

Háromdimenziós inhomogenitások indikációi a béléscső-elektroda elektromágneses terének szekunder komponenseiben¹

TAKÁCS ERNŐ¹, HURSÁN GÁBOR²

A tanulmány a béléscső-elektrodával harántolt, háromdimenziós inhomogenitások által létrehozott, anomális elektromágneses összetevőknek — mint az inhomogenitások indikációinak — sajátosságait vizsgálja integrálegyenletes numerikus modellezés eredményei alapján.

Ezek az összetevők horizontálisan rétegzett feltér fölött nem jelennek meg. Kizárólag a fúrás környezetében levő, laterális inhomogenitások hozzák létre őket. Emiatt a fúrás közvetlen közelében végzett mérésekkel is képesek jelezni a jelentős mélységű inhomogenitás meglétét.

A téglatest alakú inhomogenitások szekunder tere jól közelíthető egy föld alatti, vízszintes elektromos dipólus terével. A dipólus terének törvényszerűségei felhasználhatók az inhomogenitás mélységének, felszíni vetületének és a fedő effektív fajlagos ellenállásának becslésében.

E. TAKÁCS, G. HURSÁN: Three-dimensional inhomogeneity indications in the secondary components of the electromagnetic field generated by the steel-casing electrode

Behaviour of the anomalous, secondary electromagnetic components generated by three-dimensional inhomogeneities penetrated by the steel-casing electrode are examined using the results of integral equation numerical modelling.

These secondary components are absent on the surface of a horizontally layered medium. They are caused completely by lateral inhomogeneities disposed asymmetrically around the casing. They can indicate by measurements carried out even in the vicinity of the borehole the presence of inhomogeneities in considerable depth.

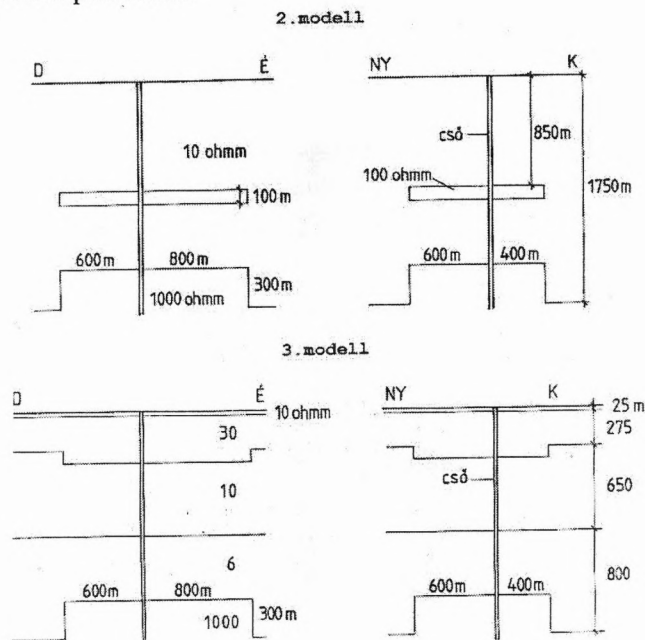
The secondary e.m. fields due to a brick-form inhomogeneity can be approximated by the field of a buried horizontal electric dipole. The features of the dipole-field can be used to estimate the depth and contour of the inhomogeneity and the effective resistivity of the covering sediment.

Bevezetés

A mélyfúrások béléscsővét lineáris tápelektrodaként használva az általa létrehozott elektromágneses tér lényegében mélybeli, vertikális elektromos dipólusok sorozata térerősségének eredője [TAKÁCS 1995]. A béléscsőves gerjesztéssel tehát az egyébként körülményesen megvalósítható felszín alatti vertikális elektromos dipólusával (VED) azonos sajátosságú elektromágneses tér hozható létre. Eddig a felszíni sugárirányú szelvényeken mért radiális elektromos térerősséggel (ER) foglalkoztunk, ami a felszíni tápelektroda — illetve elektrodák — megfelelő, például kör menti elhelyezésével a primer térerősségnek egyetlen komponense.

A béléscsőves mérés alkalmazási területeként a mélyfúrás közvetlen környezetében levő laterális inhomogenitások kutatása adható meg. Bár a hagyományos — felszíni elektrodás — árambevezetéshez képest a béléscsőves mérésnek azonos távolságon a radiális elektromos térerősséggel is nagyobb a kutatási mélysége — ráadásul az árnyékoló rétegek alatt is van árambevezetés — az inhomogenitás által létrehozott anomális tér kis értékű a primerhez képest. Emiatt a fúráshoz közel az ER komponens kis érzékenységgé az inhomogenitásra. Nagyobb távolságon a primer tér fokozottabb csökkenése miatt az anomális rész már jelentős

részévé válik a mért értéknek. Az inhomogenitás indikációja tehát a mélyfúrástól távol jelenik meg szignifikánsan az ER komponensben.

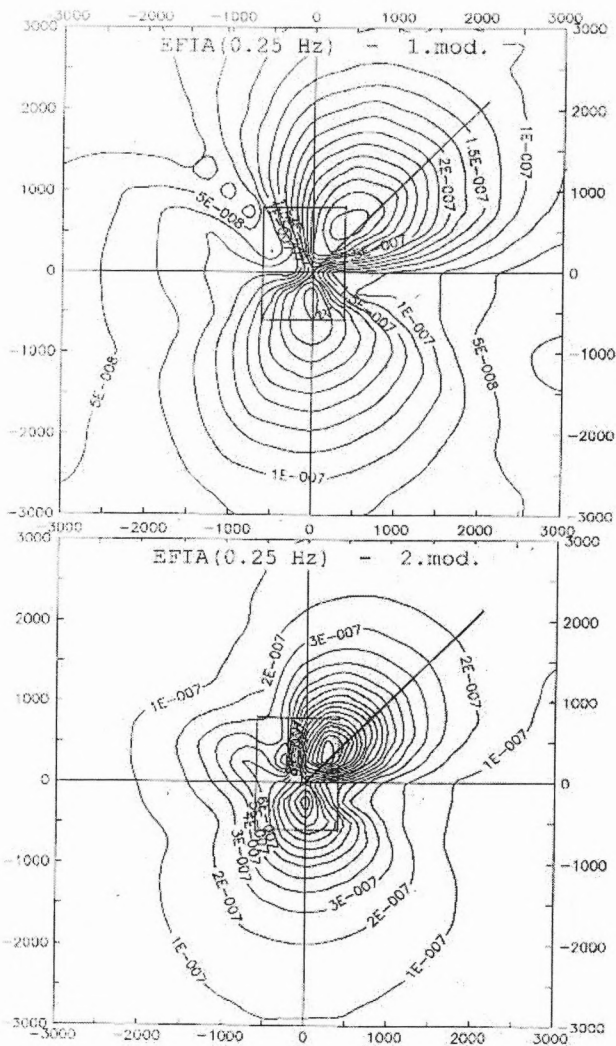


1. ábra. A béléscsővel harántolt 3D-s inhomogenitások modelljeinek oldalnézeti vetületei. Az 1. modell a 2. modelltől abban különbözik, hogy ott a felső inhomogenitás hiányzik
Fig. 1. Side view of the 3D inhomogeneity models penetrated by the casing. In the case of model 1 the upper inhomogeneity is missing

¹ Beérkezett: 2000. május 26-án

² Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék, H-3515 Miskolc, Egyetemváros

³ University of Utah, Dept. of Geology and Geophysics, Salt Lake City, UT 84112

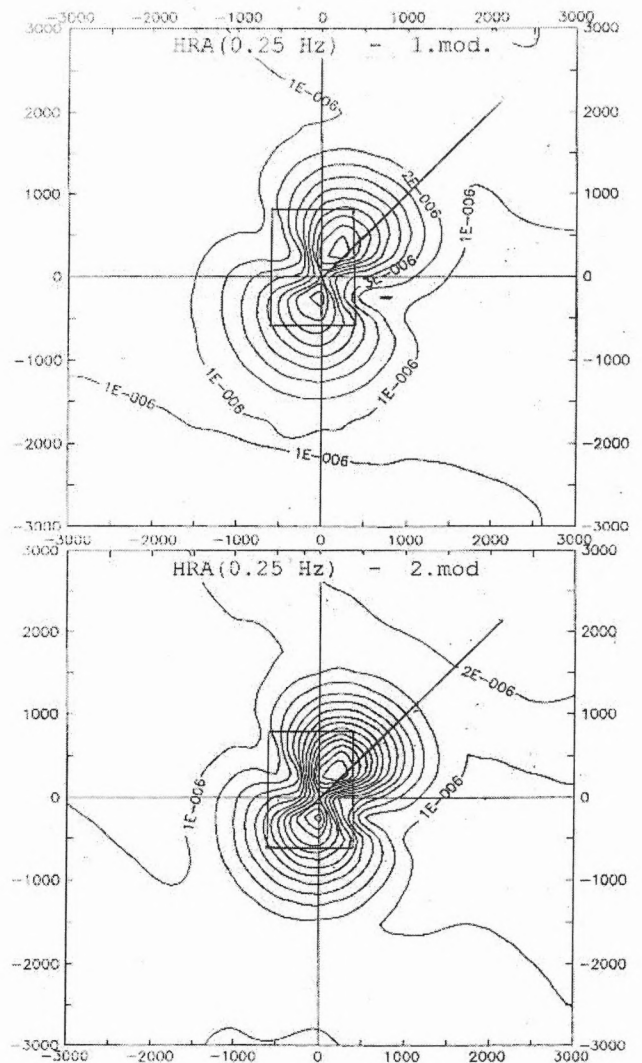


2. ábra. A tangenciális elektromos összetevő amplitúdójának területi eloszlása

Fig. 2. Amplitude contour map of the tangential electric component

A felszíni elektróda alkalmas telepítésével elérhető, hogy a radiális szelvényeken teljes egészében a laterális inhomogenitástól származzék a tangenciális elektromos (EFI), a radiális és vertikális mágneses (HR, HZ) komponens. Kisebb értékű primer tangenciális mágneses összetevővel (HFI) viszont számolni kell. Ezen szekunder komponensek amplitúdója és fázisa egyaránt tartalmaz földtani információkat. Tanulmányunkban a hangsúlyt a könnyen mérhető amplitúdó sajátosságainak bemutatására helyezzük. A fázisszög részletes tárgyalása nagy terjedelmet igényelne. Emiatt alkalmazhatóságának csak egy példáját említjük az 5. fejezetben.

A MOL Rt. Hazai Kutatási Üzletágának megbízásából a Geocom Ltd.-nél — Salt Lake City, USA — HURSÁN Gábor ZSDANOV M. professzor irányításával numerikus modellezést végzett a béléscsöves mérés lehetőségeinek tisztázására [TAKÁCS 1999]. Tanulmányunk ennek a munkának néhány eredményét mutatja be.



3. ábra. A radiális mágneses összetevő amplitúdójának területi eloszlása

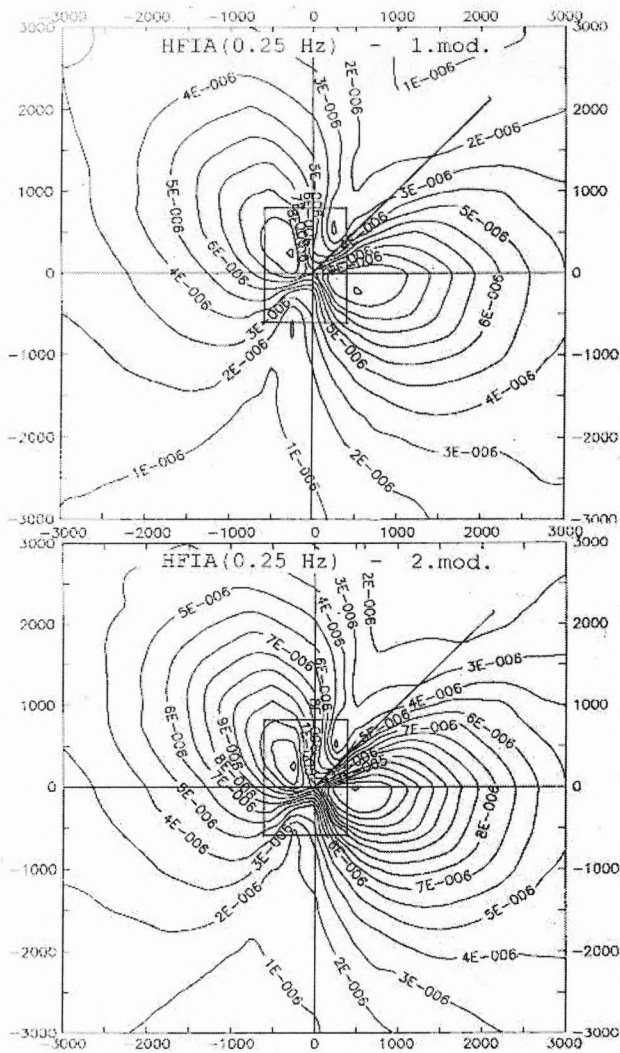
Fig. 3. Amplitude contour map of the radial magnetic component

1. A vizsgált modellek

A modellezés a CEMI — Center for Electromagnetic Modeling and Inversion, University of Utah — integrálegyenletes Sysem programcsomagjával történt. Ezen azonban jelentős változtatásokat kellett végezni, mivel a béléscsöves gerjesztés lényegesen eltér a hagyományos elektromágneses módszereknél alkalmazottaktól. A számításokhoz béléscső árameloszlását a 2383. nyilvántartási számú OTKA téma keretében kifejlesztett programmal határoztuk meg [TAKÁCS et al. 1995].

A béléscsővel harántolt inhomogenitások esetét három modellel vizsgáltuk.

Az 1. modellnél az 1800 m hosszúságú béléscső az 1000 ohmm-es aljzatnak 300 m magasságú, 1000x1400 m felületű, hasáb alakú felbotozódás a 10 ohmm-es fedő alatt 1500 m-ben éri el aszimmetrikus helyzetben. Az áramforrás egyik pólusa a felszín alatt 10 m-rel kezdődő cső felső végéhez, a másik pedig a közvetlenül felette levő



4. ábra. A tangenciális mágneses összetevő amplitúdójának területi eloszlása

Fig. 4. Amplitude contour map of the tangential magnetic component

felszíni elektródához csatlakozik. Ez a konfiguráció a terepen több, azonos áramerősséget leadó felszíni elektróda közeli, körkörös elhelyezésével valósítható meg.

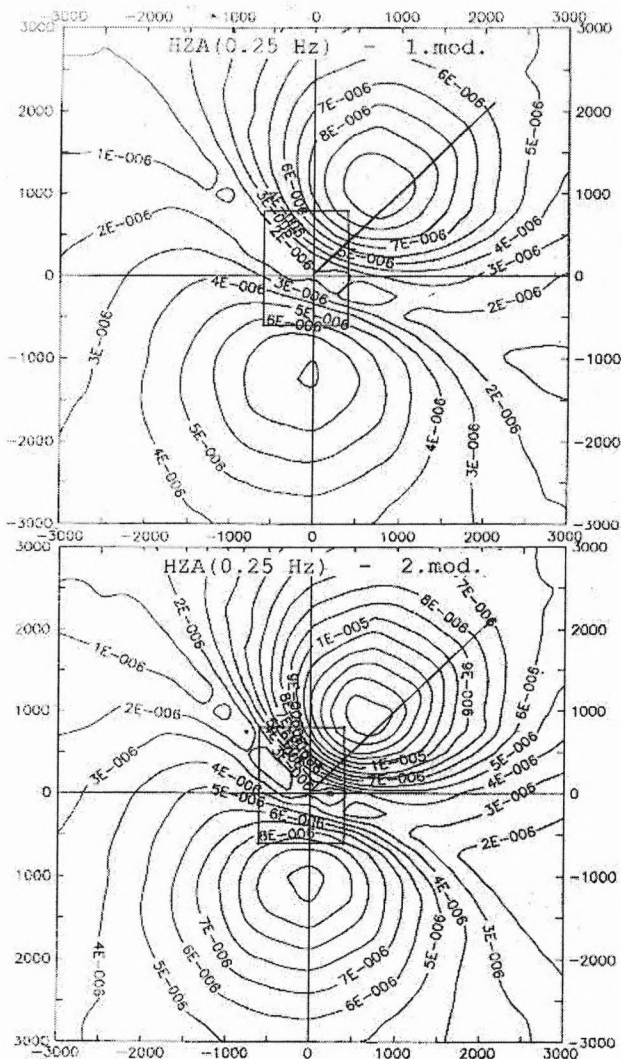
A 2. modell az előzőtől abban tér el, hogy az aljzat felboltozódása fölött a 10 ohm-es összetetben egy második, 100 ohm-es inhomogenitás települ 850–950 m mélység között, ami az aljzat inhomogenitásával azonos felületi méretű és vele fedésben van.

A 3. modellnél a fedő réteggel. Az alsó inhomogenitás továbbra is az aljzat hasáb alakú felboltozódása az előzőekkel megegyező mérettel. A felső inhomogenitás pedig a 30 ohm-es második réteg 300–400 m közötti, téglatest alakú kivastagodása, ami fedésben van az alsó inhomogenitással.

Az 1. ábra a 2. és 3. modelleket mutatja (ld. a 108. oldalon).

2. A szekunder komponensek kisfrekvenciás amplitúdójának területi eloszlása

Az anomális elektromos és mágneses komponensek amplitúdójának (EFIA, HRA, HFIA, HZA) területi alakulását 0,25 Hz-nél az 1. és 2. modellre a 2.–5. ábra mutatja.



5. ábra. A vertikális mágneses összetevő amplitúdójának területi eloszlása

Fig. 5. Amplitude contour map of the vertical magnetic component

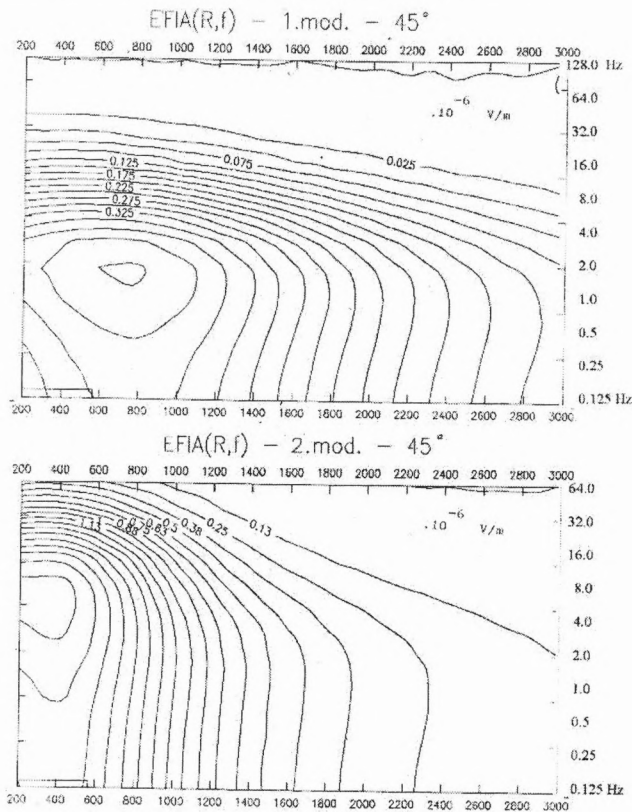
A HFIA összetevőnél kis értékű primer térerősség is szerepel ebben a képen.

Valamennyi összetevőnél az izovonalak az inhomogenitás fölött aszimmetrikusan kirajzolódó, két szélső értékkel indikálják az inhomogenitás meglétét és helyzetét. Közöttük éles minimum-sávok alakulnak ki. A 2. modell felső inhomogenitása domináló anomáliával jelentkezik és a béléscsőhöz közelebb alakul ki.

Az anomális amplitúdók területi alakulásában fő vonásokban a föld alatti, vízszintes elektromos dipólus térerősség-eloszlásának sajátosságai fedezhetők fel. Erre az EFIA, HRA és HZA esetében a mérési szelvény és a dipólus tengelye által bezárt szög szinusza, a HFIA komponensnél pedig a koszinusza szerinti irányfüggés a jellemző. Az inhomogenitást „helyettesítő” föld alatti dipólus azonban a hasáb szimmetriatengelyeihez képest — az egyes térnegyedekben eltérő módon — elfordult helyzetű és változó momentumú. A „helyettesítő” föld alatti elektromos dipólust az inhomogenitás felületén kialakult felületi töltések aszimmetriája fordítja el, ugyanis a béléscső nem a hasáb középpontján halad át. Emiatt a hasáb béléscsőhöz közelebbi oldallapjain nagyobb a felületi töltéssűrűség.

3. A szekunder komponensek amplitúdójának távolság-frekvencia metszetei

Az anomális térerőségek amplitúdójának frekvencia- és távolságfüggését az EFIA, HRA és HZA szélső értékén átmenő, ÉK-i szelvényre mutatjuk be a 6.–9. ábrán.



6. ábra. A tangenciális elektromos összetevő amplitúdó-frekvencia metszete az ÉK-i irányú szelvény mentén

Fig. 6. Tangential electric field amplitude pseudo-section along the NE profile

Az inhomogenitás hatására létrejött szélső érték legtisztábban az EFIA komponensnél jelenik meg. Maximuma a határfelület közelében, de a kis frekvenciáknál rajta túlnyúlóan alakul ki. A nagyobb frekvenciákon viszont már az inhomogenitás fölé húzódik. Az izovonalak értékében és lefutásában szignifikáns az eltérés a felső inhomogenitás megjelenésével.

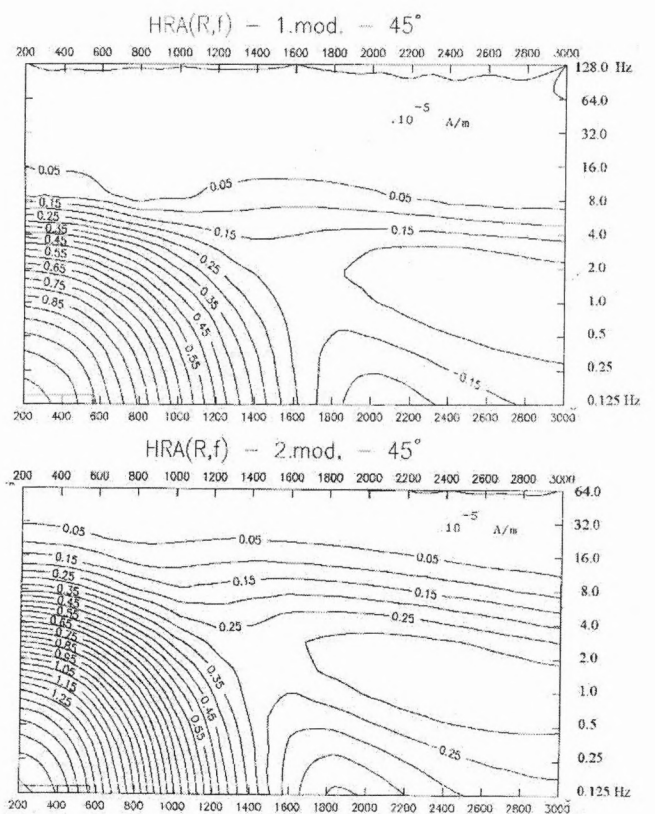
A mágneses összetevőkben a felső inhomogenitás jelenléte kisebb változást hoz.

A HRA komponens maximuma a többenél jobban koncentrálódik az inhomogenitás fölé. Az 1800–3000 m-en a 0,25–2,0 Hz-en kialakult minimum nulla-átmenet következménye, ami ezen komponens jellegzetessége.

A HZA összetevőnek a béléscsőnél van nulla-átmenete. Kis frekvencián szélső értékei jóval a határfelületen kívül alakulnak ki. A felső inhomogenitás az amplitúdónak mintegy 50%-os növekedését hozza és a maximum mintegy 200 m-rel kerül közelebb a béléscsőhöz.

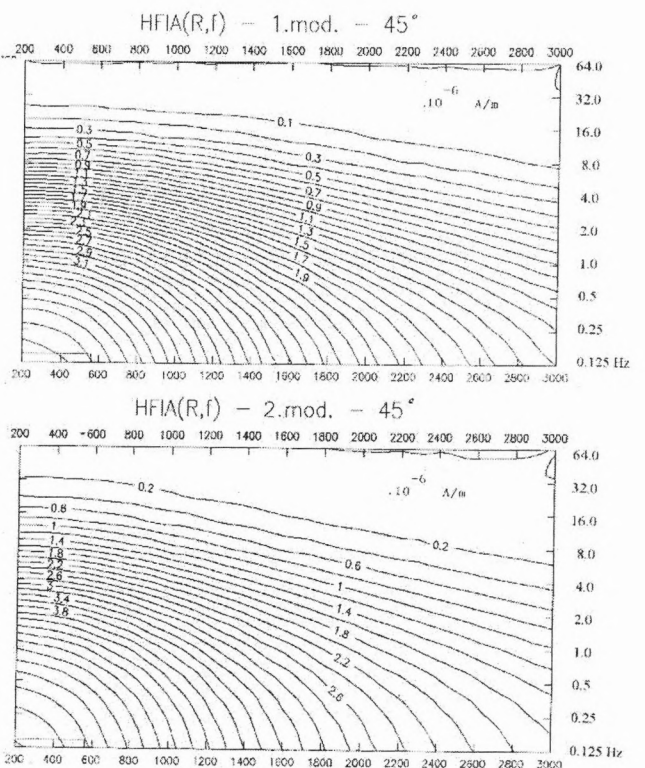
4. Az amplitúdó frekvenciaszondázási görbéi

A további szemléltetés céljából a 10a. ábrán az ÉK-i szelvény 200, 1400 és 3000 m-en levő pontjára EFIA frekvenciaszondázási görbéket is bemutatunk az 1. és 2. modellre.



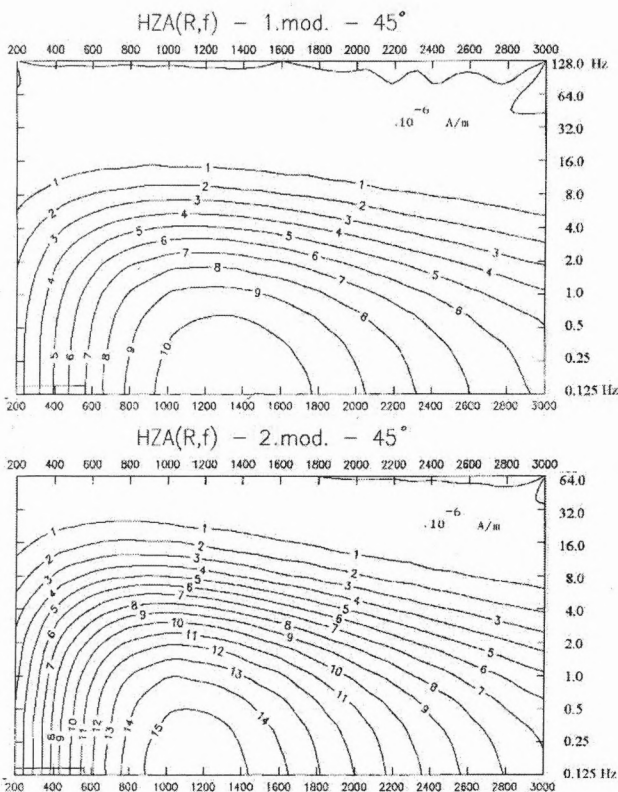
7. ábra. A radiális mágneses komponens amplitúdó-frekvencia metszete az ÉK-i irányú szelvény mentén

Fig. 7. Radial magnetic field amplitude pseudo-section along the NE profile



8. ábra. A tangenciális mágneses komponens amplitúdó-frekvencia metszete az ÉK-i szelvény mentén

Fig. 8. Tangential magnetic field amplitude pseudo-section along the NE profile



9. ábra. A vertikális mágneses komponens amplitúdó-frekvencia metszete az ÉK-i szelvény mentén

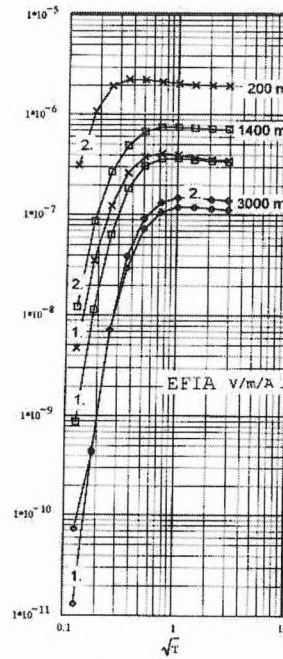
Fig. 9. Vertical magnetic field amplitude pseudo-section along the NE profile

EFIA-ban az 1. és 2. modellhez tartozó görbék eltérése a legkisebb távolságon a legnagyobb. A kisfrekvenciás jobb oldali aszimptoták egy nagyságrenden belül helyezkednek el. Az elválás a frekvenciával növekszik és 64 Hz-en már közelíti a két nagyságrendet, mert a felső inhomogenitás hatása a nagyobb frekvenciákon nagyobb. A felső inhomogenitás geometriai közelsége miatt nagyobb az effektív fajlagos ellenállás és ezért hosszabbá válik a kváziszacionárius szakasz, valamint a maximum nagyobb frekvencián jelentkezik, mint az 1. modellnél. A bemutatott hatás a távolsággal csökken. 3000 m-en a két modell görbéi már egymáshoz közeliek.

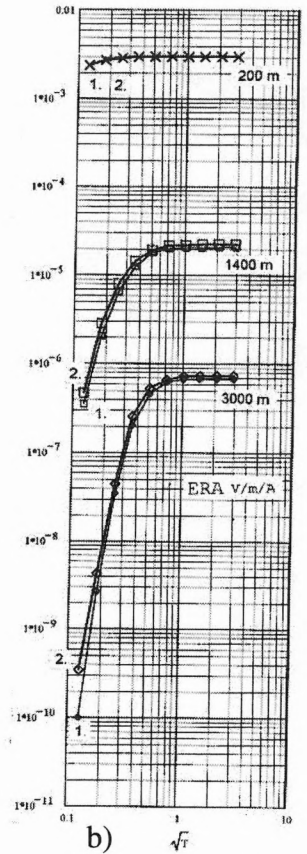
Tanulságos összehasonlítani a radiális elektromos összetevő (ERA) és a tangenciális összetevő (EFIA) görbéit. ERA értékében a primer elektromos térerősség a meghatározó, amiben a béléscsőtől mért távolság a döntő szerepű (10b. ábra). Emiatt $R=200$ m-nél az 1. és 2. modell görbéjének eltérése szinte észrevehetetlen. Elválásuk csak a nagyobb távolságokon érzékelhető. Az anomális EFIA összetevő görbéi viszont az inhomogenitás tényleges helye fölött mutatják a legnagyobb eltérést.

A felső inhomogenitás még kisebb mélységénél az indikáció akár élesen elkülönülő helyi maximummal is megjelenhet a nagyfrekvenciás szakaszon. Ez a helyzet a 3. modell esetében. EFIA és HRA frekvenciaszondázási görbék láthatók az ÉK-i szelvény előbbi három pontjára a 11. ábrán, amin összehasonlításul a felső inhomogenitás nélküli, rétegzett fedő alatti 1. modell görbéi is szerepelnek. A felső inhomogenitás hatására $R=200$ m-nél teljesen eltűnik, a nagyobb távolságokon pedig mintegy 8 Hz-től a nagyobb frekvenciák felé trendváltással

megszakad a görbék bal oldali, süllyedő szakasza. A felső inhomogenitás elkülönülő indikációval jelenik meg.



a)



b)

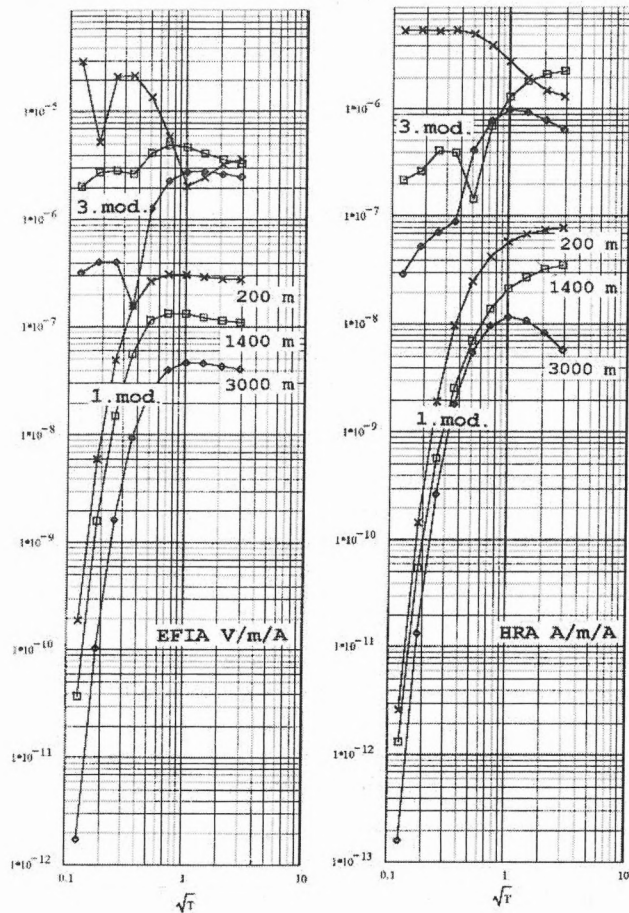
10. ábra. A tangenciális elektromos (EFIA) és a radiális elektromos (ERA) összetevő amplitúdójának frekvenciaszondázási görbéi az 1. és 2. modell ÉK-i szelvényének $R=200, 1400$ és 3000 m állomásán

Fig. 10. Tangential electric (EFIA) and radial electric (ERA) amplitude frequency-sounding curves at stations $R=200, 1400, 3000$ m along the NE profile for models 1 and 2

5. Az inhomogenitás térbeli helyzetére és a fedő effektív fajlagos ellenállására vonatkozó becslés lehetőségei

Az értelmezés fő feladata az inhomogenitás vetületének megadása. Kontúrjának egyes szakaszai az amplitúdók szélső értékeinek területi eloszlásából a bemutatott törvényszerűségeket figyelembe véve kijelölhetők. A térbeli helyzet megadása azonban csak az inverziótól várható, amikor a felszín alatti térfogat-, illetve felületelemekhez töltéseloszlást számítunk. A szóba jöhető térfogat, illetve felület célszerű megválasztásában segítenek az inhomogenitás mélységére vonatkozó becslések.

Az anomális térerősségek távolságtól és frekvenciától való függése nyilvánvalóan információt hordoz az inhomogenitás mélységi helyzetéről. Forrásuknak a jelenlegi modelleknél durva közelítéssel a mérési szelvényvel szöget bezáró, föld alatti, vízszintes elektromos dipólus tekinthető. Valójában azonban az inhomogenitás felületén felhalmozódó töltések a szekunder komponensek forrásai.



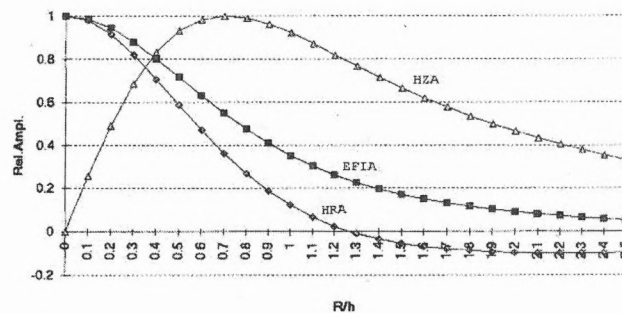
11. ábra. A tangenciális elektromos (EFIA) és a radiális mágneses (HRA) összetevő amplitúdójának frekvenciaszondázási görbéi az 1. és 3. modell ÉK-i szelvényének $R=200, 1400$ és 3000 m állomásán

Fig. 11. Tangential electric (EFIA) and radial magnetic (HRA) amplitude frequency-sounding curves at stations $R=200, 1400, 3000$ m along the NE profile for models 1 and 3

Az amplitúdók távolságtól való függésének bemutatására vizsgáljuk meg a felszín alatti vízszintes elektromos dipólus felszíni térorsságének alakulását. Az anomális összetevőknek a maximumukra normált amplitúdója a homogén féltér felszínén egyenáramnál a távolság (R) és mélység (h) arányának függvényében a 12. ábra szerint alakul. A görbéken jellegzetes pontok — metszések, félértékű helyek, szélső értékek, nulla-átmenet stb. — jelölhető ki. Az abszcissza menti helyzetükből tájékozódhatunk az inhomogenitást „helyettesítő” dipólus mélységéről. Így például HZA maximuma $0,71$, HRA és EFIA félértékű helye $0,57$ és $0,77$ R/h értéknél van. A modellezés eredményeit vizsgálva ezen R/h értékek felhasználásával megfelelő egyezést kaptunk a téglatestek mélységével.

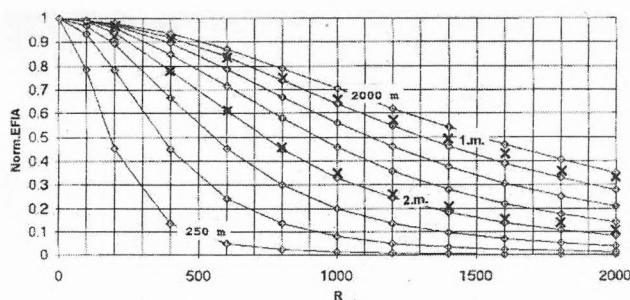
A jellegzetes pontok mellett az amplitúdószelvények teljes adatrendszer is felhasználható. A 13. ábrán $0,1$ Hz-re EFIA normált amplitúdójának távolságfüggése látható a dipólus különböző mélységére 250 -tól 2000 m-ig 250 m-es lépésekkel. Az ÉK-i szelvényre számított normált amplitúdó az 1. modell esetében az 1750 m, a 2. modellnél pedig az 1000 m paraméterű görbéknél található. Ezek jó becslései az inhomogenitások mélységének. A 2. modell két különböző mélységű inhomogenitása mellett a felső domináló módon hat a tangenciális elektromos összetevő távol-

ságfüggésére. A fedésben levő, többszörös inhomogenitások hatásának szétválasztásában emiatt a frekvenciafüggést is elemezni kell. Megoldást biztosítana a fúrás ideje alatt különböző béléscső-, vagy rudazathosszúságnál ismételt mérések lehetősége.



12. ábra. A felszín alatti, egyenáramú vízszintes elektromos dipólus maximumukra normált EFIA, HRA és HZA amplitúdói a radiális távolság (R) és mélység (h) arányának függvényében

Fig. 12. EFIA, HRA, HZA amplitudes normalised by their maximums due to a buried dc horizontal electric dipole as a function of the separation/depth — R/h — quotient

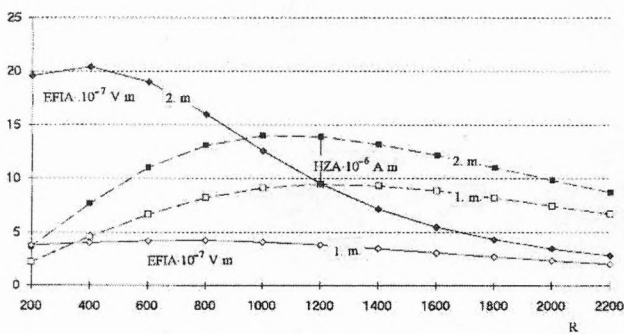


13. ábra. A 250 – 2000 m között különböző mélységben levő vízszintes $0,1$ Hz-es elektromos dipólus felszíni tangenciális elektromos összetevője normált amplitúdójának szelvény menti alakulása

Fig. 13. Normalised tangential electric field amplitude profiles due to a $0,1$ Hz horizontal electric dipole located at different depths in the depth interval 250 – 2000 m

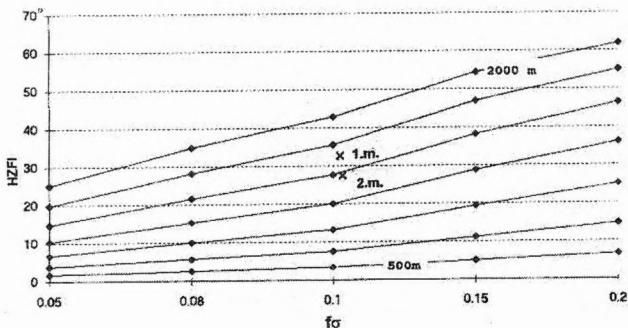
A 2. modell felső inhomogenitásának azonban kisebb hatása van a mágneses összetevőkre. A 14. ábrán a tangenciális elektromos és a vertikális mágneses amplitúdó látható az 1. és 2. modell ÉK-i szelvényére 1 Hz-en. Az elektromos görbék elválása lényegesen nagyobb és félértékű pontjaikból összhangban a fentiekkel az 1. modellnél 1740 , a 2. modellnél 970 m adódik az inhomogenitások mélységére. Az utóbbi esetben az elektromos komponens tehát csak a felső inhomogenitást látja. A vertikális mágneses összetevő maximumának helyéből viszont az 1. modellnél 1660 , a 2. modellnél 1480 m-t kaptunk. Az 1. modellnél tehát jó az egyezés az elektromos és mágneses komponensekből származtatott mélységek között. A 2. modellnél ellenben a vertikális mágneses komponens a két inhomogenitás tényleges helyzete közötti mélységet ad, ami közelebb van az alsóhoz. Az elektromos és a mágneses összetevőkből levezetett mélységek eltérése tehát figyelmeztet, hogy két inhomogenitás van a 2. modellnél.

A hasáb alakú inhomogenitáshoz kötött dipólus feltételezésével levezethető a fedő effektív fajlagos ellenállása is. Erre az egyes szekunder összetevők amplitúdójának, vagy



14. ábra. Az 1. és 2. modell tangenciális elektromos és vertikális mágneses komponense amplitúdója az ÉK-i szelvényen 1 Hz-en

Fig. 14. Amplitudes of the tangential electric and vertical magnetic components along the NE profile of models 1 and 2



15. ábra. A vertikális mágneses összetevő fázisszöge az amplitúdó maximumának helyén a horizontális elektromos dipólus különböző mélységénél a vezetőképesség és frekvencia szorzatának függvényében a kis indukciós szám tartományában

Fig. 15. The phase of the vertical magnetic component at the location of the amplitude maximum of the horizontal electric dipole buried in various depths as a function of the product frequency. Conductivity — $f\sigma$ — in the small induction number range

fázisának távolság-, illetve frekvenciafüggése számos lehetőséget kínál. Válasszuk most példaképpen erre a célra a vertikális mágneses összetevő fázisszögét (HZFI) a kis indukciós számok tartományában, ahol a fázisszög szinte lineáris függvénye a vezetőképességnek. A 15. ábrán elméleti görbék láthatók a homogén feltérben levő, mélybeli horizontális elektromos dipólus vertikális mágneses összetevőjének az amplitúdó szelvény menti maximumának a helyén mért fázisára a dipólus mélységének 500–2000 m tartományra 250 m-es közönként. Az abszcisszán a frek-

vencia (f) és a vezetőképesség (σ) szorzata szerepel. Az $f\sigma = 0,1$ helyen változik a skála. Az 1. és 2. modellre vonatkozó pontokat 1 Hz-re az amplitúdó maximuma helyéből levezetett mélység és a maximumnál mért fázisszög alapján hordtuk fel. Az ezen pontokhoz tartozó abszcissza értékéből a frekvencia ismeretében származtatott vezetőképesség a tényleges $\sigma = 0,1$ -hez egészen közeli érték.

Következtetés

A numerikus vizsgálat eredményei alapján megállapítható, hogy az elektródaként használt béléscsővel, illetve rudazattal harántolt 3D-s inhomogenitások fölött jellegzetes területi eloszlású szekunder elektromágneses térkomponensek jelennek meg. Ezek még szinte a fúrás közvetlen közelében mérve is — ahol a primer komponensben nem érzékelhető az anomália — jelentős mélységtartományból és árnyékoló réteg alól is jelzik az inhomogenitás meglétét. A modellezés feltárta az egyes szekunder komponensek több szempontból egymástól különböző sajátosságait. Ezek alapján az inhomogenitás paramétereire becslés végezhető, ami a tényleges inverzió hatékonyságát segítheti.

Köszönetnyilvánítás

A témakörben a 2383. sz. OTKA-támogatással elért megalapozó eredmények után a MOL Magyar Olaj- és Gázipari Rt. Hazai Kutatási Üzletága tette lehetővé az ismertetett numerikus modellezés elvégzését. Érdeklődésükért, valamint a lehetséges mérési konfigurációval, az értelmezéssel és a modellek kiválasztásával kapcsolatos értékes tanácsaikért a szerzők köszönetüket fejezik ki dr. FERENCZY Lászlónak és NAGY Zoltánnak.

HIVATKOZÁSOK

- TAKÁCS E. 1995: The normal surface electric field of an E-field excited steel casing. *Acta Geod. Geoph. Hung.* **30**, 331–341
- TAKÁCS E., SZARKA L., VARGA M. 1995: Elektromágneses kutatás a mélyfúrások béléscsővének felhasználásával. *Magyar Geofizika* **36**, különszám, 60–64
- TAKÁCS E. 1999: Béléscső alkalmazásával végzett kísérleti elektromágneses frekvenciaszondázások adatainak feldolgozása és értelmezése. *Kutatási jelentés II*, 135. o.