

PETHŐ GÁBOR, VASS PÉTER,

GEOFIZIKA ALAPJAI

6



A Műszaki Földtudományi Alapszak tananyagainak kifejlesztése a
TÁMOP 4.1.2-08/1/A-2009-0033 pályázat keretében valósult meg.

VI. MESTERSÉGES ÁRAMTERŰ GEOELEKTROMOS MÓDSZEREK

1. GEOELEKTROMOS MÓDSZEREK RÖVID TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉSE


Az általános fizika elektromossághoz kötődő felfedezései hatással voltak a földtani kutatásban használatos elektromos kutatómódszerekre is. **Ohm** nevéhez nem csak a róla elnevezett törvény (1826) fűződik, hanem tőle származik a fajlagos vezetőképesség fogalma is. Forrásmentes tértartományban az egyenáramú terek jellemzésére a felfedezőjéről, **Laplace**-ról (1749-1827) elnevezett differenciálegyenlet használatos. Ismert elektromos töltéseloszlás esetén a **Laplace-Poisson egyenlet** (1812) teszi lehetővé a potenciáeloszlás meghatározását. Az egyenáramú geoelektromos kutatómódszereknél az említett felfedezések, ill. eredmények közvetlen felhasználást kaptak.

Az első mesterséges forrást felhasználó egyenáramú geoelektromos mérést **Conrad Schlumberger** végezte 1912-ben. Az egyenáramú geoelektromos szondázás gyakorlati bevezetésére **Wenner** (1912) és **C. Schlumberger** (1920) publikációt követően került sor. A látszólagos fajlagos ellenállás koncepciójának a bevezetése is a nevükhöz fűződik, melyet a fenti időpontú publikációikban adtak meg. A módszer megalapozásához **Stefanescu** (1930) a horizontálisan rétegzett fél-térre vonatkozó összefüggések levezetésével járult hozzá. Az első cikk a *Geophysics* folyóiratban a geoelektromos módszerekről **Statham**-tól (1936) származik.

Az egyenáramú módszerek elméletével **Keller** és **Frischknecht** (1966), **Koefoed** (1979) továbbá **Patra** és **Mallick** (1980) foglalkozott. Két-, három- és négyréteges homogén rétegzett féltér esetére **Orellana** és **Mooney** (1966) elméleti görbesereget adott meg mind Schlumberger, mind Wenner elrendezésre. **Ghosh** (1971) szűrőelméleten alapuló módszere tette lehetővé az elméleti görbék gyors számítását.

A több dimenziós szerkezetek vizsgálata **Hohmann** (1975) **Pridmore** (1978) továbbá **Dey** és **Morisson** (1979) úttörő jellegű dolgozataival kezdődött el.

2. EGYENÁRAMÚ GEOELEKTROMOS MÉRÉSEK

Ebben a fejezetben a mesterséges áramterű geoelektromos módszereket ismertetjük a következő lecke  keretében ismertetésre kerülő **gerjesztett polarizáció (GP)** kivételével.

Ezeket a méréseket olyan alacsony frekvenciás mérőárammal végzik, melyek hatásukban még egyenáramúnak tekinthetők. A megoldható feladatok köre széles. Pl. ekvipotenciális vonalak kimérésével jó vezetők térbeli helyzetét lehet meghatározni (korábban rétegvizek sózásával az ekvipotenciális vonalak helyzetének időbeli változásából a rétegvíz áramlási irányára és sebességére is következtettek). Gyakran arra a kérdésre kell válaszolni, hogy egy bizonyos mélységszintben megjelenik-e egy éles fajlagos ellenállás változást mutató szerkezet. Ekkor a geoelektromos mérés geometriáját a vizsgált szerkezet várható mélységhelyzetének megfelelően kell tervezni, majd szelvény szerinti, vagy területi mérést kell elvégezni. Ezt a mérést fajtát **horizontális elektromos szelvényezésnek (HESZ)** nevezzük. A legfontosabb felhasználási terület a fajlagos ellenállás mélység szerinti változásának megismerése, mely a mérési geometria változtatásával járó egyenáramú szondázással valósul meg. A felszínen elvégzett **vertikális egyenáramú szondázás (VESZ)** a mérési pont alatti fajlagos ellenállás eloszlást tükrözi horizontális rétegződés esetén. Amikor a geológiai viszonyok megengedik a homogén rétegzett fél-tér közelítést (pl. medence területek vízszintesen egymásra települő rétegei, folyók kavicsteraszának változó rétegsora), akkor a szondázási görbék 1D-s kiértékeléséből megadható a rétegek fajlagos ellenállása és vastagsága. A felszínközeli laterális fajlagos ellenállás változások kimutatására elsősorban multielektrodás mérés javasolható, melyet gyakran kiegészítenek ugyanazon geometriai elrendezés mellett végzett GP mérésekkel is. A bonyolultabb – azaz többdimenziós – szerkezetek esetén is megfelelő algoritmusok és programok állnak a kiértékelők rendelkezésére.

Pontszerű áramelektroda potenciálja

Az egyenáramú méréseknél jól elkülöníthető az adó- és a vevőáramkör (**6.1. ábra**). Az adóköri áramforrás két sarkát tápelektrodák (A, B) segítségével földeljük, így biztosítható a közvettestbe vagy felszíni méréseknél a talajba a közvetlen árambevezetés. A bevezetett áram térbeli eloszlása annak függvényében módosul, hogy milyen fajlagos ellenállású térrészek vannak egymással kontaktusban a mérőárammal átvilágított tértartományban. A jó vezető tértartományban az áramvonalak sűrűsödése, míg a nagy fajlagos ellenállású képződményekben az áramvonalak széttartása figyelhető meg. A homogén esethez képesti változás mértékére a mérőelektrodák (M, N) közötti potenciálkülönbség értékéből lehet következtetni az alkalmazott tápáram és a mérés geometriai elrendezése ismeretében. Leggyakrabban négy elektrodás rendszert használunk fajlagos ellenállás mérésre.

A legegyszerűbb eset a homogén, izotróp – azaz iránytól függetlenül állandó fajlagos ellenállású – tértartomány esete. Ilyenkor teljes térben az A pontbeli, I áram bevezetési elektróda ekvipotenciális felületei gömbök, és az áramvonalak a sugár irányába lépnek ki. Ha az árambevezető elektróda a felszínen van, akkor az áramfolyás a levegő szigetelő volta miatt csak a felszín alatti térben jelentkezik. Az áram bevezetési ponttól r távolságra elhelyezkedő M felszíni pontban (6.1. ábra) a potenciál (U) a differenciális Ohm-törvény felhasználásával és abból a tényből adható meg, hogy valamennyi áramvonal áthalad az A középpontú, r sugarú, közetben lévő (képzelt) félgömb felszínén. Ezen félgömb felületén a sugárirányú áramsűrűség (\vec{j}) értéke:

$$\vec{j} = \frac{I}{2\pi r^2} = \sigma \vec{E} = \sigma(-\text{grad}U) = \sigma\left(-\frac{\partial U}{\partial r}\right)$$

Az egyenletből a potenciál értékére integrálás után

$$U = \frac{\rho l}{2\pi r} + C$$

adódik, ahol figyelembe vettük, hogy az elektromos vezetőképesség (σ) és a fajlagos ellenállás (ρ) egymásnak reciproka. Ha $r \rightarrow \infty$, akkor az U potenciál zérushoz tart, tehát felszíni mérésnél

$$U(r) = \frac{\rho l}{2\pi r}.$$

A fentiekből következik, hogy felszín alatt a homogén izotróp térbe (teljes tér) történő áram bevezetésénél (pl. fúrólukba helyezett pontszerű tápelektroda esete, amikor eltekintünk a fúrás miatt kialakuló inhomogén tértartományoktól) a potenciál az alábbi értékkel adható meg:

$$U(r) = \frac{\rho l}{4\pi r}.$$

Ha homogén rétegzett fél-tér felett mérünk, akkor a tápelektroda egy tőle r távolságban lévő felszíni pontra vonatkozó potenciál összefüggése tükrözi a rétegződés hatását. Jelölje r_1 a felszíni réteg fajlagos ellenállását, ekkor:

$$U(r) = \frac{\rho_1 l}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r} + 2 \int_0^{\infty} K(m) I_0(mr) dm \right\}.$$

A zárójelben lévő második tag adja meg a rétegződés járulékos hatását, ahol $K(m)$ a rétegződést jellemző (valamennyi réteg fajlagos ellenállásától és vastagságától függő), rekurziós úton számítható magfüggvény, $I_0(mr)$ a nullarendű Bessel-függvény. Ez a formula jelenti a kiindulást a homogén rétegzett fél-tér feletti elméleti látszólagos görbe számításához.

Töltött test módszere

Az eljárás lehetővé teszi környezetéhez képest jó vezető felszín alatti képződmény kiterjedésének jellemzését abban az esetben, ha a képződményhez legalább egy ponton az áramforrás egyik pólusa egy tápelektroda révén közvetlenül csatlakoztatható. A módszer tehát feltételezi fúrással, vágással vagy más módon ezen kontaktus kivitelezhetőségét. A másik tápelektroda elméletileg a "végtelenbe" kerül, gyakorlatban elegendő 10-15-ször nagyobb távolságba elvinni a távoli elektródot, mint amilyen a kimutatandó jó vezető test legnagyobb laterális mérete. A módszernek az a lényege, hogy a jó vezető felülete az árambevezetés miatt azonos potenciálúvá válik (innen származik a töltött test módszere elnevezés). A jó vezető képződmény közvetlen környezetében – akkor ha más, áramfolyást torzító hatás nem jelentkezik – az ekvipotenciális felületek követik a fémes test alakját. Ha a jó vezető fémes test méreteihez képest nem húzódik nagy mélységben, akkor a felszínen kimérhető ekvipotenciális vonalak általában követik a kimutatni kívánt képződmény felszíni vetületét. Az ekvipotenciális vonalak az ekvipotenciális felületek és a felszín metszésvonalai.

A töltött test módszerének egyik áramlástan alkalmazása a talaj- vagy rétegvíz áramlási irányának és sebességének közelítő meghatározása. Akkor lehet alkalmazni, ha a vizsgált réteget meglévő fúrás harántolja, és a réteget meg lehet sózni (ma épp a sózás miatt ezt a módszert ritkán alkalmazzák, az eljárást inkább a szennyezett talajvíz áramlási sebességének meghatározására használják fel). Még sózás előtt meg kell határozni a kiindulási állapotot jellemző felszíni ekvipotenciális vonalak egyikét úgy, hogy az egyik tápelektroda az áramlást mutató réteg szintjében van, mely a továbbiakban a mérések idején ott is marad, míg a másik elektróda elegendően távol van leföldelve. A sózás előtti felszíni ekvipotenciális vonalak megközelítőleg kör alakúak, ami a pontszerű tápelektroda fenti, homogén teljes térre

vonatkozó potenciál összefüggéséből következik. Homogén esetben az ekvipotenciális felületek gömbök és ezek metszészonalai a vízszintesnek tekinthető felszínnel körök. Az első mérést követően sózás után többször (6-10 óránként) ki kell mérni az ekvipotenciális vonalakat. Az áramlás következtében az ekvipotenciális vonalak geometriája fokozatosan megváltozik a sós víz mozgása miatt. Ennek megfelelően az ekvipotenciális vonalak a kiindulási kör alakhoz képest megnyúlnak és a megnyúltság iránya jelöli ki az áramlási irány felszíni vetületét. Ezen irányban az ekvipotenciális vonalak időbeli "elmozdulásából" lehet következtetni az áramlási sebesség vízszintes komponensére.



INTERNETES KITEKINTÉS

További információ található a <http://www.kbfi-triasz.hu/> honlap áramlási paraméterek meghatározása részen.

Felszíni fajlagos ellenállásmérés, különböző mérési elrendezések

A mérés adó- és a vevőkörből áll, lásd a **6.1. ábrán**. Az elrendezések közül a legismertebbek a *Schlumberger*, *Wenner* és a különböző *dipól-dipól elrendezések*. A mai egyenáramú műszerek általában GP-t is mérnek. Homogén, izotróp félteret feltételezve a fentiek ismeretében a +I áramot bevezető A elektróda potenciálja az M és az N pontban

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi AM} \quad U_N = \frac{\rho I}{2\pi AN}$$

míg a köztük lévő potenciálkülönbség

$$\Delta U_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi AM} - \frac{\rho I}{2\pi AN}$$

A B pontban az I áram negatív előjelű és ezen áramelektroda hatására a mérő elektródák közötti potenciálkülönbség

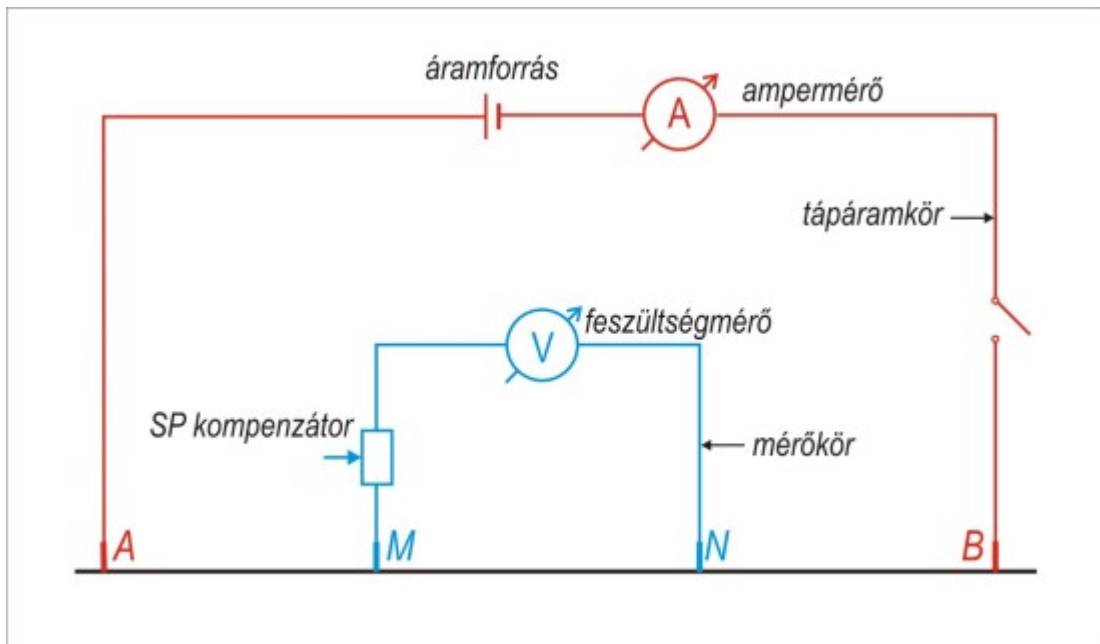
$$\Delta U_{MN} = \frac{-\rho I}{2\pi BM} + \frac{\rho I}{2\pi BN}$$

A két áramelektroda miatt a teljes potenciálkülönbség:

$$\Delta U_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

Ebből az összefüggésből a homogén fél-térre érvényes fajlagos ellenállás meghatározható:

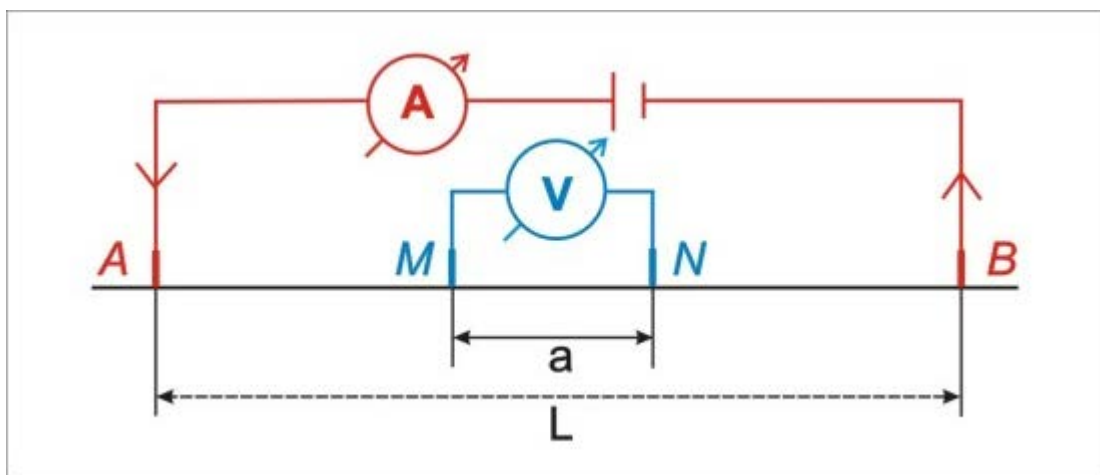
$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \frac{\Delta U_{MN}}{I} = k \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$



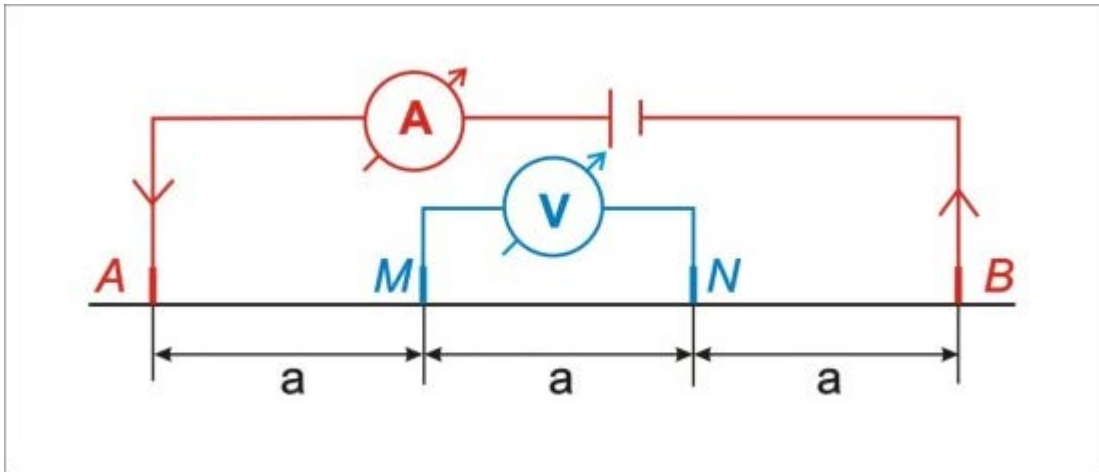
6.1. ábra: Négy elektródás egyenáramú fajlagos ellenállásmérés tápáram- és mérőköre

A levezetett összefüggés alapján két következtetés tehető. Az egyik, hogy a fajlagos ellenállás az adókori áram, a mérőköri feszültségkülönbség továbbá a mérési elrendezés (a k geometriai faktor) ismeretében meghatározható. A másik, hogy homogén fél-tér felett a fajlagos ellenállás állandóságából a $k \Delta U_{MN} / I$ kifejezés állandósága következik, tehát elrendezéstől függetlenül ugyanazt a fajlagos ellenállás értéket kell mérnünk homogén fél-tér felett. Megjegyezzük, hogy a fenti levezetésben a geometriai elrendezésre semmiféle megszorítást nem tettünk.

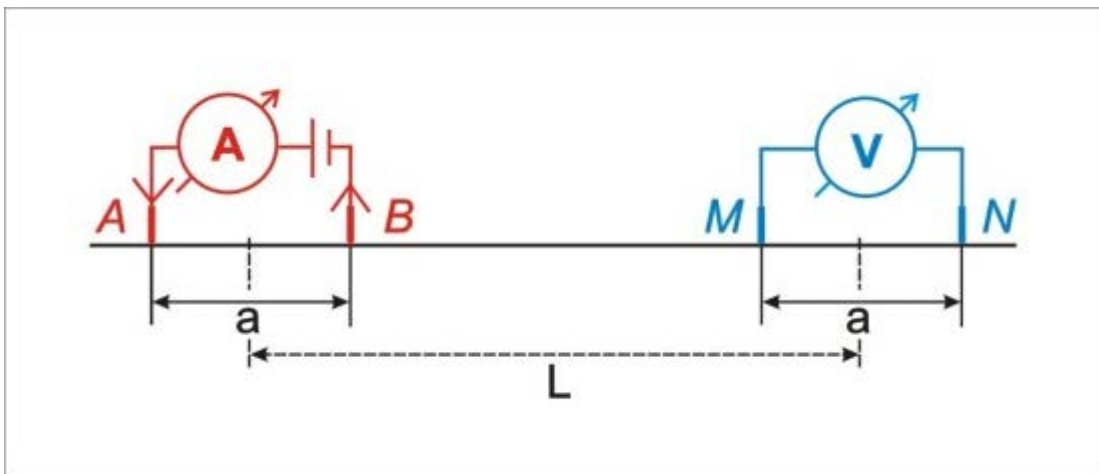
A négy elektródás elrendezések közül a *Schlumberger* (6.2. ábra) és *Wenner* (6.3. ábra) elrendezéseket gyakran alkalmazzák. Mind a kettő a mérési középpontra (állomásra) nézve szimmetrikus elrendeződésű, azonban a *Schlumberger elrendezésnél* az MN távolság (a) lényegesen kisebb mint az AB (L). Emiatt gradiens elrendezésnek is nevezik, ugyanis a mérő elektródák közötti feszültségkülönbség a gradienssel arányos. A *Wenner elektróda elrendezés* a Schlumberger mérési elrendezés egy olyan speciális esete, amikor $AM=MN=NB=a$.



6.2. ábra: Schlumberger elektróda elrendezés

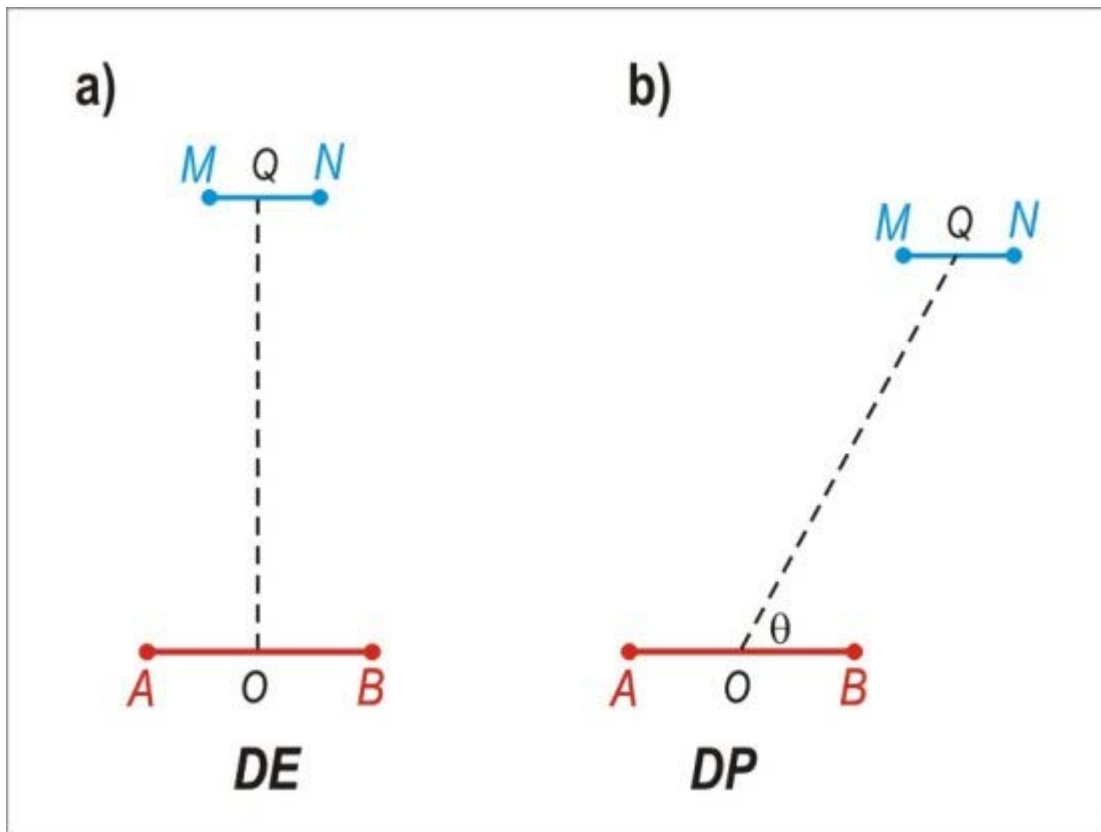


6.3. ábra: Wenner mérési elrendezés

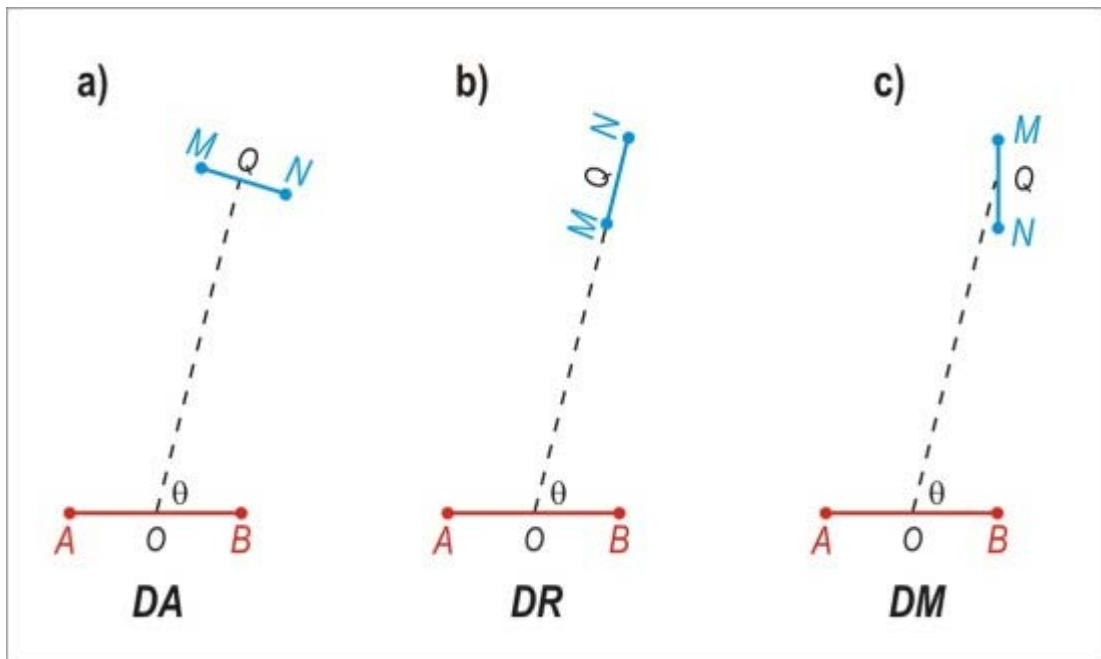


6.4. ábra: Dipól-dipól elrendezésnél táp- és mérő dipólust alkalmaznak

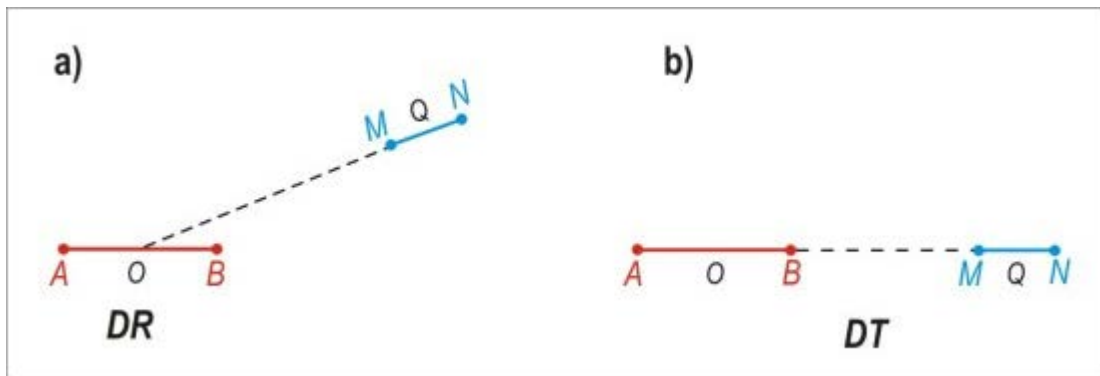
Amennyiben nagyobb mélységbehatolás szükséges, mint ami a *Schlumberger* vagy *Wenner* elrendezésekkel elérhető, vagy a terepi viszonyok nem támogatják az előbb említett terítéseket, dipól elrendezéseket alkalmaznak. Közös jellemzőjük, hogy a mérő dipól a tápdipólon kívül úgy helyezkedik el, hogy a két dipólus középpontja közötti távolság lényegesen nagyobb, mint az adó vagy a vevő dipólok hossza (6.4. ábrán L és a aránya). Az adó és vevő dipólok egymáshoz viszonyított helyzetéből adódóan megkülönböztetünk dipól ekvatoriális (DE), dipól párhuzamos (DP), dipól azimutális (DA), dipól radiális (DR), dipól merőleges (DM) és dipól tangenciális (DT) elrendezéseket (6.5., 6.6., 6.7. ábrák).



6.5. ábra: Dipól ekvatoriális (DE) és dipól párhuzamos (DP) mérési elrendezés

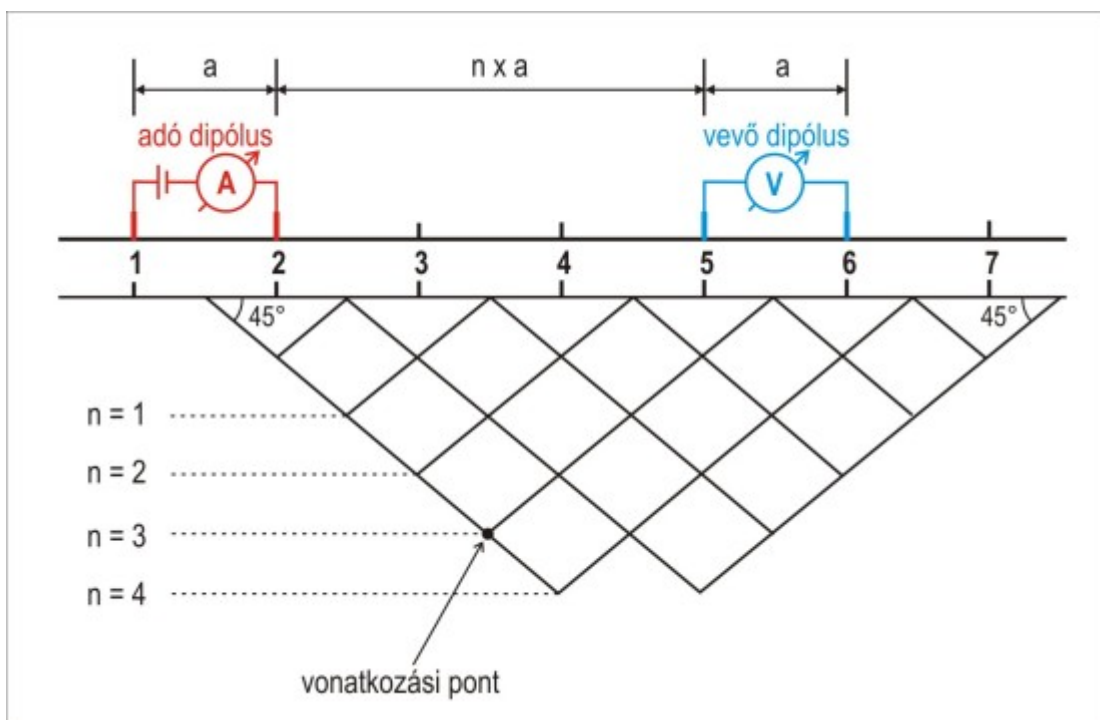


6.6. ábra: Dipól azimutális (DA), dipól radiális (DR), dipól merőleges (DM) elrendezések



6.7. ábra: Dipól radiális (DR), dipól tangenciális (DT) elrendezések

A 6.5. ábrán látható, hogy a dipól ekvatoriális elrendezés a dipól párhuzamos elrendezés azon esete, amikor a dipólusok felezőpontját összekötő egyenes – melyet a szondázás tengelyének nevezünk – merőleges mind a táp, mind a mérő dipólra. A 6.7. ábrán pedig jól látható, hogy a dipól tangenciális elrendezés a dipól radiális elrendezés egy speciális esetének tekinthető. A dipól-dipól mérések érzékenyebbek a dőlt határfelületekre és az oldalirányú hatásokra a Schlumberger és Wenner elrendezésekhez képest. Az elektróda elrendezések vonatkoztatási pontja az a pont, melyre a mérési eredmények vonatkoznak. Homogén fél-tér és szimmetrikus négy elektródás elrendezésnél a terítés közepe (a szimmetria pont), dipól elrendezésnél a dipólusokat összekötő egyenes szakasz felező pontja a referencia pont. Mérnökgeofizikai és egyéb felszín közeli feladatok megoldására gyakran alkalmazzák az Eltran elrendezésből kifejlesztett multielektrodás elrendezést, amelynek lényegét a 6.8. ábra mutatja. Az ábrán a vonatkoztatási pont meghatározása látható arra az esetre, amikor az adó dipólus helyzetét az 1-2, míg a vevő dipólusét az 5-6 felszínen lévő pontokban képzeljük el. A vonatkoztatási pont az adó- és vevő dipólus felezőpontjából kiinduló 45°-os egyenesek metszéspontja.



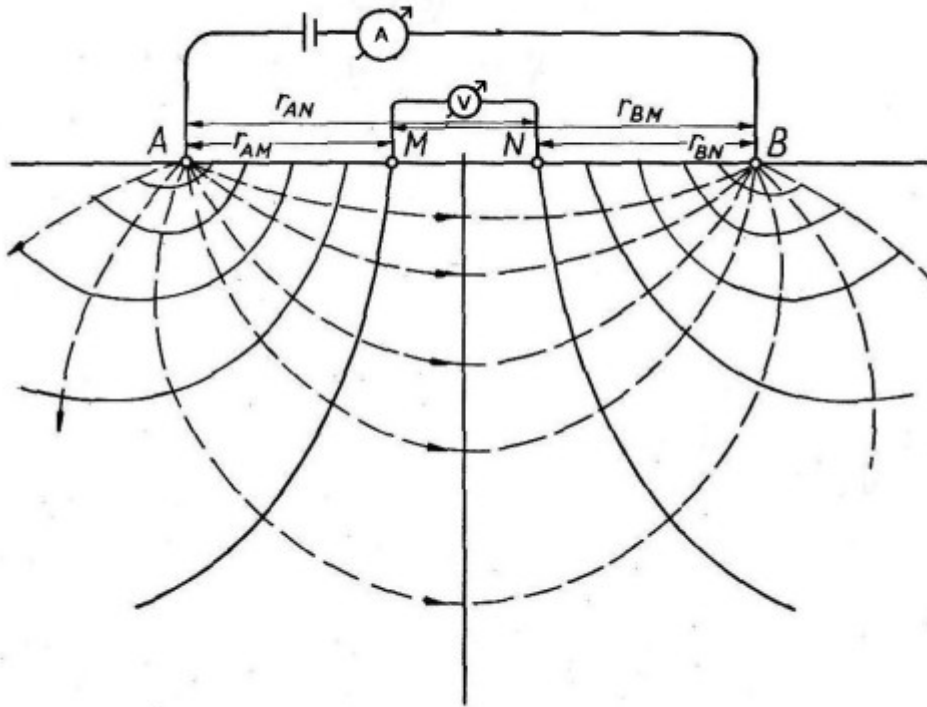
6.8. ábra: Multielektrodás elrendezés és a mért fajlagos ellenállás vonatkoztatási pontjának meghatározása

Vertikális elektromos szondázás (VESZ)

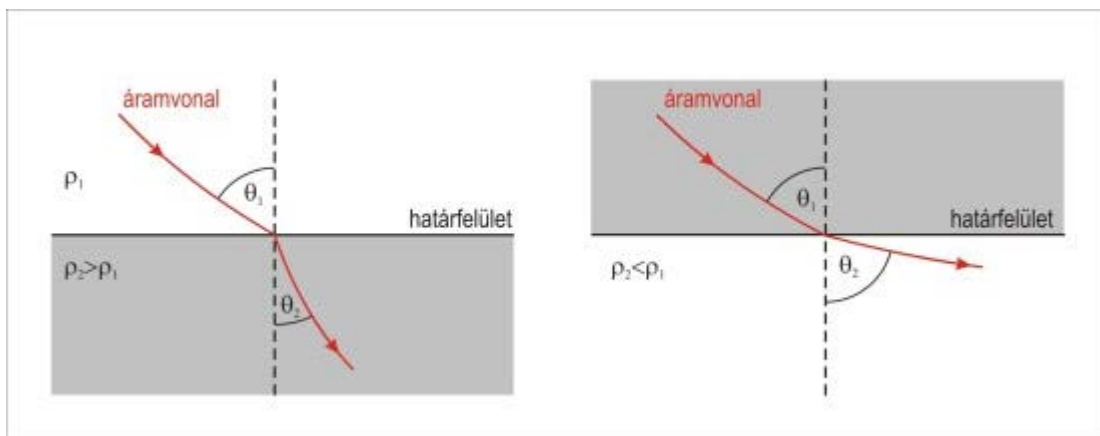
Általában kis és közepes mélységű kutatásokban alkalmazzák, de gyakran több km mélységből is elsősorban a dipól-dipól mérésekkel fajlagos ellenállás információ szereztető (a módszer mellett szól, hogy nem nagy költséggel kivitelezhető). A mérőáram behatolási mélysége rögzített MN mellett a tápelektrodák mérőelektrodákhoz képesti távolságának növelésével fokozható. A vertikális elektromos szondázási görbéket $AB/2$ vagy az adó-vevő dipólus távolság függvényében jelenítik meg, a mérés eredményeként a látszólagos fajlagos ellenállást adják meg. A 6.9. ábrán az áramvonalak (szaggatott vonallal) és a potenciál vonalak (folytonos vonallal) vannak feltüntetve arra az

esetre, amikor tápáram által "átvilágított" tértartomány fajlagos ellenállás alapján homogén. Korábban említettük, hogy a jó elektromos vezetőképességű tértartományban az áramvonalak sűrűsödnek, míg a nagy fajlagos ellenállású képződményekben az áramvonalak széttartása figyelhető meg. A **6.10. ábra** az áramvonalak törését szemlélteti vízszintes határfelületre. Ennek lényege, hogy az áramvonalak beesési merőlegeshez képesti törése a fajlagos ellenállások arányától függ, úgy, hogy a szögek tangenseinek aránya a fajlagos ellenállások arányával fordítottan arányos:

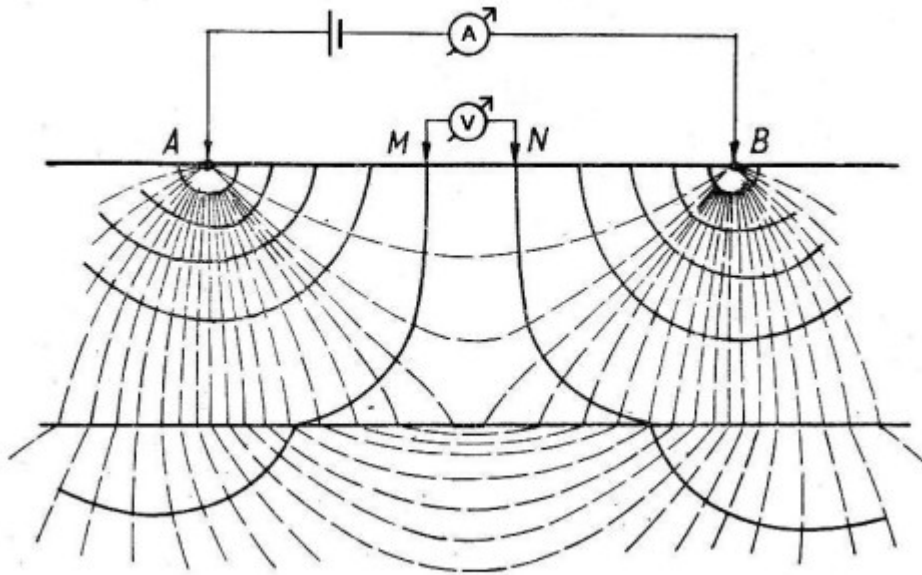
$$\frac{\operatorname{tg} \theta_1}{\operatorname{tg} \theta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$



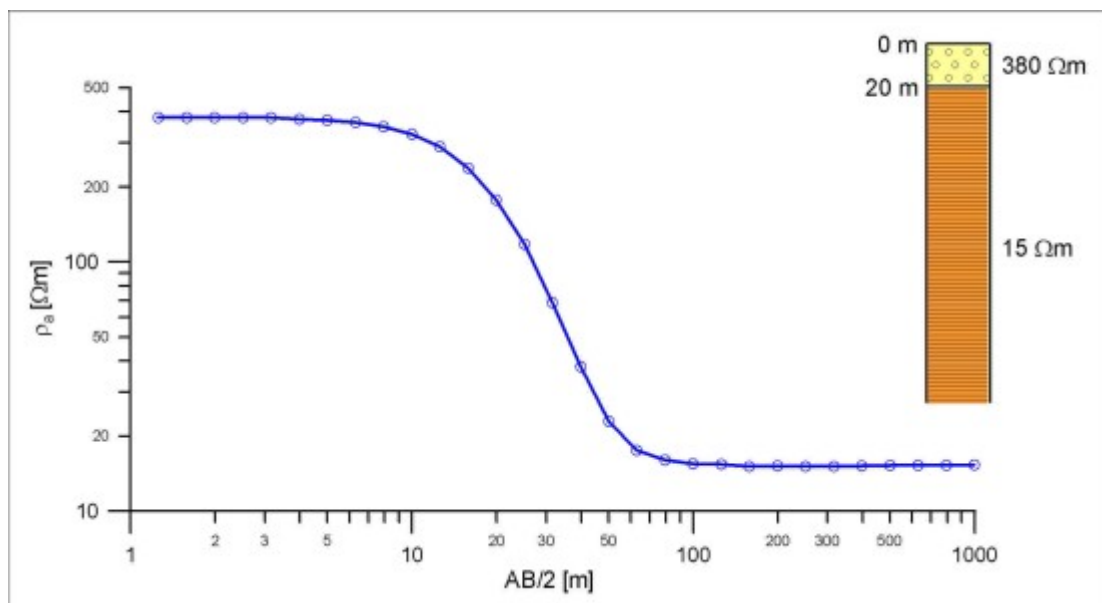
6.9. ábra: Négyelektrodás elrendezés mellett az áramvonalak (szaggatott) és a potenciálvonalak (folytonos) kialakulása homogén esetben [1]



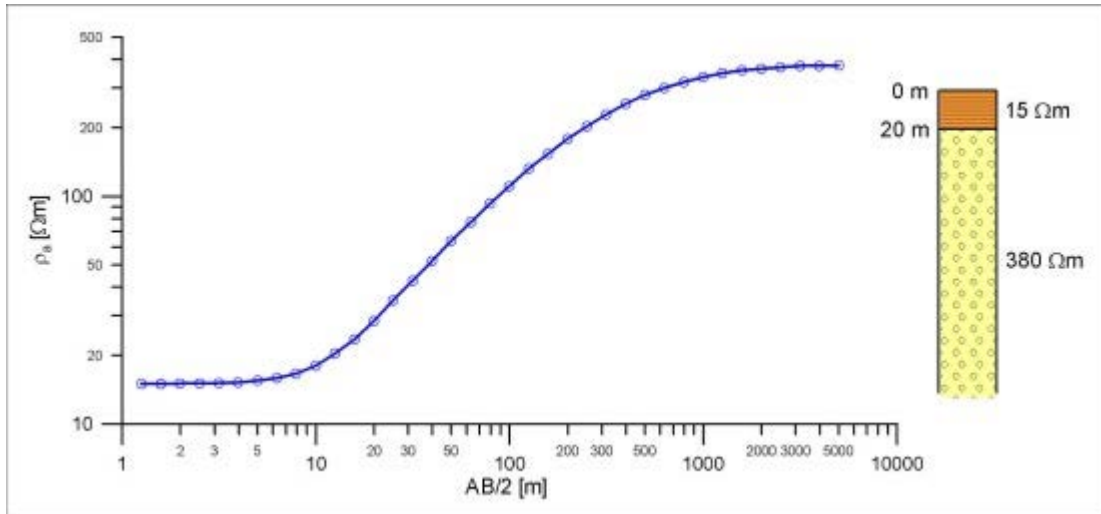
6.10. ábra: Áramvonal törése vízszintes határfelületen, az alsó a nagyobb fajlagos ellenállású réteg (bal oldalon), míg az alsó a kisebb fajlagos ellenállású réteg (jobb oldalon)



6.11. ábra: Négyelektrodás elrendezés mellett az áramvonalak (szaggatott) és a potenciálvonalak (folytonos) kialakulása kétréteges fél-tér esetén. A mélyebben lévő réteg kisebb fajlagos ellenállású mint a felette lévő [ii]



6.12. ábra: Kétréteges Schlumberger szondázási görbe a jobb oldali modellre

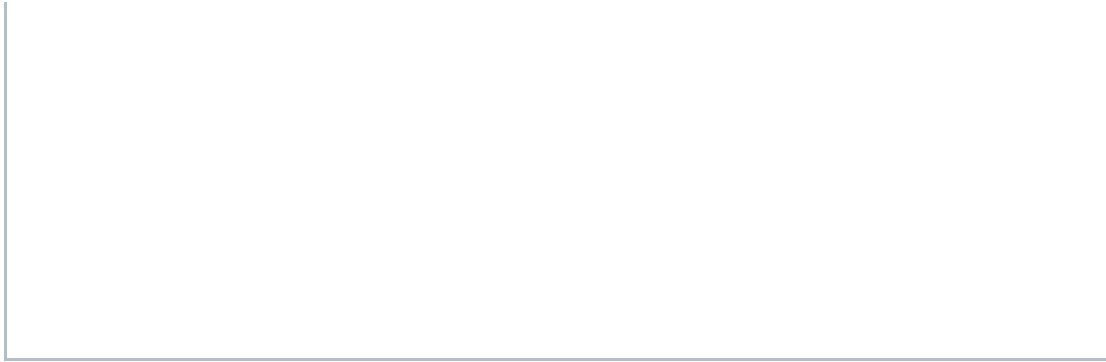


6.13. ábra: Kétréteges Schlumberger szondázási görbe a jobb oldali modellre

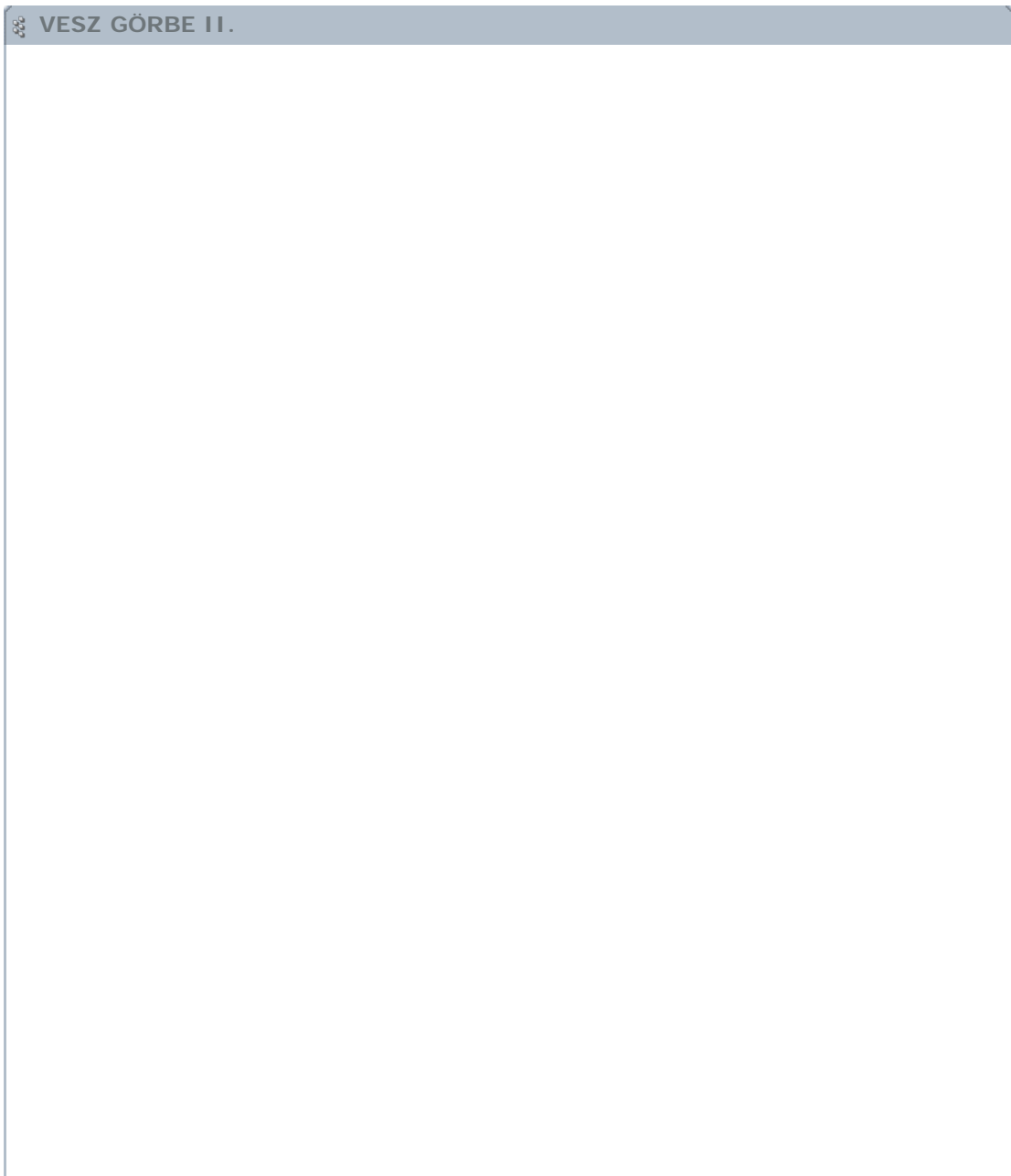
A VESZ mérés során az AB értékeket mértani sorozat szerint választják meg. A szondázási görbén a mért fajlagos ellenállás $AB/2$ szerinti függését log-log léptékben adják meg. A szondázási görbe baloldali -kis $AB/2$ értékekhez tartozó- szakasza tehát a felszíni réteg, míg a nagy $AB/2$ értékekhez tartozó része a mélybeli rétegek fajlagos ellenállását tükrözi. A mért fajlagos ellenállás a mérési elrendezéstől függetlenül csak egyetlen esetben egyezik meg a réteg valódi fajlagos ellenállásával akkor, ha csupán egyetlen homogén izotróp réteg van. Ugyanakkor elegendően vastag felső és "végtelen" kiterjedésűnek tekinthető alsó réteg esetén a szondázási görbe baloldali szakasza aszimptotikusan a felső, míg jobb oldali része aszimptotikusan az alsó réteg fajlagos ellenállásához tart. Ezt tapasztaljuk a 6.12. és 6.13. ábrán lévő modellekre számított szondázási görbéknél is. A mélység szerint fordított fajlagos ellenállás viselkedést mutató két modellre számított látszólagos fajlagos ellenállás szondázási görbék jól tükrözik az 1D-s földtani felépítést.

Az alábbi két interaktív animáció témája hasonló. Azért készült, hogy bemutassuk egy kétréteges földtani modell esetében a VESZ (vertikális elektromos szondázási) görbe és a felszín alatti áramfolyás alakulását a tápelektroda távolság függvényében.



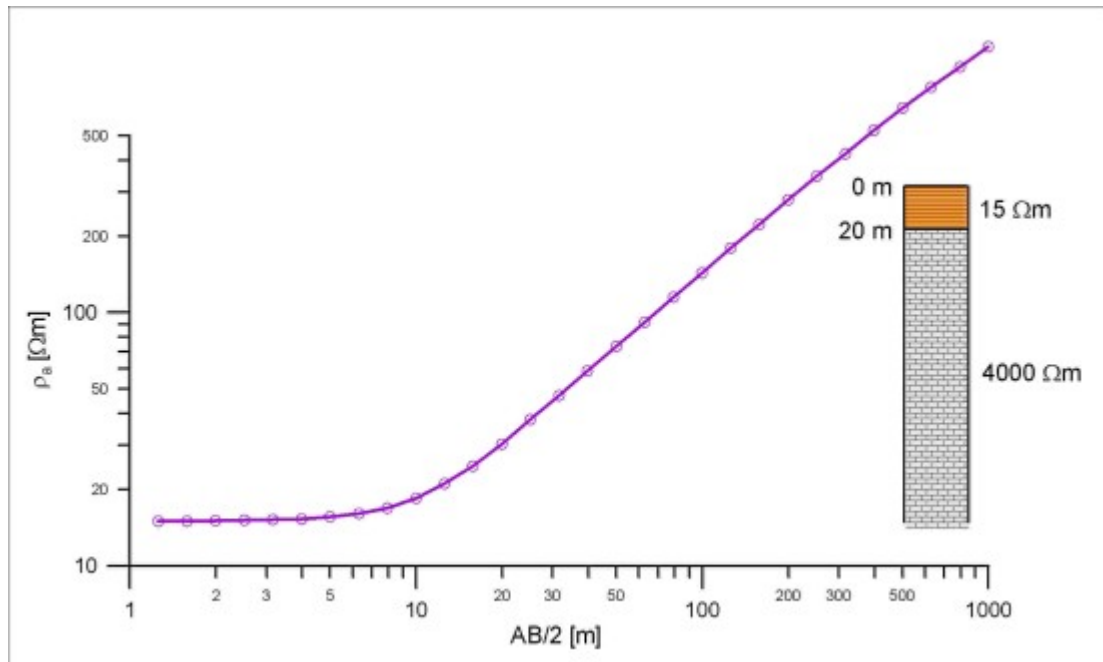


Ez az animáció arra az esetre vonatkozik, amikor a nagyobb fajlagos ellenállású (380 ohmm) felső réteg alatt egy kis fajlagos ellenállású (15 ohmm) réteg helyezkedik el.



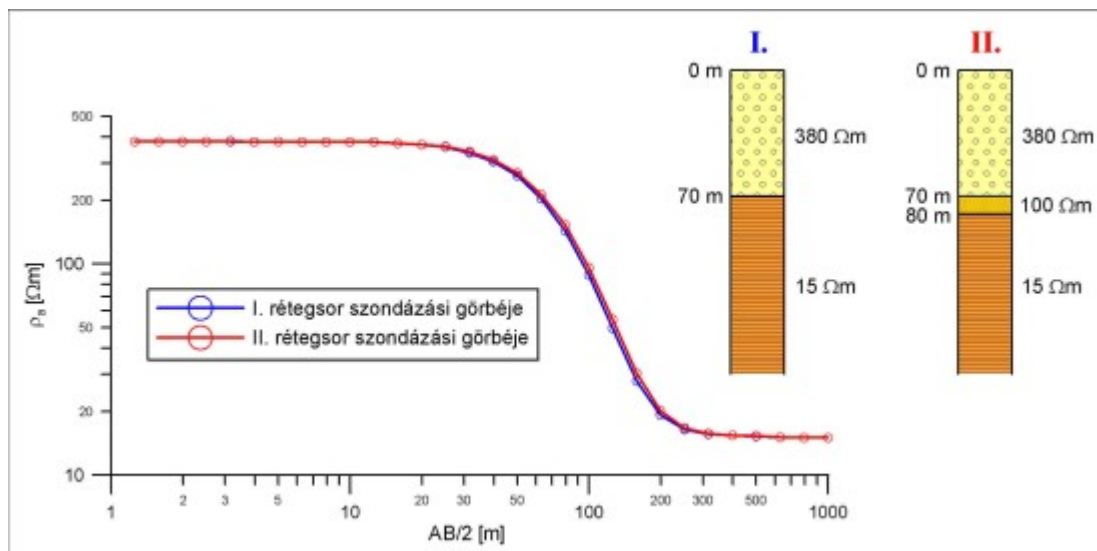
A második animáció ugyancsak a VESZ szondázási görbe kialakulását és az áramvonalak eloszlását mutatja az előzőhöz képest fordított fajlagos ellenállás viszonyra: itt a kisebb fajlagos ellenállású (15ohmm) réteg alatt található a nagyobb fajlagos ellenállású (380 ohmm) réteg. Mindkét esetben a felső réteg vastagsága 50m, ellentétben a **6.12.** és **6.13. ábrán** bemutatott modellekkel, ahol ez 20m volt.

Megjegyezzük, hogy a nagyobb fajlagos ellenállású aljzatok felett mért VESZ szondázási görbék a ∞ nagy fajlagos ellenállású aljzatra számítottéhoz hasonlóan viselkednek. Van hasonlóság a **6.13. ábrán** lévő, vagy a (2) animációban szemléltetett esettel, azonban a nagyobb fajlagos ellenállású aljzatot a log-log léptékű szondázási görbén 45° -os szögben emelkedő egyenes ág tükrözi, mint ahogy az a **6.14. ábrán** is látható. Minél mélyebben van az alaphegység, annál "később" alakul ki ez a jellegzetes emelkedés.



6.14. ábra: Kétréteges Schlumberger szondázási görbe a jobb oldali modellre, gyakorlatilag végtelen fajlagos ellenállású aljzat felett

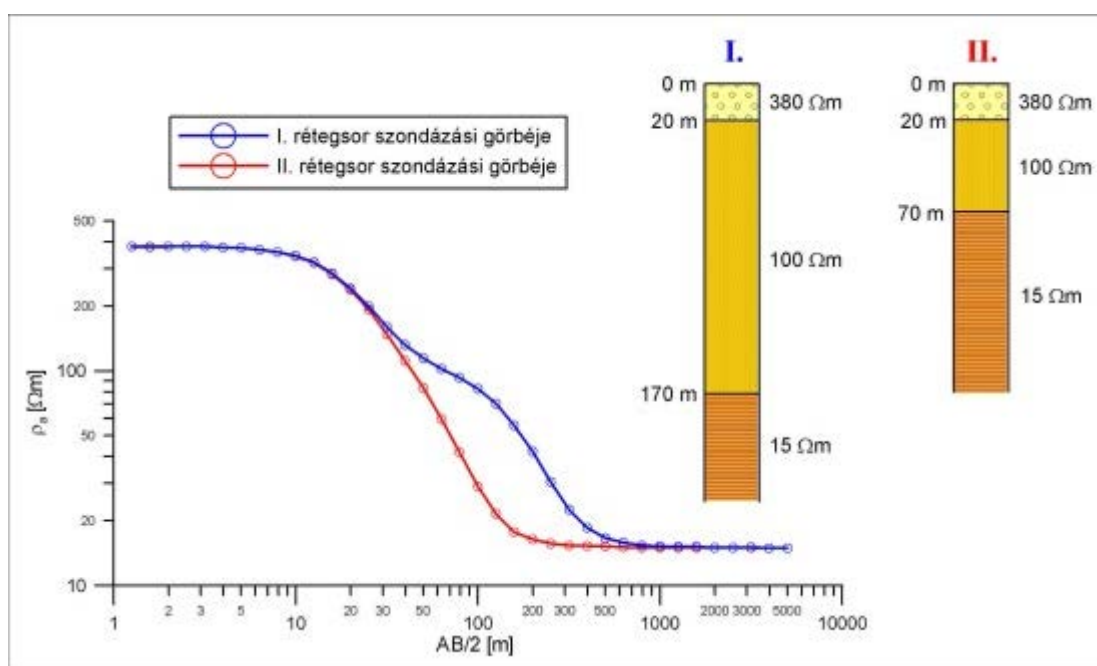
A fentiekből következik, hogy a szondázási görbe közvetlenül a rétegek valódi fajlagos ellenállását nem adja meg, általában a különböző mélységű árambehatalások során átvilágított tértartományra jellemző átlagolt fajlagos ellenállás értéket mérünk. A mért érték tehát nem valódi, hanem látszólagos fajlagos ellenállás. Az angol nyelvű szakirodalomból átvett *apparent* jelző rövidítése indokolja, hogy ezen fizikai mennyiség jelölése ρ_a . A látszólagos fajlagos ellenállás egy olyan homogén féltér fajlagos ellenállása, amely adott áramnál és mérési elrendezés mellett hatását illetően helyettesíti a rétegzett vagy inhomogén fél-teret. Ha ugyanazon az állomáson két, egymásra merőleges terítést alkalmazva gyakorlatilag megegyező szondázási görbéket kapunk, akkor az állomás alatti fél-tér vízszintesen (nagy valószínűséggel) rétegzettnek tekinthető. A szondázási görbe viselkedéséből általában megállapítható, hogy egy-, két-, vagy háromréteges-e a görbe, és az is, ha ennél több réteget tartalmaz. Ugyanakkor a mért szondázási görbék kiértékelése nem mindig egyértelmű. Minél mélyebben, minél kisebb vastagságban és környezetéhez képest minél kisebb fajlagos ellenállás kontraszttal jellemezhető egy réteg, annál nehezebben mutatható ki a réteg jelenléte az elektromos szondázási görbe alapján. Gyakori eset, amikor a kérdéses réteg azért nem jelentkezik a szondázási görbén, mert kis vastagságú, és fajlagos ellenállása a közrefogó rétegek fajlagos ellenállás értékei közé esik. Ezt nevezik rétegelnyomás jelenségének. A **6.15. ábrán** látunk erre példát.



6.15. ábra: Réteg elnyomás jelensége

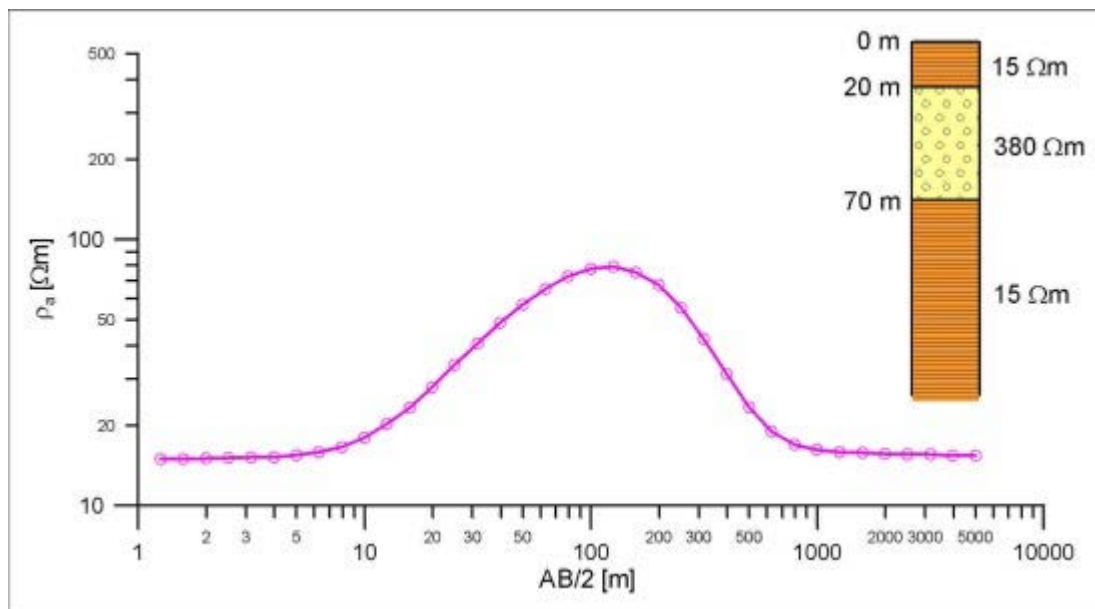
A II. modell 100ohm fajlagos ellenállású rétege kimérhető módon nem jelentkezik a szondázási görbén. A közrefogott réteg vékony, másrészt fajlagos ellenállása a közrefogó rétegekre jellemző fajlagos ellenállás értékek közé esik.

Ha a mélység függvényében a fajlagos ellenállás értékek monoton növekvő vagy monoton csökkenő tendenciát mutatnak (ez utóbbi pl. a **6.16. ábra** modellje), akkor a kimutathatóság szempontjából fontos, hogy a közrefogott réteg nagyobb vastagságú legyen. Ezt látjuk a **6.16. ábrán** is, ahol a piros szondázási görbe ismeretében nem gondolnánk azonnal három réteg jelenlétére.



6.16. ábra: Q típusú típusú rétegződésekre számított Schlumberger szondázási görbék

A **6.16. ábrán** az 50 m vastagságú réteg -ugyanabban a mélységben feltételezve- más fajlagos ellenállás viszonyok mellett könnyebben kimutatható. Ezt mutatja be a **6.17. ábra** K típusú (a három réteg közül a közrefogott a legnagyobb fajlagos ellenállású) rétegződése. A rétegződés megfelel egy agyag-kavics-agyag rétegsornak.



6.17. ábra: K típusú rétegződés felett jelentkező VESZ szondázási görbe

A kétrétegesnél nagyobb rétegszámú esetekben ugyanazon mérési eredményhez a kiértékelés során több megoldás is tartozhat. Ez a többértelműség csak bizonyos modell tartományban jelentkezik. A nehézséget az okozza, hogy a rétegsorok valójában eltérést mutatnak, ugyanakkor a szondázási görbék azonos lefutásúak, így a kiértékelés során ezek a modellek nem, vagy csak nagyon nehezen különíthetők el. Egymástól eltérő 1D-s szerkezetek felett mért, mérési hibahatáron belül megegyező szondázási görbék esetén találkozunk az ekvivalencia jelenségével. A szóba jöhető megoldások közül a tényleges 1-D megoldás meghatározása jelenti az ekvivalencia feloldását, ami leggyakrabban más geofizikai méréssel (pl. tranziens szondázással vagy szeizmikus méréssel), vagy fúrás révén szerzett réteg vastagság és rétegekre jellemző fajlagos ellenállás adatok felhasználásával történhet.

A vízszintesen rétegzett közeg néhány paraméterrel jellemezhető, melyek a rétegzettséggel párhuzamos és arra merőleges áramfolyást feltételezve adhatók meg vízszintesen helyzetű rétegekből felépíthető egységnyi keresztmetszetű H magasságú négyzetalapú hasábra. A hasábon belül a homogén rétegek h_i vastagságúak és r_i fajlagos ellenállásúak. A hasáb alaplajára és így a réteghatárookra is merőleges áramfolyást feltételezve írható, hogy a rétegzett közeg eredő harántirányú ellenállása (T):

$$T = \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n \rho_i h_i = \rho_x H$$

melynek értéke a sorba kötött rétegek harántirányú ellenállásainak (T_i) az eredője, és kifejezhető az átlagos (vagy eredő) harántirányú fajlagos ellenállás (ρ_x) és a rétegsor össz-vastagsága (H) szorzataként is. Amikor az áram a rétegződéssel párhuzamosan folyik, akkor a rétegek egymással párhuzamosan kapcsolt ellenállásokként jelentkeznek, és ilyenkor nem a rétegződésre jellemző eredő ellenállást, hanem az eredő hosszirányú vezetőképességet (S) szokták megadni. Ez az érték az egyes rétegek hosszirányú vezetőképességének ($\frac{h_i}{\rho_i}$) összege, és fordítva arányos az eredő hosszirányú fajlagos ellenállással (r_i)

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} = \frac{H}{\rho_t}$$

A fentiek ismeretében meghatározható a rétegsor anizotrópia tényezője, ami definíció szerint az eredő harántirányú és az eredő hosszirányú fajlagos ellenállás arányának négyzetgyöke:

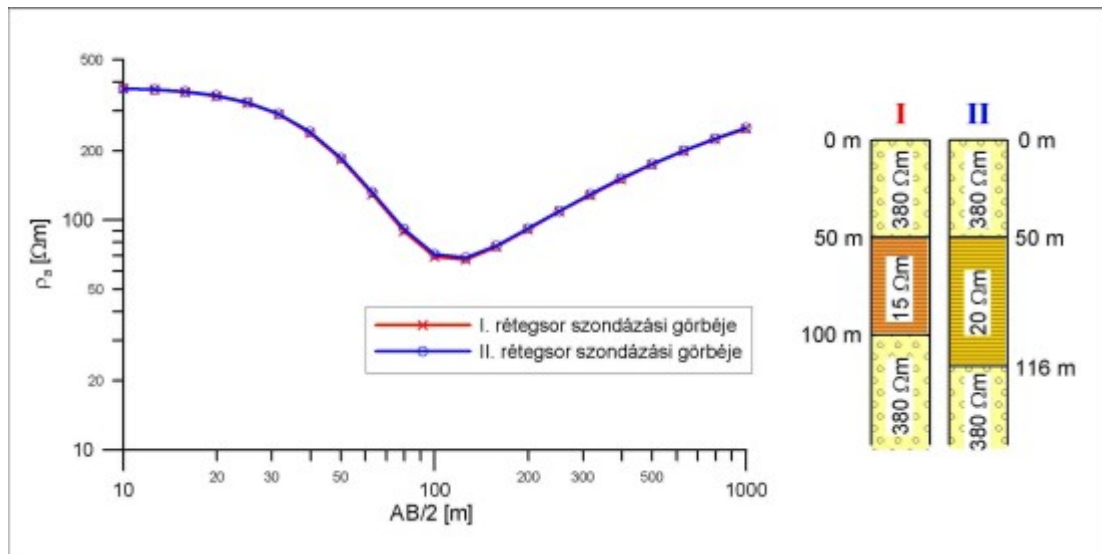
$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_x}{\rho_t}} = \frac{\sqrt{TS}}{H}$$

Ez az anizotrópia a pseudo anizotrópia, ugyanis annak ellenére, hogy a rétegsor homogén, izotróp rétegekből épül fel, a rétegzett fél-tér anizotróp közegnek tekinthető. Ez az érték -mint általában az anizotrópia tényező- mindig

nagyobb mint 1, jelen esetben azt fejezi ki, hogy milyen mértékben változik a rétegsor fajlagos ellenállása, ha különböző irányban történik rajta keresztül az áramvezetés. VESZ görbén elkülönülten jelentkező, pszeudo anizotrópiát létrehozó nagyobb vastagságú rétegek maguk is anizotrópok lehetnek. Ilyenkor egyetlen réteg esetén a rétegződésre merőlegesen és azzal párhuzamosan a réteg eltérő fajlagos ellenállású. Az üledékes réteg keletkezési körülményeinek természetes következménye az anizotrópia. A homokok, agyagok, agyagos homokok általában kis mértékű anizotrópiát ($1 \leq \lambda \leq 1,2$) mutatnak. A homokkövek, rétegzett homokkövek, palás agyagok anizotrópia tényezője közepes (1,2 és 1,6 közötti) értékű, míg az agyagpalák, barna és fekete szenek, palás szenek anizotrópiája jelentős intervallumban változva egészen nagy -1,5 és 3,0 közötti- értéket is felvehet. Vannak olyan rétegek, melyek a szondázási görbén önállóan nem jelentkeznek, ugyanakkor a fúrásban elvégzett elektromos mérés szelvényén még elkülöníthetők egymástól, vastagságuk néhány méter szokott lenni. Ezek a rétegek alakítják ki a makroanizotrópiát. Ezen kívül kialakulhat mikroanizotrópia is, mely a makroanizotrópiák okozó rétegeket felépítő, néhány cm-es vastagságú, egymástól alig eltérő fajlagos ellenállású rétegek miatt jelentkeznek. Az általános anizotrópián a makro- és mikroanizotrópia együttes hatását értik (bővebben **Renner et al.**, 1970 és **Takács** 1987).

Az ekvivalencia jelenségének leírásakor közvetlenül nem veszik figyelembe az anizotrópia hatást, ugyanis az ekvivalenciát eredményező rétegsorok rétegei leggyakrabban 1-hez elég közeli anizotrópia tényezővel jellemezhetők. Homogén izotróp vízszintesen rétegzett fél-tér esetén legalább 3 rétegnek kell lennie ahhoz, hogy az ekvivalencia hatás jelentkezhesen. Háromnál több réteg esetén is előállhat, és kétféle ekvivalencia hatást lehet megkülönböztetni: az S és T típusút. Az első eset elsősorban akkor áll elő, ha viszonylag kis vastagságú jó vezető réteget fog közre a közbülső réteghez képest nagyobb fajlagos ellenállású két réteg. A jó vezető rétegben az áram a rétegződéssel közel párhuzamosan folyik, és a benne folyó áram mennyisége nem változik, ha ezen jó vezető réteg fajlagos ellenállása és vastagsága ugyanolyan mértékben megnő. Ezt szemlélteti a **6.18. ábra**, ahol az I. és II. rétegződések felett a mért szondázási görbék nem különülnek el egymástól. Ezen H típusú (ρ_1, ρ_2, ρ_3) modellekre, amennyiben egy bizonyos

modell tartományban $S_2 = \frac{h_2}{\rho_2}$ állandó, az elméletileg kiszámítható látszólagos fajlagos ellenállás szondázási görbék kimérhető mértékben nem térnek el egymástól, így ezek a modellek S szerinti ekvivalenciára vezetnek.



6.18. ábra: S típusú ekvivalencia kialakulása H típusú rétegződésre

Ez a típusú ekvivalencia A típusú (ρ_1, ρ_2, ρ_3) modellek felett is kialakulhat. Megjegyezzük, hogy a szigorúbb ekvivalencia vizsgálatoknál az első réteg hatását is figyelembe kell venni, mert valójában S_2/S_1 állandósága vezet ekvivalenciára. A másik esetben az ekvivalencia jelensége a közrefogott nagy fajlagos ellenállású képződmény harántirányú ellenállásának (T) állandóságára vezethető vissza: a T típusú ekvivalencia esetén a közrefogott nagy fajlagos ellenállású rétegben, annak határfelületére merőlegesen folyik az áram, így ennek a rétegnek a hatását a $h_2 \rho_2$ szorzat tükrözi. Egy bizonyos modell tartományban mindazon K típusú (ρ_1, ρ_2, ρ_3) rétegsorok, melyek középső rétegére a harántirányú ellenállás állandó, ekvivalenciára vezetnek. Q típusú (ρ_1, ρ_2, ρ_3) rétegződéseknél is jelentkezhet ez a típusú ekvivalencia.

A mérési eredmények kiértékelése inverziós eljárással történik, ami az előremodellezési feladat optimálási kritérium melletti sokszori megoldására vezet. A kiindulási modell paraméterein olyan és annyi változtatást kell végrehajtani,

hogy a módosítások utáni geoelektromos modellre számított elméleti görbe minél jobb egyezést mutasson a terepi szondázási görbével. A terepi szondázási görbével legjobb egyezést mutató számított szondázási görbe bemenő geoelektromos paramétereit fogadjuk el megoldásként. Többek között folyók kavicsterasának rétegsoron belüli változásainak nyomon követésére is alkalmas az az új eljárás, melyet **Gyulai et al.** (2010) fejlesztettek ki. Ez az inverziós eljárás figyelembe veszi mind a rétegek vastagság, mind pedig a rétegeken belüli fajlagos ellenállás változásokat is.

A geoelektromos módszer a rétegsor geoelektromos paramétereinek (rétegek vastagsága és azok fajlagos ellenállása) meghatározása mellett további feladatok megoldására használható. A földtani, szilárd ásványkincs kutatás (bauxit, szén, stb.) szerves része és alkalmazása elengedhetetlen a vízkutatásban is. A vízbázisok vizsgálatában is fontos módszer. Kő- és kavicsbányászat tervezéséhez, készletszámításhoz fontos eljárás. Számos mérnökgeofizikai alkalmazása van: üreg- és pincekutatás, rézsűállékonyság, partfal vizsgálat. Eredményesen használható fedett kommunális hulladék lerakók laterális lehatárolására, hulladék lerakók állapot vizsgálatára (pl. a mesterséges szigetelőréteg ellenőrzésére). Fontos felhasználást kap árvízvédelmi gátak ellenőrzésében is.



INTERNETES KITEKINTÉS

Az alábbi honlapokon jó áttekintést kapunk a széleskörű felhasználhatóságáról:

https://www.elgi.hu/portal/resources/elgi_design/intro/index.php ⓘ

<http://www.haromko.hu/szolgaltatasok.html> ⓘ

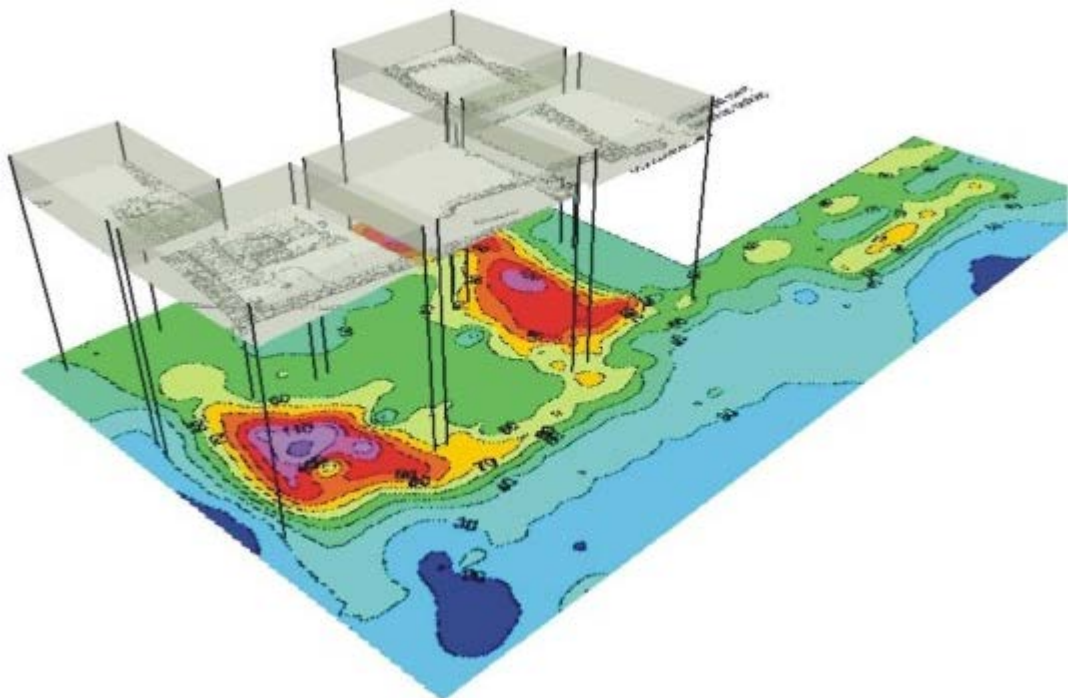
<http://www.kbfi-triasz.hu/> ⓘ

<http://www.agiusa.com/> ⓘ

A legutóbbi honlapon különösen érdekes a multielektrodás mérés (1994) a Sting (Cave 2) barlang felfedezésekor tett észrevétel: ennek fajlagos ellenállása nagyobb mint a korábban ismertté, ui. a korábban ismert barlangban (Cave 1) a sztalagmiték és sztalagtiték összenövése figyelhető meg, ugyanakkor a Sting barlang pedig cseppkő nélküli.

A fenti honlapokon elérhető esettanulmányok között folyón, tó- és tengerfenéken elvégzett geoelektromos mérésekkel és azok értelmezésével is találkozhatunk.

A geoelektromos méréseknek bányabeli alkalmazása is ismeretes, mely bevezetésében a *Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének* úttörő szerepe van (**Csókás et al.** 1986). Végül egy, a sárospataki várhoz kapcsolódó régészeti kutatás geofizikai eredményét mellékeljük. A **6.19. ábra** térképén a nagy fajlagos ellenállású részeket a piros-lila színek jelzik, ezek felelnek meg a kőfalaknak, amit a térkép felett lévő rajz jól szemléltet. Az ásatás kezdeti eredményét a **6.20. ábrán** látható fotó mutatja, ma a látogató a teljes "műhely" megtekintheti.



6.19. ábra: Ágyú- és harangöntő műhely archeogeofizikai kutatása geoelektromos módszerrel [iii]



6.20. ábra: Fotó a 6.19. ábra mérési eredménye alapján feltárt kőfalakról a sárospataki ágyú- és harangöntő műhely archeogeofizikai kutatása során [iv]

3. HIVATKOZÁSOK, IRODALOMJEGYZÉK

Csókás, Dobróka, Gyulai 1986: *Geoelectric determination of quality changes and tectonic disturbances in coal deposits*, Geophysical Prospecting, Vol. 34. pp.1067-1081.

Gyulai, Ormos, Dobróka 2010: *Sorfejtéses inverzió V. Gyors 2D geoelektromos inverziós módszer*, Magyar Geofizika, 51. pp.1-11.

Renner, Salát, Stegena, Szabadváry, Szemerédy 1970: *Geofizikai Kutatási módszerek III.*, Felszíni Geofizika

Takács 1987: *Geofizika, Geoelektromos kutatómódszerek, 1. rész*

Telford, Geldart, Sheriff 1993: *Applied Geophysics*, Second Edition

4. ELLENŐRZŐ KÉRDÉSEK

6. LECKE: MESTERSÉGES ÁRAMTERŰ GEOELEKTROMOS MÓDSZER - F ...



Többször megoldható feladat, **elvégzése kötelező**.
A feladat végső eredményének a mindenkori **legutolsó megoldás** számít.



Válassza ki a helyes választ a következő kérdésekre!

1. Ki fejlesztette ki és mikor az első, mesterséges forrást felhasználó egyenáramú geoelektromos mérést?

Dahnov (1940)

Sunberg (1952)

Schlumberger (1912)

2. Kinek a nevéhez fűződik a látszólagos fajlagos ellenállás koncepciójának a bevezetése?

Wenner

Stefanescu

C. Schlumberger

3. Mi a különbség a HESZ és a VESZ között?

A két rövidítés első betűjéből adódik, az első horizontális, a másik vertikális elektromos mérésre utal.

Az első horizontális elektromos szelvényezést a második vertikális elektromos szondázást rövidít.

Egy betű.

4. Milyen szükséges feltétele van a töltött test módszere kivitelezhetőségének?

A mérőkör nagy bemeneti impedanciájú legyen.

A kimutatni kívánt képződményhez legalább egy ponton az áramforrás egyik pólusa egy tápelektroda révén közvetlenül csatlakoztatható legyen.

Csoport elektródák alkalmazása.

5. Mi a közös a Schlumberger, Wenner és a különböző dipól-dipól elrendezésekben?

Látszólagos fajlagos ellenállást mérő rendszerek, bennük külön tápáramkörrel és feszültségmérő körrel.

Valamennyi elektromágneses mérési elrendezés.

Csak a felszínen használhatók.

Döntse el, hogy az alábbi állítások igazak vagy hamisak!

6. A látszólagos fajlagos ellenállás az adóköri áram, a mérőköri feszültségkülönbség továbbá a mérési elrendezés (a k geometriai faktor) ismeretében meghatározható.

I	H

7. A Schlumberger elrendezésnél a mérőelektródák közötti MN távolság lényegesen nagyobb mint a tápelektrodák közötti AB távolság.

I	H

8. A Wenner elektróda elrendezés a Schlumberger mérési elrendezés egy olyan speciális esete, amikor $AM=MN=NB=a$.

I	H

9. A dipól-dipól elrendezéseknél a mérődipól a tápdipólon kívül úgy helyezkedik el, hogy a két dipólus középpontja közötti távolság lényegesen nagyobb, mint az adó vagy a vevő dipólok hossza.

I	H

10. A dipól radiális elrendezés a dipól párhuzamos elrendezés azon esete, amikor a szondázás tengelye merőleges mind a táp, mind a mérő dipólra.

I	H

Válassza ki a helyes választ a következő kérdésekre!

11. **Hogy nevezzük azt a dipól-dipól elrendezést melynél a szondázás tengelye egybeesik mind a táp, mind a mérő dipól tengelyével?**

dipól merőleges (DM)

dipól azimutális (DA)

dipól tangenciális (DT)

dipól radiális (DR)

dipól párhuzamos (DP)

dipól ekvatoriális (DE)

12. **Hogy nevezzük azt a dipól-dipól elrendezést melynél a szondázás tengelye merőleges mind a táp, mind a mérő dipólra?**

dipól merőleges (DM)

dipól párhuzamos (DP)

dipól tangenciális (DT)

dipól radiális (DR)

dipól ekvatoriális (DE)

dipól azimutális (DA)

13. **Melyik állítás a helyes?**

Határfelületen az áramvonalak törésekor a szögek szinuszaik az aránya a fajlagos ellenállások hányadosával egyezik meg.

Határfelületen az áramvonalak törésekor a szögek aránya a fajlagos ellenállások hányadosával egyezik meg.

Határfelületen az áramvonalak törésekor a szögek tangenseinek hányadosa a fajlagos ellenállások arányával fordítottan arányos.

14. **Hogyan mutatkozik meg a gyakorlatilag végtelen fajlagos ellenállású alaphegység hatása a VESZ szondázási görbén?**

45°-os emelkedéssel

30°-os csökkenéssel

10°-os emelkedéssel

15. **Melyik állítás a helyes?**

A VESZ mérés során a mért fajlagos ellenállás a mérési elrendezéstől függetlenül csak egyetlen esetben egyezik meg a réteg valódi fajlagos ellenállásával akkor, ha egyetlen homogén izotróp réteg van.

A mért fajlagos ellenállás a mérési elrendezéstől függvényében mindig a réteg valódi fajlagos ellenállásával egyezik meg.

16. Válassza ki, hogy a megadott háromréteges esetek közül melyik kettőben alakulhat ki a rétegelnyomás jelensége ugyanolyan rétegvastagságok esetén?

H típusú $(\rho_1 \langle \rho_2 \rangle \rho_3)$

A típusú $\rho_1 \langle \rho_2 \rangle \rho_3$

Q típusú $(\rho_1 \rho_2 \langle \rho_3 \rangle)$
rétegződésnél

17. Válassza ki, hogy a megadott háromréteges esetek közül melyik kettőben alakulhat ki T típusú ekvivalencia?

K típusú $(\rho_1 \langle \rho_2 \rangle \rho_3)$

A típusú $(\rho_1 \langle \rho_2 \rangle \rho_3)$

Q típusú $(\rho_1 \rho_2 \langle \rho_3 \rangle)$
rétegződésnél

18. Válassza ki, hogy a megadott háromréteges esetek közül melyik kettőben alakulhat ki S típusú ekvivalencia?

Q típusú $(\rho_1 \rho_2 \langle \rho_3 \rangle)$ H típusú $(\rho_1 \langle \rho_2 \rangle \rho_3)$

rétegződésnél

A típusú $(\rho_1 \langle \rho_2 \rangle \rho_3)$

19. Mi a különbség az ellenállás és a fajlagos ellenállás mértékegysége között?

Nincs különbség a kettő mértékegysége között.

Az ellenállásé ohm, a fajlagos ellenállásé ohmm.

20. Melyik módszernek jobb a fajlagos ellenállás mélység szerinti felbontása?

VESZ

HESZ

21. Mire következtet abból a tényből, hogy ugyanazon állomáson, topográfia mentes környezetben mérve az egymásra merőleges terítések mellett kapott VESZ görbék gyakorlatilag megegyeznek?

Szeizmikus refrakciót kell alkalmazni a rétegsor meghatározásához.

Ilyen csak a tankönyvben létezik.

A kutatási mélységig a vizsgált tértartomány vízszintesen rétegzett jellegére.



- Vezesse le pontszerű áramelektroda potenciálját homogén fél-tér felszínére!
- Ismertesse a töltött test módszerének a lényegét!
- Milyen feladatok megoldására alkalmazható a töltött test módszere?
- Ismertesse a homogén fél-térre érvényes négy elektrodás fajlagos ellenállás mérésre vonatkozó geometriai tényező (k) levezetésének főbb lépéseit!
- Ismertesse a VESZ mérés lényegét!
- Rajzoljon meg egy horizontálisan rétegzett fél-térre egy kétréteges VESZ szondázási görbét
 - a) amikor az alsó réteg nagyobb fajlagos ellenállású,
 - b) amikor az alsó réteg kisebb fajlagos ellenállású mint a felső!
- Rajzoljon meg egy horizontálisan rétegzett fél-térre egy háromréteges VESZ szondázási görbét
 - a) amikor a közrefogott réteg nagyobb fajlagos ellenállású,
 - b) amikor a közrefogott réteg kisebb fajlagos ellenállású, mint a környező rétegek!
- Rajzoljon meg egy horizontálisan rétegzett fél-térre egy háromréteges VESZ szondázási görbét
 - a) amikor a rétegek fajlagos ellenállása a mélységgel nő
 - b) amikor a rétegek fajlagos ellenállása a mélységgel csökken!
- Mi a rétegelnyomás jelenségének a lényege?
- Ismertesse az S-típusú ekvivalencia jelenséget!
- Ismertesse a T típusú ekvivalencia jelenség lényegét!
- A VESZ és HESZ milyen alkalmazási területeit ismeri?
- Foglalja össze az anizotrópiával kapcsolatos ismereteit!

BIBLIOGRÁFIA:

- [i] Renner et al. (1970) alapján
- [ii] Renner et al. (1970) alapján
- [iii] ME Geofizikai Tanszék
- [iv] ME Geofizikai Tanszék (2006) alapján