

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A Doktori Iskola vezetője:
Prof. Dr. Szűcs Péter
egyetemi tanár

**SZENNYEZETT TERÜLETEK LEHATÁROLÁSA ÉS A
SZENNYEZETTSÉG MINŐSÍTÉSE GEOFIZIKAI ÉS
GEOSTATISZTIKAI MÓDSZEREK ALKALMAZÁSÁVAL**

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Írta:
SZILVÁSI MARCELL
okl. földtudományi mérnök

Tudományos vezetők:

DR. HAVASI ISTVÁN
egyetemi docens

† **DR. HABIL. TURAI ENDRE**
egyetemi magántanár

Miskolci Egyetem
Geofizikai Intézeti Tanszék
Miskolc
2026

1. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK ÉS CÉLKITŰZÉSEK

A rekultivált, illetve a mai előírásoknak nem megfelelő módon kialakított hulladéklerakók környezeti kockázatot képviselhetnek, ezért térbeli kiterjedésük, belső szerkezetük és a lehetséges szennyeződés-terjedés vizsgálata kiemelt jelentőséggel bír. A hagyományos feltérítési módszerek (például fúrások és mintavételek) ugyan nagy pontosságú információt szolgáltatnak, azonban térben korlátozottak és költségigényesek, valamint egy hulladéklerakó vízzáró rétegeit nem célszerű átfúrni. A geoelektromos geofizikai módszerek megfelelő lehetőséget biztosítanak a felszín alatti viszonyok roncsolásmentes, nagy kiterjedésű vizsgálatára.

A multielektrodás fajlagos ellenállásmérés és a gerjesztett polarizáció (GP) együttes alkalmazása széles körben elterjedt a hulladéklerakók és egyéb környezeti problémák vizsgálatában, minthogy mindkét mérési módszer érzékeny a hulladéktest, a csurgalékkal érintett zónák, valamint a természetes rétegek közötti kőzetfizikai különbségekre (Bernstone et al., 2000; Cardarelli és Di Filippo, 2004; Chambers et al., 2006; Guinea et al., 2022). A GP módszer kiemelten használható a biogeokémiailag aktív és szennyezett zónák kimutatására, mivel a polarizációs jelenségek szoros kapcsolatban állnak a közeg elektrokémiai tulajdonságaival (Flores-Orozco et al., 2020; Chao et al., 2024).

A geoelektromos mérések értelmezésének egyik alapvető nehézsége pedig az, hogy az eredmények gyakran többértelműek, és az egyes paraméterek külön-külön történő vizsgálata nem mindig vezet egyértelmű földtani modellhez. A klasszikus értelmezési megközelítések jellemzően egyedi 2D szelvényekre épülnek, amelyek csak korlátozottan használhatók a térbeli összefüggések feltérítésére. A nemzetközi szakirodalom ugyanakkor rámutat arra, hogy több, rendezett geometriájú szelvény együttes feldolgozása és térbeli integrálása jelentősen javíthatja a hulladéktest és a szennyezett zónák értelmezhetőségét (Maurya et al., 2017; Martorana et al., 2023).

A GP időtartománybeli adatainak feldolgozása lehetőséget ad a különböző polarizációs mechanizmusok elkülönítésére, például időállandó-spektrum (TAU-transzformáció) alkalmazásával (Turai, 1981). Az így előállított többparaméteres adatrendszerek értelmezése viszont komplex statisztikai megközelítést igényel. A geoelektromos adatok gyakran nem Gauss-eloszlásúak, és kieső értékeket tartalmaznak, ezért robusztus statisztikai módszerek használata indokolt. E tekintetben a Steiner-féle leggyakoribb érték (MFV) módszer hasznos a domináns jellemzők stabil meghatározására heterogén adatrendszerek esetén.

A PhD értekezésem fő célja egy olyan komplex, többparaméteres geoelektromos értelmezési módszertani rendszer kidolgozása volt, amely működőképes a rekultivált hulladéklerakók és egyéb felszínközeli, szennyezett területek térbeli szerkezetének és állapotának megbízható leírására. A kutatás során a hagyományos geoelektromos feldolgozási lépéseket több új, vagy továbbfejlesztett módszerrel egészítettem ki. A célkitűzés megvalósítása érdekében:

- alkalmaztam és geoelektromos adatokra adaptáltam a Steiner-féle MFV módszert, külön megvizsgálva annak különböző paraméterezési lehetőségeit,
- időállandó-spektrum alapú (WAV) feldolgozással elemeztem a gerjesztett polarizációs adatokat,
- kidolgoztam egy topográfiát figyelembe vevő horizontális szeletelési eljárást, amely biztosítja a 2D szelvényekből származó adatok térbeli integrációját,
- valamint többváltozós statisztikai módszerekkel (klaszteranalízis) támogattam az objektív interpretációt.

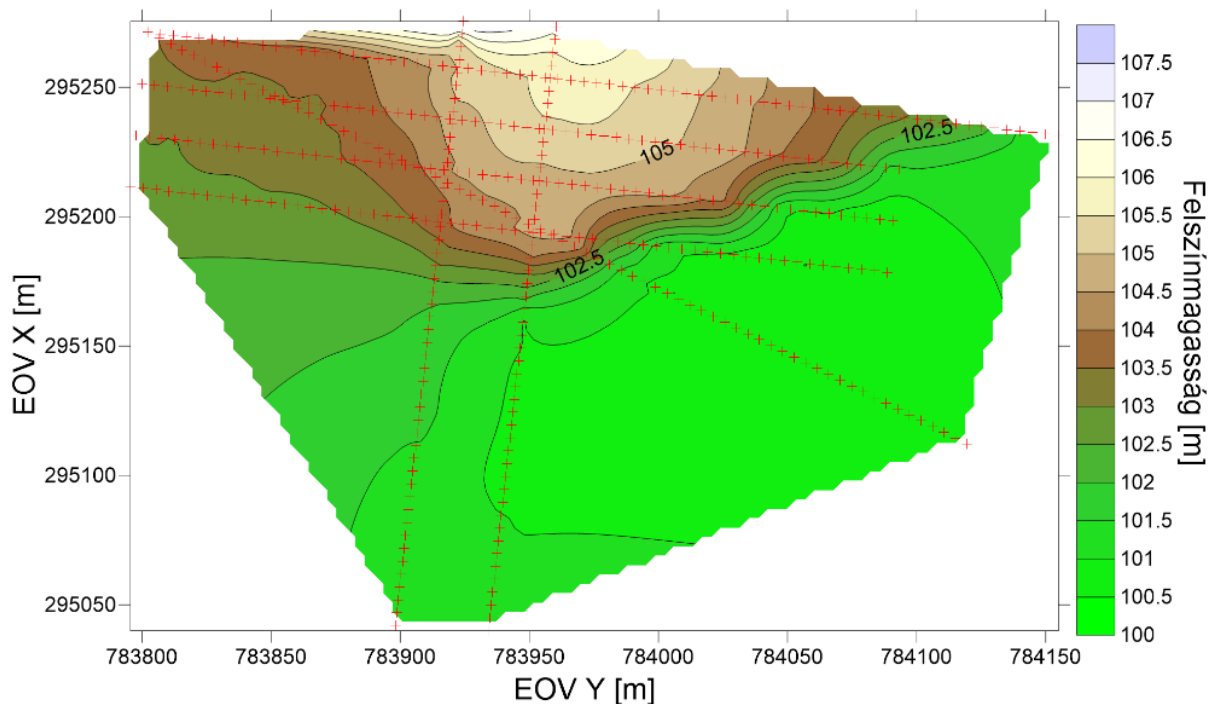
A módszertani fejlesztések validálása több esettanulmányon történt, kiemelten egy Nyékládháza térségében található rekultivált hulladéklerakó vizsgálatát, ahol a multielektrodás geoelektromos és gerjesztett polarizációs mérések, valamint a térbeli integráció biztosította a hulladéktest és a potenciálisan szennyezett zónák háromdimenziós jellegű lehatárolását. A téziszüzetben a módszertani eredmények csak erről a területről kerülnek bemutatásra. A PhD értekezés célja nem csupán egy konkrét esettanulmány bemutatása, hanem egy általánosítható, többparaméteres geoelektromos értelmezési keretrendszer létrehozása, amely hozzájárul a környezetföldtani vizsgálatok megbízhatóságának növeléséhez és az interpretációs bizonytalanság csökkentéséhez.

2. ALKALMAZOTT MÓDSZEREK ÉS AZOK EREDMÉNYEI

A kutatás során alkalmazott módszertani rendszer célja a multielektródás geoelektromos és gerjesztett polarizációs adatok kombinált, többparaméteres értelmezése volt. A feldolgozási folyamat a terepi mérésektől a statisztikai alapú interpretációig több egymásra épülő lépésből állt.

2.1. Terepi mérések és inverziós feldolgozás

A vizsgálatok során multielektródás geoelektromos méréseket végeztem, amelyek kapcsán látszólagos fajlagos ellenállás és gerjesztett polarizációs adatokat rögzítettem. A méréseket rendezett geometriájú szelvényháló mentén végeztem, ami biztosította a későbbi térbeli integrációt. A mért adatokat 2D inverziós eljárással dolgoztam fel, amelyből fajlagos ellenállás- és polarizálhatósági modelleket készítettem. Az inverzió során figyelembe vettem a topográfiai viszonyokat (1. ábra), így a számított modellek térben konzisztens módon értelmezhetők.



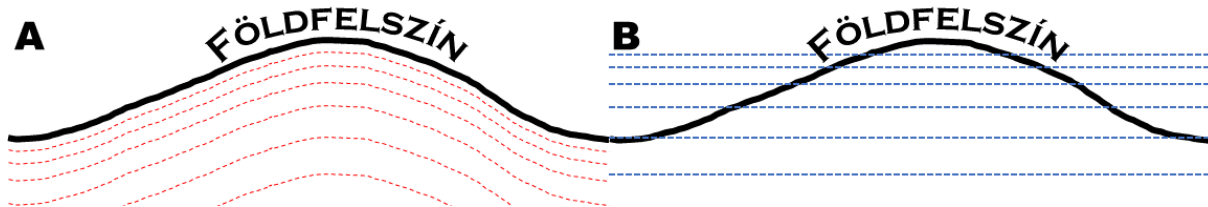
1. ábra: A vizsgált terület topográfiai térképe, piros keresztekkel jelölt elektródahelyekkel.
(szerző saját szerkesztése)

2.2. A 2D szelvények térbeli integrálása

A különálló 2D szelvényekből származó inverziós pontokat egységes térbeli koordináta-rendszerbe illesztettem. Az így létrejött 2,5D adatrendszer megkönnyítette a különböző szelvények összehasonlíthatóságát és közös értelmezését. Ez a megközelítés biztosította, hogy teljes 3D inverzió alkalmazása nélkül is térbeli képet kapjunk a vizsgált objektum szerkezetéről, amely előnyös komplex terepi viszonyok esetén.

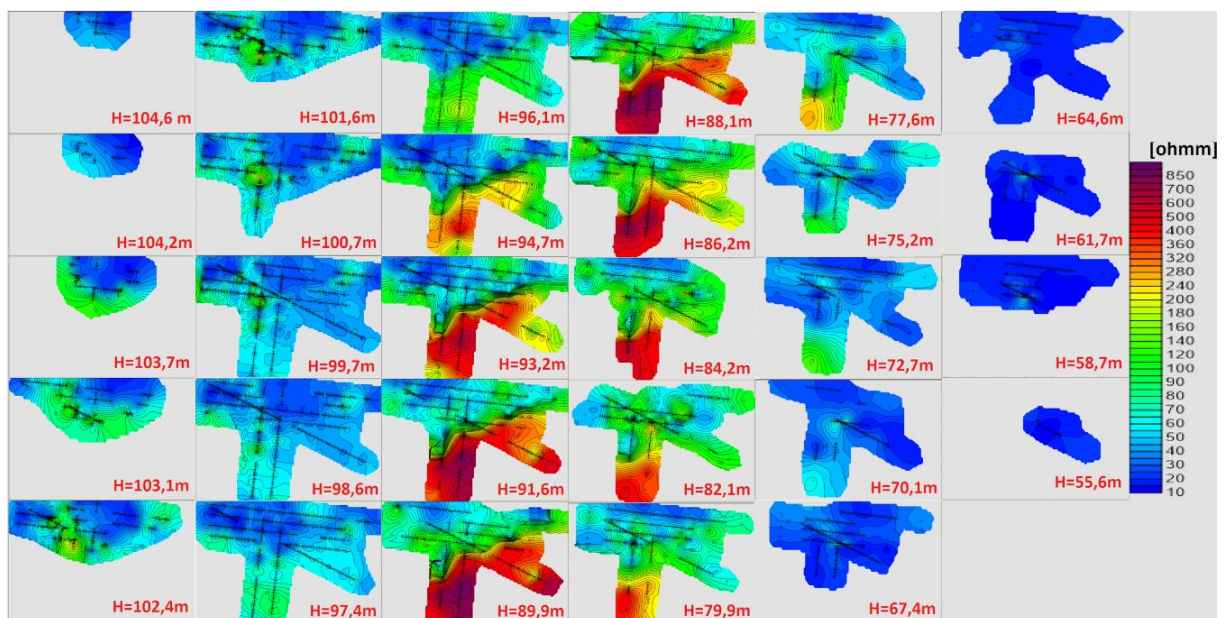
2.3. Horizontális szeletelési eljárás

A térbeli értelmezés érdekében horizontális szeletelési eljárást alkalmaztam. Változatos topográfia esetén az azonos inverziós szintekhez tartozó pontok nem egyetlen vízszintes síkban helyezkednek el, ezért egy olyan módszert (2/B ábra) dolgoztam ki, amely az elektródatávolság és a pontsűrűség figyelembevételével definiálja a szeletek mélységét.



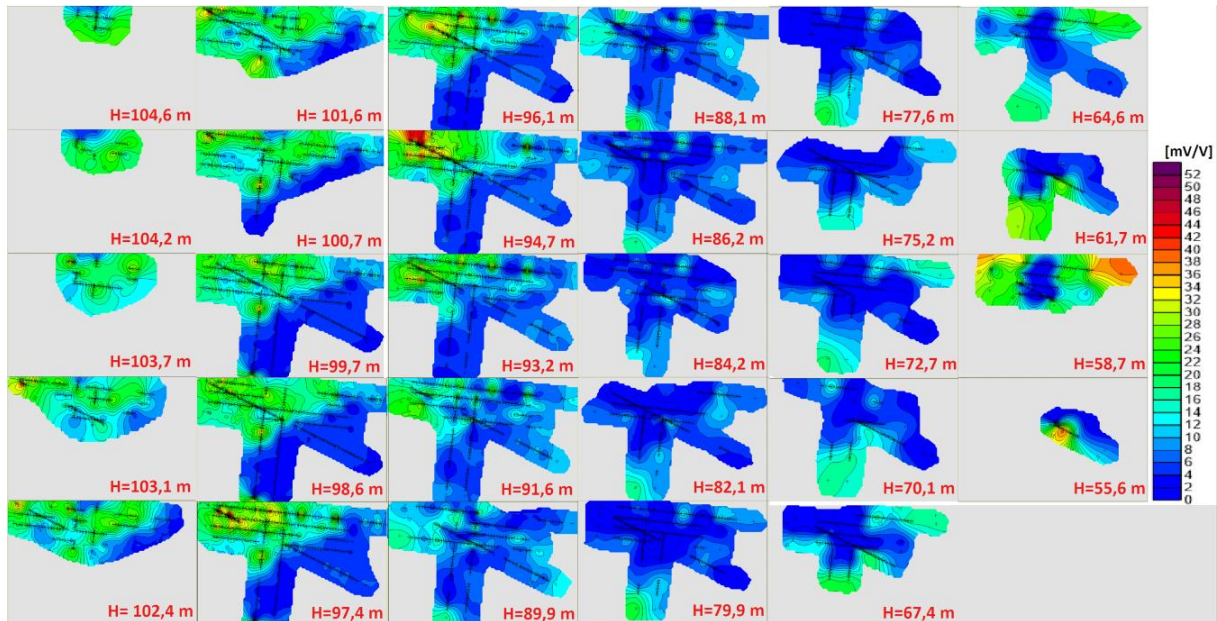
2. ábra: A topográfia hatása a horizontális szeletek meghatározására. (A) A geoelektromos mérésekből számított paraméterpontok elhelyezkedése változó felszín alatt. (B) Az alkalmazott szeletelési algoritmus által meghatározott horizontális síkok. (szerző saját szerkesztése)

Az eljárás biztosítja azt, hogy az egyes horizontális térképek valóban azonos mélységi szinteket reprezentáljanak, ezáltal pedig a térbeli értelmezés fizikailag konzisztenssé válik. A fajlagos ellenállás (3. ábra) és a gerjesztett polarizáció horizontális eloszlástérképei jól szemléltetik azt, hogy a hulladéktest térbeli kiterjedése és szerkezeti heterogenitása különböző mélységi szinteken eltérő módon jelenik meg.



3. ábra: A fajlagos ellenállás horizontális eloszlástérképei különböző magassági szinteken. (szerző saját szerkesztése)

Amíg az ellenállás elsősorban a vezetőképességi kontrasztokat hangsúlyozza, addig a gerjesztett polarizáció (4. ábra) a potenciálisan szennyezett, biogeokémiaailag aktív zónák finomabb elkülönítésére használható.

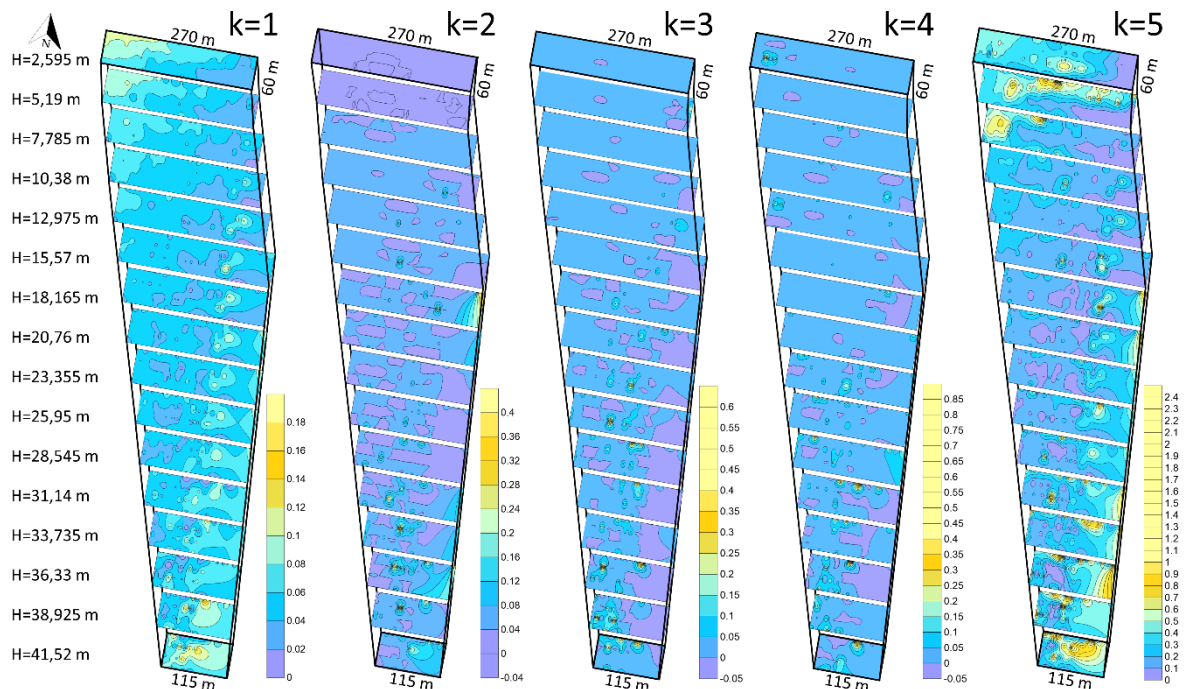


4. ábra: A gerjesztett polarizáció tölthetőségi horizontális eloszlástérképei különböző magassági szinteken. (szerző saját szerkesztése)

A kidolgozott szeletelési eljárás hatását kvantitatív módon is értékeltem. Az eredeti és az új szeletelési rendszer összehasonlításához a rétegindexeket normalizáltam, majd meghatároztam a pontok relatív szeletpozíciójának eltérését. A vizsgált területen az átlagos eltérés 1,17 rétegnek, a medián 0,86 rétegnek adódott, ami azt mutatja, hogy az eljárás a pontok többségét csak kis mértékben rendezi át, miközben a topográfiából eredő geometriai torzításokat megszünteti. Ez igazolja, hogy a módszer a térbeli interpretációt nem torzítja, hanem annak fizikai konzisztenciáját javítja.

2.4. WAV alapú gerjesztett polarizációs feldolgozás

A gerjesztett polarizációs adatok részletesebb értelmezése érdekében időállandó-spektrum alapú (WAV) feldolgozást alkalmaztam. Az eljárás biztosítja a különböző polarizációs folyamatok elkülönítését, ezáltal pedig a fizikai háttér pontosabb értelmezését. A módszer alkalmazásával azonosítottam olyan finom szerkezeti és anyagbeli különbségeket (5. ábra), amelyek a hagyományos paraméterek alapján nem voltak egyértelműek.



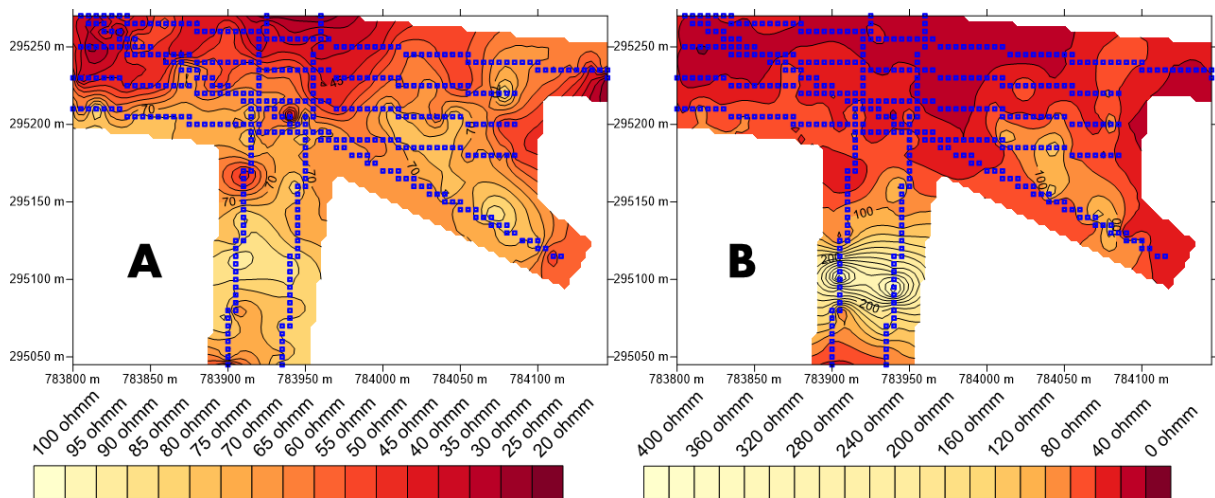
5. ábra: A legrövidebb relaxációs időtartományhoz ($k = 1-2$), a közepes relaxációs időtartományhoz ($k = 3-4$) és a leghosszabb relaxációs időtartományhoz ($k = 5$) tartozó normalizált WAV-paraméter különböző vonatkoztatási szinthez tartozó 2D-s horizontális szelvényei az Ny1-4 szelvények mentén. (szerző saját szerkesztése)

2.5. MFV alapú statisztikai feldolgozás

A geoelektromos adatok robusztus értelmezése érdekében alkalmaztam a Steiner-féle leggyakoribb érték (MFV) módszert. A módszer használható a domináns értékek meghatározására olyan adatrendszerekben, amelyek nem Gauss-eloszlásúak és kieső értékeket tartalmaznak. A vizsgálatok során két megközelítést alkalmaztam:

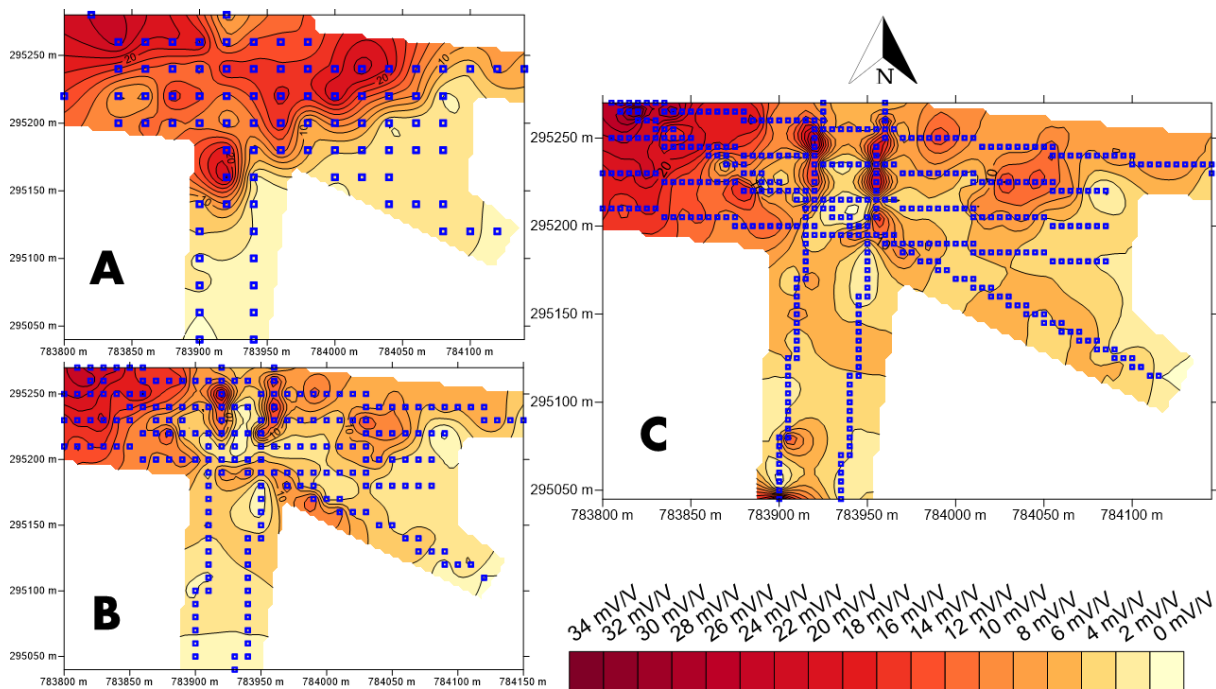
- klasszikus Steiner-féle MFV,
- fix dihéziós paraméterrel számított MFV.

Megállapítottam azt, hogy a különböző paraméterezések eltérő térbeli érzékenységet eredményeznek, amely módot ad a célzott interpretációra. Kimutattam azt is, hogy az iteratívan újraszámolt ε -paramétert alkalmazó Steiner-féle MFV módszer (6/B ábra) célravezetőbb a leggyakoribb értékek azonosítására az egyes adatoszlopokban. Ez a színskála kiterjedésében is megjelenik, mivel az eredmények a teljes 0–400 Ωm tartományt lefedik, jelezve a domináns értékek szélesebb dinamikáját. A fix ε -paraméterrel számított MFV (6/A ábra) inkább az átlaghoz közeli értékeket emeli ki, ugyanakkor a kieső értékek kiszűrésével még így is robusztusabb eredményt ad, mint a hagyományos átlagolás.



6. ábra: Fajlagos ellenállás térképek fix (A) és iteratívan (B) újraszámolt ε -os MFV módszerrel, ahol a kék négyzetek a referencia pontokat jelölik. (szerző saját szerkesztése)

Az iteratíván újraszámolt ε -paraméter alkalmazásának térbeli hatása a különböző mintavételi sűrűségek összehasonlításával jól szemléltethető (7. ábra).



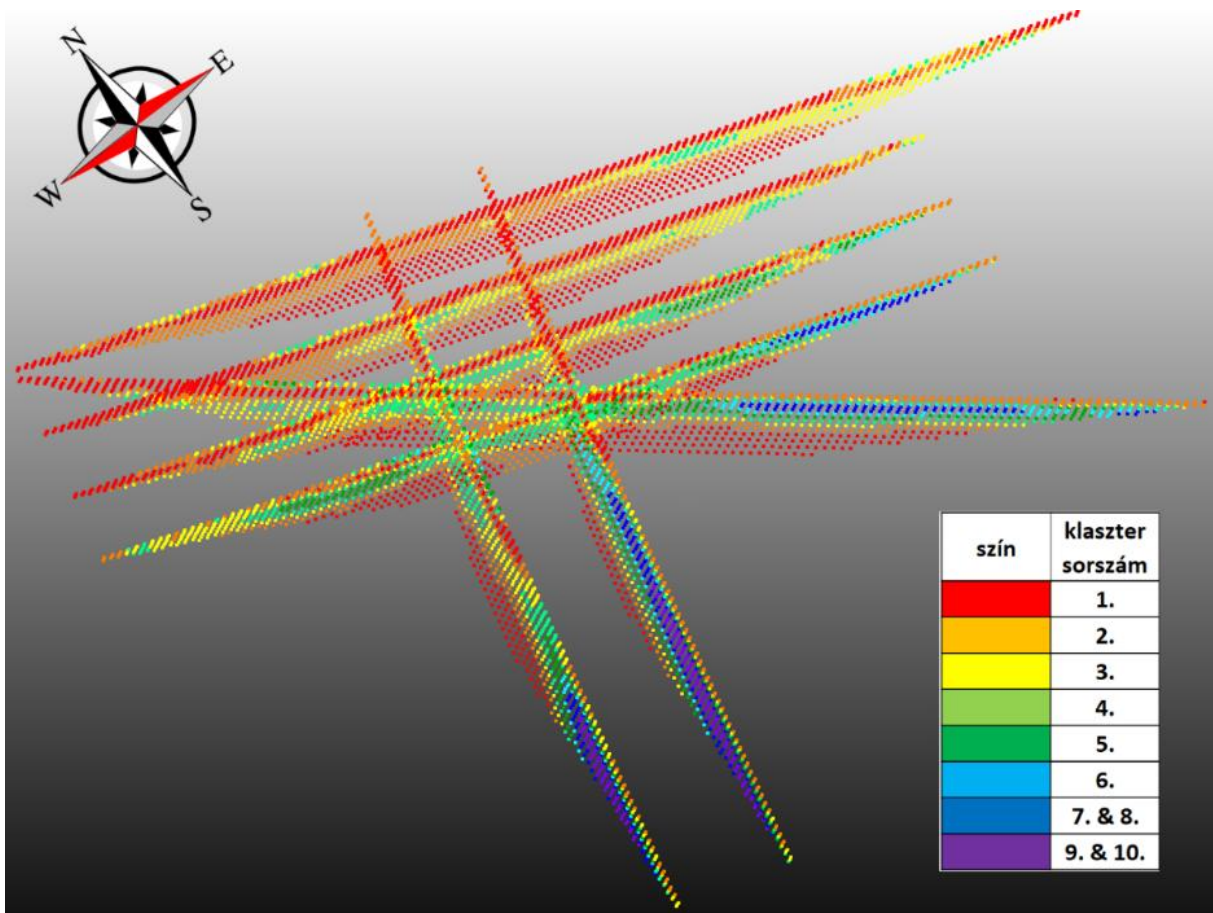
7. ábra: GP térképek iteratíván újraszámolt ε -os MFV módszerrel, ahol a kék négyzetek a referencia pontokat jelölik. **A:** 20×20 m-es zónák; **B:** 10×10 m-es zónák; **C:** 5×5 m-es zónák. (szerző saját szerkesztése)

A túl sűrű 5×5 m-es felbontás esetén az egymást metsző szelvények azonos területeken eltérő leggyakoribb értékeket jelölnek ki, ami térben nem koherens mintázatot eredményez. Ezt a jelenséget a 10×10 m-es felbontásnál is megfigyeltem, bár kisebb mértékben. A 20×20 m-es mintavételi sűrűség már kellően stabil és térben konzisztens eredményt biztosít, ami a módszer gyakorlati alkalmazhatósága szempontjából optimális kompromisszumnak tekinthető. Ez pedig rámutat arra, hogy a mintavételi sűrűség nem csupán adatfelbontási, hanem interpretációs stabilitási kérdés is.

A vizsgált területen a kvantitatív összehasonlítás alapján a fajlagos ellenállás esetében az iteratív ε -paraméterrel számított MFV módszer nagyobb relatív eltérést (~24–27%) és kisebb szórást (~16–21%) mutatott, mint a fix ε -paraméteres változat (~20–24% és ~22–25%), míg a gerjesztett polarizáció esetében a módszer viselkedése a mintavételi sűrűségtől függött.

2.6. Klaszteranalízis

A többparaméteres adatrendszer értelmezésének támogatására klaszteranalízist alkalmaztam, amely működőképes a hasonló tulajdonságú térrészek statisztikai alapú csoportosítására. A módszer célja az volt, hogy csökkentse a vizuális interpretáció szubjektivitását, és strukturáltabb alapot biztosítson a különböző földtani és környezeti egységek elkülönítéséhez (8. ábra).

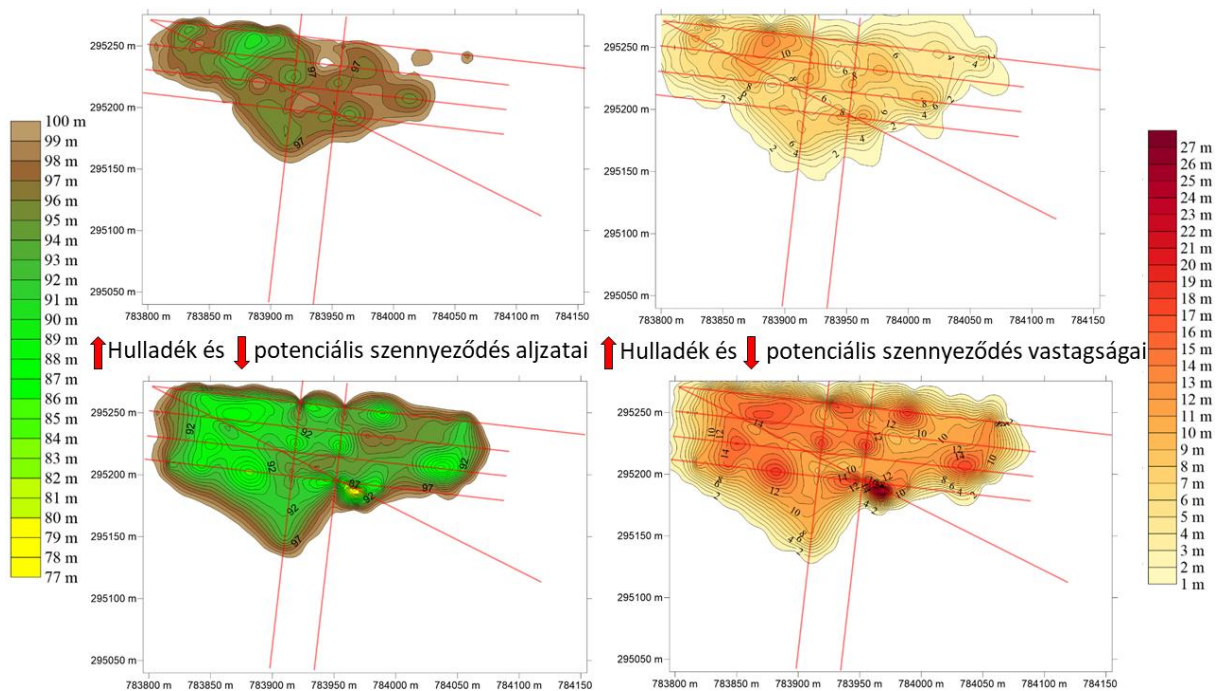


8. ábra: A 10 klaszterből álló elemzés által megszínezett mérési pontok térbeli helye (szerző saját szerkesztése)

Vizsgálataim szerint a klaszteranalízis támogatja a hulladéktest, a potenciálisan szennyezett zónák és az érintetlen háttérterületek elkülönítését, ugyanakkor a zónahatárok kijelölése továbbra is interpretációt igényel. Ennek megfelelően a klaszterezés nem önálló, teljesen objektív lehatárolást biztosít, hanem egy olyan statisztikai segédeszköznek tekinthető, amely a többparaméteres geoelektromos adatok konzisztens és reprodukálható értelmezését támogatja.

2.7. Aljzat- és vastagságtérképek

A fajlagos ellenállás és a gerjesztett polarizációs modellek alapján meghatároztam a hulladéktest és a potenciálisan szennyezett zónák alsó határát. Az így kapott felületek alapján vastagságtérképek és térfogatbecslések készültek. A hulladékréteg átlagos vastagsága 4–8 m, lokálisan elérheti a 13 m-t is, míg a potenciálisan szennyezett zóna ennél nagyobb térbeli kiterjedést mutat.



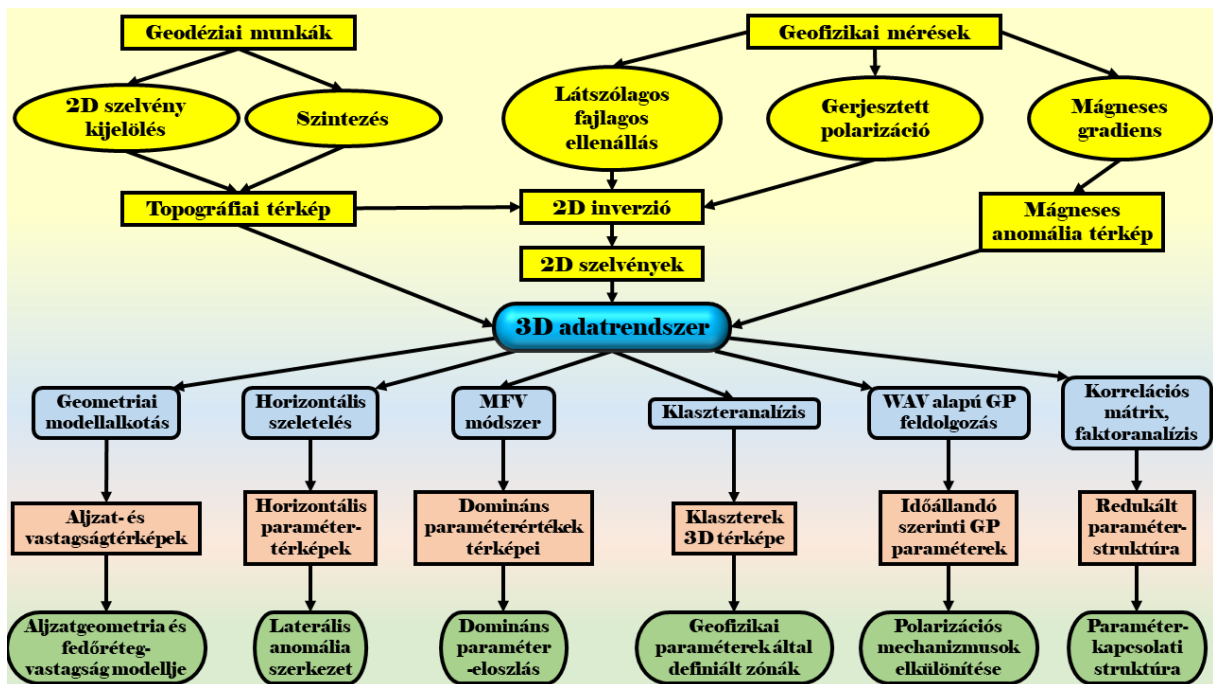
9. ábra: A hulladéktest és a potenciálisan szennyezett zóna becsült alsó határának izovonalas térképei [mBf], valamint ezek becsült vastagságainak izovonalas térképei [m]. A piros vonalak a geoelektromos mérési szelvények elhelyezkedését mutatják. (szerző saját szerkesztése)

2.8. Integrált értelmezés

Az alkalmazott módszerek együttes használata biztosította a vizsgált terület komplex, többparaméteres értelmezését. A fajlagos ellenállás és a gerjesztett polarizáció térbeli eloszlásának vizsgálata, kiegészítve a horizontális szeletelési eljárással, biztosította a hulladéktest geometriai lehatárolását. Az MFV alapú statisztikai feldolgozás robusztus módon emelte ki a domináns fizikai jellemzőket, míg a WAV alapú feldolgozás a polarizációs folyamatok finomabb szerkezeti és anyagbeli különbségeit tárta fel. A klaszteranalízis a többparaméteres adatrendszer statisztikai alapú csoportosítását biztosította, amely támogatta a különböző szerkezeti egységek elkülönítését, ugyanakkor azok végső lehatárolása továbbra is szakmai interpretációt igényelt.

A használt módszerek eredményeinek integrációja alapján elvégeztem a hulladéktest, a potenciálisan szennyezett zónák és az érintetlen háttérterületek térbeli elhelyezkedésének lehatárolását. Az egyes feldolgozási lépések nem önállóan, hanem egymást erősítve járultak hozzá az interpretációhoz, amely egyrészt jelentősen csökkentette az inverziós és értelmezési bizonytalanságot, másrészt növelte az eredmények konzisztenciáját.

A módszertani rendszer működésének összefoglalását és az egyes eljárások közötti kapcsolatot a 10. ábrán szemléltetem. Az ábra kiemeli, hogy a különböző feldolgozási lépések egymásra épülése révén egy strukturált, többfázisú interpretációs folyamat valósul meg, amelyben a statisztikai és geofizikai módszerek egymást kiegészítve támogatják a komplex felszínközeli rendszerek megbízható vizsgálatát. Ez az integrált megközelítés nemcsak a jelen vizsgálatban, hanem általános környezetföldtani problémáknál is alkalmazható, heterogén és komplex felszínközeli környezetek esetén.



10. ábra: Az alkalmazott geoelektromos módszertani rendszer integrált eredménye (szerző saját szerkesztése)

3. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. tézis

Kimutattam, hogy a Steiner-féle leggyakoribb érték (MFV) módszer viselkedése a geoelektromos adatrendszerekben a variációs együtthatótól (CV) függ, és az alkalmazott ε -paraméterezés, valamint a mintavételi sűrűség együttesen határozza meg az eredmények stabilitását és a domináns értékek meghatározását.

A tézis kifejtése:

Az MFV módszer alkalmazása során a kapott paraméterértékeket a referencia pontokban meghatározott átlagértékekhez viszonyítottam. A relatív eltérést az átlag torzító hatásától való eltérés mértékéeként, míg annak szórását a módszer stabilitásának jellemzésére értelmeztem.

A vizsgálatok alapján kimutattam, hogy a relatíve nagyobb variációs együtthatójú adatrendszerek (pl. itt fajlagos ellenállás, $CV \approx 1,34$) esetén az iteratíván újraszámolt ε -paraméterrel működő MFV módszer minden vizsgált esetben nagyobb relatív eltérést (~24–27%) és kisebb szórást (~16–21%) eredményezett, ami a domináns értékek stabilabb és kevésbé torzított meghatározását jelzi.

A relatíve kisebb variációs együtthatójú adatrendszerek (pl. itt gerjesztett polarizáció, $CV \approx 0,73$) vizsgálata esetén az MFV-paraméterezés érzékenyebbnek bizonyult a mintavételi sűrűségre. Sűrű mintavételezésnél a fix ε -paraméterrel számított változat adott stabilabb eredményt, míg ritkább mintavételezés (20×20 m) esetén az iteratív ε -paraméterrel működő megközelítés vált megbízhatóbbá. Az alacsonyabb relatív szórású adatrendszerekben a módszer stabil alkalmazásához nagyobb térbeli aggregáció szükséges.

Megállapítottam, hogy az MFV módszer alkalmazhatósága nemcsak az adatok eloszlásától, hanem azok relatív szórásától is függ: nagy szórású rendszerekben az iteratív ε -paraméterezés közvetlenül is stabil eredményt ad, míg alacsony szórású rendszerekben a stabilitás biztosításához a mintavételi sűrűség és a paraméterezés együttes optimalizálása szükséges.

2. tézis

Kimutattam, hogy a gerjesztett polarizáció időállandó-spektrum (WAV) alapú feldolgozása, standardizált paramétereken alapuló dominanciaelemzéssel kiegészítve, hatékonyan alkalmazható geoelektromos vizsgálatok során. Az eljárás lehetővé teszi a különböző polarizációs mechanizmusokhoz köthető térbeli mintázatok kvantitatív elkülönítését.

A tézis kifejtése:

A WAV-alapú feldolgozás során a gerjesztett polarizáció lecsengési görbéit különböző időállandó-spektrumra bontottam, és kimutattam, hogy az egyes időablakokhoz tartozó komponensek eltérő térbeli eloszlást mutatnak. Igazoltam, hogy a módszer nemcsak vertikális-, hanem horizontális szelvények mentén is alkalmazható, biztosítva a polarizációs jelenségek térbeli kiterjedésének vizsgálatát.

A különböző időállandó-tartományok összehasonlíthatósága érdekében a WAV-paramétereket az adott időablakok eloszlásához viszonyítva standardizáltam, majd minden térbeli pontra meghatároztam a domináns időállandó-tartományt. A vizsgált területen végzett alkalmazás során a rövid időállandók ($k = 1-2$) a pontok mintegy 74%-ában, míg a hosszú időállandóhoz tartozó komponens ($k = 5$) a pontok közel 17%-ában jelent meg dominánsan, a közepes időállandók ($k = 3-4$) pedig kisebb arányban, lokális jelleggel fordultak elő.

A rövid időállandók elsősorban háttérjelenségekhez köthetők, míg a közepes és hosszú időállandók térben elkülönülő, strukturált zónákat alkotnak. A hosszú időállandójú komponensek nagy kiterjedésű, vertikálisan is összefüggő mintázatokat mutatnak, amelyek tartós elektrokémiai és biogeokémiai folyamatokkal, illetve szennyezőanyagok jelenlétével hozhatók összefüggésbe.

Megállapítottam, hogy a standardizált dominanciaelemzés nemcsak az adott vizsgálati területen, hanem általános módszertani értelemben is megfelelő a különböző időállandó-tartományok relatív térbeli szerepének összehasonlítására, ugyanakkor a dominanciaeloszlás konkrét arányai az adott geológiai és szennyezettségi viszonyoktól függenek.

3. tézis

Kidolgoztam és alkalmaztam egy topográfia-korrigált horizontális szeletelési eljárást, amely egységes térbeli értelmezést ad különböző magasságban elhelyezkedő geoelektromos szelvénypontoknak változékony felszíni viszonyok mellett.

A tézis kifejtése:

Az általam kidolgozott eljárás során a geoelektromos szelvények pontjait a valós topográfiai viszonyok figyelembevételével rendeztem horizontális szeletekbe, biztosítva a különböző szelvények közös térbeli értelmezését.

A módszer hatását kvantitatívan úgy vizsgáltam, hogy az eredeti és az új szeletelési rendszer rétegindexeit normalizáltam, majd pontonként meghatároztam a relatív szeletpozíciók eltérését, amelyet az eredeti rendszer szintjeire visszaskáláztam. A vizsgált területen az átlagos eltérés 1,17 rétegnek, a medián 0,86 rétegnek, míg a maximális eltérés 4,14 rétegnek adódott.

A validációs területen az eljárás a pontok többségét csak kis mértékben rendezi át a vertikális szerkezetben, ugyanakkor képes korigálni a topográfiából eredő torzításokat. A nagyobb eltérések elsősorban a nagyobb mértékű felszínváltozással jellemezhető szakaszokon jelentkeztek, mert a módszer érzékeny a valós geometriai viszonyokra.

Megállapítottam, hogy a topográfia-korrigált szeletelési eljárás a vizsgált területen geometriailag konzisztens és kvantitatívan kontrollált módon módosította az adatelrendezést, ezáltal megbízhatóbb térbeli értelmezést adott változékony felszíni viszonyok mellett.

4. tézis

Igazoltam, hogy a többparaméteres geoelektromos adatok klaszteranalízissel történő feldolgozása használható a különböző geofizikai tulajdonságú térrészek objektív elkülönítésére, amennyiben a klaszterszám megválasztása kvantitatív validációval (*silhouette index*) és geofizikai interpretációval együttesen történik.

A tézis kifejtése:

Vizsgálataim során kimutattam, hogy a klaszteranalízis hatékony eszköz a fajlagos ellenállás és a gerjesztett polarizáció együttes figyelembevételével definiált többparaméteres adatrendszerek strukturálására és lehetőséget ad geofizikai tartományok elkülönítésére. Igazoltam, hogy a klaszterezés eredménye erősen függ a klaszterszám megválasztásától: alacsony klaszterszám esetén a rendszer túlzottan összevont, míg magas klaszterszámnál a paramétertér mesterséges felosztása és kis elemszámú klaszterek megjelenése figyelhető meg. A különböző klaszterszámokra elvégzett kvantitatív értékelés alapján megállapítottam, hogy a *silhouette index* megfelelő a klaszterezés minőségének objektív jellemzésére, és egyértelműen jelzi az optimális klaszterszám-tartományt. A nagyobb klaszterszámok bár statisztikai értelemben kedvezőtlenebbek, a paramétertér részletesebb feltárását segítik elő, amely értelmezési szempontból indokolt.

Eredményeim alapján megállapítható, hogy a klaszteranalízis nem tekinthető teljesen automatizált módszernek, ugyanakkor a kvantitatív validációval és geofizikai értelmezéssel kombinálva csökkenti a szubjektivitást, és hatékony eszközt biztosít a geoelektromos adatok térbeli szerkezetének feltárására.

5. tézis

Kidolgoztam és alkalmaztam egy integrált geoelektromos feldolgozási és értelmezési módszertani rendszert, amely az egyes feldolgozási lépések egymásra épülő alkalmazásával csökkenti az értelmezési bizonytalanságot az alkalmazott vizsgálati környezetben.

A tézis kifejtése:

Kidolgozott módszertanom a mérési tervezéstől az inverzió, szeletelésen és statisztikai feldolgozáson át egységes értelmezési rendszert alkot. Igazoltam, hogy az egymásra épülő feldolgozási lépések alkalmazása konzisztensebb térbeli modellekhez vezet. Az integráció jelen formájában statisztikai alapú, amely további fejlesztési lehetőséget jelent, kiváltképpen a közös inverziós megközelítések irányába.

4. GYAKORLATI ALKALMAZHATÓSÁG

A PhD értekezésemben bemutatott módszertani rendszer gyakorlati jelentősége elsősorban a felszínközeli környezetföldtani vizsgálatok területén érvényesül, főként rekultivált hulladéklerakók és egyéb szennyezett területek esetében. A multielektrodás geoelektromos és gerjesztett polarizációs mérések kombinált végrehajtása célravezető a felszín alatti szerkezet roncsolásmentes feltárására, amely költséghatékony alternatívát jelent a hagyományos, pontszerű feltárási módszerekkel szemben.

A kidolgozott módszertani megközelítés egyik legfontosabb gyakorlati előnye az, hogy több egymást kiegészítő feldolgozási lépést integrál egy egységes értelmezési rendszerbe. A 2D inverziós szelvények térbeli integrálása és a horizontális szeletelési eljárás biztosítja a vizsgált objektum kvázi háromdimenziós leírását anélkül, hogy teljes 3D mérési és inverziós rendszer alkalmazása szükséges lenne. Ez előnyös olyan területeken, ahol a terepi viszonyok vagy az infrastruktúra korlátozza a szabályos elektródaháló telepítését.

A robusztus statisztikai módszerek, főként az MFV alapú feldolgozás alkalmazása, javítja a geoelektromos adatok megbízhatóbb értelmezését azáltal, hogy csökkenti a kieső értékek és a zaj hatását. Ez a gyakorlatban stabilabb és reprodukálhatóbb eredményeket képez, ami pedig a mérnöki döntéstámogatás szempontjából kiemelt jelentőségű. A klaszteranalízis alkalmazása támogatja a kevésbé szubjektív értelmezést, mivel biztosítja a különböző fizikai tulajdonságú térrészek automatikus elkülönítését.

A gerjesztett polarizáció időállandó-spektrum alapú feldolgozása (WAV módszer) további információt szolgáltat a felszín alatti közeg elektrokémiai tulajdonságairól. Ennek gyakorlati jelentősége abban rejlik, hogy a módszer érzékeny a szennyezőanyagok jelenlétére és a biogeokémiai folyamatokra, ezáltal pedig megfelelő lehet a potenciálisan szennyezett zónák pontosabb lehatárolására. A bemutatott módszertani rendszer a gyakorlatban az alábbi területeken használható:

- rekultivált és működő hulladéklerakók állapotfelmérése és monitorozása,
- szennyezett területek lehatárolása és kockázatbecslése,
- mérnökgeofizikai előkészítő vizsgálatok (pl. beruházások, infrastruktúra-fejlesztések előtt),
- valamint felszín alatti heterogén szerkezetek térbeli modellezése.

A módszer külön előnye, hogy a különböző feldolgozási lépések kombinációja révén csökkenti az egyértelműtlenségből fakadó interpretációs bizonytalanságot. Ez pedig hozzájárul ahhoz, hogy a mérnöki és környezetvédelmi döntéshozatal során a geoelektromos vizsgálatok eredményei közvetlenebb módon felhasználhatók legyenek.

Megállapítható, hogy a PhD értekezésemben bemutatott integrált geoelektromos értelmezési megközelítés nemcsak tudományos szempontból jelent előrelépést, hanem a gyakorlatban is alkalmazható eszközt biztosít komplex felszínközeli problémák vizsgálatához.

5. A SZERZŐ TÉMÁBAN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓI IDŐRENDI SORRENDEN

- [1] **Szilvási, M. és Havasi, I. (2026):** Rekultivált hulladéklerakó térbeli lehatárolása multielektrodás geoelektromos és gerjesztett polarizációs mérések alapján. *Magyar Geofizika* ISSN: 0025-0120 67. évfolyam (2026) 1. szám
- [2] **Szilvási, M. (2026):** Application of the Most Frequented Value Method in Geoelectrical Data System. *Geosciences an Engineering* ISSN: 2063-6997 Vol. 14 No. 1 (2026)
- [3] **Szilvási, M. (2025):** New methods for processing geoelectric geophysical survey data of shallow-depth contaminants and man-made facilities. *LV. Meeting of Young Geoscientists/Ifjú Szakemberek Ankétja*. pp. 48-49.
- [4] **Szilvási, M. (2025):** A geodézia támogató szerepe begyűjtött geofizikai adatok feldolgozásánál. In: *LXIII. Bányamérő Konferencia: "Technológiaváltás a bányamérésben"* pp. 96-102.
- [5] **Szilvási, M. (2025):** Paraméterérzékenységi vizsgálatok különböző elektróda elrendezések esetén. *Új eredmények a műszaki föld- és környezettudományban 2025*. pp. 99-112.
- [6] **Szilvási, M. (2023):** Horizontális szeletelési módszer geofizikai geoelektromos szelvényezéshez. *Új eredmények a műszaki föld- és környezettudományban 2023*. pp. 168-175.
- [7] **Szűcs, P., Turai, E., Mádai, V., Vass, P., Miklós, R., Zákányi, B., Ilyés, Cs., Fekete, Zs., Kilik, R., Móricz, F., Nyíri, G., Szilvási, M. és Szabó, N. P. (2022):** Innovation in assessment of the geothermal energy potential of abandoned hydrocarbon wells in the southern and southeastern foreground of the Bükk Mountains, northeast Hungary *Hydrogeology Journal*, 30(8), pp. 2267-2284. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02560-y>
- [8] **Szilvási, M. (2022):** Shallow geophysical premeasurements at a construction site. *Inverziós Ankét 2022 Konferencia*. 31 p.

- [9] **Szilvási, M. és Turai, E. (2018):** Geodéziai alapok kialakítása egy rekultivált hulladéklerakó geofizikai felméréséhez és kiértékeléséhez. In: LVII. Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatsere. pp. 56-61.
- [10] **Turai, E., Nádasi, E. és Szilvási, M. (2018):** Felszín alatti objektumok és földtani szerkezetek kutatása geoelektromos tomográfiával. *Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2018* pp. 374-381.
- [11] **Turai, E., Szilvási, M., Nádasi, E. és Abordán, A. (2017):** Rekultivált hulladéklerakó belső szerkezetének vizsgálata geoelektromos módszerekkel. *Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2017* pp. 586-593.
- [12] **Szilvási, M., Turai, E. és Nádasi, E. (2017):** Resistivity and IP Monitoring near a Tailings Storage - A Case Study from Hungary In: *79th EAGE Conference & Exhibition 2017* Paris, Paper Th SP2 05, 3 p.
- [13] **Turai, E. és Szilvási, M. (2017):** Rekultivált hulladéklerakó szennyezettségének vizsgálata. *Műszaki Földtudományi Közlemények*, 86(1) 181-192.
- [14] **Szilvási, M., Turai, E. és Kovács, B. (2016):** In Field Geoelectric Measurements for Detection of Heavy Metal Contaminations. microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Paper: A12
- [15] **Turai, E., Nádasi, E. és Szilvási, M. (2016):** A geoelektromos geofizikai módszerek terepi alkalmazásának új eredményei a környezetvizsgálatok területén. *Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016* pp. 680-689.
- [16] **Szilvási, M., Turai, E. és Kovács, B. (2016):** Heavy metal detection using geoelectric methods in field. *XLVII. Ifjú Szakemberek Ankétja – Meeting of Young Geoscientists* pp. 57-58.

A tézisfüzet hivatkozásai

- [1] Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T., Hogland, W. (2000): DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys. *Environmental Geology*, 39(3–4), 360–371. <https://doi.org/10.1007/s002540050015>
- [2] Cardarelli, E., Di Filippo, G. (2004): Integrated geophysical surveys on waste dumps: evaluation of physical parameters to characterize an urban waste dump (four case studies in Italy). *Waste Management & Research*, 22(5), 390–402. <https://doi.org/10.1177/0734242X04046042>
- [3] Chambers, J. E., Kuras, O., Meldrum, P. I., Ogilvy, R. D., Hollands, J. (2006): Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics*, 71(6), B231–B239. <https://doi.org/10.1190/1.2360184>
- [4] Chao, C., Ma, X., Liu, S., Zheng, C., Mao, D. (2024): Characterization of solid waste deposit using electrical resistivity tomography and time-domain induced polarization. *Journal of Environmental Management*, 366, 121854. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121854>
- [5] Flores-Orozco, A., Gallistl, J., Steiner, M., Brandstätter, C., Fellner, J. (2020): Mapping biogeochemically active zones in landfills with induced polarization imaging: The Heferlbach landfill. *Waste Management*, 107, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.001>

- [6] Guinea, A., Bicknell, J., Cox, N., Swan, H., Simmons, N. (2022): Characterization of legacy landfills with electrical resistivity tomography: a comparative study. *Journal of Applied Geophysics*, 203, 104716. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104716>
- [7] Martorana, R., Capizzi, P., Pirrera, C. (2023): Unconventional arrays for 3D electrical resistivity and induced polarization tomography to detect leachate concentration in a waste landfill. *Applied Sciences*, 13(12), 7203. <https://doi.org/10.3390/app13127203>
- [8] Maurya, P. K., Rønde, V. K., Fiandaca, G., Balbarini, N., Auken, E., Bjerg, P. L., Christiansen, A. V. (2017): Detailed landfill leachate plume mapping using 2D and 3D electrical resistivity tomography – with correlation to ionic strength measured in screens. *Journal of Applied Geophysics*, 138, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.01.019>
- [9] Turai, E. (1981): GP time-domain görbék TAU-transzformációja. *Magyar Geofizika*, 22(1), 29–36. ISSN: 0025-0120