

Modern hulladéklerakók aljzatszigetelési hibáinak kimutatása 3D modellezéssel

BARACZA MÁTYÁS KRISZTIÁN

Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros
E-mail: baracza@uni-miskolc.hu

A világ számos fejlett országában, az Európai Unióban, így Magyarországon is komoly környezetvédelmi előírások vonatkoznak arra, hogyan és milyen feltételekkel helyezhetők el veszélyes és kommunális hulladékok lerakókban, tárolókban. Az egyre szigorodó környezetvédelmi előírásoknak megfelelően új hulladéklerakók építésre már csak akkor adnak létesítési engedélyt, ha a beszállítani kívánt hulladékok típusához a kritériumoknak megfelelően kialakított aljzatszigetelési rendszert építenek ki. E kombinált aljzatszigetelési rendszerek megakadályozzák a hulladékokból az altalaj felé áramló csurgalékvizek kiszivárgását a környezetbe. Az aljzatszigetelési rendszer kiépítése során és a hulladékok elhelyezése közben hibák keletkezhetnek a szigetelésben. A biztonságos üzemeltetés egyik feltétele annak az ellenőrzése, hogy építés közben nem sérült-e meg az aljzatszigetelés. Ennek egyik módszere lehet a geoelektromos geofizikai vizsgálat, melynek nagy előnye a fúrásos és egyéb in-situ vizsgálati módszerekkel szemben, hogy a már lerakott hulladékok és a kiépített aljzatszigetelési rendszer megbontása nem következik be. A 3D FD (3Dimenziós véges differencia) előremodellező program felhasználásával vizsgáltam az előforduló aljzatszigetelési hibák kimutathatóságát. A dolgozat bemutatja a hulladéklerakó építésének (üzemeltetésének) néhány olyan problémáját, amely az olyannyira fontos aljzatszigetelés sérülését eredményezheti. Továbbá bemutatja annak fizikai alapját, amely lehetővé teszi a sérülések geoelektromos módszerrel történő kimutatását. Ehhez geofizikai modellszámítások eredményét mutatja be egyszerű modellen.

Baracza, M. K.: 3D model studies for detecting the barrier system punctures of modern waste site

Containment of communal and hazardous waste materials in Hungary and worldwide in modern landfills is frequently achieved by lining the structure with a low permeability geomembrane commonly made of plastics like high density polyethylene. Strict construction quality control is applied during the construction of the geomembrane to ensure that the number of penetrating holes and other imperfections in it are reduced to an acceptable extent. Conventional non destructive testing methods are used to detect punctures, under the construction, however in operating waste sites these methods are not applicable to the entire geomembrane surface. Some geoelectrical method, closely related to the direct current electrical resistivity one, can be used to test the lined containment. The geoelectrical techniques exploit the insulating properties of modern geosynthetical membranes and are able to locate the holes of the geomembrane under the protective soil or waste covering it. That method does not damage the liner. That enables the method to locate leaks in active landfills after the waste has been deposited on the floor area. The available 3D FD forward modelling program permits investigation of deposits of optional horizontal range in a three-dimensional, inhomogeneous geometry and with an arbitrary resistivity distribution.

Beérkezett: 2012. május 20.; *elfogadva:* 2012. június 19.

Bevezetés

A hulladéklerakóknál előírás, hogy a lerakó alatt kialakított természetes anyagok keverékéből beépített jó vízzáró képességű szigetelő rétegek mellett, bizonyos esetekben szintetikus anyagból készült szigetelő réteget vagy rétegeket is ki kell alakítani a hulladéktestből kioldódó anyagok visszatartására. A hulladéklerakók kialakításakor kiépített és megfelelően tömörített természetes anyagok keverékéből álló szigetelő réteg anyaga általában különböző típusú agyagok

és geopolimerek keveréke. A különböző arányban kevert és beépített agyagok fizikai és talajmechanikai szempontból támasztott követelményeit több kormányrendelet szabályozza.

Az aljzatszigetelés legfontosabb eleme a geomembrán, más néven fólia szigetelőréteg, szintén a csurgalékvíz elszivárgását hivatott megakadályozni. A számos geomembrán típus közül a HDPE (nagy sűrűségű polietilén) és az EPDM (gumifólia) szigetelőket alkalmazzák leggyakrabban. A kivitelezési költségek általában HDPE fóliánál kedvezőbbek,

ezért ennek alkalmazása elterjedtebb. Megkívánt minimális vastagsága hulladéklerakóknál 2 mm. Élettartama megfelelő kivitelezés és üzemeltetés szerint eléri a 100 évet. Gyártói mérések szerint, optimális körülmények között a fajlagos ellenállása meghaladja a 10^{11} Ωm -t. E nagy elektromos ellenállású fólián átfolyó áram nagyon kicsi, de nem nulla a nagy felület következtében. Ez magyarázhatja azt a jelenséget, hogy teljesen ép szigetelőfólián keresztül is folyik áram, amely néhány század milliamper is lehet.

A HDPE fóliát általában 4–5 m széles tekercsekből építik fel a hulladéklerakók előkészített felületű és minőségű aljzatára. Illesztésük ragasztással vagy hőpréseléssel készül. A kiépítés során a fóliahegesztés jóságának vizsgálatára több módszert is használnak, elterjedt módszer a fóliahegesztés során kialakított sűrített levegővel tesztelhető csatorna, légnyomás megtartó képességének vizsgálata. Emellett vákuumtechnikán alapuló tesztek is léteznek a „varratok” minősítésére. Ezeket a vizsgálatokat általában az illesztési felületek mentén végzik, nem a homogén fóliaszakaszok vizsgálatára (Szabó I. 2001). Ezek az eljárások nem alkalmasak a hegesztésen kívüli fóliasérülések kimutatására, pedig a szigetelőfólia kiépítése közben számos fizikai sérülés alakulhat ki. A leggyakoribb okok: a fólia-előállítás végző berendezés kapaszkodó karmai által okozott sérülések, a fóliahegesztés kialakításakor létrejött olvadási hibák, gyenge minőségű munkavégzés, munkagépek járőfelületei által okozott sérülések stb.

A lefektetett szigetelőfóliák felső oldalán számos olyan üzemeltetést segítő elem kap helyet, amely nem inert hulladékok esetén a felgyülemelő csurgalékvíz mennyiségének csökkentésére és a biológiai bomlási folyamatok során keletkező gázok elvezetésére, felhasználására szolgálnak. Ezek beépítése ugyancsak veszélyt jelenthet a fóliaszakadások kialakulására.

A fent leírt vonalas gyűjtőlevesítményeknek, gázkutaknak, gyűjtőzompoknak többszörösen kell ki- és behaladniuk a hulladéktestbe, megtörve a szigetelőfólia folytonosságát. A lefektetett szigetelőfólia és a felszínen futó vonalas kialakítású drének és csövek védelmére általában geotextilréteget terítenek le, majd annak felületére általában jó vízvezető képességű, néhány tíz centiméter vastagságú mosott kavics vagy kavicsos homok szivárgórétet építenek ki. A szivárgórét feladata a későbbi üzemeltetés során a csurgalékvizek és bomlástermékek drénekhez történő vezetése és az egyenletes terhelés biztosítása a szigetelő felé.

A csőcsatlakozások és aknák szigetelőfóliával történő összedolgozása különös figyelmet igénylő munka, mert ezeken a helyeken sokszor alakulhatnak ki fóliahegesztési hibák (Szabó A. 2008).

A hulladéklerakókat nemcsak aljzatszigetelés kialakítására szokták szigetelőfóliákkal borítani, hanem azok lezárásakor, fedőréteg kialakítására is használják, a csapadékok beszivárgásának minimalizálására. A fedőfólia-réteg kialakításakor is fontos követelmény, hogy a fólia teljes mértékben vízzáró legyen. Ez azért fontos, mert a csapadék hulladéktestbe áramlása plusz terhelést jelent az aljzatszigetelő rendszerre. Meg kell említeni, hogy ezek a beszivárgó vizek ki-

sebb kockázatot jelentenek a hulladéklerakó üzemeltetése szempontjából, mert a hulladéktestben zajló bomlási folyamatokhoz szükség lehet külső vízmennyiségre.

Ahhoz, hogy geoelektromos módszerekkel kimutatható legyen egy aljzatszigetelési rendszer szivárgásmentessége, elektromos szempontból többféle módszer alkalmazható.

Mindegyik lényege, hogy egy áramforrásból elektródán keresztül áramot kell juttatni az elszigetelt lerakóterbe, továbbá az áramkör zárásához szükség van egy hulladéklerakón kívül elhelyezett másik elektródára (mint nyelőre). Az áramkör a „szigetelő”-rétegen (fólián) keresztül záródik. A szigetelőfólia elektromosan (szakadás hiányában) teljesen vagy csaknem teljesen elszigeteli egymástól a hulladék felőli és az altalaj felőli oldalt.

Amennyiben az aljzatszigetelés sérült, a szakadáson keresztül jelentős áram „szökik” meg a hulladékteréből. Ennek hatására a potenciáeloszlás jelentősen megváltozik a sérülésmentes állapothoz képest, ami alapja a sérülések kimutatásának.

Ha az átvezető sérülés száraz és nincs kitöltve nedves közzel, akkor a szakadás elektromos szempontból kimutathatatlant. Szakadás esetén a hulladékokkal feltöltött lerakó aljzatszigetelési sérülésen keresztül elektromosan jól vezető zóna köti össze a lerakó belső terét a külső környezettel.

Mérési eljárások

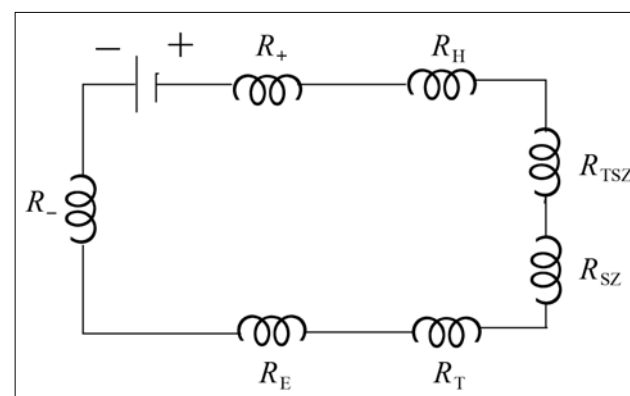
A szakadásmérésnél kialakuló áramkör következő fő részeit az 1. ábra mutatja be, az Ohm-törvényt felhasználva:

R_+ ; R_- = átmeneti ellenállás (az árambevezető és -nyelő elektróda felületén),

R_H = hulladék ellenállása (hulladéktest átlagos fajlagos ellenállásértéke),

R_{TSZ} = szivárgó réteg ellenállása (kavics vagy kavicsos homok szivárgó réteg),

R_{SZ} = szigetelőfólia ellenállása (HDPE vagy EPDM aljzatszigetelő fólia),



1. ábra Szakadáskereső geoelektromos mérés áramköri elemei

Figure 1 Electrical analogue of resistance circuit for geoelectrical leak location method

R_T = altalaj ellenállása (befogadó geológiai közeg),
 R_E = elektródák ellenállása (az árambevezető és -nyelő elektróda anyagának az ellenállása).

A kialakuló áramerősség az áramkörben:

$$I = \frac{U}{R_+ + R_H + R_{TSZ} + R_{SZ} + R_T + R_E + R_-}$$

Azért, hogy az átmeneti ellenállások befolyását elkerüljük, a geoelektromos gyakorlatban általánosan alkalmazott külön mérőelektródával (elektródákkal) mérjük a potenciált vagy potenciálkülönbséget.

Amennyiben nincs szakadás a fólia felszínén, az áramsűrűség eloszlása egyenletes az egész lerakótér felszínén. A kialakuló áramerősséget és potenciáleloszlást befolyásolja a fóliára fektetett rétegek mérete, alakja, vastagsága, inhomogenitása és az árambevezető elektróda elhelyezkedése. Az áramszőkés jelenségét a 2. ábra mutatja.

A féltér felszíni potenciáleloszlását mindig befolyásolja a behordott fedőrétegek inhomogenitása, a lerakó térben futó csövek, az altalaj változékonysága, a hulladéklerakó geometriai viszonyai, sarkak, élek, padkák helyzete. A későbbiekben vizsgálni szeretném e paraméterek hatásainak elkülönítését a szakadástól. A méréshez használt áramforrások lehetnek egyen- vagy váltakozó feszültségű berendezések. A váltakozó feszültséget alkalmazó mérőrendszerek előnye az elektródákon kijuttatható magasabb feszültség, de hátránya a feltöltődési effektussal kapcsolatos káros zavarpotenciálok ráakódása a mért jelre. Az alkalmazott frekvencia csökkentésével jelentősen mérsékelhető a feltöltődési és kisülési effektus.

A terepen gyakorlatban használt egyenáramú források általában akkumulátorok. Néhány sorba kötött akkumulátorral azonban nem biztos, hogy elegendő nagyságú áramot tudunk a hulladéktestbe bevezetni.

Mérések alkalmával fontos a forráselektrodák elhelyezésének megválasztása, illetve kiképezése, mert különösen

inhomogén hulladéktest esetén a hulladékon átfolyó áram erőssége gyorsan csökken az elektródától távolodva, és az áram mindig a hozzá legközelebbi szakadási helyen át igyekszik a legrövidebb úton keresztül zárni az áramkört.

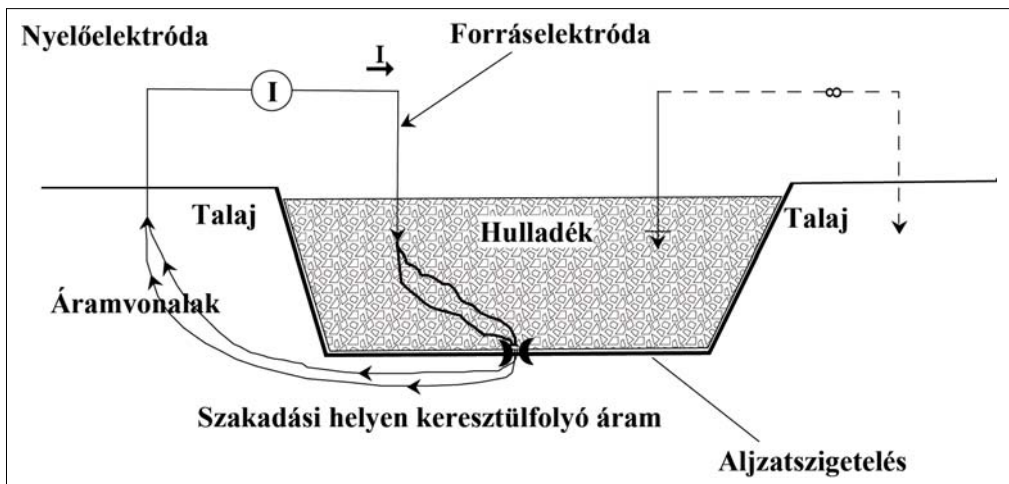
A lerakótéren kívül elhelyezkedő nyelő áramelektrodát a kételektrodás rendszer kívánalmainak megfelelően, a kvázi végtelen távoli pontban kell elhelyezni (Frangos W. 1997).

Fontos szempont, hogy a hulladéklerakó aljzatszigetelésének felszínre kibúvó vállrészét, az övszivárgó környezetében teljesen le kell takarítani annak érdekében, hogy az áramszőkési effektus ne a felszíni hanyag letakarítás miatt megmaradt „áramhídon” keresztül valósuljon meg. Mérés alkalmával el kell távolítani minden olyan, áramvezetés szempontjából kritikus tereptárgyat, amely kivezetheti az áramot a körbeszigetelt lerakótérből. Szintén nagy odafigyelést jelentő kritérium, hogy a meglehetősen inhomogén szerkezetű és fajlagos ellenállású szilárd hulladékok felszínén megfelelő erősségű áramot lehessen a hulladéktestbe juttatni.

Az eddigi gyakorlatban a hulladéklerakók üzemeltetéséhez, biztonsági vizsgálataikhoz kapcsolódóan kétféle geoelektromos gyakorlat alakult ki:

- előre beépített szenzorrendszerre épülő méréstechnika,
- mobil, állandó érzékelők nélküli, hulladékfelszínről végezhető mérések.

A gyakorlatban általában az előre beépített szenzorrendszert alkalmazzák. Az előre beépített szenzorrendszer esetében a szigetelő fólia alá és felé közvetlenül hálószerűen elhelyezett elektródákat építenek be, és folyamatos monitoringméréseket végeznek (Kovács A., KBFI-Triász Kft. 2007, BHF Environmental s.r.o. Slovakia 2012). Ezek alapján állapítják meg a szivárgás helyét (szakadás helyét). A mérések legfőbb előnye, hogy időjárástól „függetlenül” a szenzorrendszerrel folyamatosan végezhető geoelektromos mérések. Hátránya, hogy kiépítése rendkívül költséges, valamint a szenzorrendszer meghibásodása esetén az utólagos



2. ábra | Áramszőkés jelensége a hulladéklerakó-testből
 Figure 2 | Configuration of electric leak location technique for landfills

javítás bonyolult, költséges, szinte javíthatatlan (Hix K. 1998).

Az előre beépített szenzorrendszer mérőelektrodái többféle elektrodaelrendezésben is működnek. Létezik olyan mérési módszer, amelynél a talaj nedvességtartalmát mérő szenzorokat építenek a szigetelő alá (Metolabor AG. 2004).

A mérések megvalósítása automatizálható. A mérési adatok összegyűjtése egy programvezérelt automata adatgyűjtő segítségével, tetszőleges elektrodaelrendezésben hajthatók végre.

A méréseket minden esetben megelőzi a bázisállapot felvétele. Ehhez viszonyított értékek alapján állapítható meg biztonságosan, hogy a hulladéklerakó aljzatszigetelésén keresztül történik-e szivárgás, és ha igen, akkor hol. A mérések kiértékelésénél figyelemmel kell lenni többek közt az altalaj vezetőképességbeli egyenetlenségeinek feltérképezésére valamint, a talajvízviszonyok változásaira stb. Ezekhez bázismérésre van szükség. Az altalaj bázis fajlagos ellenállástérképének elkészítését általában Wenner-elrendezéssel célzerű elvégezni.

Geoelektromos mérőrendszerrel nem rendelkező hulladéklerakók esetében a lerakó körül telepített figyelőkutakban mérik a talajvízben oldott ionok és vegyületek változásait. Amennyiben valamely figyelőkútban változás tapasztalható a kútvíz minőségében, valószínűsíthető, hogy az aljzatszigetelő fóliában valahol szakadás alakult ki, és a szakadási helyen vagy helyeken keresztül csurgalékvíz szivárog az altalajba, elszennyezve ezzel a talajvizet.

Magyarországon is léteznek olyan hulladéklerakók, amelyek kialakításánál már előírás volt a szigetelőfólia beépítése, de különböző okok miatt geoelektromos szenzorrendszer beépítésére nem került sor, vagy az üzemeltetés során végérvényesen megrongálódtak az érzékelők. Ilyen esetekben jelenthet megoldást a mobil szakadáskeresési eljárások alkalmazása.

Mobil szakadáskeresési eljárás

A hulladékfelszínről történő mobil szakadáskeresési eljárást a nehéz kivitelezési és kiértékelési sajátosságok miatt eddig

csak szűk körben, próbaszerűen alkalmazták. A mobil szakadáskeresési geoelektromos mérések általában a hulladéktest felszínén végezhetőek el. Egy ilyen mobil szakadáskeresési eljárás kifejlesztésére irányuló kísérlet eredményét mutatjuk be ebben a dolgozatban.

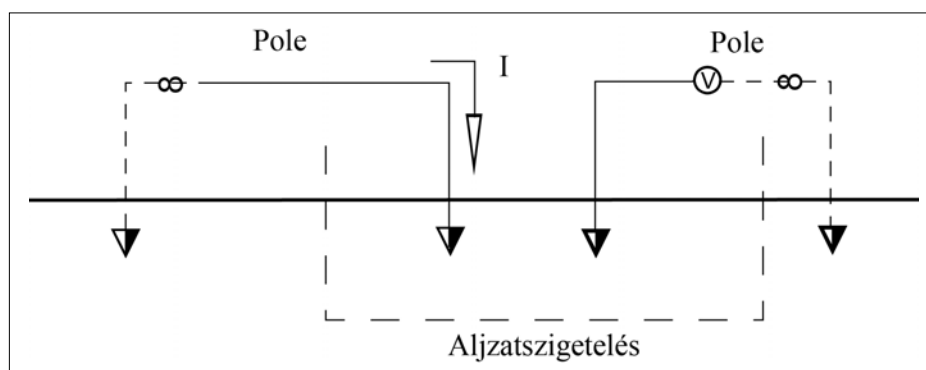
A javasolt mérési módszer mobil szakadáskeresési eljárás esetén, a Pole–Pole és Pole–Dipole mérések. Mindkét mérés esetében az áramszökési effektus és helyének detektálása a cél, a felszínen elhelyezett mérőelektrodák segítségével.

Pole–Pole elektrodaelrendezés esetén az áram bevezetése az elszigetelt hulladéktestbe egy áramelektroda segítségével történik. Az áramelektroda-pár másik tagja (nyelő), a lerakóterén kívül a kvázi végtelenben helyezkedik el, amelyen keresztül a bevezetett áram, energiaforrásba való visszavezetése történik. Pole–Pole elrendezésnél a mérő elektrodapár egyik tagja az elszigetelt hulladéktest felszínén mozog, párja a kvázi végtelenben található a hulladéklerakon kívül. A Pole–Pole elektrodaelrendezés sematikus vázlatát a 3. ábra mutatja.

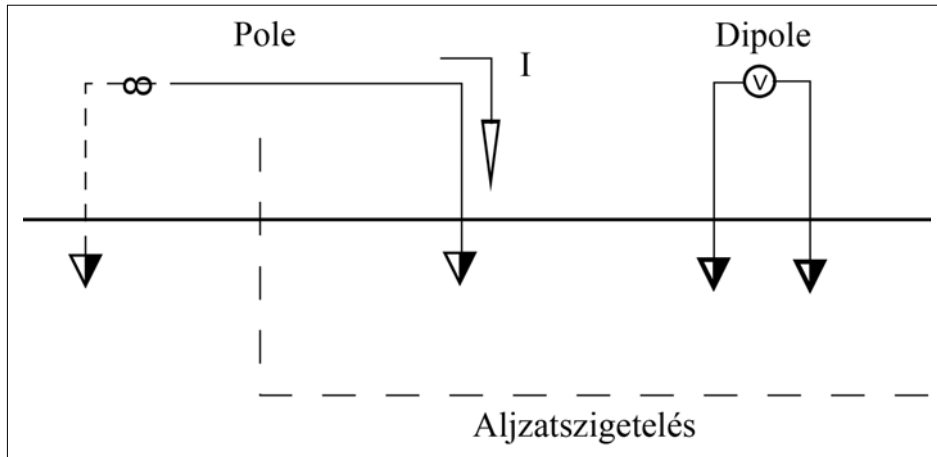
A tápelektrodán bevezetett áram a hulladéklerakó testben szétáramolva a nagy fajlagos ellenállású aljzatszigetelésen áthaladva (igen nagy felület) zárja az áramkört. A hatására kialakuló potenciáltér-eloszlás, a hulladék belső szigetelésével körbe vett részén a mérő- vagy más néven referenciaelektroda segítségével mérhető meg. A méréseket szelvényvonalak mentén érdemes végezni. A potenciálértékeket a szelvényvonal mentén a hulladékba szúrt referenciaelektrod és a külső párja közt kialakuló potenciálkülönbségek adják. A mérés felbontóképessége növelhető a mérési pontok minél sűrűbb elhelyezésével. Pole–Pole mérések eredményeképpen olyan potenciáeloszlás-térkép hozható létre a vizsgált terület felett, amely kiugró potenciálanómália megjelenítésével hívja fel a figyelmet a szakadás helyére. Sajnos több egymáshoz közel található szakadási hely esetén a potenciálérték maximuma nem mutatja pontosan, hol is találhatóak a kritikus helyek.

Pole–Dipole elektrodaelrendezés esetén a 4. ábra mutatja az elektrodák helyzetét.

A mérés kivitelezése egy áram- és egy mérődipólus segítségével történik. Az áram bevezetése a hulladéklerakó nagy



3. ábra Pole–Pole elektrodaelrendezés
Figure 3 Schematic representation of Pole–Pole electrode arrangement



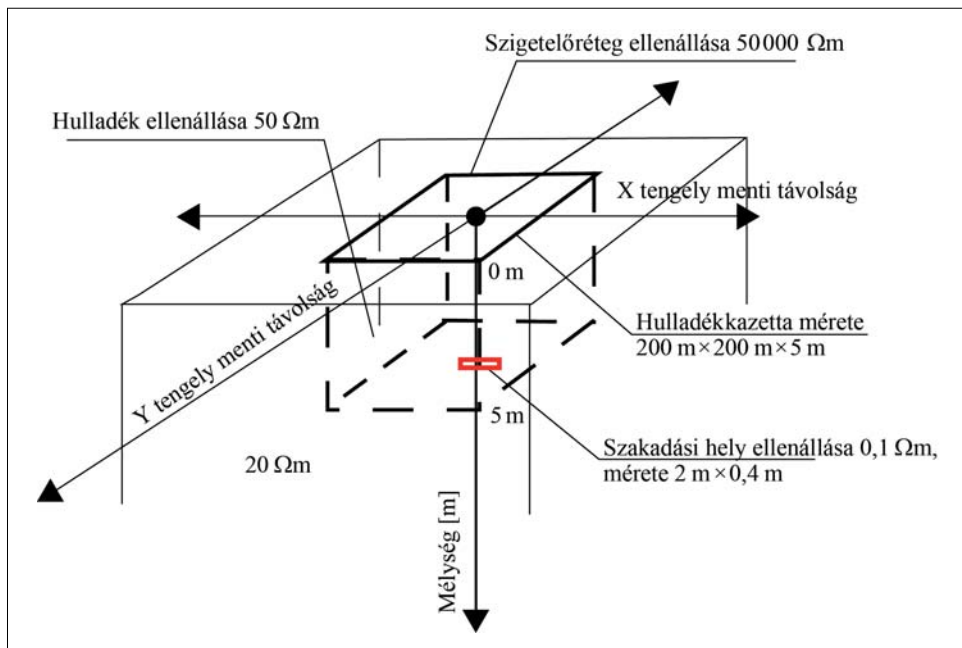
4. ábra Pole–Dipole elektródaelrendezés
Figure 4 Schematic representation of Pole–Dipole electrode arrangement

fajlagos ellenállású fóliával körbe határolt terén belül történik egy áramelektroda segítségével, melynek párja, a nyelőelektroda a lerakóterén kívül, kvázi végtelen távolságban található. További vizsgálat tárgya lesz a távoli elektród mélybeli elhelyezése. A mérő- vagy potenciáelektrodák távolságát változtatják annak függvényében, hogy mennyire szükséges növelni a mérés felbontóképességét, illetve milyen mélységben van a szigetelőfólia. A mérődipólusok távolságát egy adott térképezési mérés során állandó értéken célszerű tartani. A mérések kivitelezése szelvényvonalak mentén történik.

A szelvényvonalak közti távolságok sűrítethetők, ha pontosabb felbontást szeretnénk látni. A Pole–Dipole mérések eredményeként megszerkeszthető egy potenciál különbség eloszlás térkép, melynek értékeit a szelvényvonalak mentén felfűzhető pontok eredményei adják.

Szakadásmentes esetben a terület felett mért potenciál- adatok eloszlása normál lefutású, értékeikben kiugró mennyiségek nem találhatók.

Amennyiben szakadás található a vizsgált hulladéklerakó aljzatszigetelésében, ott a szakadás közvetlen környezetében, egy pozitív–negatív értékkel megjelenő potenciálcúcs-



5. ábra Előremodellezéskor felhasznált hulladéklerakó modell
Figure 5 Waste model for 3D FD modelling

pár figyelhető meg, melynek inflexiós pontjában, a két csúcspont közti függvényszakasz középpontjában található a szakadási hely.

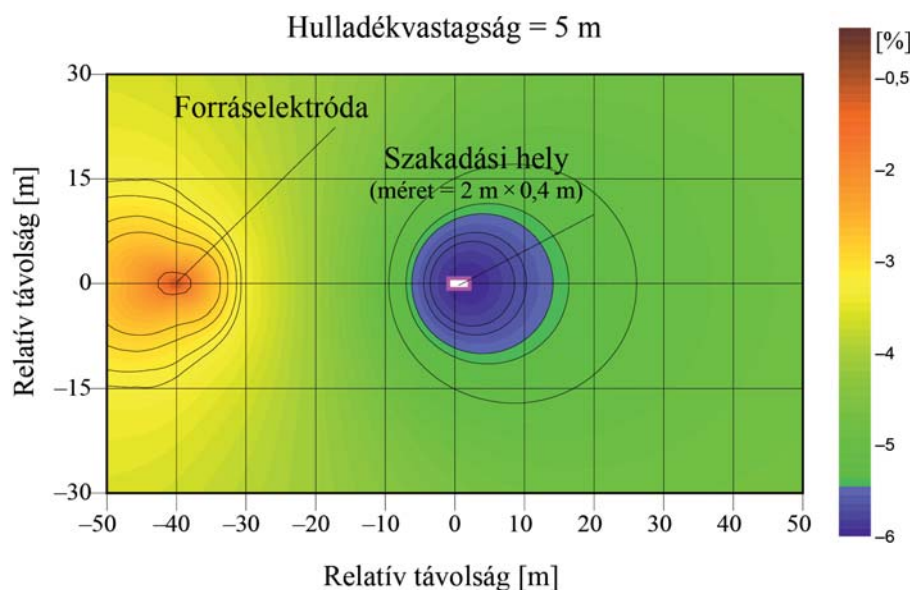
Amennyiben több szakadási hely is található egymáshoz közel a fólia felületén, akkor a potenciáeloszláson alapuló kiértékelés csak többször ismételt helymeghatározásra irányuló méréssel ad megbízható eredményeket.

A mérések eredményes kivitelezéséhez fontos a talajnedvesség jelenléte. Ha a hulladéktest felszíne vagy maga a lerakott hulladék kevés nedvességet tartalmaz, akkor erősen

romlik az elektromos áramvezető képességük, így gyengül a mért jel erőssége, kimutathatatlaná válhat a szakadás helye a fólián.

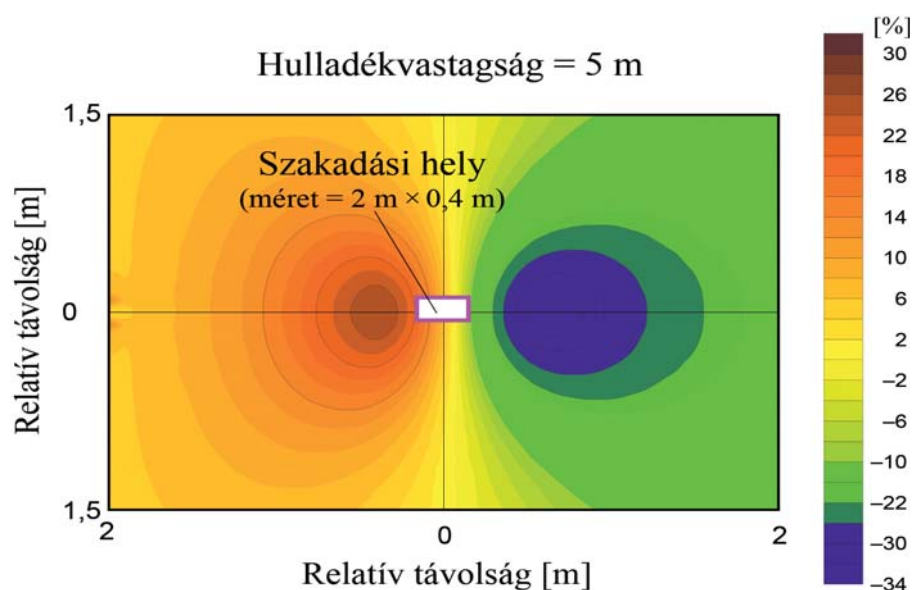
3D modellezés

A Geofizikai Intézet Tanszéken rendelkezésre álló 3D FD (*3-Dimensional Finite Difference*) véges differencia előre-modellező program tetszőleges keresztmetszetű, három-



6. ábra | Normált potenciáeloszlás-térkép Pole-Pole elektródaelrendezés esetén

Figure 6 | Normalized potential distribution map of Pole-Pole arrangement



7. ábra | Pole-Dipole elektródaelrendezés anomáliaképe

Figure 7 | Potential distribution map of Pole-Dipole arrangement

dimenziós, inhomogén, normális értelemben bármilyen fajlagos ellenállású és geometriájú hulladéksajátságokkal kombinálható lerakók vizsgálatát teszi lehetővé. A tetszőleges szó alatt a hulladéklerakókba behordott anyagok gyakorlatában tapasztalható átlagos fizikai tulajdonságok értenődők. A véges differencia előremodellező alapprogramot Klaus Spitzer német kutató fejlesztette ki a Freibergi Bányászati Akadémia Geofizikai Intézetében (Spitzer K. 1995).

Az X , Y horizontális irányok rácseleminék maximális száma mindkét irányban 73 db, a Z vertikális irányú rácselemeke 39 db. A program segítségével a potenciálértékek a tér minden tetszőleges pontjában kiolvashatóak. A program a futtatása végeredményeként a beadott modelleknek megfelelő virtuális térben tetszőleges konfigurációjú elektroáelrendezés potenciálképét generálja le.

A kapott eredmények kiértékeléséhez Gyulai Ákos véges differenciás program segítségével végzett modellszámítási eredményeit használtam fel (Gyulai Á. 1997).

Az előremodellezések alkalmával különböző geometriájú hulladéklerakó modelleket vizsgáltam, melyeket terepi példák alapján alkottam meg. A különböző geometriai sajátágú hulladéktestek mellett modelleztem eltérő terepi példák-ból vett fajlagos ellenállásértékekkel feltöltött objektumokat is. A lefutott modellszámítások szerint a program képes kezelni nagy inhomogenitású hulladékmodelleket is, különböző elektroá elrendezések esetén. Eddigi modellkísérleteim alkalmával nagy behatoló- és kimutatóképes-

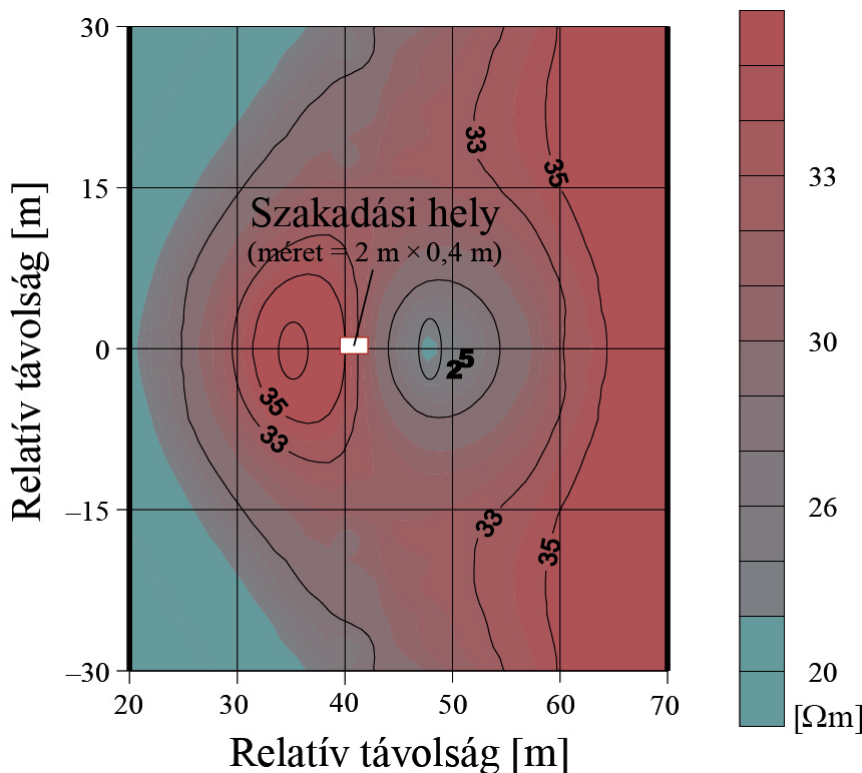
ségük miatt a Pole–Pole, Pole–Dipole elektroáelrendezéseket vizsgáltam.

Az elvégzett modellkísérletek közül bemutatni kívánt eredményekben 5 m vastagságú hulladékkal kalkuláltam, amely megfelel egy feltöltés alatt álló kommunális szilárdhulladék-lerakónak. A behordott hulladék fajlagos ellenállását 50 Ω m-nek, a környező terület átlagos fajlagos ellenállását 20 Ω m-nek vettem, az objektum közepén elhelyezett szakadást 0,1 Ω m fajlagos ellenállású cellákkal töltöttem fel. A szakadás mérete a modellben 2 m \times 0,4 m, melynek modelljét az 5. ábra mutatja.

A hulladékzsetta méretét 200 m \times 200 m területűnek választottam. A szigetelőfólia fajlagos ellenállását 50 000 Ω m-re állítottam be. Ez lényegesen kisebb, mint amit a gyártók a fóliára garantálnak. Néhány számítást végeztem arra nézve, ha a fólia ennél nagyobb fajlagos ellenállású. Ezek a számítások azt mutatják, hogy a fólia fajlagos ellenállásának növelésével igen jelentősen növekszik a szakadás okozta indikáció. A leírt alapmodell paraméterei megfelelnek egy jelenlegi hulladéklerakóban átlagosan mérhető értékeknek.

A Pole–Pole elektroáelrendezéssel generált normált potenciáeloszlás térképet az 6. ábra mutatja. A normálási művelet során a szakadást tartalmazó modell értékeit normáltam a szakadásmentes esetre vonatkozóan.

A kinagyított normált potenciáeloszlás-térképen látható, hogy a szakadási hely a koordináta-rendszer 0,0 pontjában elhelyezve -6% -os anomáliával jelenik meg. Az $X = -40$,



8. ábra Pole–Dipole elektroáelrendezés látszólagos fajlagosellenállás-térképe
 Figure 8 Plot of the apparent resistivity values in Pole–Dipole array

$Y = 0$ koordinátájú helyen megjelenik a forráselektroda is lokális pozitív anomáliával. A jobb kimutathatóság érdekében a fenti modellszámításból meghatároztam a mérő-dipólussal mérhető potenciálkülönbségeket.

A modellszámítást elvégezve Pole–Dipole elektrodaelrendezésre is, adódik a 7. ábrán bemutatott bipoláris anomáliakép, ahol a pozitív és a negatív anomáliapár maximuma közötti távolság közepén jelentkezik a szakadás helye. A kinagyított potenciáleloszlás-térképen a pozitív–negatív anomáliapár értékei -34 és $+30\%$ -os csúcsokkal jelennek meg.

A 8. ábra a látszólagos fajlagosellenállás-eloszlás térképét mutatja be Pole–Dipole elrendezés esetén. A látszólagos fajlagos ellenállás számított értékeit a potenciáleloszlásból határoztam meg.

Az $X = 40$, $Y = 0$, $Z = 0$ helyzetű szakadási középpont közvetlen környezetében jól megfigyelhető a látszólagos fajlagos ellenállás izovonalainak bipoláris anomáliaképe. A jelölt szakadási hely két oldalán szimmetrikusan elhelyezkedő két anomália maximumértékei közti képzeletbeli vonal felezőpontja jelöli ki szakadás helyét.

A felhasznált 3D véges differencia elven működő előremodellező program segítségével eredményesen tervezhető meg a gyakorlatban már kipróbált elektrodaelrendezések által létrejövő térbeli potenciáleloszlás. A munka folytatásaként nagy behatolóképeségű és többféle elektrodaelrendezés esetén tervezem a potenciál- és fajlagosellenállás-terek előremodellezését elkészíteni egy és több szakadási hellyel rendelkező modellek esetében (Szalai S. et al. 2010). A kapott előremodellezési eredményeket terepi alkalmazásokon szeretném kipróbálni. Tervezem továbbá a hulladéklerakók aljzatszigetelési vizsgálatának kiértékelési gyakorlatába át-

ültetni a 1,5D inverziós eljárást (Gyulai Á., Ormos T. 1999a).

Összegzés

Az elvégzett modellvizsgálattal a céloom annak igazolása volt, hogy az általam javasolt új módszer képes detektálni a hulladéklerakó aljzatszigetelési hibáit.

A bemutatott modellvizsgálati példával, mint a hulladéklerakó felszínén végzett mérésekkel is, detektálható az aljzatszigetelés szakadása. Természetesen további modellezésekkel kívánom bizonyítani, hogy a módszer alkalmas különböző hulladéklerakó-teszt esetén is a szakadási helyek kimutatására. Mindehhez további szintetikus modellvizsgálatok elvégzését tervezem, valamint feltétlen összehasonlításokat azokkal a mérésekkel, amelyeket a hulladéklerakó szigetelése alá beépített elektrodarendszer alkalmazásával végeznek.

További vizsgálatok szükségesek az inhomogén hulladéktest által okozott problémák vizsgálatára – és általában is –, az inhomogenitás figyelembevételére valamilyen inverziós meghatározással.

Az előremodellezés segítséget nyújthat a terepi mérések optimális kialakításában, ezzel pénzt és energiát spórolva a kivitelezőnek. A kipróbálásra került és jövőben bevonni kívánt kiértékelési eljárások hozzájárulnak, illetve hozzájárulhatnak a szigetelőfólia szakadási helyeinek eredményesebb felkutatásához.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti az OTKA T042686. számú projektjének támogatását.

Hivatkozások

- Szabó I., 2001: Hulladékelhelyezés. Tankönyv, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolci Egyetem
- Szabó A., 2008: Hulladéklerakók lezárásának aktuális kérdései, PhD-értekezés, Miskolc, Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola
- Frangos W., 1997: Electrical detection of leaks in lined disposal ponds. *Geophysics* 62, 1737–1744
- Kovács A., KBFI-Triász Kft. 2007: Műanyag földműszigetelések ellenőrzése. Mélyépítő Tükörkép Magazin 2007/3.
- BHF Environmental s.r.o., Slovakia, 2012: Geoelectrical Detection and Location of Leaks through Plastic Geomembranes. Tevékenységismertető brosúra
- Hix K., 1998: Leak Detection for Landfill Liners Overview of Tools for Vadose Zone Monitoring, Technology Status Report prepared for the U.S. E.P.A. Technology Innovation Office under a National Network of Environmental Management Studies Fellowship
- Metolabor AG., 2004: Dichtungskontrollsystem TAUPE für Mülldeponien I–II., Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft 2004/10.
- Spitzer K., 1995: A 3-D finite difference algorithm for DC resistivity modelling using conjugate gradient methods. *Geophysical Journal International* 123, 902–914
- Gyulai Á., 1997: Geoelektromos 3-D FD modellezési vizsgálatok. T 019088 sz. OTKA pályázat II. Részjelentés, 1–48
- Szalai S., Varga M., Novák A., Szarka L. 2010: A „Nem konvencionális geoelektromos elrendezések” című K 49604 sz. OTKA projekt eredményeiből. *Magyar Geofizika* 51(4), 209–226
- Gyulai Á., Ormos T., 1999a: A new procedure for the interpretation of VES data: 1.5-D simultaneous inversion method. *Journal of Applied Geophysics* 41, 1–17
- Scales J. A., Gersztenkorn A., Treitel S., 1988: Fast Lp solution of large, sparse, linear systems: Application to seismic travel time tomography. *Journal of Comp. Phys.* 75, 314–333
- Steiner F., 1997: Optimum methods in statistics. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Vass P., 2010: A Fourier-transzformáció mint inverz feladat. PhD-értekezés. Miskolci Egyetem