

Háromdimenziós kéreganomália a magnetotellurika alapján a Balaton-felvidéken*

KISS J.

Szabályzott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (SZTFH), Földtani Igazgatóság,
1123 Budapest, Alkotás utca 50.
E-mail: janos.kiss@sztfh.hu

A magnetotellurikus (MT) mérési eredményeket a szakirodalomban főleg szelvények mentén látjuk megjelenni. A dunántúli MT mérési adatok is közel párhuzamos lefutású szeizmikus szelvények nyomvonalához kötődnek. Adódik tehát az ötlet/igény, hogy a szelvények közötti térrészt is megvizsgáljuk, azaz területi feldolgozást végezzünk a meglévő adatok alapján, ami a nagyszerkezeti felépítésben biztosan adhat új információkat. Mivel az MT szondázó jellegű mérés így a háromdimenziós megjelenítés is érdekes lehet.

Ezekhez nagy mennyiségű mérési adatnak egyidejű, egységes kezelését kellett megoldani. Az MT mérések EDI (ASCII) formátumban tárolt adatainak kezelése beépített Excel programok segítségével bárki számára elvégezhető, csak egy konvertáló programot kell készíteni, hogy az impedancia valós és képzetes részét (vagy további paramétereit), frekvenciánként, táblázatos formában kiírjuk (például XLS formátumban) az EDI fájlokból. Az Excel program beépített függvényei lehetővé teszik, hogy nagy mennyiségű szondázási adatot térképszerűen dolgozzunk fel (amelyből mélységmetsetek, szinttérképek vagy 3D térrácsok állíthatók elő).

E munka során (váratlanul), egy háromdimenziós ismeretlen kéreganomália rajzolódott ki a magnetotellurika fázisparamétere alapján, a Dunántúl É-i részén.

Kiss, J.: Three-dimensional crustal anomaly based on magnetotellurics in the Balaton Highlands

Magnetotelluric (MT) measurement results are mainly presented in the literature along profiles. The MT measurement data from Transdanubia are also linked to the route of nearly parallel seismic profiles. This gives rise to the idea/need to examine the space between the profiles, i.e., to perform regional processing based on the existing data, which can certainly provide new information about the large-scale structure. Since MT measurements are probe-like in nature, three-dimensional visualization may also be interesting.

This required the simultaneous, uniform management of large amounts of measurement data. The management of MT measurements stored in EDI (ASCII) format can be performed by anyone using Excel's built-in programs. All that is needed is to create a conversion program to write the real and imaginary parts of the impedance (or additional parameters) for each frequency in tabular form (e.g., in XLS format) from the EDI files. The built-in functions of Excel allow us to process large amounts of survey data at once (from which depth profiles, contour maps, or 3D grids can be generated).

During this work (unexpectedly), a three-dimensional unknown crustal anomaly emerged based on the magnetotelluric phase parameters in the northern part of Transdanubia.

Beérkezett: 2026. január 13.; elfogadva: 2026. február 27.

1. Bevezetés

A „Földtani alapszelvények vizsgálata” téma (ELGI 1975) keretében a Kisalföld kutatása során – az elektromágneses mérések elterjedésével/fejlődésével – a szeizmikus szelvények nyomvonala mentén magnetotellurikus mérések is történtek (ELGI 1982). A korábbi MT alap kutatások (Ádám 1974–1983) egyedi pontok voltak, de ezek közel

párhuzamos szelvények formájában állnak rendelkezésre, viszonylag sűrű állomástávolsággal.

A Balatontól délre szintén vannak ilyen szelvények, amelyeket eltérő kutatási projektek során mértek elődeink. A Dunántúl tehát viszonylag sűrűn fel van mérve magnetotellurikus elektromágneses mérésekkel, amelyek összedolgozását és megjelenítését kezdtük el az archív mérési adatok újrafeldolgozása „Magnetotellurikus Országos

* Az MFT-MGE közös vándorgyűlésén 2025-ben elhangzott előadás alapján.

Alapszelvények” (röviden MTOA) kutatási témában, 2022-ben.

Vizsgáltuk az elsődleges, azaz a főimpedanciákból kapott mérési paraméterek eloszlását szondázásonként, szelvényenként és később háromdimenzióban. Ez rengeteg munkát és eredményt (mélységszelvények, mélységtérképek) jelent, amelyekből néhány szelvényt publikáltunk is (Kiss, Szebenyi 2023, Szebenyi et al. 2023, Kiss et al. 2024).

Az előzményekhez hozzátartozik, hogy korábban már történtek numerikus modellezések a háromdimenziós inhomogenitások kimutatására (Szarka, Fischer 1989, 1991, Szarka et al. 2004), aminek konklúziója az volt, hogy a felszíni változások alatti mélybeli modelleket legjobban az invariánsok közül, a $\det(\text{Re}Z)$ és a φ fázisparaméter adták vissza. Ezt a megállapítást a nagy mennyiségű terepi mérési adat feldolgozása alapján, a fázisparaméteren keresztül sikerült most megerősíteni.

Jelen tanulmányunkban, a Dunántúl területén meglévő, magnetotellurikus szondázások feldolgozásából kapott fázisparaméterre fogunk fókuszálni, mivel érdekes eredményt – egy háromdimenziós kéreganomáliát jelzett a Balatonfelvidéken.

2. Magnetotellurikus impedancia fázisparamétere

A magnetotellurikus mérések előfeldolgozása során az időtartományban végzett E_x , E_y , H_x , H_y , H_z komponensek mérési eredményeit frekvenciatartományba átszámoljuk (ATS–EDI konverzió). Ezzel előállítjuk a komplex impedancia- (impedanciatenzor- és fázistenzor-) értékeket.

A fázis a komplex impedancia képzetes ($\text{Im}Z$) és valós ($\text{Re}Z$) része közötti fázisszöget mutatja, amely a szakirodalom alapján a közeg vezetőképességétől függ (Berdicsevszkij 1968).

$$\varphi = \arg(Z) = \arctg(\text{Im}Z/\text{Re}Z).$$

Homogén feltér esetén, azaz ha nem változik a közeg fajlagos ellenállása (azaz $\rho_a = \text{állandó}$), akkor a fázis értéke konstans 45° értékű lesz. Amennyiben változik a fajlagos ellenállás ($\rho_a \neq \text{állandó}$), akkor a fázis (φ) értéke is változni fog. Ha csökken az elektromos vezetőképesség (vagy nő a fajlagos ellenállás), akkor a fázis értéke is csökken ($\varphi < 45^\circ$), ha nő a vezetőképesség (csökken a fajlagos ellenállás), akkor a fázis értéke nagyobb lesz ($\varphi > 45^\circ$), amint azt a szakirodalom már a kezdetektől ismerteti (Berdicsevszkij 1968).

A fázis szögét, az \arg függvény definíciója szerint a valós tengelyhez viszonyítjuk, akkor értéke negatív lesz. A gyakorlat azonban azt mutatja, hogy csak a szög értékével kell számolni előjel nélkül, azaz $\varphi = |\varphi|$ – mivel az impedancia nagyságára, amely egy komplex szám – nincs hatással a fázis előjele.

A kutatás során az egyes rétegek pontos fajlagos ellenállását nem tudjuk, így a fázis csak a relatív változásokat fogja megmutatni, amelyet a mért látszólagos fajlagos

ellenállás értékek alapján tapasztalunk a környezethez képest. A fázis tehát a változásra, annak irányára lesz érzékeny, és nem függ attól, hogy milyen nagyságrendű értéken következik be a változás! További részleteket a fázis szerepéről egy korábbi cikkünkben publikáltuk (Kiss 2025).

3. Területi mérési adatok

2025-ben a magnetotellurikus területi vizsgálódásokat a Dunántúl területén végeztük, ahol az MTOA¹⁾ alapszelvények megjelenítései és feldolgozásai munkái, adatellenőrzései miatt már viszonylag nagyszámú (~800 pont) szondázást ellenőriztünk és tudtunk felhasználni (1. ábra).

Az MT mérések során, a H_x , H_y , H_z , E_x és E_y paramétereket mérjük és tároljuk (*.ats²⁾ állomány), de ezeket az adatokat – mivel időnként rendkívül hosszú idejű mérésnek hatalmas mennyiségű adata volt – korábban nem tárolták el, hanem csak az előfeldolgozás utáni eredményeket, és az ebből számolt paramétereket archiválták az *.edi³⁾ állományokba.

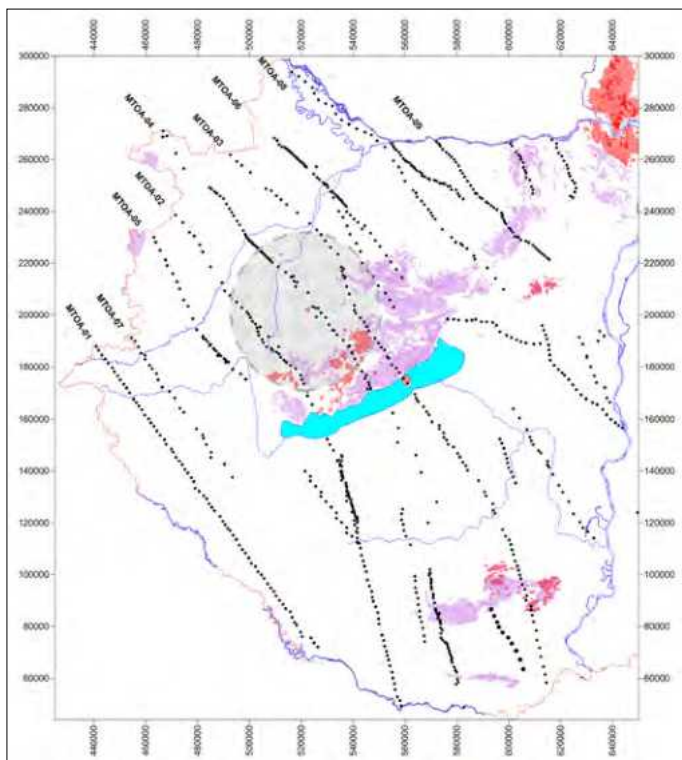
Régi MT mérések esetén az ATS–EDI konverzió (előfeldolgozás) még nem volt teljes (saját fejlesztésű műszer és saját készítésű programok miatt nem volt egységes), így az archív mérések esetén, ha csak az EDI file őrződött meg, bizonyos paraméterek (pl. tenzor és tipper paraméterek) meghatározása utólag már nem lehetséges. A mérési adatok is eltérő mintázásúak (frekvencia, azaz mélység szerint), azaz nem egységesen megmintázott adatrendszerrel kell például a területi feldolgozások esetén dolgozni.

A területi feldolgozás során nem foglalkoztunk az MT adatok rotációjával, noha az adatok körülbelül fele az előfeldolgozás vagy az inverzió előtt forgatva lett és a 14 darab *.arh kiterjesztésű állománynál is csak feltételezzük, hogy nem volt rotáció (ebben az archív formátumban a rotáció nem volt tárolva, valószínűleg a nyers mérési adatokat látjuk). A közel 400 db szondázás visszaforgatása egyenként az eredeti mérési irányokba elvileg lehetséges, de nagyon időigényes munka lenne.

Az első MTOA-szelvények feldolgozásával kapcsolatos tapasztalatok alapján, látszólagos fajlagos ellenállás és fázis mélységtérképeket szerkesztettünk, azaz az elektromágneses főimpedanciákból származó elsődleges mérési paramétereket jelenítettük meg. Ez azért volt különösen érdekes, mert a Dunántúl É-i részén mért mérési adatokon már a tellurikus mérések kezdetén (Ádám, Verő 1967, Takács 1968) jól vezető zónákat azonosítottak (Dunántúli Vezetőképesség Anomália, DVA), amit később szelvények mentén végzett MT mérések (Ráner et al. 1980, Ádám 1992) is megerősítettek.

3.1. A mérési adatok feldolgozása

A magnetotellurikus EDI-állományokból kigyűjtött adatokon elvégeztük a látszólagos fajlagos ellenállás (ρ_a), fázis (φ_{ij}) és Bostick-mélység- (H_{Bostick}) paraméterek⁵⁾ meg-



1. ábra Magnetotellurikus szondázási pontok, prekainozoos medencealjzat kibúvások (lila poligonok) és felszíni magmás képződmények (piros poligonok), valamint egy több paraméter alapján kimutatott körgyűrűs szerkezet (Bodoky, Kiss 2014, 2020) a Dunántúlon

Figure 1 Magnetotelluric sounding points, PreCenozoic basin floor outcrops (purple polygons) and surface magmatic formations (red polygons), as well as a circular structure detected based on multiple parameters (Bodoky, Kiss 2014, 2020) in Transdanubia

1. táblázat Területi feldolgozás különböző szintjeinek mélysége, adatszama és a kigyűjtött térképállomány forrásadatai (10 db). (H_{ave} – átlagos Bostick-mélység, ρ_{as} – látszólagos fajlagos ellenállás eredője, φ_{ave} – impedancia fázis átlagértéke, ρ_{xy} – látszólagos fajlagos ellenállás (E_x/H_y), φ_{xy} – impedanciafázis, ρ_{yx} – látszólagos fajlagos ellenállás (E_y/H_x), φ_{yx} – impedanciafázis, Z_{skew} – impedancia skew, Z_{ellipt} – impedanciaellipticitás, R_{AniMax} – fajlagos ellenállás anizotrópiamaximuma). Az adatszám alapján jól látszik, hogy a különböző időkből mért MT szondázások mintázása erősen változó még a mélységintervallumok alkalmazása mellett is! (~800 db szondázási pont felhasználásából)

Table 1 Depth of different levels of spatial processing, number of data points and source data for the collected map collection (10 items). (H_{ave} – average Bostick depth, ρ_{as} – apparent resistivity, φ_{ave} – average impedance phase, ρ_{xy} – apparent resistivity (E_x/H_y), φ_{xy} – impedance phase, ρ_{yx} – apparent resistivity (E_y/H_x), φ_{yx} – impedance phase, Z_{skew} – impedance skew, Z_{ellipt} – impedance ellipticity, based on the data, it is clear that the pattern of MT probes measured at different times varies greatly even when depth intervals are used! (based on the use of ~800 probe points)

No.	Mélységtartomány (m)	Középmélység (m)	Mélységköz (m)	Adatok száma	Paraméter
1	750–1000	875	250	2285	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
2	1000–1500	1250	500	3230	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
3	2000–2500	2250	500	1458	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
4	3500–4000	3750	500	784	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
5	5000–5500	5250	500	682	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
6	7000–7500	7250	500	553	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
7	10000–11000	10500	1000	786	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
8	14000–15000	14500	1000	530	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
9	20000–25000	22500	5000	1597	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
10	30000–35000	32500	5000	907	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
11	40000–45000	42500	5000	560	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
12	50000–55000	52500	5000	381	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
13	60000–65000	62500	5000	270	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}
14	70000–75000	72500	5000	187	H_{ave} , ρ_{as} , φ_{ave} , ρ_{xy} , φ_{xy} , ρ_{yx} , φ_{yx} , Z_{skew} , Z_{ellipt} , R_{AniMax}

határozását. Mivel két irányban történtek mérések, így a kapott *E*- és *H*-polarizációs fázisértékekből számtani középértékeket képeztünk minden frekvencia (periódusidő) esetében. A Bostick-mélység a közeg fajlagos ellenállásától függően változhat, továbbá különböző mérési kampányokban nem ugyanolyan mintázással történtek (archiválódtak) a mérések, így a mintázat nem egyenközű. Ennek kiküszöbölésére és zajszűrés céljából adott mélységek esetén a $H \pm 125$ m-től a $H \pm 2500$ m-ig terjedő tartományok adatait gyűjtöttük ki (1. táblázat), s kerültek megjelenítésre az interpolálás után mint paraméterterkép.

A Bostick-mélységnek van még egy bizonytalansági faktora is, amit a mágnesezettség okoz. A mágneses paraméter megnöveli μ_r -szeresére a számolt látszólagos fajlagos ellenállást, ez a Bostick-mélységet is növelni fogja, ugyanakkor a Bostick- és a skin-mélység képletében négyzetgyökös alakban fordított arányossággal is megjelenik a mágnesezettség $[1/(\mu_r)^{1/2}]$, amely kisebb mértékben, de csökkenteni fogja a behatolási mélységet. Mivel a két polarizációból kapott mérési eredményeket együtt használjuk, így a Bostick-mélység és a fázis esetén is átlagértékeket használtunk (a látszólagos fajlagos ellenállás esetében vektorösszegzést).

A síkrács és a térrács mérete 2500 m-es, ami még e nagy érték ellenére – a terület felmérttségéhez képest (2–5 × 20–40 km-es kváziháló) – is sűrűnek mondható. Ebből adódóan a finom földtani részletek nem fognak kirajzolódni, inkább csak egy elnagyolt robusztus képet látunk, amit az átlagolás is árnyal.

Az impedancia fázis paraméterére különleges figyelmet fordítottunk az MTOA alapszelvények mentén kapott feldolgozási eredmények miatt (2., 3., 4. ábra).

Az ábrákon, a Dunántúlon ÉÉNY–DDK irányban végigfutó szelvényeken, jól elkülönülő átlagfázis-anomáliákat kaptunk a Balaton és a Rába folyó között. A 45°-nál nagyobb értékkel jelentkező zóna a Dunántúli Vezetőképesség Anomália (DVA) megjelenéséhez kapcsolódik, de a korábbi fajlagosellenállás-metszeteknél szélesebben azonosítható. Vajon miért?

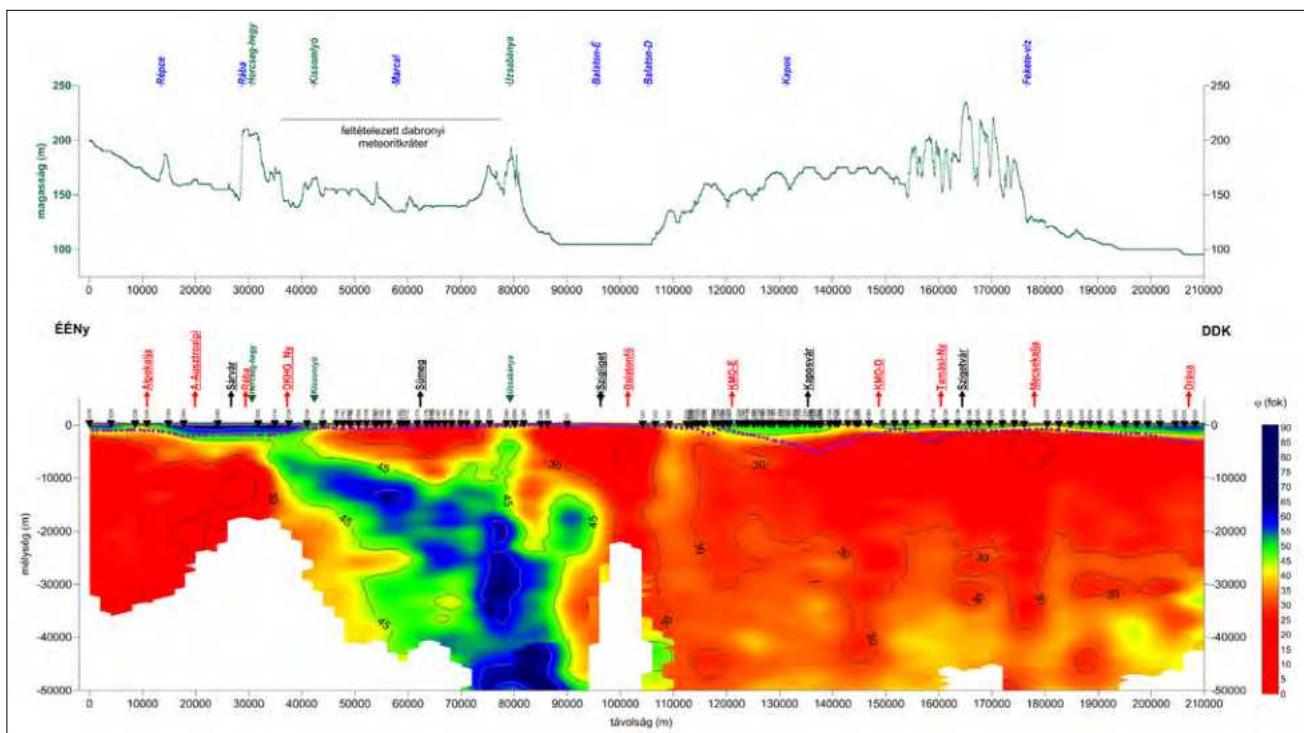
3.2. A skinhatás

Mielőtt elkezdjük boncolgatni az eredményeket, idézzük meg Nikola Tesla⁶⁾ életrajzi könyvében (Kocsis 2011) leírtakat:

„A nagyfrekvenciás áram a vezetőkben és az élő szövetekben a mágneses tér kiszorulása következtében nem a vezető anyag belsejében folyik át, hanem annak felszíne és a környező közege mentén. Ez a fajta áramvezetés ezért – az angol neve után – a skin- azaz bőrhatás elnevezést kapta, aminek megértésében Tesla kísérleteinek és bemutatásainak alapvető szerepe volt!”

A kétdimenziós szelvények tulajdonképpen ezt a Tesla-féle skinhatást mutatták ki a közel függőleges határfelületek mentén.

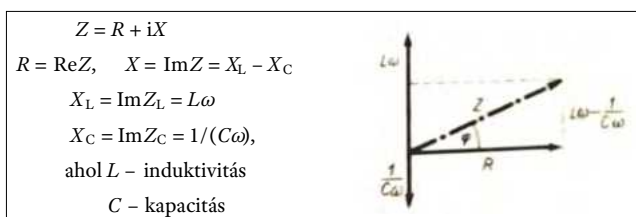
A skineffektus olyan jelenség, amely során, a vezetéken átfolyó váltakozó áram, a vezető felületének közelében koncentrálódik, ahelyett, hogy egyenletesen oszlana el a keresztmetszetben. Ez azt jelenti, hogy az áramsűrűség a



2. ábra Az MTOA-02 szelvény átlagfázis mélységmetszete a domborzattal (Kiss et al. 2024C)
 Figure 2 Average phase depth section of the MTOA-02 profile with relief (Kiss et al. 2024C)

egy nagy (földtani) kondenzátor fegyverzeteként működnek a váltóáramú elektromágneses térben. A fegyverzetek között a fázis alapján megnövekedett vezetőképességet gyanítunk, de az MT modellezések alapján homogén feltételekben a mágneses permeabilitás megjelenése is növeli a látszólagos fajlagos ellenállást és növeli a behatolási mélységet is. Így egy mágneses kőzettest megjelenésekor kialakulhat a skineffektus és a kapacitív impedancia jelensége is.

A komplex impedancia (mint bármely komplex mennyiség) valós ($\text{Re } Z$) és képzetes ($\text{Im } Z$) részre bontható. Valós része a hatáso ellenállás (rezisztencia), jele R ; képzetes része a meddő ellenállás (reaktancia), jele X (5. ábra).



5. ábra Az impedancia, annak valós ($\text{Re } Z$) és képzetes ($\text{Im } Z$) része az induktivitás és kapacitás függvényében (Budó 1979)
Figure 5 Impedance and its real ($\text{Re } Z$) and imaginary ($\text{Im } Z$) parts as a function of inductance and capacitance (Budó 1979)

A váltóáramú elektronikában a meddő ellenállásnak ($\text{Im } Z$) az előjele meghatározza az impedancia jellegét. A képzetes komponens ($\text{Im } Z$) iránya ennek megfelelően az induktív és a kapacitív impedancia eredőjéből adódik, amit vektoros összeadással érhetünk el. Az eredő impedancia az induktív $\text{Im } Z_L$ és kapacitív $\text{Im } Z_C$, valamint az ohmos $\text{Re } Z$ vektorösszegéből adódik (5. ábra).

Mindezekből adódik, hogy az impedanciákat a képzetes tengelyhez képest a következőképpen írhatjuk fel:

ha $\text{Im } Z > 0$, az impedancia induktív jellegű,⁷⁾

ha $\text{Im } Z < 0$, az impedancia kapacitív jellegű,⁸⁾

ha $\text{Im } Z = 0$, nincs váltóáramú impedancia, az impedancia tisztán ohmos jellegű.

Az $\text{Im } Z$ paraméter pozitív és negatív irányú is lehet, a $\text{Re } Z$ (ohmos ellenállás) paraméter csak pozitív, de az Im és a Re tengelyek között 90° szöghelykülönbség van. A váltóáramú impedancia a két összetevő vektorösszege.

A fázisparaméter ebből a szempontból földtani információt is hordozhat. Mivel nincsenek pontos kőzetfizikai információink a földtani közegekről, amit vizsgálunk, így az induktív és kapacitív jellegének ismerete maximum érdekesség, de érdemben ma még nem tudjuk felhasználni. Viszont a komplex impedancia (a Z amplitúdó értéke) kiszámítását nem befolyásolja a fázisszög előjele, így a fázisszög megjelenítését a magnetotellurikus kutatás során célszerű előjel nélkül (avagy abszolút értékben) használni, azaz csak az $|\text{Im } Z|$ és $|\text{Re } Z|$ közötti szög ($0^\circ - 90^\circ$) nagysága az érdekes számunkra. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy

az ohmos, az induktív és a kapacitív ellenállások eredője az összetevők kölcsönös helyzetétől (soros, vagy párhuzamos kapcsolás) is függhet.

4. A mérési adatok térképi megjelenítése (a fázisgrid)

A következőkben bemutatjuk a korábban bemutatott változtatás (1. táblázat) alapján előálló átlagfázis mélységtérképeket.

A helyszínrajzot, a magnetotellurikus mérési pontok térképét a 1. ábra mutatja, amin megjelenítettük a felszíni medencealjzat-kibúvások és a felszíni magmás képződmények poligonjait, valamint a feltételezett meteorit-beecsapódás helyén, a több paraméter alapján megjelenő körgyűrű formájú kontúrt. Az φ_{ave} átlagfázis⁹⁾ adatok térképi megjelenítését mutatja különböző mélységekre a 6. és a 7. ábra. A fázisparaméter átlagértékével, az adott ponton különböző E - és H -polarizációkban megjelenő változások egységesítését, összevethetőségét akartuk elérni – egyetlen értékkel jellemezni az adott mérési pontot.

Minden térkép megjelenítésekor ugyanazt a színelékes alkalmaztuk, így összevethető a különböző mélységmetri adatok. A térképek egyedi értékelésével most nem foglalkozunk, egyrészt mert túl ritka a mérési adatrendszer, így az adatok csak robusztus összevetésre alkalmasak. Másrészt túl nagy területnek a földtani forrásadatát kéne elemezni, amire most még nem vagyunk felkészülve.

Ennek ellenére végignézve a térképeken bizonyos tendenciák és változások jól követhetők, s ezt a fázistérképek (6., 7. ábra) és a háromdimenziós térrács bemutatásán keresztül fogjuk szemléltetni.

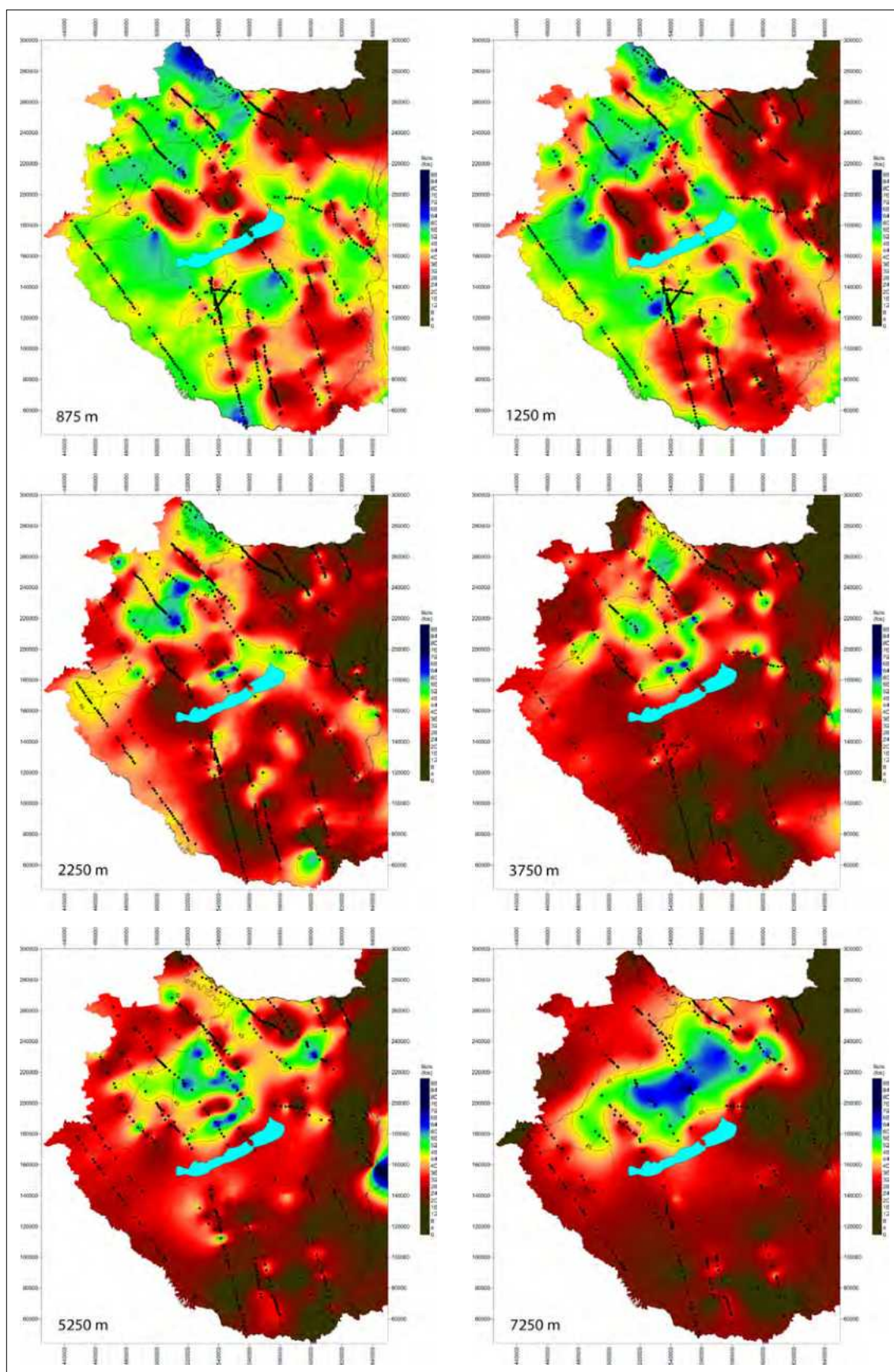
Az impedanciák átlagos fázisparamétere alapján a DVA sokkal határozottabban és nagyobb, összefüggő területen jelenik meg.

Felszínközépen a Rába-vonal DNY-ÉK-i zónája jelenik meg határozottan, aztán ahogy egyre mélyebbre megyünk, a fázisparaméterekből kirajzolódó jól vezető zóna bekúszik a Balatonfelvidék alá, és kapcsolatot mutat a bazaltos előfordulásokkal vagy éppen a nem bizonyított, feltételezett dabronyi meteorit becsapódás (Bodoky, Kiss 2014, 2020) helyével.

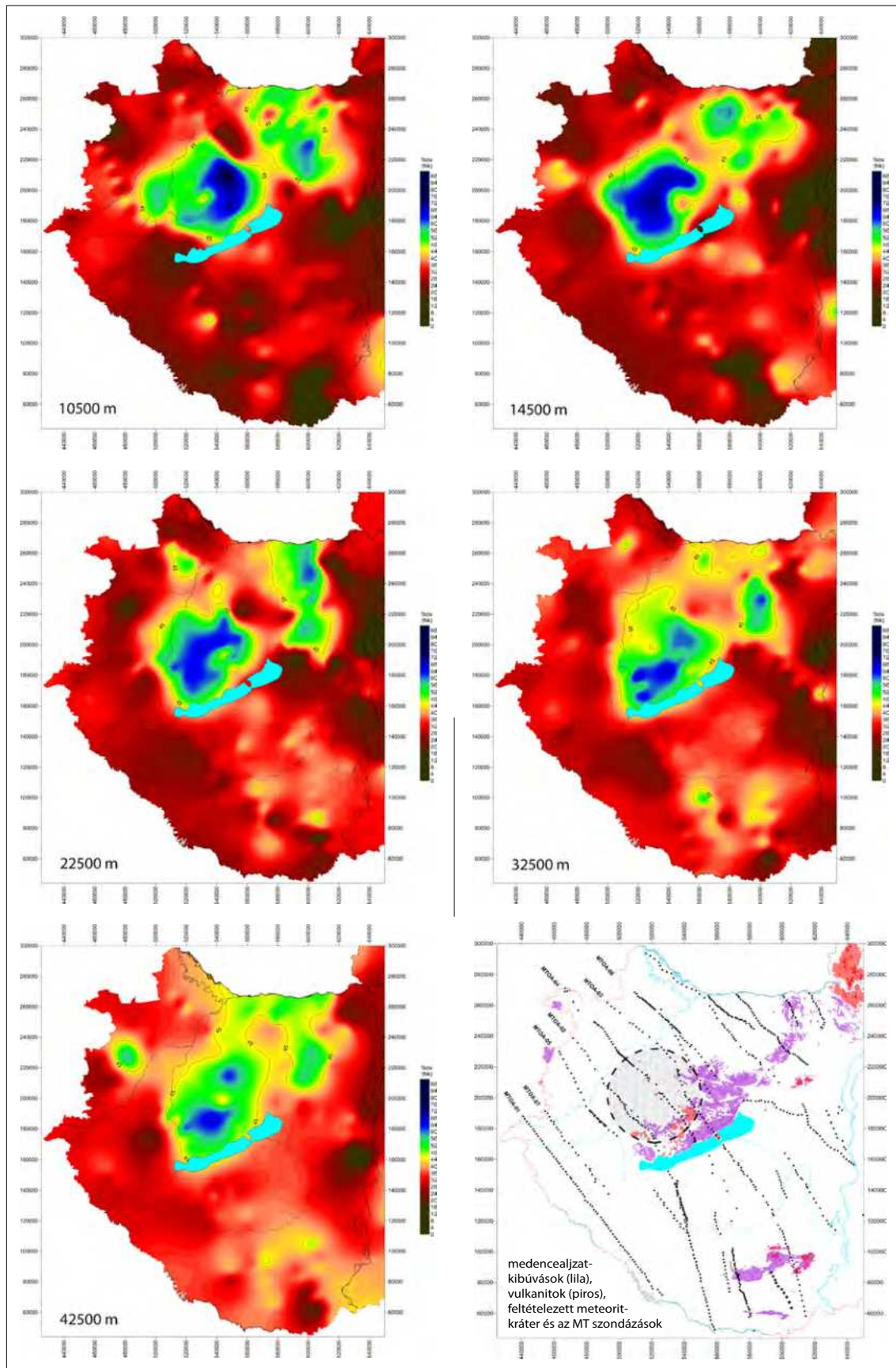
Adódik tehát a kérdés, hogy mi okozza az MT fázis által jelzett jól vezető vagy mágneses hatást? Szerkezeti zónához, litológiai felépítéshez, fluidumtartalomhoz (oldott sótartalma miatt) esetleg magmás tevékenységhez vagy vulkanizmushoz kapcsolódik?

A mélységtérképek vizsgálata vezetett el minket a háromdimenziós megjelenítés szükségességéhez. A sok átlagfázistérképet bélyegtérképként mutatjuk be, a jobb áttekinthetőség miatt és azért is, mert a háromdimenziós megjelenítés fogja megadni a térbeli képet.

Mivel szondázó jellegű területi adatokról van szó, így a szinttérképek és a forrásadatok alapján 3D térrácsot készíthetünk, azaz meg tudjuk jeleníteni háromdimenziós képként is a 45° -nál nagyobb értékkel jelentkező fázisparamétereket.



6. ábra | A magnetotellurikus impedancia φ_{ave} átlagfázistérképe különböző mélységekre I.
Figure 6 | Map of the φ_{ave} average phase of magnetotelluric impedance at different depths I.

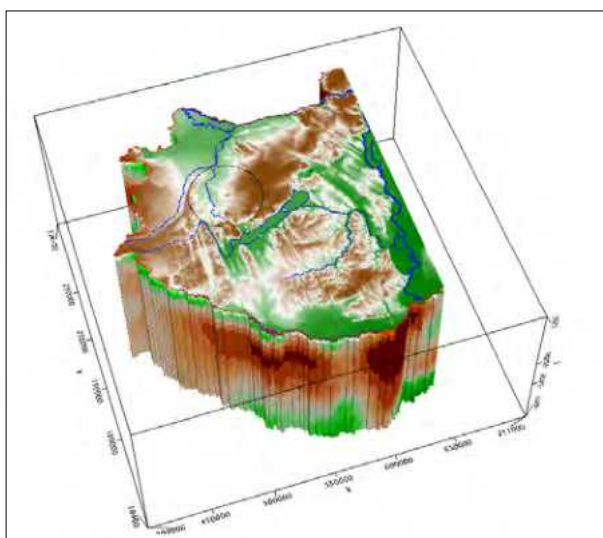


7. ábra | A magnetotellurikus impedancia φ_{ave} átlagfázistérképe különböző mélységekre II.
 Figure 7 | Map of the φ_{ave} average phase of magnetotelluric impedance at different depths II.

Az egyedi magnetotellurikus szondázások, a szelvények adatsora és az elkészített szinttérképek adatai alkotják majd a háromdimenziós térrács bemenő input állományát. Mivel a fázist átlagoltuk, így a különböző polarizációkban kapott Bostick-mélységeket is átlagolni kellett.¹⁰⁾

5. A mérési adatok térbeli háromdimenziós megjelenítése (fázistérrács)

A magnetotellurikus szondázások adataiból és az elkészített térképi adatrendszerekből Oasis Montaj (Geosoft, Seequent) programmal 2500 m ráctávolságú háromdimenziós rács (voxel) interpolálható (8. ábra).



8. ábra Az impedancia háromdimenziós átlagfázis térrácsa a domborzattal

Figure 8 Three-dimensional average phase voxel of impedance with relief

A programrendszer lehetővé teszi, hogy a háromdimenziós rácsot szeleteljük x , y és z irányokban (9., 10. ábra), vagy a negyedik paraméter (pl. átlagfázis) alapján izofelületeket rajzoljunk ki (10., 11. ábra).

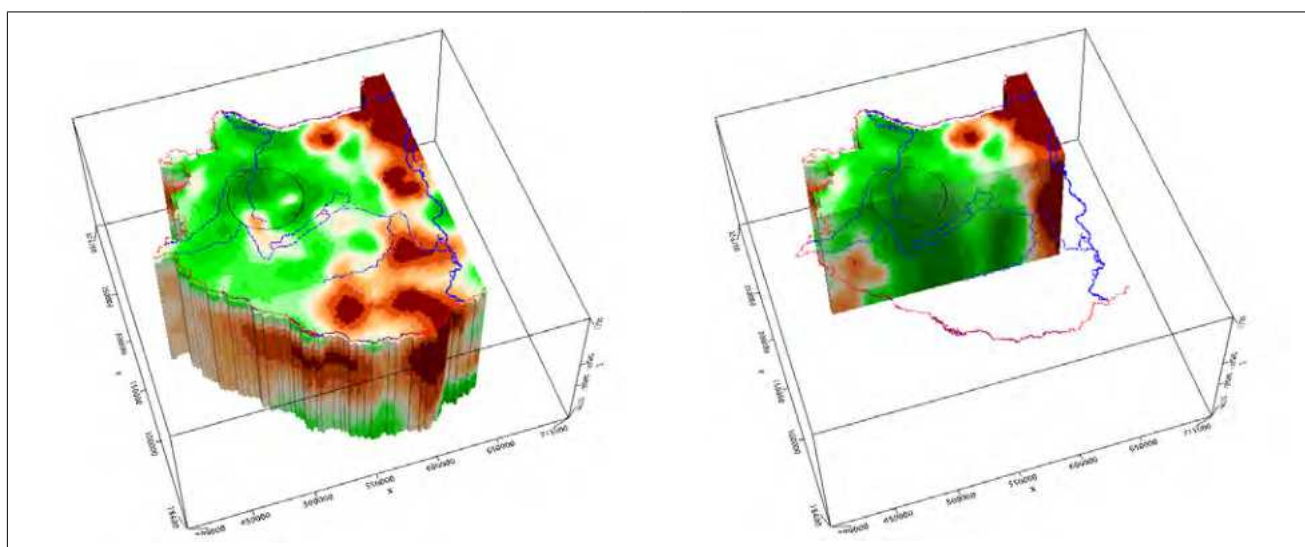
A földtani megfeleltetéshez érdemes tehát elkészíteni a háromdimenziós térrácsot (9. ábra), amelyből sima lefutású izofelületeket lehetett készíteni, például különböző fázisértékekre. A 9. és 10. ábra mutatja a felülről és délről megvágott térrácsot, amit azért vágunk meg, hogy láthatóvá váljanak az izofelületek. A 45, 48, 50, 52 és 54° fázisfelületeket szeparáltuk el különböző színekkel, hogy később a legkisebb értéktől indulva lehámozzuk a felületeket egymásról, vizsgálva a kapott alakzatokat (11. ábra).

A 12. és 13. ábra segítségével azt vizsgáltuk, hogy milyen mélységtartományban jelenik meg a háromdimenziós test és milyen mélységig követhető.

A fázis-izofelületek által jelzett vezető zónák alapján az látszik, hogy a felületek az ismert bazaltos előfordulásokkal korrelálnak, az alakzatok geometriája talán azok elhelyezkedésének felel meg legjobban.

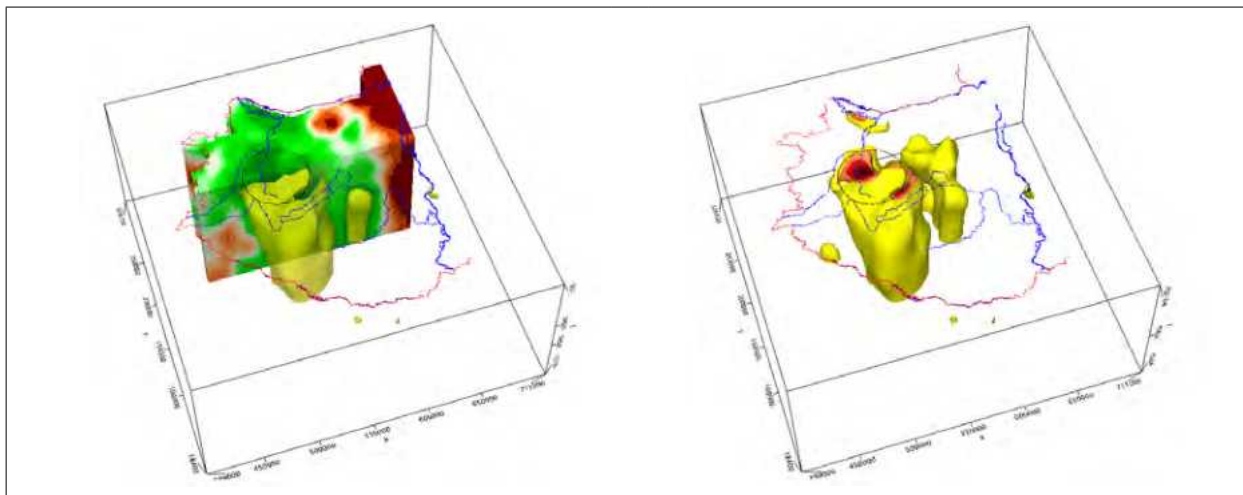
A 10. ábra sárga felületén belül megjelenő nagyobb fázisértékek rajzolata a felszínközéiben, a Kabhegy–Csohány vonulattal, illetve az Egyházaskesző–Kemenesmagasi (Kemeneshát) vulkánmezővel azonos. Feltételezve a bazaltvulkanizmus és a fázisparaméterek kapcsolatát, ahogy mélyebbre megyünk, e két terület közötti részen rajzolódik ki egy közös gyökérezóna, amelyből kiágaznak balatonfelvidéki kitörések és a Kemeneshát bazaltjai (Kemenesmagasi, Pásztori). Ezek egy közös mélységi kamrából kiindulva érik el a felszín, a csatornák többé-kevésbé azonosíthatóak a 11. ábra alapján.

Érdekes módon a mágneses anomália térképen (14. ábra, Kiss, Gulyás 2006) csak a felszíni tanúhegyek látszanak, a mélyen elhelyezkedő „fáziskamra” nem azonosítható. Felmerül tehát a gyanú, hogy nem a mágnesezettséggel, hanem a kitörés következtében kialakuló közettani változók



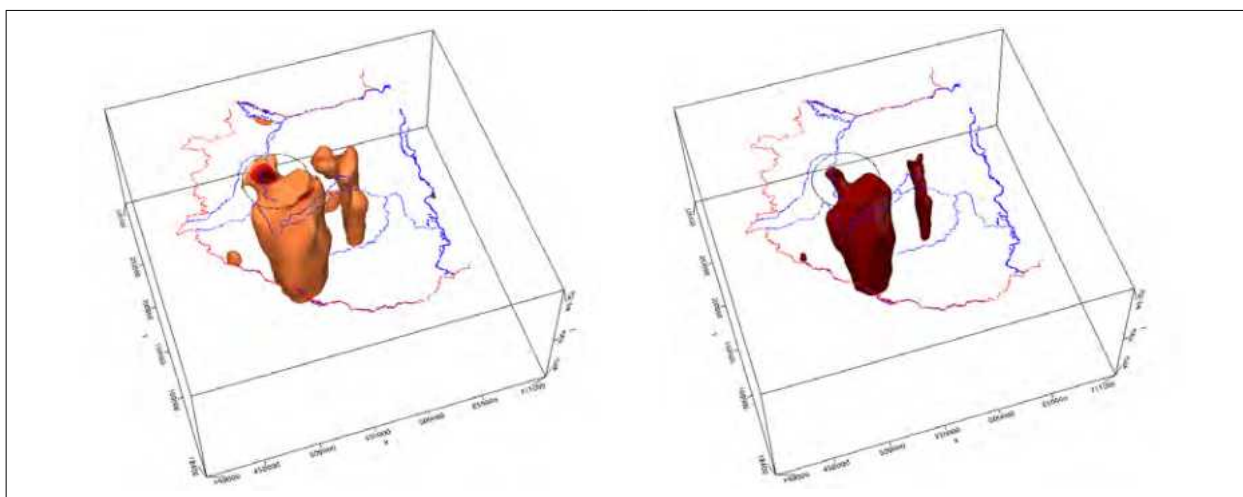
9. ábra Az impedancia háromdimenziós átlagfázis térrácsa a domborzat nélkül (balra) és szeleteléssel (jobbra)

Figure 9 Three-dimensional average phase voxel of impedance without relief and with slicing



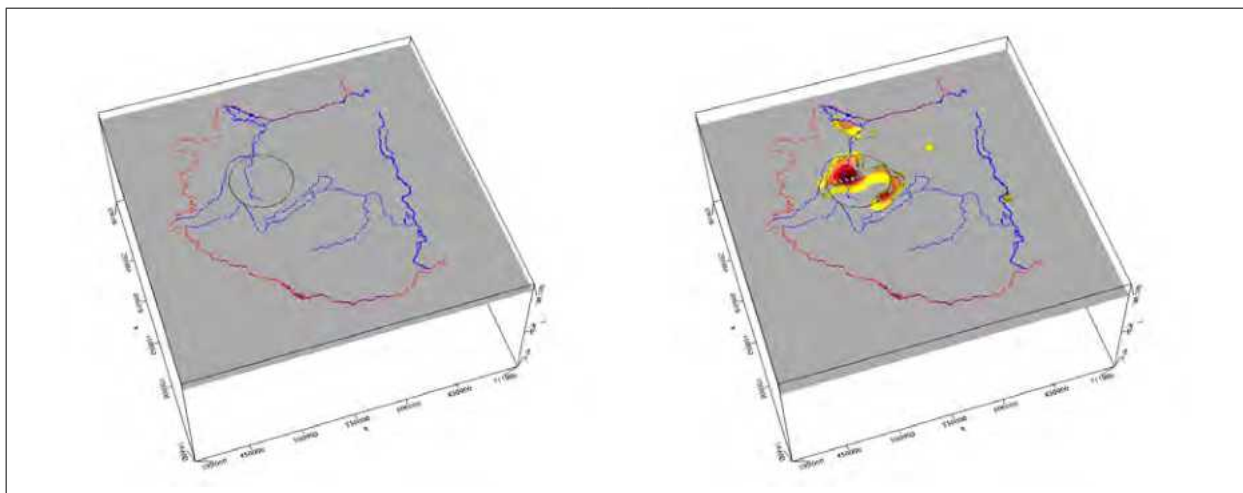
10. ábra | Az impedancia háromdimenziós átlagfázis térrács szeletelése és $\varphi = 45^\circ$ (sárga) felület (balra) és annál nagyobb fázisértékek határfelületei (jobbra)

Figure 10 | Three-dimensional average phase voxel slicing of impedance and boundary surfaces of phase values greater than 45° (yellow)



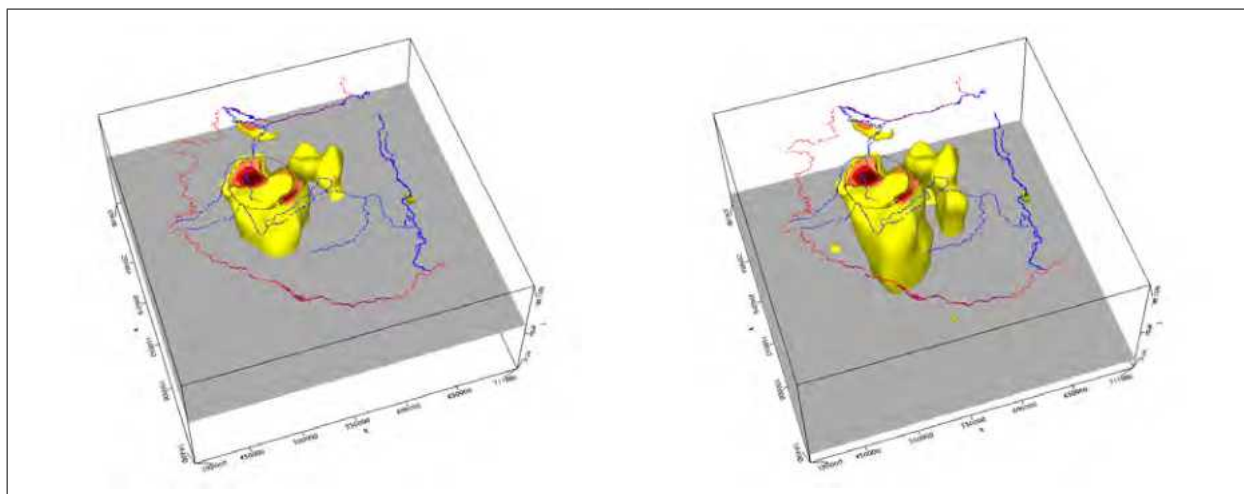
11. ábra | Az impedancia háromdimenziós átlagfázis térrácsa a $\varphi = 48^\circ$ (narancs) és nagyobb, valamint a $\varphi = 52^\circ$ (barna) fázisértékek határfelülete

Figure 11 | Boundary surfaces of phase values greater than 48° (orange) and 52° (brown) from the three-dimensional average phase voxel

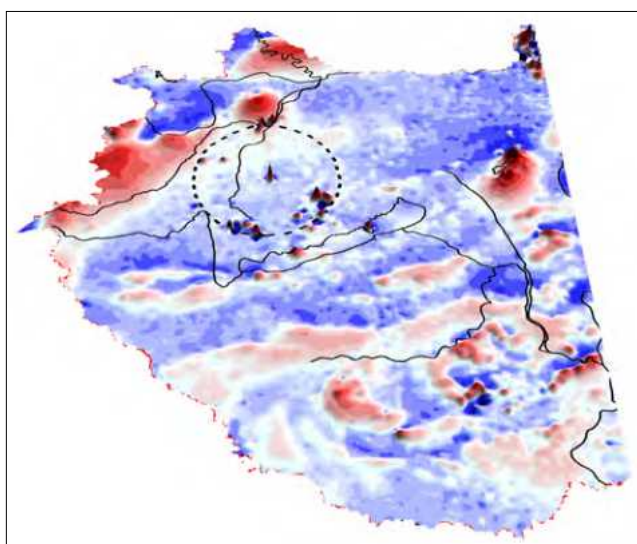


12. ábra | A háromdimenziós test megjelenése a fix mélységsíkok esetén (2500 m és 5000 m mélység)

Figure 12 | Appearance of the three-dimensional body in the case of fixed depth planes (depths of 2500 m and 5000 m)



13. ábra | A háromdimenziós test megjelenése a fix mélységsíkok esetén (-20 000 m és -40 000 m)
 Figure 13 | Appearance of the three-dimensional body in the case of fixed depth planes (-20,000 m and -40,000 m)



14. ábra | A mágneses ΔT anomália-térkép a területről
 Figure 14 | Magnetic ΔT anomaly map of the area

sokkal (katakazitok, fluidumok, kőzetolvadék) lehet kapcsolatban a mélybeli fázisanomália. A helyzetet tovább bonyolíthatja, hogy korábbi vizsgálataink alapján a Dabrony közelében található gravitációs minimum, tellurikus vezetőképesség maximum, valamint a domborzat és a bazaltos tanúhegyek körgyűrűs elhelyezkedése alapján felmerült a földtörténeti múltban történt, meteoritbecsapódás gyanúja (Bodoky, Kiss 2014, 2020). Ez a földkérget ért sokkhatás megmagyarázhatja a több 10 km-es mélységű fázis alapján kijelölhető vezetőképesség-anomáliát.

Szintén érdekes, hogy az Alpok-alja mágneses anomáliái, a D-Dunántúl mágneses anomáliái vagy a Velencei-hegység bázisos magmás képződményei (kiömlési andezit és mélységi diorit) alatt sem látszik hasonló fázisanomália a magnetotellurikus mérések alapján. Tehát vagy nincs megfelelő térfogatú mágneses anyag, vagy az anomáliákat

– a nyilvánvaló kapcsolat ellenére – nem a mágnesezettség okozza!

A Velencei-hegység esetében nincsen magnetotellurikus mérési adatunk. Ha volt is mérés, az adatok nagyon rosszak/zajosak voltak. Ez összeköthető azzal is, hogy felszínközeli mágneses határfelületek mentén nagyon „zajossá” válhatnak a mérések. Így, ebben az esetben, ha voltak is mérések, azokat használhatatlannak ítélték meg elődeink és törölték azokat!

Felmerül a gyanú, hogy csak a fázisparaméterek átlagképzése és a mélységtartományok szerinti adatgyűjtés miatt véletlenszerűen állt össze a jól vezető zóna, de ezt az MTOA-02 (2. ábra), MTOA-03 (3. ábra) és MTOA-04 (4. ábra) szelvények menti fázis mélységmetsetek megcáfolják, mivel azokon is jól azonosítható ez a mélyzóna.

A mágnesesanomália-térkép (14. ábra) alapján lokális, nagyfrekvenciás anomáliák mentén egy gyűrűs szerkezetet ki tudunk mutatni, de összefüggő anomáliát/magmakamrát nem! Ennek magyarázata az lehet, hogy a bázisos magmakamra a Curie-mélységnél (~15–18 km) nagyobb mélységben van, és ott az anyag már elveszítette egységes mágnesezettségét, ezért a mágnesesanomália-térképen nem jelentkezik. A mágnesezettség-paraméter jelen lehet ennél nagyobb mélységekben is – mivel a ferromágneses nikkelt (Ni) 358 °C, vas (Fe) 770 °C, a kobalt (Co) 1130 °C Curie-hőmérsékletű, így lehetnek olyan nem vas, hanem kobalt elemtartalmú földtani képződmények, amelyek ennél mélyebben is megőrzik mágneses tulajdonságaikat, ami megmagyarázhatja a magnetotellurikus mérések fázisparaméterét.

A Dunántúl É-i felének sajátos felépítése már többször okozott zavart. A domborzati térkép alapján a középhegységi zóna (Balaton-felvidék, Bakony, Vértes, Gerecse, Dunazug) kiemelt röghegység, azaz már az alpi orogén előtt is létezett – korábban alakult ki. Az izosztáziaelmélet alapján itt gravitációs minimumra számíthatnánk, de a kibúvások részek gravitációs maximumként jelentkeznek (Kiss, Gu-

lyás 2005). Ezt a „rendellenességet” még meg tudjuk magyarázni a kéreg-köpeny határon vagy az alsó kéregben található bazalt magmakamrával, ami a geokémiai vizsgálatok alapján feltárt, tanulmányozott köpenyzárványok és Embey-Isztin et al. (1990) vizsgálatai alapján valahol a mélyben jelen lehet.

Az alsókéreg-xenolitok forrását Dobosi és Embey-Isztin (2004) a következőképpen határozza meg:

„A Panon-medence alsókéreg-eredetű metamagmás granulitxenolitjainak kémiai összetétele arra utal, hogy protolitjaik primitív, vagy enyhén frakcionált, tholeiites affinitású bázisos magmás kőzetek lehettek (Embey-Isztin et al. 1990), amelyek Kempton et al. (1997) szerint valószínűleg egy nagy tömegű olivin-tholeiit összetételű magma köpeny/kéreg határra történt benyomulása, úgynevezett magmás alápárnázás (underplating) révén keletkeztek”.

„A Moho elmélyülése a középhegység alatt és a vastag kéreg-köpeny átmeneti zóna (Mituch, Posgay 1972) a bázisos és ultrabázisos kőzetek összetett rétegződésével függ össze, ami más kontinentális területek példája alapján magas hőáramlással jellemezhető” (Embey-Isztin et al. 1990). Ez a magas hőáram, ha jelen van, lokális kőzetolvadékot hozhat létre, amelynek fizikai paraméterei az eredeti kőzettől (a környezettől) eltérőek lesznek.

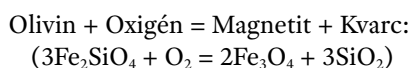
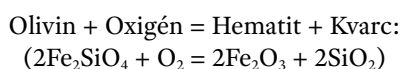
Érdekes módon a CEL08 (vagy MTOA-03) szelvény mentén a szeizmikus tomográfia sebességszelvénye (Kiss 2009A, 2009B, Kiss, Prácsér 2017) határozottan jelzi az izosztatikus gyökérszónát és benne a bázisos anyag lokális, felszínre emelkedési helyeit (bazaltos tanúhegyek). A kivastagodó felső kéreg helyzete az MT fázisanomáliának megfelelő, bár kicsit szélesebben jelentkezik.

6. Kőzetfizikai megfontolások

Fontos szerepe lehet itt annak a felismerésnek, hogy a bazaltokban lévő peridotit-zárványok (régi nevükön „olivin-csomók”¹²⁾ vagy „olivinbombák”, Embey-Isztin 2017) a Föld köpenyéből származnak.

„Hazánk mindkét alkáli olivin bazalt területén, a Dunántúlon és Nógrád megyében egyaránt megtalálhatók a szóban forgó zárványok. A dunántúli zárványok néhány helyen bőven és több kg-os súlyban is jelentkeznek...” (Embey-Isztin, 1976).

A Balaton-felvidéken a zárványok egyik fontos kísérő ásványa az olivin, továbbá ismert, hogy a magnetit- és hematitásványok az olivin oxidációjából keletkezhetnek (Kiss et al. 2011) a mélybeli bázisos kőzetek exhumálódásakor (oxidációs zónába történő felemelkedésekor):



Ha tehát az olivin a köpenyanyag felemelkedésekor az oxidációs zónába kerül, akkor hematit és magnetit képződhet belőle. Mindkét ásvány az elektromosságot fémesen vezeti, továbbá mindkét ásvány mágneses tulajdonságokkal is rendelkezik, azaz alkalmasak mágneses és elektromos vezetőképesség-anomáliát, azaz kisebb-nagyobb relatív változást okozni, amely változást a magnetotellurika fázisparamétere érezheti legjobban!

A Balaton-felvidék alatti „magma-alápárnázódás”, vagy a (részleges) kőzetolvadék, amely magas hőmérséklet miatt alakulhat ki, esetleg a köpenyanyag oxidációs zónába emelkedése szintén relatív változásokat idézhet elő a kőzetek elektromos vezetőképességében. Mivel az MT fázisparaméter a relatív változásokra érzékeny csak, azaz a környezetben csökken vagy nő a fajlagos ellenállás – függetlenül attól, hogy mindez 50 Ωm-en vagy 5000 Ωm-en következik be – a változás kimutathatóvá válik.

7. Összefoglalás

Az archív magnetotellurikus mérések ritka hálóban ugyan, de lefedik a Dunántúl területét. 2022-ben elkezdjük a Magnetotellurikus Országos Alapszelvények (MTOA) összeállítását a különböző időkben, eltérő projektekben, más-más mérőcsapatokkal (régi nevükön MTA-GGKI¹³⁾, MNE¹⁴⁾ és ELGI¹⁵⁾) és nem azonos mérőműszerekkel lemért magnetotellurikus (MT) elektromágneses szondázási adatokból. Ennek előfeltétele volt, hogy az MT mérési adatok a SEG szabvány szerinti EDI formátumban rendelkezésre álljanak.

A magnetotellurikus adatbázisban a mérési adatok ATS¹⁶⁾, EDI¹⁷⁾ és ARH¹⁸⁾ formátumú állományokban őrződtek meg. Az ATS fájlok a legteljesebbek, az időtartománybeli mérési-észlelési adatokat tárolják (a nagy méretük miatt csak az utóbbi kb. 10 év adata van meg ebben a formátumban). A frekvenciatartománybeli mérési adatokat az EDI-állományok jelentik, ez a feldolgozó programok (GeoTools, WinGlink, Phyton) forrás-adatrendszerre, amelyet az ATS fájlokból konvertálva kaptunk meg az előfeldolgozások során. Ez lett a magyarországi magnetotellurikus adatbázis szabvány formátuma is. Vannak ARH-állományok, amely még az EDI szabványformátum megjelenése előtt, az ELGI által kifejlesztett mérőműszerhez és feldolgozórendszerhez kialakított házi formátum volt (bináris állomány). A több mint 4400 szondázást tartalmazó digitális adatbázisban a legtöbb szondázási adat vagy az előfeldolgozás után rögtön EDI-ben készült, vagy utólag lett konvertálva. Volt azonban 93 szondázás, amelyek csak ARH formátumban álltak rendelkezésre, ezeket konvertálni kellett EDI formátumba – megmentve a mérési adatokat.

A Dunántúlon a térképszerű megjelenítéshez az alapszelvények mentén közel 800 db szondázási adatot használtunk fel.

Az MT mérési adatok feldolgozása és az impedancia átlagfázisértéke alapján, a Dunántúlon egy háromdimenziós test rajzolódik ki, aminek eredete lehet:

- Feszültségtérrel kapcsolatos gyengeségi zóna (katak-lazit, fluidum feláramlással) – A Pannon bazalt nyilván tektonikailag preformált gyengeségi zónákban tört fel, ami sűrűn behálózta a Balaton-felvidéket. Ezekben a gyengeségi zónákban, csomópontokban a fluidumok is közlekedhettek;
- Egy ősrégi meteorit becsapódás relikta (fellazulási zóna, fluidumok) – A geometriai formán túl, szinte semmilyen más információ nem szól a meteoritkráter mellett. Viszont bejöhethet a képbe a CUDO meteorit (Compact Ultrahigh Density Object, Jan Rafelski 2019), ami egy furcsa, sötét anyaghoz kötött neutroncsillag- (mikro-„fekete lyuk”-) töredék becsapódási nyoma;
- A felső kéregbe (vagy alsó kéregbe) benyomuló alsó kéreg (vagy köpeny) anyaga okozza, egy diapír, bázisos (ultrabázisos) képződmény, kaotikus mágnesezettségű kőzetanyaggal;
- Egy magmás benyomulás a kéreg-köpeny határon (mágneses, gravitációs hatások) – ezek a xenolitokban megjelennek. A bazalt egy része megállt ott, és kikristályosodott durvaszemcsés piroxenit, amfibol-piroxenit, illetve amfibol és klinopiroxén megakristályok formájában;
- Egy mélyben rekedt nagyobb bázisos kőzetolvadék test (ősi hotspot vagy magmakamra), amely későbbi Pannon bazaltvulkanizmussal (és köpeny xenolitokkal) hozható összefüggésbe (kőzettani hatás). Az alsó kéreg olvadása során keletkező olvadékok is elindulhattak fölfelé még a bazalttevékenység előtt. Ezek az olvadékok kisebb mélységi magmás testekként és a repedésekben, törésekben dájék vagy kisebb nagyobb érhalózat kitöltő magmás anyagként megjelenhetnek ebben a zónában. Ilyen xenolitokat is ismerünk.

A háromdimenziós testről tanúskodhatnak az MT mérések túl:

- A körgyűrű formájú földtani, domborzati, továbbá geofizikai alakzatok, anomáliák (Bodoky, Kiss 2014, 2020);
- A területen található vulkanitok, a bennük található köpenyxenolitokkal, olivinbombákkal, peridotitokkal (Embey-Isztin 2017);
- A Balaton-felvidék lehetséges posztvulkáni gázkiáramlásai (várjuk az eredményeket), [HUN-REN, Bacsányi-tördemic gázkromatográfiai mérőállomás].

Az MFT-MGE vándorgyűlésen elhangzott előadás és jelen tanulmány is problémafelvetés is egyben, hogy közösen próbáljuk meg meghatározni ennek a földkéregben található testnek a földtani eredetét, összetételét és lehetséges kifejlődését! (A témában eddigi segítőim Zilahi-Sebess László, Szarka László, Török Kálmán és Szebenyi Renáta voltak.)

A tanulmány szerzője

Kiss János

Jegyzetek

- ¹⁾ MTOA – MagnetoTellurikus Országos Alapszervény
- ²⁾ *.ats – Advance Time Series, MT mérési adatok formátuma (standard műszeroutput)
- ³⁾ *.edi – Electronic Data Interchange, MT archiválási adatok formátuma, nemzetközi szabvány
- ⁴⁾ *.arh – az ELGI saját magnetotellurikus bináris archiválási formátuma
- ⁵⁾

$$\rho_a = \frac{1}{\omega \mu_0} |Z_{ij}|^2; \quad \varphi_{ij}(\omega) = \arctg \left(\frac{\text{Im}(Z_{ij}(\omega))}{\text{Re}(Z_{ij}(\omega))} \right);$$

$$H_{\text{Bostick}} = \sqrt{\rho_a / \omega \mu_0}$$
- ⁶⁾ Nikola Tesla a váltóáramú eszközök, gépek, transzformátorok, azaz a modern, váltóáramú elektromosság első felhasználója, mérnök, fizikus, feltaláló, természettudós és filozófus.
- ⁷⁾ Induktív impedancia (induktancia): Ha növeljük a frekvenciát, a tekerces ellenállása is növekszik. Egyenárammal szemben nincs ilyen többletellenállás. A tekercesnek a váltakozó árammal szemben tanúsított többletellenállása az önindukció következménye. Ezt az ellenállást induktív ellenállásnak (induktív reaktanciának) nevezzük, és X_L -l jelöljük. $X_L = (\omega L)^{-1}$, ahol L az induktivitás (vagy $+\text{Im } Z$)
- ⁸⁾ Kapacitív impedancia (kapatitancia): A kondenzátornak az a tulajdonsága, hogy váltóáramoknál úgy viselkedik, mint egy ellenállás, de a frekvencia függvényében. Nagy frekvenciáknál kisebb, kis frekvenciáknál nagyobb ellenállást képvisel. X_C -vel jelöljük. $X_C = (\omega C)^{-1}$, ahol C a kapacitás (vagy $-\text{Im } Z$)
- ⁹⁾ $\varphi_{\text{ave}} = (\varphi_{xy} + \varphi_{yx})/2$ (számtani átlag)
- ¹⁰⁾ $H_{\text{ave}} = (H_{\text{Bostick}_{xy}} + H_{\text{Bostick}_{yx}})/2$
- ¹¹⁾ Az a hőmérséklet, amelynél a ferromágneses anyagok elveszítik a ferromágnességüket és paramágnessé válnak. A nagy hőmérséklet okozta plusz energia miatt a doménszerkezet először kaotikussá válik, majd szétesik.
- ¹²⁾ Ezek a csomók gyakoribbak vulkáni termékekben mint a mélységi eredetű masszívumokban (Lacroix 1893).
- ¹³⁾ MTA-GGKI (MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet) – ma HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet.
- ¹⁴⁾ NME (Nehézipari Műszaki Egyetem) – ma Miskolci Egyetem.
- ¹⁵⁾ ELGI (Eötvös Loránd Geofizikai Intézet) – ma Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága.
- ¹⁶⁾ ATS – Advance Time Series
- ¹⁷⁾ EDI – Electromic Data Interchange standard (SEG standard, Wight 1991)
- ¹⁸⁾ ARH – archívum, bináris állomány (ELGI standard)
- ¹⁹⁾ Az *.arh kiterjesztésű bináris adatok dekódolása (megfejtése) régi Fortran segédprogramokban meglévő formátum adatok alapján történt.

Hivatkozások

- Ádám A. (1992): A dunántúli elektromos vezetőképesség-anomália földtani és módszertani jelentősége. Akadémiai székfoglaló: 1990. szeptember 24. Értekezések, emlékezések. Akadémiai Kiadó, Budapest. ISBN 963-05-6403-3
- Ádám A., Verő J. (1967): A magyarországi elektromágneses mérések újabb eredményei. Geofizikai Közlemények, 16/1–2, 25–52.

- Ádám A. (1974–1983): Jelentés a dunántúli magnetotellurikus alapkatásokról. Kézirat, MTA-GGKI, MFBGA Adattár
- Berdicsevszkij M. N. (1968): Geoelektromos kutatások magnetotellurikus szelvényezéssel. Nyedra Kiadó, Moszkva, p. 255.
- Bodoky T., Kiss J. (2014): A dabronyi negatív gravitációs anomália vizsgálata: eltemetett meteorkráter? *Magyar Geofizika*, 55/2, 82–87.
- Bodoky T., Kiss J. (2020): Újabb vizsgálatok a feltételezett dabronyi becsapódási szerkezettel kapcsolatban. *Magyar Geofizika*, 61/1, 19–27.
- Budó Á. (1979): Kísérleti Fizika II. Tankönyvkiadó, p. 396.
- Dobosi G., Embey-Isztin A. (2004): A Pannon-medence alatti alsókéreg jellemzői és eredete a granulitxenolitok alapján – áttekintés. *Földtani Közönlöny* 134/4, 481–498.
- ELGI (1975): A Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet 1975. Évi Jelentése. <https://epa.oszk.hu/03100/03104>
- ELGI (1982): A Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet 1982. Évi Jelentése. <https://epa.oszk.hu/03100/03104>
- Embey-Isztin A. (1976): Felsőköpeny eredetű lherzolitzárványok a magyarországi alkáli olivinbazaltos, bazanitos vulkanizmus közetében. *Földtani Közönlöny*, 106, 42–51.
- Embey-Isztin A. (2017): Köpenyeredetű kőzetek felismerésének története és szerepe a geológiai gondolkodás fejlődésében. *Földtani Közönlöny*, 147/4, 415–422.
- Embey-Isztin A., Scharbert H. G., Dietrich H., Poultidis H. (1990): Mafic granulites and clinopyroxenite xenoliths from the Transdanubian Volcanic Region (Hungary): implications for the deep structure of the Pannonian Basin. *Mineralogical Magazine*, 54, 463–483.
- Rafelski J. (2019): <http://www.physics.arizona.edu/rafelski/PS/1906CUDOinBalaton.pdf>
- Kiss J. (2009A): Gravitációs és mágneses feldolgozások és modellezések a földtani környezet megismerése céljából. Doktori (PhD-) értekezés, NyME Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola, Sopron.
- Kiss J. (2009B): A CEL08 szelvény geofizikai vizsgálata. *Magyar Geofizika*, 50/2, 59–74.
- Kiss J. (2025): Magnetotellurika a gyakorlatban – az impedancia fázisparamétere. *Magyar Geofizika* 66/2, 54–66.
- Kiss J., Gulyás Á. (2005): Magyarország gravitációs Bouguer-anomália-térképe, M = 1:500 000-es nyomtatott térképe. ELGI kiadvány
- Kiss J., Gulyás Á. (2006): Magyarország mágneses ΔZ anomália térképe, M = 1:500 000-es nyomtatott térkép. ELGI kiadvány
- Kiss J., Prácser E. (2016): Szelvény mentén végzett adatfeldolgozási eljárások – hatókijelölés, frekvenciaszűrés és mélységfókuszálás – alkalmazása a CEL08 vonalon. *Magyar Geofizika* 57/2, 69–87.
- Kiss J., Prácser E. (2021): Kétdimenziós magnetotellurikus modellezés – irányanizotrópiából származó hatások vizsgálata. *Magyar Geofizika* 62/1, 43–60.
- Kiss J., Szarka L., Prácser E. (2023): Mágneses torzulások a magnetotellurikában – A klasszikus MT feldolgozási eljárások várható torzulásai mágneses közeg megjelenése esetén, 2D direkt modellezés eredményei extrém nagy mágneses permeabilitás esetén. *Magyar Geofizika*, 64/1, 1–15.
- Kiss J., Szébenyi R.M. (2023): Dunántúli magnetotellurikus MTOA-01 alapszelvény (CEL07 litoszférakutató szeizmikotomográfia-szelvény mentén). *Magyar Geofizika*, 64/2, 78–94.
- Kiss J., Szébenyi R., Lukács T. (2024C): Magnetotellurikus Országos Alapszelvények – a Dunántúli MTOA-02 szelvény komplex feldolgozása. *Magyar Geofizika*, 65/4, 138–152.
- Kiss J., Zilahi-Sebess L., Szarka L. (2011): A mágnesség jelensége és a Hopkinson-effektus. *Magyar Geofizika*, 52/3, 151–169.
- Kempton P. D., Downes H., Embey-Isztin A. (1997): Mafic granulite xenoliths in Neogene alkalibasalts from the western Pannonian Basin: Insights into the lower crust of a collapsed orogen. *J. Petrol.* 38, 941–970.
- Kocsis G. I. (2011): Nikola Tesla és az Univerzum titkai. Dürer Nyomda, Gyula, p. 494.
- Lacoiu A. (1893): Les enclaves des roches volcaniques. *Annales de l'Académie de Mâcon, Protat frères. Mâcon*, 710 p.
- Mítuch E., Posgay K. (1972): The crustal structure of central and southeastern Europe based on the results of explosion seismology, Hungary. *Geofizikai Közlemények (Special ed.)* 118–129.
- Ogava Y. (1987): MT 2D forward program code [partial derivatives with respect to mesh parameters (resistivity) are calculated].
- Prácser E. (2007): Modified MT 2D forward program code of Uchida (using magnetic permeability too for the model).
- Ráner G., Tátrai M., Varga G. (1980): Földtani alapszelvények geofizikai vizsgálata. MÁELGI Évi Jelentése, 40–45.
- Szarka L., Fischer G. (1989): Surface electromagnetic parameters in terms of the distribution of current at depth. *Geophysical Transactions* 35/3, 157–172.
- Szarka L., Fischer G. (1991): Subsurface electromagnetic parameters in terms of the distribution of current. *Geophysical Transactions* 37/1, 25–38.
- Szarka L., Zhang D., Ádám A. (2004): How magnetotellurics is able to see through 3D near surface inhomogeneities? *Acta Geod. Geoph. Hung.*, 39/4, 381–394.
- Szébenyi R. M. (2023): Magnetotellurikus adatok feldolgozása a Dunántúlon, egy mintaszelvény alapján. Diplomamunka, ELTE, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest, p. 49.
- Takács E. (1968): Anomalous conductivity of the upper crust in the NW foreground of the Bakony Mountains. *Acta Geod. Geoph. Mont. Hung.*, 3, 155–160.
- Uchida T. (1994): Modified MT 2D forward program code of Ogava (ABIC installed, Misfit corrected, Tipper disabled, Tipper revived)

Függelék

Magnetotellurikus modellezési eredmények

Érdekes az átlagfázis viselkedését a mágneses kontaktus környékén (15. ábra) megvizsgálni, mert arról csak keveset tudunk. Már 2009-ben elkezdtük a kétdimenziós MT modellezéseket a fajlagos ellenállás és a fázis paraméter vizsgálatára – Ogava Y. (1987) véges differenciás algoritmusának Uchida T. (1994) és Prácser E. (2007) által feljavított változatával – amelyről publikációk is készültek (Kiss, Prácser 2021, Kiss et al. 2023).

Egy elektromos vezetőképesség szempontjából homogén féltérbe helyzetünk el egy mágneses testet, amelynek az elektromos vezetőképessége a homogén féltérrel egyező, de a mágnesezettsége eltérő és modellezéssel vizsgáltuk a kialakuló EM teret a kontaktus környezetében.

A programmal, a kontaktus modellt használtuk (15. ábra), kisebb mágneses permeabilitású ($\mu_r = 2$) felszíni testtel, homogén elektromos vezetőképességű ($\rho = 10 \Omega\text{m}$) féltérben vizsgálva az impedancia fázis viselkedését.

A különböző polarizációkban eltérő hatásokat tapasztalunk a látszólagos fajlagos ellenállás (ρ_{TE} és ρ_{TM}) értékekben (16. ábra). Mindhárom görbe menetére meg lehet adni a magyarázatot.

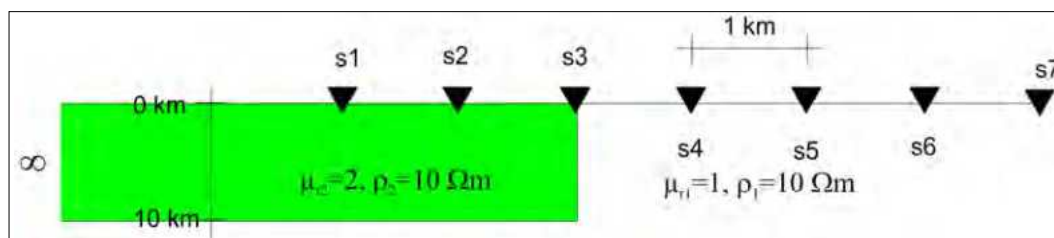
A mágneses test feletti 2-es ponton a felszíni mágneses permeabilitás megnöveli a fajlagos ellenállás értékét, amely

a nagy mélységek (kis frekvenciák) irányában mindhárom görbe esetén közelít a mágneses test alatti féltér fajlagos ellenállásához (16. ábra).

A kontaktuson (3-as pont) a felszínközélen $10 \Omega\text{m}$ -nél nagyobb (TM), illetve kisebb (TE) az értékek, az átlagfázis pedig $10 \Omega\text{m}$ körül fele-fele arányban szerepel, felül a nagyobb értékek (16. ábra, középen).

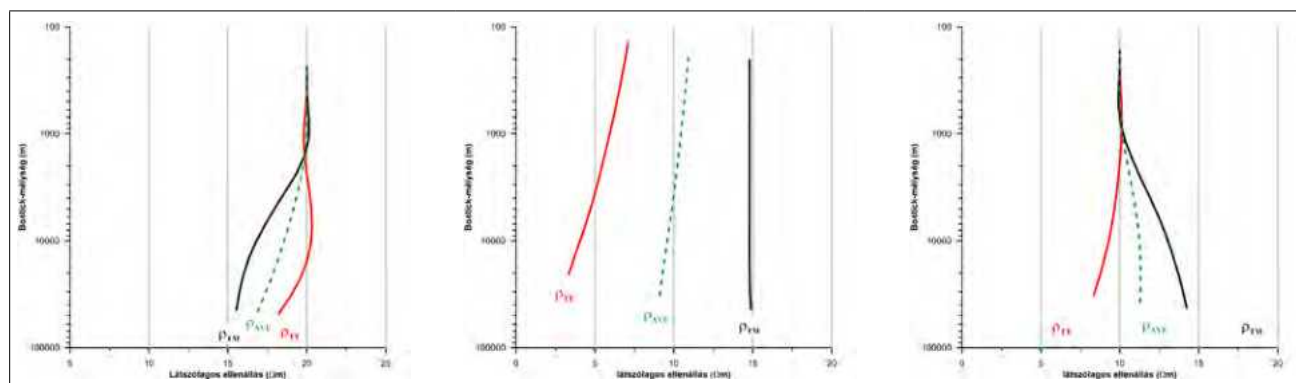
A mágneses test nélküli homogén féltérben (4-es pont) a fajlagos ellenállás $10 \Omega\text{m}$ a felszínközélen, majd 1000 m mélységben szétnyílnak a görbék. TE^1 módban csökkenő értékkel, TM^2 módban és átlagfázis esetén oldalhatásként megjelenik a mágneses test okozta megnövekedett fajlagos ellenállás érték (16. ábra, jobbra).

A kontaktus környezetében a különböző polarizációkban a fázis görbék (φ_{TM} és φ_{TE}) eltérő menetet mutatnak (17. ábra). Az átlagfázis (φ_{AVE}) görbe a mágneses test felett 45° értékről indulva egyre nagyobb értéket vesz fel. A kontaktus felett már a kezdőfrekvencián (mélységen) is 45° feletti értékeket mutat, míg a mágneses testtől távolodva a görbe kezdeti értékeire a 45° alatti értékek lesznek jellemzőek a mágneses test vastagságának megfelelő mélységig. A TE és TM fázisgörbék menete változékony és nagyon függ attól, hogy a kontaktushoz képest milyen helyzetben/távolságra vannak.



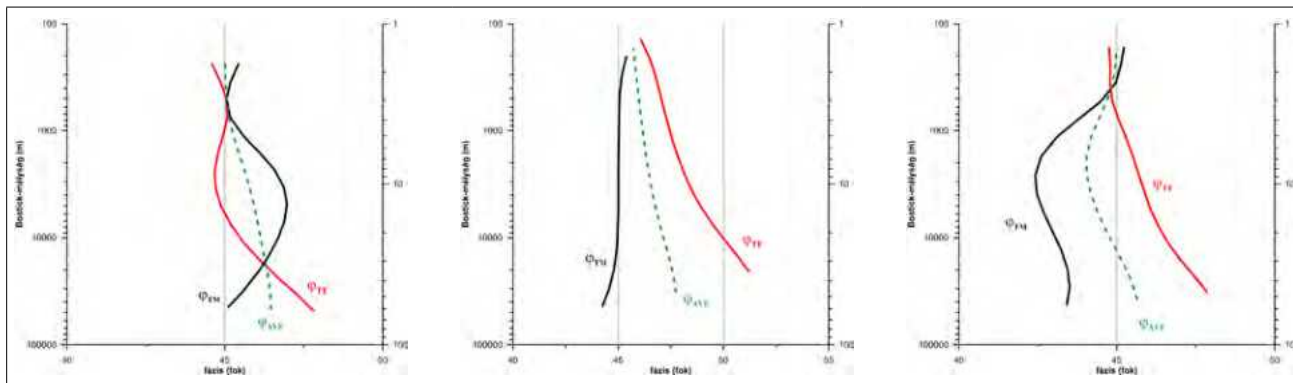
15. ábra | A modellben az elektromos vezetőképesség szempontjából homogén féltérbe ($\rho = 10 \Omega\text{m}$, $\mu_r = 1$) mágneses testet ($\mu_r = 2$) helyeztünk, és 7 szondázási ponton vizsgáltuk a hatást

Figure 15 | In the model, we placed a magnetic body ($\mu_r = 2$) in a homogeneous half-space in terms of electrical conductivity ($\rho = 10 \Omega\text{m}$, $\mu_r = 1$) and examined the effect at 7 probe points

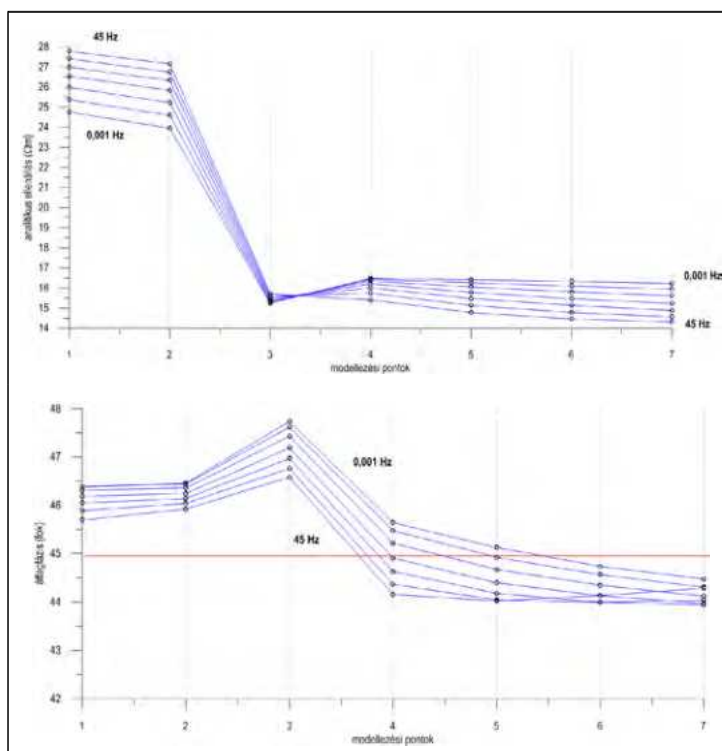


16. ábra | A mágneses modell felett kapott látszólagos fajlagosellenállás-görbék menete a 2-es, 3-as és 4-es ponton

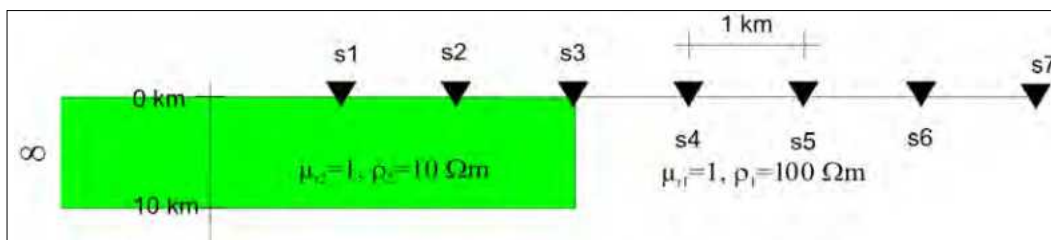
Figure 16 | Apparent resistivity curves obtained above the magnetic model at points 2, 3, and 4 (TE – E-polarization, TM – H-polarization)



17. ábra A mágneses modell felett kapott fázisgörbék a 2-es, a 3-as és a 4-es ponton
 Figure 17 Phase curves obtained above the magnetic model at points 2, 3, and 4 (TE – E-polarization, TM – H-polarization)



18. ábra Az analitikus látszólagos fajlagos ellenállás³⁾ (felül) és az átlagfázis (alul) menete a modellszelvény mentén a mágneses modell esetén – a pontról pontra a változások egyenletes tendenciát mutatnak
 Figure 18 The analytical apparent resistivity (top) and average phase (bottom) along the model section in the case of the magnetic model – point-to-point changes show a uniform trend



19. ábra A modellben a mágneses permeabilitás szempontjából homogén féltérbe ($\mu_r = 1, \rho_r = 100 \Omega m$) elektromosan vezető testet ($\mu_r = 1, \rho_r = 10 \Omega m$) helyeztünk és 7 szondázási ponton vizsgáltuk a hatást
 Figure 19 In the model, we placed an electrically conductive body ($\mu_r = 1, \rho_r = 10 \Omega m$) in a homogeneous half-space in terms of magnetic permeability ($\mu_r = 1, \rho_r = 100 \Omega m$) and examined the effect at 7 probe points

A fázis egyrészt érzékeny a vezetőképesség megváltozására (Berdicsevszkij 1968), másrészt érzékeny a mágneses permeabilitás megváltozására is, amit a kétdimenziós modellezések mutatnak (Kiss 2025).

A mágneses permeabilitás növekedése homogén féltér esetében a látszólagos fajlagos ellenállás növekedését, azaz szigetelő hatást okoz, addig paradox módon a fázisparaméter esetében 45° -nál nagyobb fázisértékeket, azaz jól vezető, ellentétes hatást eredményez a kontaktus környezetében. A kontaktus környékén tehát bonyolulttá válik a helyzet, a két polarizációban eltérő módon változnak a paraméterek. Az átlagfázisgörbék azonban valamelyest egyszerűsítik a helyzetet.

A 18. ábra mutatja a látszólagos fajlagosellenállás- és a fázisértékek menetét a modellezett szelvény mentén pontról pontra. A felszíni mágneses test nagy frekvenciákon növeli a fajlagos ellenállás értékét, ami a mágneses testtől eltávolodva a kisfrekvenciás értékekre még gyenge hatással van, miközben a nagyfrekvenciás részekben már érződik. Ez a törvényszerűség, a frekvenciák sorrendjét módosítja a mágneses és nem mágneses test felett (18. ábra). A váltáspont ebben az esetben a kontaktus felett található. A fázis menete a kontaktus környezetében sokkal egyenle-

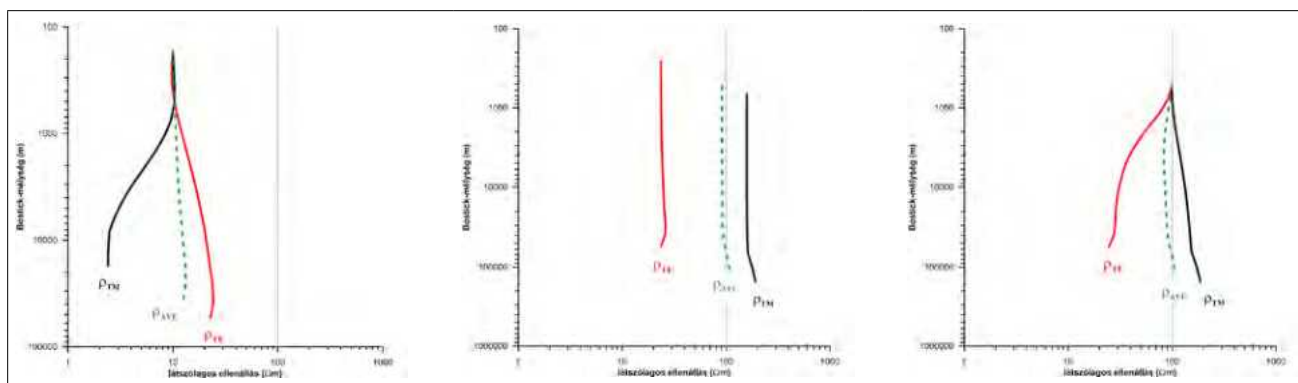
tesebb: monoton, bár a kontaktus felett túllövés (3-as pont) látszik.

Ez azt jelenheti, hogy az átlagfázisértékek felhasználhatók a magnetotellurikus mérési adatok földtani értelmezése során, a mágneses határfelületek azonosítására is.

Nézzük meg azonban, hogy egy nem mágneses közegben az elektromos vezetőképesség értékek változása (függőleges határfelület) esetén (19. ábra) mi történik!

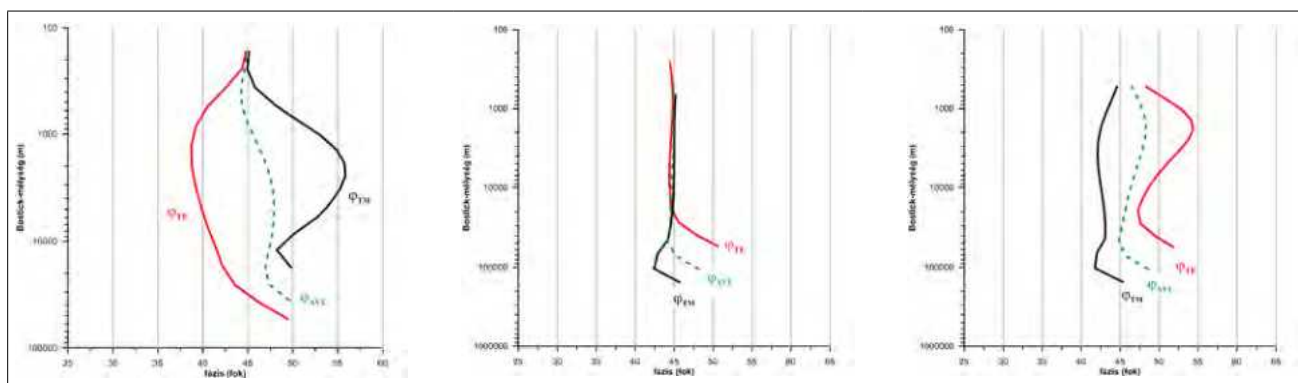
A látszólagos fajlagosellenállás-görbék viselkedése szinte ugyanazt a trendet mutatja, mint a mágneses test kontaktusa esetében. Az E - és H -polarizációs látszólagos fajlagosellenállás-görbék ugyan eltérő módon viselkednek a kontaktuson és annak két oldalán a modell felett (20. ábra), de a legérdekesebb a kontaktus felett, ahol a görbék különböző fajlagosellenállás-értékkel (20, 100 és 200 Ωm), de homogén jellegű féltérre jeleznek. Az átlagos fajlagosellenállás-értékkel értelmezhető a modell legegyszerűbben, ami a jól vezető test felett 10 Ωm , máshol 100 Ωm értékekkel jelentkezik.

A fázis viselkedése is érthetővé válik, ha végiggondoljuk, hogy a különböző polarizációkban hogyan fognak elhelyezkedni az elektródák (E -polarizációban kontaktussal párhuzamosan, H -polarizációban kontaktusra merőlegesen), és hogyan változik a vezetőképesség. Érdekes mó-



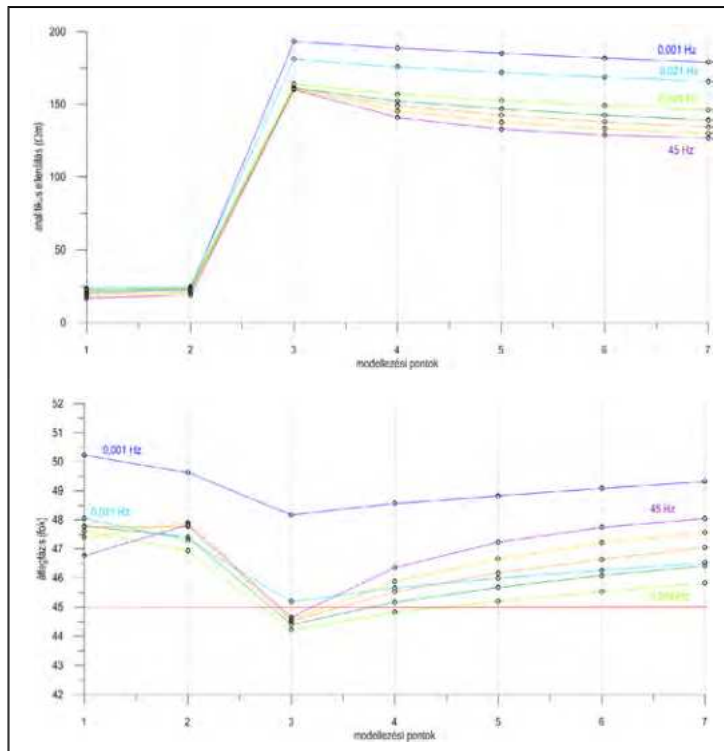
20. ábra | A jól vezető modell felett kapott látszólagos fajlagosellenállás-görbék a 2-es, a 3-as és a 4-es ponton

Figure 20 | Apparent resistivity curves obtained above the well-conducting model at points 2, 3, and 4



21. ábra | A jól vezető modell felett kapott fázisgörbék menete a 2-es, 3-as és 4-es ponton

Figure 21 | Phase curves obtained above the well-conducting model at points 2, 3, and 4



22. ábra Az analitikus látszólagos fajlagos ellenállás (felül) és az átlagfázis (alul) menete a szelvény mentén a jól vezető modell esetén – a pontról pontra történő változások a fajlagos ellenállás esetében egyenletes, a fázis esetében ettől eltérő változást mutatnak

Figure 22 The course of the analytical apparent resistivity (top) and the average phase (bottom) along the section in the case of a well-conducting model – point-to-point changes are uniform in the case of resistivity, but show different changes in the case of phase

don a kontaktus felett mindhárom görbe beáll 45°-ra (21. ábra) és csak 10 km mélység után jelenik meg a nagyobb fajlagos ellenállás hatása először a φ_{TE} görbén. A φ_{AVE} és φ_{TM} görbéken ez sokkal mélyebben következik be.

A szelvény nyomvonalán a vezetőképesség növekedése a látszólagos fajlagos ellenállás csökkenését okozza (22. ábra), s az átlagfázis 45°-nál nagyobb értékeket vesz fel, a kontaktus kivételével, szinte az egész modellszelvény mentén. A kontaktus felett az fázis érték 45° alá megy (22. ábra).

Ezek a modellezési eredmények azért voltak fontosak, hogy a feldolgozás során kapott mélységtérképeket vagy a térrácsokat, az azokban megjelenő változásokat értelmezni tudjuk. Itt rögtön felmerül az is, hogy a Földben folyó tellurikus áram vízszintes terjedési iránya miatt más ered-

ményt fogunk kapni a vízszintes és a függőleges/ferde határfelületek esetén. Az is érdekes, hogy az indukált és remanens mágnesezettség irányítottságának és a test geometriájának (forma, legnagyobb kiterjedési irány) is szerepe lehet a kialakuló EM torzulásokban. Ezek a paraméterek azonban többnyire ismeretlenek számunkra!

Jegyzetek

- ¹⁾ TE vagy E-polarizáció – a kontaktussal párhuzamos irány
- ²⁾ TM vagy H-polarizáció – a kontaktusra merőleges irány, azaz szelvényirány
- ³⁾ Analitikus fajlagos ellenállás – az egymásra merőleges ρ_{TE} és ρ_{TM} vektorösszege (frobeniuszi vagy euklideszi norma)