

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A Doktori Iskola vezetője:
Prof. Dr. Dobróka Mihály
egyetemi tanár

**MODERN HULLADÉKLERAKÓK
ALJZATSZIGETELÉSI VIZSGÁLATA
GEOELEKTROMOS MÓDSZEREKKEL**

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

Írta:
BARACZA MÁTYÁS KRISZTIÁN

Tudományos vezető:
DR. GYULAI ÁKOS
egyetemi tanár
az MTA doktora

**Miskolci Egyetem
Geofizikai Tanszék
Miskolc
2013**

Témavezetői ajánlás**Baracza Mátyás Krisztián****„MODERN HULLADÉKLERAKÓK ALJZATSZIGETELÉSI
VIZSGÁLATA GEOELEKTROMOS MÓDSZEREKKEL”****című doktori (PhD) értekezéséhez**

Baracza Mátyás Krisztián 2001-ben szerzett környezetmérnöki diplomát a környezetgeofizikus-mérnöki szakirányon a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karán. Doktori értekezésének témája hulladéklerakók geofizikai, pontosabban geoelektromos módszerekkel történő vizsgálatához kapcsolódik. A geofizikai kutatásokhoz új kiértékelési és értelmezési módszereket dolgozott ki, amelyek az értekezés címében megjelölt feladatokra, de ahhoz képest szélesebb körben is alkalmazhatók a környezeti geofizikai kutatásokra.

Kutatásait a témavezető irányításával végezte, azonban önálló kutatási eredményeket ért el, amelyek tehát saját eredményei. Az eredmények részben alap kutatási, részben pedig alkalmazott kutatási eredményként értékelhetők. Tudományos eredményeit dolgozatában részletesen kifejtette illetve a dolgozatához kapcsolódó téziszüzetében megfogalmazta és a téziseit illesztette a dolgozat fejezeteihez. Kutatási eredményei egyértelműen újak, fontosak és saját eredmények. Azok megfogalmazása kiválóan megfelel a szakmai illetve kutatási igényeknek.

A dolgozat talán legértékesebb része – amely olyan új és általában is alkalmazható geofizikai kutatási-kiértékelési módszer kidolgozása – különböző geofizikai, geoelektromos módszerek egyidejű (szimultán) alkalmazása a geokörnyezet megismerésére. Ez a geofizikai inverz feladat megoldását jelenti olyan módon, hogy a geofizikai adatokban a környezetre vonatkozó információt szimultán megoldással nyerik ki különböző geofizikai mérési adatok együtteséből. Ez a megoldás lehetővé teszi a geofizikai kutatásokat bonyolult szerkezetek geometriai és fizikai paramétereinek az eddigénél pontosabb meghatározását. A geofizikai kutatások egy korábbi időszakában komplex interpretációt alkalmaztak, az inverziós módszerek kialakulásával pedig joint inverziót. Az inverziós technika alkalmazása olyan automatikus algoritmuson alapuló megoldást jelent, amelyre ez idáig nem dolgoztak ki hatékony módszereket ennyire bonyolult geokörnyezeti szerkezetek esetére. Az automatikus megoldás helyett olyan iteratív interaktív módszert dolgozott ki és alkalmazott, amelyet a kiértékelő szakember irányít elsősorban is paraméterérzékenységi vizsgálatok alapján.

Kutatásait elméleti modelleken és terepi eset modellen végezte. Az elméleti vizsgálatai részletesek és megalapozottak, a terepi eset vizsgálatai pedig megnyerőek és nagyon biztatóak gyakorlati alkalmazások vonatkozásában.

Mindezek alapján az értekezés nyilvános vitára bocsátását és Jelölt részére a doktori (PhD) cím odaítélését jó szívvel és melegen javaslom.

Miskolc, 2013. október 11.



(Gyulai Ákos)
professzor emeritus
az MTA doktora

TARTALOMJEGYZÉK

| | |
|--|-----------|
| SUMMARY | 1 |
| 1. BEVEZETÉS..... | 3 |
| 2. HULLADÉKLERAKÓK FŐBB SZERKEZETI SAJÁTOSSÁGAI | 5 |
| 2.1. HULLADÉKLERAKÓK TÍPUSAI..... | 5 |
| 2.2. A HULLADÉKLERAKÓK SZIGETELÉSE | 8 |
| 2.2.1. Természetes anyagú szigetelők..... | 9 |
| 2.2.2. Geoszintetikus agyagszigetelők..... | 11 |
| 2.2.3. Mesterséges anyagú szigetelők..... | 12 |
| 2.3. GEOMEMBRÁN FELÜLETEK LEFEKTETÉSÉNEK MINŐSÉGELLENŐRZÉSE | 13 |
| 2.4. HULLADÉKLERAKÓK JOGI SZABÁLYOZÁSA | 15 |
| 2.5. GEOMEMBRÁN FELÜLETEK FIZIKAI SÉRÜLÉSEINEK LEGFŐBB OKAI..... | 21 |
| 2.6. GEOMEMBRÁNOK EGYÉB ALKALMAZÁSAI HULLADÉKLERAKÓK ÜZEMELTETÉSEKOR | 22 |
| 2.7. HULLADÉKLERAKÓ MEGFIGYELŐ RENDSZERE..... | 24 |
| 2.8. SZIGETELŐ RENDSZER MŰKÖDŐKÉPESSÉGÉNEK ELLENŐRZÉSE | 25 |
| 3. GEOMEMBRÁN HIBAHELYEK DETEKTÁLÁSÁRA ALKALMAZOTT GEOELEKTROMOS MÉRŐRENDSZEREK-IRODALMI ELŐZMÉNYEK | 28 |
| 3.1. HULLADÉKLERAKÓK GEOELEKTROMOS VIZSGÁLATAINÁL ALKALMAZOTT ELEKTRODA ELRENDEZÉSEK..... | 31 |
| 3.2. ÁLLANDÓ HELYEKEN, ELŐRE BEÉPÍTETT FIX SZENZOR RENDSZEREK | 36 |
| 3.3. MOBIL GEOELEKTROMOS HIBAHELY-KERESŐ MÓDSZER | 40 |
| 4. HULLADÉKLERAKÓK GEOELEKTROMOS MODELLEZÉSE | 42 |
| 4.1. 3D FD PROGRAM BEMUTATÁSA | 46 |
| 4.2. HULLADÉKLERAKÓK MODELLEZÉSE A BEHORDOTT HULLADÉKVASTAGSÁG FÜGGVÉNYÉBEN..... | 47 |
| 5. KIÉRTÉKELÉSI LEHETŐSÉGEK HULLADÉKLERAKÓK VIZSGÁLATAINÁL A GEOELEKTROMOS ADATTÉRBE..... | 51 |
| 5.1. ADATOK MEGJELENÍTÉSE ELOSZLÁSTÉRKÉPEK ÉS SZELVÉNY MENTI ELOSZLÁSOK SEGÍTSÉGÉVEL | 51 |
| 5.2. ADATOK KIÉRTÉKELÉSE NORMÁLÁSSAL | 55 |
| 5.3. ADATOK SZŰRÉSE..... | 56 |
| 5.3.1. Adatok feldolgozása Potenciál eloszlás térképek segítségével | 56 |
| 5.3.2. Adatok feldolgozása Potenciál különbség (gradiens) eloszlás térképek segítségével | 57 |
| 5.4. SZŰRÉSEK HATÁSA AZ ADATOKON | 61 |
| 6. KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK AZ INVERZ FELADAT MEGOLDÁSÁVAL | 66 |
| 6.1. ELMÉLETI GÖRBÉS ILLESZTÉSEK, FOKOZATOS KÖZELÍTÉSEK MÓDSZERE, INVERZIÓS MÓDSZEREK..... | 67 |
| 6.2. EGYESÍTETT FOKOZATOS KÖZELÍTÉS MÓDSZERE | 72 |
| 7. PARAMÉTERÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLATOK | 86 |
| 8. ÖSSZEGRÖZÍTÉS..... | 94 |
| IRODALOMJEGYZÉK..... | 97 |

Summary

In the practice of waste disposal, the bottom of the disposal area is usually cover by single or double HDPE geomembrane liner system. The function of a geomembrane liner is to prevent percolate flow to the environment.

Construction damage, primarily caused while placing protective drainage material on the geomembrane, will always be a significant potential problem. Many of the leaks occurred at T-joints, patches and at the seams in highly-stressed areas such as the base of the side slope. In my research work I have utilized the three-dimensional finite element (FD) solution of the governing equations for this potential equation problem. The geoelectrical leak location method is to impress a voltage across the geomembrane, then detect in the grid points where electrical current flows through the geomembrane. When no leaks are present, the voltage impressed across the liner produces a very low and a relatively uniform voltage distribution in the material above the liner. If the liner has a leak, electrical current flows through the leak causing a localized anomaly in the potential gradient. Leaks are located by measuring potential gradients in the material above or below the liner to search for these localized area(s) of relatively high electrical potential gradients. A major advantage of these methods is the ability to collect data around the perimeter of the landfill cell without placing electrodes on the floor area.

Since the method is not damage the liner it is suitable to locate leaks in active landfills after waste has been placed on the floor area.

In the geophysical leak location forward modeling methods, I calculated with maximum 20m of stabilized waste thicknesses. Electrical leak location on the top of the waste body seems to be promising and effective way to locate this damage for repair.

In evaluating the results, potential and potential difference distribution maps are used, the possibilities and results of normalizing are examined, and so is the possibility of various filtering processes in order to reduce noises and thus to emphasize the leakage signal of the geomembrane isolation.

The methods currently used in the approximative solution of the geophysical inverse problem are reviewed, and a new method is developed so-called iterative simultaneous successive approximation method. By using the suggested method, various geoelectric data sets are evaluated together for the purpose of determining the structure of landfills. 3-D parameter sensitivity examinations are performed concerning the other object in the landfill. The leakages and inhomogeneities in the 3-D model structures as well as the

effects of the individual layer characteristics on each other are examined by means of parameters sensitivity tests, for which the parameter sensitivities and test results defined and achieved by Gyulai (1989) are used.

The new method developed is essentially a complex interpretation method for solving the inverse problem and improves the evaluation results in a similar way to joint inversion.

In addition the parameter sensitivity analysis method was used to solve the inverse problem. The connection of the layer specific physical parameters and the layer geometric data can be analyzed by parameter sensitivity tests.

The aim of my studies was to prove that the suggested new method can detect the faults of geomembrane isolation of landfills and it is usually applicable to evaluate the inverse problem of complex models. The method can be capable to solve similar environmental research projects. The applied forward modeling can assist to optimal design of field measurements, saving money and energy to the constructor.

The developed interpretation method may contribute to locate protective geomembrane leak locations more effectively and to solve inverse problems not only in geophysics.

1. BEVEZETÉS

Magyarországon az elmúlt bő két évtized során jelentősen megváltozott a hulladékgazdálkodás és hulladék elhelyezés gyakorlata. A mai kor követelményeinek megfelelő hulladéklerakók kialakítása a rendszerváltás után, az 1990-es években kezdődött meg és jelenleg is tart. Az elkészült EU konform rendeleteknek köszönhetően felszámolták az engedéllyel nem rendelkező településszéli hulladéklerakókat és új, a jogszabályi előírások szerinti nagykapacitású regionális hulladéklerakókat hoztak létre. A korábbi közel 2500 hulladéklerakó helyett, csak valamivel több, mint hetven modern, a környezetvédelmi szabályozásnak megfelelő depónia maradt az ország területén.

A hulladékok szakszerű kezelése és elhelyezése nem csak hazánkban, de a világ bármely környezetvédelemre figyelmet fordító országában is fontos kérdés. A hulladékok megfelelő műszaki védelemmel történő elhelyezése a fejlett országokban előbb, a fejlődő országokban később indult el, vagy várhatóan el fog indulni. A gazdaság és az ipar fejlettsége mindig meghatározó tényező a keletkező hulladékok fajtáinak és mennyiségének kérdésében.

Magyarországon az utóbbi évek hulladékgazdálkodással kapcsolatos jogszabályai és rendeletei mind arra irányulnak, hogy megvédjék a természetes és mesterséges környezetet az ember okozta környezeti terhelésektől. A környezetvédelmi szabályozás egyre szigorodó feltételei között, bonyolult mérnöki megoldások kivitelezésére és üzemeltetésére van szükség. A hulladékok elhelyezése előtt kiemelt szempont, hogy csökkentsék a lerakásra szánt hulladékok mennyiségét. A válogatókba és hulladékudvarokba érkező anyagok többféle szempont szerint csoportosíthatók. A hulladékokban található hasznosítható, értékesíthető másodnyersanyagokat kiválogatják, ezzel is csökkentve a lerakásra szánt anyagok mennyiségét. Optimális esetben a hulladéklerakókban már csak a jelenlegi technológiai színvonalunk szerint hasznosíthatatlan anyagokat helyezik el.

A lerakókban elhelyezett hulladékokat fajtájuk szerint elkülönítve a környezetre legkisebb veszélyt jelentő módon kell elhelyezni, hogy az odaszállított szennyező anyagokkal ne hozzanak létre másodlagos környezetszennyezést.

A hulladéktestből a lebomlási folyamatok és az esetlegesen hulladékokra érkező csapadékfajták hatására csurgalékvíz keletkezhet. A csurgalékvíz az aljzatszigetelés hibahelyein keresztül a geológiai befogadó környezet vagy esetlegesen élővizek irányába

távozhat. Ezen környezetterhelési lehetőség minimalizálására szolgálnak a természetes és mesterséges anyagú szigetelési rendszerek.

Magyarországon a hulladéklerakásról, valamint a hulladéklerakóval kapcsolatos egyes szabályokról és feltételekről a 20/2006. (IV.5.) KvVM rendelet, valamint annak 92/2007. (XI. 28.) KvVM módosítása rendelkezik. A 20/2006. (IV.5.) KvVM rendelet 19. §-a értelmében a hulladéklerakókat "műszaki védelemmel" kell ellátni. Modern hulladéklerakóknál a műszaki védelem részei a mesterséges szigetelőrétegek és a geofizikai monitoring rendszer.

A geofizikai monitoring rendszer feladata a mesterséges szigetelőrétegek vízzáróságának ellenőrzése annak érdekében, hogy a körülhatárolt hulladéktestből ne juthasson ki szennyeződés a befogadó geológiai környezetbe. A geofizikai monitoring működési elve szerint a geoelektromos módszerek csoportjába tartozik. Üzemeltetésük szerint lehet előre beépített és mobil kivitelű. Az előre beépített geofizikai monitoring rendszer mérőelektródái, a mesterséges szigetelő rendszer alá kerülnek beépítésre a hulladéklerakó építése során. Míg a mobil geofizikai mérőrendszernek nincsenek előre elhelyezett mérőegységei a hulladéklerakó térben. Ezen geoelektromos mérési rendszerek képesek kimutatni a hibahelyeket a geomembrán fólia/lemez felületeken. Mindkét mérési típus a műanyag szigetelőrendszer kiváló elektromos ellenállását kihasználva, a hiba kialakulásakor meginduló áramsökés helyének detektálására irányul. Dolgozatomban a mobil geofizikai mérőrendszer adatainak feldolgozásával foglalkoztam, amely méréseket a hulladékfelszínen végzik. Az adatok feldolgozását 3-D modellszámítási és terepi adatrendszereken végeztem. Vizsgáltam milyen elektróda elrendezések a leghatékonyabbak a hulladéklerakók geomembrán hibáinak kimutatására. Az adatok információtartalmának minél eredményesebb kimutatására, paraméterérzékenységi vizsgálatokat végeztem. Kidolgoztam az egyesített fokozatos közelítés módszerét, amelynek segítségével eredményesen vizsgálhatók a hulladéklerakók geometriai és fizikai paraméterei, inhomogenitásai, valamint kimutathatóak az aljzatszigetelési hibák.

2. HULLADÉKLERAKÓK FŐBB SZERKEZETI SAJÁTOSSÁGAI

Az alábbiakban összefoglalom a magyarországi hulladéklerakóknak a téma kifejtéséhez szükséges szerkezeti sajátosságait. Magyarországon az elmúlt években egyre nagyobb feladatot jelent a hulladékok mennyiségének folyamatos növekedése. A fogyasztói szokások megváltozásával egyre több „egyszer használatos” áru kerül a háztartásokba. Az ipari tevékenység során emelkedik a deponálásra szánt melléktermékek, hulladékok mennyisége, fajtái.

A Mit nevezünk hulladéknak? kérdésre, 2012. évi CLXXXV. hulladékról szóló törvény adja meg a választ: „bármely anyag vagy tárgy, amelytől birtokosa megválnak, megválni szándékozik vagy megválni köteles”. Veszélyességi jellemzőit a hulladékról szóló törvény 1. számú melléklete határozza meg.

A keletkező hulladékok többségét törvényileg szabályozott formában helyezik el. A hulladékok deponálása óhatatlanul ökológiai, gazdasági, higiéniai, valamint tájképi hatásokkal jár. Ezért a hulladéklerakók helykiválasztása, tervezési és üzemeltetési kérdései nagy körültekintést igényelnek.

A kialakításra kerülő modern hulladéklerakók többféle szempont szerint csoportosíthatók. A csoportosítás alapja lehet a hulladéklerakó alakja, vagy akár a behordásra szánt hulladékok veszélyeztető potenciája. A csoportosítás elvégezhető a hulladékok halmazállapota alapján is.

Az ember és környezete számára bármilyen lerakó típusról is legyen szó a legfontosabb kérdés a biztonság. A biztonságos üzemeltetéshez átgondolt műszaki megoldásokat és megfelelő ellenőrzési lehetőségeket kell biztosítani. Az ellenőrzés egyik eszköze a gondosság mellett, a monitoring rendszer üzemeltetése, mellyel képesek lehetünk meggyőződni arról, hogy az üzemeltetett hulladéklerakó mekkora kockázatot jelent az emberre és a környezetre.

A nem megfelelő technológiai megoldások, az ellenőrizetlenül lerakott hulladék a környezetükre nézve számos veszélyt hordoznak magukban.

A hulladéklerakók bezárásával a rekultiváció kérdésköre foglalkozik.

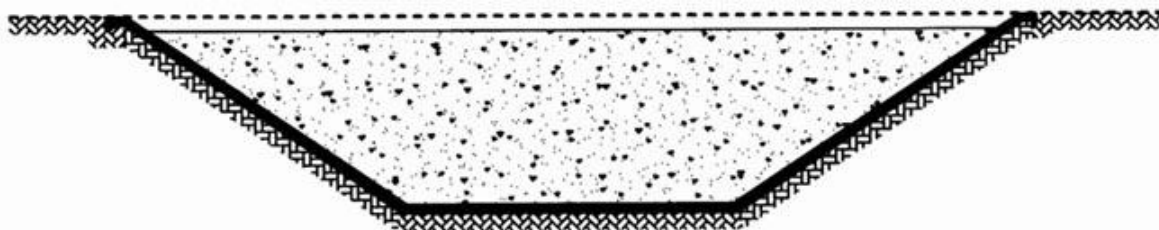
2.1. Hulladéklerakók típusai

A hulladéklerakók osztályozása többféle kritérium szerint történhet pl. a hulladéklerakás időtartama, a hulladék minősége, az előkészítés módja, az építési módja, a veszélyeztető

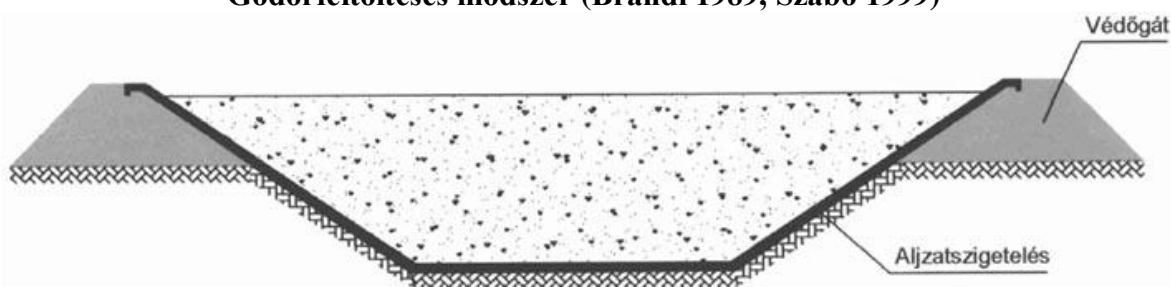
potenciálja szerint, stb. Ezek közül én csak a geoelektromos modellalkotás szempontjából fontos a hulladéklerakók építési módja szerinti csoportosítással foglalkozok részletesebben.

Az építési mód szerinti csoportosításnál megkülönböztethetőek (Brandl 1989, Szabó 1999):

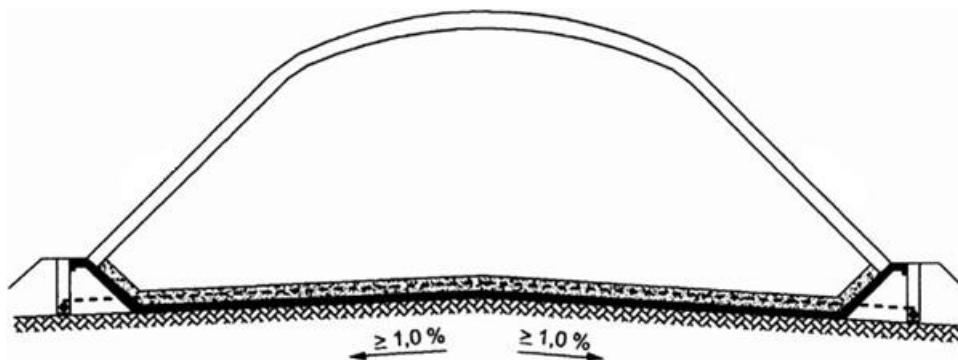
- a) Feltöltéssel épített depóniák
 - fedett vagy fedetlen,
 - nyitott vagy zárt,
 - gödörfeltöltéses módszer (felszín közelében kialakított depónia), **1.1 ábra**,
 - védőgáttal kiemelt földmedence, **1.2 ábra**,
 - hányószerűen kialakított depónia (dombépítéses módszer), **1.3 ábra**,
 - lejtőoldalnak támaszkodó depónia (völgyfeltöltéses módszer), **1.4 ábra**.
- b) Tárolószerűen kialakított lerakó
 - szabadon álló,
 - felszíni, részben vagy teljesen betemetett,
 - felszínközeli, részben vagy teljesen földbe süllyesztve.
- c) Felszín alatti hulladéktárolók
 - vágatban-,
 - felhagyott bányatérsgben-,
 - kavernában kialakított hulladéklerakó.



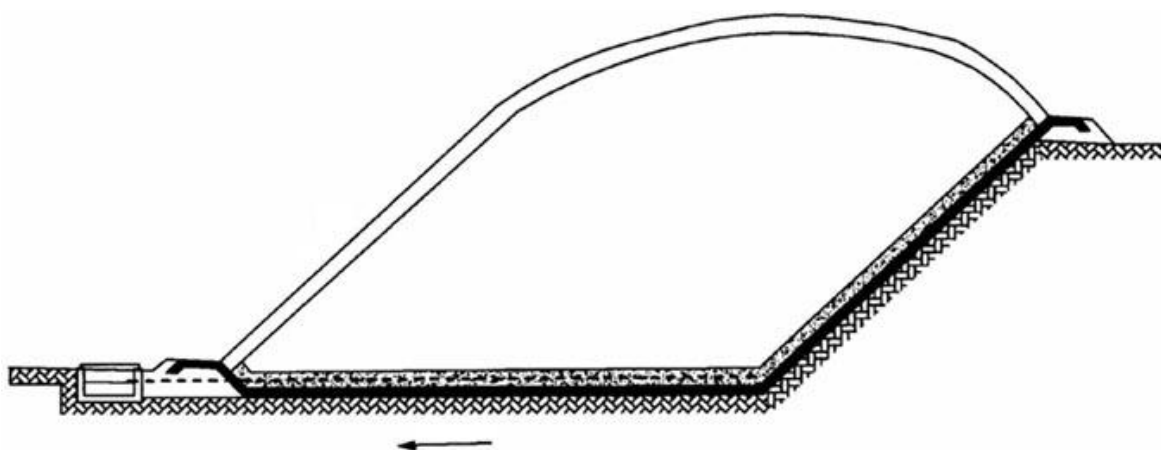
1.1. ábra
Gödörfeltöltéses módszer (Brandl 1989, Szabó 1999)



1.2. ábra
Védőgáttal kiemelt földmedence (Brandl 1989, Szabó 1999)



1.3. ábra
Hányószerűen kialakított depónia „dombépítési módszer”
 (Brandl 1989, Szabó 1999)



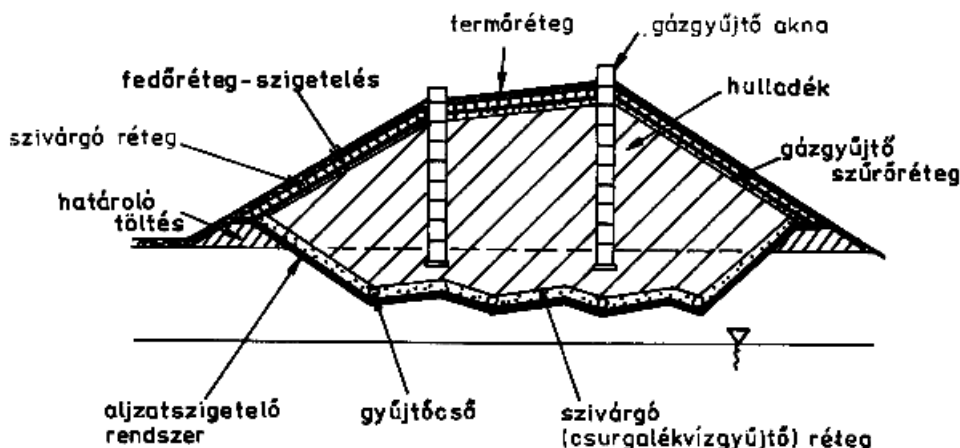
1.4. ábra
Lejtőoldalnak támaszkodó depónia „völgyfeltöltési módszer”
 (Brandl 1989, Szabó 1999)

A hulladék elhelyezés módja szerint felszín közelében gödör feltöltési módszerrel kialakított depóniák, tájképileg a leginkább elrejtendő objektumok, esetenként a meglévő bányagödrök gazdaságosan kihasználhatók erre a célra. Legfőbb hátránya ezen kialakítási módnak, hogy a keletkező csurgalékvíz és az üzemelés során a nyitott részeken bejutó csapadékvíz elvezetése nehézkes, illetve a megoldás jelentős többletberuházást igényel.

A hulladéklerakási gyakorlatban azonban mindig alkalmazkodni kell a helyi terepviszonyok adta lehetőségekhez, ezért a felsorolt négy alaptípus bármilyen kombinációja kialakulhat. A fenti négy ábrán bemutatott hulladéklerakó alak mindegyikénél kulcskérdés, az aljzatszigetelő rendszer megfelelő vízzáróságának kialakítása. Az **1.3** és **1.4** ábrák esetében a hulladéklerakók aljzatszigetelését lejtéssel kell ellátni, hogy a keletkező csurgalékvizek minél hamarabb és könnyebben összegyűjthetőek legyenek az erre a célra kiképzett gyűjtő helyeken.

2.2. A hulladéklerakók szigetelése

A depóniák szigetelőrendszere záró- és aljzatszigetelő rendszerből áll. A kettő rendszer együtt a teljes hulladéktömeget körbezárja, a külvilágtól elszigeteli. A körbezárás akkor megfelelő, ha mindkét elem szigetelő hatása tartós, és a szennyezőanyagok csak az ellenőrzött csurgalékvíz- és gázgyűjtő elvezető vezetékeken keresztül lépnek ki. A depóniák szigetelőrendszerének elemeit a **2. ábra** szemlélteti:



2. ábra
Hulladéklerakó szigetelőrendszerének elemei (Szabó 1999)

Az aljzat- és záró szigetelő rendszernek az alábbi követelményeknek kell megfelelnie (Stief 1985, Franzius 1987):

- vízzáróság csapadékvízzel szemben,
- hőállóság 70°C-ig,
- depóniagázokkal szembeni szigetelőkéesség,
- depóniaterheléssel (mechanikai, kémiai, biológiai) szembeni ellenálló képesség,
- képes legyen elviselni a bekövetkező süllyedéseket,
- kiszáradással szembeni ellenálló képesség,
- mikroorganizmusokkal, rágcsálókkal, a növényzet gyökérzetével szembeni ellenálló képesség,
- erózió- és fagyállóság,
- technikailag egyszerű beépíthetőség,
- az építési- és üzemeltetési fázisban a tömörség és szigetelőkéesség ellenőrzésének a lehetősége,

- sérülés, rongálódás esetén javíthatóság,
- gazdaságosság.

A fenti követelményrendszer igen komoly kívánalmakat támaszt mind a záró-, mind pedig az aljzat és oldalszigeteléssel szemben. Ahhoz, hogy az aljzatszigetelés a vele szemben támasztott követelményeknek megfeleljen, az előírásoknak megfelelően többrétegű, szivárgó réteget is tartalmazó egységes rendszernek kell lennie. Az aljzatszigetelés anyaga szerint természetes anyagú (agyag, adalékanyaggal kevert talajok), és mesterséges anyagú szigetelések (műanyag, bitumen, stb.) különböztetünk meg, valamint a kettő kombinációját.

Az aljzatszigetelő rendszer tervezésének lényeges szempontjai a következők (Brandl 1989):

- a szigetelőrendszer többrétegű legyen, amelynek alapvető eleme egy természetes anyagú szigetelőréteg és további anyagok, szigetelőrétegek alkalmazása szükség szerint,
- hatékony szivárgó rendszer kerüljön beépítésre, ami a csurgalékvizek gyűjtésére, elvezetésére és ellenőrzésére szolgál,
- minimális legyen a hidraulikus gradiens a szigetelőrétegen,
- az aljzatszivárgók és dréncsővek megfelelő eséssel rendelkezzenek,
- alacsony hőmérséklet a depóniaaljazaton.

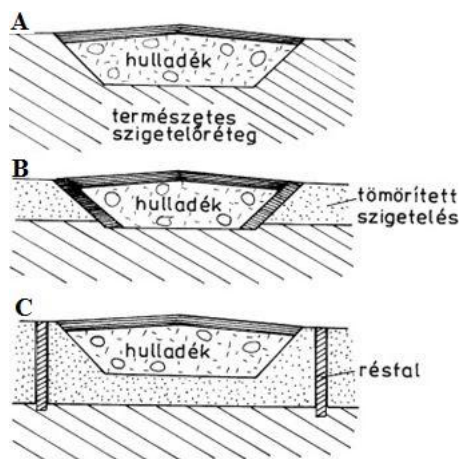
A depóniaaljazaton fellépő magas hőmérséklet kedvezőtlen hatású, mivel elősegíti a szennyezőanyagok átáramlását a szigetelőrétegen. Felléphetnek továbbá száradási repedések is, amelyek szintén kedvezőtlenek a vízzáróság szempontjából. Ezért kívánalom, hogy nagy reakcióhőt termelő anyagok ne kerüljenek közvetlenül a depónia aljzatszigetelő rendszere közvetlen közelébe.

2.2.1. Természetes anyagú szigetelők

A természetes anyagokkal történő szigetelés sokszor a legolcsóbb megoldást jelentheti kiépítéskor. A természetes anyagú szigetelők lehetnek:

- természetes környezetben kialakított szigetelők,
- természetes anyagból kialakított (épített, tömörített) szigetelők és
- a kettő kombinációja.

Természetes anyagú szigetelők alkalmazására mutat példát a **3. ábra** (Daniel 1987, Szabó 1999). A természetes anyagból kialakított tározók (földmedrű tározók) többnyire hidraulikai gátakból és szűrőrétegekből kialakított rendszerek. Ezen típusú tárolók újonnan történő létesítését a hatályos jogszabályok már tiltják. A természetes környezetben kialakított tározók lehetnek vízvezető és vízzáró kőzetben kialakítottak. Vízvezető környezetben épült tározók esetén kármentesítés vagy továbbüzemeltetés céljából további védelemre is szükség lehet, pl. vízzáró résfal, függőnyfal kiépítésével. A **3. c ábrán** bemutatott résfal alkalmazásának egyik eklatáns példája az ausztriai Bécs területén található Rautenweg-i hulladéklerakó, ahol a kedvezőtlen földtani környezetben engedélyezett hulladéklerakó tovább üzemeltetése céljából létesítettek a depónia körül keskeny résfal-as megoldást a szennyeződések szétterjedésének megakadályozására.



3. ábra

Természetes környezetben kialakított tározó (Daniel 1987, Szabó 1999)

A) *Vízzáró kőzetben kialakított; B) Vízvezető kőzetben kialakított; C) Vízzáró résfal-as szigeteléssel körülvett*

A szigetelőréteg anyagának kiválasztásakor alapvető szempont, hogy természetes állapotában vagy beépítés után - figyelembe véve az alapállapothoz képest a depónia üzemelése során fellépő változásokat – biztosítható legyen a megkívánt szennyezőanyag visszatartó képesség és az agyagásvány minőség (megfelelő montmorillonit tartalmú). Ezt a kritériumot, a hulladék jellegétől, minőségétől és veszélyességi osztályától függő minimális szivárgási tényező értékkel adják meg. A megkívánt érték, a depónia altalajára 10^{-7} - 10^{-8} m/s, a szigetelő anyagára 10^{-9} - 10^{-10} m/s érték közé esik.

Az anyagnyerőhely kiválasztásánál mindig felmerül a kérdés, milyen talajok a legkedvezőbbek a szigetelőréteggént való beépítés szempontjából. Vízzáróság szempontjából, minél nagyobb agyagásvány tartalmú, a különösen nagy montmorillonit

tartalmú, tehát a nagy plasztikus indexű (I_p) agyagok jöhetnek számításba. Ugyanakkor tény, hogy minél nagyobb az I_p értéke egy agyagnak, annál nehezebben tömöríthető, valamint annál inkább hajlamos a víztartalom változás hatására bekövetkező zsugorodásra. Az optimális megoldást a kis- és közepes plaszticitású, de megfelelő agyagásvány tartalmú és adszorpciós kapacitású iszapos agyag talajok adják. A megkívánt szigetelőképeséget biztosító keverék összetétel laboratóriumi úton, kísérletsorozattal határozható meg. A keverékek beépítési paramétereit mindig egyedileg kell megvizsgálni.

A természetes anyagú szigetelők geoelektromos szempontból jól vezető réteget képeznek a hulladékok alatt. Az agyagok természetes víztartalmánál fogva az elektromos áram könnyen képes áramolni ezekben, ami kedvező a geomembrán hibahely kereső geoelektromos vizsgálatok alkalmazásakor.

2.2.2. Geoszintetikus agyagszigetelők

A természetes anyagból készített szigetelések mellett a 80-as évek végén jelentek meg és azóta egyre nagyobb szerephez jutnak az ún. geoszintetikus agyagszigetelők, melyet a nemzetközi irodalomban általában csak a GCL megjelölést használják (Geosynthetic Clay Liner). A hazai szóhasználatban a bentonitos szigetelőlemez, bentonit-szőnyeg, bentonit-paplan elnevezés terjedt el. A bentonitos szigetelőlemezek többnyire két geoszintetikus hordozó elem (geotextília vagy geomembrán) közötti bentonitrétegből állnak. A bentonit fő alkotó eleme a montmorillonit amely nagy duzzadó és vízfelvevő képességű agyagásvány. A bentonitréteg vastagsága általában 5-10 mm. Az előállítás során a bentonitot por vagy granulátum formájában helyezik a geoszintetikus lemezek közé. A bentonitos szigetelő lemez két fajtája ismert, az egyik az erősítés nélküli, a másik a tűzési eljárással készült bentonitos szigetelőlemez. De ma leginkább a tűnemezelt szigetelőlemezeket alkalmazzák, amelynél a szálhidak körbezárják a bentonitot és megakadályozzák a hidratált bentonit oldalirányú elmozdulását a geotextíliák között. A lemez az egyenlőtlen süllyedést könnyen elviseli, nyíróerők felvételére alkalmas. Szigetelőlemezként való alkalmazásukat az teszi különösen vonzóvá, hogy a vízfelvétel (hidratáció) hatására a bentonit duzzad, azonban a két határoló geotextília tűzéssel vagy tűnemezeléssel történő összekötése a térfogat növekedést gátolja, így egy kis vastagságú, de tömör vízzáró réteg alakul ki.

2.2.3. Mesterséges anyagú szigetelők

A hulladék összetétele, veszélyeztető potenciálja és a csurgalékvíz agresszivitása miatt, az esetek nagy többségében nem elegendők a természetes anyagú szigetelőrendszerek. Ezért további műszaki védelemre van szükség. A mesterséges anyagú szigetelők gyakorlatában a legelterjedtebbek a hajlékony műanyag membránszigetelők (geomembránok). A geomembránok mellett, műszaki védelemként néhány országban elterjedt az aszfaltbeton szigetelés, valamint különböző vegyi anyagokkal (pl. műgyanta) történő impregnáló szigetelések is. Dolgozatomban én csak a műanyag geomembrán szigetelőket mutatom be. Műanyag geomembránokat a hulladéklerakók szigetelésére a '70-es évektől alkalmaznak. Legnagyobb hátrányuk a mechanikai hatásokkal szembeni érzékenység (sérülékenység). A hajlékony membránszigetelő anyaga szintetikus polimer. Magyarországon az eddigi gyakorlat során felhasznált szigetelőanyag fajták:

- részben kristályos termoplasztikus műanyagok közül (záró szigetelőnek) kis sűrűségű polietilén (LDPE), (aljzat és záró szigetelőnek) nagy sűrűségű polietilén (HDPE),
- vulkanizált elasztomerek közül etilén propilén dién monomer (EPDM).

Ezek közül a legelterjedtebb a HDPE, amelyet aljzat és záró szigetelőnek is használnak, de e mellett záró szigetelésre alkalmazzák az LDPE-t is, amelyek fajlagos ellenállás értékeit az **1. táblázat** mutatja:

| Geomembrán anyagának neve | Fajlagos ellenállás [ohmm] |
|---------------------------------|----------------------------|
| Nagy sűrűségű polietilén (HDPE) | 10^{11} - 10^{14} |
| Kis sűrűségű polietilén (LDPE) | 10^{11} - 10^{14} |

1. táblázat
Nagy és kis sűrűségű polietilén fajlagos ellenállásának értékei
(Darillek és Parra 1988)

A HDPE nagy fajlagos ellenállása miatt kiváló szigetelést képes biztosítani geoelektromos szempontból is. A táblázatból kiolvasható 10^{11} - 10^{14} ohmm fajlagos ellenállás tartomány kvázi végtelennek tekinthető elektromos szempontból. Anyaga hibamentes esetben, szinte teljes mértékben képes megakadályozni az elektromos áram keresztülhaladását a geomembrán két oldalfelülete között.

2.3. Geomembrán felületek lefektetésének minőségellenőrzése

A kedvező mechanikai, kémiai, biológiai ellenálló képessége (kompatibilitás) miatt, hulladékok építésénél legelterjedtebben használt geomembrán típus a HDPE, melyek élettartama mai ismereteink szerint eléri a 100 évet. A HDPE szigetelőlemezeket általában 3,1-9,4 m széles tekercsekből építik fel, a hulladéklerakók már előkészített minőségű felületeire.

Az osztrák ÖNORM S 2076-1 szabvány (amelyet a magyar gyakorlatban is alkalmaznak) a műanyag szigetelőlemezek lefektetésének minőségellenőrzéséről, a következő képpen rendelkezik (Szabó 2006):

➤ A geomembrán lefektetés belső felügyelete

A fektetést végzőnek a munkálatok alatt minden varratot a következő kritériumok alapján felül kell vizsgálni és megfelelően jegyzőkönyveznie kell:

- a próbahegesztéskor lefektetett keretfeltételek teljesítése, pl. összenyomó erő, előtolási sebesség, hegesztési hőmérséklet.
- ítéletalkotás szemrevételezéssel.
- állandó roncsolásmentes tömítettségre vonatkozó vizsgálat.
- a lefektetett lemezek hullámképződésének, mely túlzott ráncolódást idézhet elő, ellenőrzése és adott esetben kijavítása.

➤ A geomembrán lefektetés külső felügyelete

A külső felügyeletet végző független vizsgáló intézménynek az alábbi vizsgálatokat kell elvégezni:

- az előterjesztett dokumentumok alapján ellenőrizni kell, hogy a megfelelő anyag került-e leszállításra.
- az építményekhez, műtárgyakhoz való kapcsolások, bekötések kivitelezésének a felülvizsgálata, véleményezése, engedélyezése.
- a lefektetett és lehegesztett szigetelő lemezek véleményezése, a fektetési tervnek való megfelelésének az ellenőrzése.
- a külső felügyelőnek a belső felügyelet szűrőpróbaszerű ellenőrzése révén meg kell győződnie arról, hogy a vizsgálatok és ezek dokumentációja szakszerűen készült-e.
- a hegesztési varratok szilárdságának roncsolással járó vizsgálata.

A hegesztési varratok ellenőrzését a német DIN DVS 2225-1, vagy az ÖNORM S 2076-1 előírásai alapján, több lépcsőben végzik. Az első lépcsőben, a hegesztési munkák

megkezdése előtt próbavarratokat készítenek. A próbavarrat segítségével történik az előírt minőségű varrat elkészítéséhez szükséges hegesztési paraméterek megállapítása, melyek a következők:

- forróék hőmérséklete, HDPE geomembránál: 280-400 °C,
- nyomóerő/görgő szélesség, HDPE geomembránál: 20 N/mm,
- hegesztési sebesség, HDPE geomembránál 0,5-2,5 m/min.

A próbavarratokon szakítószilárdsági vizsgálatokat kell végezni. A hegesztési munkák csak akkor kezdhetők el, ha a vizsgálatok eredményei az előírásoknak megfelelnek. A hegesztési paramétereket a külső körülmények változásával aktualizálni szükséges. A következő ellenőrzési lépcső az elkészített varratok ellenőrzése. Az ÖNORM S 2076-1 szabvány alapján a kész varratokat először szemrevételezéssel kell ellenőrizni. A szemrevételezés kiterjed a varratok küllemére, átlapolási geometriájára, és folytonosságára. A hegesztési varratok minőségének helyszíni ellenőrzésére különböző módszerek ismertek. Az elmúlt évek során a fóliák hegesztésére számos segédeszköz került kifejlesztésre. A szigetelőlemezek helyszíni hegesztéseit többnyire kétféle módszerrel végzik:

- forróékes,
- extrúziós.

A forróékes hegesztés történhet egyszeres vagy kétszeres varratkészítéssel. Az egyszeres hegesztési varratok ellenőrzése történhet vákuumharangos ellenőrző vizsgálattal, és nagyfeszültséggel végzett ellenőrző vizsgálat segítségével.

Vákuumharangos ellenőrző vizsgálat alkalmazásakor kisebb foltok, varratok minősége ellenőrizhető. A harang elhelyezése előtt a vizsgálandó varratot szappanos vízzel kell bekenni. Az ellenőrzés 0,4 bar vákuummal történik. A varrat minősége megfelelő, ha a harang alatt szappanos buborék nem keletkezik.

A nagyfeszültséggel végzett ellenőrző vizsgálat alkalmával, az ellenőrizendő varrattartományban egy ellenelektroda elhelyezése szükséges. Az ellenőrizendő varrattartományt a vizsgálat előtt tisztítani és szárítani szükséges. Ezt követően az ellenőrizendő varraton, a készülék seprűs elektródáját végig kell vezetni 30-40 kV feszültséggel. A vizsgálati sebesség nem lehet nagyobb, mint 10 m/min. A varrathibákat a készülék optikai és akusztikai jelekkel jelzi.

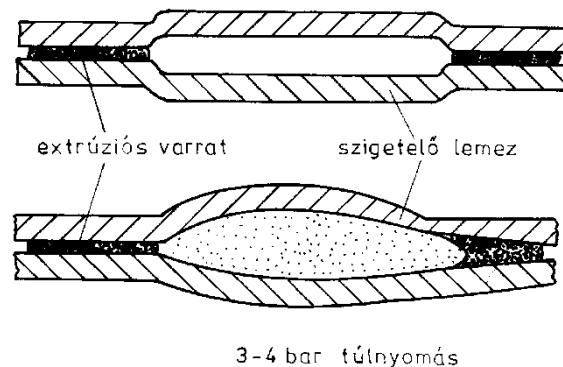
Lehetőség szerint a geomembrán tekercseinek összehegesztése (amely függ a beépítési geometriától) kettős hegesztési varratok segítségével történik. A kettős hegesztési varratok

ellenőrzése roncsolódás mentesen, a varratok között található vizsgáló csatorna nyomáspróbájával történik (**4. ábra**).

A HDPE szigetelőlemeznél a nyomáspróba irányértékei a következők:

- nyomás: min. 3 bar, max. 4 bar,
- vizsgálati idő: a kondicionálási idővel együtt 15 perc.

A nyomás mérése kb. 5 perc kondicionálási idő után kezdődik és legalább 10 percig tart. A varrat megfelelő minőségű, ha a vizsgálati idő alatt a nyomás 10%-nál kevesebbet esik vissza. A vizsgálati eredmények jegyzőkönyvben való rögzítése után, a varrat lezárt túlsó végét ki kell nyitni és a manométeren ellenőrizni kell, hogy nyomása nullára esik. Ezzel biztosítható, hogy valóban a varrat teljes hossza lett ellenőrizve.



4. ábra

Kettős hegesztési varratok ellenőrzése nyomáspróbával (Szabó 1999)

A geomembrán felületek hegesztése rendkívül fontos feladat, mert hanyag munkavégzés esetén a hibás szakaszokon keresztül csurgalékvíz távozhat a befogadó geológiai környezetbe. A hibahelyeken keresztül átfolyó áram folytonos hibát képezhet geoelektromos mérések alkalmával.

2.4. Hulladéklerakók jogi szabályozása

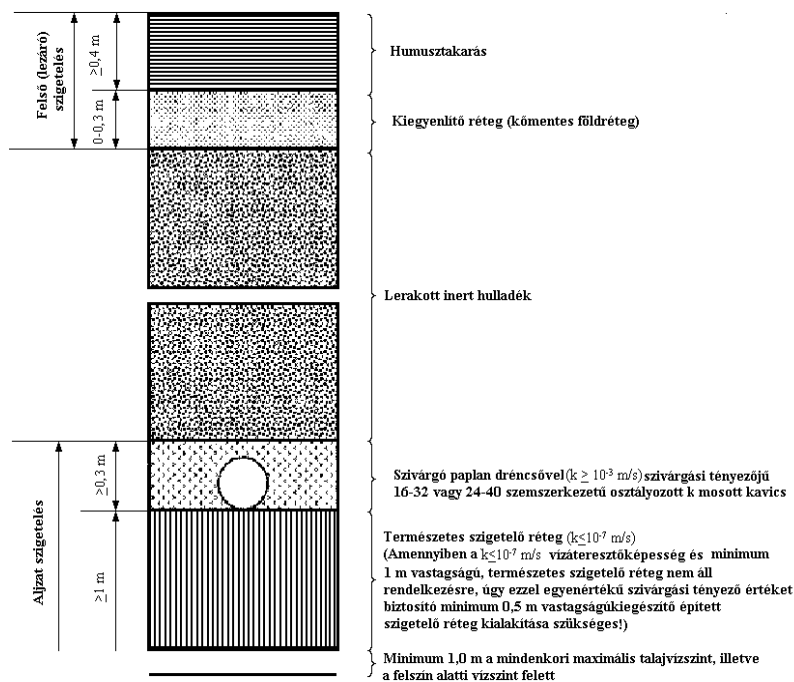
A hazai hulladéklerakókra vonatkozó törvényi szabályozás alapja a 31/1999 EK irányelv (az ún. landfill directive), míg a hulladékok hulladéklerakóban történő átvételének kritériumairól és eljárásairól a 31/1999 EK irányelv II. mellékletének 16. cikke alapján a 33/2003 EK tanácsi határozat (az ún. council decision) határozza meg, amely irányelvek és tanácsi határozat alapjául szolgáltak a hazai hulladéklerakással foglalkozó törvényeknek is.

A hulladéklerakással, valamint a hulladéklerakóval kapcsolatos egyes szabályokról és feltételekről 20/2006 (IV.5.) KvVM rendelet 4§-a szerint a lerakásra kerülő hulladék összetételétől, a helyszín természeti adottságaitól és a tervezett műszaki feltételektől függően a hulladéklerakó lehet:

- a) inert hulladék lerakására szolgáló hulladéklerakó (*A kategória*) **5.1 ábra**,
- b) nem veszélyes hulladék lerakására szolgáló hulladéklerakó (*B kategória*) **5.2 ábra**,
ba) szerves, nem veszélyes hulladék lerakására szolgáló hulladéklerakó (*B1b-alkategória*),
bb) vegyes összetételű (jelentős szerves és szerves anyagtartalommal egyaránt rendelkező), nem veszélyes hulladék lerakására szolgáló hulladéklerakó (*B3 alkategória*),
- c) veszélyes hulladék lerakására szolgáló hulladéklerakó (*C kategória*) **5.3 ábra**.

A hazai jogszabályba a nem veszélyes szerves hulladékok lerakója (B2) és a felszín alatti veszélyeshulladék-tárolóhely (D) fogalma nem került be, így ezek kialakítása hazánkban nem engedélyezett. Az irányelvek valamennyi új és működésben lévő lerakóhelyre vonatkoznak.

Veszélyességük alapján a fenti három hulladéklerakó típus közül a legkisebb kockázatot a környezetésre az „*A kategóriába*” sorolt inert hulladék lerakására szolgáló hulladéklerakó jelenti. A **5.1 ábrán** bemutatott inert hulladék lerakására szolgáló hulladéklerakó kötelező rétegsorában a hulladékok alatt nem szükséges kialakítani geomembránt a hulladékokból elszivárgó szennyező anyagok visszatartására. Erre elegendő a megfelelő szivárgási tulajdonságokkal kiépített ásványi agyagú szigetelő réteg is, hiszen az inert hulladékokból nem oldódnak ki veszélyes anyagok, melyek veszélyt jelentenek a környezetre. Ha egyéb hulladékok bekeveredésekor erre mégis sor kerülne, képes azt a természetes agyagszigetelés visszatartani a befogadó geológiai környezettől. Ennél a hulladéklerakó típusnál nem alkalmazhatóak azok a későbbiekben ismertetni kívánt geoelektromos módszerek, amelyek az áramszökés fizikai elvét kihasználva vizsgálják a lerakótér szigetelő rendszerét.

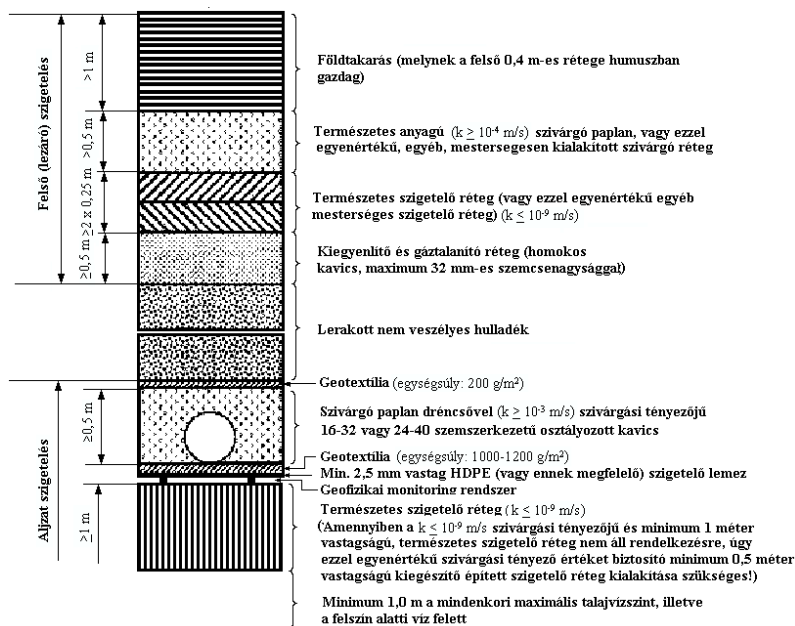


5.1. ábra

Inert hulladék lerakására szolgáló hulladéklerakó aljzatszigetelő rendszere felépítésének szabályozása a 20/2006.(IV.5.) KvVM rendelet alapján (Dióssy 2011)

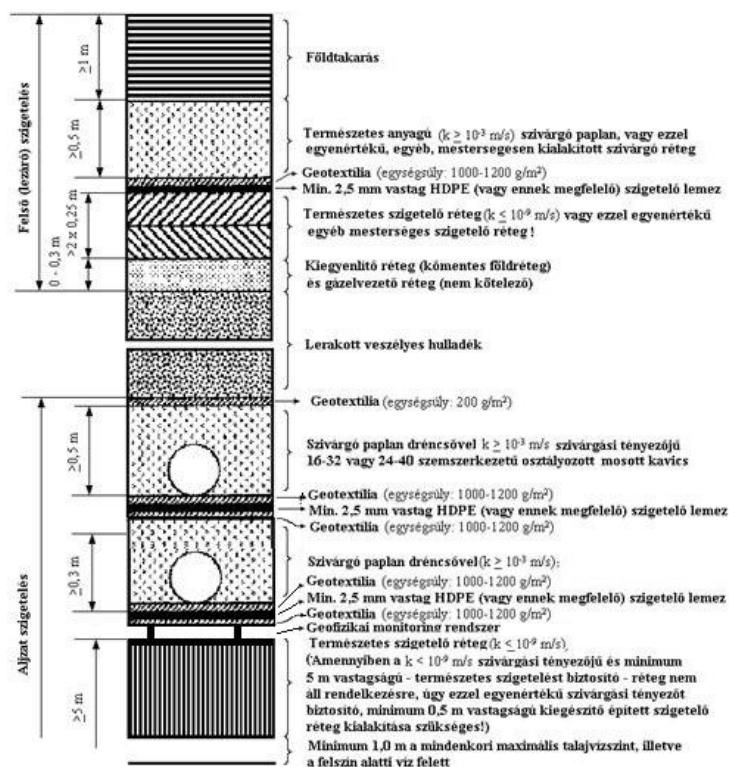
Az 5.2 és 5.3 ábrákon bemutatott B-3 és C kategóriájú hulladéklerakó típusok esetében alkalmazhatóak azok a geoelektromos módszerek, amelyek a hulladékokat körülvevő szigetelőréteg geomembrán felületének hibahelyeit képesek kimutatni. Az 5.2 ábrán megfigyelhető, hogy a törvényi előírás szerint vegyes összetételű, nem veszélyes hulladék lerakására szolgáló hulladékok lerakására használatos B-3 kategória esetében, kombinált szigetelőrendszert szükséges beépíteni. B-1 és B-3 kategóriájú lerakók kötelező rétegsorában a legfőbb különbség, hogy B-3 kategória esetén előírás a geofizikai monitoring beépítése. A 20/2006. (IV.5.) KvVM rendelet a hulladékok emberre és környezetre való veszélyességük alapján egyre szigorúbb feltételeket támaszt. C kategóriájú veszélyes hulladékok lerakására szolgáló depóniák esetén, már kombinált és egy második geomembrán szigetelőréteg beépítését írja elő a rendelet, melyet a 5.3 ábra szemléltet. A B-3 és C kategória esetén, tehát előírás a geoelektromos szempontból is kiváló szigetelő képességű réteg(ek) kiépítése. A 20/2006. (IV.5.) KvVM rendelet a meghibásodás-észlelő rendszer kiépítését a B-3 és a C kategóriájú hulladéklerakóknál írja elő. A B-3 kategóriájú lerakóknál a magyar szabályozás szigorúbb, mint a nemzetközi gyakorlat, a C kategóriájúnál azzal megegyező. A C kategóriájú hulladéklerakóknál a monitoring rendszert célszerű a második geomembrán réteg alá helyezni, mert a felső geomembrán meghibásodását a közbenső szűrő-védő réteg észleli.

2. HULLADÉKLERAKÓK FŐBB SZERKEZETI SAJÁTÓSÁGA



5.2 ábra

Vegyes összetételű, nem veszélyes hulladék lerakására szolgáló hulladéklerakó aljzatszigetelő rendszere felépítésének szabályozása a 20/2006.(IV.5.) KvVM rendelet alapján (Dióssy 2011)



5.3 ábra

Veszélyes hulladéklerakó aljzatszigetelő rendszere felépítésének szabályozása a 20/2006.(IV.5.) KvVM rendelet alapján

Az **5.3 ábra** Dióssy (2011)-től átvett eredetiét megváltoztattam a 20/2006. (IV.5.) KvVM rendelet előírásai miatt, ahol a rendelkezés *C kategóriájú* hulladéklerakók esetén a geofizikai monitoringrendszer telepítését az alsó geomembrán alá írja elő.

A 20/2006. (IV.5.) KvVM rendelet az *A, B, C kategóriájú* hulladékok esetén az alábbi követelményeket fogalmazza meg a létesítéssel és üzemeltetéssel kapcsolatban:

1. A hulladéklerakót a lerakásra kerülő hulladék összetételének figyelembe vételével olyan műszaki védelemmel kell megtervezni és megépíteni, amely biztosítja a hulladéklerakó teljes élettartama során a környezeti elemek, különösen a közvetlen környezetében lévő felszíni és felszín alatti vizek, a földtani közeg és a levegő szennyeződés elleni védelmét.
2. A hulladéklerakó medencéjének alját és oldalait úgy kell kialakítani, hogy azok geológiai szigetelőrétege megfeleljen az alábbi követelményeknek:

| Hulladéklerakó kategória | Szivárgási tényező (m/s) | Vastagság (m) |
|---|-----------------------------|---------------|
| Inerthulladék-lerakó (<i>A kategória</i>) | $k \leq 1,0 \times 10^{-7}$ | ≥ 1 |
| Nem veszélyes hulladéklerakó (<i>B-1b és B-3 alkategória</i>) | $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ | ≥ 1 |
| Veszélyes hulladéklerakó (<i>C kategória</i>) | $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ | ≥ 5 |

2. táblázat

Geológiai szigetelőrétegre vonatkozó követelmények (20/2006. (IV.5.) KvVM rendelet)

Ha a **2. táblázat** szerinti tulajdonságokkal rendelkező természetes geológiai védelem nem áll rendelkezésre, úgy ezzel egyenértékű transzport egyenértékűséget biztosító, minimum 0,5 méter vastagságú kiegészítő épített ásványi anyagú szigetelő réteg kialakítása szükséges minden lerakó kategória esetében. A szigetelő réteg természetes és/vagy mesterségesen előállított anyagokból egyaránt kialakítható.

Két szigetelőrendszer akkor tekinthető egyenértékűnek, ha a kialakuló kumulatív szennyezőanyag-áramok azonosak, azaz ugyanolyan mértékű szennyezőanyag-visszatartó képességgel rendelkeznek. Az egyenértékűséget a tervező számításokkal igazolja, a kivitelezőnek pedig vizsgálatokkal kell igazolnia a tényleges megfelelést. A geológiai szigetelőrétegek anyagának kedvezőek a közepes kövér agyagok, vagy ha természetes előfordulásban ezek nincsenek jelen, akkor az épített réteget vagy agyagból, vagy valamilyen keverék talajból építik fel. A keveréktalaj egy komponense többnyire bentonit.

A geológiai és az épített szigetelőrétegek a hézagokat kitöltő pórúsvíz miatt, geoelektromos szempontból igen jó áramvezető tulajdonsággal rendelkeznek. Ez a jó áramvezető tulajdonság fontos eleme annak az áramkörnek, amely segítségével a geoelektromos módszerek eredményesen alkalmazhatók a hibahely kimutatásához.

3. A, B, C kategóriájú hulladéklerakók esetében a kialakítandó oldalfal- és aljzatszigetelés rétegrendjét a **3. táblázat** tartalmazza:

| Szigetelési rétegrend elemei | Hulladéklerakó kategória | | | |
|---|--------------------------|---------------------------------|--|----------------------------|
| | Inert (A kategória) | Nem veszélyes | | Veszélyes (C kategória) |
| | | Szervetlen (B1b alkategória) | Vegyes összetételű (B3 alkategória) | |
| Mesterséges szigetelőréteg | nem előírt | előírt | előírt | előírt |
| Geofizikai monitoring rendszer (új lerakónál) | nem előírt | nem előírt | előírt | előírt |
| Szivárgó réteg | nem előírt | előírt | előírt | előírt |

3. táblázat
Szigetelési rétegrend elemei (20/2006. (IV.5.) KvVM rendelet)

A **3. táblázat** alapján látható, hogy mesterséges szigetelőréteg kiépítése csak az A kategóriájú Inert hulladéklerakók esetében nem szerepel előírásként a 20/2006. (IV.5.) KvVM rendeletben. A többi hulladéklerakó kategória esetében a mesterséges szigetelőréteg anyaga lehet rugalmas geomembrán lemez, amely legalább 2,5 mm vastag ($d < 2$ mm fólia; $d > 2$ mm lemez) vagy azzal egyenértékű környezeti védelmet biztosító réteg. A mesterséges szigetelőréteget képező anyagnak egyrészt szignifikánsan alacsonyabb permeabilitási tulajdonságokkal kell rendelkeznie, mint a 2. pontban meghatározott geológiai szigetelőrétegek, másrészt anyagában különböznie kell a geológiai szigetelőrétegtől. A fenti rendelet szintén előírja, hogy a hulladéklerakó szigetelőrendszerének fenékszintje és a felszín alatti víz szintjének, illetve talajvíz nyomásszintjének maximuma között legalább 1 méter távolságot kell tartani.

Geofizikai monitoring rendszert a szivárgási helyek meghatározásának előírása szerint csak „Nem veszélyes hulladékok” lerakására szolgáló *B-3 alkategória* és „Veszélyes hulladékok” elhelyezésére használt *C kategóriájú* hulladéklerakók esetében szükséges beépíteni. A geofizikai monitoring rendszer Magyarországon és a világ más országaiban is előre beépített elektródarendszerrel működő berendezéseket jelent. „Nem veszélyes hulladékok” elhelyezésére szolgáló *B-1b kategóriájú* lerakók esetén előírás a mesterséges szigetelőréteg beépítése, de hozzá már nincs feltétlenül meghatározva a geofizikai monitoring rendszer kiépítése. Ezért *B-1b kategóriájú* hulladéklerakók esetén kifejezetten előnyös lehet a hulladékfelszínről történő geoelektromos mérések alkalmazása abban az esetben, ha felmerül az aljzatszigetelés hibájának a gyanúja. További vizsgálati lehetőséget jelentenek a hulladékfelszíni geoelektromos mérések azon mesterséges szigetelőréteggel rendelkező hulladéklerakók esetén, ahol ugyan készült előre beépített geofizikai mérőrendszer, de az valamilyen oknál fogva működésképtelenné vált.

2.5. Geomembrán felületek fizikai sérüléseinek legfőbb okai

A geomembránok kiépítése közben és az üzemeltetés során számos fizikai sérülés kialakulására van lehetőség. Amelynek okai lehetnek:

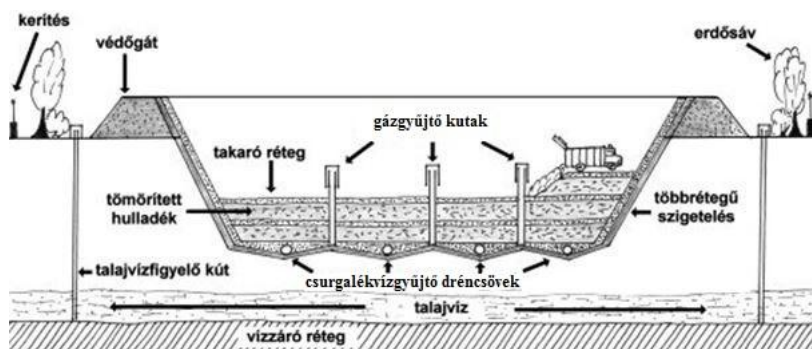
- a fólia előállítását végző berendezés kapaszkodó karmai okozta sérülés, mely a kész anyag felcsavarásakor keletkezhet, ezek általában tűhegynyi sérüléseket jelentenek,
- a fóliahegesztés kialakításakor létrejött olvadási hibák,
- gyenge minőségű munkavégzés,
- kés általi vágásnyomok,
- cigaretta által okozott égési sérülések,
- a fólia leterítésekor cipőtalpba szúródott hegyes tárgy okozta szúrt, mart sérülései a műanyag felületeken,
- vadállatok okozta rágások,
- vandalizmus,
- munkagépek járófelületei által okozott sérülések (leggyakoribb).

További sérülést kiváltó okok, ha már a lefektetett geomembránt védő réteget ráterítették a szigetelendő felszínére:

- éles- hegyes kövek beszúródásai, átnyomódásai, amelyet egy nagy tömegű tárgy vagy munkagép okozott,

- fóliatekereszt tartó és forgató munkagép támasztó lábai okozta sérülések, „letalpalási nyomok”,
- lánctalpas munkagép nyomai,
- mechanikus kaparódások, vonszolások nyomai,
- mérő elektródák nyomai.

A fent leírt vonalas gyűjtő létesítmények többszörösen kell ki és behaladjanak a hulladéktestbe, megtörve a szigetelő fólia folytonosságát. Erre mutat példát az **6. ábra**.



6. ábra

Vonalas gyűjtő létesítmények a depóniában (Déri et al. Tervezési Segédlet 2002)

A lefektetett szigetelő fólia és a felszínen futó vonalas kialakítású drainek és csövek védelmére általában geotextília réteget terítenek, majd annak felületére általában jó vízvezető képességű néhány tíz centiméter vastagságú 16/32-es mosott kavics réteket építenek ki. A szivárgó réteg feladata a későbbi üzemeltetés során a csurgalékvizet drainekhez vezetése, és az egyenletes terhelés biztosítása a szigetelő felé.

A csőcsatlakozások és aknák szigetelő fóliával történő összedolgozása különös figyelmet igénylő munka. A tapasztalatok szerint e helyeken különösen nagy a fóliahegesztési hibák kialakulásának gyakorisága (Bishop 2002).

2.6. Geomembránok egyéb alkalmazásai hulladéklerakók üzemeltetésekor

A hulladéklerakókat nemcsak aljzatszigetelés szempontjából szokták szigetelő membránokkal borítani, hanem azok lezárásakor a , fedő réteg kialakítására is használják, a csapadékok beszivárgásának minimalizálására (**7. ábra**).

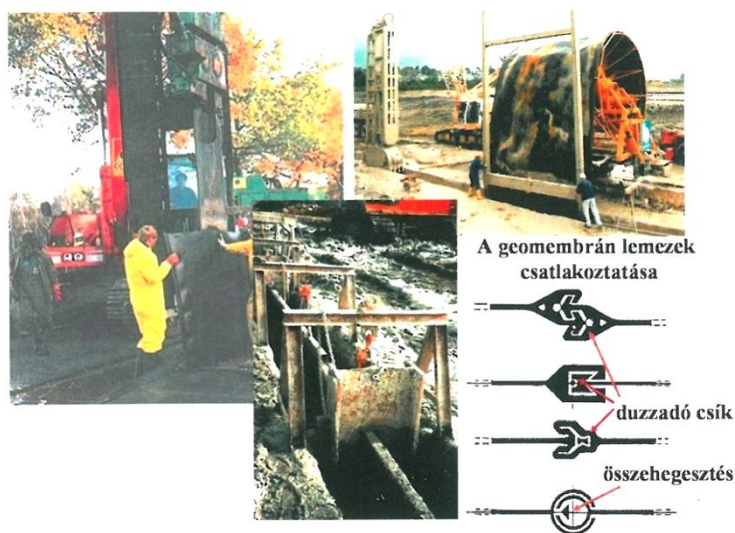


7. ábra

Geomembrán alkalmazása hulladéklerakók lezárásakor (Szabó és Szabó 2012)

A záró geomembrán réteg kialakításakor is fontos követelmény, hogy a bejutó csapadék mennyiségét minimalizálja. A csapadék hulladéktestbe áramlását követően többlet jelenthet az aljzatszigetelő rendszernek, így növelve az esetlegesen talajba szivárgó csurgalékvíz mennyiségét. Fontos megemlíteni, hogy ezen beszivárgó vizek kisebb kockázatot jelentenek a hulladéklerakó üzemeltetése szempontjából, mert a hulladéktestben zajló bomlási folyamatok többlet vízmennyiséget igényelhetnek (Szabó és Szabó 2012).

A geomembránok egy további alkalmazási lehetősége szennyezett területek kármentesítésénél, a függőleges vízzáró falak építése. A körülzárás alap gondolata az, hogy a területet körbevevő vízzáró falat vagy egy vízzáró altalajba, vagy egy mesterségesen kialakított talplemezbe bekötve önálló vízháztartással rendelkező teret hoznak létre, ahonnan megakadályozható a szennyező anyagok kijutása. Ennek beépítésére mutat példát a 8. ábra.



8. ábra

Résfalak kialakítása geomembránok segítségével (Szabó és Szabó 2012)

A teljes vízzáróság érdekében használhatják a geomembrán szigeteléseket tározó medencék kialakításánál is. Tározómedencéket létesíthetnek csapadékvizek tárolására, hígtrágyák és egyéb iszapok deponálására. Felhasználhatóak továbbá mezőgazdasági felületek erózió elleni védelmére, patakmedrek szigetelésére, sósvíz tározók, párologtató medencék aljzatszigetelésére, tároló tartályok belső, külső szigetelésre.

2.7. Hulladéklerakó megfigyelő rendszere

Egy hulladéklerakó bármilyen műszaki állapotban is van mindig potenciális veszélyforrást jelent az ember és környezete számára. A hulladéklerakók biztonságos üzemeltetése érdekében szükség van megfigyelő rendszer kialakítására. A megfigyelő rendszer (monitoring) elemeinek feladata, a depónián belüli változások figyelemmel kísérése, a lerakóból esetlegesen kijutó szennyezőanyagok lehető legrövidebb időn belüli észlelésének és nyomon követésének a biztosítása, az ember és a környező természeti értékek védelme. A megfigyelő rendszer elemeit, a mérések lebonyolításának rendjét, a vizsgálandó paramétereket hulladéklerakónként egyedileg kell meghatározni.

A lerakó üzemelése alatt és bezárása után is folyamatosan ellenőrizni kell (Szabó és Szabó 2012):

- az elsődleges technológiai létesítmények (tárolóterek, műtárgyak) műszaki állapotát, állapotváltozását,
- a tárolóterek szivárgásának megfigyelésére szolgáló eszközök és berendezések működőképességét,

- a lerakótelep védőtávolságán belül a felszín alatti víz minőségét,
- a lerakótelep területéről elvezetett felszíni víz minőségét,
- a levegőszennyező anyagok emisszióját, immisszióját,
- a lerakótelep környezetében a hatásvizsgálatban kijelölt élő szervezetek állapotát és annak változásait,
- a biztonsági célokat szolgáló melléklétesítmények, vízelvezető és vízkezelő rendszerek működőképességét.

A szükséges megfigyelőrendszer elemei két csoportba sorolhatók a lerakó üzemelésével, állapotváltozásával kapcsolatos megfigyelőrendszer, valamint a lerakónak a környezetére gyakorolt hatását figyelő-ellenőrző rendszer.

A hulladéklerakó környezetre gyakorolt hatásait figyelembe véve az alábbi monitoring elemeket szükséges létre hozni (Csőke 2011):

- a szigetelési rendszer működőképességének ellenőrzése,
- talajvíz monitoring,
- levegő monitoring,
- talaj monitoring,
- csurgalékvíz tározó medence ellenőrzése,
- gáz monitoring.

A környezet megóvása érdekében továbbá fontos még tekintettel lenni a lerakó belső változásaira, ezért figyelni kell a hulladéklerakó mozgásmegfigyelő rendszerét, és ellenőrizni a lerakó mechanikai változásait.

Ezek közül csak a szigetelőrendszer működőképességének ellenőrzését szolgáló monitoringgal, azon belül a geofizikai monitoringgal kívánok foglalkozni.

2.8. Szigetelő rendszer működőképességének ellenőrzése

A szigetelő rendszert alapvetően két fő részre lehet bontani, záró és aljzatszigetelő rendszerre. A zárószigetelő-rendszer feladata a hulladéktestbe bejutó csapadékok minimalizálása. Az aljzatszigetelő rendszer a hulladékokból kioldódó szennyeződések visszatartására szolgál. Az aljzatszigetelő rendszeren esetlegesen kijutó szennyezőanyagok észlelése kulcs fontosságú feladat.

A szivárgás észlelésére két alapvetően elfogadott rendszert lehet megkülönböztetni (Déri et al. Tervezési Segédlet 2002):

- ellenőrző szivárgó rendszer,
- geofizikai (geoelektromos) monitoring rendszer.

A talajnedvesség mintavevői lehetnek liziméterek, illetve vákuum-túlnyomásos rendszerű talajnedvesség mintavevők. Célszerű közvetlenül a szigetelőrendszer alá, majd különböző mélységszintekbe telepíteni az észlelő egységeket oly módon, hogy a telítetlen zóna teljes vastagságában ellenőrizhető legyen. A beépítést még a szigetelőrendszer kivitelezése előtt el kell végezni. Történhet továbbá a mérés a szigetelés alatti telítetlen zónában talaj nedvességtartalom változást érzékelő szenzorrendszer segítségével is (Meteolabor AG 2004). Alkalmazása túl költséges, ezért nem túl elterjedt (**9. ábra**) a használata.



9. ábra

TAUPE talajnedvesség érzékelő műszer mérőszalagja (Meteolabor AG 2004)

A szigetelőrendszer alatti telítetlen zónának meghatározó szerepe van abban, hogy a talajvíz/rétegvíz minőségét veszélyeztető szennyezés a telítetlen zónán átszivároghatva képes-e elérni, illetve milyen minőségi változás után éri el a talaj-, vagy rétegvizet.

A geomembrán elemet tartalmazó aljzatszigeteléssel rendelkező hulladéklerakók esetén, a szigetelés hatékonyságának az ellenőrzése főleg indirekt úton történik. Néhány nyugat európai hulladéklerakó esetén előfordulnak nedvességtartalom (Schumann 2002) vagy koncentráció-változást mérő rendszerek a szigetelés alatti telítetlen zónában.

Mindkét módszer a mennyiségi és nem a minőségi változásról (pl. vízminőség) ad információt. Különösen hasznos lehet a módszer a depónia üzemelésének az első éveiben, amikor még a folyamat időben nem állandósult. A permanens folyamat beálltával a talajnedvesség mérésén alapuló technikák már kevesebb értékelhető információt szolgáltatnak. Ugyancsak hasznos lehet alkalmazásuk ott, ahol átszivárgást gyakorlatilag nem engednek meg, mint pl. a többszörös geomembrán-agyag kombinált szigetelő rendszereknél.

3. GEOMEMBRÁN HIBAHELYEK DETEKTÁLÁSÁRA ALKALMAZOTT GEOELEKTROMOS MÉRŐRENDSZEREK-IRODALMI ELŐZMÉNYEK

A geomembránt is tartalmazó kombinált szigetelőrendszerrel rendelkező hulladéklerakók építése a világ fejlett országaiban mintegy három évtizeddel ezelőtt kezdődött meg. Már kezdetben felmerült az első építetőkben a gondolat, hogy szükség lenne olyan „nonivázív” technikák kifejlesztésére, amelyek segítségével biztonságosan megállapíthatóak a geomembrán szigetelés hibahelyei. A „noninvazív” kifejezés arra utal, hogy a lerakótérben elhelyezett hulladék eltávolítása nélkül megállapítható legyen hol találhatóak a szigetelő felületeken a kritikus helyek, zónák. A hibahelyek felkutatása kettébontható kiépítési és üzemeltetési szakaszra. Kiépítési szakaszban, amikor a geomembránok hegesztése történik, főleg vákuum és nagyfeszültségű célműszerekkel végzik a hegesztési varratok ellenőrzését. A geofizikai, azon belül a geoelektromos módszerek első alkalmazási lehetősége a depóniater átadása előtti szakaszban történhet. A depónia átadása előtt a jogszabályi előírásoktól függően szükség lehet a geomembrán integritásának vizsgálatára, vagyis arra, hogy megfelel-e a teljes vízzárósági kritériumnak. A teljes vízzáróság a geomembrán szempontjából a „tökéletes” elektromos elszigeteltséget is kell, hogy jelentse. Egy hulladéklerakó ugyanis csak akkor adható át művelési szakaszba, ha a geomembrán szigetelés teljesíti az áramszökés-mentes állapotot. Az áramszökés-mentes állapot pedig csak tökéletesen zárt geomembrán segítségével érhető el.

Az előírások szerint a geofizikai monitoring rendszert a geomembrán fólia/lemez alá kell telepíteni annak érdekében, hogy detektálható legyen az esetleges geomembrán hibák helyei.

Az elektromos áramszökés elvén alapuló geoelektromos módszereket az angol szakirodalomban ELL (Electrical Leak Location) technikáknak nevezik.

A szigetelési hibák detektálására alkalmazható geoelektromos rendszerek két fő csoportja különböztethető meg (Bishop 2002):

- állandó helyeken, előre beépített fix szenzor rendszerek,
- mobil elektromos hibahely kereső eljárások.

A két felsorolt módszer között az üzemeltetés módja a legfőbb különbség. Az előre beépített rendszer esetén, komoly költségen szükséges beépíteni a hálószerűen telepített érzékelőket. Az érzékelőkön mérhető vezetőképesség-fajlagos ellenállás értékeket, a huzalozási hálózaton keresztül, egy automatizált mérőrendszer meghatározott időközönként kiolvassa és az üzemeltető a kiértékeli a változásokat. Kiépítés után az előre

beépített rendszer üzemeltetése gyors, automatizálható, az eredmények kiértékelése szakember által egyszerűbben elvégezhető. A hulladékkal való fizikai érintkezés elkerülhető, hiszen az érzékelők még a hulladékok behordása előtt beépítésre kerültek a geomembrán alá.

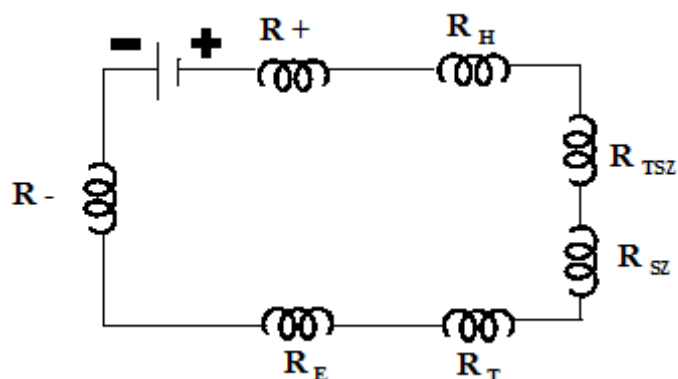
Ezzel szemben a mobil elektromos hibahely kereső módszer nem igényli a költséges érzékelő rendszer beépítését. A mobil technika az előre beépítettel ellentétben a hulladékok felszínén elhelyezett elektródák segítségével gyűjti össze a szigetelésre vonatkozó fajlagos ellenállás adatokat. Alkalmazása erőteljesen időjárás függő. Az elektródák hulladékfelszíni elhelyezéséhez szükség van valamilyen szintű fizikai kontaktusra a hulladékkal. Kiértékelése bonyolult, nagy tapasztalatot igénylő feladat. Léteznek olyan geomembrán szigeteléssel rendelkező hulladéklerakók, ahol nem készült előre beépített monitoring rendszer vagy az üzemeltetés során a rendszer megsérült, tönkrement. Ekkor szükség lehet a mobil geoelektromos hibahely kereső módszer alkalmazására is.

Azért, hogy az átmeneti ellenállások befolyását elkerüljük, a geoelektromos gyakorlatban általánosan alkalmazott külön mérőelektróddával (elektródákkal) mérjük a potenciált vagy potenciál különbséget. Amennyiben nincs hibahely a geomembrán felszínén az áramsűrűség eloszlása egyenletes az egész lerakótér felszínén. A kialakuló áramerősséget és potenciál-eloszlást befolyásolják a következők: fóliára fektetett rétegek mérete, alakja, vastagsága, inhomogenitása, az árambevezető elektróda elhelyezkedése, a behordott fedőrétegek inhomogenitása, a lerakó térben futó csövek, az altalaj változékonysága, a hulladéklerakó geometriai viszonyai, a sarkak, élek, padkák helyzete.

A méréshez használatos áramforrások lehetnek egyen vagy váltakozó feszültségű berendezések (Bishop 2002). 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 (Darillek és Parra 1988).

Darillek és Parra (1988) az EPA (U.S. Environmental Protection Agency) számára készített tanulmányban mutattak rá arra, hogy a hulladéklerakók felszínén végzett geomembrán hibahely kereső geoelektromos méréseknél előnyösebb, ha a méréseket egyenáramú forrás segítségével végzik. Ezért vizsgálataiban egyenfeszültségű mérési rendszerek előremodellezését és terepi mérési adatainak feldolgozását végeztem.

A **10. ábra** a mindkét féle geomembrán hibahely kereső technikánál érvényes áramkör fő elemeit mutatja be:



10. ábra

Geomembrán hibák detektálásánál alkalmazott geoelektromos mérőrendszerek áramköri elemei (Baracza 2012)

ahol, R_+ ; R_- átmeneti ellenállás (az árambevezető és nyelő elektróda felületén), R_H hulladék ellenállása (hulladéktest átlagos fajlagos ellenállásértéke), R_{TSZ} a szivárgó réteg ellenállása, R_{SZ} a geomembrán szigetelő ellenállása, R_T az altalaj ellenállása, R_E az elektródák ellenállása (az árambevezető és nyelő elektróda anyagának az ellenállása).

A 10. ábra alapján a kialakuló áramerősség az áramkörben:

$$I = \frac{U}{R_+ + R_H + R_{TSZ} + R_{SZ} + R_T + R_E + R_-} \quad (1)$$

Sok esetben a terepen használt egyenfeszültségű áramforrások akkumulátorok.

Mérések alkalmával fontos a forráselektrodák elhelyezésének a megválasztása, illetve kiképezése, mert különösen inhomogén hulladéktest esetén, a hulladékon átfolyó áram erőssége az elektródától távolodva gyorsan csökken. A hulladéktestbe vezetett elektromos áram mindig a legkisebb ellenállású úton keresztül próbája zárni az áramkört (Darillek és Laine 1999).

Fontos szempont, hogy a hulladéklerakó aljzatszigetelésének felszínre kibúvó váll részét, teljesen le kell takarítani (11. ábra) annak érdekében, hogy az áramszőkési effektus ne a felszíni hanyag letakarítás miatt megmaradt „áramhídon” keresztül valósuljon meg.



11. ábra

Letisztított szigetelő felületek a hulladéklerakó peremén (Hansen és Beck 2009)

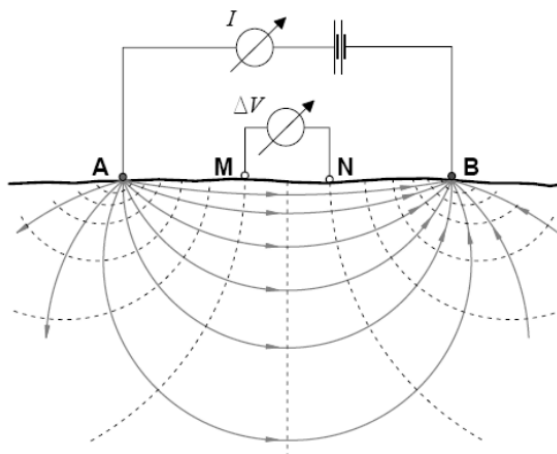
Mérések alkalmával minden olyan tárgyat, vezetéket el kell távolítani a hulladéklerakó pereméről, ami képes kivezetni a mérőáramot a körülszigetelt területről. Ha ez nem történik meg körültekintő módon, hibás következtetések vonhatók le kiértékeléskor (Frangos 1997).

3.1. Hulladéklerakók geoelektromos vizsgálatainál alkalmazott elektróda elrendezések

A gyakorlatban alkalmazott geofizikai vizsgálatok kiválasztásának legfőbb szempontja, hogy a felhasznált módszer képes legyen a vizsgált objektumon belül kimutatni azt a paramétert, amit tanulmányozni szeretnénk. Jelen esetben a geomembrán felületének hiba helyeit keressük. Az geomembrán aljzatszigeteléssel nem rendelkező hulladéklerakók felszínén többnyire Vertikális Elektromos Szondázást (VESZ) hajtanak végre, aminek segítségével elkülöníthetők a lerakott hulladékok inhomogenitásai, illetve kijelölhetőek a hulladéktest fenékszintjei (Aristodemou és Thomas-Betts 2000). A VESZ mellett, tomografikus vizsgálatokat is végezhetnek, amikor a hulladéktestet különböző fizikai elven átvilágítva (pl. elektromos, szeizmikus) állapítják meg a hulladéklerakó egyes rétegeparamétereinek határfelületeit, fizikai tulajdonágait (Binley et. al. 1999).

A geoelektromos vizsgálatoknál leginkább alkalmazott elektróda konfiguráció a hagyományos négyelektródás elrendezés. Ezek közül a Schlumberger, Wenner, Dipol

axiális elrendezések fordulnak elő legtöbbször. Hagyományos négyelektródás elrendezés sematikus képét a **12. ábrán** láthatjuk.

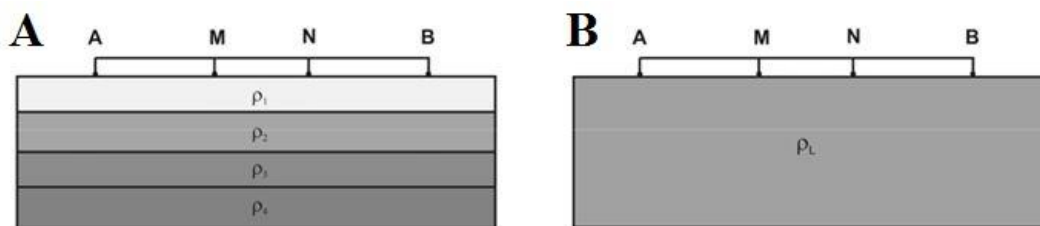


12. ábra
Négyelektródás elrendezés

A mérés során két tápelektrodán (AB) áramot juttatunk a talajba, a kialakult potenciálkülönbséget két mérőelektrodán mérjük (MN). Egyenáramú elektromos mérések esetén a pontforrás potenciálja homogén féltér felett:

$$U = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2)$$

Az áramerősség és a feszültség mértékének ismeretében adott mérési elrendezés mellett a látszólagos fajlagos ellenállás (ρ_L) kiszámítható (**13. ábra**).



13. ábra

Látszólagos fajlagos ellenállás értelmezése felszíni egyenáramú mérések során

A) Valódi fajlagos ellenállásokat tartalmazó modell; B) Látszólagos fajlagos ellenállást tartalmazó modell

A felszíni egyenáramú mérések során különböző fajlagos ellenállású közetekben (pl. $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$) halad az áram. Azonban ezeknek a rétegeknek a valódi fajlagos ellenállását nem ismerjük. Az általunk mért látszólagos fajlagos ellenállás (ρ_L) azt fejezi ki, mintha az áram által átjárt közeg homogén ρ_L fajlagos ellenállású közettet lenne. Számítása:

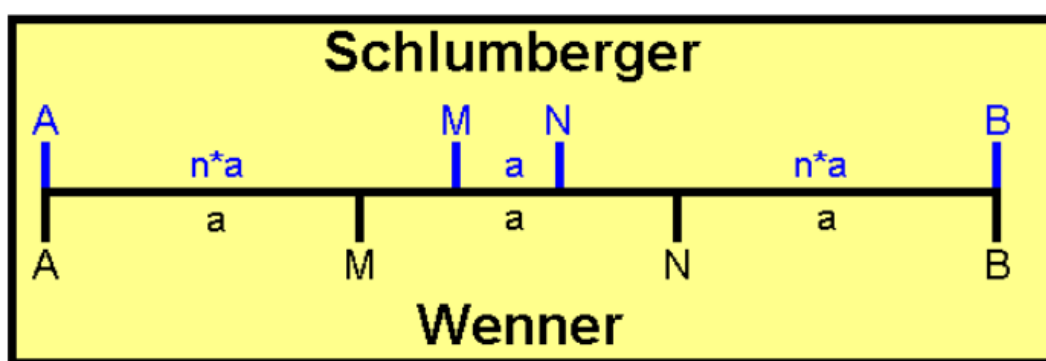
$$\rho_L = K \frac{\Delta U}{I} \quad (3)$$

ahol, K a geometriai tényező, ΔU a mérőelektrodák között mért feszültség, I a mérhető áramerősség.

A mérési elrendezés hatását a K geometriai tényező foglalja magába. Ahol AM, BM, AN, BN elektrodák közti távolságot jelenti.

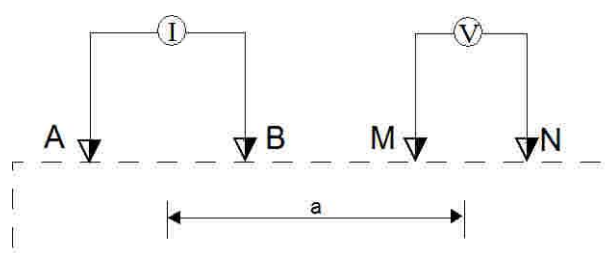
$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (4)$$

Wenner elrendezés esetén AM, MN, BN távolságok egyelők, Schlumberger elrendezés esetén AM és NB többszöröse MN-nek, melyet a **14. ábra** szemléltet.



14. ábra
A Wenner és a Schlumberger elrendezés

Dipol axiális elrendezés esetén az AB áramelektrodák és MN mérőelektrodák közötti távolságokat állandó értéken tartjuk, míg az AB és MN elektrodapáros középvonala közti távolságot változtatjuk (**15. ábra**).



15. ábra
A Dipol axiális elrendezés

Amennyiben a fenti három konfiguráció valamelyikével végzünk méréseket a geomembrán szigeteléssel rendelkező hulladéklerakó felszínén, akkor mindhárom konfiguráció elektrodái az elszigetelt térszínen belül találhatóak, így a kialakuló áramkör a hulladékon

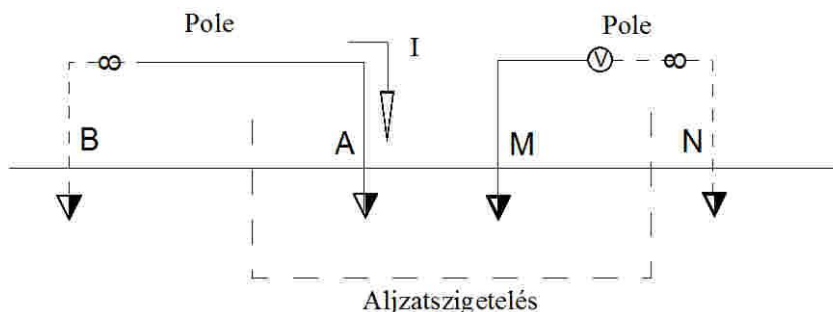
belül zárul, ezért a mérések nem érzékenyek a szigetelési hibákra. Érzékenyek lehetnek viszont a hulladék belső inhomogenitásaira, belső üregeire.

Különböző elektródakonfigurációk a szigetelt téren kívül is elhelyezhetők, de azok nem érzékenyek a szigetelés hibahelyeinek felkutatására, mert az elektromos áram mindig a jól vezető szakaszok felé próbál folyni. A nagy ellenállású szigetelés viszont ezzel a fizikai elvvel ellentétes hatású. A geomembrán hibák kimutatására ezért olyan elektróda elrendezéseket célszerű alkalmazni, amelyek áramköre a szigetelt téren belülről indul, és azon kívül záródik.

Léteznek továbbá ún. egyenáramú null-elrendezések, amelyekben a mérőelektródáknak a tápelektródákhoz viszonyított helyzete olyan, hogy a homogén féltér felszínén a mérőelektródák között mért potenciál-különbség nulla (Szalai 2002). Inhomogén esetben a homogénre viszonyított eltérés akár végtelen nagyságú jelet is eredményezhet. Ezen speciális elektróda elrendezések segítségével nagy érzékenységek érhetők el a vizsgált fajlagos ellenállás paraméterekre. A null-elrendezések kettébonthatóak normál és fókuszált elrendezésekre.

Dolgozatomban többféle olyan null mérési rendszert vizsgáltam, amelynek lényege, hogy a null potenciál értéke abból a speciális helyzetből adódik, hogy az AB áramelektrodát szigetelő réteg választja el egymástól.

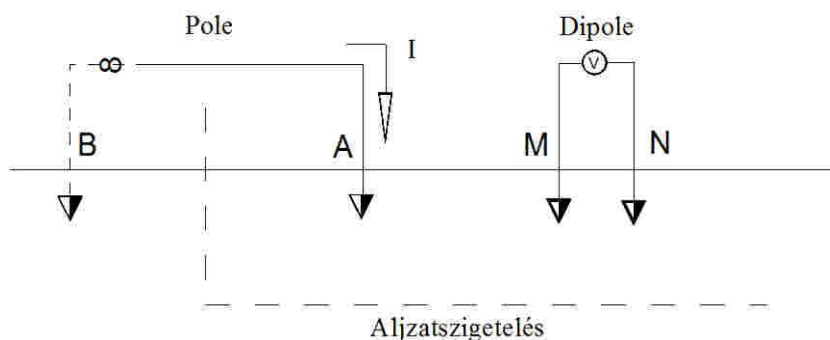
Pole-Pole elektróda elrendezés esetén az áram bevezetése az elszigetelt hulladéktestbe az (A) áramelektroda segítségével történik. Az áramelektroda-pár másik tagja (B) nyelő, a lerakótéren kívül a kvázi végtelenben helyezkedik el. Pole-Pole elrendezésnél a mérőelektróda-pár egyik tagja (M) az elszigetelt hulladéktest felszínén mozog, párja az (N) elektróda kvázi végtelenben található a hulladéklerakón kívül. Pole-Pole elektróda elrendezés sematikus vázlatát a **16. ábra** mutatja.



16. ábra
A Pole-Pole (kételektrodás) elektróda elrendezés

A tápelektródán bevezetett áram a hulladéktest alatti geomembrán hibán, vagy a nagy fajlagos ellenállású aljzatszigetelésen áthaladva (amely igen nagy felület) zárja az áramkört. A kialakuló áramerősség jelentősen függ a hulladék nedvességtartalmától és a hiba vagy hibahelyek nagyságától. A gerjesztés hatására a hulladék felszínén kialakuló potenciálértékeket hulladékba szúrt mérő, vagy más néven referencia elektród segítségével mérhetjük meg. A mérőelektród párja az elszigetelt térrészen kívül helyezkedik el a kvázi végtelenben. A méréseket szelvényvonalak mentén érdemes végezni. A mérés felbontóképessége növelhető a mérési vonalak és mérési pontok minél sűrűbb elhelyezésével.

Pole-Dipole elektróda konfiguráció esetében a **17. ábra** mutatja az elektródák helyzetét.



17. ábra
A Pole-Dipole elektróda elrendezés

A hulladékfelszínen a mérés kivitelezése egy áram és egy mérő dipólus segítségével történik. Az (A) forrás elektródára áramot kapcsolva mesterséges áramteret hozunk létre az elszigetelt térrészen belül, amelynek árama arra törekszik, hogy záródjon a lerakótéren kívül a végtelenben elhelyezett (B) nyelő elektródával. A mérő, vagy potenciál elektródákat (M és N) szintén a hulladékfelszínén mozgatjuk mérőpontról mérőpontra. A mérő dipólus távolsága változtatható annak függvényében, hogy mennyire szükséges növelni a mérés felbontó képességét, illetve milyen mélységben található a szigetelő fólia. A mérési pontok a feltételezett hibahelyek környezetében sűrűsíthetők. A könnyebb kiértékelés érdekében a mérő dipólusok távolságát egy adott térképezési mérés során állandó értéken célszerű tartani.

A mérések kivitelezése szelvényvonalak mentén történik. A szelvényvonalak közti távolságok sűrűsíthetők, 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.

Hibamentes esetben a terület felett mért potenciál adatok eloszlása normál lefutású, értékeikben kiugró értékek nem találhatók meg.

Geomembrán szigetelőréteggel ellátott hulladéklerakók esetén, számos kutató (Frangos 1997, Taylor et al. 1999, Loke 1999, Bishop 2002) próbálkozott különböző elektródaelrendezésekkel geomembrán hibahelyeket kimutatni. Vizsgálataikban rámutatnak, hogy a Pole-Pole és a Pole-Dipole konfigurációk mutatkoznak a legérzékenyebbné a hibahelyek kimutatására.

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, azaz kimutathatatlaná válhat a hibának a helye a fólián (Sirieix et al. 2012, Bishop 2002).

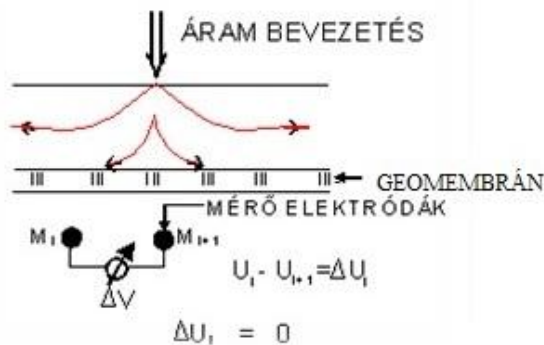
3.2. Állandó helyeken, előre beépített fix szenzor rendszerek

A hulladéklerakóknál alkalmazott geomembrán lemez állapot felmérésére már közel húsz éve alkalmaznak geofizikai méréseket világszerte, így Magyarországon is.

Az állandó (előre beépített) módszert képviselő geoelektromos monitoring rendszer legfőbb előnye az építési fázist követő időszakban, illetve a lerakó üzemeltetés első periódusában van. Mondható ez azért, mert csak nagyon indokolt esetben kezdenek bele (még ismert hibahely esetén is) a hulladékok kiásásába annak érdekében, hogy a geomembrán hibája kijavítható legyen. Kockázatos és balesetveszélyes feladat egy instabil, esetlegesen több tíz méter vastag hulladéktestben egy olyan kutató gödröt ásni, amelyen keresztül kijavítható a hibahely. Az előre beépített geoelektromos szenzor rendszer, hasonlóan a mobil hibahely kereső módszerhez, a geomembránok szigetelő tulajdonságait kihasználva szolgáltat információt a szigetelés állapotáról.

Az állandó helyeken előre beépített érzékelők segítségével végzett mérések azt jelentik, hogy a szigetelőréteg alá hálószerűen elhelyezett elektródákat, szenzorokat telepítenek, melyek időszakos vagy folyamatos monitoring lehetőséget biztosítanak a hulladéklerakó üzemeltetői számára, hogy meggyőződjenek a szivárgás mentességéről.

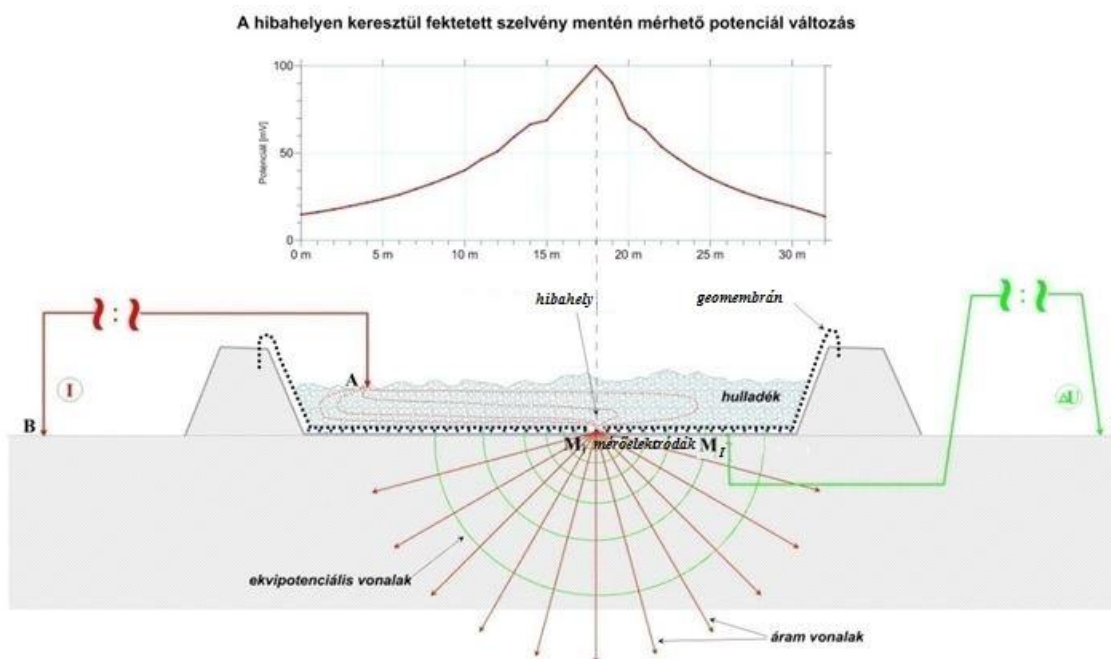
A monitoring rendszereknél használt geoelektromos módszer arra a fizikai alapra épít, hogy a mechanikailag szigetelő geomembrán pl. nagysűrűségű polietilén HDPE, elektromosan szinte tökéletes szigetelő. Kiváló áramszigetelési tulajdonságai miatt, a geomembrán két oldalára (alá és fölé) elhelyezett áramelektroda-pár között hibátlan geomembránon keresztül nem folyhat áram. Elvét a **18. ábra** mutatja be.



18. ábra

A hibátlan geomembrán felett kialakuló elektromos áramvonalkép (KBFI Triász Kft.)

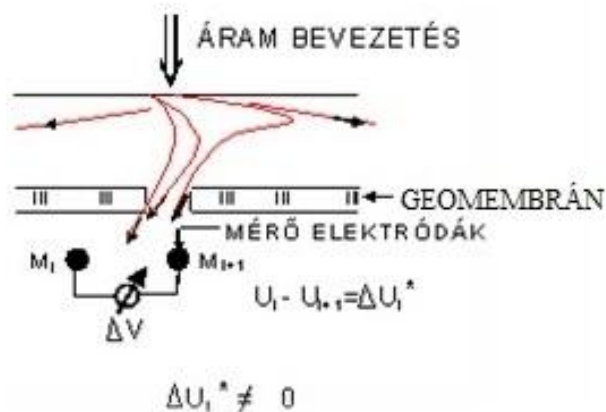
Ehhez az szükséges, hogy az egyik áramelektroda a szigetelőfóliával a környezetétől teljesen elzárt térrész fölé kerüljön, a másik pedig azon kívülre egy kvázi végtelen pontba. Ebben az elrendezésben hibátlan geomembrán esetén „nem képes záródni” az áramkör, ezért nem folyik áram. A valóságban mindig mérhető, különböző intenzitású zaj, de ezeken kívül szignifikáns potenciálkülönbség nem mérhető a szigetelő fólia alatt, vagy felett elhelyezett (pontszerűen vagy vonalszerűen elhelyezett) mérőelektrodák között (19. ábra).



19. ábra

Előre beépített szenzor rendszer sematikus rajza (KBFI Triász Kft.)

Amennyiben hibás a geomembrán, szignifikáns mérőáram képes átfolyni az árambevezető elektródapár között és ennek megfelelően a mérőelektródákon az átfolyó áram nagyságának megfelelő potenciálkülönbség mérhető. Ennek sematikus bemutatása a **20. ábrán** látható.



20. ábra

A hiba hatására kialakuló elektromos áramvonalkép (KBFI Triász Kft.)

Előre beépített geoelektromos mérőrendszer esetén szisztematikusan végzett mérésekkel detektálni lehet a geomembrán hibahelyeit. A geoelektromos mérések nyújtotta információk segítségével pontosan és költséghatékonyan határozhatóak meg az üzemeltetés során felmerülő szivárgási helyek. Ez nagyon fontos, mert a lerakók üzemelése során több méteres vastagságú hulladék alatt a mai gyakorlat szerint nehezen - vagy egyáltalán nem - javíthatók a fólián keletkezett sérülések. Ez igaz még abban az esetben is, ha a hiba helye pontosan ismert. Ilyen esetben kis szennyezés terjedési sebesség esetén, vagy veszélytelen irányban történő áramlás esetén, hosszú évekig nem jelent veszélyt a fólia meghibásodása (Kovács 2007). Mind a fólia, mind a fólia alatti talaj állapotának a vizsgálatához speciális, szigorú technológiai szabályok betartása mellett telepített érzékelő rendszerre, pontos, gyors, számítógéppel vezérelt mérőberendezésre és a mérési adatok értelmezéséhez, feldolgozásához egyedi fejlesztésű, hatékony számítógépes programokra van szükség.

A geoelektromos monitoring rendszer részei:

- hálószerűen elhelyezett pont és vonalelektrodák rendszere,
- az elektródák (szenzorok) közti kapcsolatot biztosító kábelek, kapcsoló eszközök,
- a mérést vezérlő és az adatgyűjtést végző számítógép,
- a két kiválasztott elektróda közé áramot kibocsátó forrás.

Érzékelő rendszer egy és két fóliaréteg esetében egyaránt telepíthető. A két fólia réteg sérülése így külön-külön regisztrálható. A monitoring rendszer üzemeltetése során a rendszeres mérések egymással történő összehasonlításából azonnal következtetni lehet a szigetelőréteg meghibásodására. Az aljzatszigetelő alá beépített monitoring rendszer méréseiből származtatott fajlagos ellenállás lokális megváltozását jórészt a depóniából elszivárgott csurgalékvíz okozhatja.

A mérések megvalósítása automatizálható, azaz a mérési adatok összegyűjtése egy programvezérelt automata adatgyűjtő segítségével, tetszőleges elektróda konfigurációban hajthatók végre.

Az üzemeltetés időszakához tartozó méréseket minden esetben megelőzi a bázisállapot felvétele. Bázismérések alkalmával a forráselektroda egyes pozícióinak felvétele a geomembrán felületére ráterített szivárgó réteg felszínén zajlik. Száraz felszínű szivárgó, vagy hulladék rétegen keresztül történő mérések esetén, a nagy átmeneti ellenállások miatt nem képes kialakulni az áram. Ilyen esetekben még a nagyméretű hibahely kimutatása sem lehetséges, ezért fontos a talajnedvesség jelenléte. Az altalaj vagy természetes alapú szigetelőréteg fajlagos ellenállástérképének alapállapot felmérését általában Wenner elrendezéssel célszerű elvégezni.

A besajtolható áram növelése érdekében praktikusán a felületek nedvesítése előzi meg a mérést száraz időjárási körülmények között. Alapállapot mérések alkalmával kivitelezéskori állapotban az (A) forráselektroda a szivárgó réteg felszínébe szúrva helyezik el. Ezen kezdeti állapotban a forráselektroda szivárgó rétegbe szúrása nagy körülményt igénylő feladat, nehogy ekkor alakuljon ki hiba a geomembrán felületén. Bázismérések felvételekor, ha gyanú merül fel a hibára, célszerű a vizsgált területet parcellákra osztani. A parcellákon belül sűrű lépésközű forráselektroda kiosztással hálószerűen mérik fel a területet. Az áramelektroda a hibahelyekhez közeledve egyre növekvő potenciálértékeket produkál a mérőelektrodákon. A geomembrán alatt elhelyezett mérőelektrodák általában korracélból készült túske alakú elektrodákat jelentenek. Átmérőjük a kiépítést végző cégtől függően 6-10 mm. Az elektrodákhoz PVC szigetelésű rézvezetékeket csatlakoztatnak, melyek forrasztással csatlakoznak össze. A forrasztás védelmére műgyanta bevonatot képeznek a csatlakozási területen. A mérőelektrodák hálószerű kiosztása általában 5m*5m-es háló mentén történik. Előfordulnak gazdasági megfontolásból ritkább elektrodahálóval rendelkező hulladéklerakók is, de ezen mérőrendszerek geofizikai értelmezése sokkal nehezkesebb, mint egy sűrű rácskiosztású mérőháló esetén.

Az altalaj és a hulladékban tapasztalható inhomogenitások miatt, célszerű minél sűrűbb mérőelektróda hálózatot kiépíteni a hulladéklerakó alá, de ezen igényeket sokszor felülbírálják a gazdaságossági megfontolások. A hulladéklerakó kiépítéséhez használt anyagok ismeretében, szükséges lehet az alapállapot felvételét segítő kiegészítő elektródaháló beépítésére. Tisztán száraz, mosott kavics anyagú szivárgó réteg esetén, megfelelő mennyiségű nedvesség hiányában nem képes folyni a mérőelektródán keresztül a vizsgáló elektromos áram. Az átmeneti segédelektróda rendszert a geomembrán felszínére ráterített geotextília felületéhez erősítik. A segéd elektródák anyaga általában jól vezető vörösréz. Hozzájuk lágyforrasztással kapcsolt PVC érszigetelésű rézvezetékek csatlakoznak, melyek kábelfüzekbe egyesítve haladnak a lerakó szélén elhelyezett kapcsolótábla kivezetéseihez. A segédelektróda háló lépésköze viszonylag ritka, akár 10-15m is lehet. Jelentősége a hulladékok behordása előtt van, utána az agresszív csurgalékvíz hatására kialakuló korrózió hamar tönkre teszi. A szigetelő felületre terített geotextília a geomembrán mechanikai védelmét szolgálja. A kiépítéskor végzett bázismérésekhez alapján állapítható meg biztonságosan, hogy a hulladéklerakó aljzatszigetelésén keresztül történik-e szivárgás, és ha igen akkor merre található a problémás terület. Sokszor a bázisállapot kiértékelését nehezíti, hogy a geomembrán alatt elhelyezkedő természetes településű agyagok rendkívül inhomogén összetételűek. Az agyagfelszínen mérhető fajlagos ellenállás értékek között azonos víztartalom mellett, akár több tíz ohmm különbségek is előfordulhatnak. Ezen természetes fajlagos ellenállás anomáliák feltérképezése is bázismérések alkalmával kerül sor.

Mindkét vizsgálati technika (az előre beépített és a mobil mérőrendszerek) működésének feltétele, hogy a geoelektromos szigetelő geomembrán megvalósítsa a hulladéktest körül a „kvázi tökéletes” elszigetelést a befogadó geológiai környezet határán. Ha e fontos feltétel nem teljesül, akkor nem lehet meghatározni áramszökés elvén megvalósított méréssel, hogy a fólia szigetelése hibamentes vagy sem.

Az előre beépített geoelektromos mérőrendszer hátránya, hogy kiépítése rendkívül költséges, valamint a szenzorrendszer meghibásodása esetén, az utólagos javítás bonyolult, költséges, szinte javíthatatlan (Hix 1998).

3.3. Mobil geoelektromos hibahely-kereső módszer

A mobil geoelektromos hibahely-kereső módszert alkalmazhatják a geomembrán felület összehegesztése után a kivitelezési időszakban (amikor a védő, vagy szivárgó réteget

ráterítik a geomembránra), vagy az üzemeltetés időszakában is (hulladékfelszínen). A hulladékfelszínről történő mobil hibakeresési módszert a nehéz kivitelezési és kiértékelési sajátosságok miatt, eddig csak szűk körben, próbaszerűen alkalmazták. A mobil hibahelykeresési geoelektromos mérések általában a hulladéktest felszínén végezhetőek el, de akadnak próbálkozások a hulladékfelszínről mélyen beszúrt elektródákkal is, de ekkor pontosan ismert kell legyen a lerakott hulladék vastagsága. Fontos feltétel az előre beépített elektródarendszerekhez hasonlóan a hulladékok környezetüktől való igen jó elektromos elszigeteltsége, melyet modern hulladéklerakók esetén a HDPE anyagú geomembrán biztosít. A legfőbb különbség a beépített szenzorrendszerhez képest, hogy nincsenek a geomembrán alá telepített elektródák, melyeket vezetékhalózat segítségével vezetnek ki a hulladéklerakó szélén elhelyezett mérőszekrénybe. Torzítja a lerakó felett mért potenciál, vagy abból számolt fajlagos ellenállások eloszlásképét a hulladékbehordó rámpa, vagy vezető anyagból készült feszítő horgony. A mérések kivitelezése a 3.1 fejezetben ismertetett módon történik. Fontos feltétel a belső térben elhelyezett forrás és a külső tér kvázi végtelen pontjában elhelyezett nyelő, amely ahhoz szükséges, hogy az elektróda elrendezés kellően érzékeny legyen a hiba hatására kialakuló anomália feltérképezésére. Egy geomembrán szigeteléssel ellátott kaliforniai sósvíztároló medencén, amely extrém arid klímájú területen fekszik, szivárgásvizsgálatokat végeztek mobil hibahelykereső geoelektromos eljárás segítségével. A vízszint csökkenéséből következtetni lehetett a hibára. A sósvízzel telt térbe helyezett tápelektrodán keresztül mégsem folyt ki csak minimális mennyiségű elektromos áram a külső térben elhelyezett nyelő elektróda felé. A szivárgási hely csak az esős idő megérkeztével volt kimutatható, mert a geomembrán hiba alatt elhelyezkedő szivárgási csóva csak akkor kapcsolódott bele a mélyebben fekvő nedves talajrétegbe. A tározókazetta alatti száraz talajréteg jó szigetelőként megakadályozta az elektromos áram átfolyását a nyelő elektróda felé (Bishop 2002). A dolgozatom célja, hogy a mobil hibakeresési módszer segítségével mérhető adatok feldolgozásával vizsgálhatóak legyenek a mai kor követelményeinek megfelelő kombinált szigeteléssel ellátott hulladéklerakók geoelektromos sajátosságai és kimutathatóak legyenek a geomembrán szigetelőrendszerük hibahelyei.

4. HULLADÉKLERAKÓK GEOELEKTROMOS MODELLEZÉSE

A geofizikai gyakorlatban gyakran alkalmaznak modelleket a vizsgált földtani szerkezetek, objektumok megismerése céljából. A modellek felépítésekor többféle fizikai tulajdonság (paraméter) vehető figyelembe. Léteznek olyan modellek, amelyek egy fajta fizikai tulajdonságot reprezentálnak, mások többféle fizikai tulajdonságot egyesítenek. Geofizikai szempontból ilyen fizikai tulajdonságok lehetnek beépítve az elektromos, mágneses, szeizmikus, stb. modellbe. Kiterjedésük szerint lehetnek 1-2-3 dimenziósak.

A modellezett térrész vonatkozhat egy nagy kiterjedésű területre és a tér egy egész kicsi szegmensére.

A modellek felépítéséhez szükség van a modellezni kívánt térrész minél jobb megismerésére, az elérhető legtöbb információ beszerzésére. A modellek lehetnek egyszerű felépítésűek, melyek homogén izotróp tulajdonságokkal rendelkező térrészeket helyettesítenek. Összetettségük egyre növelhető a bennük elhelyezett inhomogenitások beépítésével, ezek viszont nehezíthetik a problémamegoldást.

A hulladéklerakók nagyon bonyolult objektumok geoelektromos szempontból. A behordott hulladékok struktúrája, inhomogenitása, erősen eltér a természetben tapasztalható rétegződésektől. A modellek felépítéséhez különböző fizikai paramétereket vehetünk figyelembe. A modellezni kívánt fizikai paraméterek kiválasztásakor mindig azokat a jellemzőket érdemes bevonni a modellezésbe, amelyek a vizsgált módszer szempontjából jól jellemzik az objektumot. Hulladéklerakók szigetelésének vizsgálatánál ezek a paraméterek pl. a vezetőképesség, a fajlagos ellenállás, a dielektromos állandó, stb. Modellalkotásakor mindig szükséges megadni a jellemzett objektum külső és belső inhomogenitásainak geometriai kiterjedését, határfelületeit. A modellezni kívánt objektumok lehetnek 1-2-3 dimenziós kiterjedésűek és ezek kombinációja. Geomembrán szigeteléssel ellátott hulladéklerakók bonyolultságuknál fogva csak 3-D (3 dimenziós) modellezéssel vizsgálhatók a minél pontosabb megismerés érdekében. A számítástechnika fejlődése új fejezetet nyitott a geofizikai előremodellezés, adatfeldolgozás területén is. A számítógépek megnövekedett kapacitása és gyorsasága, korábban kezelhetetlennek tűnő komplexitású problémák megoldását tette lehetővé. A fejlődés üteme egyre gyorsul, a jövőben még bonyolultabb, a valóságot egyre jobban közelítő modellek megalkotása is lehetővé válik. Jelenleg azonban mindig szükség van egyszerűsítésekre a kezelhetőség és könnyebb feldolgozhatóság érdekében.

Hulladéklerakók modellezésekor a hulladéktest egészét homogén eloszlású tartományként számíthatjuk, amely pl. monodepóniák modellezésekor nem jelent problémát. Ilyen monodepóniák pl. a vörös iszap tárolására szolgáló tároló terek, vagy sósvíz, hígtrágya tárolására szolgáló geomembrán szigetelésű medencék. A felépített hulladéklerakó modelleket számos lerakó esetén, tovább kell bonyolítani a tárolótéren belül blokkosan, vagy sztochasztikusan változó inhomogenitások elhelyezésével. Az inhomogenitások modellbe építésekor nem csak a fizikai paraméterei változtathatók, hanem azok geometriája (kiterjedése, alakja) is. A modellekbe épített inhomogenitások reprezentálhatnak jó és rosszvezető tulajdonságú anyagokat is. Jó vezetők lehetnek pl. fémek, vashordók, sok agyagot tartalmazó hulladékok, szerves anyagokat tartalmazó iszapok, stb., míg rossz vezetők pl. a betontömbök, a műanyagok, vagy a levegővel kitöltött üregek, stb.

A **4. táblázat**, a hulladéklerakók üzemeltetésekor gyakran előforduló anyag fajlagos ellenállás értékeit mutatja. A táblázatból látható, hogy a fémek bizonyulnak a legjobb áramvezetőnek, ezért fajlagos ellenállásuk igen alacsony értéket mutat. Kis fajlagos ellenállással rendelkeznek a táblázatban felsorolt azon az anyagok, amelyek sok vizet tartalmaznak, és/vagy hozzájuk kapcsolódó vízben sok oldott ion található. Legkisebb a vezetőképessége a levegőnek és a mesterséges szigetelőnek használt műanyagoknak.

| Kőzet, anyagfajta neve | Fajlagos ellenállás [ohmm] |
|---------------------------------|----------------------------|
| Levegő | $>10^9$ |
| Desztillált víz | 108 |
| Sósvíz 3% | 0,15 |
| Csurgalékvíz | 0,1-1,5 |
| Nedves talaj | 10-30 |
| Felső talajréteg | 50-300 |
| Agyag | 5 - 30 |
| Agyagmárga, márga | 5 - 50 |
| Bentonit, kaolin | 1 - 10 |
| Vizes kavics | 50 - 1000 |
| Száraz kavics | 100 - 10000 |
| Száraz homok | 50 - 1000 |
| Vizes homok | 50 - 100 |
| Homokkő | 100 - 2000 |
| Mészkö, dolomit | 100- 5000 |
| Gránit | 200 - 10000 |
| Bazalt, andezit | 200 - 10000 |
| Réz elektróda | $1,7 \cdot 10^{-8}$ |
| Nagy sűrűségű polietilén (HDPE) | $10^{11}-10^{14}$ |
| Polivinil-klorid (PVC) | 10^9 |

4. táblázat

Néhány jellegzetes hulladéklerakóban előforduló anyag fajlagos ellenállása (Frangos 1997, Darillek és Parra 1988, Loke 1999, Bishop 2002)

A táblázatban nem szerepelnek az 5-1000 ohmm-es tartományban a több komponensű hulladékok fajlagos ellenállás értékei, mert jelentősen változnak a víztartalomtól, a hulladékok anyagától és a hulladék korától. Kis fajlagos ellenállás értékkel jellemezhetőek a szennyezett agyagok, híg trágyák, sok bomló szerves anyagot tartalmazó hulladékok. Nagyobb fajlagos ellenállás értéket mutatnak az építési törmelékek és a csomagoló anyagként használt műanyag hulladékok. A nem tisztán egy fajta hulladék deponálására szolgáló hulladéklerakók (pl. kommunális hulladék-lerakók), a változó anyagminőségű és

lerakási geometriájú hulladékok miatt, inhomogén összetételű hulladéktestnek tekinthetők. A Geofizikai Tanszék által korábban a nyékládházai kommunális hulladék-lerakók felett mért látszólagos fajlagos ellenállás adatai alapján, ezen vegyes összetételű kommunális hulladékok átlagos fajlagos ellenállása 10-50 ohmm közötti tartományba esik, de egyes inhomogenitás értékei elérhetik a több száz ohmm-t is (pl. betontömb). Az átlagos látszólagos fajlagos ellenállás értéktől való növekedés száraz körülmények között, az átlagtól való csökkenés viszont nedves körülmények között figyelhető meg.

Modellezés szempontjából a problémát az algoritmusok alkalmazásában vékony, a szomszédos rétegektől nagy kontrasztokkal elkülönülő rétegek beépítése jelentheti. Nem minden modellezési algoritmus „tolerálja” a nagy inhomogenitással rendelkező modell elemek kezelését.

Geoelektromos szempontból elszigetelt lerakóterek előremodellezése speciálisnak tekinthető, amely dimenziószámbeli csökkentést nem enged meg a modellben. A szigetelő fólia extrém nagy fajlagos ellenállása és alakja miatt durva inhomogenitásként befolyásolja a modellezett teret. Ilyen szerkezetek esetében a direkt és az inverz feladat megoldása is bonyolult eljárásokat igényel. Ezekre az 1-D és 2-D analitikus megoldások már nem kínálnak megoldást. Bonyolult, nem egyszerűsíthető szerkezetek leképezésére csak a 3-D inverziós módszerek alkalmasak (Ellis és Oldenburg 1994).

A dimenziójukban nem egyszerűsíthető 3-D modellek direkt feladat megoldására a numerikus módszerek kínálnak megoldást. A 3-D terek egyenletrendszerének megoldására számos numerikus módszert fejlesztettek ki, ezek közül elektromos vezetőképesség terének leírására a leggyakrabban alkalmazott módszerek:

- Finite Differnce (FD) módszer (véges differencia),
- Finite Element (FE) módszer (véges elem),
- Boundary Integral (határfelületi integrál) módszer.

Geoelektromos előremodellezéseimhez az FD numerikus módszert használtam, mivel ezen módszer algoritmusa és számítógépi programja állt rendelkezésre.

4.1. 3D FD program bemutatása

Dolgozatomban a hulladéklerakók geoelektromos terének modellezésére a Geofizikai Intézeti Tanszéken rendelkezésre álló 3-D FD (3-Dimensional Finite Difference) véges differencia előremodellező programot használtam. A program tetszőleges keresztmetszetű, háromdimenziós, inhomogén, bármilyen fajlagos ellenállású és geometriájú hulladék sajátosságokkal kombinálható lerakók vizsgálatát teszi lehetővé. A tetszőleges szó alatt, a hulladéklerakókba behordott szilárd anyagok gyakorlatában tapasztalható átlagos fizikai tulajdonságai értendő. A véges differencia előremodellező alapprogramot Klaus Spitzer német kutató készítette a freibergi Bányászati Akadémia Geofizikai Intézetében (Spitzer 1995, Spitzer és Chouteau 1997). A programban az elektromos potenciál, az alábbi egyenletet felhasználásával kerül meghatározására:

$$\sigma \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial y} \cdot \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial \sigma}{\partial z} \cdot \frac{\partial U}{\partial z} = -I \delta(x - x_q) \delta(y - y_q) \delta(z - z_q), \quad (5)$$

ahol σ a vezetőképesség, U az elektromos potenciál, I az elektromos áram.

A felhasznált 3D FD előremodellező programba beépített elektromos potenciál egyenletét FD „approximációt” alkalmazva konjugált gradiens módszerrel oldja meg. A dipólforrás (vagy pontforrás) az x , y , z sík rácspontjaiban tetszőlegesen elhelyezhető (x_q , y_q , z_q), a potenciálértékek az x , y , z tér tetszőleges rácspontjaiban számíthatók. A program számítási pontossága lehetővé teszi a látszólagos fajlagos ellenállás értékek meghatározását, tetszőleges mérési kombinációkra, nagy pontossággal. A nagy pontosságú számítási eredményeket azzal biztosítottam, hogy a rácskiosztást vizsgálataimban a modellekhez alakítottam, továbbá normáltam az adatokat.

A véges differencia módszer lényege, hogy a modellezett teret tetszőleges darabszámú, egymással érintkező téglatest alakú elemekre bontjuk, ahol a téglatest fajlagos ellenállását a sarokpontokban (rácspontokban) megadott fajlagos ellenállású értékekkel jellemezzük.

Az elektromos ellenállás probléma differenciál egyenleteinek diszkretizálásához, a téglatestek közepére definiált értékek véges különbségének másodrendű Taylor-sorfejtéses megoldását használja. Az elektromos vezetőképesség értékek melyeket a rácspontokban adunk meg tetszőleges eloszlásúak lehetnek. A program a parciális differenciálegyenletek megoldásához a Preconditioned Conjugate Gradient Method (CGPC) alkalmazza, amely vagy szimmetrikus és pozitív definiált mátrixszal rendelkező lineáris egyenletrendszer

numerikus megoldására szolgáló algoritmus. A CGPC konjugált gradiens módszer egy iterációs módszer, mely alkalmazható olyan rendszerek kezelésére is, melyek túl nagyok ahhoz, hogy direkt módon Cholesky-felbontással megoldhatók legyenek. A konjugált gradiens módszert elsősorban nagyméretű, ritka mátrixok esetén érdemes használni. A prekondicionált konjugált gradiens módszernél, ha alkalmas prekondicionálási mátrixot választunk, akkor kevesebb lépésszámban és kevesebb idő alatt kapunk eredményt.

A programban megadható X, Y horizontális irányú rácselemeinek maximális száma mindkét irányban 113 db rácselem lehet, míg a Z vertikális irányú rácselemek száma 39 db. Ezen rácselem számok a rendkívül számolásigényes előremodellezés miatt alakultak ki, mely hosszas kutatómunka eredményeként született meg a számítógép gépejének optimalizálására (Spitzer és Wurmstich 1999). A véges differencia módszer számolási idő igénye, az alkalmazott modellek bonyolultságától függően egyre növekszik. Modellezéskor a számítógép gépeje is határt szab a felhasznált modellrács elem számának. Pontosságát a tesztelésnél használt egyes modelltípusok esetén Spitzer az alábbi cikkeiben adta meg: Spitzer (1995), Spitzer és Chouteau (1997).

A program bemenő adatait egy „in” kiterjesztésű file-ban kell elkészíteni. A bemeneti adatok az alábbi elemekből épülnek fel:

- a modell rácspontjainak száma, pozíciói,
- alkalmazni kívánt elektróda konfiguráció típusa, elektróda pozíciói,
- cellánként beállítani kívánt fajlagos ellenállás értékek.

A program végeredményként a modellezett tér minden egyes definiált pontjában (rácspontokban) megadja a mérhető potenciál értéket. A potenciálokból könnyen kiszámítható a tér bármely pontjában tapasztalható fajlagos ellenállás értéke.

A kapott eredmények kiértékeléséhez (Gyulai 1996-1997a) véges differenciás program segítségével végzett modellszámítási tapasztalatait használtam fel.

4.2. Hulladéklerakók modellezése a behordott hulladékvastagság függvényében

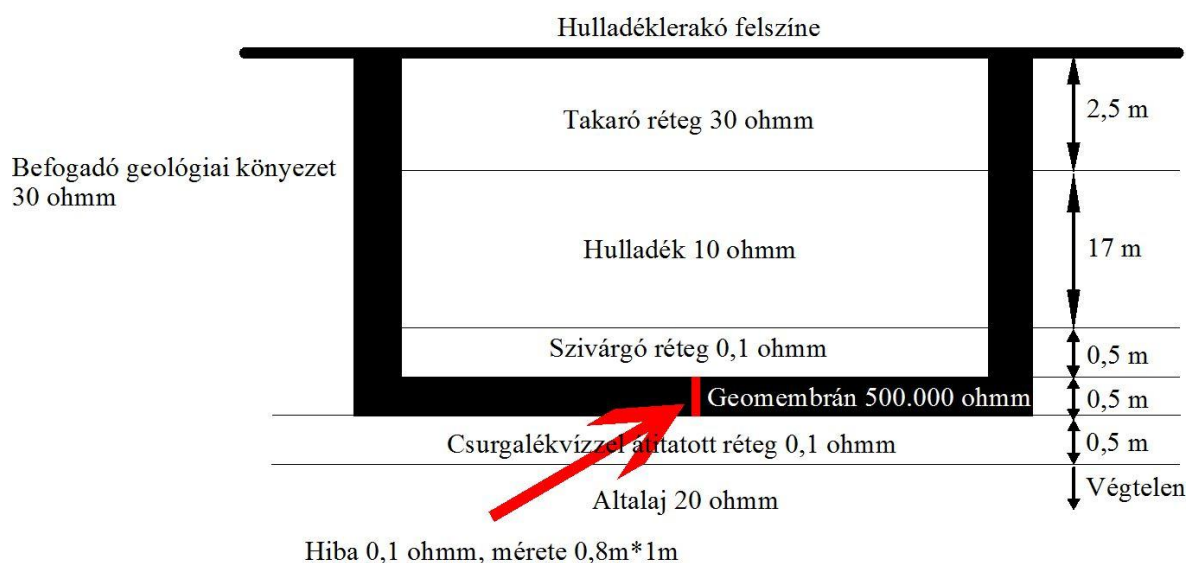
A műanyag szigeteléssel ellátott hulladéklerakók modellezése szétválasztható a geomembrán felett elhelyezett rétegek vastagságának függvényében, így:

- kiépítést követő kis vastagságú hulladékkal borított szakaszra, illetve
- üzemeltetés közbeni, vastagabb hulladék rétegekkel borított vizsgálatokra.

A hulladéklerakó kiépítésének kezdetén alapvetően vékonyréteg vizsgálatokkal kell modellezést végezni. Az üzemeltetési időszakban egyre vastagodó hulladék réteggel kell

kalkulálni. A kiépítés azon szakaszában, amikor a geomembránra már ráterítése került a szivárgó-védő réteg, illetve a szivárgó felületére elkezdtek behordani a hulladékokat, geomembrán felett csak néhány tíz centiméteres vagy legfeljebb néhány méteres vastagsággal kell számolni. A hibahely kimutatása egyre bonyolultabbá válik a geomembrán feletti rétegek vastagságának növekedésével.

A **21. ábrán** azt az általános hulladékmodellt mutatom be, amelyet vizsgálataim során mindvégig alapnak tekintettem. A modellezés során az általános hulladékmodell minden paraméterének változtatását elemeztem. Az vizsgált paraméterváltoztatások közül dolgozatomban csak azokat mutatom be, amelyek érdekes változást mutattak.



21. ábra
Általános hulladékmodell

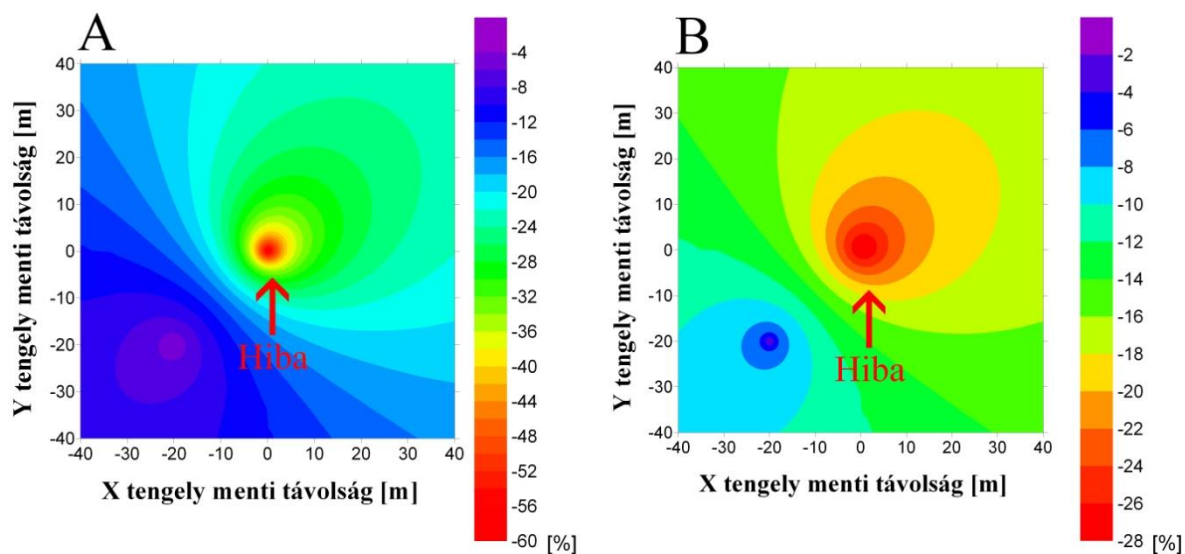
Az általános hulladékmodell véges differencia számításainál csak a geomembrán vastagságát torzítottam. A teljes vastagságnál és fajlagos ellenállásnál egy helyettesítő réteget alkalmaztam. A modell egyéb vastagságaihoz képest a geomembrán vastagsága olyan vékony és nagy fajlagos ellenállású, hogy azokat a számítógépi programozáshoz nem lehetett alkalmazni. A helyettesítő réteg paramétereit a $T = h\rho$ (ahol h a vastagság, ρ a fajlagos ellenállás) formula alapján számítottam. Az 1-D modellre analitikusan és a megváltoztatott modellre véges differencia módszerrel számított T értékek megegyezését írtam elő. A T eredmények egyezése 100-szor kisebb fajlagos ellenállásnál, de 100-szor nagyobb rétegvastagságnál 1%-on belül megegyeztek. A részletes vizsgálataimnál ennek az alapmodellnek a paramétereit változtattam jelentős mértékben. Például: takaró réteg

elhagyása, hulladék vastagságának és fajlagos ellenállásának változtatása, hibahely méretének, alakjának, fajlagos ellenállásának módosítása, stb.

A geomembrán fajlagos ellenállásának választott 500.000 ohmm, geoelektromos szempontból olyan kvázi végtelennek tekinthető, hogy rajta keresztül hibamentes esetben csak elenyésző mértékű, a fólia teljes felületén keresztül folyó áram észlelhető.

További előremodellezési kísérleteim azt bizonyították, ahogy romlik a szigetelő fólia fajlagos ellenállás értéke, úgy romlik a hibahelyek kimutathatósága, de fordítva is igaz, ha növekszik a szigetelő fólia fajlagos ellenállása javul a hiba kimutathatósága.

A **22. ábra** eltérő hulladékvastagságú modellek normált potenciál eloszlás térképeit mutatja kis vastagságú hulladék esetén. A **21. ábrán** bemutatott általános hulladékmodellhez képest, itt elhagytam a takaró réteget és a geomembrán alatt és felett elhelyezett jól vezető 0,1 ohmm-es rétegeket. A **22. ábra A** oldalán 2 m vastagságú hulladékkal borított modell, mellette jobbra a B-vel jelzett oldalon 5 m hulladékvastagságú modell normált potenciál eloszlástérképe látható. A normálás az 5.2 fejezet (8) formulája szerint történt.



22. ábra

Eltérő vastagságú hulladékmodellek felszínre számolt normált potenciál eloszlás térképei

A) 2 m vastag hulladék; B) 5 m vastag hulladék

A **22. ábra** A és B részén jól összehasonlítható, hogy ha növekszik a behordott hulladék vastagsága, gyengül a geomembrán hiba kimutathatósága. 2 m vastag hulladék esetén a központban elhelyezett hiba -60%-os, 5 m vastag hulladék estében -28%-os anomáliát okoz.

A modellben a geomembrán vastagsága 0,5 m, fajlagos ellenállása 500.000 ohmm. A geomembrán hibahelyének mérete 0,8 m*1 m, fajlagos ellenállása 0,1 ohmm, amely az X,Y koordináta rendszer 0 pontjában helyezkedik el. A hulladék fajlagos ellenállása 50 ohmm. A hulladéklerakót befogadó geológiai környezet fajlagos ellenállása 30 ohmm, az altalaj fajlagos ellenállása 50 ohmm. A hulladéklerakó szigetelésének határai 150 m*150 m-es méretűre voltak beállítva. Az „A” forrás mindkét esetben a -20 m, -20 m pontban, a „B” nyelő a -2000 m, -2000 m-es pontban helyezkedett el.

Terepi mérések alkalmával különösen növeli a mért adatok zajosságát a hulladéktest inhomogenitása, és az áramkör kialakulásához szükséges hulladéklerakóban lévő nedvesség hiánya.

5. KIÉRTÉKELÉSI LEHETŐSÉGEK HULLADÉKLERAKÓK VIZSGÁLATAINÁL A GEOELEKTROMOS ADATTÉRBE

A geoelektromos adatok ezen feldolgozása a geofizikának egy olyan módszere, amelynél közvetlenül a mérési adatokból, azok eloszlásából a struktúra, vagy a struktúra egy adott jellemzőjének meghatározása, pl. geomembrán hibahelyek detektálása a cél. A hiba helyének a kimutatásakor a hiba okozta adateloszlás anomális jellegét vizsgáljuk. Az anomáliával (eltéréssel) kapcsolatos legfontosabb kívánalmak:

- mértéke elegendően nagy legyen, kiemelkedjen a közeg inhomogenitásai által okozott képből és a mérési hibák által okozott zajból,
- a kiértékelés szempontjából kedvező, ha az anomália alakú képet mutat, vagy az alakjának olyan jellegzetességei ismerhetőek fel, melyek a geomembrán hibát reprezentálják.

Az objektum hatásának kiemelésére a geofizikai adatok kiértékeléséhez általában normálásokat, szűréseket alkalmaznak.

5.1. Adatok megjelenítése eloszlástérképek és szelvény menti eloszlások segítségével

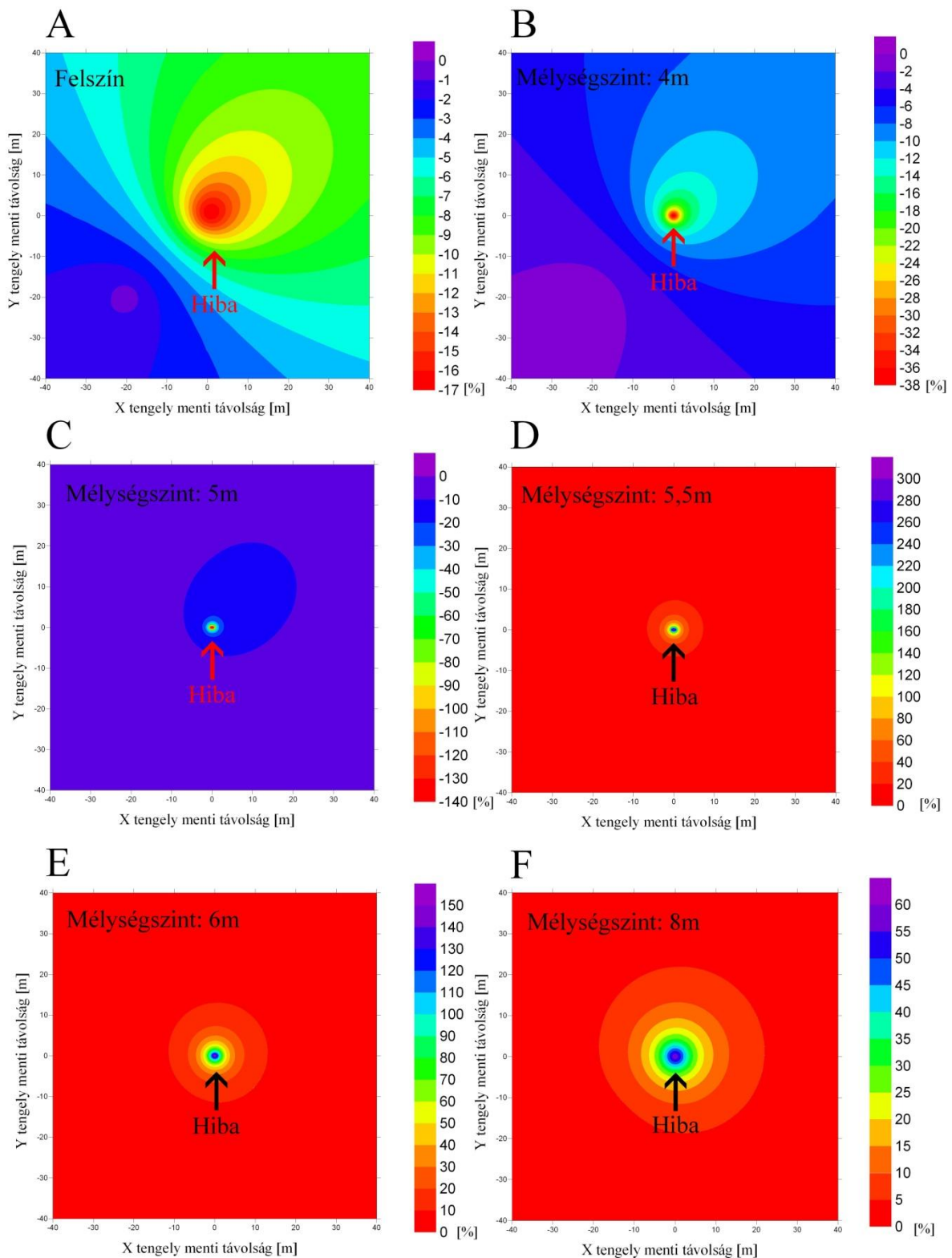
A pontonkénti mérési adatokból izovonalas térképek, metszetek szerkeszthetők a vizsgált objektum feletti geofizikai adatok eloszlásának szemléltetésére. Dolgozatomban a hulladéklerakók felszínén mérhető geoelektromos adatokat a felszínen lévő két egymásra merőleges koordináta tengely (X és Y) által meghatározott felület mentén ábrázoltam. A koordináta tengelyek skálázása lehet lineáris, vagy logaritmusos. A skálázás alkalmazható helyi koordináta rendszerhez, EOVS vagy GPS koordinátákhoz. Az geoelektromos mért adatok koordináta rendszerben történő ábrázolásával, elkészíthető a vizsgált terület, objektum izovonalas képe, mint geofizikai alaptérkép.

A geoelektromos adatok megjelenítésének egy másik lehetősége a szelvény menti ábrázolás. Ezzel laterálisan is és „látszólagos mélység” szerint is ábrázoljuk az adatokat. Ez az általam ábrázolt szelvényeknél a Z tengelyt jelenti. A tengelyek skálázása általában méterben történik. Itt is érvényes, hogy adat ábrázolásakor a tengelyek lehetnek lineárisak és logaritmusosak. Az általam készített eloszlás térképek és szelvények lineáris skálázás szerint készültek.

Az eloszlástérképek és szelvény menti eloszlások segítségével válasz kapható arra a kérdésre, hogyan alakul a potenciálok térbeli eloszlása a hulladéklerakóknál. A

hulladéklerakók felszínén mérhető geoelektromos adatok ábrázolása mellett vizsgáltam, hogy volna-e értelme előre definiált mélységszinteken geoelektromos méréseket elvégezni, hibakeresés céljából. Vizsgálataimat olyan mélységszinteken definiáltam, amelyek még a felszínről könnyen elérhető tartományban vannak, mert a hibahely mélységszintjén nagy változások figyelhetők meg a potenciál eloszlásban (ezért is telepítik az előre beépített elektróda rendszereket közvetlenül a geomembrán alá). Mivel a mobil hibahely-kereső eljárásoknál a hulladék felszínén mérünk vizsgáltam, hogy mennyire csökken a mérhető jel a hibahelytől a felszínen távolodva.

Az egyes mélységszinteken kiolvasható normált potenciál eloszlás izovonalas térképeken történő ábrázolására mutat példát a **23. ábra**. A normálás az 5.2 fejezet (8) formulája szerint történt. A **21. ábrán** bemutatott általános hulladékmodellhez képest, itt elhagytam a takaró réteget és a geomembrán alatt és felett elhelyezett jól vezető 0,1 ohmm-es rétegeket. A hulladéklerakó modellben a geomembránnal körülhatárolt terület oldalszélessége 150 m*150 m, és a behordott hulladék vastagsága 5 m. Ezen méretek átlagosnak tekinthetők egy művelés alatt álló depóniaegység esetén (Slack et al. 2006). A geomembrán fajlagos ellenállásának értéke 500.000 ohmm (ami a korábban **4. táblázatban** bemutatott maximális 10^{14} ohmm-es fajlagos ellenállással szemben jóval kedvezőtlenebb), amely valós értéknek mondható (Ping et al. 2007). A modell megalkotásakor korábbi tapasztalataimat használtam fel (Baracza 2012a, Baracza 2012b, Baracza et al. 2005). A hulladékot az egyszerűség kedvéért egy átlagos 50 ohmm fajlagos ellenállású rétegnek választottam. A hulladéklerakót befogadó geológiai környezet fajlagos ellenállását 30 ohmm-re, az altalaj fajlagos ellenállását 20 ohmm-re állítottam be. A geomembrán hibahelye a modell X, Y síkú geometriai közepén helyezkedik el, fajlagos ellenállása 0,1 ohmm, mérete 0,4 m*1 m. A modellalkotásakor a programban Pole-Pole méréshez tartozó forráspozíciókat állítottam be, ahol az „A” forráselektroda a felszín -20 m, -20 m pontjában, a „B” nyelő elektróda a kvázi végtelenben a felszínen a -2000 m, -2000 m-es rácspontban helyezkedett el. A **23. ábra A** része a felszínre vonatkozó normált potenciál eloszlásképet mutatja be, majd B, C, D, E, F részárbrák a jelölt mélységszinteken prezentálják a normált potenciál eloszlásokat.



23. ábra

Normált potenciál eloszlás térképek különböző mélység szinteken
 A) Felszín; B) 4 m-es mélység szint; C) 5 m-es mélység szint;
 D) 5,5 m-es mélység szint; E) 6 m-es mélység szint; F) 8 m-es mélység szint

A **23. ábra** felszíni térképétől az 5 m mélyen elhelyezkedő nagy fajlagos ellenállású geomembrán szintjéig, folyamatosan növekszik a terület közepén elhelyezkedő hibahely okozta anomália normált százalékos értéke. A szigetelés alatt 5,5 m-en ábrázolt normált potenciálértékeket tartalmazó eloszláskép százalékos értékeiben előjelváltás figyelhető meg és látható, hogy az anomália, a szigetelés alatti legközelebbi térrészben adja a maximális értéket. Az ábrákon jól látható a szigetelő réteg alá beépített mérőrendszer előnye. Vannak esetek, pl. korábban épült hulladéklerakónál, ahol nem építettek be geoelektromos geofizikai mérőrendszert, vagy valami oknál fogva helyreállíthatatlanul megsérült a rendszer. Ilyen esetekben jelenthet alternatívát a geomembrán hibák detektálására a hulladékfelszínen mérő mobil módszer.

A felszín közeli szinteken bemutatott eloszlástérképeken a hibánál jelentkező anomália mellett megfigyelhető továbbá, a -20 m, -20 m koordináta pontban elhelyezett forrás okozta anomália is. A forrás hatása a felszíntől a mélység felé távolodva, azonban egyre gyengülő hatást mutat.

Látható továbbá, hogy a szigetelő fóliától egyre mélyebbre távolodva, a hiba okozta anomália értéke egyre csökken. A kiértékelő számára a szigetelés alatt közvetlenül kiolvasott potenciálértékek nagyon koncentráltan mutatják a problémás területet. Nem elegendően sűrű mérőpontok esetén viszont az anomália nem észlelhető!

A normálást, a geomembrán hibahelyet tartalmazó és a hibahelytől mentes modell adatai között végeztem. A továbbiakban bemutatom a dolgozatban alkalmazott normálás folyamatát.

A leírtak alapján fogalmazom meg az 1. tézist:

1. tézis

Elméleti vizsgálatokkal igazoltam, hogy „A” forráselektroda hulladéklerakó területén való elhelyezésével, valamint a „B” nyelő elektroda távoli elhelyezésével és „MN” potenciál mérőelektrodák segítségével olyan geoelektromos mérési rendszer alakítható ki, amely különösen érzékeny a hulladéklerakó geomembrán szigetelésének sérülésére. Az alkalmazott mérési elrendezés „N” mérőelektrodája Pole-Pole elrendezés esetén a hulladéklerakó elszigetelt területétől távol, Pole-Dipole elrendezés esetén a hulladéklerakón belül helyezkedik el. Ehhez 3-D modellezési vizsgálatokat végeztem, melyekkel bizonyítottam, hogy a hulladéklerakó felszínen végzett területi és/vagy szelvény menti geoelektromos mérések alkalmasak kis és nagy vastagságú (5-20m) lerakók vizsgálatához.

5.2. Adatok kiértékelése normálással

A geofizikában az adateloszlások anomáliás jellegének kiemelésére, gyakran alkalmaznak normálást. Vizsgálataimban a normálás célja, hogy a hulladéklerakók geoelektromos adatai közül markánsabban kimutathatók legyenek azok az adattérbeli objektumok, amelyek az aljzatszigetelési hibákra utalnak. A művelet végzésekor a geomembrán hibát tartalmazó modell adatait normáltam, a modell adataival. A normálás azonban feltételezi a sérülésmentes adatok ismeretét. Ezt korábbi mérésekből, vagy a modell paraméterek ismeretében számítással lehet meghatározni.

Az alkalmazott normálás képlete [%]:

$$\eta_I = \frac{a-b}{b} \cdot 100 \quad (6)$$

ahol „a” a hibás geomembrán esetén mért vagy számított adatok értéke, „b” a hibátlan geomembrán esetén mért vagy számított adatok értéke. Az adatrendszerben található objektumok hatásai a normálás elvégzésével felerősíthetők.

Egyes esetekben kedvezőbb kiemelő hatás érhető el az adatoknál, ha a normálás képletét az alábbi módon változtatjuk [%]:

$$\eta_{II} = \frac{a-b}{a} \cdot 100. \quad (7)$$

A két normálási változat adatrendszere között igen nagy eltérések adódhatnak különböző geoelektromos mérési elrendezések alkalmazása esetén. Ezért a két normálás előnyeit együttesen kihasználó átlagolási formulát fogalmaztam meg, amelynek elvégzésével minden esetben biztonsággal nyerhető részletgazdag térkép a vizsgált jelenség tanulmányozására [%]:

$$\eta^* = \frac{1}{2} \left(\frac{a-b}{a} + \frac{a-b}{b} \right) = \frac{a-b}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) = \frac{a-b}{2} \frac{a+b}{ab} = \frac{a^2-b^2}{2ab}. \quad (8)$$

A hulladéklerakók geoelektromos hibahely keresési vizsgálatainál a normálás elvégzése után is azt várjuk, hogy a sérüléshez kapcsolódó anomália képe kiemelkedjen a környezetéből, maradjon alakhú vagy az alakjának legyenek olyan jellegzetességei, melynek segítségével könnyen kimutatható a hibás terület.

A geofizikai adateloszlások anomáliás jellegének kiemelésére új normálási formulát vezettem be, amelyet a 2. tézisben fogalmaztam meg és ezért a dolgozatomban szereplő normált eloszlástérképek mindegyikét ezzel az átlagolási formulával számítottam:

2. tézis

Új normálási eljárást vezettem be a geomembrán hibáinak, illetve hiba helyeinek meghatározására, amely a gyakorlatban alkalmazott kétféle normálás előnyét egyesíti:

$$\eta^* = \frac{1}{2} \left(\frac{a-b}{a} + \frac{a-b}{b} \right) = \frac{a^2 - b^2}{2ab},$$

ahol „a” a hibás geomembrán esetén mért vagy számított adatok értéke, „b” a hibátlan geomembrán esetén mért vagy számított adatok értéke.

5.3. Adatok szűrése

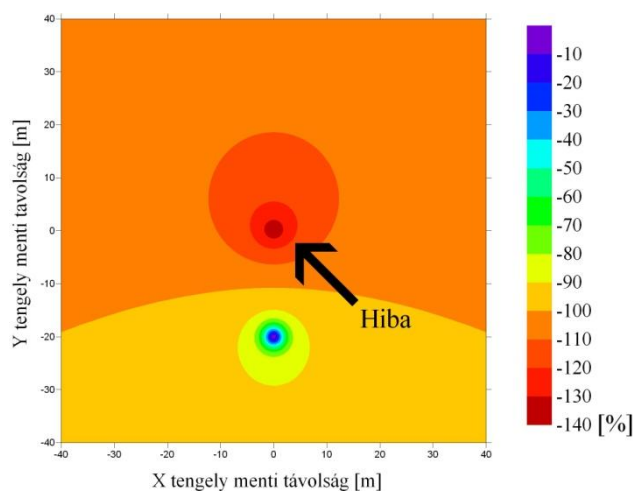
A képfeldolgozási eljárások alkalmazásánál, a zajjal terhelt geoelektromos adatok rendszeréből kiemeljük a hibahelyre vonatkozó legfontosabb különbségeket (anomáliákat), melyek kijelölik a további vizsgálat szempontjából kulcs fontosságú részeket. A kiértékelést nehezítik az adatokra rakódó különböző nagyságú és típusú zajok.

Az előre modellezési adatok, zajmentes állapotnak felelnek meg, valamint a terepi mérésekből származó adatok általában zajjal terhelték. A szintetikus modellezés adatait a terepi adatokhoz történő jobb hasonlítás érdekében zajokkal terheljük. Vizsgálataimban az adatokhoz 2-5-10%-os Gauss eloszlású zajt kevertem.

5.3.1. Adatok feldolgozása Potenciál eloszlás térképek segítségével

Előremodellezéskor előre definiált X és Y koordinátákkal rendelkező rácspontokban számítjuk a modellezett hulladéklerakó felszínén az elektróda elrendezésnek megfelelő potenciál értékeket. Terepi esetben a hulladékfelszínen mérjük a gerjesztés hatására kialakuló potenciálteret. A mérőpontok elhelyezkedése hálószerűen felépített, rácspontok mentén történik.

A felszíni X, Y koordináta rendszerben ábrázolt normált potenciál eloszlásra mutat példát a **24. ábra**. A normálás az 5.2 fejezet (8) formulája szerint történt.



24. ábra
Normált potenciál eloszlás térkép
zajmentes adatok esetén

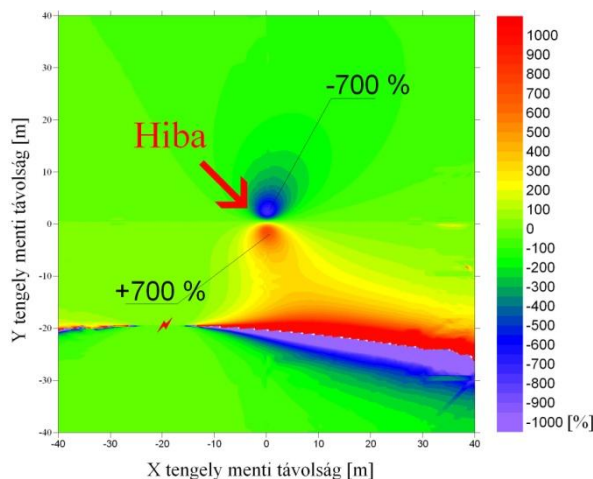
A **24. ábra** Pole-Pole elektróda elrendezés, 5m-es hulladékvastagság és 500.000 ohmm-es geomembrán fajlagos ellenállás esetén mutatja a potenciál eloszlás normált értékeket. A **21. ábrán** bemutatott általános hulladékmodellhez képest, itt elhagytam a takaró réteget. A hulladéklerakó modellben a geomembránal körülhatárolt terület oldalszélessége 150 m*150 m. Az ábrán a forrás az X=0 m, Y=-20 m felszíni pontban helyezkedik el, amely -10%-os anomáliaként jelenik meg. A geomembrán hibahelye a 0,0 pontban található, mérete 0,4 m*1 m, modellbeli fajlagos ellenállás értéke 0,5 ohmm. A normált potenciál eloszlásképpen a hibahelyet -140%-os izovonal mutatja, amely érték köszönhető, a modellben a szigetelés alatt és felett elhelyezett jól vezető 0,5 ohmm-es rétegeknek. A hulladék fajlagos ellenállása 50 ohmm. A hulladéklerakót befogadó geológiai környezet fajlagos ellenállása 30 ohmm, az altalajé 20 ohmm.

5.3.2. Adatok feldolgozása Potenciál különbség (gradiens) eloszlás térképek segítségével

A hulladékfelszíni geoelektromos adatok hiba felett mérhető anomáliájának kutatására előnyös lehet alkalmazni a potenciáladatokon elvégezhető potenciálkülönbség (gradiens) mérést. A gradiens alapú mérések háttérében a térjellemező deriválása áll. A gradiens módszerekre épülő eljárások fontos szerepet játszanak az intenzitás átmenetek (élek) detektálásában, így egyúttal a képek élesítésében is.

Terepi méréseknél ezeket az adatokat közvetlenül mérjük a mérőelektródák között, vagy pedig a potenciálok additivitása alapján a Pole-Pole rendszerből számítjuk.

A potenciálkülönbség képzésével javul a geomembrán hibája okozta anomália elkülöníthetősége az egyéb objektumoktól. Képfeldolgozás alkalmával is használhatóak a normálások és szűrések a hibahely kiemelésére. Az Y tengely irányában képzett potenciálkülönbség képzésére mutat példát a **25. ábra**.

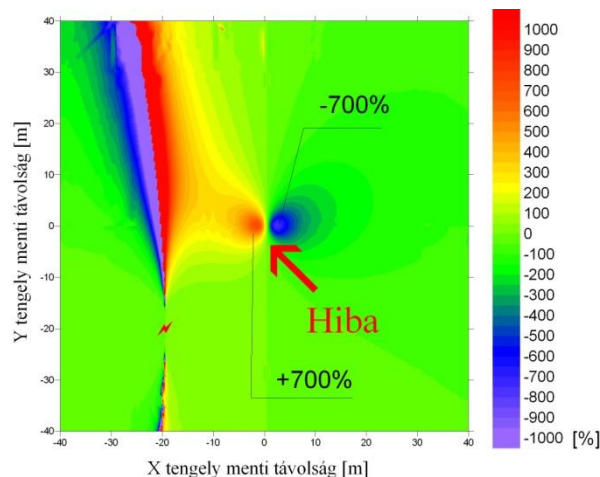


25. ábra

Y tengely mentén megjelenő normált potenciálkülönbség eloszlástérkép

A **25. ábrán** a forrás a modellben a -20m, -20m pontban helyezkedett el, melyet az ábrán vörös villámjel mutat. A nyelőt a hulladéklerakó elszigetelt területén kívül, a -2000 m, -2000 m koordinátájú pontban helyeztem el. A normálást a (8) képlet szerint végeztem. A normált potenciálkülönbség eloszlástérkép közepén elhelyezkedő pozitív-negatív anomáliapár csúcsértékei eléri a +/- 700 %-os értéket, melyek csúcsértékeit összekötő egyenes felezőpontja jelöli a hibát. Az előbbi anomália mellett, a forrás vonalában létre jött egy „zavarzó zóna”. Ez az Y= -20 vonal közelében megfigyelhető zóna egy másik irányú potenciál különbség esetén áthelyeződik a mérési pozíciótól függő vonalra. A **21. ábrán** bemutatott általános hulladékmodellhez képest, itt is elhagytam a takaró réteget. A hibahely mérete a geomembránon 0,8 m*1 m, fajlagos ellenállása 0,5 ohmm. A hulladék vastagsága 2m, fajlagos ellenállása 50 ohmm. A hulladéklerakót befogadó geológiai környezet fajlagos ellenállása 30 ohmm, az altalajé 20 ohmm. A geomembrán fajlagos ellenállása 500.000 ohmm. A geomembrán alatt és felett fél méter vastag 0,5 ohmm-es jól vezető zónákat helyeztem a hibahelyen keresztül folyó csurgalékvíz elektromos paramétereinek modellezésére. A modellezett hulladékkazetta geomembrán szigetelésének kiterjedése X,Y irányban 150 m*150 m, de a jobb láthatóság érdekében csak a hulladéklerakó belső területének +40 m és -40 m közötti területét ábrázoltam. A **25. ábrán**

bemutatott hulladékmodell potenciál adatain X irányba is elvégezhető a potenciálkülönbség számítás, amelynek normált potenciálkülönbség eloszlás térképét a **26. ábra** mutatja be. A normálás műveletét a (8) képlet szerint végeztem.

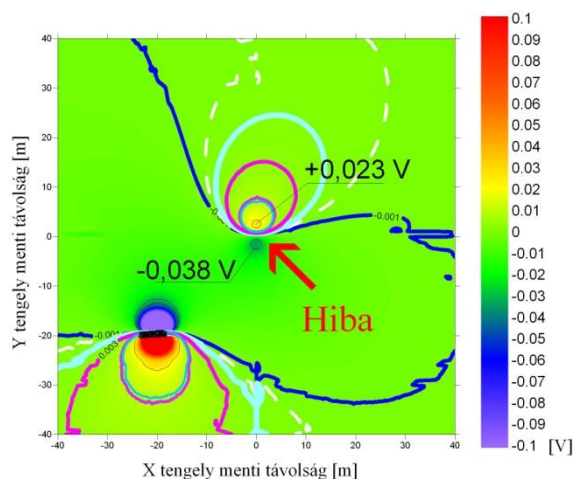


26. ábra

X tengely mentén megjelenő normált potenciálkülönbség eloszlástérkép

A **26. ábrán** is megfigyelhető a forrás vonalában elhelyezkedő zavarzóna. A forrás helyét vörös színű villámjel mutatja a -20 m,-20 m pozíciójú felszíni pontban. A százalékokban kifejezett normált eloszlástérkép közepén látható a hiba okozta pozitív-negatív anomáliapár. Ezen két képi objektumot összekötő egyenes képzeletbeli felező pontja adja hiba pontos helyét a 0,0 pontban. Az ún. zavarzóna jellegzetes képe része lehet a kiértékelésnek. (Ezekon a helyeken egy speciális null-elrendezés alakul ki.)

A normálás művelete az X vagy Y koordináták szerinti potenciálkülönbség képzésénél is eredményesen alkalmazható. Vizsgálataimban azt tapasztaltam (amelyet a dolgozatban nem mutatok be), hogy minél távolabb kerül a forrás a hiba helyétől, annál jobban szétválik a forrás és a hibahely okozta anomália képe egymástól, ezáltal tisztábban felismerhetővé válik a hiba anomáliaképe. A potenciálkülönbség eloszlásra mutat példát a **27. ábra**.

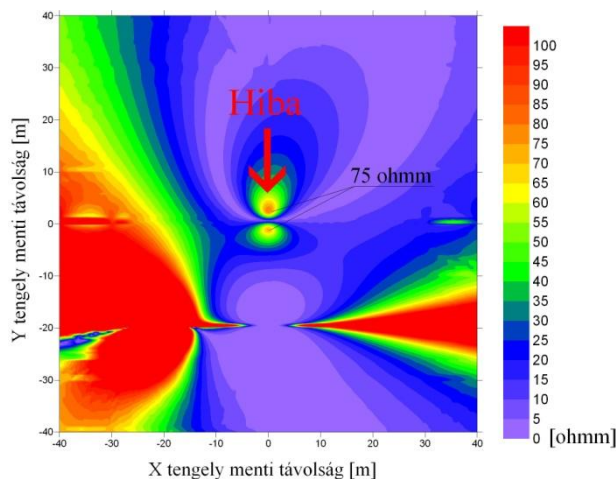


27. ábra

Y tengely mentén megjelenő potenciálkülönbség eloszlástérkép

A **27. ábrán** is jól látható a -20 m,-20 m pontban elhelyezkedő forrás körül anomália. Itt -20 m,-20 m-es forráshelyzetnél 2m hulladékvastagság esetén a pozitív anomáliacsúcs értéke 0,023V, a negatív anomáliacsúcs értéke -0,038V. A **27. ábra** hulladéklerakó modellje azonos a **25. és 26. ábrához** felhasználtakkal.

A **27. ábra** potenciálkülönbség adataiból előállíthatóak a Pole-Dipole rendszerben számított látszólagos fajlagos ellenállás értékek, melyet a **28. ábra** mutat be. A **28. ábrán** jól azonosítható a forrás által okozott „zavarzóna” az $Y=-20$ vonalban. A 2 m vastag hulladék alatt elhelyezkedő hibahely okozta anomáliapár 75 ohmm-es értékkel jelenik meg.



28. ábra

Y tengely mentén megjelenő potenciálkülönbségből számolt látszólagos fajlagos ellenállás eloszlás térkép

A bemutatott **25-28. ábrák** és az elvégzett modellkísérleteim alapján megállapítható, hogy vékony hulladék esetén (1-5m), geoelektromos adatok kiértékelésekor a potenciálkülönbség képzésen alapuló gradiens módszer megkönnyíti a hibahely okozta anomália felismerését és kiemelését a zajból.

A potenciálkülönbség képzést, mint gradiens képző módszert, többféle hulladékgeometrián tanulmányoztam. Vizsgálataimat a megfelelő összehasonlítás érdekében azonos hulladékgeometriájú sorozatmodelleken, eltérő forráshelyzetekben végeztem a dolgozatban.

5.4. Szűrések hatása az adatokon

A geofizikai adatokban található objektumok anomália hatásának kiemelésére a normálás mellett, szintén széles körben alkalmazott technika a szűrés. Megfelelően kiválasztott szűrések hatására az adatrendszerben található objektumok határfelületei könnyebben válnak felismerhetővé, csökkenthető a zaj, ezáltal egyszerűsödhet az értelmezés. Terepi adatok feldolgozásakor szinte minden esetben kell számítani valamilyen mértékű zajra. A szűrési eljárások két főcsoportra oszthatók. Az első csoport simítja a képeket, csökkenti a kontrasztot, a második csoport éppen ellenkezőleg a kontraszt kiemelésére szolgál. A simító eljárások lineáris és nem lineáris alcsoportokra oszthatók. Az eredeti adatrendszerből szűrt térképet az adatrendszer és a szűrőmátrix konvolúciójaként kapjuk. A szűrőmátrixok megválasztásával befolyásolni tudjuk a szűrő átviteli karakterisztikáját (Ádám et al. 1988, Turai 2005).

A szintetikus adatokhoz különböző típusú zajok keverhetők, melyek segítségével közelíteni lehet a terepi adatokhoz. Munkámban szűréseket végeztem zajmentes és zajjal terhelt szintetikus adatokon.

A szűréseket a Golden Softver nevű amerikai szoftvercég által készített SURFER 9 térképszerkesztő program beépített szűrőcsaládjaival végeztem, hulladékfelszínen mérhető geoelektromos adatokon. A többféle geometriájú lerakó modelltől származó adatsorok szűrését szisztematikusan végezve először a programba beépített Lineáris szűrőcsalád közül a

- „Low Pass”,
- „High Pass”,
- „Order 1 Derivative”,
- „Order 2 Derivative”,

- „Shift and Difference”,
- „Gradient Directional”, és
- „Embossing” típusú szűrőket.

Majd a nem lineáris szűrőcsalád típusok közül a

- „Order Statistics”,
- „Moment Statistics”, és
- „Compass Gradient” szűrőket vizsgáltam.

Vizsgálataimat zajmentes és az alapadatrendszerhez kevert 2%, 5% és 10% Gauss zaj hozzáadásával végeztem. A különböző szűrőcsaládokon történt vizsgálataim alapján a „Predefined Gauss Low Pass (3*3) Process 10” (továbbiakban: Gauss (3*3) alul áteresztő szűrő) szűrőtípus mutatkozik leghatékonyabbnak, de mellette az „Order 2 Derivative Difference of Gaussian (7*7)” (továbbiakban: másodrendű derivált Gauss (7*7) szűrő) szűrő is kedvező szűrési tulajdonságokat mutat.

A Gauss Low Pass szűrő képlete az alábbi formula szerint adható meg (Jian és Mason 2009):

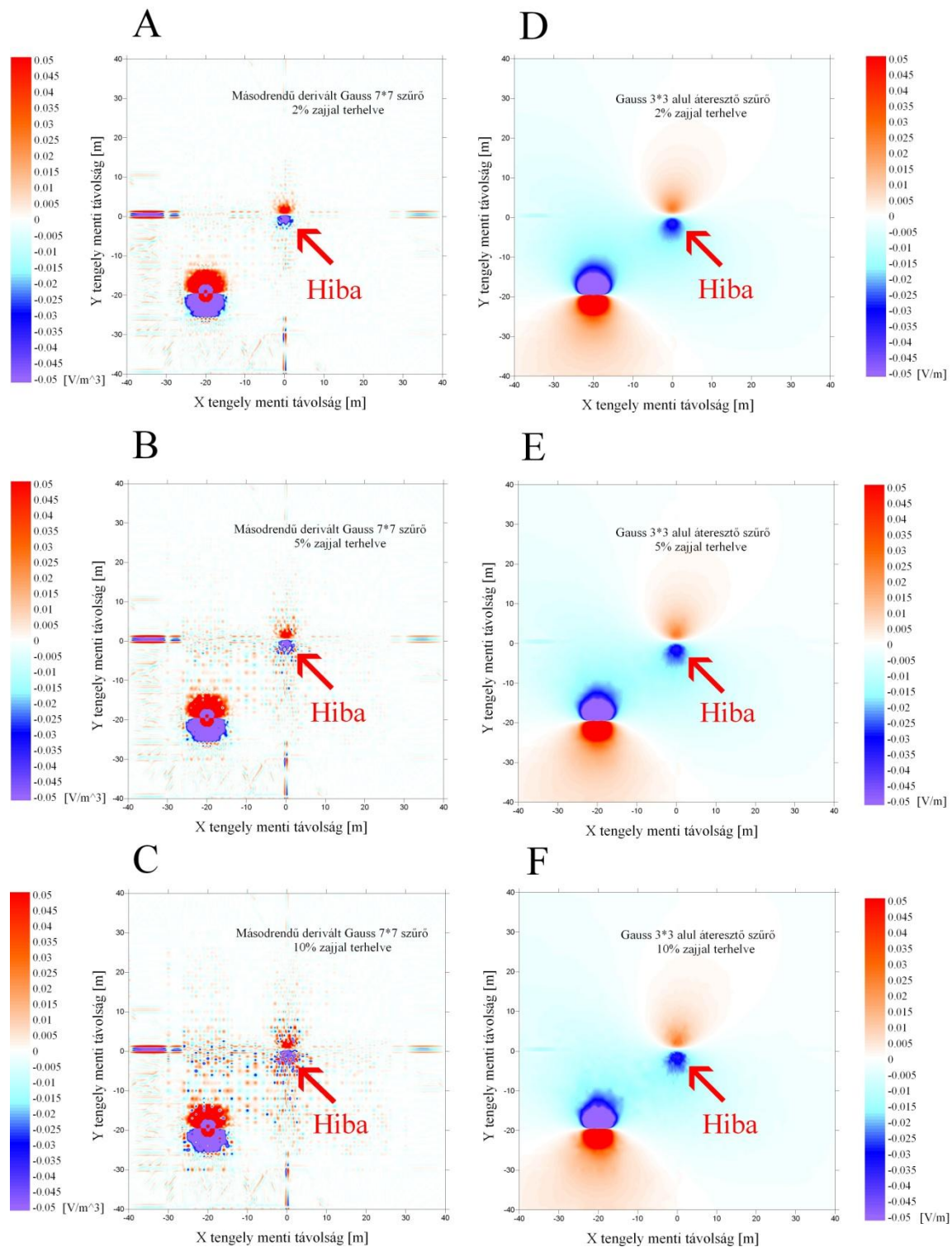
$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (9)$$

ahol σ az adatok szórását, x és y a horizontális és vertikális képi koordinátákat jelentik. A Gauss Low Pass típusú szűrők a magas frekvenciás zajok eltávolítására szolgálnak. Mivel a szűrő súlyai nem dimenziótlanok, ezért a szűrt mennyiségek mértékegysége a szórás miatt $\left[\frac{1}{m}\right]$ -el szorzódik.

A másodrendű derivált Gauss szűrő kétszer deriválja a szűrendő adatokat mind x mind y irányban. Mivel a szűrő súlyok ennél a szűrőtípusnál sem dimenziótlanok, ezért $\left[\frac{1}{m^3}\right]$ -el szorzódik a szűrt mennyiségek mértékegysége (Bart 2003). Ezen szűrés segítségével az adatrendszerben található élek emelhetők ki. Ahol nincs a képi adatokban változás, ott a szűrő nullába viszi a szűrt értékeket csakúgy, mint a Laplace típusú szűrők (Jian és Mason 2009).

A másodrendű derivált Gauss (7*7) szűrőről megállapítható, hogy csak kismértékű zajjal terhelt adatrendszeren célszerű alkalmazni, mivel elmossa az eloszlástérképen a hibának a helyét. Míg a Gauss 3*3 alul áteresztő szűrő akár 10%-os hibaterheltség esetén is jól megadja a geomembrán hibahelyét.

5. KIÉRTÉKELÉSI LEHETŐSÉGEK HULLADÉKLERAKÓK VIZSGÁLATAINÁL A GEOELEKTROMOS ADATTÉRBE



29. ábra

Másodrendű derivált Gauss (7*7) élkemelő szűrővel és Gauss (3*3) alul áteresztő szűrővel szűrt Y tengely irányban megjelenő potenciál különbség eloszlás térképek
 A) 2%-os Gauss zajjal terhelt adatrendszer 7*7-es szűrővel szűrve; B) 5%-os Gauss zajjal terhelt adatrendszer 7*7-es szűrővel szűrve; C) 10%-os Gauss zajjal terhelt adatrendszer 7*7-es szűrővel szűrve; D) 2%-os Gauss zajjal terhelt adatrendszer 3*3-as szűrővel szűrve; E) 5%-os Gauss zajjal terhelt adatrendszer 3*3-as szűrővel szűrve; F) 10%-os Gauss zajjal terhelt adatrendszer 3*3-as szűrővel szűrve

A **29. ábra** bal oldalán (A, B, C) található másodrendű derivált Gauss (7*7) szűrővel végzett szűrések eredményei láthatók. A teljes szűrt adatrendszerből csak az X, Y tengelyek menti távolság szerinti -40 m és 40 m közötti adatok lettek ábrázolva. Az ábrán fentről lefelé növekszik az adatok zajterhelése. A **29. ábra** elkészítésénél alkalmazott hulladéklerakó modell azonos a **25-28. ábrákhoz** felhasználttal.

A **29. ábra** minden résztérképének (A-F) közepén található a 0,8 m*1 m-es geomembrán hiba okozta anomáliapár, míg a -20 m,-20 m-es pontban a forrás által okozott nagyméretű anomália. Emellett megfigyelhetők apró, a hibahely felismerését nem zavaró alakzatok is. A növekvő zajterheléssel csökken a szűrés minősége. Eltérő forráshelyzetek esetén a forrás által okozott anomáliapár is „tovább mozdul” az új forráspozícióba, a hibahely okozta anomáliapár viszont az ismert koordináta pozícióban marad. A **29. ábra** jobb oldalán (D, E, F) találhatóak a Gauss (3*3) alul áteresztő szűrőtípus által szűrt adatok, amelyek zajterhelése fentről lefelé növekszik (2%, 5% és 10%). Mindhárom jobb oldali eloszlástérkép középpontjában látható a hiba okozta anomáliapár, illetve a -20 m,-20 m-es pontban a forrás által okozott anomália. A zajterhelés növekedtével romlik a szűrés hibahely kiemelő képessége. A **29. ábra** két különböző szűrőtípusa által feldolgozott zajos adatrendszer közül a jobboldali Gauss (3*3) alul áteresztő szűrőtípus mutatja szignifikánsabban a geomembrán hibahelyét.

Szűréseket nem csak potenciál, illetve potenciál különbség adatokon lehet végezni, hanem fajlagos ellenállás adatokon is.

Vizsgálataimat kiterjesztettem különböző geometriájú és vastagságú hulladékmodellekre is, melyeknél azt tapasztaltam, hogy a hulladék vastagság növekedésével gyengül a felszínen mérhető jel erőssége. Vékony hulladéklerakók esetében két okból is érdemes a forrás-mérőpont távolságot növelni. Ezzel egyrészt csökkenteni lehet a forrás körüli tér zavaró hatását, másrészt elérhető, hogy a hibahelyhez tartozó adatok (anomáliák) a mérőpontra (M, MN közép) vonatkoznak. A mérhetőséget erősen befolyásolja a hulladék inhomogenitása és a hulladékok, vagy takaró réteg víztartalma. A mérhető jel nagyon erősen függ a hulladéklerakóba behordott anyagok minőségétől, azok agyagtartalmától, és a lerakás módjának geometriájától. Mivel a legtöbb hulladékban biológiai bomlási folyamatok és különböző konszolidációs mozgások zajlanak, ezért az aktuálisan geoelektromos szempontból kvázi kimérhetetlen hibahelyek az idő múlásával feltérképezhetőek válhatnak. Ezért szükség lehet időben elhúzódó iteratív mérések

elvégzésére is a beépített geofizikai mérőrendszerrel nem rendelkező hulladéklerakók felszínén.

A jelen fejezetben bemutatott eredményeket a 3. tézisben foglaltam össze:

3. tézis

Felszínen mért potenciál és potenciál különbség (X vagy Y tengely mentén jelentkező) eloszlás térképi megjelenítésével, a mért adatok normált értékeinek ábrázolásával, az eloszlás térképek geofizikai szűrésével igazoltam, hogy kis vastagságú (1-5m) hulladéklerakók geomembrán hibái és azok helyei (1-2m-es is) meghatározhatók.

6. KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK AZ INVERZ FELADAT MEGOLDÁSÁVAL

A hulladéklerakók üzemidejének növekedésével egyre vastagszik a behordott hulladékok mennyisége. Egyre vastagabb hulladékrétegek esetén, bonyolultabbá válik a geoelektromos mérések kivitelezése, a mért adatok értelmezése. Amíg kis hulladékvastagságok esetén (1-5 m) elegendőek voltak az 5. fejezetben ismertetett kiértékelési módszerek, addig vastagabb behordott hulladék (5-20 m) esetén, ezen módszerek hibahely kimutató készsége egyre csökken. Vékony hulladék réteg esetén, a hulladékvastagsághoz viszonyított relatíve nagy forrás és nyelő távolság miatt, a hulladék felszínén mért hibahelyre vonatkozó információ betömörül a mérési pont felé, ezért a mérési pont felett lehet ábrázolni az értékeket. A vékony hulladék felett mérhető geoelektromos információ markánsabban jelenik meg, mint vastagabb esetben. Vastag hulladék esetén az alkalmazott Pole-Pole, Pole-Dipole geoelektromos mérések forrás és nyelő távolsága csökken a vastagsághoz képest, ennek hatására a hibahely okozta anomália szintén kialakul, de a hatása erősen kiszélesedik, a kimutatható hatás gyengül. Tovább gyengítik a felszínen mérhető geoelektromos adatokat, a hulladékban található inhomogenitások és zajok. Ezért a vastagabb hulladék felszínén végzett geoelektromos mérések kiértékelésénél szükség van a földtani szerkezetek geofizikai meghatározásánál alkalmazott újabb módszerek bevonására.

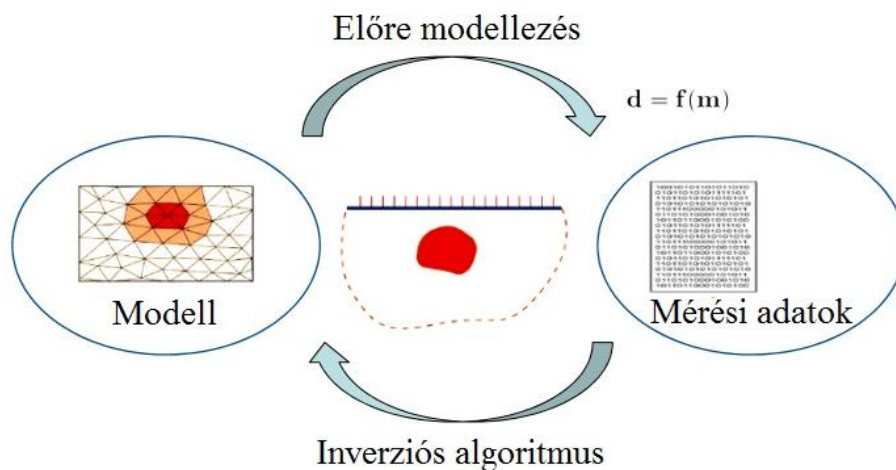
A geofizikai módszerekkel (terepen) olyan adatokat célszerű megmérni, amelyekből a szerkezeti és fizikai paramétereket közvetve, ún. kiértékelés után tudjuk megkapni. Ezt az eljárást az inverz feladat megoldásának nevezzük. Az inverz feladat megoldása azt jelenti, hogy a geofizikai (esetünkben geoelektromos) adatokból a hulladéklerakó geometriai és fizikai jellemzőit határozhatjuk meg. Vagyis ahhoz, hogy geofizikai adatokból földtani szerkezetek születhessenek, szükség van az inverz feladat megoldására. Az eljárás végén tehát előáll a geofizikai adatokból az általunk megismerni kívánt struktúra. Ebbe bele tartozik a hulladéklerakó teljes szerkezete, a geomembrán hibái.

Azonban az inverz feladat megoldásának igen szigorú feltételei vannak. Egy hulladéklerakó, az általában szokásos geofizikai kutatáshoz képest, rendkívül bonyolult, speciális, a hibahelyeket leszámítva a geomembrán által, zárt szerkezetnek minősül. A hulladéklerakó szerkezete laterálisan és vertikálisan is sok inhomogenitást tartalmaz.

A kezdeti időszakban, amikor a hulladéklerakó épülése során a sérüléseket egy vékony hulladékfeltöltésen keresztül vizsgáljuk, bonyolult 3-D modellstruktúráról beszélhetünk,

amelynek csak egyik paramétere a geomembrán hibahely. Ennek az inverz feladatnak a megoldása valódi kihívást jelent a geofizikus számára.

A geofizikai inverz feladat megoldását (inverz modellezést) megelőzi egy előzetes modell felvétele a terepi tapasztalatok és az a priori ismeretek alapján. A leképezni kívánt objektum mérési adatai és az elméleti modell közötti kapcsolatot a **30. ábra** mutatja be.



30. ábra

Az előre modellezés és az inverz feladat kapcsolata

Az inverziós feladat megoldása során a mért adatokat egybevetjük a feltételezett modellen számított adatokkal, majd jellemezzük azt. A cél az, hogy a mért és a számított adatok egyezése javuljon, eltérésük minimalizálódjon. Ezt az eljárást addig folytatjuk, amíg egy általunk meghatározott egyezőségi feltételt el nem érünk.

A geoelektromos gyakorlatban az inverz feladat megoldására alapvetően három fő kiértékelési módszert alkalmaznak (Koefoed 1979):

- Elméleti görbés illesztések,
- Fokozatos közelítések módszere,
- Inverziós módszerek.

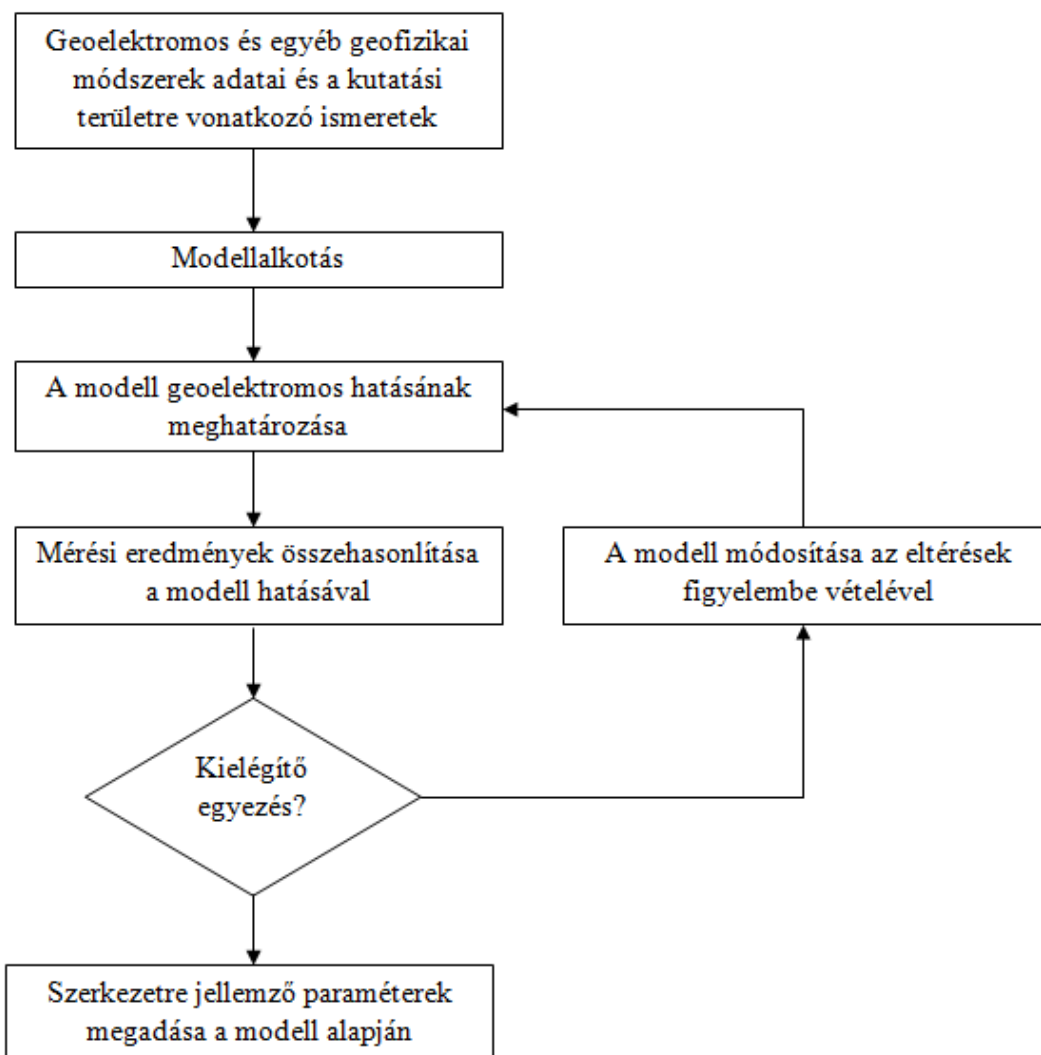
6.1. Elméleti görbés illesztések, fokozatos közelítések módszere, inverziós módszerek

Elméleti görbés illesztések alkalmával, a kiértékelő nem foglalkozik a direkt feladat megoldásával, hanem előre megszerkesztett albumokban szereplő görbe seregeket illeszt a mérési adatokra. Ilyen fajta kiértékelésekkor, a geoelektromos gyakorlatban a mérési adatok ábrázolása függvényyszerűen történik. Az ábrázolás elkészítésekor az egyik

tengelyre a mért fajlagos ellenállások (geofizikai adatok), a rá merőleges koordináta tengelyre a felhasznált mérési elrendezés elektródávolságai kerülnek.

A geoelektromos mérések kiértékelésére szolgáló széles körben alkalmazott elméleti görbéket tartalmazó gyűjtemény a „Schlumberger album” (Orellana és Mooney 1966, Zohdy 1975). A Schlumberger albumokban található elméleti görbék segítségével kiértékelhetővé válnak az egyenáramú geoelektromos mérésekből származó adatok 1-D modellek esetén. A geofizikai (geoelektromos) adatok értelmezésének első lépése, hogy a Schlumberger albumokban kikeressük a mért adatok görbáját legjobban közelítő elméleti görbét és metszetének paramétereit (h_i , ρ_i), amit a földtani felépítés közelítésének tekintünk. A kiértékelést zavarhatja, hogy a terepi adatokat tartalmazó adatsorra, több eleméleti görbe is ráilleszthető. Ilyenkor ekvivalencia problémáról beszélünk. A görbeseregek alkalmazásával lehatárolhatóvá válnak a földtani szerkezet, objektum, különböző egységei.

Az fokozatos közelítések módszerét a nemzetközi irodalomban "Trial and Error" módszerként is ismerhetjük (Tarantola 1994, Hohmann és Ward 2012). Ebben az elnevezésben röviden benne foglaltatik az eljárás lényege: az előzetes a priori információk alapján, felvesszünk egy induló elméleti modellt. Majd egybe vetve a mért és számított adatrendszerrel, az eltérés (hiba) alapján megállapítjuk, hogy milyen irányban indokolt változtatni a modellen. Ezt a feladatot általában több lépésben tudjuk megoldani. A modellen történő ismételt változtatások után újra meghatározzuk a hatást és annak a mért értékektől való eltérését, és így tovább addig, amíg a mért és számított értékek különbsége egy előre meghatározott limit alá nem csökken. Az utolsó lépésben szereplő modell az értelmezés végeredménye. Az első lépést jelentő geofizikai adatok begyűjtése és az utolsó lépésként leírt paraméterek meghatározása közé több, a kiértékelést (inverziót) jelentő részfeladat illeszkedik. A fokozatos közelítések módszere algoritmizálható. Az elvégzendő fokozatos közelítések feladatának megkezdése előtt, célszerű blokk vázlatot készíteni melyet a **31. ábra** mutat be (Steiner 1982).



31. ábra

A fokozatos közelítések módszerének blokkvázlata (Steiner 1982)

A fokozatos közelítések módszerének legfőbb különbsége az inverziós algoritmusokhoz képest, hogy az mért és számított adatok egyezésének vizsgálatakor, a kiértékelő állapítja meg mikor tekinthető egyezőnek a két modell és milyen mértékben változtatja meg a modellt. Előnyös tulajdonsága, hogy nem szükséges különösebb matematikai tudás a kiértékelés végrehajtásakor, a kiértékelő jellegzetes objektumok összehasonlításával operálhat, könnyen beilleszthető a kiértékelő egyéb irányú tudása, intuíciói a vizsgált területtel kapcsolatban. Az egyes modellek összehasonlítása kvalitatív módon végezhető. A geofizikai, ezen belül geoelektromos mérések kiértékelésére az utóbbi években egyre jobban terjedő eljárások az inverziós módszerek. Az inverziós módszerekre is érvényes a **31. ábra** blokkvázlata, csak ezeknél a módszereknél a mért és számított adatok minimalizálását különböző algoritmusokkal működő inverziós programok végzik.

Az adatokkal kapcsolatban számítani kell arra, hogy a geofizikai adatok minden esetben zajjal terheltek. Ennek fontos következménye, hogy a kiértékelési eredmények mindig hibásak lesznek. A zaj egy része a mérések geometriai hibáiból, másik részük a műszerek mérési hibáiból származik. Továbbá számítani kell még, az ún. modellhibákból eredő zajra. Modellezés szempontjából zajnak számít egy homogén modelltől történő eltérés is. Hulladéklerakók esetében, egy homogénnek tekinthető monodepónián belül (pl. hígtrágya, vörös iszap, gázgyári cianidokat tartalmazó iszap) zajként jelenik meg modellezési szempontból egy inhomogenitás megjelenése.

Egyszerű földtani szerkezetek felett végzett Vertikális Elektromos Szondázás (VESZ) mérések látszólagos fajlagos ellenállás adatokból (szondázási görbe) sokszor, egyedi inverziós módszerekkel becsülik a lokális rétegeparamétereket (Koefoed 1979). A leggyakrabban a Schlumberger mérési elrendezést alkalmazzák. A modell felvételénél 1-D közelítést alkalmaznak. Az alkalmazás feltétele, hogy a modell horizontálisan csak kis mértékben, „lassan” változzon.

Manapság rendkívül nagy intenzitással fejlesztik az inverziós módszereket, leginkább az együttes inverziót, amely sokféle geofizikai adatból történő szelvény menti, vagy területi megoldások irányába mutat a különféle „inverziós technikák” alkalmazásával (Menke 1984, Pellerin és Wannamaker 2005).

„Gyorsan” változó, azaz tipikus 2-D és 3-D struktúrák kutatására a hagyományos VESZ-től eltérő módszereket dolgoztak ki. Ennek lényeges eleme, hogy a méréseket a horizontális szelvényezés és a vertikális szondázás kombinációjaként végzik. A mérési adatokból - az elrendezésnek megfelelő vonatkozási pontokban ábrázolt látszólagos fajlagos ellenállás értékek alapján - látszólagos fajlagos ellenállás szelvényeket (pseudo szelvények) szerkesztenek, amelyek a kiértékelési módszerek alapjául szolgálnak. A méréseket általában előre telepített, egyenközű sokelektrodás, a központból vezérelt mérőrendszerrel valósítják meg.

A mérési adatok (szelvények) kiértékelésére, ill. interpretálására sokféle módszert alkalmaznak, melyekről jó áttekintést ad Gyulai és Ormos (1999a). Ezek közül a módszerek közül egyre nagyobb szerepet játszanak az olyan inverziós módszerek, amelyek 2-D és 3-D geoelektromos struktúrák kiértékelésére is alkalmasak (Barker 1992, Loke és Barker 1996). Ezen inverziós módszerek alkalmazásában viszont problémát jelent a becslés megbízhatóságának gyengesége, amely általában a sok ismeretlenből származik.

A megbízhatóság növelésének módja az együttes inverziós módszerek alkalmazása, vagy a becsült modellparaméterek számának csökkentése. Ez utóbbinak viszont kétségtelenül

határt szab a hulladéklerakó modell bonyolultsága. A modellparaméterek számának egyik csökkentési módja a modell geometriai és fizikai jellemzőinek függvényekkel történő leírása a mérési szelvény mentén (Gyulai és Ormos 1998a, Gyulai és Ormos 1999a, Gyulai 1999a, b, c). A függvényinverziós módszerek (sorfejtési módszerek) lényege, hogy a rétegvastagságokat (közvetve a határfelületeket) és a geofizikai paramétereket (a fajlagos ellenállásokat) a szelvény mentén függvényekkel írják le. Az inverzióban a sorfejtési együtthatókat határozzák meg, majd azok segítségével a szelvény mentén pontról-pontra kiszámítják a modell lokális paramétereit. A sorfejtéses inverzióban az ismeretleneket jelentő együtthatók alkalmazásával együttes inverzió valósítható meg.

Az együttes inverzió megvalósítható azonos vagy különböző fizikai paramétereken alapuló geofizikai módszerek adataival. Az együttes inverzió használatával feloldható az egyedi inverziós eljárások alkalmazásakor jelen lévő ekvivalencia probléma (Vozoff és Jupp 1975, Dobróka et al. 1991). Az eddig ismert szimultán és joint inverziós módszerek akkor hatékonyak, ha a földtani-geofizikai modellnek van legalább egy közös paramétere. A közös paramétereket általában a rétegvastagságok jelentik. A határfelületek kölcsönös megfeleltetése azonban nem mindig lehetséges, amely gátolja a joint inverzió alkalmazását.

A geofizikai adatok kiértékelésére már évtizedekkel ezelőtt megalkotásra kerültek komplex kiértékelési módszerek. A komplex kiértékelések korábban annyit jelentettek, hogy a kutatott területen végzett különböző típusú geofizikai mérések eredményeit külön úton értékelték ki. Majd az egyes szakterületekkel foglalkozó szakemberek az önállóan megalkotott kiértékelési eredményeket egymással egyeztetették. Ebből az egyeztetési folyamatból fejlődött ki a joint inverzió algoritmizált változata.

A hagyományos VESZ mérések értelmezésére fejlesztették ki a 1,5-D inverziós módszert (Gyulai és Ormos 1998a, 1999a). A módszer lényege, hogy a 2-D földtani modell laterális változásait sorfejtéssel írják le alkalmasan választott bázisfüggvények segítségével. Ebben az iteratív inverziós algoritmusban 1-D előremodellezést alkalmaznak. Az 1-D közelítés miatt, a 1.5-D inverzió eredményét csak laterálisan „lassan” változó geológia szerkezeteknél célszerű elfogadni végeredményként.

A pontosabb kiértékelési eredmények érdekében gyorsan változó földtani szerkezetek esetében szükség van az inverzióban egy második lépésre, azaz az előremodellezésben 2-D vagy 3-D alkalmazására. Gyulai és szerzőtársai (2010) az előremodellezésre a 3-D modellekre kidolgozott FD algoritmust alkalmazzák (Spitzer 1995) még akkor is, ha az előremodellezés 2-D. Ezzel a módszerrel bonyolult geológiai szerkezetek is

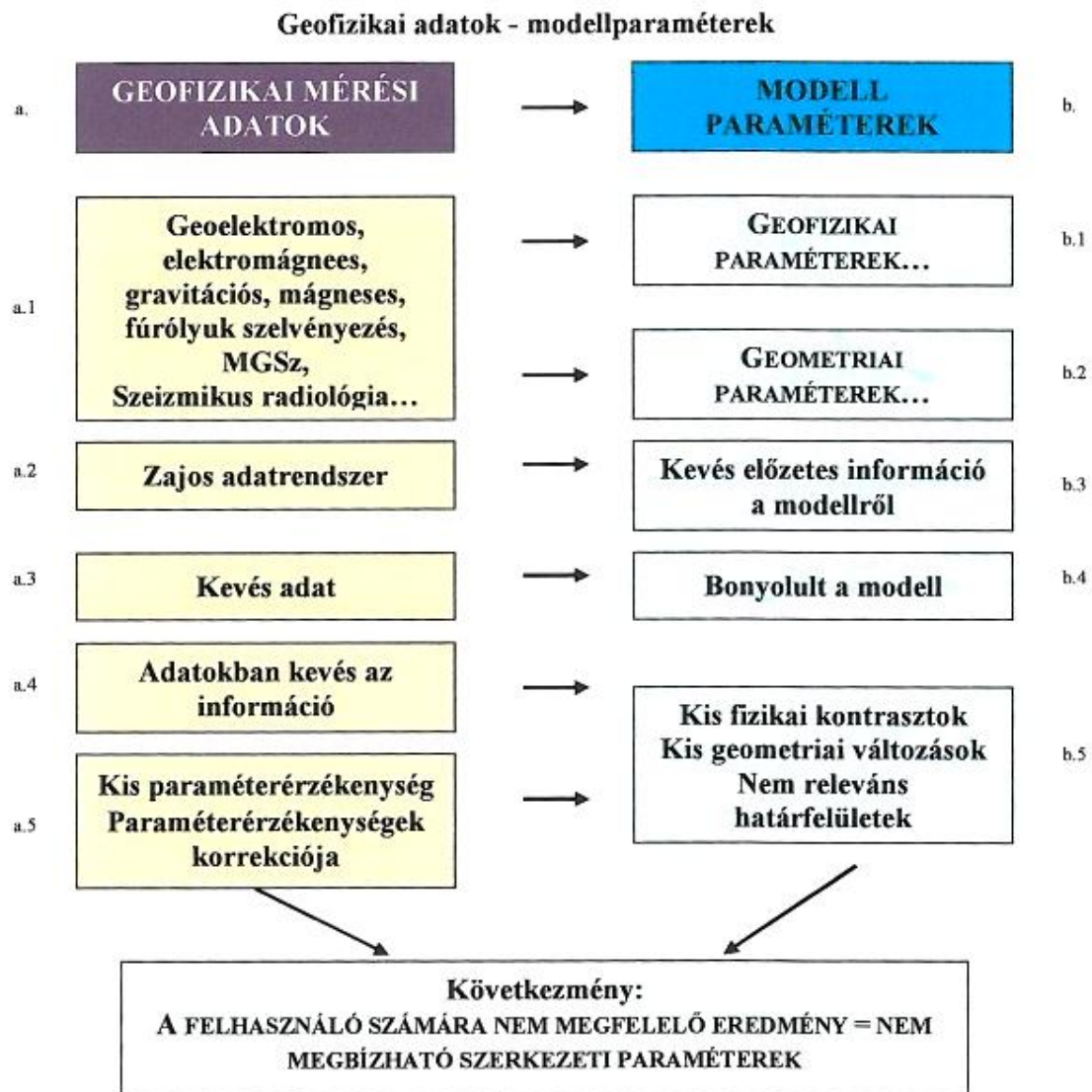
meghatározhatók. A 2-D előremodellezésre alapozott közelítő 3-D inverziót (Gyulai és Tolnai 2012) 2.5-D inverzióknak nevezték el.

A fent leírt inverziós eljárások mindegyike egyszerűsítéseket, közelítéseket alkalmaz, amelyek nem használhatóak a hulladéklerakókhoz hasonló bonyolult 3-D objektumok kiértékeléséhez. A geomembránnal szigetelt hulladéklerakók nagyon speciális 3-D szerkezete miatt, szükség van a 3-D modellek használatára. Nem alkalmazhatóak 1-D, 2-D, sem 3-D közelítések. A nagyon szigorú megkötések miatt, a geofizikában általában használatos közelítések (approximációk) nem alkalmazhatóak a modell egyszerűsítésére.

6.2. Egyesített fokozatos közelítés módszere

A hulladéklerakók előremodellezési vizsgálatainak kiértékeléséhez munkám során az interaktív kiértékelések családjába sorolható egyesített fokozatos közelítés módszerét alkalmaztam, amely az adategyesítés miatt hasonlít a joint inverzióhoz (Gyulai és Baracza 2012). Az egyesített fokozatos közelítés módszer elnevezésben az egyesített kifejezés alatt nem feltétlenül a különböző fizikai paraméterek alapján működő geofizikai módszereket kell érteni, hanem olyan geofizikai módszereknek az egyesítését, amelyeknek eltérő a paraméter érzékenysége.

A módszer szemléltetéséhez a **30. ábrára** utalnék vissza, melyben a terepi adatok és az előremodellezés közötti kapcsolatot az inverz út jelenti, amelynél a bemutatni kívánt egyesített fokozatos közelítés módszert alkalmazom. Az egyesített fokozatos közelítés módszerét a fokozatos közelítések módszeréből fejlesztettem tovább. Azért, hogy megértsük az egyesített fokozatos közelítés módszerét nézzük meg az inverz feladat néhány problémáját, amelyet a **32. és 33. ábra** szemléltet. Az **32. ábra** bal oldalán a mérési adatok és az azokból származó problémák, a jobb oldalán a modellparaméterek és az azokhoz kapcsolódó problémák (inverz feladat problémái) láthatók (Gyulai 2010).



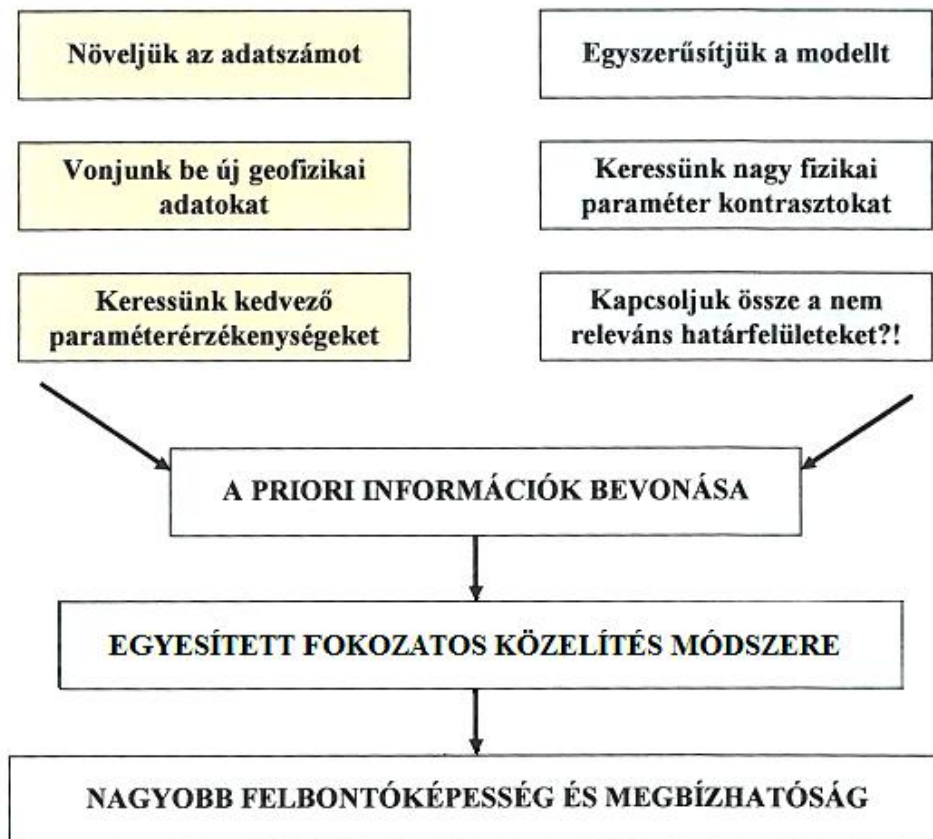
32. ábra
A kiértékelés minőségének javítása (Gyulai 2010)

Az egyes geofizikai módszereket attól függően nevezik el (a.1), hogy milyen geofizikai paramétereken (b.1) (paraméter különbségeken) alapulnak. A geoelektromos módszerek a kőzetek elektromos vezetőképességén (fajlagos ellenállásán), az elektromágneses módszerek az előbbi mellett a dielektromos állandó különbségeken, a mágneses módszerek a kőzetek mágneses szuszceptibilitásán, a gravitációs módszerek a sűrűség különbségeken, a szeizmikus módszerek az eltérő hullámterjedési sebességeken (egyres módszereknél a sűrűségkülönbségek), a radiometriai módszerek a kőzetek radiológiai sajátosságain alapulnak. Az adatokkal kapcsolatban számítani kell arra, hogy a geofizikai adatok minden esetben zajjal terheltek (a.2). Ennek fontos következménye, hogy a kiértékelési eredmények is valamilyen szinten hibásak lesznek. A zaj egy része a mérések geometriai hibáiból, másik részük a műszerek mérési hibáiból származik. Továbbá, az ún.

modellhibákból is adódik zaj. Amennyiben a geofizikai adatokból bonyolult szerkezeteket, azaz sok ismeretlen szeretnénk meghatározni, gyakran jelent problémát, hogy ehhez kevés adat áll rendelkezésre (a.3). Lehetséges az is, hogy sok geofizikai adatot mértünk, de nincs elegendő információ azokban a szerkezetekről. Melynek egyik oka lehet például a kis paraméterérzékenység (Gyulai 1989). Ennek következménye, hogy az inverz feladat megoldásánál nincs lehetőségünk a paraméterek kívánatos részletességű meghatározására. Az inverz feladat megoldásához (a geokörnyezet megismeréséhez) a lehető legtöbb előzetes információt kell összegyűjteni a geokörnyezetről (b.3). Mivel a modell a környezet egyszerűsített és parametrizált változata, ezért a tényleges környezetet pontatlanul írja le, amely hibákat okoz a kiértékelésben. A hiba csökkentésére a modell bonyolításával lenne lehetőség, azonban ez több ismeretlen meghatározását igényelné, amely más oldalról hibás kiértékelést okozhat.

Gyakori probléma, hogy kicsik a geofizikai kontrasztok a határfelületek két oldalán, illetve kicsik a geometriai változások, amelyeket szeretnénk kimutatni. Mindezekből következik, hogy a geofizikai kutatás egyszerű módszerekkel nem mindig képes a felhasználó számára megfelelő pontosságú adatokat szolgáltatni.

A **33. ábra** segítségével mutatók be azok a lehetőségek, amelyekkel a fenti problémák jelentős mértékben feloldhatóak, azaz nagyobb felbontóképességű és megbízhatóságú eredményt lehet velük elérni (Gyulai 2010).

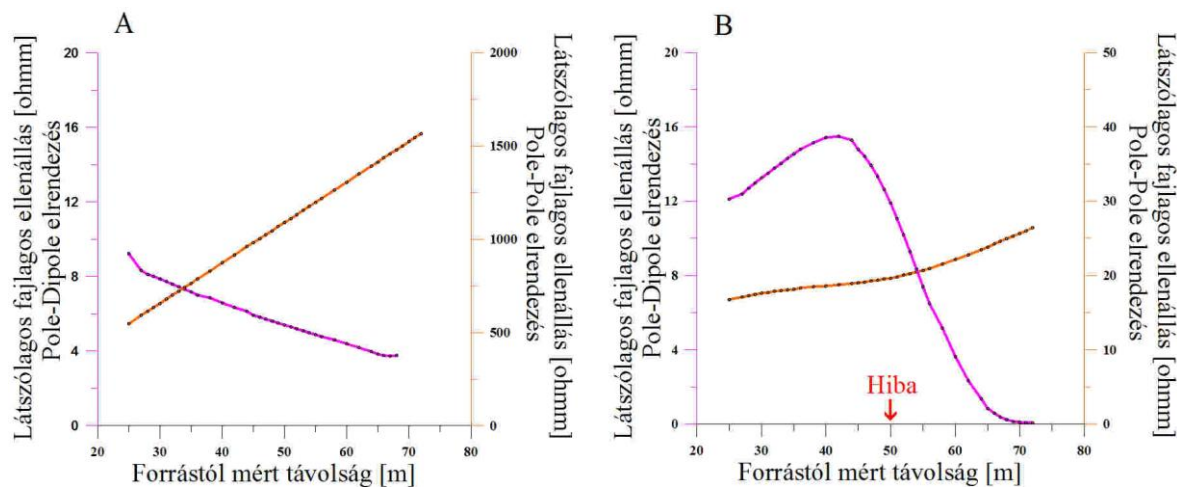


33. ábra
A kiértékelés javításának eszközei (Gyulai 2010)

A kiértékelés minőségét javítja az összes a priori információ bevonása. Mindig mérlegelni kell, mit lehet tenni annak érdekében, hogy a tanulmányozott szerkezet sajátságai, tulajdonságai minél jobban kiemelhetők legyenek. Ha gyengén kimutatható egy vizsgált paraméter, mi lehet annak az oka. Hulladéklerakók esetén, az okok között szerepelhetnek a kismértékű geometriai változások vagy fajlagos ellenállás kontrasztok (kisméretű a hibahely), vagy hulladék vastagsága. Ekkor mit lehet tenni annak érdekében, hogy javuljon a hiba kimutathatósága? Van-e elegendő információ, mit helyeztek el a hulladéklerakó testen belül, és ha igen milyen inhomogenitásokra lehet számítani? Ha nincs elegendő a priori információja a kiértékelőnek, az is elképzelhető, hogy nem megfelelő eredmény születik meg a kiértékeléskor. Ezért mindig törekedni kell arra, hogy a legtöbb beszerezhető információ alapján a különböző típusú adatokat egybe vetve történjen a kiértékelés. Több eltérő paraméterérzékenységgel rendelkező adat bevonásával jutunk el az egyesített fokozatos közelítések módszerhez.

A korábban említett geofizikai inverziós eljárások mindegyikénél, alkalmaznak egyszerűsítéseket, közelítéseket. A hulladéklerakók viszont olyan összetett 3-D

objektumoknak felelnek meg, amelyeknél nem engedhető meg az egyszerűsítés, mert az nagy hibát okoz a kiértékelésben. Másként, az alkalmazott modellek túlságosan nagy hibával lennének terheltek.



34. ábra

Pole-Pole és Pole-Dipole elrendezéshez tartozó látszólagos fajlagos ellenállás értékeket tartalmazó szondázási görbék

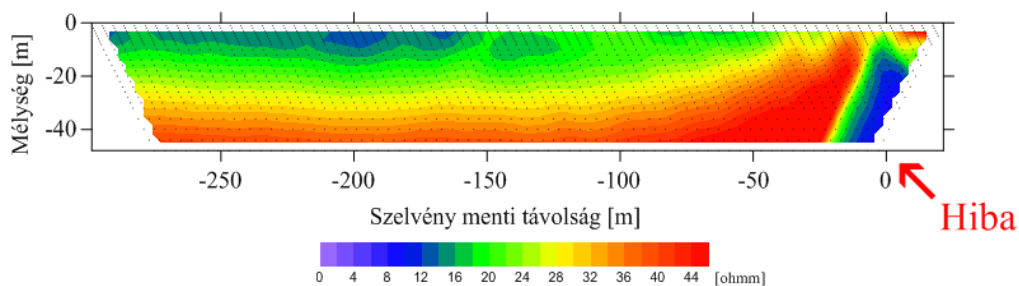
A) Hibátlan geomembránt tartalmazó modell esetén; B) Geomembrán hibahelyet tartalmazó modell esetén

Az egyesített fokozatos közelítés módszer megértéséhez egy szintetikus modellszámítás eredményét mutatom be. A **34. ábra** Pole-Pole és Pole-Dipole mérési elrendezések látszólagos fajlagos ellenállás értékeit mutatja be egy tipikus hulladék modell eredményeit összehasonlítva. A **34. ábra** A részén geomembrán hibát nem tartalmazó, a B részén hibát tartalmazó esetet ábrázol. Látható, hogy jelentős különbség van a két mérési elrendezés adatai között. Az egyesített fokozatos közelítés módszer ezt a különbséget használja ki a mért adatok és az elméleti adatok összehasonlításakor. A dolgozat további részében ezt részletesen kifejtem.

Az egyesített fokozatos közelítések módszer bemutatására, egy magyar geofizikai szolgáltató cégtől kapott hazai geomembrán szigeteléssel rendelkező kommunálishulladéklerakó felszínén végzett egyenáramú geoelektromos mérés adatait használtam, melyet a **35. és 36. ábrák** mutatnak be. Ezen hulladéklerakó felszínén több szelvény mentén is történtek egyenáramú geoelektromos mérések. Ezek közül a bemutatott szelvényben, kimutatható volt egy nagyméretű geomembrán hibahely jelenléte. A mérések Pole-Pole (kételektrodás) elrendezésben történtek. A **35. ábrán** jól látható, egy a szelvény jobb oldalán található sötétkéssel jelölt 10 ohmm körüli alacsony fajlagos ellenállású zóna, a 0 m-es szelvényvonal környezetében. Ezen felszín felé lezáródó alacsony fajlagos ellenállású zóna

egy nagy kiterjedésű 5 m*5 m-es hibahely hatására alakult ki. Az szelvény többi részén csak felszín közeli alacsony fajlagos ellenállású inhomogenitások figyelhetők meg 12-16 ohmm értékekkel sötétkék színnel jelölve, mely a lerakóba behordott nagy agyagtartalmú hulladék következménye. A látszólagos fajlagos ellenállások eloszlásából látható, hogy a mélység irányába növekszik a fajlagos ellenállás. A szelvény mélyebb rétegeiben tapasztalható fajlagos ellenállás növekedés és a rendelkezésre álló a priori információk alapján, az aljzatszigetelés hatásának vehető. A behordott hulladék vastagsága 20 m. A hulladéklerakó felszínén kijelölt szelvény mentén a mérőelektródák egyenközűen 1 m-es távolsággal voltak telepítve.

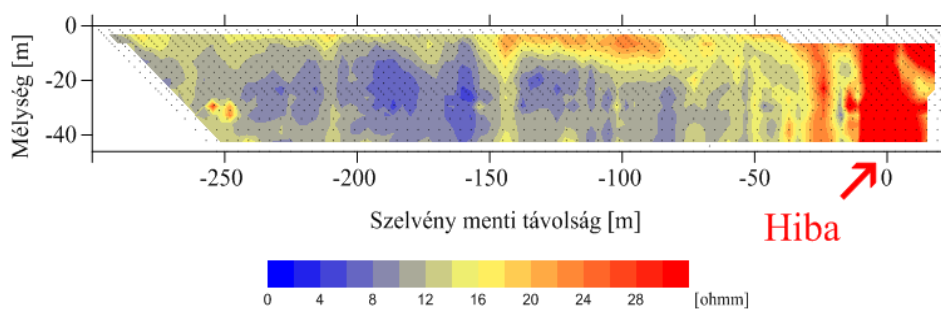
Az **35. ábrán** bemutatott szelvényben megfigyelhető fekete pontok, a vonatkozási pontokban definiált mérési eredmények helyét mutatják. A szelvény két szélén elhelyezkedő fehér színnel letakart terület alatt nem áll rendelkezésre mérési adat.



35. ábra

A hulladéklerakó felszínén Pole-Pole elektróda elrendezéssel mért látszólagos fajlagos ellenállás eloszlás szelvénye

A hibahely pontosabb meghatározása érdekében a szelvény mentén mért potenciálértékek ismeretében kiszámolhatóak a Pole-Dipole (három elektródás) mérési elrendezésre vonatkozó látszólagos fajlagos ellenállás értékek, melyet a **36. ábra** mutat. Ezzel a módszerrel, plusz információk vonhatók be a geomembrán hibahely keresésére irányuló hulladéklerakó felszíni vizsgálathoz, hiszen a Pole-Dipole elrendezésnek mások a lerakótéren belüli objektumokra vonatkozó paraméterérzékenységei.



36. ábra

A hulladéklerakó felszínére számolt Pole-Dipole elektróda elrendezés látszólagos fajlagos ellenállás eloszlás szelvénye

A **36. ábrán** is jól látható a 0 m-es szelvényvonalban megfigyelhető anomália, ami magas ellenállású zónaként jelenik meg a környezetéhez képest. Előre is megjegyzem, hogy ez a nagyon pozitív anomália csak látszólag kapcsolódik a hibahelyhez. A kiértékelés eredménye szerint ez „elsősorban” a hulladéklerakó belső inhomogenitása. A szelvény többi részén megfigyelhető inhomogenitás a hulladéklerakóba behordott eltérő összetételű változatos geometriájú hulladékoknak köszönhető. Első pillanatra úgy tűnik, hogy ezen a szelvényen nem látható olyan anomália, amely a geomembrán hibahelyéből származna. Ezt a szelvényt csak az egyesített fokozatos közelítés módszerével kapott kiértékelés alapján érthetjük majd meg. A természetben található felszín közeli geológiai szerkezetek ekkora inhomogenitásokat és változékonyságot csak ritkán és nagyon kivételes esetekben mutatnak. A hulladéklerakót összességében modellezve, ami a hulladéktest mellett, magába foglalja az aljzatszigetelésre szolgáló geomembránt és a hulladéklerakót befogadó geológiai környezetet is, csakis szigorúan 3-D modellekkel írhatóak le. Az egyesített fokozatos közelítés módszer alkalmazásához a priori információkat szükséges gyűjteni a mérési területről:

- eddig behordott hulladék vastagsága,
- lerakás módja,
- behordott hulladékok fajtája,
- csurgalékvíz, talajvíz adatok,
- esetleges mozgások,
- belső lebomlási folyamatok,
- csapadék adatok,
- szigetelésre szolgáló geomembrán fajtája, vastagsága,
- eddig tapasztalt hibajelenségek,
- figyelő kutak minőségi adatainak változása,
- geomembrán alatt elkészített természetes agyagszigetelők anyaga, vastagsága,
- befogadó geológiai környezet anyagminőségi jellemzői,
- stb.

Az összegyűjtött a priori információk alapján és a hulladékfelszíni geoelektromos mérési adatok birtokában, felállítható egy előzetes modell. Itt utalnék vissza a **31. ábrán** bemutatott blokkvázlatra. Mivel az egyesített fokozatos közelítés módszere egy iteratív jellegű módszer, ezért minden lépésben vizsgálni kell, hogy a megalkotott modellen számított adatok mennyiben térnek el a mért adatoktól. Az egyesített fokozatos közelítés

módszer iterációinak akkor van vége, ha a fokozatos változtatásokon átesett modellből ábrázolt eloszláskép megjelenése, és jelen esetben a terepi adatok alapján készült szelvény között, előzetesen meghatározott eltérés alá csökken.

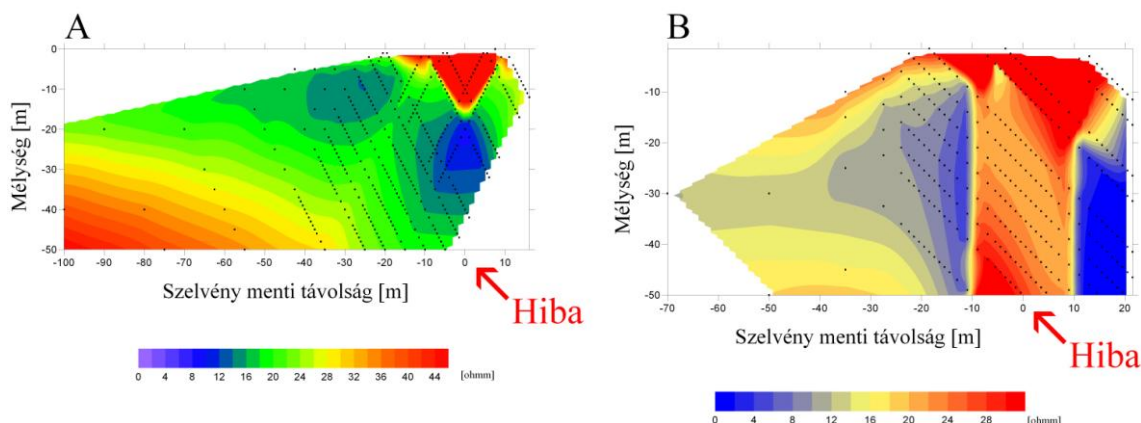
A „Kezdeti modell” megalkotásához a **21. ábrán** bemutatott „Általános hulladékmodell”-t vettem alapul, amelyet a rendelkezésre álló a priori ismeretek alapján pontosítottam. Az általános hulladékmodellben szereplő hulladék vastagságot megtartottam, ami 20 m. A szigetelőréteg fajlagos ellenállását 500.000 ohm-m-nek, a geomembránnal körülhatárolt hulladékkazetta oldalait 300 m*300 m-es méretűnek állítottam be. A hulladék felső két és fél méteres takaró rétegét 30 ohm-m, míg a mélyebben fekvő hulladékok fajlagos ellenállást 10 ohm-m-es értékre állítottam be. Mivel a terepi adatokból készült Pole-Pole (kételektrodás) szelvényben, amit a **35. ábra** mutatott be, a -50 m-es szelvényvonal környezetében emelkedett fajlagos ellenállású zóna észlelhető, ezért a kezdeti modellben, a hiba felett egy 200 ohm-m fajlagos ellenállású 20 m széles inhomogenitást építettem be. A Pole-Pole szelvény alapján, a modell 200 ohm-m-es inhomogenitásának geometriai közepe alá helyeztem a geomembrán hibahelyét, amely 5 m*5 m kiterjedésű. A 200 ohm-m fajlagos ellenállású inhomogenitás megfelel egy agyagos felületekkel rendelkező betontörmeléknek. A valóságban igen gyakran, az aljzatszigetelés alatt és felett elhelyezkedő csurgalékvízzel átítatott zóna reprezentálására 0,1 ohm-m fajlagos ellenállású rétegeket helyeztem. A geomembrán alatti csurgalékvízzel szennyezett és a felette elhelyezett szivárgó réteg vastagsága 0,5 m.

Megjegyzem, hogy a dolgozatban nem mutatom be azon modell számítások eredményét, amelyet a jól vezető (0,1 ohm-m) rétegek nélkül végeztem Pole-Pole elrendezésre. Az így számított látszólagos fajlagos ellenállások értéke csaknem tízszer nagyobb volt, mint a mért értékek és a szelvény szakaszon sehol sem alakult ki hibára utaló lokális jellegű jelentős fajlagos ellenállás csökkenés. Ezért az irodalmi ajánlásokat is felhasználva áttértem a geomembrán felett elektromosan jól vezető (erősen szennyezett) szivárgó réteget is tartalmazó modellekre. A geomembrán meghibásodása esetén ilyen zóna a szigetelő alatt is kialakulhat. Ugyancsak nem mutatom be még néhány paraméter olyan megválasztásának eredményét, amelynél az elméleti modellre számított értékek többszörösen nagyobbak voltak Pole-Pole elrendezésben, mint a mért értékek. Az előbbieken alapján a „Kezdeti modelleknek” már azt a modellt nevezem, amelynél a Pole-Pole elrendezésben nagyságrendi és alaki jellegzetesség volt tapasztalható az elméleti és mért értékek között, persze figyelemmel az a priori ismeretekre is.

A kezdeti modellből számolt fajlagos ellenállás eloszlástérképeket a **37. ábra** mutatja. Az ábra bal oldalán a Pole-Pole, a jobb oldalán a Pole-Dipole mérési rendszernek megfelelő látszólagos fajlagos ellenállások szelvényei láthatók (azonos modellre). A fehérrel jelzett területeken nincsenek adatok, ezért kerültek az ábrán letakarásra. Az ábrán vonalszerűen elhelyezkedő fekete színű pontok, az egyes terítésekhez tartozó vonatkozási pontokat jelentik.

Szelvény menti ábrázolások alkalmával, a geofizikában szokásos gyakorlatot követtem a vonatkozási pontok ábrázolásakor, a Pole-Pole elrendezés esetén, a felszínen az AM távolság felét, a mélység irányában az AM távolságot jelenti. Pole-Dipole konfiguráció esetén, a mérési adatok vonatkozási pontjai a felszínen az MN elektródák közti távolság felező pontjánál, a mélység szerinti elhelyezkedése $\frac{AO}{2}$ távolságnál helyezkedik el. Ahol O az MN mérőelektródák közepét jelenti.

A **37. ábra** bal oldali Pole-Pole mérés szerinti előremodellezési adatai a terítések középpontjaitól pozitív és negatív irányban is ábrázolásra kerültek, míg a Pole-Dipole mérési rendszernek megfelelő adatok csak \overline{AO} pozitív irányába kerültek ábrázolásra. Az ábrázolt adatok, a szemléletesebb bemutatathatóság érdekében, csak kinagyított részei a teljes modellezési térnek. Az **37. ábra** 0 m-el jelölt szelvényvonala megfelel, a **35. ábrán** Pole-Pole elrendezésben terepen mért szelvény 0 m-es vonalában ábrázoltakkal. A **37. ábra** 0 m-es szelvényvonalban található a hibahely attól jobbra és balra. A geomembrán hibahely felett kis mélységben látható vörös szín árnyalataival megjelenített nagy fajlagos ellenállású zóna, a lerakott betontörmelék hatásának felel meg. A hibahely alatti térségben alacsony fajlagos ellenállású zóna látható. A **37. ábra** jobb oldalán, Pole-Dipole elektróda elrendezésnek megfelelő eloszlástérkép látható. A jobb oldali eloszlástérképen jól megfigyelhető a szelvény menti távolság -10 m és 10 m közötti szakaszán, a modellben 20 m szélesre beállított (becslés alapján) betontörmelékek helye.

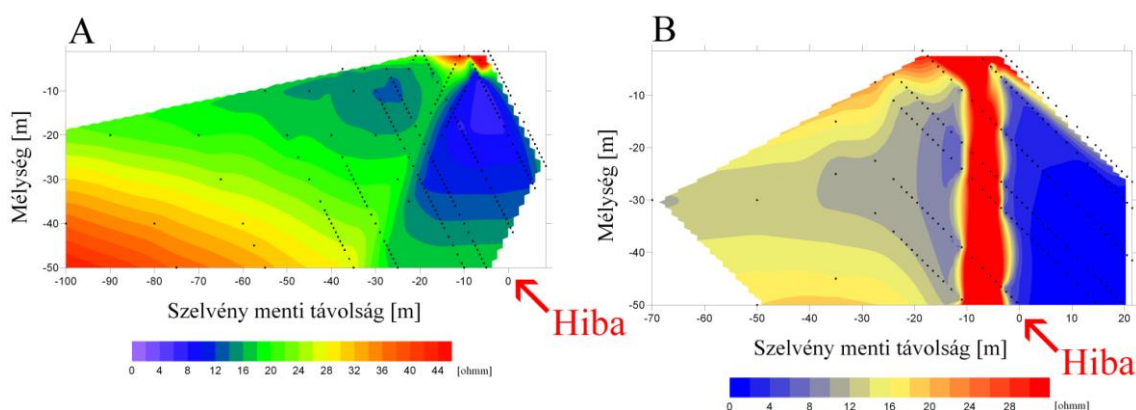


37. ábra

**Látszólagos fajlagos ellenállás szelvények és a hiba helye
„kezdeti modell” esetén**

A) Pole-Pole elektróda elrendezés; B) Pole-Dipole elektróda elrendezés

A modell finomítása érdekében a **31. ábrán** bemutatott blokkvázlatra visszautalva, a „Kielégítő egyezés?” vizsgálatnál a „Nem kielégítő egyezés” útra terelve a kiértékelést, újabb modellváltozatra készültek számítások, ezzel elindítva az iterációk sorát. Az egyesített fokozatos közelítés módszer szerint végrehajtott iterációs lépések közül kiragadva néhány részeredményt, mutatom be a célmodellhez történő eljutás állomásait. A „Kezdeti modell” után következő lépés eredményét mutatja a **38. ábra**. Az eltérés a kiindulási modellhez képest az, hogy a nagy ellenállású betontörmelék horizontális irányú kiterjedését csökkentettem, így az eredeti 10 m szélességű inhomogenitás helyett, a szélessége 4 m-re csökkent. A modellben oszlopszerűen elhelyezkedő inhomogenitás széle, a -10 m-es szelvényvonalnál kezdődik.



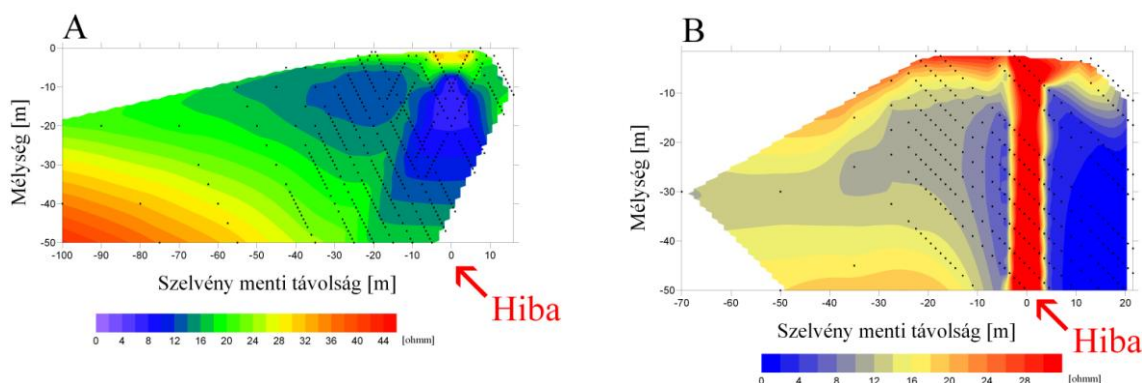
38. ábra

**Látszólagos fajlagos ellenállás szelvények és a hiba helye
aszimmetrikusan keskenyített inhomogenitás esetén**

A) Pole-Pole elektróda elrendezés; B) Pole-Dipole elektróda elrendezés

A **38. ábra** bal oldalán a Pole-Pole elrendezés eredményeit bemutató szelvényen látható, hogy az inhomogenitás keskenyítésének hatására, zsugorodott a felszínen észlelhető

emelkedett ellenállású zóna területe (meleg színek) és feljebb húzódott a csökkent ellenállású terület (hideg színek). Az ábra jobb oldalán bemutatott Pole-Dipole mérési elrendezéshez tartozó eloszlástérkép -10 m és -4 m közötti sávjában a felszíntől a szelvény aljáig markánsan végig húzódik egy emelkedett 50 ohmm körüli látszólagos fajlagos ellenállású zóna, ami a 3-D modellben elhelyezett 200 ohmm-es objektum (betontörmelék) következménye. Tovább módosítva a modellt, szimmetrikusan csökkentettem a koordináta rendszer közepén elhelyezett 200 ohmm-es zóna határait, a +3m és -3m-el jelzett szelvény menti távolságok közé, amelyet a **39. ábra** mutat.

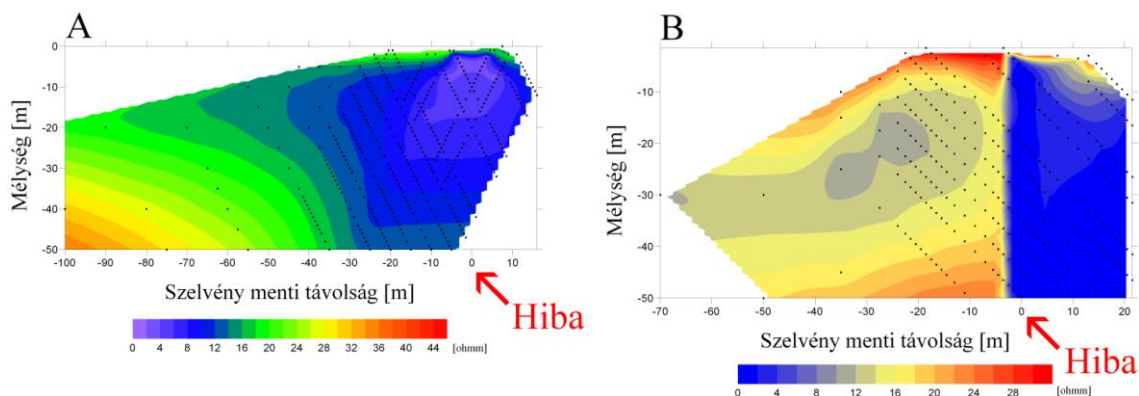


39. ábra

Látszólagos fajlagos ellenállás szelvények és a hiba helye szimmetrikusan keskenyített inhomogenitás esetén

A) Pole-Pole elektróda elrendezés; B) Pole-Dipole elektróda elrendezés

A **39. ábrán** bemutatott modell további finomítást igényelt, ezért próba képpen 3-D modell közepén elhelyezett 200 ohmm-es inhomogenitás fajlagos ellenállását drasztikusan 1 ohmm-re cseréltem, mintha a lerakóba egy oldott ionokban gazdag iszapszerű hulladékot helyeztek volna el. Ennek a hatását mutatja a **40. ábra**.

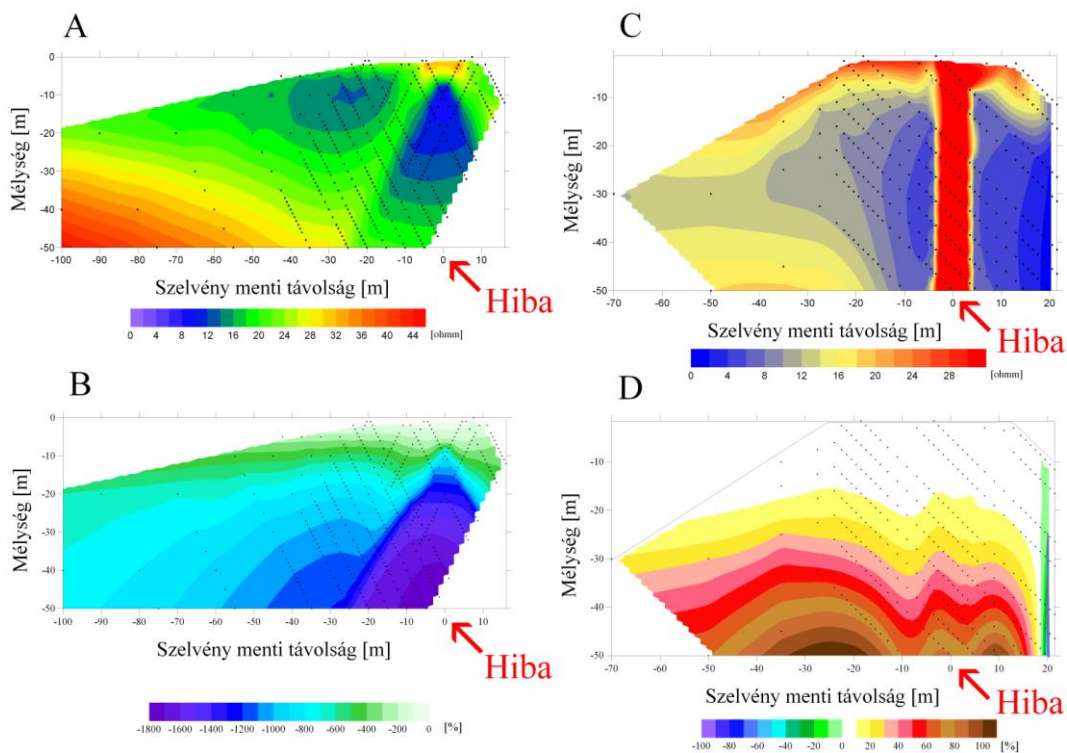


40. ábra

Látszólagos fajlagos ellenállás szelvények és a hiba helye 1 ohmm-es értékkel kitöltött keskeny szimmetrikus inhomogenitás esetén

A) Pole-Pole elektróda elrendezés; B) Pole-Dipole elektróda elrendezés

A **40. ábrán** jól látható, hogy a modellben a hiba középpontja felett szimmetrikusan elhelyezett +3 m és -3 m szelvény menti távolságok közötti alacsony fajlagos ellenállású hulladék hatására, mind a bal oldali Pole-Pole, mind a jobb oldali Pole-Dipole elrendezéshez tartozó szelvényen eltűnt a pozitív anomália sáv és erősen kiszélesedett a 2-4 ohmm-el jellemezhető alacsony látszólagos fajlagos ellenállású terület. Fontos megállapítani, hogy a hulladéklerakó belső csökkent fajlagos ellenállású inhomogenitása a Pole-Pole számított és mért képén is erősen összerosódik a hiba hatásával, míg a Pole-Dipole szelvényen ugyanez nem következik be. További módosításokat végrehajtva a modellen, jutottam el a hányószerűen lerakott 200 ohmm fajlagos ellenállású inhomogenitás alakjához. Ezen inhomogenitási geometria nyújtotta a kvázi a legjobb egyezést, a terepi mérések alapján készített **35. és 36. ábrán** bemutatott Pole-Pole és Pole-Dipole látszólagos fajlagos ellenállás szelvényekkel, melyet a **41. ábra** mutat. Az ábra bal oldalán Pole-Pole (A, B), a jobb oldalán Pole-Dipole (C, D) elrendezéshez tartozó eloszlás szelvények láthatók. Az ábra A és C része látszólagos fajlagos ellenállásokat ábrázol. Az alul ábrázolt B és D részek elkészítéséhez a korábban bemutatott (8) képlet szerinti normálást használtam.



41. ábra

Látszólagos fajlagos ellenállás és normált eloszlás szelvények

200 ohmm-es hányószerűen a hibahely felett lerakott inhomogenitás esetén

A) Pole-Pole látszólagos fajlagos ellenállás szelvény; B) Pole-Pole normált eloszlás szelvény; C) Pole-Dipole látszólagos fajlagos ellenállás szelvény; D) Pole-Dipole normált eloszlás szelvény

A **41. ábra** B jelű normált eloszlásképén megfigyelhető, hogy a szelvény menti távolság 0 vonalában 20 m-es mélységben -1200% körüli érték mutatja a geomembrán hibahelyét. A Pole-Dipole elrendezéshez tartozó D jelű normált eloszlásképén viszont a hibahelyére utaló pozitív negatív anomália közötti 0%-os izovonal értéke a szelvény menti távolság 20 m-es vonalában figyelhető meg. Amely eltolódás a hibahely felett elhelyezett inhomogenitás következménye.

Elvégezve a **35. és 36. ábrák** terepi adatait tartalmazó eloszlás szelvényeinek és a **41. ábrán** látható Pole-Pole és Pole-Dipole szelvények képi összehasonlítását megállapítható, hogy az egyesített fokozatos közelítés módszer segítségével elvégzett 3-D modellezéssel, a terepi adatok inverz feladatának végrehajtásakor a terepi adatrendszerhez közeli egyezés érhető el. Az a priori ismeretek alapján felépített kezdeti modellből az általam kifejlesztett egyesített fokozatos közelítés módszer segítségével geoelektromos szempontból rekonstruálható a nagy inhomogenitásokkal és extrém fajlagos ellenállás viszonyokkal jellemezhető hulladéklerakó.

Az inverz feladat megoldásának bonyolultságát mutatja az egyesített fokozatos közelítési módszer ábrái (**37-41. ábra**) mellett, a 7. pontbeli paraméterérzékenységi fejezetben leírtak és bemutatott ábrák. Ezen belül különösen is kiemelném a **43. ábra** B és D részletét, amely a hiba jellegzetes alakját mutatja szimmetrikus környezetben Pole-Pole és Pole-Dipole elrendezésnél 20 m vastag lerakó esetén. Fontos még kiemelni, hogy ilyen bonyolult szerkezetek kiértékelése a fokozatos közelítés módszere mellett paraméter érzékenységi vizsgálatok is szükségesek.

A fejezetben bemutatott eredmények alapján a következő téziseket állítottam fel:

4. tézis

Kidolgoztam az egyesített fokozatos közelítés módszert hulladéklerakók vizsgálatához, mely az inverz feladat megoldását jelenti, különböző geofizikai mérési adatok együttes kiértékelésére, beleértve a hulladéklerakó összes paraméterének meghatározását. Ez jelenti:

- a. a hulladéklerakó geometriai és fizikai paramétereinek meghatározását,
- b. a geomembrán hibahelyének meghatározását,
- c. a geomembrán hibahelyek és a hulladék inhomogenitásainak megkülönböztetését.

5. tézis

Modellszámításokkal igazoltam, hogy hulladéklerakók felszínén végzett területi és/vagy szelvény menti geoelektromos mérések látszólagos fajlagos ellenállás számításai nagy vastagságú lerakók vizsgálatára is alkalmasak. Az aljzatszigetelés geomembránjának hibája a potenciál mérések esetében a látszólagos fajlagos ellenállásokat kis és nagy mélységek esetén egyaránt csökkenti. A hibahely a potenciálkülönbség mérések esetén a forrás és a geomembrán hiba között növeli, majd a hibát követően csökkenti a látszólagos fajlagos ellenállás értékeket. A hiba fölött lévő „durva” inhomogenitás azonban ennek az átmenetnek a helyét befolyásolja.

6. tézis

Felszínen végzett mobil terepi mérési adatoknak az egyesített fokozatos közelítés módszerével történt kiértékelésével igazoltam, hogy a geoelektromos módszer alkalmas még nagy vastagságú (20m) hulladéklerakók esetében is azok geomembrán hibáinak feltárására. Az általam kidolgozott új módszerrel a hulladéklerakók többi paraméterét is meghatároztam.

7. PARAMÉTERÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLATOK

A hulladéklerakók geoelektromos szempontból többféle fizikai mérőszámmal jellemezhetők. Ezen mérőszámok közül az egyes rétegek vezetőképesség vagy fajlagos ellenállás adatai emelhetők ki, mint legfontosabb jellemzők, a rétegvastagságok mellett. A fajlagos ellenállás, és rétegvastagságok közti kapcsolat meghatározására paraméterérzékenységi vizsgálatokat végeztem. Ekkor az alábbi paraméterérzékenységekre vonatkozó kifejezés (Gyulai 1989) alapján azt figyeltem, hogy az egyes paraméterek megváltozása milyen irányú és mértékű változást okoz a mért látszólagos fajlagos ellenállásban.

A látszólagos fajlagos ellenállás és paraméterváltozások viszonyát a

$$\psi_i = \frac{\partial(\ln\rho_a)}{\partial(\ln h_i)} = \frac{\partial\rho_a}{\partial h_i} \frac{h_i}{\rho_a} \quad (10)$$

és

$$\varphi_i = \frac{\partial(\ln\rho_a)}{\partial(\ln\rho_i)} = \frac{\partial\rho_a}{\partial\rho_i} \frac{\rho_i}{\rho_a} \quad (11)$$

egyenletekkel, az ún. vastagság- és fajlagos ellenállás érzékenységek definiálhatóak.

Ez a kapcsolat jellemezhető a

$$\psi_i^* = \frac{\partial\rho_a}{\partial h_i} \frac{1}{\rho_a} = \frac{\partial(\ln\rho_a)}{\partial h_i} \quad (12)$$

$$\varphi_i^* = \frac{\partial\rho_a}{\partial\rho_i} \frac{1}{\rho_a} = \frac{\partial(\ln\rho_a)}{\partial\rho_i} \quad (13)$$

kifejezésekkel is, vagy pedig az

$$m = \frac{\partial\rho_a}{\partial h_i} \quad (14)$$

$$n = \frac{\partial\rho_a}{\partial\rho_i} \quad (15)$$

mennyiségekkel. Legelőnyösebbnek a (10) és (11)-el definiált kifejezés használata látszik, mivel az dimenziótalan formában jellemzi a látszólagos fajlagos ellenállás függvény és a paraméterváltozások kapcsolatát.

Általánosan kifejezve a paraméter érzékenységet

$$\text{paraméter érzékenység} = \frac{\Delta\rho_a}{\Delta p} \frac{p}{\rho_a} \quad (16)$$

A paraméterérzékenységek a definícióból adódóan azt mutatják meg, hogy a hulladéklerakó rétetparaméterinek differenciális megváltoztatása milyen mértékben és irányban változtatja meg az adott mérési elrendezéssel kapható látszólagos fajlagos

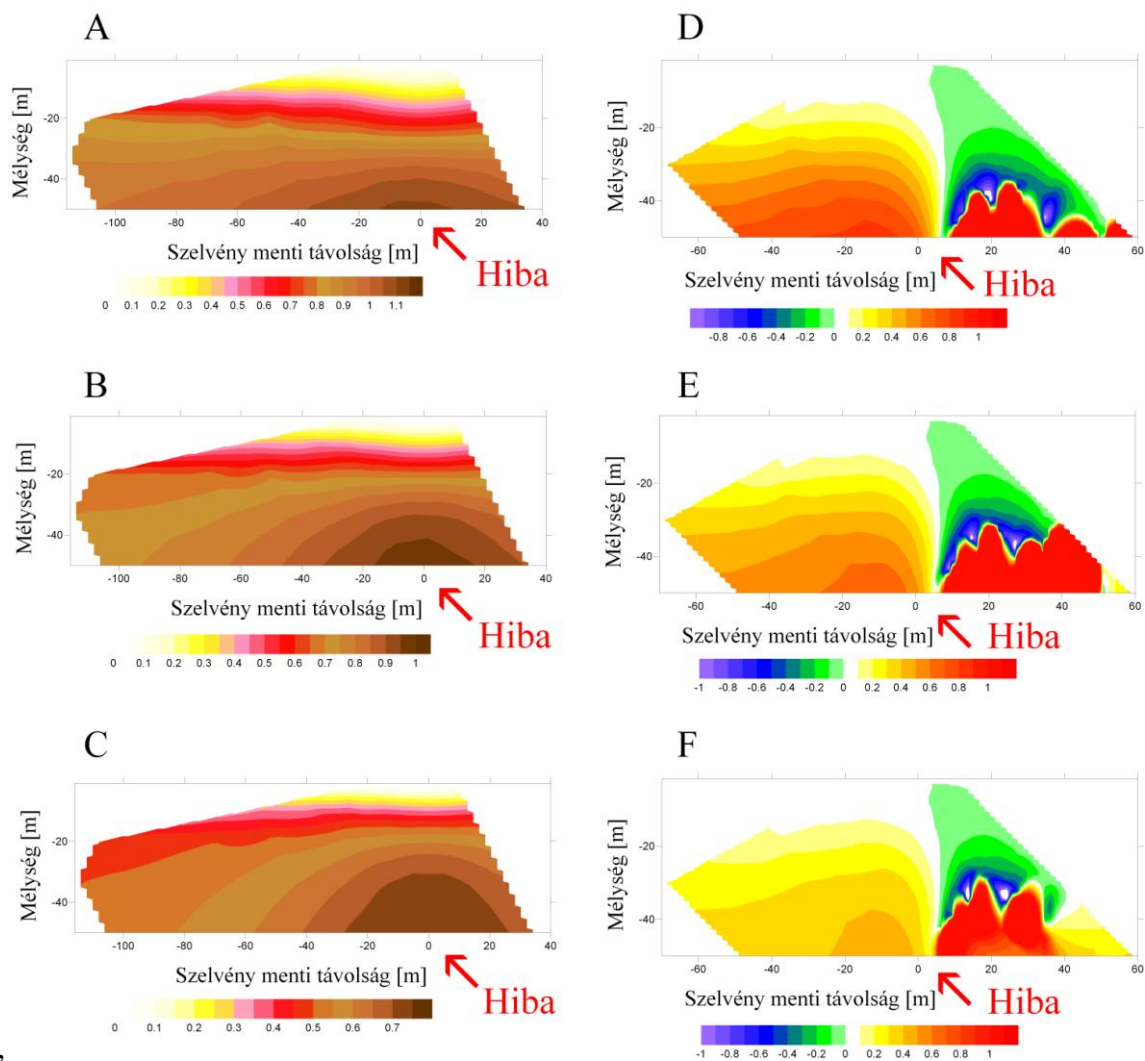
ellenállás értéket. Az érzékenység negatív, ha a rétegparaméter megváltozása ellentétes irányú változást okoz a látszólagos fajlagos ellenállásban. A paraméterérzékenység eloszlás térképek 0 érzékenységű területei kijelölik a geoelektromos méréseknek a modellparaméterek változására érzéketlen viszonyait. A geoelektromos gyakorlatban nagyon jónak mondható a paraméterérzékenység, ha abszolút értéke megközelíti az 1-et. Kedvezőtlennek tekintők azok a modellviszonyok vagy mérési elrendezések, amelyeknél az érzékenység abszolút értéke kisebb 0,1-nél (Gyulai 2000). Az érzékenységi függvények megadhatóak a rétegparaméterek vagy a mérési távolságok kapcsolatában. Az ábrázolásuk módja attól függ, hogy egy adott mérési elrendezésben a modell megváltozásának, vagy adott modellnél a mérési elrendezés változásának hatását kívánjuk vizsgálni. A gyakorlati geoelektromos kutatási feladat megoldására olyan mérési elrendezést és távolságot célszerű alkalmazni, amelynél a vizsgálandó (kutatott) rétegparaméter tekintetében nagy, a többi paraméterre kis érzékenység adódik. Szondázási módszereknél - ha több ismeretlen rétegparaméter együttes meghatározása a feladat - a paraméterérzékenységi vizsgálatoknál azok korrelációjára is figyelemmel kell lenni, mivel ez ekvivalencia problémát okoz.

A paraméterérzékenységek úgy tekinthetők, mint a mérési adatokban lévő információ (a modelltől) egyik mérőszáma. A paraméterérzékenységek arra is rámutatnak, hogy valamely geoelektromos mérési adat a modell melyik részéről és melyik paraméteréről szolgáltat ismereteket a vizsgálatot végző számára.

Paraméterérzékenységi vizsgálataim egyik csoportjánál azt vizsgáltam, hogy szimmetrikusnak tekinthető hulladékmodellek esetében azonos geometriai tulajdonságok mellett, hogyan változik a paraméterérzékenység, ha valamely réteg fajlagos ellenállását változtatom. Vizsgálataim során minden esetben követtem az egyszerűbbtől a bonyolultabb modellek irányába történő számításokat a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében. Két szomszédos lépés tekintetében mindig csak egy paraméteren változtattam. Ennek demonstrálására, az elvégzett paraméterérzékenység vizsgálataim közül egyet kiragadva mutatok be, mely terepi példák alapján megalkotott 3-D modellsorozatra vonatkozó eredmény. A modell főbb mérőszámai között szerepel a hulladéklerakó szigetelő geomembránjának fajlagos ellenállása és méretbeli adatai, valamint a hiba paraméterei. Az elszigetelt terület X, Y koordináták szerinti kiterjedése 300 m*300 m, a szigetelés fajlagos ellenállása 500.000 ohmm. Vizsgálataimnál többféle szigetelési ellenállást is használtam, de a könnyebb összehasonlítás érdekében tartom magam a korábbi fejezetekben bemutatott 500.000 ohmm-hez, amely általában véve megfelel a terepi eseteknek. A hibahely méretét 5 m*5 m-es nagyságra állítottam be, hasonlóan az egyesített fokozatos közelítés

módszernél bemutatottakhoz. Ezen vizsgálatnál felhasznált hulladékmodell fő elemeiben megegyezik a **21. ábrán** bemutatott „Általános hulladékmodell” paramétereivel. A takaró réteg fajlagos ellenállása 30 ohmm vastagsága 2,5 m. Az alatta elhelyezkedő nedves hulladék fajlagos ellenállása 10 ohmm, vastagsága 17 m. A hulladék alatt elhelyeztem, egy elektromosan jól vezető szivárgó réteget, amelynek fajlagos ellenállása 0,1 ohmm, vastagsága 0,5 m. Az aljzatszigetelés alá szintén elhelyeztem egy 0,1 ohmm fajlagos ellenállású csurgalékvízzel szennyezett réteget. Az altalaj fajlagos ellenállását 20 ohmm-nek, a befogadó geológiai környezetét 50 ohmm-nek vettem. A hiba geometriai közepét a rácsháló 0,0 pontjához pozicionáltam.

A **21. ábrán** bemutatott „Általános hulladékmodell” paraméterérzékenységi vizsgálatainál először a geomembrán hibahelyének fajlagos ellenállás-változására vonatkozó érzékenységeket tanulmányoztam. A hibahelyen beállított fajlagos ellenállás értékeket lépésenként megdupláztam, így a kezdeti 0,1 ohmm után 0,2; 0,4 ohmm-es értékek következtek. Végrehajtva a korábban bemutatott (16) képlet szerinti paraméterérzékenységi vizsgálatokat Pole-Pole és Pole-Dipole elektróda elrendezés szerinti adatrendszerekre, adódik a **42. ábra**. Az ábra bal oldalán Pole-Pole (A, B, C), a jobb oldalán Pole-Dipole (D, E, F) elektróda elrendezés, hibahely fajlagos ellenállás-változás szerinti paraméterérzékenység vizsgálatai láthatóak. A legfelső két szelvény (A, D) 0,1 ohmm hibahelyen felvett fajlagos ellenállás mellett számolt paraméterérzékenységet mutatja. Középen (B, E) 0,2 ohmm, legalul (C, F) a 0,4 ohmm-hez tartozó paraméterérzékenység eloszlásokat ábrázoltam.

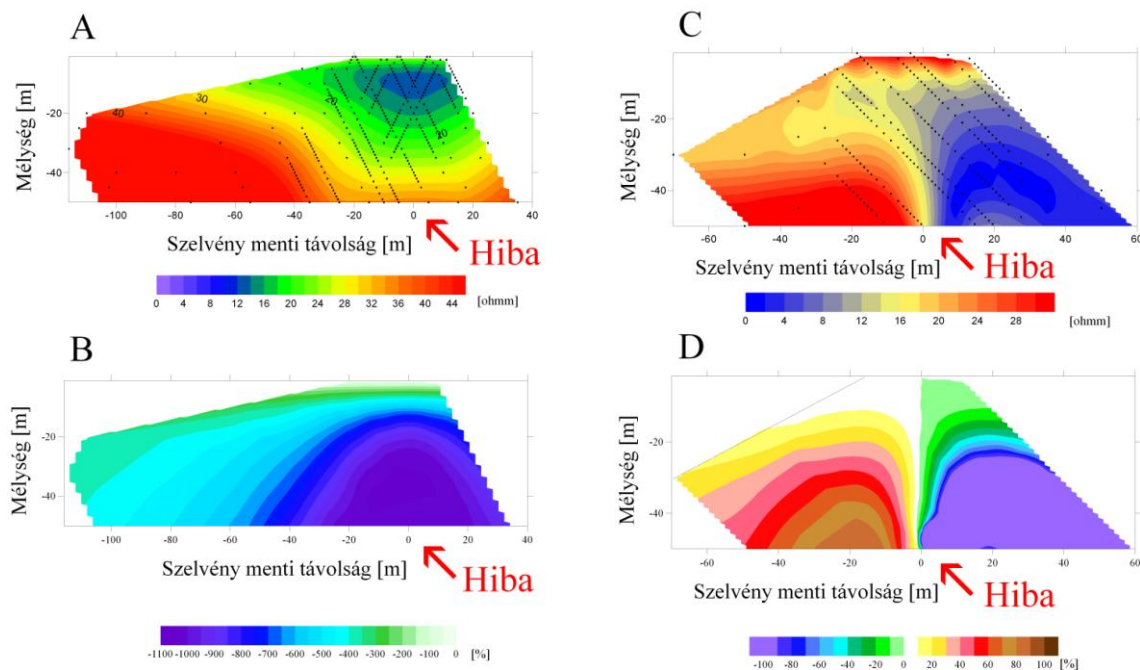


42. ábra

A geomembrán hibahelyére vonatkozó paraméterérzékenység eloszlás térképek
 A) Hibahely értéke 0,1 ohmm Pole-Pole elrendezés; B) Hibahely értéke 0,2 ohmm Pole-Pole elrendezés; C) Hibahely értéke 0,4 ohmm Pole-Pole elrendezés; D) Hibahely értéke 0,1 ohmm Pole-Dipole elrendezés; E) Hibahely értéke 0,2 ohmm Pole-Dipole elrendezés; F) Hibahely értéke 0,4 ohmm Pole-Dipole elrendezés

Az **42. ábra** bal oldalán (A, B, C) elhelyezkedő Pole-Pole elektróda elrendezés paraméterérzékenység eloszlás szelvényei, a hibahely fajlagos ellenállásának növelése esetén barnás színekkel mutatják a legnagyobb paraméterérzékenységű zónákat. A legnagyobb paraméterérzékenységgel rendelkező területek éppen egybe esnek a szelvény menti távolság nulla vonalával, ahol a modellekben az 5 m*5 m méretű geomembrán hiba lett elhelyezve. Ezen paraméterérzékenység ábrák ugyan a mélység tekintetében nem fedik a modellben 20 m mélységszintre beállított hibahelyet, viszont jól megjelenítik a problémás területet. A jobb oldalon látható (D, E, F) Pole-Dipole elektróda elrendezéshez tartozó paraméterérzékenység eloszlás térképek megerősítik a Pole-Pole rendszerben

kijelölt problémás területet. A hibát jelző jellegzetes eloszláskép másként alakul, mint a Pole-Pole szelvénynél. A paraméterérzékenység számítások mellett a **43. ábrán** bemutatom, a **42. ábra** (C, F) részéhez tartozó látszólagos fajlagos ellenállás eloszlás szelvényeket és azok normált változatait, ahol a geomembrán hiba fajlagos ellenállásának értéke 0,4 ohmm. A **43. ábra** felső két eloszlás szelvénye, Pole-Pole (A) és Pole-Dipole (C) elrendezés esetén mutatja a látszólagos fajlagos ellenállás értékeket. A Pole-Pole (A) szelvénybeli látszólagos fajlagos ellenállás eloszlás térképen megfigyelhető, hogy a 20 m-es fenékszint vonalában a 0 m-es szelvény menti távolsághoz köthetően, - ahol a hibahely található -, 10 ohmm körüli fajlagos ellenállás értékek helyezkednek el. Ugyanez a hely a mellette található Pole-Dipole (C) szelvénybeli látszólagos fajlagos ellenállás eloszlás térképen szintén alacsony ellenállású zónát mutat, de minimum értékei attól távolabb mélyebb zónákba tolnak. Az ábrákon található fekete kör szimbólumok a mérésekhez tartozó vonatkozási pontokat jelentik. A sarkak menti letakart területeken nincs mérési adat, ezért kerültek kitakarásra a szelvényekből. A **43. ábra** második sorában (B, D) Pole-Pole és Pole-Dipole elrendezések szelvényei a korábban 5.2-es fejezetben bemutatott (8) normálási képlet szerint készültek.



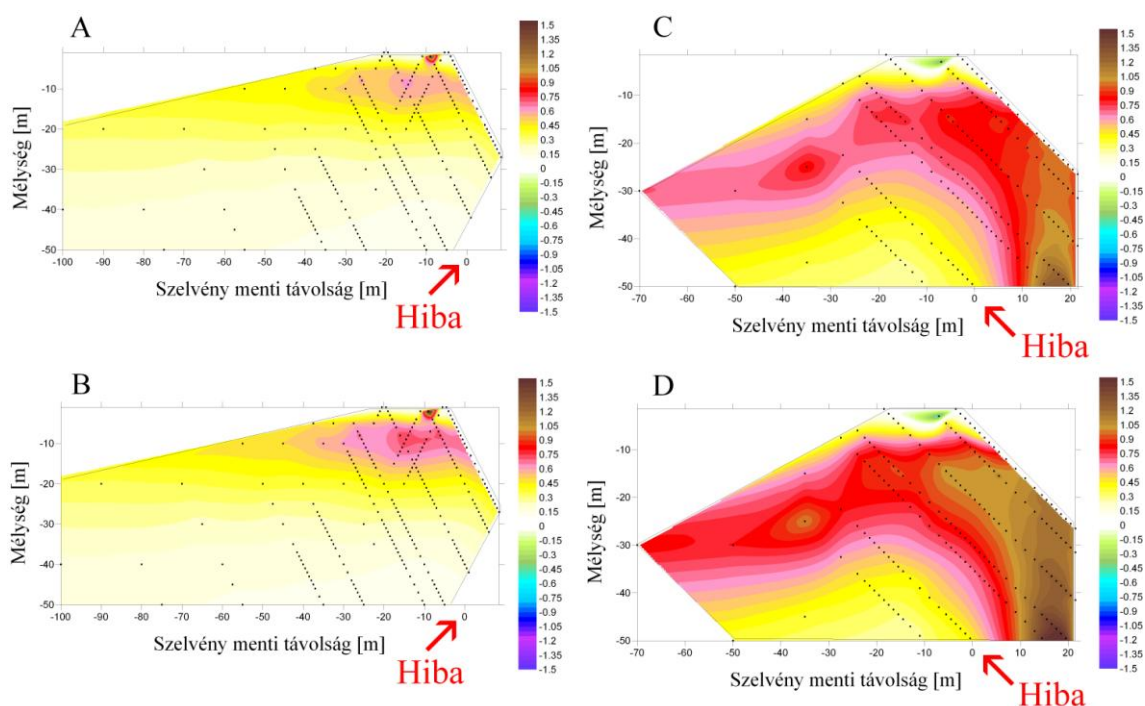
43. ábra

Pole-Pole és Pole-Dipole konfiguráció szerinti látszólagos fajlagos ellenállás és normált eloszlás térképek

A) Pole-Pole látszólagos fajlagos ellenállás szelvény; B) Pole-Pole normált eloszlás szelvény; C) Pole-Dipole látszólagos fajlagos ellenállás szelvény; D) Pole-Dipole normált eloszlás szelvény

Az **43. ábra** B részéből kitűnik, hogy a szelvény menti távolság 0 m-hez tartozó vonalban, a 20 m-es mélységszinttől indulólag -1100% körüli normált értékek figyelhetők meg a hibahely alatt. Az ábra D részében szelvény menti távolság 0m-es vonalának két oldalán pozitív és negatív anomáliapár figyelhető meg. Az ábrán a bipoláris anomália között elhelyezkedő 0%-os vonalszerű alakzathoz köthető a hiba elhelyezkedése. A **43. ábra** alapján elmondható, hogy törekedni kell a több féle elektróda elrendezéshez köthető komplex kiértékelésre, valamint hasznos információkat szolgáltat a hibahely kijelölésében az adatok (8) képlet szerinti normálása.

További paraméterérzékenység vizsgálat segítségével történő elemzésre mutat példát **44. ábra**, amelyben a hulladéktest egy mélyebb rétegének fajlagos ellenállását változtattam.

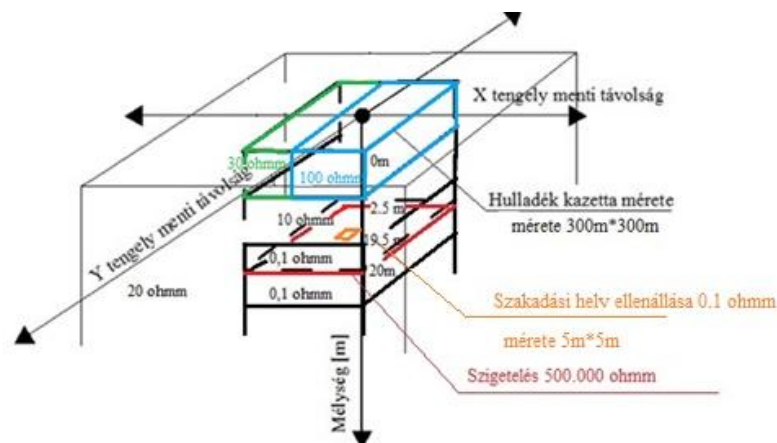


44. ábra

Paraméterérzékenységek vizsgálatok a hulladék felső rétegére vonatkoztatva

A) Hulladék fajlagos ellenállás értéke 8 ohmm Pole-Pole elrendezés; B) Hulladék fajlagos ellenállás értéke 12 ohmm Pole-Pole elrendezés; C) Hulladék fajlagos ellenállás értéke 8 ohmm Pole-Dipole elrendezés; D) Hulladék fajlagos ellenállás értéke 12 ohmm Pole-Dipole elrendezés

A felhasznált hulladéklerakó modellt a **45. ábra** mutatja. A modell takaró rétege 2,5m vastag, amelyben a -10 m-es szelvény menti távolságtól jobbra 100 ohmm, tőle balra 30 ohmm-es értékek találhatóak. A 2,5 m és a 19,5 m mélység között elhelyezett hulladék fajlagos ellenállása 10 ohmm. A szigetelő réteg alatt (csurgalékvízzel szennyezett réteg) és felett (szivárgó réteg) jól vezető 0,1 ohmm-es rétegeket helyeztem el a csurgalékvízzel szennyezett réteg reprezentálására.



45. ábra

Módosított hulladéklerakó modell paraméterérzékenységi vizsgálathoz

A **44. ábrán** bemutatott paraméterérzékenység vizsgálatban azt tanulmányoztam, hogy a 2,5 m és a 19,5 m között elhelyezett hulladékréteg 20 %-os fajlagos ellenállás változtatása, hogyan jelenik meg paraméterérzékenység tekintetében. A **44. ábra** bal oldali része (A, B) Pole-Pole, a jobb oldali része (C, D) Pole-Dipole elrendezésnek megfelelő adatok paraméterérzékenységi vizsgálatát mutatja. A **44. ábra** felső két (A, C) eloszlástérképén a kezdeti 10 ohmm-es hulladékréteg fajlagos ellenállását csökkentettem 20%-al, 8 ohmm-re. A vizsgált hulladékréteg fajlagos ellenállás csökkentésének hatására megfigyelhető, hogy a Pole-Pole (A) szelvény legnagyobb paraméterérzékenység értékei, az ábra felső 20 méteres tartományában figyelhetőek meg 0,75-ös maximum értékkel, melyet a vörös szín árnyalatai mutatnak. Hasonló mondható el a Pole-Pole elektrodaelrendezés B jelű szelvényéről is, ahol a hulladékréteg fajlagos ellenállásának 12 ohmm-re növelésével, szélesedett a nagyobb paraméter érzékenységgű zóna tartománya. Az A és B ábrák alapján elmondható, hogy Pole-Pole elrendezés esetén egybe esik a szelvényben a legnagyobb paraméterérzékenységgel jellemezhető zóna, a modell azon rétegével, ahol a 20%-os fajlagos ellenállás csökkentést, illetve növelést hajtottam végre. A **44. ábra** C és D részében bemutatott Pole-Dipole elrendezésnek megfelelő paraméterérzékenységek maximális értékei, a szelvény menti távolság 15 m-es vonalában figyelhetőek meg a barna szín árnyalataival. A mélység szerinti eloszlásuk eltér a Pole-Pole elrendezésnél 20m-es mélységtartományig húzódó legnagyobb paraméterérzékenységei értékektől. A **44. ábra** mind a négy (A-D) részábrájánál megfigyelhető a felszín közelében a -10 m-es szelvényvonalban egy emelkedett paraméterérzékenységgű terület, amely a 30 és a 100 ohmm-es hulladékréteg határvonalát jelzi.

Az elvégzett számos elemzés alapján megállapítható, hogy bonyolult objektumok, földtani alakzatok esetén is eredményesen alkalmazható a paraméterérzékenységi vizsgálat. Paraméterérzékenység vizsgálatok segítségével kijelölhetőek azok a zónák a vizsgált objektumon belül, amelyek érzékenyen érintettek a különböző modellparaméterek megváltoztatásában. Paraméterérzékenység vizsgálatok segítségével jól jellemezhető, hogy egy-egy modellbeli változás, milyen hatással van a többi rétegjellemző mérőszámaira.

Ezek alapján megállapítható, hogy a paraméterérzékenység vizsgálatokat célszerű elvégezni azonos modellek felett mérhető különböző elektróda elrendezésekhez tartozó adatrendszerek összehasonlítására is. Ezen azonos modellhez, de eltérő mérési elrendezés tartozó adatok, különböző érzékenységet mutatnak az egyes változtatások hatásairól.

A fejezetben bemutatott eredmények alapján a következő tézist állítottam fel:

7. tézis

Paraméterérzékenységi módszert dolgoztam ki hulladéklerakók geoelektromos kutatásához. Bizonyítottam, hogy a potenciál mérésekkel és a potenciál különbség mérésekkel kapott látszólagos fajlagos ellenállásokból számított paraméterérzékenységek a hulladéklerakó szerkezetétől függően igen jelentősen eltérnek egymástól. A paraméterérzékenységek:

- a. alkalmasak a kutatás mérési rendszerének kiválasztásra,
- b. segítik az inverz feladatban a kezdeti, start modell meghatározását,
- c. szükségesek az egyesített fokozatos közelítés módszer alkalmazásához.

8. ÖSSZEGZÉS

Dolgozatomban a mobil geomembrán hibahely kereső geoelektromos módszer alkalmazhatóságával és kiértékelési lehetőségeivel foglalkoztam. A mobil geomembrán hibahely-kereső geoelektromos módszer nem igényel előre beépített elektródákat. Költségigénye így elenyésző az előre beépítetthez képest. Elegendő, ha a hulladékfelszínén szisztematikusan hálószerűen mérnek végig a hulladéklerakó belső elszigetelt terét. Mérések alkalmával át kell kényszeríteni a vizsgáló áramot a szigetelés hiba helyén keresztül azért, hogy az alkalmazott mérő elektróda elrendezés kellően érzékeny legyen a hiba felkutatására. Ehhez szükséges egy a belső térben elhelyezett forrás és az elszigetelt külső térben elhelyezett nyelő elektróda. A hulladék felszínén többféle elektróda elrendezésben célszerű elhelyezni az áram és mérő elektródákat. A mérések alkalmával hibamentes esetben, csak csekély mértékű áram képes átfolyni a nagy felületű szigetelő rétegen. Ugyanakkor elmondható, hogy mindig mérhető jel a mérőelektródán (elektródákon) hibamentes esetben is, valamilyen mértékű el nem hanyagolható zajon felül is. A hiba kialakulásakor mobil geoelektromos módszer esetén, a hibahely felett kis vastagságú hulladéknál a hulladékfelszínen, kiugró nagyságú változás észlelhető a mérhető potenciáltérben. A hibahely hatására kialakuló potenciáltér torzulás mértéke erősen függ a hulladékfelszínén és a hulladéktest belsejében tapasztalható nedvességtartalomtól. Erősen befolyásolják a mérhető jelet a behordott hulladék fajtái, vastagsága, belső inhomogenitásai. A hulladékvastagság növekedésével csökken a hulladékfelületen mérhető jelek nagysága. Célszerű a hibahelyeket minél sűrűbb mérési hálóval felkutatni. Az alkalmazott különböző elektródaelrendezések az egyes szerkezetek vizsgálatakor, eltérő paraméterérzékenységekkel rendelkeznek. A mért értékek jel-zaj viszonyának javítására, a kiértékeléskor különböző elektróda elrendezések együttes használata ajánlott. Ezáltal növelhető a mért adatokból kiolvasható hasznos információk mennyisége.

Vizsgálataimat előremodellezés és terepi adatok kiértékelésével végeztem. Előremodellezéskor a hulladéklerakók szerkezete, nagy inhomogenitásai és jelentős fajlagos ellenállás kontrasztjai miatt, kizárólag 3-dimenziós modelleket használtam. Előremodellezési vizsgálataimnál a 3-dimenziós véges differencia módszert alkalmaztam. Kiértékelésekor az adatokban rejlő információk kiemelésére képfeldolgozási eljárásokat, normálást és különböző típusú zajszűréseket végeztem. Normálás és szűrés hatására javult az adatok jel-zaj viszonya. Az adatok ábrázolását területi és szelvény menti eloszlástérképek segítségével végeztem.

A szigetelt hulladéklerakó geomembrán hibáit képviselő geoelektromos adatok előállításához szükséges modellek és a kiértékelés inverz feladatának megoldásához használatos algoritmusok, csakis 3-dimenziós természetűek lehetnek. A nagy inhomogenitásokkal rendelkező bonyolult lerakó struktúra, nem engedi a dimenziószámának csökkentését. A 3-dimenziós adatstruktúrától történő egyszerűsítés hibás kiértékelési eredményre vezet.

Az adatok kiértékelésére kifejlesztettem az egyesített fokozatos közelítés módszerét, amely az adatok inverz feladatának megoldásában nyújt segítséget. Az egyesített szó a módszer nevében arra utal, hogy ugyanazon vizsgált objektumot, egyszerre több mérési elrendezéssel vizsgáljuk és kiértékeléskor ezeket együttesen felhasználva végezzük az interpretációt. Az egyesítés azért vezet eredményre, mert az inverz feladat megoldásának egyik legnagyobb problémája, hogy az adatokban nincs elegendő információ. Ezért keresni vagy mérni kell új paraméterérzékenységekkel rendelkező adatrendszereket. A fokozatos kifejezés arra utal, hogy a kiértékelés menete iteratív jellegű. A módszer lényege hasonlít a geofizikai adatok kiértékelésére szolgáló joint inverziós eljárásokhoz. Az egyesített fokozatos közelítés módszerével végzett kiértékeléskor a hibahely okozta eloszlásképben megfigyelhető alakzatok azonosítása kvalitatív és kvantitatív összehasonlítás alapján zajlik. Az ábrázolt anomáliák alapján tipikus alakzatokat, anomáliaformákat keresünk az összehasonlításhoz. Az egyesített fokozatos közelítés módszere segítségével eredményesen végezhető el bonyolult nagy inhomogenitással rendelkező 3-dimenziós geoelektromos adatok kiértékelése vastag (20 m) hulladéklerakó esetén is.

Az inverz feladat megoldására felhasználtam továbbá, a paraméterérzékenység vizsgálati módszert. Paraméterérzékenység vizsgálatok segítségével elemezhető az egyes rétegjellemző fizikai paraméterek és a réteggeometriai adatok kapcsolata. Vizsgáltam az egyes modellben szereplő rétegek fajlagos ellenállás és méretkülönbségek közti kapcsolatokat, különös tekintettel a geomembrán szigetelőréteg hibahelyekre vonatkozóan. Az elvégzett vizsgálatokkal a célom annak igazolása volt, hogy az általam javasolt új módszer képes detektálni a hulladéklerakó aljzatszigetelési hibáit és általában is hasznosítható bonyolult modellek inverz feladatának kiértékelésére.

A módszer felhasználása előnyös lehet hasonló környezetkutató témák megoldására.

Az alkalmazott előremodellelés segítséget nyújthat a terepi mérések optimális kialakításában, ezzel pénzt és energiát spórolva a kivitelezőnek. A kifejlesztett kiértékelési eljárás hozzá járulhat a geomembrán hibahelyeinek eredményesebb felkutatásához és szélesebb körben, geofizikában alkalmazott inverz feladat megoldásában.

Köszönetnyilvánítás

Elsőként szeretnék köszönetet mondani témavezetői munkájáért Dr. Gyulai Ákos professzor úrnak, a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék egyetemi tanárának. Köszönöm lelkiismeretes oktatói és nevelői munkáját, valamint a számos korszerű tudományos ismeretet, melyet széles körű szakmai tapasztalata alapján átadott nekem. Örömet fejezem ki, hogy közös munkánk során bölcs tanácsokkal, valamint tudományos szemlélettel látott el, és gondosan irányította eddigi szakmai fejlődésemet.

Mint a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékének tudományos segédmunkatársa köszönetemet fejezem ki oktató és doktorandusz kollegáimnak szakmai segítségükért, és azért a nyugodt munkahelyi légkörért, melyben doktori munkámat végezhettem.

Köszönöm azon ipari szakemberek és cégek szakmai tanácsait és mérési adatait, akik segítették munkámat.

Végül szeretnék köszönetet mondani családom tagjainak, akik szerető gondoskodásukkal és önzetlen segítő szándékukkal lehetővé tették tanulmányaim és munkám kiteljesedését.

„A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.2/B-10/1-2010-0008 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”

Irodalomjegyzék

- Aristodemou E., Thomas-Betts A. 2000 DC resistivity and induced polarization investigations at a waste disposal site and its environments. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 275–302.
- Ádám O., Steiner F., Takács E. 1988 Bevezetés az alkalmazott geofizikába I. Kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest.
- Bagchi A. 1989 Design, construction and monitoring of sanitary landfill. John Wiley and Sons, 285.
- Baracza M. K. 2012 Modern hulladéklerakók aljzatszigetelési hibáinak kimutatása 3D modellezéssel. *Magyar Geofizika*, 53 (2), 91-98.
- Baracza M. K. 2012 Three Dimensional Model Studies of Modern Landfills. *Geosciences and Engineering*, Volume 1., Number 1., 21-28.
- Baracza M. K., Gyulai Á., Ormos T., Szabó I., Turai E., Dobróka M. 2005 The exploration of waste sites by means of geoelectric and seismic methods. EGU General Assembly, Vienna, 24-29 April 2005, Conference CD, Abstract-Number: EGU05-A-05597, 1.
- Barker R. D. 1992 A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. *First Break*, 10. 53-62.
- Bart M. T. H. R. 2003 Gaussian derivatives. *Computational Imaging and Vision, Front-End Vision and Multi-Scale Image Analysis*, Vol. 27, 53-69, ISBN: 978-1-4020-1503-8.
- Binley A., Daily W., Ramirez A. 1999 Detecting Leaks from Waste Storage Ponds using Electrical Tomographic Methods. 1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, Greater Manchester, April 14-17, 1999.
- Brandl H. 1989 Geotechnische und bauliche Aspekte bei der Neuanlage von Abfalldeponien. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 134. Jg. H.3. 123-163.
- Csóke B. 2011 Hulladékgazdálkodás műszaki alapjai. Digitális Tankönyvtár, <http://www.tankonyvtar.hu>
- Daniel D. E. 1987 Earthen liners for land disposal facilities *Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*. Geotechnical Special Publication, No. 13. ASCE. 21-39.
- Darillek G. T., Parra J. O. 1988 The electrical leak location method for geomembrane liners. Environmental Protection Agency Report No. EPA/600/2-88/035, June 1988.

- Darillek G.T., Laine D. L. 1999 Performance-based specification of electrical leak location surveys for geomembrane liners. Geophysics '99 Conference Proceedings, Boston, Massachusetts, USA, April 28-30 1999, 645-650.
- Dobróka M. 1991 Fejezetek az elméleti fizikából. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Dobróka M., Gyulai Á., Ormos T., Csókás J., Dresen L. 1991 Joint inversion of seismic and geoelectric data recorded in an underground coal mine. Geophysical Prospecting, 39, 643-665.
- Dobróka M. 1994 Változó rétegvastagságú inhomogén szeizmikus hullámvezetőben terjedő Love-típusú hullámok diszperziós relációja, az abszorpciós-diszperziós jellemzők inverziója. Akadémiai doktori értekezés, Miskolc-Budapest.
- Dobróka M., Fancsik T., Amran A. 1995 On the in-seam seismic inverse problem. 57th EAEG Meeting, Glasgow, 29 May 2 June.
- Dióssy L. 2001 honlap: <http://www.diossylvaszlo.hu/>
- Csókás J., Gyulai Á., Lénárd M. 1974 Mérnökgeofizika az építőiparban. Alapozásra kedvezőtlen feltöltéses, üreges talaj kimutatása és lehatárolása geofizikai mérésekkel. Építőanyag, XXVI. évf. 1. sz. 13-17.
- Ellis R. G., Oldenburg D.W. 1994 The Pole-Pole 3-D DC-resistivity inverse problem: a conjugate gradient approach. Geophysics Journal International, 119, 187-194.
- Bishop I. 2002 Electronic Leak Location Testing of Geomembranes P1-419/TR. Technical Report, Environmental Agency Bristol UK.
- Frangos W. 1997 Electrical detection of leaks in lined waste disposal ponds. Geophysics, 62, 1737-1744.
- Franzius V. 1987 Bedeutung von Oberflächenabdichtungen für Gas-und Wasserhaushalt von Deponien Fortschritte der Deponietechnik. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis pp. 167-173. Erich Schmidt Verlag.
- Gyulai Á. 1989 Parameter sensitivity of underground DC measurements. Geophysical Transactions, 35(3), 209-225.
- Gyulai Á. 1996-1997a Geoelektromos 3-D FD modellezési vizsgálatok. T 019088 OTKA II. Részjelentés, 1-48. o. Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék.
- Gyulai A. 1999a Új geoelektromos inverziós eljárás geológiai szerkezetek meghatározására: kombinált 2-D és 3-D függvényinverzió. Magyar Geofizika, 40. évf. 4. sz. 94-98.
- Gyulai Á. 1999b Felszín közeli geológiai szerkezetek kutatása geoelektromos módszerekkel. Kutatási részjelentés, FKFP 0914/1997. pályázat.

- Gyulai Á. 1999c Kétdimenziós geoelektromos struktúrák inverziója. „Geofizikai Inverzió 99” Tudományos Anket, 1999. márc. 8-9. Miskolc, MGE-MAB rendezvény.
- Gyulai Á. 2000 2-D Földtani szerkezetek interpretációja együttes geoelektromos inverziós módszerekkel. MTA dolgozat.
- Gyulai Á., Ormos T. 1998a Újabb eredmények a VESZ adatok 1.5-D inverziós kiértékelésében. Magyar Geofizika, 38. 257-264.
- 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.
- Gyulai Á., Ormos T. 1999b Hohlraumortung mit geoelektrischen und Oberflächen seismischen Methoden. 59. DGG Tagung, Braunschweig 8-12 March 1999. PGT05, 116.
- Gyulai Á., Ormos T., Dresen L. 2000 A joint inversion method to solve problems of layer boundaries, differently defined by seismics and geoelectrics. EEGS 6th Meeting Environmental and Engineering Geophysics, September 3-7, Bochum-Germany, Proceedings P-CH04.
- Gyulai Á. 2010 Geofizikai kutatások geoelektromos sorfejtéses inverzióval. Oktatási segédlet, Miskolci Egyetem.
- Gyulai Á., Ormos T., Dobróka M. 2010 A quick 2-D geoelectric inversion method using series expansion. Journal of Applied Geophysics, No. 72, 232-241.
- Gyulai Á., Turai E., Baracza M. K. 2012 A CGI inverzió eredményének elemzése egy terepi példán. Magyar Geofizika, 53 (4), 267-275.
- Gyulai Á., Baracza M. K. 2012 Mi a Joint inverzió? Magyar Geofizika, 53 (4), 275-280.
- Gyulai Á., Tolnai É. E. 2012 2.5D geoelectric inversion method using series expansion. Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, Vol. 47 (2), 210-222.
- Hansen R. and Beck A. 2009 Electrical Leak Location Surveys for Landfill Caps. Proceedings of the Environmental and Water Resources Institute (EWRI), "An International Perspective on Environmental and Water Resources" Bangkok, Thailand, January 5-7, 2009.
- 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. August 1998.
- Hohmann G.W., Ward S.H. 2012 Electrical Methods in Mining Geophysics GL04049 Tutorial Book. University of Utah, Geology and Geophysics Department.
- Inman J.R. 1975 Resistivity inversion with ridge regression. Geophysics, 40, 798-817.
- KBFI Triász Kft. 2013 honlap: <http://www.kbfi-triasz.hu/>

- Kis M. 1998 Felszín közeli szerkezetek vizsgálata szeizmikus és egyenáramú geoelektromos adatok együttes inverziójával. PhD doktori értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc.
- Kis M., Gyulai Á., Ormos T., Dobróka M., Dresen L. 1998 A new approach for the investigation of 2-D structures-method development and case-history. 60th EAGE Conference and Technical Exhibition, 8-12 June 1998.
- Koefoed O. 1979 Geosounding Principles, Resistivity Sounding Measurements. Amsterdam-Oxford-New York.
- Déri L., Hudák I., Reith I., Szabó I., Nagy Gy. Tervezési Segédlet Köztisztasági Egyesülés 2002. A települési szilárd hulladéklerakók beruházásához, üzemeltetéséhez, és bezárásához, készítette: A Környezetvédelmi Minisztérium Hulladékgazdálkodási és Környezettechnológiai Főosztálya megbízásából Köztisztasági Egyesülés, http://www.kvvm.hu/szakmai/hulladekgazd/tervezes_seged
- Kovács A. 2007 Műanyag földműszigetelések ellenőrzése Hibakeresés geofizikai módszerrel. Mélyépítő Tükörkép Magazin 2007/3. június.
- Liebig A. 1996 Zweidimensionale geoelektrische Inversion als Teil einer integrierten geophysikalischen Auswertung zur Erkundung oberflächennaher Schichten. Doktorarbeit, Fakultät für Geowissenschaften der Ruhr-Universität, Bochum.
- Liu J. G., Mason P. J. 2009 Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing. Imperial Collage London, Willey-Blackwell Publication.
- Loke M. H. 1999 Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, A practical guide to 2-D and 3-D surveys. University of Montana, <http://www.cas.umt.edu/geosciences/>
- Loke M. H., Barker R. D., 1996 Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131-152.
- Meteolabor AG 2004 Dichtungskontrollsystem TAUPE für Mülldeponien I-II. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft's Hefte, honlap: <http://www.meteolabor.ch/>
- Misiek R., Liebig A., Gyulai Á., Ormos T., Dobróka M., Dresen L. 1997 A joint inversion algorithm to process geoelectric and surface wave seismic data. Part II: application. Geophysical Prospecting, 45, 65-85.
- Orellana E., Mooney H. M. 1966 Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding over layered structures. Interciencia Madrid.

- Ping Y., Changxin N., Gongxum Y., Lu D., Qi W., Yanwn W. 2007 Comparison of two theoretical models for electric leak location at landfill. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, DOI: 10.1007/s 11741-007-0324-z.
- Pellerin L., Wannameker P. E. 2005 Multi-dimensional electromagnetic modeling and inversion with application to near-surface earth investigations. Elsevier, *Computers and Electronics in Agriculture* 46 (2005). 71–102, doi:10.1016/j.compag.2004.11.017.
- Salát P., Tárcsái Gy., Cserepes L., Vermes M., Drahos D. 1982 A geofizikai interpretáció információs-statisztikus módszerei (szerkesztette: Salát P.) Tankönyvkiadó.
- Schulz R., Tezkan B. 1988 Interpretation of resistivity measurements over 2-D structures. *Geophysical Prospecting*, 36, 962-975.
- Schumann R. 2002 Kontrolle von Barrieren: Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit an Hand des Bodenwassergehaltes. Ph. D. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).
- Spitzer K. 1995 A 3-D finite difference algorithm for DC resistivity modeling using conjugate gradient methods. *Geophysical Journal International*, 123, 902-914.
- Spitzer K., Chouteau M. 2003 A DC resistivity and IP borehole survey at the Casa Berardi gold mine in northwestern Quebec. *Geophysics*, 68 (2), 453-463.
- Spitzer K. and Wurmstich B. 1999 Speed and accuracy in 3D resistivity modeling, in: Oristaglio, M.L. and Spies, B.R. (eds.), *Three-Dimensional Electromagnetics*, SEG Book Series "Geophysical Developments", 7, Society of Exploration Geophysicists, 161–176.
- Sirex C., Fernandez Martinez J. L., Riss J., Genelle F. 2013 Electrical resistivity characterization and defect detection on a geosynthetic clay liner (GCL) on an experimental site. *Journal of Applied Geophysics* 90, 19-26.
- Slack J. R., Gronow J. R., Hall D. H., Voulvoulis N. 2006 Household hazardous waste disposal to landfill: Using LandSim to model leachate migration. *Environ Pollution*, 146 (2), 501-509.
- Stief K. 1985 Anforderungen an die Wirksamkeit von Deponiebasisabdichtungen Deponiebasisabdichtung mit Kunststoffdichtungsbahnen. Beihefte zu Müll und Abfall, H.22. 9-13.
- Szabó I. 1999 Hulladékéelhelyezés. Miskolci Egyetemi Kiadó.
- Szabó I. 2006 Hulladéklerakók tervezése, üzemeltetése. Oktatási segédlet, Miskolci Egyetem.

- Szabó I., Szabó A. 2012 Hulladéklerakók rekultivációja, utógondozása Miskolci Egyetem, Gazdász-Elasztik Kft.
- Szalai S. 2002 Egyenáramú null-elrendezések. Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron, Ph. D. dolgozat.
- Szalai S., Szarka L., Prácser E., Bosch F., Müller I., Turberg P. 2002 Geoelectric mapping of nearsurface karstic fractures by using nullarrays. *Geophysics*, 67(6), 1769–1778 10.1190/1.1527077.
- Szalai S., Szarka L. 2008. Parametersensitivity maps of surface geoelectric arrays, I. Lineararrays. *Acta Geod. Geoph. Hung.*, 43, 419-437.
- Steiner F. 1982 Geofizika I. Gravitációs és mágneses módszerek. Kézirat, Tankönyvkiadó Budapest.
- Steiner F. 1997 Optimum methods in statistics. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Tarantola A. 1994 Inverse Problem Theory, Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation. Elsevier, ISBN 0-444-42765-1.
- Taylor S. B., White C. C., Barker R. D. 1999 Acomparison of portable and permanent landfill liner leak detection systems. *Field Instrumentation for Soil and Rock*, ASTM STP1358, Durham G. N. and Marr W. A. (Eds.) American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA157-174.
- Turai E. 2005 Spektrális adat- és információfeldolgozás. Kézirat, Miskolci Egyetem, 1-227.
- Vozoff K., Jupp D.L.B. 1975 Joint inversion of geophysical data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 42, 977-991.
- Zohdy A. A. R. 1975 Automatic interpretation of schlumberger sounding curves, Using modified Dar Zarrouk functions new techniques DC resistivity exploration, *Geological Survey Bulletin* 1313-E.