elektromos paramétertől függ, hanem a $\mu_r \rho$ szorzattól, azaz az elektromos és mágneses paraméterektől függő érték.

⁶⁾ *Mafikus képződmények*: bázisos metamorfitok, és bázisos magmás képződmények, különös tekintettel az erős remanens mágnesezettségű anyagokra, ez főleg a fiatal vulkanitok jellemzője.

Hivatkozások

Kiss J., Prácser E. (2021): Kétdimenziós magnetotellurikus modellezés – irányanizotrópiából származó hatások vizsgálata. Magyar Geofizika, 62/1, 43–60.

Kiss J., Prácser E., Szarka L., Ádám A. (2010): Mágneses fázisátalakulás és a magnetotellurika. Magyar Geofizika, 51/2, 1–15.

Kiss J., Szarka L., Prácser E. (2005): Second order magnetic phase transition in the Earth. Geophysical Research Letters, 32, L24310. DOI: 10.1029/2005GL024199

Kiss J., Zilahi-Sebess L., Rádi K. (2020): MT mérési adatok nem hagyományos feldolgozása („AniMax” – anizotrópiamaximumok és analitikus fajlagos ellenállás). Magyar Geofizika, 61/3, 101–122.

Prácser E. (2010): A mágneses permeabilitás meghatározása inverzióval. Magyar Geofizika, 51/4, 175–184.

Szarka L., Kiss J., Prácser E., Ádám A. (2010): The magnetic phase transition and geophysical crustal anomalies. Chinese Journal of Geophysics, 53/3, 612–621. DOI: 10.3969/j.isnn.0001-5733.2010.03.015