

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

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

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

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

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

TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

Szilvási Marcell

„Szennyezett területek lehatárolása és a szennyezettség minősítése geofizikai és geostatisztikai módszerek alkalmazásával” című PhD értekezéséhez.

A jelölt 2013-ban a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karán földtudományi mérnöki diplomát szerzett. Ezt követően a Földtudományi mérnöki MSc Geofizikus-mérnöki szakirányát 2015-ben elvégezve MSc földtudományi mérnök lett. 2015-2018 között pedig egyetemünk Mikoviny Sámuel Doktori Iskolája levelezős doktorandusz hallgatójaként tevékenykedett. Ennek kapcsán a kutatási területe magába foglalta a geofizikát, a geoelektromos méréseket, a szennyezésterjedést, a geostatistikát és a térinformatikát is.

Az elmúlt 10 évet is meghaladó időszakban többször eredményesen szerepelt különböző versenyeken. Közülük megemlíteném a matematikai csapatversenyeket és a nemzetközi olajipari versenyeket. Az utóbbi kapcsán külön kiemelném a 2015-ös 1. helyezést (1200 csapat). Ebben az évben a kolozsvári TDK-n még az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontjának különdíját is megszerezte.

Ami munkavégzéshez kötődő szakmai tapasztalatait illeti 2013 és 2015 nyarán 1-1 hónapot, mint geofizikus mérnök-gyakornok, a budapesti ELGI-nél dolgozott. 2015-től pedig a Miskolci Egyetem Geodéziai és Bányaméréstani Intézeti Tanszékének tanársegédi munkáját végzi.

Doktori tanulmányait levelező képzésben, teljes munkaidős oktató-kutatói állás mellett, kezdte el és fejezte be. A Geodéziai és Bányaméréstani Intézeti Tanszéken a doktori témájához kapcsolódó feladatok elvégzése mellett, figyelembe véve a tanszék szakmai profilját, egy másik szakterületen is elmélyült ismereteket szerzett. Ennek igazolásaképpen publikációs és kutatási tevékenységet végzett, amely mutatja a folyamatos szakmai fejlődését. Az a tény, hogy párhuzamosan több tudományos irányban tudott előrehaladni az egyértelmű jele a szakmai alkalmazkodóképességének és a terhelhetőségének.

A doktori képzés éveitől kezdve tehetséggondozó tevékenységet is folytatott. Hat Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat témavezetőjeként működött közre, valamint egy MSc diplomamunka elkészítését is irányította. Hallgatóit nem csupán szakmailag segítette, hanem a tudományos gondolkodásmód és a mérnöki szemlélet kialakításában is aktív szerepet vállalt. Több hallgatót készített fel szakmai versenyekre is. E tevékenysége hiteles, mivel korábban maga is jelentős sikereket ért el hazai és nemzetközi szakmai és tudományos

versenyeken, így személyes tapasztalatait a mentoráló munkájában közvetlenül tudta hasznosítani.

Szerepvállalása a szakmai közéletben szintén kiemelendő. Tagja a Magyar Geofizikusok Egyesületének, az Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesületnek és a Borsod-Abaúj-Zemplén Vármegyei Mérnöki Kamara Szilárdásvány-bányászati tagozatának, ahol a szakcsoport elnökségi tagjaként is tevékenykedik. A hites bányamérői jogosultság megszerzése tovább erősíti mérnöki kompetenciáját és szakmai felelősségvállalását.

A jelölt nyelvismereteinek a fejlesztésével (középfokú angol és német, alapfokú spanyol, orosz, koreai és kínai) tudatosan építi nemzetközi orientációját is.

Szilvási Marcell doktori értekezésének témavezetői ajánlásakor az eredeti témavezetője kapcsán szükséges megemlíteni egy rendkívül sajnálatos elhalálozási eseményt. A jelölt doktori kutatását ugyanis eredetileg Dr. habil. Turai Endre irányításával kezdte meg, aki a választott kutatási terület elismert művelője volt. Dr. Turai Endre egyetemi magántanár 2025. május 14-én bekövetkezett halála komoly veszteséget jelentett a szakmai közösség számára. Ezt követően, mint az addigi társtémavezetője vettem át a felelős témavezetői feladatokat, biztosítva a kutatás folytonosságát. A dolgozat témája szervesen illeszkedik Turai Endre tudományos profiljába, és annak továbbfejlesztéseként, részben kiegészítéseként értelmezhető. A jelölt munkája ilyen értelemben nemcsak önálló tudományos teljesítményt, hanem egy szakmai iskola következetes továbbvitelét is jelenti.

Felelős témavezetői ajánlásomat, mint a Miskolci Egyetem Geodéziai és Bányaméréstani Intézeti Tanszékének vezetője fogalmazom meg. E tanszéken a doktorjelölt immár közel tizenegy éve folytat oktató és kutatótevékenységet. Ezen időszak pedig lehetőséget adott arra, hogy szakmai fejlődését, munkabírást, oktatói és kutatói attitűdjét alaposan megismerjem. Itt említem meg azt is, hogy véleményem szerint a tanszékünkön megszerzett geodéziai, térképészeti, térinformatikai ismeretei nagy mértékben segítették doktori kutatómunkáját, amely a tézisekben megfogalmazott új eredményekben is visszatükröződik.

A jelölt doktori értekezése a geofizika területén, ezen belül pedig elsősorban a geoelektromos mérések, a szennyezésterjedési folyamatok vizsgálata és a térinformatikai alapú adatfeldolgozás témakörében jött létre. A kutatás célja a mérési módszerek alkalmazhatóságának pontosítása, az értelmezési lehetőségek bővítése és a modellezési megközelítések fejlesztése volt. A dolgozat egyik legfontosabb jellemzője az, hogy abban a terepi mérések, az inverziós feldolgozás és a térinformatikai integráció nem elkülönülten, hanem egységes rendszerben jelennek meg. Az egyes tézisek pedig érthetően kijelölik

azokat az új eredményeket, amelyek a módszertan finomításához és a gyakorlati alkalmazhatóság erősítéséhez is hozzájárulnak.

Szilvási Marcell PhD értekezését egyetemi munkakörömhöz kapcsolódó tudományos szakmai ismereteimre alapozva, nem pedig a geofizikai inverziós eljárások szakembereként értékelem. A dolgozat logikus szerkezeti felépítése, a módszertani következetesség, az adatok értelmezésének logikája és az eredmények mérnöki relevanciája alapján meggyőződéssel kijelenthetem azt, hogy a jelölt önálló és tudományosan megalapozott kutatómunkát végzett. A geofizikai eredmények térinformatikai és alkalmazott földtudományi kontextusba helyezése pedig kiváltképp értékes, és a tanszék interdiszciplináris profiljához is jól illeszkedik.

A jelölt kutatómunkájának eredményét öt tézispontban foglalta össze. Úgy gondolom, hogy kutatásának eredményei a geofizika ezen fontos tématerülete kapcsán a gyakorlatban a jövőben majd eredményesen felhasználhatók lesznek. Megállapítható az is, hogy Szilvási Marcell doktori értekezése tartalmában, módszertanában és eredményeiben megfelel a Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola tartalmi és formai követelményeinek. Tudományos teljesítménye ugyanakkor illeszkedik a néhai Turai Endre professzor által képviselt szakmai irányhoz, azt továbbfejleszti és korszerű módszertani elemekkel gazdagítja. A már említett oktatói, mentoráló és szakmai közéleti tevékenysége, valamint mérnöki jogosultságai alapján pedig felkészült és felelősségteljes kutatói pályára alkalmas szakembernek tekinthető. Felelős témavezetői véleményem az, hogy Szilvási Marcell PhD dolgozata teljesíti a doktori értekezésekkel szemben támasztott követelményeket, ezért alkalmas arra, hogy az a nyilvános vitában megmérettessen. Meggyőződésem, hogy ez a tudományos munka, megfelelő arra, hogy az említett PhD védés eredményeként a Bíráló Bizottság a tudományos fokozat odaítélésére javaslatot tegyen.

Miskolc, 2026. február 25.



Dr. Havasi István

intézeti tanszékvezető egyetemi docens, felelős témavezető

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	1
Summary	2
1. Bevezetés, a téma ismertetése	3
2. Elméleti összefoglaló	8
2.1 Egyenáramú geoelektromos mérések	8
2.2 Különböző megvizsgált elektródaelrendezések bemutatása.....	9
2.2.1 Wenner-alfa.....	10
2.2.2 Wenner-béta	10
2.2.3 Wenner-Schlumberger	11
2.2.4 Dipól-dipól.....	11
2.3 A gerjesztett polarizáció fizikai mechanizmusai	12
2.3.1 Időtartománybeli GP és TAU-transzformáció	12
2.3.2 Polarizációs típusok földtani értelmezése	14
2.4 A mágneses mérések elméleti háttere	15
2.5 A földradar módszer jellemzése és az adatfeldolgozás lépései	17
2.6 A paraméterérzékenység vizsgálata.....	19
2.7 A leggyakoribb érték (MFV) módszere.....	20
3. A geoelektromos értelmezés módszertana.....	22
3.1 Mérési stratégia, geometriai tervezés és topográfia.....	22
3.1.1 Nyékládházi terület	22
3.1.2 A Miskolci Egyetemen kijelölt kutatási terület	26
3.2 Paraméterérzékenységi vizsgálatok előre modellezéssel.....	30
3.2.1 Digitális modellalkotás	30
3.2.2 Előre modellezés	31
3.2.3 Paraméterérzékenységi vizsgálatok	32
3.3 Inverzió előtti adatminőség-ellenőrzés és hibaszűrés	33
3.4 2D-s inverzió és 3D-s adatbázisépítés	35
3.5 Mágneses mérések	38
3.6 Topográfiát figyelembe vevő horizontális szeletelési algoritmus	39
3.7 Többparaméteres statisztikai értelmezési rendszer.....	42
3.7.1 Klaszteranalízis	42
3.7.2 Korrelációvizsgálat	43
3.7.3 Faktoranalízis	44

3.7.4 A leggyakoribb érték módszere	44
3.8 GP időállandó-spektrum alapú minősítési megközelítés	45
3.9 Integrált értelmezési keretrendszer	48
4. Gyakorlati alkalmazás és validáció.....	50
4.1 Kontroll geológiai modell – paraméterérzékenységi eredmények	50
4.2 Vezetőképeségi változások vizsgálata – egy zagytározó környezete.....	56
4.2.1 Időbeli összehasonlítás mérési pontonként	56
4.2.2 A vezetőképeség térbeli ábrázolása.....	57
4.3 Diffúz szennyezési környezet – rekultivált hulladéklerakó	59
4.3.1 2D-s vertikális szelvények elemzése	59
4.3.2 Aljzat- és vastagságtérképek.....	63
4.3.3 Horizontális szelettérképek értelmezése	66
4.3.4 Mágneses mérési eredmények	70
4.3.5 Többparaméteres osztályozás eredményei.....	71
4.3.5.1 Klaszteranalízis eredményei.....	71
4.3.5.2 Korrelációs mátrix és a faktoranalízis eredményei	74
4.3.5.3 Fix ε -os MFV módszer térképei.....	75
4.3.5.4 Steiner-féle MFV módszer térképei	77
4.3.5.4 Az MFV módszerek kvantitatív összehasonlítása.....	78
4.3.6 Szennyezési indikátorok a GP spektrum alapján	80
4.3.6.1 A vertikális 2D-s szelvények értelmezése.....	80
4.3.6.2 A horizontális 2D-s szelvények értelmezése.....	85
4.3.6.3 A WAV-paraméterek dominanciaelemzése	88
4.4 Mesterséges objektumok detektálása – építési terület vizsgálata	89
4.4.1 A geofizikai adatok kiértékelt szelvényei közösen ábrázolva	89
4.4.2 A szelvények pontjainak a 3D-s megjelenítése	90
4.4.3 Horizontális paramétertérképek	92
4.4.4 Klaszteranalízis eredménye	93
4.4.5 A klaszterszám optimalizálása és összehasonlító értékelése	96
5. Következtetések és gyakorlati alkalmazhatóság.....	97
6. Tézisek	100
Köszönetnyilvánítás	104
Irodalomjegyzék	105
Mellékletek	110

Összefoglaló

A doktori értekezésem célja egy geoelektromos feldolgozási és értelmezési módszertani rendszer kidolgozása volt felszínközeli, heterogén és antropogén hatásokkal terhelt területek vizsgálatára. A vizsgálat kiindulópontja az volt, hogy ilyen komplex rendszerek megbízható értelmezése csak több, egymást kiegészítő geofizikai és feldolgozási módszer együttes alkalmazásával lehetséges. A bemutatott módszertan a mérési tervezéstől az inverzió és a térbeli adatbázis kialakításán át a horizontális szeletelésig, valamint a statisztikai és spektrális feldolgozásig egységes értelmezési rendszert alkot. A kontroll modellen végzett paraméterérzékenységi vizsgálatok igazolták, hogy az elektródaelrendezés megválasztása befolyásolja a különböző mélységi és geometriai hatók kimutathatóságát, így a mérési geometria az értelmezés megbízhatóságát meghatározó tényező. A módszer terepi validálása során egy zagytározó környezetben a vezetőképességi változások térbeli és mélységi követése biztosította a geofizikai anomáliát mutató zónák lehatárolását. A nyékládházi rekultivált hulladéklerakón a fajlagos ellenállás és a gerjesztett polarizáció együttes értelmezése, valamint a topográfia-korrigált horizontális szeletelés alkalmas volt a hulladéktest és a kapcsolódó térrészek kvázi háromdimenziós modellezésére. Az aljzat- és vastagságtérképek, valamint a becsült térfogatok meghatározása azt mutatta, hogy az integrált feldolgozás nagyobb információtartalmat biztosít, mint a szelvények külön-külön történő értelmezése. A statisztikai módszerek alkalmazása alapján megállapítható, hogy a klaszterszám megválasztása befolyásolja az eredmények részletességét és értelmezhetőségét, ezért a klaszteranalízis nem tekinthető teljesen automatikus osztályozási módszernek. A korreláció- és faktoranalízis azt mutatta, hogy a vizsgált paraméterek részben eltérő fizikai folyamatokat reprezentálnak, így azok együttes értelmezése indokolt. Az MFV módszer alkalmazása stabilabb reprezentatív értékeket adott heterogén és zajjal terhelt adatrendszerek esetében, míg a WAV-alapú spektrális feldolgozás segítette a különböző polarizációs mechanizmusok térbeli elkülönítését. A miskolci vizsgálatok azt mutatták, hogy az integrált megközelítés mesterséges objektumok detektálásában is hatékonyan alkalmazható. A kidolgozott módszertani rendszer csökkenti az interpretáció bizonytalanságát, és komplex felszínközeli problémák vizsgálatában is megbízható értelmezést biztosított. A módszer alkalmazható környezetföldtani és mérnökgeofizikai feladatokban, például rekultivált hulladéklerakók vizsgálatában és potenciálisan szennyezett területek lehatárolásában.

Summary

The aim of this dissertation was to develop an integrated geoelectrical data processing and interpretation framework for the investigation of near-surface environments characterized by heterogeneity and anthropogenic influence. The research is based on the premise that reliable interpretation of such complex systems requires the combined application of multiple complementary geophysical methods and processing techniques. The proposed methodology forms a unified interpretation framework, covering survey design, inversion, spatial database construction, horizontal slicing, as well as statistical and spectral analyses. Investigations on a synthetic model confirmed that electrode configuration significantly affects the detectability of subsurface structures, demonstrating that measurement geometry is a key factor in reliable interpretation. Field validation showed that conductivity variations can be effectively used to delineate potentially affected zones in a tailing environment. At the Nyékládháza landfill site, the combined interpretation of electrical resistivity and induced polarization data, supported by topography-corrected horizontal slicing, enabled quasi-three-dimensional modelling of the waste body and associated subsurface zones. Basement and thickness maps, along with estimated volumes, demonstrated that integrated processing provides substantially more information than the interpretation of individual profiles. The application of statistical methods revealed that the number of clusters strongly influences the level of detail and interpretability, indicating that cluster analysis cannot be considered a fully automatic classification tool. Correlation and factor analyses confirmed that the investigated parameters represent partly different physical processes, making their combined interpretation essential. The Most Frequent Value (MFV) method provided a more robust estimation of representative parameters in heterogeneous and noisy datasets, while WAV-based spectral analysis enabled the spatial separation of different polarization mechanisms. Investigations in the Miskolc study area demonstrated that the integrated approach is also suitable for the detection of man-made subsurface objects. In conclusion, the developed framework reduces interpretational uncertainty and allows for reliable analysis of complex near-surface systems. The methodology is particularly applicable in environmental and engineering geophysics, including landfill assessment and the delineation of potentially affected areas.

1. Bevezetés, a téma ismertetése

A doktori kutatásom során szennyezett területek vizsgálhatóságát tűztem ki célul. Nagyon fontos feladat a szennyeződések nyomonkövetése és térbeli lehatárolása, amelyhez főként geoelektromos méréseket alkalmaztam összetett szelvényezések mentén. A geofizikai kutatások előnye, hogy nagy területek vizsgálhatók velük, és a felszín megbontása nélkül nyerhető információ a felszín alatti viszonyokról. Igaz, hogy ezáltal nem olyan közvetlen és pontos adatokat kapunk, mint magmintákból, ugyanakkor átfogó képet adnak a vizsgált területről. A felszíni elektromos és elektromágneses módszerek mérési költségei a kapott információkhoz viszonyítva kedvezőek. A kutatás célja nem pusztán különböző szennyezett vagy potenciálisan problémás területek geofizikai vizsgálata volt, hanem egy olyan integrált geoelektromos értelmezési és vizsgálati módszertani rendszer kidolgozása és validálása, amely alkalmas lehet sekély zónákban található, főként antropogén hatásokkal terhelt területek azonosítására és térbeli lehatárolására. A geodézia és térinformatika területén szerzett tapasztalataimat a geofizikai kutatások kialakításánál és az adatfeldolgozás során is hasznosítani kívántam. Az önállóan irányított precíz szelvénytervezés, a szelvények kijelölése és geometriai elrendezése, majd azok felmérése biztosította a későbbi térinformatikai és geostatistikai elemzések stabil alapját. Ezért fektetek hangsúlyt a dolgozatban a részletes bemutatásukra, hiszen csak megbízható adatrendszerre támaszkodva lehet geofizikai következtetéseket levonni. Miután a térinformatikai rendszer kellően stabil, a következő lépés a geofizikai terepi mérések előkészítése és a megfelelő mérési módszer kiválasztása. Ezért szükségesnek tartottam annak vizsgálatát, hogyan reagálnak a geofizikai inverziós szoftverek az ugyanazon terület felett, különböző elektródaelrendezésben végzett mérésekre, kiváltképpen dőlt rétegsor felett. Először homogén féltérben elhelyezett anomáliára végeztem paraméterérzékenységi vizsgálatokat előre modellezés segítségével. Szennyezőanyagot is tartalmazó közegben éppen azért alkalmazunk geofizikai módszereket, hogy a felszín alatti rétegek közetfizikai paramétereiről roncsolásmentesen szerezzünk információt, ugyanakkor egy módszer tesztelésénél hasznos visszajelzést jelenthetnek az *in situ* adatok. Ennek érdekében egy ismert geológiai szelvényt, egy mecseki kőszételepet választottam mintapéldának, ahol korábbi fúrások (F-1 és F-2) magmintái és karotázs adatai alapján a terület földtani felépítése ismert (Püspöki, 2009). Ezt a szelvényt digitalizáltam, majd előre modellezés után paraméterérzékenységi vizsgálatokat végeztem rajta.

A kutatás következő fázisában felhasználtam a diplomamunkámban [Szilvási, 2015] végzett vizsgálatok adatrendszerét, amelyben egy dunántúli zagytározó környezetében talajszennyezettségi vizsgálatok céljából végzett VESZ és GP mérések szerepeltek. A

mérések két időpontban történtek, és az adatfeldolgozás során látszólagos vezetőképesség szelvényeket állítottam elő. Az itt alkalmazott gerjesztett polarizáció jelenségét C. Schlumberger figyelte meg először 1920-ban, majd Dakhnov (1941) dolgozta fel annak elméletét. A módszer később terepen (Kearey és társai, 2002) és alkalmazásokban is megjelent, majd a környezeti vizsgálatokban is elterjedt. Az időtartományban mérhető látszólagos polarizálhatósági görbe ($\eta_a(t)$) integráltranszformációval írható le (Turai, 1981). Az időállandók növekedésével különböző polarizációs mechanizmusok (filtrációs, membrán, redox, fémes, dielektromos) különíthetők el, amelyek földtani értelmezést biztosítanak. Fancsik és társai 2021-ben új inverziós módszert fejlesztettek ki ezen mért adatok kiértékelésére. Az adatfeldolgozás során szembesültem azzal, hogy a mérési pontok önmagukban értelmezhetők, azonban a pontatlan térbeli helymeghatározás csökkenti az összehasonlíthatóság megbízhatóságát. További korlátot jelentett, hogy a GP görbe csak néhány időpillanatban került mintavételezésre, ami a részletesebb elemzéseket korlátozta. Ezért célul tűztem ki, hogy sűrűbb időbeli mintavételezéssel, több egymáshoz közeli szelvény mentén végezzek méréseket, alapot teremtve egy kvázi 2,5D-s kiértékelésnek.

A tudományos céljaimat kielégítő, korábban már mások által megvizsgált szennyezett területet választottam a méréseim elvégzéséhez. A célterület Magyarország északkeleti részén, Nyékládháza település belterületén található. Napjainkban ezt a területet részben már hasznosították egy több mint 50 000 tulipánt tartalmazó többfunkciós tulipánkert formájában, így ugyanilyen geometriával rendelkező geofizikai méréseket már nem lehetne ott megismételni vagy kiegészíteni. A 35-ös számú főút és egy vasúti szakasz határolja azt a rekultivált hulladéklerakót, amelynél a felmérések során felszín alatti hulladék és az abból esetlegesen kiszivárgott szennyezőanyagok roncsolásmentes felszínközeli vizsgálata lezajlott. Az általam korábban használt felméréseknél és mások geoelektromos leképezési kutatásainál azt tapasztaltam, hogy a mérések jellemzően egy vagy több szabálytalan nyomvonalú szelvény mentén történtek, ami nehezítette a 3D-s kiértékelést. Ugyanezt a hulladéklerakót 1997-ben Pappné Molnár és Török, valamint 1999-ben Tóth és Szabó egy-egy tudományos diákköri kutatás keretében már megvizsgálták különböző geofizikai módszerekkel. A kutatómunkám során egy geometriailag összetettebb és rendezettebb elrendezéssel megterveztem a geofizikai felmérések szelvényeinek elhelyezkedését 2016-ban, amire akkor ők is tettek hasonló javaslatokat a tanulmányaik végén. A felmérések kezdeti kiértékelései már korábban bemutatásra kerültek (Turai és Szilvási 2017; Szilvási és Turai 2018), és a mélyebb rétegek vizsgálatához az elektródák a vizsgálandó területtől távolabb is telepítésre kerültek. Ebből kifolyólag mezőgazdasági területek felett is volt

néhány szelvényt szakasz. A vizsgálati módszerek közé tartozott a multielektródás egyenáramú elektromos szondázás, amely során látszólagos fajlagos ellenállás és gerjesztett polarizációs adatok kerültek rögzítésre. Ezen mérésekhez egy 72 csatornás SYSCAL (Iris Instruments) mérőeszközt használtam. A lecsengési görbét a korábbi 4 helyett már 20 időpillanatban rögzítettem minden szelvény esetében, amelyhez ugyan több idő kellett a terepi munkavégzés során, de sokkal részletgazdagabb időállandó-spektrumot lehetett belőle előállítani.

A hulladéklerakó vizsgálata során indokoltnak tartottam mágneses mérések elvégzését is. A Föld mágneses terének tudományos igényű leírását Carl Friedrich Gauss adta meg 1834-ben, amelyben a mágneses tér forrását a Föld belsejébe helyezte, és bemutatta a magnetométer működési elvét is. Az 1950-es évektől a protonprecessziós magnetométerek elterjedése előrelépést hozott, míg a legnagyobb pontosságot ma a szupravezetés elvén működő eszközök biztosítják. Az egyik szelvény mentén GSM-19 Overhauser típusú protonprecessziós magnetométerrel (GEM System) gradiens mágneses méréseket végeztem. Nuamah és Dobróka (2019) nem egyenlő távolságközű mágneses adatok feldolgozására fejlesztett inverziós eljárása a későbbi kiegészítő mérések esetén itt is alkalmazható lehet. Yehualaw és társai (2024) a mágneses méréseket kiegészítő módszerként alkalmazták vertikális elektromos szondázással (VESZ) nyert fajlagos ellenállás adatok értelmezésében. A mért mágneses és geoelektromos paraméterek közötti kapcsolatot korrelációs mátrix és faktoranalízis segítségével vizsgáltam.

A földtani és környezetföldtani vizsgálatok során alkalmazott geoelektromos mérési adatrendszerek gyakran erősen heterogén, nem Gauss-eloszlású és kieső értékekkel terhelt adatstruktúrát eredményeznek. A felszín alatti közeg természetes inhomogenitása, a szennyezőanyag-eloszlás térbeli változékonysága, valamint a mérési zaj együttesen olyan eloszlásokat hozhatnak létre, amelyek esetében a klasszikus számtani átlag alkalmazása torzított és fizikailag félrevezető eredményhez vezethet (Huber, 1981; Hampel et al., 1986). A geofizikai adatok feldolgozásában ezért esszenciális a robusztus statisztikai módszerek alkalmazása, hogy a csoportosítások ne szubjektív módon, hanem objektív statisztikai eljárások segítségével történjenek. Ezek célja olyan helyparaméter meghatározása, amely a minta domináns viselkedését reprezentálja, miközben korlátozza a szélsőértékek túlzott befolyását (Rousseeuw & Leroy, 1987). A geotudományokban kardinális ez a megközelítés, mivel a kieső értékek nem feltétlenül mérési hibák, hanem gyakran valódi földtani jelenségek indikátorai. Steiner Ferenc dolgozta ki a leggyakoribb érték (*Most Frequent Value*, MFV) módszert, és formalizálta azt földtudományi alkalmazások számára (Steiner,

1988; Steiner, 1992). A módszert a geofizikai gyakorlatban több szerző is alkalmazta adatfeldolgozási és klaszterezési feladatokra. Szabó és munkatársai (Szabó, 2012; Szabó, Balogh & Stickel, 2018) MFV-alapú faktoranalízist alkalmaztak többparaméteres geofizikai log-adatok értelmezésére, kimutatva, hogy a módszer stabil klaszterközéppontot eredményez nem hagyományos eloszlású adatok esetén is. Többváltozós rezervoár azonosítási kutatásokban is megjelentek olyan robusztus adatfeldolgozási eljárások, amelyek az MFV-hez hasonló elven működnek (Szabó et al., 2023). A Pulse projektben végzett kutatómunkám során (2017-2021) jómagam is alkalmaztam a felhagyott szénhidrogén kutak paramétereinek az összehasonlításához az MFV módszerét (Szűcs és társai, 2022). Ezek a kutatások rámutattak arra, hogy a hagyományos átlagolási eljárásokhoz képest az MFV-alapú összesítés javítja a földtani egységek elkülöníthetőségét és a strukturális trendek stabilitását a kieső értékek hatásának csökkentésével. Megvizsgáltam a Steiner-féle MFV módszer alkalmazhatóságát vertikálisan rendezett, többparaméteres (fajlagos ellenállás és gerjesztett polarizáció) geofizikai adatrendszerek esetében, tekintettel arra, hogyan lehet az inverzió utáni térbeli pontokból egységes képet alkotni a hulladéklerakó felett. Vizsgáltam továbbá, hogy a módszer milyen feltételek mellett ad reális eredményeket, valamint, hogy az egyszerűbb fix paraméterezés vagy a Steiner-féle iteratívan újraszámolt dihézió paraméterrel működő eljárás vezet-e megbízhatóbb eredményhez. Az MFV-alapú feldolgozás eredményei 2D-s térképek formájában jelennek meg, amelyek felülnézetben jellemzik az egyes zónákat. Ezt követően olyan statisztikai eljárás alkalmazását tűztem ki célul, amely nemcsak síkbeli vetületben, hanem a mélységi koordináta megtartásával is képes a térbeli pontok jellegzetességeinek leírására és az egybefüggő anomáliák azonosítására. Ciampi és társai (2024) elektromos fajlagos ellenállási adatok alapján klaszteranalízist alkalmaztak rétegek elkülönítésére, azonban vizsgálatuk korlátozott számú szelvényre és fúróluk-adatokra támaszkodott. Hulladéklerakók esetében ilyen jellegű mintavételezés a környezeti kockázatok miatt nem alkalmazható. A saját vizsgálataim során a hét szelvény menti adatokat vetettem alá klaszteranalízisnek különböző paraméterek és klaszterszámok figyelembevételével annak érdekében, hogy meghatározzam, mely konstrukció eredményezi a legértelmezhetőbb földtani térbeli mintázatokat.

A nyékládházai összetett mérési és adatfeldolgozási munkák után szükségesnek éreztem, hogy az eddig használt módszerek némelyikét más terepi környezetben is validáljam. Meg akartam vizsgálni, hogy a hulladéklerakónál jól működő módszertan alkalmas-e más jellegű antropogén szennyeződések kimutatására is. Ezenfelül a hulladéklerakónál mágneses mérés

csak egy szelvényen történt, ahol külső antropogén hatások is akadályozták az adatgyűjtést, a további szelvényeken történő méréseknek pedig fizikai akadálya volt. Ezért célul tűztem ki egy olyan adatrendszer kialakítását, amelyben minden geoelektromos szelvény mentén mágneses adatok is rendelkezésre állnak. Ebong és társai (2021) a 2D-s fajlagos ellenállás leképezési vizsgálatokat földradar mérésekkel egészítették ki az adatok hitelesítése érdekében. Ennek hatására én is végeztem ilyen jellegű méréseket, hogy megvizsgáljam, milyen összefüggések azonosíthatók a különböző módszerek eredményei között. 2021-ben az akkori tervek szerint új hotel építését tervezték a Miskolci Egyetem campusán az E/6-os kollégium mögötti területen, az Eper utca és a Csermőkei út között, amely alkalmasnak tűnt a mérések elvégzésére. A beruházás az Európai Egyetemi Játékokhoz kapcsolódott, amelynek 2024-es megrendezési jogát a Miskolci Egyetem a Debreceni Egyetemmel közösen nyerte el. Az Egyetem más pontján zajló építkezések során többször előfordult, hogy a földben található vezetékeket véletlenül megsértették, ami azt mutatta, hogy a felszín alatti létesítményekről nem áll rendelkezésre teljes körű, naprakész térképi információ. A kutatásom egyik gyakorlati célja ezért az volt, hogy még az építési munkálatok előtt feltérképezzem az altalajt, és azonosítsam az ott található ember alkotta objektumokat. A kutatás gyakorlati kivitelezése szempontjából kedvező volt, hogy egy akkori másodéves műszaki földtudományi MSc hallgatóm, Denis Silas Nkwabi TDK dolgozatot készített. A témavezetésemmel elkészített munka később diplomadolgozattá bővült (Nkwabi, 2022). Az így nyert adatrendszerre támaszkodva a doktori kutatásomban a korábbi eredményeket kiegészítettem az általam alkalmazott adatfeldolgozási, statisztikai és ábrázolási módszerekkel, valamint a különböző paraméterek közötti, általam bevezetett összefüggések alkalmazásával, amelyek megkönnyítik a komplex értelmezést. A kutatás részeként a hagyományos geodéziai módszerekkel előállított terepmodell mellett lézerszkennel (LiDAR eszközzel) is elkészítettem a domborzatmodellt. A terület későbbi átalakítása miatt közvetlen felületi összehasonlításra már nem volt lehetőség, azonban a két technológia összevetésével értékelni tudtam azok előnyeit és korlátait. Korábbi vizsgálataim (Szilvási és társai, 2023) alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a jövőbeli geofizikai mérésekhez a lézerszkennelés alkalmazása indokolt, amelyhez a szükséges előkészítő vizsgálatokat jelen kutatás során végeztem el. A doktori kutatás során ezért arra törekedtem, hogy a geofizikai, térinformatikai és statisztikai megközelítéseket egységes értelmezési rendszerbe illesszem, és alkalmazhatóságukat eltérő környezeti problémákon keresztül vizsgáljam meg.

2. Elméleti összefoglaló

2.1 Egyenáramú geoelektromos mérések

Az egyenáramú geoelektromos mérések a dolgozatban alkalmazott integrált feldolgozási és értelmezési rendszer alapját képezik. A mért látszólagos fajlagos ellenállás adatok szolgáltatják azt az elsődleges fizikai paramétermezőt, amelyre az inverziós, szeletelési és statisztikai feldolgozási lépések egymásra épülnek. A mérési geometria és az elektródaelrendezés megválasztása közvetlen hatással van a későbbi feldolgozási lépések eredményeire, ezért ezek szerepe nemcsak mérési, hanem módszertani szempontból is meghatározó.

Megkülönböztetünk aktív, illetve passzív gerjesztésű módszereket annak függvényében, hogy a méréshez szükséges tápláló energiát, mi magunk nyújtjuk és szabályozzuk, vagy külsőleg létrejött elektromágneses terek által generált mért jelekkel dolgozunk. A méréseknél felhasznált gerjesztő áram lehet egyen- és váltóáram is. Az utóbbival lehet időtartományban, illetve frekvenciatartományban is szondázni.

Az egyenáramú geoelektromos méréseket olyan alacsony frekvenciás mérőárammal végzik, melyek hatásukban még egyenáramúnak tekinthetők. A látszólagos fajlagos ellenállás azon homogén és izotróp féltér tényleges fajlagos ellenállásával egyenértékű, amely az adott elektródaelrendezés és betáplált áram mellett ugyanazt a potenciálkülönbséget eredményezné a mérőelektródák között, mint a terepi mérés során. Az egyenáramú fajlagos ellenállás-mérések során több elektródát használunk, amelyek galvanikus összeköttetést teremtenek a talaj és a mérőrendszer között. Az elektródák egy részét a tápáram talajba vezetésére használjuk, és a többivel pedig mérjük a kialakuló feszültségkülönbséget. Ezekből a látszólagos fajlagos ellenállás a következőképpen számolható:

$$\rho_a = k \frac{\Delta U}{I} \quad (1)$$

ahol ρ_a - a látszólagos fajlagos ellenállás [Ωm],

ΔU - a mérőelektródák közötti feszültségkülönbség [V],

I - a tápalektródákon keresztül folyó áram [A],

k - az elektródák elhelyezkedésétől függő geometriai tényező.

A behatolási mélység az elektróda-elrendezéstől és a kutatott térrész valódi fajlagos ellenállás kontrasztjától függően a terítéshossz 10-30%-a. Ha pl. a tápalektródák távolsága 5 m, akkor a behatolási mélység kb. 0,5-1,5 m. Ezen módszerek tehát szignifikáns fajlagos ellenállás-különbségekkel jellemezhető földtani szerkezetek és mesterséges objektumok

kutatására használhatók (Szalai és társai, 2009). A vertikális elektromos szondázás (VESZ) esetén a függőleges irányú változásaira vagyunk kíváncsiak a mért fajlagos ellenállásnak, amely különböző vastagságú és eltérő típusú kőzetek eredménye. A tápelektrodák távolságának a növelésével egyre mélyebb rétegeken keresztül halad az áram. Az elérhető maximális mélység a gyakorlat szerint a maximális AB távolság fele, harmada, negyede, ötöde is lehet a különböző szituációk függvényében. A mért látszólagos fajlagos ellenállásokat log-log skálán ábrázoljuk az $AB/2$, illetve az $AB/4$ távolság függvényében.

A multielektrodás módszer (Dahlin és Bernstone, 1997) esetében egyszerre több mérésre alkalmas elektródát telepítünk, miközben kábeleken keresztül összeköttetésben állnak egy központi számítógéppel. A mérésbe bevonni kívánt 4-4 elektródát pedig a számítógép választja ki. Így gyakorlatilag az összes lehetséges kombinációban történik mérés, ami egy 72 elektródás elrendezés esetén több száz darabot (Wenner esetén 744 db) jelent. Tulajdonképpen sok egymáshoz közeli mérés telepítését vonjuk össze, majd egyszerre indítjuk el azokat. Ezáltal munkát és időt spórolunk, nem beszélve az adatfeldolgozásról is. Végeredményben egy vertikális sík mentén alakulnak ki a vonatkoztatási pontok, amikre a mért eredményeket ki lehet vetíteni. A VESZ-hez képesti hátránya az, hogy a maximális behatolási mélységet korlátozza, hogy mennyi elektródát telepítettünk és mekkora az azok közti távolság.

A multielektrodás mérési elrendezésekből származó sűrű adatlefedettség megkönnyíti a későbbi inverziós feldolgozást és a térbeli értelmezést. A dolgozat további fejezeteiben ezekre az adatokra építve kerül sor a topográfiával korrigált szeletelésre, valamint a többparaméteres statisztikai értelmezésre.

2.2 Különböző megvizsgált elektródaelrendezések bemutatása

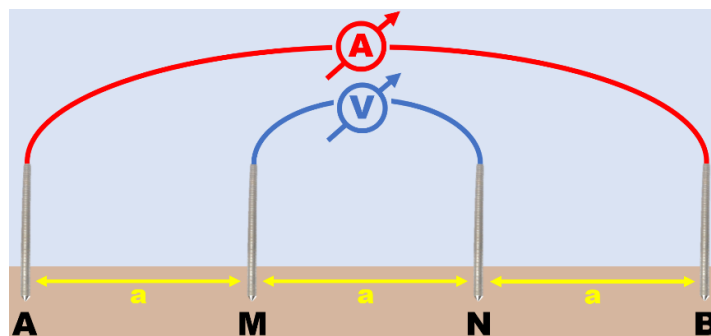
A különböző elektródaelrendezések alkalmazása a dolgozatban nem önálló vizsgálati lépésként jelenik meg, hanem a mérési adatok információtartalmának növelését szolgálja. Az eltérő geometriai konfigurációk különböző érzékenységgel reagálnak a felszín alatti szerkezetekre, ezért azok együttes alkalmazása hozzájárul a későbbi inverziós és statisztikai feldolgozások stabilitásához és megbízhatóságához, főképp heterogén, többirányú változásokat mutató környezetben.

A szakirodalom alapján az elektródaelrendezések közül a nagyobb behatolási mélységet a Schlumberger elrendezés biztosítja. A legkedvezőbb horizontális (szelvény menti) felbontóképességet a dipól-dipól elrendezés adja, míg vertikálisan (mélység szerint) a Schlumberger elrendezés (Kearey et al, 2002). A mérések feldolgozását inverziós

programokkal végezzük. Lehetőségünk van a különböző elektróda-elrendezéseket együttesen kezelni, és meghatározni a mérés behatolási mélységéig terjedő térrészben a valódi fajlagos ellenállás viszonyokat. A világon már létezik több tucat típusú elektródaelrendezés (Szalai és társai, 2009), mindegyik különböző előnyös tulajdonságokkal rendelkezik különböző szituációkban. Én ezek közül 4 db olyan elrendezést választottam ki, amelyeket az általam használt mérőműszer is képes kivitelezni, és amelyek eltérő érzékenységi tulajdonságaik révén kiegészítik egymást a vizsgált területek felett, valamint a terepen történő nem túl komplikált telepítési munkákat is figyelembe vettem.

2.2.1 Wenner-alfa

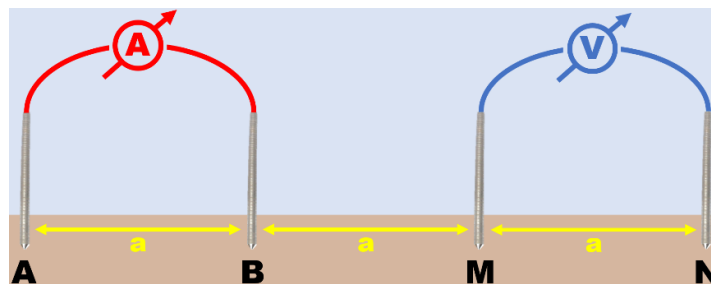
Ebben az elektródaelrendezésben (1. ábra) az elektródák egyenlő távolságra vannak, és az az egész szelvényt ennek az összeállításnak a folyamatos eltolásával mérjük le. A vertikális változásokra érzékeny ez a módszer, pl. zavartalan üledékes rétegsor, de relatíve rosszul mutathatók ki vele horizontális változások, mint pl. vetők. A többi elrendezéshez képest közepes behatolású. (Loke, 2000)



1. ábra: Wenner-alfa elrendezés (A-B: adó elektródák, M-N: vevő elektródák) (szerző saját szerkesztése)

2.2.2 Wenner-béta

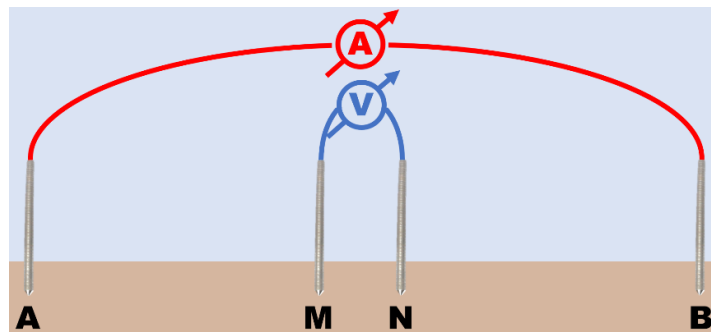
Ez az elrendezés (2. ábra) hasonlít a Wenner-alfához abban, hogy egyenlő távolságra helyezkednek el az elektródák (A-B-M-N) egymástól, azonban az elektródák sorrendje a dipól-dipól elrendezéssel egyezik meg.



2. ábra: Wenner-béta elrendezés (A-B: adó elektródák, M-N: vevő elektródák) (szerző saját szerkesztése)

2.2.3 Wenner-Schlumberger

A Wenner és a Schlumberger elrendezések hibridje ez az elrendezés (3. ábra). A Schlumberger elrendezésből vette át, hogy a vevők (M-N) távolsága rögzített. Az adók (A-B) távolságát az M-N távolság egész számú többszöröseire növeljük a mérés előrehaladtával. Közepesen érzékeny a horizontális és a vertikális szerkezetekre egyaránt. Azokon a területeken, ahol mindkét fajta geológiai szerkezet várható, ott jó kompromisszum érhető el a Wenner és a dipól-dipól elrendezések között vele. A közepes behatolási mélység 10%-kal nagyobb a Wennerénél, viszont ezáltal gyengébb is a jelerőssége, de a dipól-dipólnál még így is nagyobb. (Loke, 2000)



3. ábra: Wenner-Schlumberger elrendezés (A-B: adó elektródák, M-N: vevő elektródák) (szerző saját szerkesztése)

2.2.4 Dipól-dipól

A két adó (A, B) és a két vevő (M, N) között egyforma a távolság (4. ábra), de az adó- és a vevőpár közti távolságot folyamatosan növelem a mérés alatt. Ez a módszer nagyon érzékeny a horizontális változásokra, de relatíve érzéketlen a vertikális változásokra. Hátránya lehet viszont, ha túl messze van a két elektródapár egymástól, akkor gyenge jelet kapunk végeredményül. (Loke, 2000).



4. ábra: Dipól-dipól elrendezés (A-B: adó elektródák, M-N: vevő elektródák) (szerző saját szerkesztése)

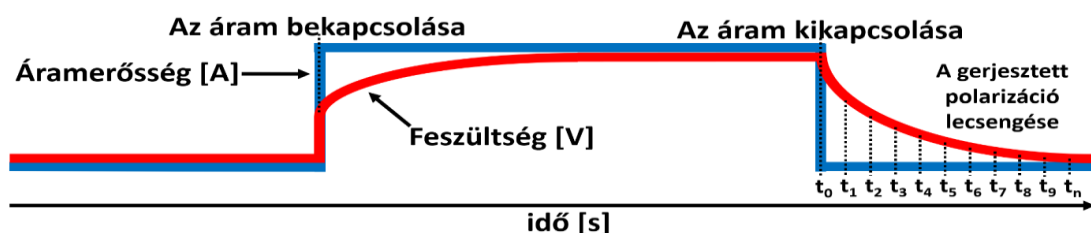
A különböző elektródaelrendezések eltérő érzékenységi tulajdonságai biztosítják, hogy ugyanazon terület több szempontból is vizsgálható legyen. Az így nyert adatok együttes feldolgozása az inverzió során növeli a rekonstruált fajlagos ellenállás modell megbízhatóságát, és alapot szolgáltat a későbbi térbeli és statisztikai értelmezésekhez.

2.3 A gerjesztett polarizáció fizikai mechanizmusai

A gerjesztett polarizáció (GP), más néven indukált polarizáció (*Induced Polarization*, IP) mérések a dolgozatban alkalmazott integrált értelmezési rendszer második alapvető paraméterezőjét adják a fajlagos ellenállás mellett. Míg az elektromos ellenállás elsősorban a közeg vezetőképességi viszonyait írja le, addig a GP-paraméterek az elektrokémiai és pórusszerkezeti tulajdonságokra is érzékenyek. A két paraméter együttes értelmezése megkönnyíti a felszín alatti anomáliák komplexebb és megbízhatóbb azonosítását.

2.3.1 Időtartománybeli GP és TAU-transzformáció

A GP módszer az alkalmazott geofizika egyik klasszikus, ugyanakkor napjainkban is aktívan fejlődő eszköze. Az eredetileg érc kutatáshoz kifejlesztett módszert sikerült az időtartománybeli mérés TAU-transzformációs feldolgozása segítségével a környezetvizsgálatok területén is sikeresen alkalmazni. A szennyezett területeknél kritikus, hogy roncsolásmentes technikát alkalmazzunk, mint a GP, amellyel gyorsan nagy területek mérhetők és anomáliák detektálhatók. A módszer azon a fizikai jelenségen alapul, hogy amikor a tápelektrodákon bevezetett áramot kikapcsoljuk, akkor a mérő elektrodákon nem tűnik el azonnal a mért feszültség, csak fokozatosan egy rövid idő múlva. Az időtartománybeli GP esetében minél több időpillanatban szükséges rögzíteni a feszültséget (5. ábra), hogy a lecsengés részletes elemzésével a különböző polarizációs hatások típusára és nagyságára becslést tudjunk adni.



5. ábra: A gerjesztett polarizáció jelensége (szerző saját szerkesztése)

A környezetszennyezés mértékét és típusát lehet jellemezni az időálló-spektrummal, amely számos szennyezett terület vizsgálatánál sikeresen működött már. A GP-jelenség időtartományú mérései nem csupán a közeg vezetőképességéről, hanem annak elektrokémiai, pórusszerkezeti és felületi tulajdonságairól is információt hordoznak. A mért időfüggő polarizálhatósági görbék azonban összetett folyamatok eredőjeként jelennek meg, ezért közvetlen értelmezésük gyakran nehézkes. A probléma kezelésére lett bevezetve a TAU-transzformáció fogalma (Turai, 1981), amely az időtartományú GP-görbéket időálló-spektrum formájában írja le. A megközelítés kiváltképp alkalmas arra, hogy a

GP-adatokat inverz problémaként kezelje, és a mért görbék mögött álló relaxációs folyamatokat kvantitatív módon jellemezze. Jelen munkában egy ilyen elven működő, MATLAB-környezetben írt általános sorfejtéses inverziós eljárás (Turai és Dobróka, 2001; Turai és Dobróka, 2011) gyakorlati alkalmazását mutatom be, amely a TAU-transzformációt nem közvetlen spektrumként, hanem súlyozott spektrális paraméterek (*Weighted Amplitude Value*, WAV) formájában állítja elő. A célom nem a matematikai lépések részletezése, hanem annak bemutatása, hogy az alkalmazott szoftver milyen elvi lépések mentén dolgozza fel a GP-idősorokat, milyen fizikai jelentésű paramétereket becsül, és ezek hogyan használhatók fel térbeli (horizontális és vertikális) szelvények értelmezésére.

Az időtartományú GP-mérések során a primer áram kikapcsolását követően a feszültség lecsengése kerül rögzítésre meghatározott időablakokban. Az így kapott (2) egyenletben látható polarizálhatósági görbe ($\eta_a(t)$) szigorúan monoton csökkenő jellegű, amely matematikailag egy időállandó-függvény integráljaként írható fel. A TAU-transzformáció lényege az, hogy ezt az időfüggést egy időállandó-térben értelmezett spektrumra ($\omega(\tau)$) bontja, ahol az egyes időállandók (τ) különböző fizikai és kémiai folyamatokhoz rendelhetők.

$$\eta_a(t) = \int_0^\infty \omega(\tau) e^{-\frac{t}{\tau}} d\tau \quad (2)$$

ahol t - a gerjesztés kikapcsolásától eltelt idő,
 τ - a polarizáció időállandója,
 $\omega(\tau)$ - az időállandó-spektrum.

A gyakorlatban azonban a folytonos spektrum közvetlen meghatározása instabil inverz feladatot jelentene, ezért a módszer diszkretizált formában kerül alkalmazásra. Az időállandó-tartományt véges számú intervallumra osztjuk, és feltesszük, hogy az egyes intervallumokhoz rendelhető egy jellemző spektrális amplitúdó, amely az adott relaxációs tartományban aktív polarizációs folyamatok összesített hatását reprezentálja. Ez a megközelítés vezet el a WAV-paraméterek fogalmához, amelyek nem a spektrum lokális sűrűségét, hanem annak súlyozott, integrált értékét adják meg egy adott időállandó-sávban. Ennek nagy előnye, hogy az így kapott paraméterek robusztusabbak, jobban összehasonlíthatók térben, és közvetlenül alkalmasak szelvényes ábrázolásra. A WAV-paraméterek így közvetlenül beépíthetők a későbbi többparaméteres statisztikai feldolgozásba, ahol a fajlagos ellenállás adatokkal együtt kerülnek értelmezésre. Ez a diszkretizált reprezentáció garantálja, hogy a GP-idősorokból származtatott paraméterek összehasonlítható formában jelenjenek meg a különböző szelvények mentén, és integrálhatók legyenek a további feldolgozási lépésekbe.

2.3.2 Polarizációs típusok földtani értelmezése

A különböző polarizációs típusok elkülönítése kulcsfontosságú a GP-adatok földtani és környezetföldtani értelmezésében, mivel az egyes mechanizmusok eltérő fizikai folyamatokra és így eltérő típusú anomáliákra utalnak. A kőzetek rétegeiben többféle polarizáció jöhet létre többek között: filtrációs, membrán, elektrokémiai (redox) és fémes. Ezeket el lehet különíteni úgy, hogy a terepi mérések adataiból kiszámolt időállandó-spektrumokat osztályozzuk nagyságuk szerint. Az időállandó értékek eloszlása alapján a polarizáció típusa becsülhető (Turai, 2004), és ezeknek a földtani okait az 1. táblázatban mutatom be.

1. táblázat: A polarizáció típusa és a polarizáció földtani okai (szerző saját szerkesztése)

A polarizáció típusa	A polarizáció földtani okai
filtrációs polarizáció	Elektromosan vezető fluidumot tartalmazó porózus talajok és kőzetek.
membrán polarizáció	Víz és diszperz agyagszemcséket tartalmaz porózus talajok és kőzetek.
redox (elektrokémiai) polarizáció	Oxidatív, vagy redukzív hatású kémiai szennyezések.
fémes (fémoldatos) polarizáció	Fémesen vezető anyagok ionosan vezető fluidumot tartalmazó kőzetekben.

A membránpolarizáció jelensége porózus közegben is kialakulhat, amennyiben a pórusokat negatív felületi elektromos töltéssel rendelkező ásványszemcsék töltik ki. Az ilyen szemcsék (például az agyagásványok) elektrosztatikus vonzás révén magukhoz vonzzák az oldatban lévő kationokat, melynek következtében pozitív töltésű, diffúz elektromos kettősréteg alakul ki a szemcsfelület környezetében. Külső elektromos tér alkalmazásakor a szabad ionok az elektromos tér irányába kezdenek elmozdulni. Amennyiben azonban a kialakult ionos réteg vastagsága meghaladja a pórus átmérőjét, az ionmozgás akadályozottá válik. Ebben az esetben az agyagszemcse kvázi-membránként viselkedik, amely a pórus egyik oldalán pozitív ionakkumulációt, míg a másik oldalán negatív iontöbbletet eredményez. Ez az ioneloszlásbeli aszimmetria vezet a membránpolarizáció kialakulásához.

A fémes/fém sós (elektroda) polarizáció akkor alakul ki, amikor elektromosan vezető ásványi szemcse ionos oldattal érintkezik, és az elektromos tér változásának hatására elektrokémiai kölcsönhatás jön létre a két fázis határfelületén. Az elektrokémiai reakciók elsődlegesen a szemcse és az oldat közötti felületen zajlanak. A természetben ez a jelenség elsősorban a legtöbb szulfidásvány esetében figyelhető meg.

Számos szennyezett terület vizsgálatakor arra a következtetésre lehetett jutni (Turai, 2004; Turai, 2011), hogy a kisebb időállandóval ($\tau < 1\text{sec}$) jelentkező komponensek a

környezetszennyezés szempontjából veszélytelen filtrációs és membrán polarizációkhoz köthetők, melyeket a talaj elektromosan vezető fluidum tartalma, valamint a diszperz agyagtartalma okoz. Viszont az elektrokémiai és fémes hatások okozta redox és fémes (szabad elektronokat tartalmazó fémoldatos) polarizáció jelenléte környezetszennyező anyagokra utal, és a nagyobb időállandójú ($\tau > 1\text{sec}$) tartományban jelentkezhetnek.

A különböző időállandó-tartományokhoz köthető polarizációs mechanizmusok elkülönítése lehetőséget nyújt, hogy a GP-adatok ne csupán kvalitatív jelzésként, hanem kvantitatív értelmezési paraméterként jelenjenek meg. A dolgozatban ezek az információk a fajlagos ellenállás adatokkal együtt kerülnek feldolgozásra, és alapot szolgáltatnak a későbbi statisztikai és klaszteranalízis alapú térbeli értelmezéshez.

2.4 A mágneses mérések elméleti háttere

A mágneses mérések a dolgozatban alkalmazott integrált értelmezési rendszer kiegészítő információforrását jelentik. Míg a geoelektromos mérések elsősorban a közeg elektromos és elektrokémiai tulajdonságait jellemzik, addig a mágneses módszer elsősorban a mágnesezhető, illetve fémes eredetű objektumok kimutatására alkalmas. A két módszer együttes alkalmazása lehetőséget biztosít a különböző fizikai tulajdonságokhoz köthető anomáliák elkülönítésére és megerősítésére. A mágneses indukció SI mértékegysége a *tesla* [*T*], a geofizikai gyakorlatban azonban ennek 10^{-9} része, a *nanotesla* [*nT*] használatos, amely numerikusan megegyezik a korábban alkalmazott gamma egységgel.

A Föld felszínén mérhető mágneses tér nemcsak térben, hanem időben is változik. Ezek a változások lehetnek periodikusak (mint a napi vagy 27 napos ciklusok), illetve szabálytalanul jelentkezők, mint például a mágneses viharok. A napi ingadozások fő forrása az ionoszféra, ahol a napsugárzás hatására kialakuló ionizáció horizontális elektromos áramokat generál. A napi változás közepes földrajzi szélességeken jellemzően $\sim 50\text{ nT}$ nagyságrendű, amely az évszaktól, a földrajzi szélességtől és a napsugárzás intenzitásától függően változik, és a mágneses egyenlítő közelében ennél nagyobb lehet.

A fokozott naptevékenység (amely hozzávetőleg 11 éves ciklusokban jelentkezik) megnöveli a Napból kilökődő töltött részecskék számát és energiáját. Ezek a részecskék a magnetoszférában gyűrűáramokat hoznak létre, amelyek akár $100\text{--}1000\text{ nT}$ nagyságú mágneses térváltozást is okozhatnak a Föld felszínén. Az ilyen erős, gyors változásokat mágneses viharoknak nevezzük. Ezek zavarhatják a navigációt, túlterhelhetik az elektromos rendszereket, és mérések szempontjából kedvezőtlenek, mivel a természetes változások elnyomhatják a keresett jeleket. A geofizikai gyakorlatban ezért bázisállomáson mért időbeli

változásokkal korrigáljuk a regionális méréseket. A napi mágneses változást a vizsgált mérési terület egészére azonosnak tételezzük fel, így ezt a hatást minden mérési pontra korrekció formájában kell alkalmazni. Amennyiben két magnetométer áll rendelkezésre, az egyiket állandó helyen, bázisállomáson kell működtetni, míg a másik, mozgó műszerrel a terepi mérési pontokon végezzük az adatgyűjtést. A mozgó állomáson minden mérés időpontját pontosan dokumentálni szükséges. Ha csak egyetlen műszer áll rendelkezésre, akkor a bázisállomást rendszeres időközönként ismételten fel kell keresni, hogy a mágneses tér időbeli változását megfelelő időbeli felbontással mintavételezni tudjuk. A bázismérésekből származó időbeli változásokat az egyes mérési pontokra a rögzített mérési időpontok alapján kell interpolálni. A bázisállomás használata abban az esetben esetleg mellőzhető, ha a vizsgált terület egy működő mágneses obszervatórium körülbelül 100 km-es körzetében található, mivel ebben az esetben az obszervatóriumi adatok felhasználhatók a szükséges időbeli korrekcióhoz. A méréseim során egyetlen műszer állt rendelkezésre, ezért a bázisállomáson rendszeresen ismételt mérésekkel határoztam meg az időbeli változásokat, és ezek alapján időarányos korrekciót alkalmaztam a szelvény menti adatokra. A napi és annál gyorsabb időbeli mágneses térváltozások nem a földkéregből, hanem a földi környezet külső régióiból, elsősorban a magnetoszférából és az ionoszférából származnak. Ezért a kis amplitúdójú, földtani eredetű anomáliák megbízható kimutatásához elengedhetetlen, hogy a mérések nyugodt geomágneses körülmények között történjenek. Mágneses viharok idején a jel/zaj viszony drasztikusan romlik, ezért az ilyen időszakokban végzett mérések információ értéke minimális.

A terepi mágneses mérések megtervezésekor alapvető fontosságú, hogy a mérőpontok közötti távolság ne haladja meg a vizsgált jelenség hatómélységének felét. Ez biztosítja, hogy a térképezett mágneses anomáliák megfelelő felbontással legyenek ábrázolhatók, és ne veszítsünk információt a mélyebben elhelyezkedő forrásokról. A nyékládházi mérésnél 2,5 méterenként mintavételeztem, a miskolcinál pedig 1 méterenként. A mágneses geofizikai módszereknek nemcsak földtani célú, hanem számos egyéb alkalmazási területe is ismert. A módszer hatékonyan alkalmazható például eltemetett fémes objektumok (fémhordók, tartályok, aknák, gépjárművek vagy föld alatti acélcsövek) kimutatására, elsősorban vertikális és horizontális gradiensmérések segítségével. A mágneses módszer jól alkalmazható kommunális hulladéklerakók lehatárolására is, amennyiben azok a környezetüknél nagyobb mágneses szuszceptibilitású anyagokat, például fémtartalmú hulladékot tartalmaznak. Ez releváns a dolgozatban vizsgált antropogén eredetű területek

esetében, ahol a mágneses anomáliák közvetlen információt adhatnak a geoelektromos mérésekkel detektált szerkezetek eredetéről.

A méréseimnél használt protonprecessziós magnetométerek működési elve a hidrogénatomok protonjaihoz kapcsolódó mágneses momentumok precesszióján alapul, amelynek frekvenciája a földi mágneses tér abszolút értékével arányos. Gerjesztés nélküli állapotban a protonok mágneses momentumai a mérőedényben lévő folyadékban a földi mágneses tér irányával párhuzamosan vagy antiparallel módon orientálódnak. Amikor a tartályt körülvevő gerjesztő tekercsbe egyenáramot vezetünk, a létrejövő mesterséges mágneses tér (amely több mint százszorosa a földi mágneses térnek) átrendezi a protonok mágneses momentumait saját irányába. Miután a gerjesztő áramot lekapcsoljuk, a protonok mágneses momentumai a földi mágneses tér körül kezdenek precesszálni. Ez a mozgás elektromos feszültséget indukál a tekercsben, és a keletkező jel frekvenciája közvetlenül mérhető. A precessziós frekvencia lineárisan arányos a földi teljes mágneses tér abszolút értékével, így a műszer ezt az értéket jeleníti meg. Ebből következik, hogy a mágneses tér meghatározásának pontossága elsősorban a frekvenciamérés precizitásától függ.

A mágneses mérések így a dolgozatban nem önálló értelmezési módszerként, hanem a geoelektromos eredmények kiegészítő és ellenőrző információforrásként jelennek meg, hozzájárulva a komplex értelmezési rendszer bizonytalanságának csökkentéséhez.

2.5 A földradar módszer jellemzése és az adatfeldolgozás lépései

A földradar (*Ground Penetrating Radar*, GPR) módszer a dolgozatban alkalmazott integrált értelmezési rendszer kiegészítő, nagy felbontású sekélymélységi információforrását jelenti. Míg a geoelektromos és mágneses mérések elsősorban fizikai paraméterek térbeli változását írják le, addig a GPR közvetlenebb geometriai képet ad a felszínközeli réteghatárokról és objektumokról. A módszer alkalmazása így lehetőséget biztosít az egyes anomáliák pontosabb térbeli elhelyezésére és a különböző geofizikai eredmények összevetésére.

A GPR módszert elsőként Stern használta 1929-ben geofizikai kutatásokra egy gleccser vizsgálatánál. Azóta széles körben alkalmazzák sekélygeofizikai kutatásoknál, mint például üregkutatás, talajvízszintmérés, régészeti kutatások, vezetékek/csövek kutatása, útvizsgálatok és jégkutatás. A módszer adatfeldolgozása a szeizmikus adatokéhoz hasonlít a hullámtulajdonsága alapján, de nem rugalmas-, hanem elektromágneses hullámterjedésen alapul. Az antenna által kibocsátott nagyfrekvenciájú (100 MHz – 3 GHz) elektromágneses hullámok a levegőben közel fénysebességgel terjednek, és optikailag átlátszatlan anyagokba is behatolva a réteghatárokról visszaverődnek. Az optikai törvények (visszaverődés, törés,

refrakció stb.) ennél a módszernél is igazak, mivel elektromágneses hullámokról van szó. Az adóantenna mellett egy vevőantenna is tartozik a műszerhez, amely rögzíti a beérkező jeleket, amik visszaverődtek a módszerre érzékeny réteghatárokról. A jel kibocsájtása és visszaérkezése között eltelt idő is rögzítésre kerül a hullám amplitúdójával egyetemben. Az elektromágneses hullám különböző sebességgel halad keresztül a különböző anyagú rétegeken (2. táblázat), amiből ki lehet számolni a rétegvastagságokat. Az ilyen magas frekvencián főként a dielektromos állandó (ϵ) határozza meg a hullám viselkedését. Az édesvíznek kiemelkedően magas ez az értéke, amire nagyon érzékeny a módszer.

2. táblázat: A földradarhoz kapcsolódó anyagparaméterek (Reynolds, 2011)

Anyag	EM hullám-sebesség v [m/ns]	Elektromos vezetőképesség σ [mS/m]	Dielektromos állandó ϵ [F/m]	Csillapítás α [dB/m]
Levegő	0,3	$5 \cdot 10^{-12}$	1	0
Édesvíz	0,033	0,02 - 2	81	0,1
Száraz homok	0,13 - 0,15	0,14	3 - 5	0,01 - 0,03
Nedves homok	0,05	6	20 - 30	0,3 - 3
Agyag	0,06	100	5 - 40	1 - 300
Mészkö	0,12	0,5 - 2	4 - 8	0,4 - 2
Gránit	0,12	0,01 - 1	7	0,8
Beton	0,13	2	7	1,3
Aszfalt	0,15	0,01	3 - 4	0,01

A különböző anyagparaméterekből adódó hullámterjedési különbségek biztosítják a felszínközeli szerkezetek nagy felbontású leképezését, amely a dolgozatban a geoelektromos és mágneses mérések eredményeinek kiegészítő értelmezését szolgálja.

A behatolási mélységet befolyásolja a kibocsájtott hullám frekvenciája is a közetek tulajdonságain kívül. A hullám frekvenciájának növelésével nagyobb felbontás, de kisebb behatolási mélység érhető el. Ezért fontos még a mérés elvégzése előtt kiválasztani a megfelelő frekvenciájú antennát a megfelelő eredmények elérése céljából. A reflexió (R) a két réteg elektromágneses impedancia (Z) kontrasztjától függ (3), és annál jobb lesz, minél nagyobb az érintkező közetek dielektromos állandói közötti különbség:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \approx \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad (3)$$

Ez azt jelenti, hogy a GPR kimondottan érzékeny a réteghatárok és anyagváltások kimutatására, így alkalmas a geoelektromos mérések által jelzett anomáliák geometriai pontosítására.

Az adatfeldolgozást a szabad hozzáférésű MATGPR R2 szoftverrel végeztem (Tzanis, 2010), amely MATLAB környezetben működő, fejlett matematikai háttérű feldolgozóeszköz. Bár nem kereskedelmi szoftver, a GPR adatok feldolgozására jól használható eszköz. A jel amplitúdójának erősítése a beérkezési idejétől függ. Minél később ér vissza egy jel annál jobban fel kell erősíteni, hiszen több idő alatt, több utat tesz meg és eközben jobban csillapodik a közetekben/anyagokban. Ez a folyamat egyes esetekben már a mérés közben megtörténik a mérőműszer által és úgy kapjuk a kész jelalakunkat. Ez sokszor előnyös, hogyha azonnal, a helyszínen kellene az információk, rögtön a mérés után, viszont az a hátránya, hogy lehetetlenné teszi az adatok későbbi más jellegű feldolgozását. Az így feldolgozott radargrammok elősegítik a felszínközeli szerkezetek részletes geometriai értelmezését, amely a dolgozatban a geoelektromos és mágneses mérésekből származtatott anomáliák térbeli pontosítását és értelmezésének megerősítését szolgálja.

2.6 A paraméterérzékenység vizsgálata

A különböző elektródaelrendezések egyszerűen összehasonlíthatók paraméterérzékenység szerint, ha a réteg paramétereinek megváltozásából eredő fajlagos ellenállás-változást vizsgáljuk (4). Azt az elrendezést tekinthetjük a legkedvezőbbnek, amely a legnagyobb érzékenységet mutatja. A kapcsolatot a fajlagos ellenállás (ρ) és a paraméter (M) megváltozása között a következő egyenlet írja le (Gyulai, 1989):

$$\Psi = \frac{\Delta \rho}{\Delta M} * \frac{M}{\rho} \quad (4)$$

A tapasztalatok alapján akkor kapunk megbízható közelítést, ha a vizsgált paramétereket körülbelül 1%-kal változtatjuk meg. Ennél kisebb változtatás esetén a hatás nehezen kimutatható, és numerikus problémák is jelentkezhetnek, míg túl nagy változtatás esetén a modell torzul. A paraméterérzékenység vizsgálata során általában kétféle megközelítés alkalmazható: a rétegek vastagságának vagy a rétegek fajlagos ellenállásának megváltoztatása.

A jelen kutatásban ez a vizsgálat alapvető szerepet játszott az optimális elektródaelrendezések kiválasztásában, valamint annak meghatározásában, hogy az egyes konfigurációk milyen mértékben képesek érzékelni a vizsgált, gyakran gyenge kontrasztú antropogén anomáliákat. Ez a lépés közvetlenül hozzájárul a későbbi inverziós és interpretációs eredmények megbízhatóságának növeléséhez. Ezáltal a mérési rendszer már a tervezési fázisban a vizsgálati célhoz optimalizálható.

2.7 A leggyakoribb érték (MFV) módszere

A Steiner-féle leggyakoribb érték módszer (*Most Frequent Value*, MFV) olyan iteratív súlyozási eljárás, amely az adattartomány leggyakoribb értékét, pontosabban a minta legsűrűbb tartományának középpontját (M) határozza meg (Steiner, 1992). A módszer alkalmazása kifejezetten indokolt a jelen kutatásban, mivel a geoelektromos adatok gyakran nem normális eloszlásúak, valamint kieső értékeket is tartalmaznak, amelyek a hagyományos átlagolási eljárásokat torzíthatják. A modellparaméterek térbeli simaságának szabályozására súlyfüggvényt alkalmazunk, amely a paraméterek közötti távolság függvényében határozza meg az egymásra gyakorolt befolyás mértékét. A súlyfüggvény csökkenő karakterű, így a közelebbi paraméterek nagyobb, a távolabbiak kisebb súllyal járulnak hozzá a regularizációs taghoz. A súlyozás matematikai alakja összhangban van a geostatistikában alkalmazott térbeli korrelációs függvényekkel, ahol a súly a pontok közötti euklideszi távolság függvénye. Ez biztosítja, hogy az inverzió során a modell lokális szerkezete kontrollált módon, fizikailag értelmezhető térbeli kapcsolat mentén alakuljon ki.

A módszer alapja egy súlyozott átlag, ahol az egyes mintaelemek súlya a becsült helyparamétertől való távolságuk függvényében csökken (5).

$$M_{j+1} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_{j+1}^2}{\varepsilon_{j+1}^2 + (x_i - M_j)^2} x_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_{j+1}^2}{\varepsilon_{j+1}^2 + (x_i - M_j)^2}} \quad (5)$$

Az eljárás egyik kulcseleme a súlyfüggvény szélességét meghatározó dihézió paraméter (ε), amely meghatározza az adathalmaz érzékenységi tartományát (6). A Steiner-féle MFV sajátossága az, hogy az ε fixen is kezelhető, illetve minden iterációs lépésben újraszámítható, ami eltérő konvergálási tulajdonságokat és földtani jelenségek kiemelésére való érzékenységet eredményez:

$$\varepsilon_{j+1}^2 = \frac{3 \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - M_j)^2}{[\varepsilon_j^2 + (x_i - M_j)^2]^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{[\varepsilon_j^2 + (x_i - M_j)^2]^2}} \quad (6)$$

Az iteráció során alkalmazott súlyfüggvény hatása szemléletesen úgy értelmezhető, hogy az egyes adatpontok hozzájárulása a becsült paraméterhez az aktuális becsléstől való távolságuk függvényében változik. Az iteráció előrehaladtával a sűrűsödési centrumhoz közelebb eső értékek egyre nagyobb súlyt kapnak, míg a távolabbi, kieső jellegű adatok

hatása fokozatosan csökken. Ennek eredményeként a módszer robusztusan képes kiemelni a domináns értéktartományt, miközben mérsékli a hagyományos átlagolás torzító hatását. A robusztus statisztikai megközelítések napjainkban is aktív kutatási területet jelentenek, kiváltképpen zajjal terhelt geofizikai adatok feldolgozásában (Maronna és társai., 2019).

Az MFV módszer előnye az aritmetikai átlaggal szemben, hogy robusztus a kieső értékekkel és nem normális eloszlásokkal szemben, miközben a mediánnal ellentétben figyelembe veszi az amplitúdóinformációt és a sűrűségi szerkezetet. Ugyanakkor kis elemszám, egyenletes eloszlás, illetve túlzott ε csökkenés esetén a módszer instabillá vagy lokálisan torzítottá válhat. A rekultivált területeken végzett geofizikai vizsgálatok során az adatok gyakran tartalmaznak mesterséges rétegződést, heterogén feltöltést és lokális kontrasztokat, amelyek torzíthatják az egyszerű átlagolási eljárásokat. Ilyen környezetben kritikus annak vizsgálata, hogy a robusztus MFV-bebecslés milyen mértékben képes a domináns fizikai viselkedést reprezentálni, illetve hogyan változik a térbeli mintázat az ε kezelésének függvényében.

A jelen dolgozatban az MFV módszer kulcsszerepet tölt be a többparaméteres geoelektromos adatok térbeli aggregálásában, mivel lehetőséget nyújt, hogy az inverzióból származó pontszerű adatokból stabil, a kieső értékek hatását csökkentő reprezentatív modellek álljanak elő. Ez a lépés közvetlen kapcsolatot teremt a fizikai mérési adatok és a későbbi statisztikai (pl. klaszteranalízis alapú) értelmezés között, így a teljes feldolgozási lánc egyik meghatározó eleme. Ezáltal az MFV módszer nemcsak statisztikai eszközként, hanem a geofizikai értelmezés stabilizálásának alapvető lépéseként jelenik meg.

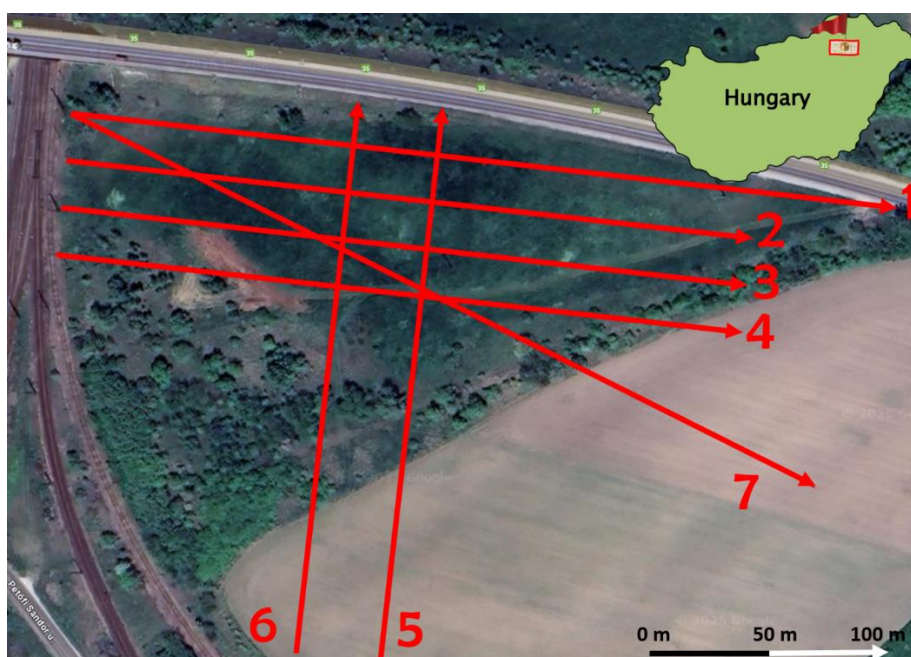
A bemutatott módszerek együttes alkalmazása biztosítja a geoelektromos adatok több szinten történő, egymásra épülő feldolgozását, amely a dolgozat további fejezeteiben egységes értelmezési keretrendszerre áll össze.

3. A geoelektromos értelmezés módszertana

3.1 Mérési stratégia, geometriai tervezés és topográfia

3.1.1 Nyékládházi terület

A geofizikai adatok több szelvény menti mérése és azok együttes értelmezése esetén alapvető fontosságú a mérési pontok pontos térbeli helyzetének meghatározása és rögzítése. A fejezetben a mérési stratégia, a geometriai tervezés és a topográfiai adatgyűjtés lépéseit mutatom be, amelyek a későbbi térbeli (2,5D–3D) értelmezés alapját képezik. A vizsgált terület megközelítőleg 300×80 m kiterjedésű. A mélységi információk biztosítása érdekében a mérési elrendezés a tényleges vizsgált területnél nagyobb, mintegy 70 000 m²-es területet fedett le. A 6. ábrán megfigyelhetők a hét darab kijelölt szelvény helyei. A vektorok nyíllal jelölt végei jelölik mindig az utolsó elektróda helyét, ami később a feldolgozott szelvények orientációjánál számít. A szelvények ilyen kialakítása elősegíti a térbeli anomáliák többirányú leképezését, és csökkenti az egyetlen irány menti értelmezésből adódó bizonytalanságot.



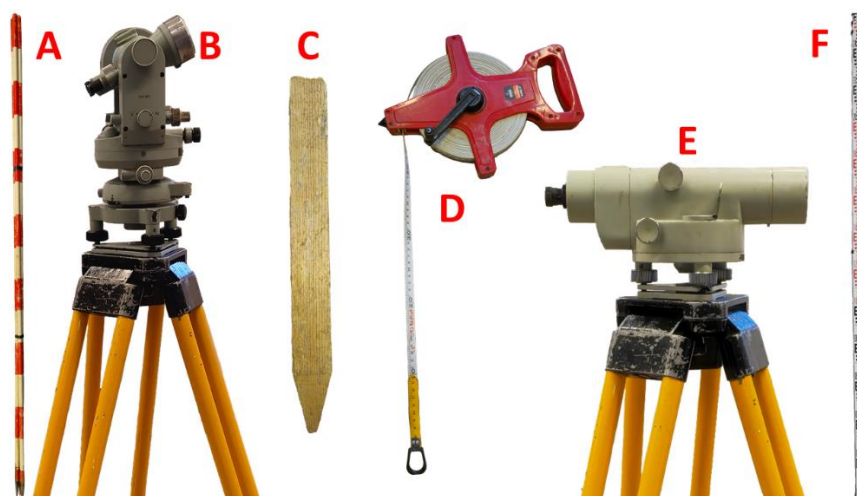
6. ábra: A vizsgált terület műholdfelvétele a geoelektromos mérési szelvények elrendezésével. (szerző saját szerkesztése)

Az általam használt elektromos mérések vizsgálatul szolgáló IRIS SYSCAL PRO mérőműszer 72 különálló csatornát tud kezelni. Emiatt 5 méteres elektróda közt választottam, ami a maximális elektródaszámot kihasználva 355 méteres szelvényt eredményez hat darab kábeldobnyi multicSATORNÁS vezeték felhasználva. Az 1. és a 7. szelvényeknél a teljes terítéssel (355 méter) terveztem meg a méréselrendezést, míg a 2., 3. és 4. szelvényeknél csak 5 kábeldobnyi (295 méter) és az 5. és 6. kereszt-szelvényeknél csak

4 kábeldobnyi terítést alkalmaztam, ami 235 méteres szelvényeket eredményezett. A 4 db párhuzamos szelvény között 20-20 méter távolságot, míg a 2 db rájuk merőleges szelvény között 36 méter távolságot terveztem. A 7. átlós szelvény az 1. szelvénnel az óramutató járásával megegyezően 20° -os szöget zár be. A geometriai elrendezés célja egy olyan szelvényhálózat kialakítása volt, amely alkalmas a térbeli szerkezetek többirányú vizsgálatára. A geometriai terv terepi megvalósításához geodéziai mérések elvégzése volt szükséges. Az imént említett szükséges munka jelentősége a begyűjtött geofizikai adatok térbeli kiértékelésekor lényeges azért, hogy azok ne csak egy elméleti tökéletes geometriára támaszkodva helytelenül legyenek 3D-s modellként kiértékelve. Például egy 355 m hosszú szelvény esetén már 1° -os irányeltérés is mintegy 6,2 m oldalirányú eltolódást eredményez. A szemmel becsült merőlegesség és párhuzamosság számottevő geometriai hibaforrást jelenthet. Könnyen előfordulhat akár egy $5\text{--}10^\circ$ -os hibával terhelt kijelölés is, ami nem biztos, hogy könnyen észrevehető szabad szemmel a terepen.

Referencia vonalnak az 1. szelvényt jelöltem ki. Mivel annak a közepe durván 3 méterrel magasabban van, mint a kezdőpontja és 5 méterrel magasabban, mint a vége, így a 355 méter hosszú szelvénynél összeláthatatlansági probléma is jelentkezett. Ennek a megoldására a szelvény kezdő- és végpontján kitűzőrudakat (7/a ábra) helyeztem el, majd egy közbenső ponton optikai teodolittal (7/b ábra) határoztam meg a pontos irányt. Ennek segítségével megirányoztam a kezdőponton található kitűzőrudat, majd a horizontális irányértéket, mint kezdőértéket 0° -ra állítottam be. Ezután a távcsövet horizontális irányban 180° -kal elfordítottam, amilyen irányba folytatódnia kell a szelvénynek, hogy az egyenes maradjon. A végponton az előzetesen provizórikusan elhelyezett kitűzőrudat az előzőleg beállított irányba el kellett mozgatni. Ezzel az első, mint referencia szelvény kezdőpontja és iránya ki lett tűzve. Főként a hosszantartó gerjesztett polarizációs mérések miatt, az összes vizsgálatot több egymást követő napon lehetett csak elvégezni. A kitűzőrudak helyére a 7./c ábrán látható kitűzőkarókat telepítettem, amik helyét ezenfelül jól látható színű festékszóróval is megjelöltem. A teodolittal 270° -os vízszintes irányértéket figyelembe véve az 1. szelvényre merőleges 5. számú szelvényt is kijelöltem a kitűzőrúd segítségével. Az első szelvénytől az 5. szelvény mentén a 7./d ábrán látható mérőszalaggal háromszor 20 méter lett felmérve, amik a 2., 3. és 4. szelvények helyeit jelölték ki. Ezeken a pontokon is elhelyeztem kitűzőkarókat. Az első teodolit álláspont helyére is karót tettünk, a műszer pedig áthelyezésre került a 2. és 5. szelvények metszetébe. A teodolitot az 1. és 5. szelvények metszetére 0° -ra forgattam, majd 90° és 270° -oknál ismét elhelyeztem 1-1 kitűzőkarót a távolban, ezzel kijelölve a 2. szelvényt. Az előző vonal kijelöléséhez hasonlóan a 3. és 4.

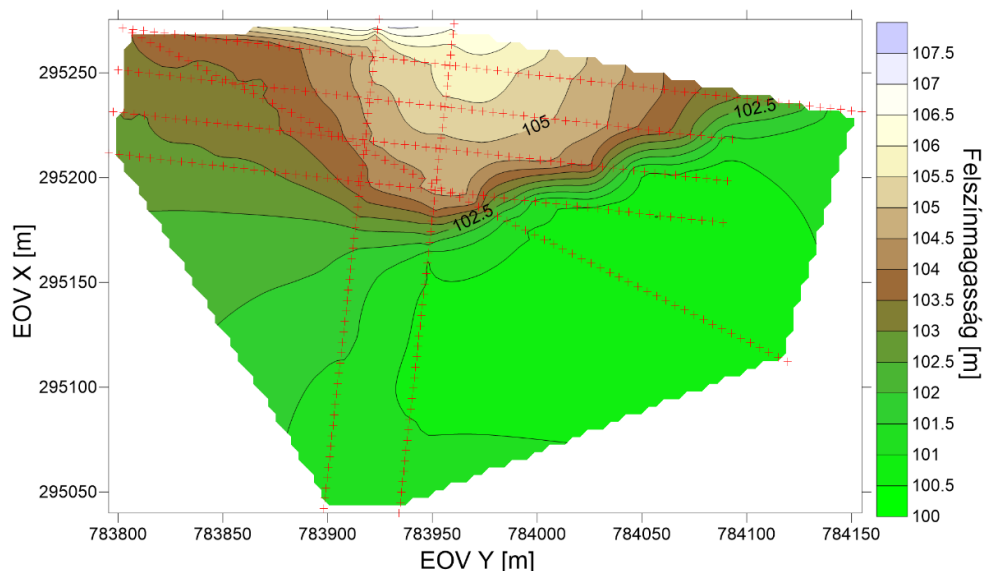
szelvény is kitűzésre került. A 6. szelvény az előző elgondolásokkal az 5. szelvénytől 36 méterre lett kitűzve. A 7. szelvény pedig az 1. szelvény kezdőpontjáról annak vonalához képest óramutató járásával megegyezően 20° -os szögben lett kijelölve. Ellenőriztem a párhuzamosságokat, a merőlegességeket és a tervezett szelvények közti távolságokat a kijelölés helyeitől független pontokon is. Amennyiben eltérések adódtak, azok a megfelelő módon korrigálásra kerültek. Ezzel a folyamattal a mérési területen meghatározásra került a vízszintes alapponthálózat. Ez biztosította, hogy a geofizikai adatok térbeli értelmezése valós geometriai viszonyokon alapuljon. A lokális koordináta-rendszert az Egységes Országos Vetületi Rendszerbe (EOV) illesztettem.



7. ábra: A használt geodéziai eszközök: a: kitűzőrudak; b: optikai teodolit állványon; c: kitűzőkaró; d: 50 méteres mérőszalag; e: kompenzátoros optikai szintező műszer állványon; f: szintezőléc (szerző saját szerkesztése)

A szelvények nem vízszintes terepen helyezkednek el, ezért az egyes elektródapontok magassági meghatározása elengedhetetlen az inverziós feldolgozáshoz. A feladat megoldásához egy egyszerű optikai kompenzátoros szintezőt (7./e ábra) és a hozzá tartozó szintezőlécet (7./f ábra) alkalmaztam. A mérnöki szintezés garantálja a mm nagyságrendű eredmények pontos meghatározását, amennyiben az ahhoz kapcsolódó mérési szabályok mindig be vannak tartva. Az esetek nagy többségében ilyen minőségű magassági adatokat mértem fel. Az összes felméréndő pont tulajdonképpen vesztett pont, nincsenek külön kijelölve, valamint a talaj és a növényzet sem hagyja jóvá a néhány cm-en belüli pontosságot. A centiméteres pontosság megfelel a geoelektromos inverzió topográfiai igényeinek. A műszerhez képest alacsonyabban elhelyezkedő pontokat az akár 5 méter magasra is kihúzható szintezőléc segítségével is meg lehet határozni, a vízszintes síkban körbeforgatott irányvonallal, azonban magasabban elhelyezkedő domborzati pontokat nem, mivel azok nem látszódnának a távcsőben. Ennek okán elsőnek az 1. szelvény legmagasabb középső

tájékan helyeztem el a szintező műszert. A geofizikai mérések során folyamatosan abból a pontból a szelvényeken 5 méterenként kijelölt elektródák helyeinél történtek a relatív magassági adatok leolvasásai. A távoli pontoknál természetesen a mm-ek leolvasása már a pici lécképen való apró csíkok miatt nem volt lehetséges, de a 0,5 cm-es nagyságrendű értékek még igen. A nagyon távoli pontok, valamint a domborzat és a növénytakaró miatt láthatatlan szelvényrészek esetében kötőpontok segítségével másik műszerállások kerültek kialakításra, ahonnan lehetett folytatni a szintezési méréseket. A geofizikai mérések elvégzése közben végeztem el a szintezést, mivel látszódtak már az elektródák helyei. Amíg a több órás elektromos leképezési mérések zajlottak, azalatt a következő szelvény helyét is kitűztem. Az összes álláspontból leolvasott relatív adatokat egy közös magassági rendszerbe normáltam. Ezután bekapcsoltam az országos rendszerbe azt, így ábrázolva a területet a Balti tenger magassági alapszintjéhez képesti értékekkel. Ezekhez a Z koordinátákhoz hozzátársítottam a korábban kiszámolt X és Y adatokat. A Surfer szoftver (Golden Software, 2025) segítségével az elektródák helyeinek a koordinátaiból egy egységsháló készült el *natural neighbor* interpolációs technika segítségével, mivel nem végez extrapolációt, így csak a mért pontok közötti tartományban hoz létre új értékeket. Az igaz, hogy vannak olyan térrészek, ahol nagyon messze vannak az ismert pontok egymástól, főként a szelvények végénél, de ott szemmel láthatóan nem volt változékony a domborzat, így ez nem okoz durva becslési hibákat. A 468 mért pontból kapott domborzati térkép a 8. ábrán látható, ahol a piros apró kereszttek az elektródák helyeit jelölik.

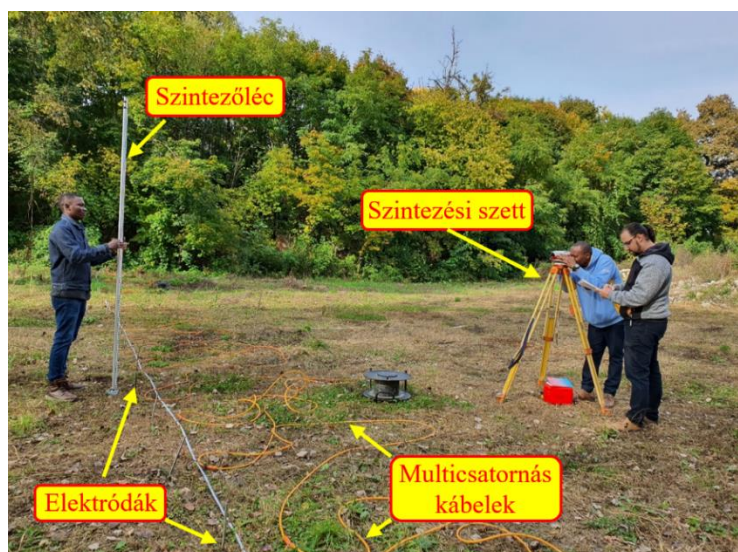


8. ábra: A vizsgált terület topográfiai térképe, piros kereszttekkel jelölt elektródahelyekkel.
(szerző saját szerkesztése)

A pontos geometriai és topográfiai meghatározás biztosította, hogy a későbbi feldolgozási lépések (inverzió, szeletelés, statisztikai elemzés) valós térbeli viszonyokon alapuljanak.

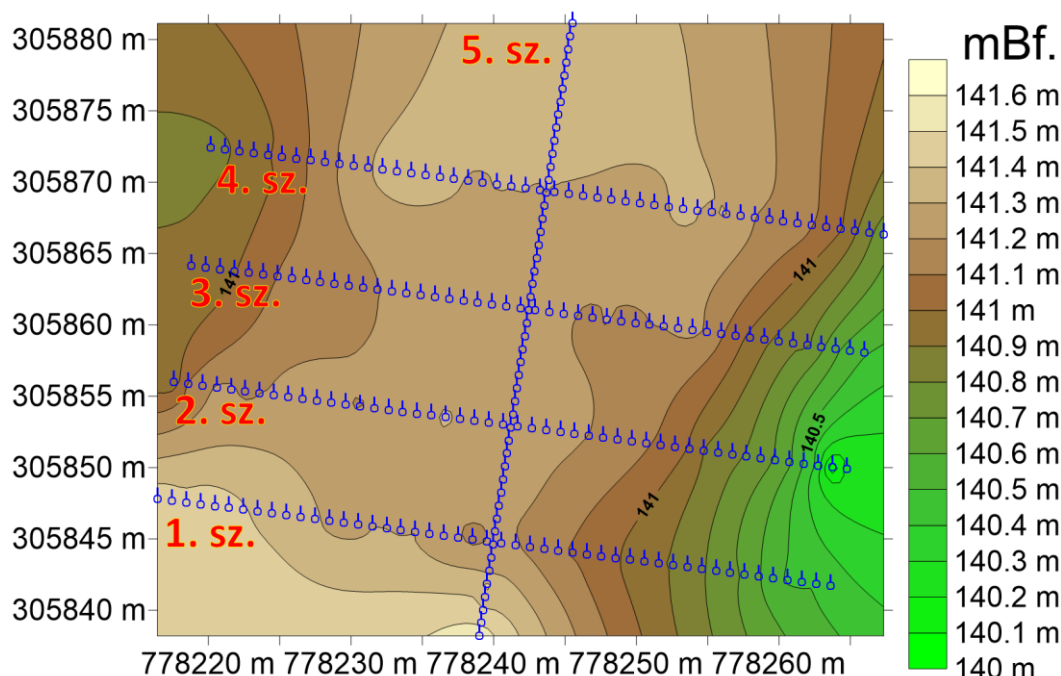
3.1.2 A Miskolci Egyetemen kijelölt kutatási terület

A méréseket Miskolci Egyetem Geofizikai Intézeti Tanszék (továbbiakban tanszék) kollégáival, valamint a TDK-zó hallgatóm és tankörtársai közreműködésével végeztük el. Ez a terület a nyékládházi vizsgálatok során kialakított módszertan más környezetben történő ellenőrzésére és kiterjesztésére szolgált. Az elsődlegesen alkalmazott módszer a fajlagos ellenállás-leképezés volt. Ehhez a tanszéken megtalálható SYSCAL (Iris Instruments) mérőműszert használtam fel. Mivel a műszer gerjesztett polarizáció mérésére is alkalmas, a fajlagos ellenállás-mérésekkel párhuzamosan GP-adatokat is rögzítettem. A vizsgálat célja nem igényelt nagy behatolási mélységet, ezzel szemben a nagyobb felbontás elsődleges szempont volt, ezért 1 m-es elektródatávolságot választottam. Szelvényenként 4 elektróda kábelt és a hozzájuk tartozó 12-12 elektródát használtam, ezzel elérve a 47 méteres szelvényhosszakat. A jobb területi lefedettség érdekében precíz geodéziai mérésekkel 4 párhuzamos, egymástól 9 m távolságra elhelyezkedő, azonos hosszúságú szelvényt tűztem ki. Az adatok térbeli összehangolásának javítása érdekében egy keresztshelvényt is kitűztem. A mért adatok 2D-s inverzióját a GeoTomo Software RES2DINV 3.59.100 semidemo verziójával végeztem. Mivel a szelvények nem tökéletesen sík felszínen helyezkedtek el, az elektródák relatív magassági meghatározásához szintezést is végeztünk. A terület további széleskörűbb megismerése érdekében a tanszék GSM-19 Overhauser magnetométer (GEM System) műszerével is végeztünk mágneses méréseket. Ezen kívül még elvégeztünk méréseket néhány szelvény mentén, szintén a tanszéken megtalálható GPR system (MALA) földradar segítségével is. Az 500 MHz-es antennát választottam, mivel ezzel lehet még a számomra érdekes mélységig kellő felbontásban visszaverődéseket észlelni.



9. ábra: Fotó a hallgatóimmal történő terepi szintezésről, az ahhoz szükséges eszközökről és néhány geofizikai kellék (szerző saját szerkesztése)

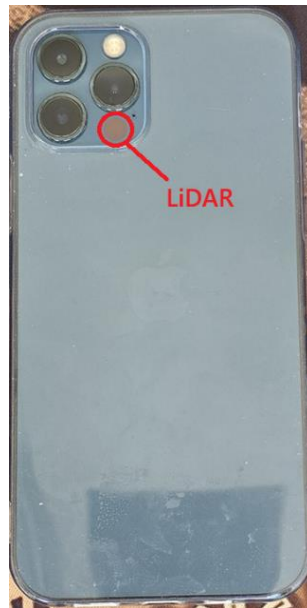
A különböző módszerek együttes alkalmazásával olyan többparaméteres adatrendszer jött létre, amely alkalmas volt a nyékládházi területen kialakított értelmezési lépések más környezetben történő kipróbálására is. A szintezést egy műszerállásból végeztük el (9. ábra). A szintezőműszer vízszintes irányvonalához viszonyítva a szintezőléc leolvasásaiból határoztuk meg az egyes pontok relatív magassági helyzetét. A legnagyobb leolvasott értékhez rendeltem a 0 lokális magasságot, majd a többi adatból kialakítottam a lokális domborzati modellt. Ezt egy ismert pont Balti alapszint feletti magasságával kiegészítve meghatároztam az elektródapozíciók abszolút magassági értékeit. Krigeléses interpolációval elkészítettem a 10. ábrán látható domborzati modellt. A magassági értékeket később a geoelektromos adatok inverziójánál is hasznosítottam. Ez biztosította, hogy az inverziós és későbbi térbeli értelmezési lépések valós topográfiai viszonyokon alapuljanak.



10. ábra: A szintezéssel felmért terület domborzati viszonyai EOVS rendszerben, kis kék vonalkával ellátott karikákkal jelölve a mérési pontokat az 5 szelvény mentén (szerző saját szerkesztése)

Néhány évvel a kutatás után a terület hasznosítási terve megváltozott, és a hotel helyett parkoló kialakítása vált aktuálissá. A tájrendezési munkálatokat már el is kezdték a vízszintes sík kialakítása érdekében. A Miskolci Egyetem területén korábban kikotort Büdöske-tó mederanyagát később erre a területre szállították, ezzel pótolva az anyagihiányt néhány zónában. Egy korábbi tanulmányomban pont azt az elhelyezett üledékes anyagot mértük fel és hasonlítottuk össze három különböző térinformatikai adatgyűjtő technikával: mérőállomás, fotogrammetriával ellátott drón és egy LiDAR-ral ellátott telefon (Szilvási és társai, 2023). 2025-ben felmértem egy LiDAR-ral felszerelt iPhone 12 Pro telefonnal a már

tájrendezett területet (Szilvási, 2025). Ennek célja már nem a korábbi geofizikai állapot rekonstruálása, hanem a gyors felszínmodell-készítés lehetőségének vizsgálata volt. 2020 óta az Apple a Pro kategóriás termékeit, kezdve az iPhone 12 Pro-tól (11. ábra) az iPad Pro-ig, ellátta egy LiDAR szenzorral, melynek segítségével ezek az eszközök térbeli adatleképezést biztosítanak. Ennek a működését és használhatóságát a földtudományi területeken egy korábbi tanulmányban már összefoglaltam. (Szilvási, 2024)



11. ábra: A felméréshez használt LiDAR-ral felszerelt iPhone 12 Pro készülék (szerző saját szerkesztése)

A telefon nem ekkora ($\sim 300 \text{ m}^2$) felületek felmérésére lett optimalizálva. A tapasztalatom alapján a közel vízszintes nagy felületek felvételére és feldolgozására jobban alkalmas, mint a kisebb alapterületű, de térben nagyon szerteágazó alakzatokra. A felvétel nagyjából 25 percig tartott. A nyers felvétel során a készülék 4,6 millió pontot, 8,9 millió felületelemet és 2565 raszteres képet rögzített. Az adatfeldolgozás során simításokkal és egyszerűsítésekkel a végleges modell 0,25 millió pontra és 0,35 millió felületelemre redukáltam, mivel ebben az esetben a térbeli lehatárolás fontosabb, mint a túlzott részletesség. A 3D-s modellt felülnézetbe forgatva olyan, mintha felülről lett volna fotogrammetriával felvéve a térkép. Ezáltal egy aktuális, nagy felbontású felülnézeti térképi modell állítható elő, külső, esetenként elavult térképi források használata nélkül. A 12. ábrán látható, hogy néhány helyen vannak üres foltok, ezeket gondosabb felvételezéssel ki lehet küszöbölni, amennyiben szükséges a tökéletes felvétel, ez azonban a rögzítési idő rovására fog menni. Ekkora területnél már egy fotogrammetriával operáló drón használata is célszerűbb lehet. A drón alkalmazását ugyanakkor engedélyezési és üzemeltetési kötöttségek nehezíthetik, szemben a telefonos megoldással, és nem fér el a zsebünkben, mint egy telefon.



12. ábra: Tereprendezés után LiDAR-ral felmért 3D-s modell felülnézeti képe. (szerző saját szerkesztése)

A telefon nagy előnye, hogy a rögzített adatok feldolgozása külön hardver nélkül is elvégezhető. Jelen esetben azonban az ábrákat (12., 13. és 14.) a feldolgozott modellt exportálva a szabad hozzáférésű Cloud Compare (v2.14.alpha) szoftverben nyitottam meg, és elkészítettem a metszeteket. A 3D-s modellt oldalnézetbe forgatva látható (13. ábra), hogy a tereprendezés után egy közel síkfelület alakult ki a leendő parkoló számára.



13. ábra: Tereprendezés után lézerszkennerral kapott 3D-s modell oldalnézeti képe. (szerző saját szerkesztése)

Ekkora egybefüggő terület felmérése során az eszköz helyenként elveszítheti a pontos térbeli tájékozódását, így a 14. ábrán látható, hogy a felülnézetből még egybefüggőnek látszó felületen az enyhén megdöntött oldalnézetben a vertikális folytonosságban szakadások láthatóak. Amennyiben mérnöki pontosságú adatokra van szükségünk, akkor az ezzel az eszközzel gyűjtött és feldolgozott adatok számunkra nem alkalmasak, viszont, ha egy gyors térbeli képet akarunk kapni, arra pedig kiváló.



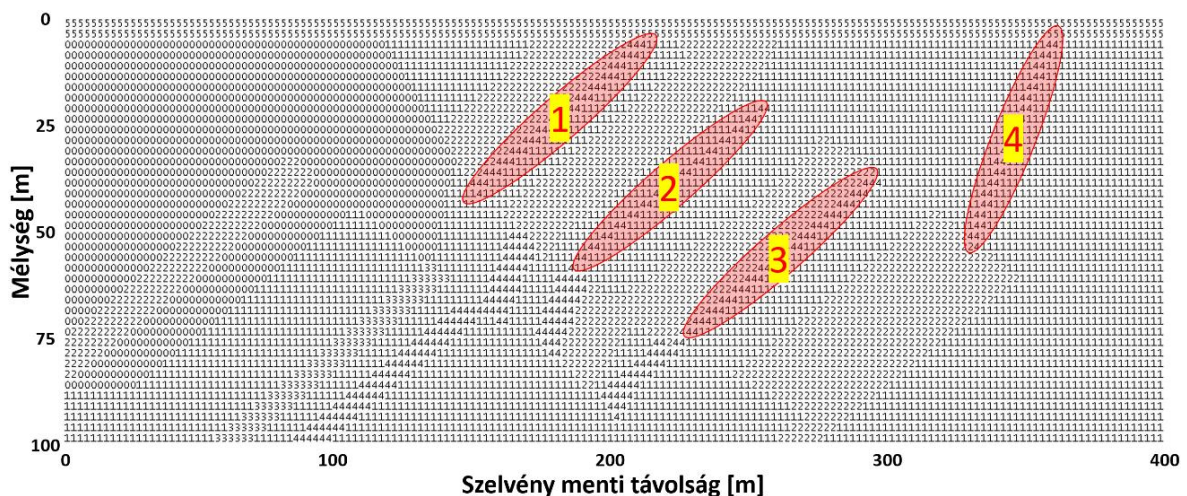
14. ábra: Tereprendezés után lézerszkennerral kapott 3D-s modell enyhén döntött oldalnézeti képe (szerző saját szerkesztése)

A jövőbeli, hasonló geoelektromos mérések során előnyben részesíteném a szelvények professzionális lézerszkennerral történő felmérését és kitűzését. Ezáltal nemcsak a geodéziai munka egyszerűsödik, hanem egy részletes nagyfelbontású felszínmodell is elkészül. Tény az, hogy a pontosság minimum egy nagyságrenddel alacsonyabb a mérnöki szintezésnél (a geofizikai adatoknál ez is elégséges), a felbontás viszont a sokszorosa lesz. Ez a megközelítés a dolgozatban alkalmazott módszertani rendszer jövőbeli továbbfejlesztési irányát is kijelöli, mivel a gyors és részletes topográfiai adatgyűjtés közvetlenül javíthatja a térbeli geofizikai értelmezések alapját.

3.2 Paraméterérzékenységi vizsgálatok előre modellezéssel

3.2.1 Digitális modellalkotás

A digitális modell kialakításához Püspöki Zoltán és társai (2009) által közölt földtani szerkezetet vettem alapul. A földtani szelvény jellemző paramétereinek (rétegek elhelyezkedése, vastagsága, dőlése, elektromos fajlagos ellenállása) felhasználásával létrehoztam a digitális modellt (15. ábra). Az így előállított modell (vertikális kiterjedés: 100 m, horizontális kiterjedés: 400 m) felett különböző elektródaelrendezésekben 2D-s direkt feladatmegoldással (előre modellezéssel) határoztam meg, hogy terepi mérés esetén várhatóan milyen válaszokat kapnánk. Ez a lépés a mérési stratégia és az elektródaelrendezések célzott összehasonlításának alapját adta.



15. ábra: Digitális földtani szelvény a 4 db később vizsgált pirossal jelzett és sorszámozott szénrétegekkel (szerző saját szerkesztése)

A különböző típusú rétegekhez különböző elektromos fajlagos ellenállást társítottam. Ezeket az értékeket az F-1 fúrólyukban végzett karotázs mérésekből adódó szelvény alapján becsültem meg. Bár egyes közettípusokhoz rendelt értékek a valóságban eltérhetnek, ebben a mintapéldában a módszertani összehasonlítás volt a cél, nem pedig a geológiai viszonyok teljes pontosságú rekonstruálása. A területet 6 különböző csoportra bontottam és ezeknek adtam egy-egy kódszámot a 3. táblázatban. Mivel az F-1 fúrólyuk karotázs szelvényének felső 25 méterében nem történt ellenállásmérés, a fedőösszlet fajlagos ellenállását becsléssel adtam meg.

3. táblázat: A szelvény közeleinek mért fajlagos ellenállása (szerző saját szerkesztése)

kódszám	közetnév	fajlagos ellenállás (Ωm)
0	agyagmárga	50
1	aleurolit	80
2	homokkő	110
3	lefejtett szénréteg (tömedék)	135
4	szénréteg	160
5	fedőréteg	100

3.2.2 Előre modellezés

A 2D-s előre modellezéshez és a zajjal terhelt adatok inverziójához a GeoTomo Software RES2DMOD és RES2DINV szoftvereit használtam (Loke és Barker, 1996). A vizsgálat célja annak meghatározása volt, hogy a különböző elektródaelrendezések közül melyik alkalmas leginkább a szénrétegek kimutatására. Jelen esetben a nagyobb fajlagos ellenállású szénrétegek (4-es kód) kimutathatóságát vizsgáltam az őket körülvevő kisebb ellenállású kőzetekhez viszonyítva. Különböző elektródaelrendezésben geoelektromos módszerrel vizsgáltam azt, hogy a különböző elhelyezkedésű szénrétegeket mennyire lehet kimutatni. A feladat megoldásához paraméterérzékenység vizsgálatot végeztem, és ennek eredményét ábrázoltam. Ez a lépés közvetlenül szolgálta a mérési konfigurációk összehasonlítását, és megalapozta a későbbi terepi alkalmazás módszertani döntéseit.

A digitális modell 84 elektródás elrendezésre készült, 5 m-es elektródatávolsággal, így a szelvény teljes hossza 420 m lett. A véges elemes módszert alkalmazó RES2DMOD szoftverrel különböző elektródaelrendezésekre kiszámoltam, hogy a modell felett milyen potenciálértékek mérhetők. 3% zajt adtam a számított adatokhoz, ami a terepi körülmények között várható mérési bizonytalanság egyszerű közelítését jelentette. A cél annak vizsgálata volt, hogy a valós földtani viszonyok ehhez hasonló szerkezete esetén mely elektródaelrendezés lenne a legkedvezőbb terepi alkalmazásra. Az adott területre leginkább megfelelő elrendezés kiválasztása függ a földtani szerkezettől, az elrendezés érzékenységi

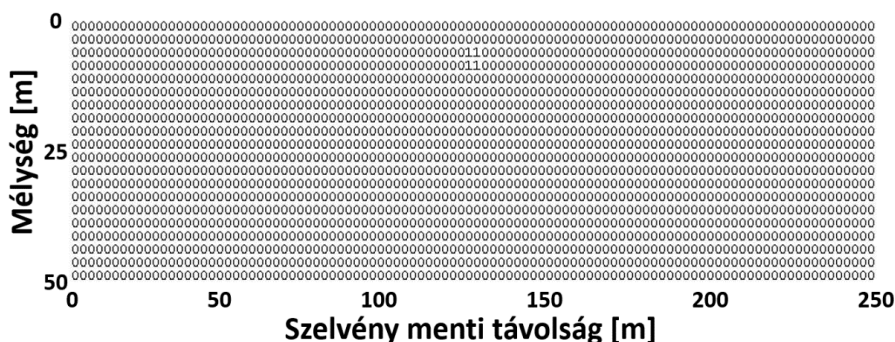
tulajdonságaitól és a háttérzajtól. A gyakorlatban legelterjedtebb elrendezések a Wenner, dipól-dipól, Wenner-Schlumberger, Pol-Pol, Pol-Dipol. Egy-egy elrendezésnél figyelembe kell venni a vertikális és horizontális érzékenységet az ellenállás változásra, a behatolási mélységet, a horizontális adatlefedettséget és a jelerősséget (Loke, 2000). Ennek megfelelően az előre modellezés nem önálló vizsgálati lépésként, hanem a későbbi terepi mérés és adatértelmezés optimalizálását szolgáló módszertani előkészítésként jelenik meg.

3.2.3 Paraméterérzékenységi vizsgálatok

Ebben a modellben a szénrétegek vastagságának kis mértékű módosítása nem volt célszerű, ezért a szénrétegek fajlagos ellenállását változtattam meg $160 \Omega\text{m}$ -ról $162 \Omega\text{m}$ -re. A Ψ értéke a gyakorlati esetek többségében 1-nél kisebb.

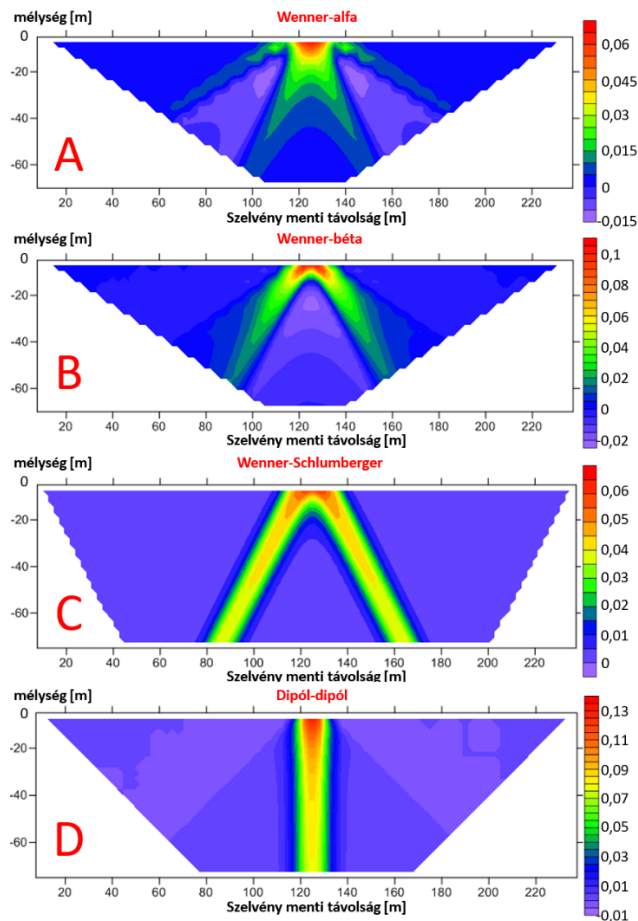
A számítást úgy végeztem el, hogy a kiinduló modellre kapott fajlagos ellenállás-értékeket (ρ) a módosított ellenállású szénréteget tartalmazó modell eredményeiből pontonként kivontam, majd a kapott $\Delta\rho$ értékeket a kezdeti paraméterértékkel ($M = 160 \Omega\text{m}$) szoroztam, és elosztottam a paraméterváltozással ($\Delta M = 2 \Omega\text{m}$) és a kiinduló fajlagos ellenállás-értékekkel (ρ). A paraméterérzékenység vizsgálatoknál nem terheltem zajjal az adatrendszereket. Erre azért volt szükség, hogy a különböző elrendezések saját érzékenységi karaktere torzítás nélkül legyen összehasonlítható. A paraméterérzékenység értékeit a Golden Software cég Surfer szoftverével ábrázoltam.

Először mind a négy elrendezés esetében megvizsgáltam, hogy homogén térben egy kis, négyzet alakú, a környezeténél nagyobb ellenállású test (16. ábra) milyen érzékenységi választ eredményez.



16. ábra: A tesztmodell (szerző saját szerkesztése)

Így az egyes elektrodelrendezésekre jellemző érzékenységi mintázatok rajzolódnak ki (17. ábra), amelyekből a dőlésérzékenységre is következtetni lehet. Megfigyelhető, hogy milyen irányokban változnak meg a mérhető paraméterértékek. Jól látható, hogy a teszt négyzet a látszólagos fajlagos ellenállás értékeit önmagán kívül mely zónákban befolyásolja.



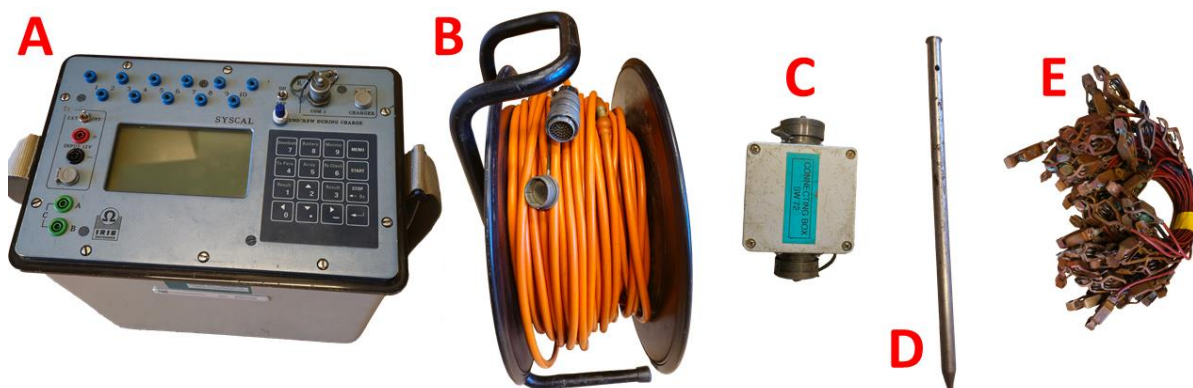
17. ábra: A 4 különböző elektródaelrendezésben vizsgált tesztmodell paraméterérzékenysége A: Wenner-alfa; B: Wenner-béta; C: Wenner-Schlumberger; D: Dipol-Dipol (szerző saját szerkesztése)

A paraméterérzékenységi vizsgálatok eredményei így közvetlen alapot adtak annak megítéléséhez, hogy a különböző elektródaelrendezések mely szerkezeti helyzetekben biztosítanak kedvezőbb kimutathatóságot, és ezáltal hogyan illeszthetők a dolgozatban alkalmazott integrált geoelektromos értelmezési rendszerbe.

3.3 Inverzió előtti adatminőség-ellenőrzés és hibaszűrés

A hulladéklerakó felszínről történő roncsolásmentes vizsgálatához a fajlagos ellenállás- és gerjesztett polarizációs leképezési módszereket együttesen alkalmaztam. A nyékládházi területen a hét szelvény mentén a teríték közepére helyeztem el az IRIS SYSCAL PRO műszert (18/a ábra). A műszer két oldalára 2-2, 2-3, illetve 3-3 kábeldobnyi multicatsornás kábelt (18/b ábra), valamint dobonként 12-12 elektródát (18/d ábra) csatlakoztattam, a kábelekhez szerelt röpszinórok (18/e ábra) segítségével. A miskolci területen ugyancsak 12-12 elektróda került egy-egy kábelre az 5 szelvény mentén, ott azonban minden szelvényen 4 kábeldobnyi terítést alkalmaztam. A kábeleket egymáshoz úgynevezett switchekkel (18/c ábra) lehet összecsatlakoztatni. A műszer kezelőfelületén Wenner-alfa elektródaelrendezést

állítottam be multielektrodás mérési technikával, Nyékládházán 5 m-es, Miskolcon 1 m-es elektrodátávolsággal. Ennél az elrendezésnél a használt négy elektróda egymástól egyenlő távolságra helyezkedik el. A mérési konfiguráció egységes kialakítása azért volt fontos, hogy a későbbi inverziós és térbeli összehasonlítások konzisztens adatrendszerre épüljenek.



18. ábra: a: IRIS SYSCAL PRO; b: kábeldob; c: kábeleket összekötő doboz; d: nem polarizálódó elektróda; e: röpszinór köteg (szerző saját szerkesztése)

A multielektrodás mérés során a műszer az összes telepített elektródából mindig 4-et választ ki, két adó- és két vevőelektrodát, majd ezekkel végzi el a mérést. A kapott látszólagos fajlagos ellenállás- és GP-tölthetőségi értékek az elektródák közötti térrész összetett hatását tükrözik, ezért nem egyetlen pont valódi paramétereit, hanem a vizsgált térrész integrált választását reprezentálják. Ahhoz, hogy a későbbi elemzéseknél megértsük a mérésből nyert adatok geometriáját, ismernünk kell az adatgyűjtő eszköz által számolt adatok lokációját. Az 5 m-es Wenner-alfa elrendezésben a négy elektróda (A-M-N-B) egymástól 5-5 m távolságra helyezkedik el, így a két szélső elektróda közötti távolság 15 m. A legsekélyebb vizsgálati mélység ennek 0,173-szorosa, azaz 2,595 m. A műszer 16 mélységszintet számol ennek az alaplépésnek a többszöröseiben, így a legmélyebb szint 41,52 m mélységben helyezkedik el. Ebből is látszik, hogy a szelvények széleinél a mélyebb részekre nem lehet adatokat számolni. A területet északról közút, nyugatról vasút határolja, amelyek az elektródák telepítésénél fizikai akadályt képezve korlátozták a szélső zónák mélyebb vizsgálatát.

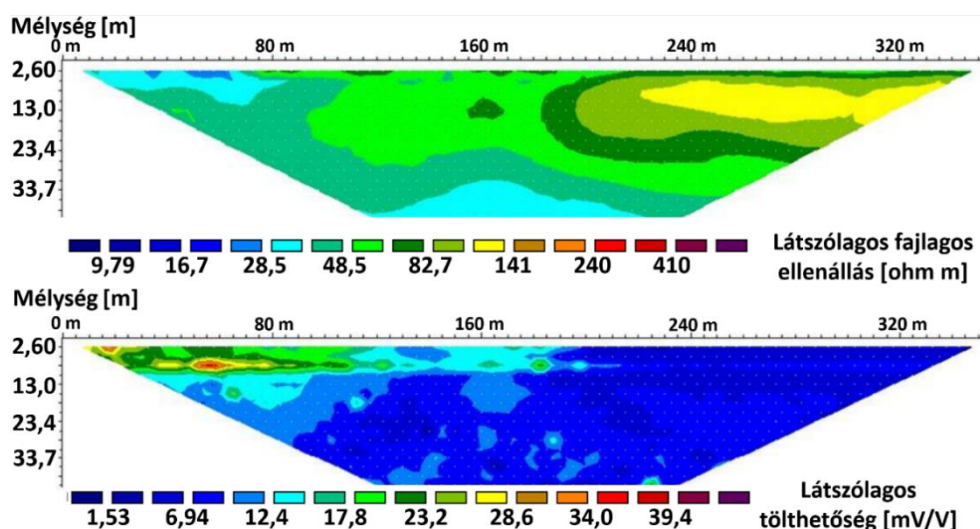
A mérések indítása előtt a műszer minden szelvényen gyors ellenőrzést („res check”) végzett az egymás melletti elektródák közötti ellenállás vizsgálatára. Ha irreálisan magas vagy nem mérhető ellenállás adódott, ellenőrizni kellett az adott elektróda csatlakozását és talajkontaktusát. A leggyakoribb hibák a hiányos kábelcsatlakozás, az oxidált érintkező felület és a laza elektródaelhelyezés voltak. Ezeket a csatlakozások tisztításával, az elektródák újracsatlakoztatásával, mélyebbre helyezésével vagy szükség esetén a környezet vízzel történő nedvesítésével lehetett megszüntetni. A mért adatokat .dat formátumban exportáltam, majd a Prosys II szoftverrel (Iris Instruments, 2025) ellenőriztem és szükség

esetén soronként szűrtem. A kiértékelés során a látszólagos fajlagos ellenállás-, a GP-tölthetőségi és az időablakokhoz tartozó mérési paraméterek alapján lehetett azonosítani a hibás vagy gyanús adatokat. Mivel többszáz sora van az adattáblának, és annak ellenére, hogy logika van abban, hogyan következnek egymás után a mért pontok a térben, mégis nehéz néha eldönteni, hogy valamely adat kieső értékkel rendelkezik, kvázi mérési hiba, vagy abban a térrészben tényleg eltérő érték(ek) kerültek(ek) rendre rögzítésre. A gyanús, de nem egyértelműen hibás értékek azonosításához a látszólagos fajlagos ellenállás- és GP-adatokat geometriahelyes elrendezésben külön táblázatokba rendeztem. Ez megkönnyítette a pozitív, de a környezetükhöz képest indokolatlanul eltérő értékek vizuális felismerését is.

Például a környező értékekhez képest indokolatlanul alacsony vagy kieső adat egy mélyebb szinten általában nem valódi földtani eltérést, hanem mérési hibát jelzett, mivel a látszólagos paraméterek nem egyetlen cella, hanem a teljes érzékeny térrész integrált választát reprezentálják. Ebben az esetben az a néhány egyértelműen azonosított cellának a sorát is eltávolítottam a későbbi adatfeldolgozásból. A hibák jellemzően a szelvények felszínközeli pontjainál, gyakran a széleken, valamint a legmélyebb számítási szinteken jelentkeztek. Ezek részben a száraz felső talajrétegekkel, részben a gyengébb geometriai lefedettséggel magyarázhatók. Az inverzió előtti adatminőség-ellenőrzés és hibaszűrés ezért nem pusztán technikai előkészítő lépés volt, hanem a későbbi inverziós, szeletelési és statisztikai feldolgozások megbízhatóságának alapfeltétele.

3.4 2D-s inverzió és 3D-s adatbázisépítés

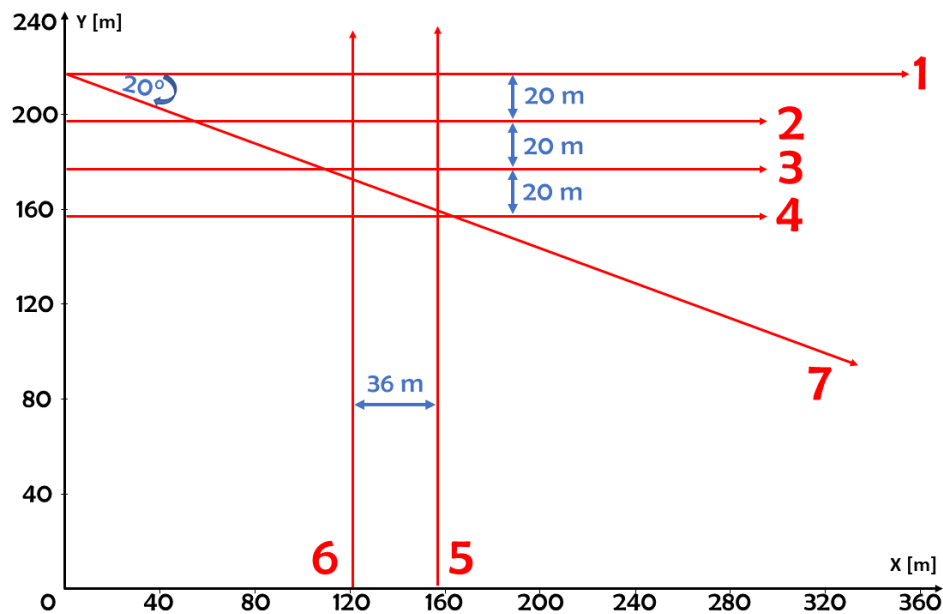
A módszereket a nyékládházi területen mutatom be, de a miskolci adatok feldolgozásánál is döntően ugyanazokat az eljárásokat alkalmaztam. A látszólagos fajlagos ellenállás- és GP-tölthetőségi képek előállításánál a topográfiát még nem vettem figyelembe. Jellegüket a 19. ábra szemlélteti, ahol felül a látszólagos fajlagos ellenállás, alul pedig a GP-tölthetőségi értékek eloszlása látható. A hulladékok általában alacsony fajlagos ellenállásúak, ugyanakkor a GP-válaszuk gyakran magasabb, mivel a töltött részecskék a kikapcsolás után is tovább polarizálhatók. A látszólagos fajlagos ellenállás kép bal felső részén egy gyengén kirajzolódó alacsonyabb értékű zóna figyelhető meg, míg ugyanitt a látszólagos GP-tölthetőség esetében karakteres magas értékű anomália jelenik meg. Ez a zóna szennyeződésre utalhat, és döntően felületi polarizációhoz köthető. A hibaszűrés után a 7 szelvényből összesen 3835 mérési pont maradt meg további feldolgozásra. A látszólagos fajlagos ellenállás és tölthetőségi adatok közvetlenül nem értelmezhetők mélységi eloszlásként, ezért szükséges azok inverziós feldolgozása.



19. ábra: Mért látszólagos fajlagos ellenállás (felső) és látszólagos tölthetőségi (alsó) térképek a 7. szelvény alatt (szerző saját szerkesztése)

A 2D-s inverzió során egy olyan modell kerül meghatározásra, amelynek válasza a lehető legjobban illeszkedik a mért adatokhoz. Az alkalmazott eljárás csillapított legkisebb négyzetek módszerén (Sasaki, 1992) alapul, amelyben a modellparaméterek iteratív módon kerülnek módosításra a számított és mért adatok közötti eltérés minimalizálása érdekében. A megoldás stabilitását és fizikai értelmezhetőségét simasági feltételek biztosítják, így elkerülhető a túlzottan tagolt, nem reális modell kialakulása. Az inverzió eredményeként ennél sűrűbb pontháló jött létre, így a fizikai paraméterekkel ellátott térbeli pontok száma közel háromszorosára nőtt. Mind a 7 szelvény esetében a RES2DINV szoftverrel történt az inverziós feldolgozás, amely a látszólagos ellenállás- és GP-adatokból mélységhelyes valódi fajlagos ellenállás- és tölthetőségi modelleket számított. Az inverzió során a program egy kezdeti modellből kiindulva iteratív módon módosítja a cellaértékeket addig, amíg a számított és a mért látszólagos adatok közötti eltérés megfelelően kicsivé nem válik. Az illeszkedés jellemzésére RMS (root mean square) hibát használtam, amelynek kisebb értéke jobb modellilleszkedést jelez. Itt az egyes elektródákhoz a Z magassági adatokat rendeltem hozzá, amelyeket a szoftver figyelembe vett a geometriai tényező számításánál. Ez a lépés teremti meg a kapcsolatot a szelvényenkénti 2D-s geofizikai eredmények és a későbbi közös térbeli értelmezés között, mivel az inverzióból származó paramétereket egységes 3D-s adatbázisba rendezi. A teljes és a korlátozott funkcionalitású szoftververziók összehasonlítása alapján azt tapasztaltam, hogy a topográfiai korrekció és a részletesebb beállítási lehetőségek hiánya az egyszerűsített változatban egyes esetekben számottevő eltérésekhez vezethet. Ez indokolta a teljes funkcionalitású inverziós feldolgozás alkalmazását. Az inverzió után a hét szelvény összesen 9863 számolt térbeli pontot

tartalmazott. A 16 mélységszint megmaradt, de a pontháló sűrűbbé vált, és a szintek közötti függőleges távolság a mélységgel növekedett. A 2D-s szelvények egyedi értelmezése után szükségessé vált azok közös térbeli rendszerbe rendezése. Ehhez minden inverzióból származó ponthoz hozzárendeltem a valós EOVS vízszintes és magassági koordinátákat, így alakítva ki az egységes 3D-s adatbázist. A több szelvényből felépített kvázi 3D modellek széles körben alkalmazott megközelítést jelentenek olyan esetekben, ahol teljes 3D inverzió nem áll rendelkezésre (Aizebeokhai, 2010). A topográfiai korrekció után a pontok Z koordinátái már rendelkezésre álltak, ezért a következő lépésben a szelvények helyi vízszintes koordinátáit kellett egységes EOVS rendszerbe transzformálni (20. ábra).



20. ábra: A helyi vízszintes koordináta rendszer (szerző saját szerkesztése)

A 7. átlós szelvény elektródahelyeinek meghatározásához az alsó geodézia alapegyenleteit (7, 8, 9 és 10) alkalmaztam, először a pontok közötti távolság (S_{AB}) számításával:

$$S_{AB} = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2} \quad (7)$$

A pontok egymáshoz viszonyított helyzetét az irányszög jellegű δ_{AB} értékkel fejeztem ki:

$$\delta_{AB} = \arctg \frac{X_B - X_A}{Y_B - Y_A} \quad (8)$$

Az inverz feladatban az ismert pont koordinátaiból, valamint a távolság és irányszög alapján számítottam az ismeretlen pont koordinátáit:

$$X_B = X_A + S_{AB} * \sin \delta_{AB} \quad (9)$$

$$Y_B = Y_A + S_{AB} * \cos \delta_{AB} \quad (10)$$

Ezek segítségével a helyi koordináta-rendszer pontjait az EOVS rendszerbe transzformáltam eltolással és forgatással.

A következő lépésben minden szelvény mentén kijelöltem a szeméttest és a szennyeződés becsült alsó határpontjait az inverziós eredmények alapján. Az egy felszíni helyhez tartozó mélységi pontok a mérési geometria miatt nem tökéletesen függőlegesen egymás alatt helyezkednek el. A hulladéktest alsó felületének helyzetét a fajlagos ellenállás-eloszlás alapján becsültem. A felszíni, szárazabb talajrétegek alatt kirajzolódó folytonos, alacsony ellenállású zónát a hulladéktesthez kötöttem, és annak alsó határát ott jelöltem ki, ahol a 30 Ωm alatti tartomány megszűnt. A határfelület helyzetét lineáris interpolációval határoztam meg az adott pontok X, Y és Z koordinátáira. A 2D-s inverzióból létrehozott 3D-s adatbázis így nem önálló szemléltetési lépést jelentett, hanem a későbbi térképezési, szeletelési és statisztikai értelmezések egységes térbeli alapját biztosította.

3.5 Mágneses mérések

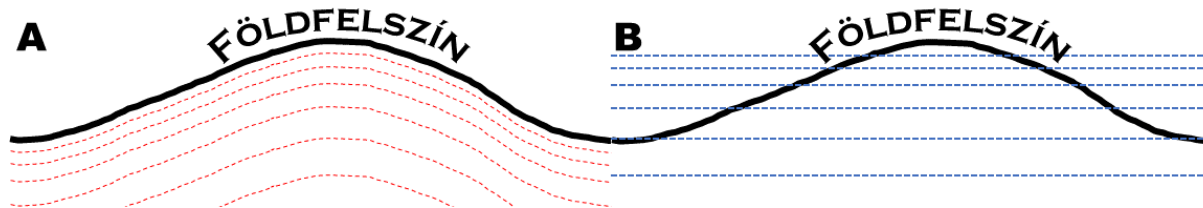
A mágneses mérések ebben a kutatásban nem önálló fő módszerként, hanem a geoelektromos eredmények kiegészítő ellenőrzésére és pontosítására szolgáltak. A mérési területen mágneses gradiensméréseket is végeztem, azonban a közeli antropogén hatások (elsősorban a vasút, a forgalmas főút és az elektromos távvezetékek) jelentősen korlátozták azok alkalmazhatóságát. Ezért a mágneses gradiensméréseket csak a 2. szelvény mentén végeztem el GSM-19 Overhauser típusú protonprecessziós magnetométerrel (GEM System). A mérési pontokat a korábban kitűzött szelvény mentén 2,5 m-es osztással jelöltem ki, a multielektrodás pontoknál és azok féltávjainál. A mágneses mérések nem ugyanazon a napon történtek, mint a fajlagos ellenállás- és GP-vizsgálatok, ezért azok mérőberendezései nem befolyásolták az eredményeket. A szelvény első 40 m-én a többi ponthoz képest közel konstans, mintegy 8500 nT-os értéknövekedést tapasztaltam, amely 42,5 m-nél hirtelen megszűnt. Mivel ez a jelenség nem mutatott helyi térbeli változást, és a bázisponton sem jelentkezett következetesen, a mérés egy részét külső geomágneses zavar torzíthatta. Ezt a torzult adatszakaszt a további feldolgozásból kizártam. A szelvény mentén minden pontban két mérés történt 1 m magasságkülönbséggel, alsó (piros) és felső (zöld) érzékelőállással, amelyeket a 44. ábrán együtt ábrázoltam. Ahol a két görbe szignifikánsan eltér egymástól, ott felszínközeli mágneses ható feltételezhető. Ahol a szelvény mentén ugyan nagy változás mutatkozik, de a két magassági állás között nincs számottevő különbség, ott inkább mélyebben elhelyezkedő mágneses forrás valószínűsíthető. A mágneses mérések így a jelen esetben nem önálló lehatárolási módszerként, hanem a geoelektromos eredmények kiegészítő ellenőrző információforrásaként voltak felhasználhatók.

3.6 Topográfiát figyelembe vevő horizontális szeletelési algoritmus

Kellően sűrű szelvényezés esetén igény jelentkezik horizontális szeletek előállítására, hogy adott mélységben a területi eloszlások értelmezhetők legyenek. Sík felszín esetén az azonos mélységszintek egyszerűen összevonhatók egységes adatbázissá. A nyékládházi területen a változékony topográfia miatt ez a megközelítés nem alkalmazható helyesen. Tapasztalatom szerint, ha a felszínmagasság különbsége meghaladja az elektródaköz (r) felét, a felszín változékonysága már nagynak tekinthető (11). Nagyon nagy szintkülönbségek esetén ugyanakkor az adatsűrűség csökkenése miatt az eljárás korlátozottan alkalmazható.

$$5r \geq Z_{max} - Z_{min} \geq \frac{r}{2} \quad (11)$$

A változékony topográfia esetén a probléma az, hogy az azonos sorszámú mélységszintekből kapott elektromos paraméterek már közel sem lesznek ugyanabban a síkban, így nem lehet belőlük interpolálni ugyanarra a mélységre vonatkozó eloszlástérképet. Ennek a bemutatására a 21. ábrán szemléltetem, mi a különbség, ha csak az automatikusan különböző mélységszintekre generált vonatkoztatási pontokból készítünk horizontális térképeket, vagy ha az általam bevezetett algoritmus által számolt helyeken lévő fizikai paraméterekből. Más lesz az információ tartalma egy-egy térképnek. Az orvostudományban a CT (számítógépes tomográfia) sem az emberi test külső formájához képest ábrázol szelettérképeket. A fejezet célja ezért annak biztosítása, hogy a korábban inverzióval előállított 3D-s adatok különböző szelvényekből származó pontjai közös, fizikailag értelmezhető horizontális rendszerbe rendezhetők legyenek.



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

A probléma feloldására egy egyszerűsített szeletelési algoritmust dolgoztam ki (Szilvási, 2023), amely a feldolgozási lépések közötti konzisztens térbeli értelmezést biztosítja. Az algoritmus (12) figyelembe veszi a pontok közötti nemlineáris mélységi eloszlást és az elektródaköz hatását. Ennek megfelelően a szeletek közötti távolság a felszín közelében kisebb, mélységben pedig fokozatosan növekszik.

$$H(i) = \frac{r}{100} * (i - 1) * (i + 4) \quad (12)$$

ahol: H : a horizontális szelvények mélysége a felszín legmagasabb pontjától számítva

i : a horizontális szelet sorszáma a felszíntől számítva

$i \in \mathbb{Z}; i \neq 1$

r : a terepen alkalmazott szomszédos elektródák távolsága

$i=1$ esetén a felszín adódna, ahol nem állnak rendelkezésre értelmezhető adatok. A szeletek számát az határozza meg, hogy milyen mélyen került még kiszámításra paraméter. Ahol már nincs megjeleníthető adat, oda már természetesen nem készül szelvény. A felszínhez közelebb a szintek között kisebb magasságkülönbségek találhatók, lefelé pedig fokozatos növekedés tapasztalható. Az algoritmusban (12) található konstans számértékek biztosítják a szeletek távolságának mélységbeli fokozatos növekedését az r elektróda távolság függvényében. Az r paraméter növekedésével a behatolási mélység is növekszik, viszont a felbontás csökken, azaz egységnyi mélységre kevesebb mintavételezési pont adódik. Emiatt a szeleteknek a relatív számát ritkítani szükséges az r növekedésével egységnyi mélységre vetítve. A szeletek meghatározása után minden (x, y, z) pontot ahhoz a horizontális síkhoz rendelem, amelynek magassága a legközelebb esett az adott pontéhoz. Így minden pont egyértelműen egyetlen szelethez tartozik, biztosítva az egységes mélységi értelmezést.

A kidolgozott szeletelési eljárás hatásának kvantitatív értékelése érdekében az eredeti és az új szeletelési rendszer összehasonlítását végeztem el. Mivel a két rendszer eltérő számú referencia-szintet tartalmaz, a közvetlen összehasonlítás érdekében a rétegindexeket normalizáltam, majd pontonként meghatároztam a relatív szeletpozíciók eltérését. A szeletindexek normalizálása a maximális szeletsorszámhoz viszonyítva történt oly módon, hogy a legkisebb sorszámú szelet a 0, míg a legnagyobb sorszámú szelet az 1 értéknek felel meg, a köztes szeletek értékei pedig a vertikális pozíciójuknak megfelelően arányosan kerülnek meghatározásra. A normalizált szeletpozíciók különbségét az alábbi módon határoztam meg:

$$\Delta i = \left| \frac{i_{ref}-1}{i_{ref,max}-1} - \frac{i_{korr}-1}{i_{korr,max}-1} \right| * (i_{ref,max} - 1) \quad (13)$$

ahol: i_{ref} : az adott pont referencia szeletindexe,

i_{korr} : az adott pont korrigált szeletindexe

$i_{ref,max}$: a referencia szeletelési rendszer maximális szeletsorszáma

$i_{korr,max}$: a korrigált szeletelési rendszer maximális szeletsorszáma.

A Δi mennyiség az adott pont relatív szeletpozíciójának eltérését fejezi ki, és biztosítja a különböző felbontású szeletelési rendszerek összehasonlíthatóságát.

A különböző elektródaközök esetén adódó szeletmélységeket a 4. táblázat foglalja össze, a (12) egyenlet alapján. A maximálisan elérhető behatolás érdekében szükséges, hogy elegendő elektródát használjunk a szelvényben, ne az legyen a szűk keresztmetszet.

4. táblázat: *H szeletelési mélységek különböző r elektródaközök esetén (szerző saját szerkesztése)*

i	H (r = 1 m)	H (r = 2 m)	H (r = 5 m)	H (r = 10 m)
2	0,06	0,12	0,3	0,6
3	0,14	0,28	0,7	1,4
4	0,24	0,48	1,2	2,4
5	0,36	0,72	1,8	3,6
6	0,5	1	2,5	5
7	0,66	1,32	3,3	6,6
8	0,84	1,68	4,2	8,4
9	1,04	2,08	5,2	10,4
10	1,26	2,52	6,3	12,6
11	1,5	3	7,5	15
12	1,76	3,52	8,8	17,6
13	2,04	4,08	10,2	20,4
14	2,34	4,68	11,7	23,4
15	2,66	5,32	13,3	26,6
16	3	6	15	30
17	3,36	6,72	16,8	33,6
18	3,74	7,48	18,7	37,4
19	4,14	8,28	20,7	41,4
20	4,56	9,12	22,8	45,6
21	5	10	25	50
22	5,46	10,92	27,3	54,6
23	5,94	11,88	29,7	59,4
24	6,44	12,88	32,2	64,4
25	6,96	13,92	34,8	69,6
26	7,5	15	37,5	75
27	8,06	16,12	40,3	80,6
28	8,64	17,28	43,2	86,4
29	9,24	18,48	46,2	92,4
30	9,86	19,72	49,3	98,6

A vizsgálható mélység a szelvényhosszhoz kötött, és a paraméterérzékenység a mélység növekedésével csökken. Ez az elektródaelrendezés típusától is függ, mivel egyes elrendezések inkább a vertikális, mások a horizontális változásokra érzékenyek.

A topográfiát figyelembe vevő szeletelési eljárás így nemcsak geometriai korrekciót jelent, hanem kulcsszerepet játszik az egyes feldolgozási lépések összekapcsolásában, mivel alapot teremt a különböző szelvényekből származó adatok konzisztens, közös térbeli értelmezéséhez. A geofizikai adatok térbeli interpolációja és szeletelése alapvető szerepet játszik a komplex felszín alatti struktúrák értelmezésében (Li és Heap, 2014).

3.7 Többparaméteres statisztikai értelmezési rendszer

A különböző mérésekből többféle fizikai paraméter határozható meg, célom ezek közötti összefüggések és mintázatok feltárása független statisztikai módszerekkel. A korábbi feldolgozási lépések célja az volt, hogy a különböző szelvényekből és módszerekből származó adatokat egységes térbeli rendszerbe rendezzem; a következő lépésben ezeknek a többparaméteres adatoknak a statisztikai alapú értelmezése következik.

3.7.1 Klaszteranalízis

A klaszteranalízis geoelektromos adatokon történő alkalmazása az utóbbi években egyre elterjedtebb, főként heterogén felszínközeli rendszerek értelmezésében (Paasche és társai., 2015). A nyékládházi esettanulmány korábbi szakaszában a hulladékaljzat és a szennyeződésterjedés kijelölése a priori küszöbértékek ($30\ \Omega\text{m}$ és $10\ \text{mV/V}$) alapján történt. A klaszteranalízis alkalmazásával a korábbi, küszöbérték-alapú lehatárolást statisztikai alapon ellenőrizhető és részben kiváltható többparaméteres csoportosítással egészítettem ki. A mért és számolt eltérő paraméterekkel jelentkező térbeli zónák csoportosítására alkalmas a klaszteranalízis. Ennek során az eljárás statisztikai alapon különböző paraméterekkel egyszerre jellemzett pontokból képez pontcsoportokat, amelyek hasonló közös karakterisztikával jellemezhetőek. A számításokat MS Excel környezetben, a Real Statistics (2025) bővítménnyel végeztem. Az inverzió után eltávolítottam a RES2DINV által generált szelvényszéli extrapolált adatokat. A vizsgálatok során a klaszterszámot $k = 3\text{--}15$ tartományban változtattam a fajlagos ellenállás és a GP tölthetőség 9630 db mérési pontjára vonatkozóan.

A klaszterezés minőségének kvantitatív értékelése érdekében a különböző klaszterszámokra kapott eredményeket *silhouette index* segítségével is elemeztem. A *silhouette index* a klasztereken belüli kohézió és a klaszterek közötti elkülönülés együttes figyelembevételével jellemzi a klaszterezés érvényességét, így alkalmas a különböző klaszterszámok összehasonlítására (Rousseeuw, 1987; Dudek, 2020). A mutató magasabb pozitív értékei jól elkülönülő klaszterstruktúrát jeleznek, míg az alacsony vagy negatív értékek a klaszterek közötti átfedés növekedésére utalnak. A klaszterszám megválasztása során nemcsak a statisztikai mutatókat, hanem a klaszterek geofizikai értelmezhetőségét is figyelembe vettem.

A fajlagos ellenállás értékei széles tartományban változnak, ezért nagy klaszterszám esetén az algoritmus elsősorban ezek szerinti felosztást végez, míg alacsony klaszterszámnál a különböző jellegű zónák összeolvadnak. A nyékládházi területen a mágneses adatok csak

egy szelvényen álltak rendelkezésre. Ezek bevonása a klaszteranalízisbe a klaszterstruktúra torzulását eredményezte, mivel a felszíni mágneses adatok nem voltak összevethetők a mélységi geoelektromos paraméterekkel.

A miskolci kutatási területen már rendelkezésemre álltak a mágneses gradiens adatok minden szelvényen. Az első kísérletben belevettem az elemzésbe a fajlagos ellenállást, a tölthetőségi és a mágneses paramétereket is. Míg az első kettő paraméter rendelkezésemre állt 3D-s adatformában, addig a mágneses adatokból csak egy felszíni 2D-s adatrendszerem volt. Ebből kifolyólag hiába rendeltem hozzá a mélyebben elhelyezkedő pontokhoz ugyanazokat a mágneses adatokat, azok ugye egyforma értékekkel rendelkeztek. A mágneses adatok 2D jellege miatt a klaszterezés során vertikális irányban mesterségesen homogén klaszterek alakultak ki. A paraméterek közötti kapcsolatok feltárására K-közép klaszterezést alkalmaztam, $k = 3-15$ tartományban. Túl alacsony klaszterszámnál (3-6) az elemzés túlságosan összevonta ebben az esetben is a látszólag is eltérő tulajdonságú értékeket, főként egy nagy és egy közepes méretű klaszterbe. Nagy klaszterszámnál (11-15) már megjelennek olyan kis elemszámú klaszterek is, amelyek már nem hordoznak érdemleges információkat. A klaszteranalízis így a különböző geofizikai paraméterek közötti kapcsolatok feltárásával hozzájárul az integrált értelmezési rendszer kialakításához, és segíti a térbeli mintázatok objektív, többparaméteres lehatárolását.

3.7.2 Korrelációvizsgálat

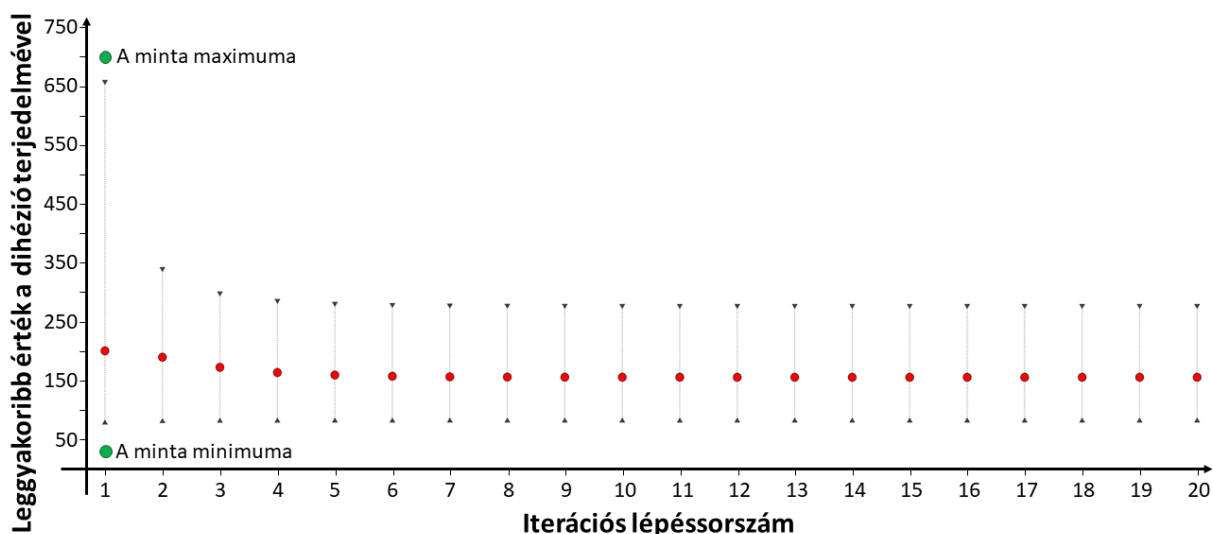
A korrelációvizsgálat célja annak feltárása volt, hogy a különböző mért és származtatott paraméterek között mutatkozik-e olyan kapcsolat, amely a klaszterezési és faktoranalízises értelmezést is alátámaszthatja. Az alsó (M_A) és felső (M_F) mérési állásokból számítottam a vertikális mágneses hatót (M_V), valamint az egymás melletti pontok között a horizontális változásokat (M_{AH} , M_{FH}). Ezeket a mágneses paramétereket korrelációs mátrix segítségével hasonlítottam össze a fajlagos ellenállás (R), a gerjesztett polarizáció (GP) és a természetes potenciál (SP) értékekkel (Szabó, 2020). Mivel a mágneses mérések felszíni adatok, ezért a korrelációvizsgálatba csak a legfelső vonatkoztatási szint paramétereit vontam be. Ezért a korrelációs mátrix előállításánál csak a legfelső vonatkoztatási szintre számolt eredmények kerültek bele. A korrelációs együtthatók a paraméterek közötti kapcsolat szorosságát jellemzik: $|r| > 0,75$ esetén erős, $|r| < 0,25$ esetén gyenge kapcsolat feltételezhető, míg a köztes tartomány közepes korrelációt jelez. Negatív előjel esetén a paraméterek ellentétes irányban változnak.

3.7.3 Faktoranalízis

Míg a klaszteranalízis a pontok csoportosítására szolgál, a faktoranalízis a paraméterek közötti közös háttérszerkezet feltárását biztosítja, ezért a többparaméteres értelmezési rendszer következő logikus lépését jelenti. A faktoranalízis alkalmazható a paraméterek közötti rejtett összefüggések feltárására, amennyiben közöttük kimutatható korreláció. Az eljárásmodot a paramétertér dimenziójának csökkentésére, a változók információtartalmának néhány fő faktorba történő összegzésével. Az elemzést MS Excel környezetben, a Real Statistics csomaggal végeztem, a nyékládházi adatrendszerre. Több faktorszám mellett is elvégeztem az elemzést, és a magyarázott variancia, valamint az értelmezhetőség alapján a háromfaktoros megoldást választottam.

3.7.4 A leggyakoribb érték módszere

Az MFV-módszer ebben a rendszerben a térbeli pontfelhők robusztus reprezentációját szolgálja, és így hidat képez a részletes pontszerű geofizikai adatok és a területi mintázatok statisztikai értelmezése között. Az MFV-módszer iteratív számításait táblázatkezelő környezetben valósítottam meg, ahol az egyes iterációs lépések egymásra épülő módon kerültek kiszámításra. A kezdeti M paramétert a minta átlagával vettem fel. Az első ε értékét a mintaterjedelem $\frac{\sqrt{3}}{2}$ -szereseként határoztam meg, amely a fix ε esetben az iteráció során állandó marad. A 22. ábrán megfigyelhető hogyan konvergál az MFV módszer segítségével a minta leggyakoribb értéke. Az ε csökkenésével az algoritmus egyre kevesebb kieső értéket vesz figyelembe. A 10. iteráció után a bemutatott mintánál már csak 0,05%-os a változás az előző iterációs lépés értékéhez képest.



22. ábra: A leggyakoribb érték (piros körlapok) és a ε értékének változása az iterációs lépések során (szerző saját szerkesztése)

Az esetleges változékony, kieső értékeket, számos pont sűrűsödést tartalmazó minták miatt 20 iterációig számoltam mindegyik esetében, mivel az $M_i - M_{i-1}$ érték kellően kicsi volt minden esetben. A fix ε -os esetben már az 5. iteráció után konvergált az iteráció minden esetben.

A horizontális eloszlástérképek előállításához a vizsgálati területet szabályos rácshálóval osztottam fel, és az egyes cellákba eső pontokat tekintettem külön mintáknak. A pontsűrűség és eloszlás általában egy multielektrodás mérésnél inverzió után heterogén. A nyékládházi adatrendszerem esetében egy megoldást kellett keresni, hogyan lehetne az MFV módszert megfelelően használni, a 9862 térbeli ponthoz kapcsolt geofizikai paraméterekből mintákat kiválasztani. Az egyes cellákon belüli pontok fizikai paramétereit az adott cella reprezentatív értékének meghatározására használtam az MFV-módszerrel. Az egy cellán belüli pontokat tekintettem különálló mintáknak, amelyeken elvégeztem az MFV módszert, mind a fajlagos ellenállás, mind pedig a GP értékekre. A módszer érzékenységét különböző cellaméretek (20×20 m, 10×10 m, 5×5 m) mellett vizsgáltam. A kisebb cellák csökkent mintaszámot eredményeztek, ami növeli a kieső értékek hatását és csökkenti az MFV alkalmazhatóságát. Kis elemszám (< 6) esetén az MFV-bebecslés instabillá válhat, ezért szükséges a felbontás és a mintaszám közötti kompromisszum meghatározása.

A fix ε alkalmazása stabilabb, kevésbé zajérzékeny eredményeket ad, ugyanakkor a lokális anomáliák részben elnyomásra kerülhetnek. Ebben az esetben az MFV kvázi robusztus átlagként viselkedik, amely a domináns zónák jellemzésére alkalmas.

Az iteratívan változó ε alkalmazása esetén az algoritmus minden iterációban újraszűri a mintát, így a becslés a domináns érték felé konvergál. Az előző robusztus átlagképzéshez képest itt már ténylegesen az adott mintában található legjellemzőbb érték felé konvergál az algoritmus, kevésbé lesz csillapítva a minta többi értékétől. Az iteráció előrehaladtával egyre szűkebb tartomány kerül hangsúlyozásra, ami medián jellegű viselkedést eredményez, és a részhalmazon kívüli elemeket túlságosan ki is zárhatja. Ez befolyásolható egy ε alsó korláttal, aminek a vizsgálatára a dolgozatban nem tértem ki. Az MFV-módszer bizonyos értelemben a klaszteranalízishez hasonló, azonban nem a klaszterek közötti különbségeket, hanem az egyes zónákon belüli domináns értékeket emeli ki.

3.8 GP időállandó-spektrum alapú minősítési megközelítés

A korábbi feldolgozási lépések során a geoelektromos és statisztikai módszerekkel a térbeli szerkezet és a paraméterek közötti kapcsolatok kerültek feltárásra. A jelen fejezet célja ezek kiegészítése a GP-idősorok spektrális alapú értelmezésével, amely a polarizációs

mechanizmusok fizikai elkülönítését segíti elő. Az alkalmazott szoftver a GP-idősorokat pontonként dolgozza fel. Minden mérési pont esetében a bemeneti adat a polarizálhatóság időfüggése, amely előre meghatározott időpontokban áll rendelkezésre. Ezek az adatok képezik az inverzió megfigyelési vektorát. A modellparaméterek az időállandó-tartomány előre rögzített felosztásához tartozó WAV-értékek, amelyeket a továbbiakban a k relaxációs időskála-index jelöl. A teljes relaxációs időtartomány (0,01–1 s) öt részintervallumra ($k = 1–5$) lett felosztva, ahol az alacsonyabb k értékek rövid, a magasabbak hosszú időállandójú folyamatokat reprezentálnak. Minden időskála-intervallumhoz egy pozitív amplitúdó (WAV) tartozik, amely kvantitatívan fejezi ki az adott tartomány hozzájárulását a GP-lecsengéshez. Az inverzió iteratív, nemlineáris eljárással történik, amely lineárizált lépések sorozatán alapul. A stabilitás érdekében a számítás logaritmikus paramétertérben zajlik, valamint regularizáció biztosítja a fizikailag értelmezhető megoldást.

A WAV-paraméterek különböző időállandó-tartományokhoz köthető fizikai folyamatokat reprezentálnak. A rövid időállandókhoz tartozó komponensek jellemzően gyors lecsengésű folyamatokat (pl. ionos vezetés, pórusfolyadék-hatások) jeleznek. A közepes tartomány a membránpolarizációhoz és a szemcsehatár menti töltésfelhalmozódáshoz köthető, míg a hosszú időállandók elektrokémiai, redox jellegű folyamatokra és potenciális szennyezőanyag-jelenlétre utalhatnak. Ez teszi a módszert kifejezetten alkalmassá környezeti alkalmazásokra. A WAV-paraméterek mértékegysége megegyezik a polarizálhatóság mértékegységével (mV/V vagy dimenziótlan), így közvetlen fizikai értelmezésük lehetséges.

Az inverzió eredményeként minden mérési ponthoz öt WAV-paraméter tartozik, amelyek külön-külön térképezhetők horizontális és vertikális szelvényeken. A szelvényes ábrázolás módot ad annak a vizsgálatára, hogy a polarizációs válasz jellege miként változik az időállandó függvényében. Ez pedig segít elkülöníteni azokat a zónákat, amelyek hasonló vezetőképességi tulajdonságokkal rendelkeznek, de eltérő GP-spektrális viselkedést mutatnak. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy egy adott anomália megjelenhet például csak a hosszú időállandókhoz tartozó WAV-szelvényeken, míg a rövid időtartományokban csupán alig észlelhető. Az ilyen jellegű viselkedés erős indikátora lehet bizonyos anyagtipusoknak vagy szennyezési folyamatoknak.

Az inverzió során minden ponthoz illeszkedési mutató és kondíciószám tartozik, amelyek alapján a megbízhatatlan eredmények kiszűrhetők. Ezek az értékek lehetőséget adnak az eredmények szűrésére és minőségellenőrzésére. Csak azok a pontok kerülnek további értelmezésre, amelyek esetében az illeszkedés megfelelőnek tekinthető. Ez a lépés terepi

adatok esetén fontos, ahol a zaj, a mérési bizonytalanságok és a heterogén közeg hatásai számottevőek lehetnek.

A módszert a nyékládházi területen, négy párhuzamos szelvény GP-idősorain alkalmaztam. Ebben az esetben a topográfiát nem vettem figyelembe, mivel a cél a módszer működésének demonstrálása volt.

Bár az abszolút WAV-amplitúdók több mint egy nagyságrenddel (0,18-as és 2,4-es maximumok) eltérnek a rövid ($k = 1$) és a hosszú ($k = 5$) relaxációs tartományok között, ezek az értékek közvetlenül nem összehasonlíthatók. Ehelyett az értelmezés az egyes relaxációs intervallumokon belüli térbeli eloszlásra és relatív kontrasztokra összpontosít, alapvetően eltérő polarizációs mechanizmusokat feltárva. Ugyanazt a földtani rendszerből visszaérkező jelet vizsgáljuk, de nem egyetlen „hangerővel”, hanem különböző időskálákra hangolt szűrőkön keresztül. Ez hasonló ahhoz, mintha egy zeneművet külön-külön hallgatnánk meg mély, közép és magas hangokra bontva. A módszer segít kialakítani egy, az előző analógiával élve „abszolút hallás”-t, ami több földtani információt tud biztosítani számunkra. A kapott térbeli pontokból mind az 5 db k relaxációs időskála-index esetében vertikális és horizontális szelvényeket is készítettem.

A különböző időállandó-tartományokhoz tartozó WAV-paraméterek amplitúdója eltérő nagyságrendben változik, ezért azok közvetlen összehasonlítása torz eredményhez vezethet. Ennek oka, hogy a nagyobb időállandókhoz tartozó komponensek általában nagyobb abszolút értékeket mutatnak, így a nyers amplitúdók alapján végzett dominanciaelemzés nem tükrözi megfelelően a különböző polarizációs mechanizmusok relatív jelentőségét. Ennek kiküszöbölésére az adatokat időablakonként standardizáltam. A standardizálás során minden időablakra ($k = 1-5$) külön-külön meghatároztam az adott adatsor átlagát és szórását, majd az egyes pontokhoz tartozó WAV-paramétereket az alábbi módon transzformáltam:

$$Z_k = \frac{WAV_k - \overline{WAV}_k}{\sigma_k} \quad (14)$$

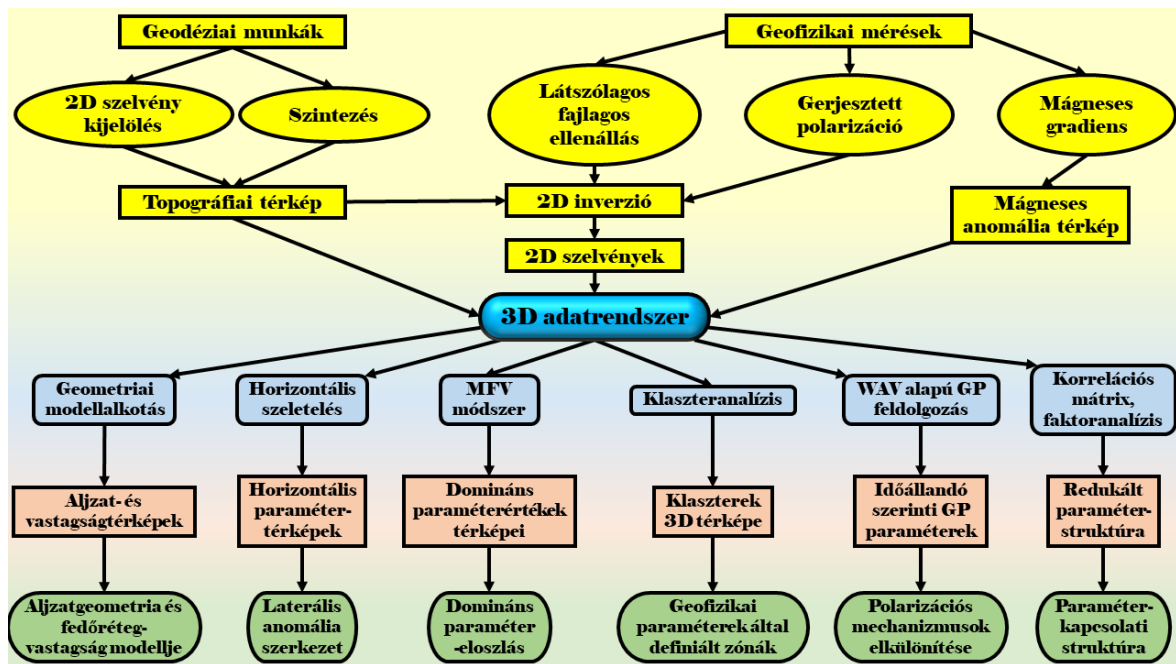
ahol WAV_k az adott pont WAV-paramétere az adott időállandó-tartományban, $\overline{WAV}_k$ az adott időablak átlaga, σ_k pedig annak szórása. A standardizált Z_k értékek az adott pont relatív eltérését fejezik ki az adott időállandó-tartomány átlagától. Ezáltal az egyes időablakok közötti összehasonlítás az eltérő amplitúdóskálák hatásától függetlenül, az adott eloszláson belüli relatív kiemelkedés alapján történik. A domináns időállandó-tartományt minden pontban a legnagyobb Z_k értékhez tartozó k index alapján határoztam meg. Ez az eljárás biztosítja, hogy az egyes időállandó-tartományok térbeli szerepe és relatív jelentősége torzításmentesen összehasonlítható legyen.

Ez a megközelítés közvetlen kapcsolatot teremt a GP-idősorok spektrális jellemzői és a korábban bemutatott térbeli és statisztikai értelmezési lépések között, így komplexebb képet ad a vizsgált terület fizikai és környezeti folyamatairól.

3.9 Integrált értelmezési keretrendszer

A bemutatott módszerek nem önálló feldolgozási lépésekként, hanem egymásra épülő, integrált értelmezési rendszerként kerültek alkalmazásra. A kutatás célja nem egyetlen geofizikai paraméter értelmezése volt, hanem a különböző mérési és feldolgozási eljárások kombinált felhasználásával egy konzisztens, többparaméteres térbeli modell létrehozása. A feldolgozási folyamat a mérési tervezéstől és adatgyűjtéstől indul, amelyben a geodéziai és geofizikai mérések együttesen biztosítják a megfelelő geometriai és fizikai alapadatokat. A 2D inverzió eredményeként előálló szelvények képezik az elsődleges interpretációs alapot, amelyekből egységes 3D adatbázis kerül kialakításra. A további feldolgozási lépések már erre az egységes térbeli adatrendszerre épülnek. A horizontális szeletelési algoritmus megkönnyíti a különböző szelvényekből származó adatok közös mélységi értelmezését, míg a geometriai modellalkotás a hulladéktest és az aljzat térbeli lehatárolását támogatja. Az MFV módszer robusztus módon emeli ki az adott zónák domináns fizikai paramétereit, csökkentve a lokális kieső értékek hatását. A többparaméteres statisztikai eljárások (klaszteranalízis, korrelációvizsgálat, faktoranalízis) a térbeli adatrendszer belső szerkezetének feltárását segítik, míg a WAV-alapú GP feldolgozás a polarizációs folyamatok időállandó szerinti elkülönítésével további fizikai információt biztosít. Ezek az eljárások egymást kiegészítve járulnak hozzá a különböző szerkezeti és anyagbeli zónák elkülönítéséhez.

Az egyes feldolgozási lépések eredményeinek integrációja alapján lehetővé válik a hulladéktest, a potenciálisan szennyezett zónák és a háttérterületek térbeli lehatárolása. Fontos kiemelni, hogy az egyes módszerek nem helyettesítik, hanem erősítik egymást: míg a fajlagos ellenállás elsősorban a geometriai viszonyokra érzékeny, addig a GP és a spektrális feldolgozás a kémiai és szerkezeti különbségeket emeli ki, a statisztikai módszerek pedig ezek kombinált mintázatait teszik értelmezhetővé. A módszertani rendszer működését és az egyes feldolgozási lépések közötti kapcsolatot a 23. ábra szemlélteti. Az ábra rávilágít arra, hogy a feldolgozás egy többfázisú, hierarchikus rendszerként értelmezhető, amelyben a különböző eljárások egymásra épülése révén csökkenthető az interpretációs bizonytalanság, és növelhető az eredmények konzisztenciája.



23. ábra: Az alkalmazott integrált geoelektromos feldolgozási és értelmezési rendszer felépítése és az egyes módszertani lépések kapcsolatrendszere (szerző saját szerkesztése)

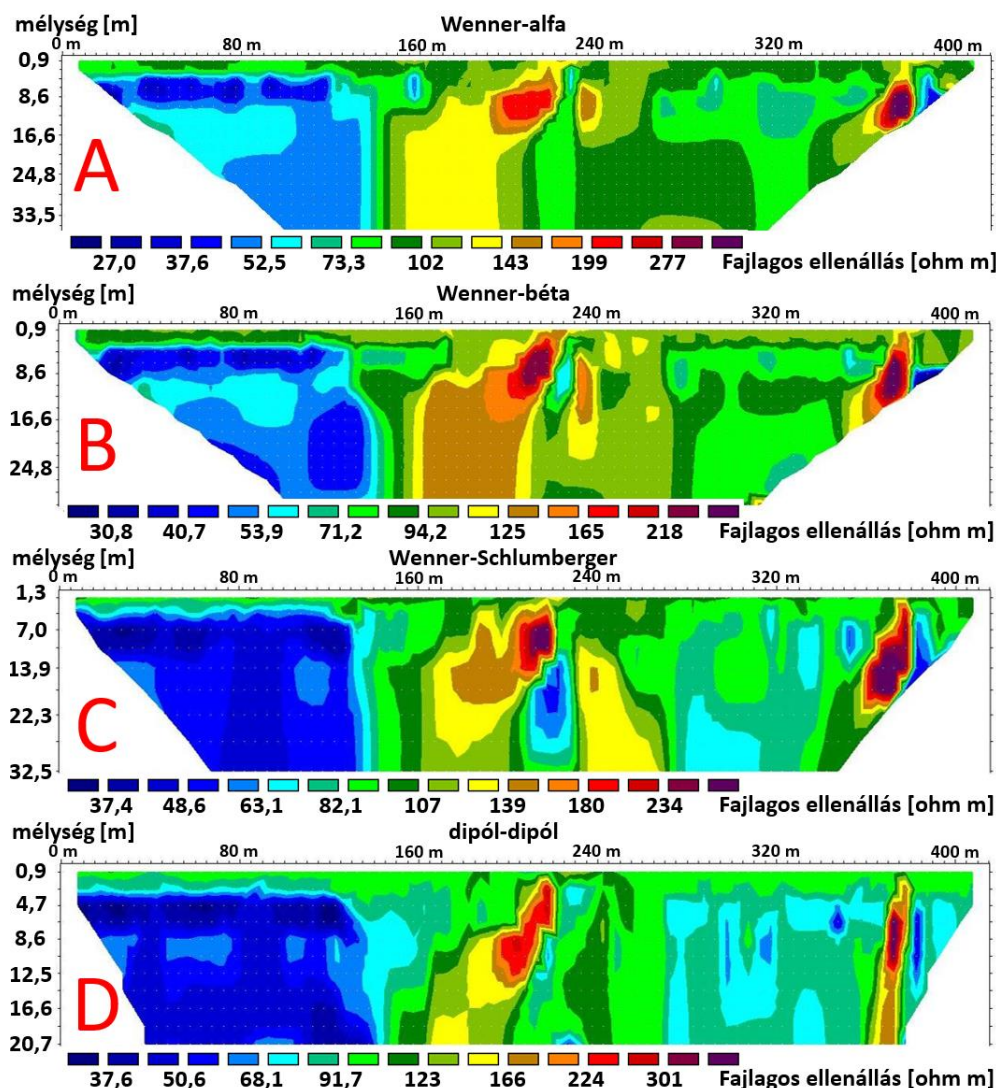
Az így kialakított integrált megközelítés nemcsak a jelen vizsgálatra alkalmazható, hanem általánosítható komplex, heterogén felszínközeli rendszerek vizsgálatára is, főként környezetföldtani problémák esetén. A bemutatott integrált feldolgozási rendszer képezi az 5. tézisem alapját, amely szerint az egymásra épülő módszertani lépések alkalmazása csökkenti az értelmezési bizonytalanságot és konzisztensebb térbeli modellekhez vezet. A geofizikai módszerek közvetlen anyagazonosításra nem alkalmasak, ezért az értelmezések minden esetben fizikai paraméterekből levont, valószínűségi alapú következtetéseknek tekintendők.

4. A módszertan validálása különböző felszín alatti rendszereken

A módszertani fejezetben bemutatott, egymásra épülő feldolgozási és értelmezési lépések (3.9. fejezet, 23. ábra) validálása érdekében az alábbiakban különböző felszín alatti rendszereken vizsgálom az egyes módszerelemek alkalmazhatóságát. Első lépésként egy kontroll geológiai modellen elemzem az elektródaelrendezések teljesítményét, kimondottan azért, hogy a módszertani rendszer egyes elemei milyen mértékben járulnak hozzá a felszín alatti struktúrák megbízható azonosításához.

4.1 Kontroll geológiai modell – paraméterérzékenységi eredmények

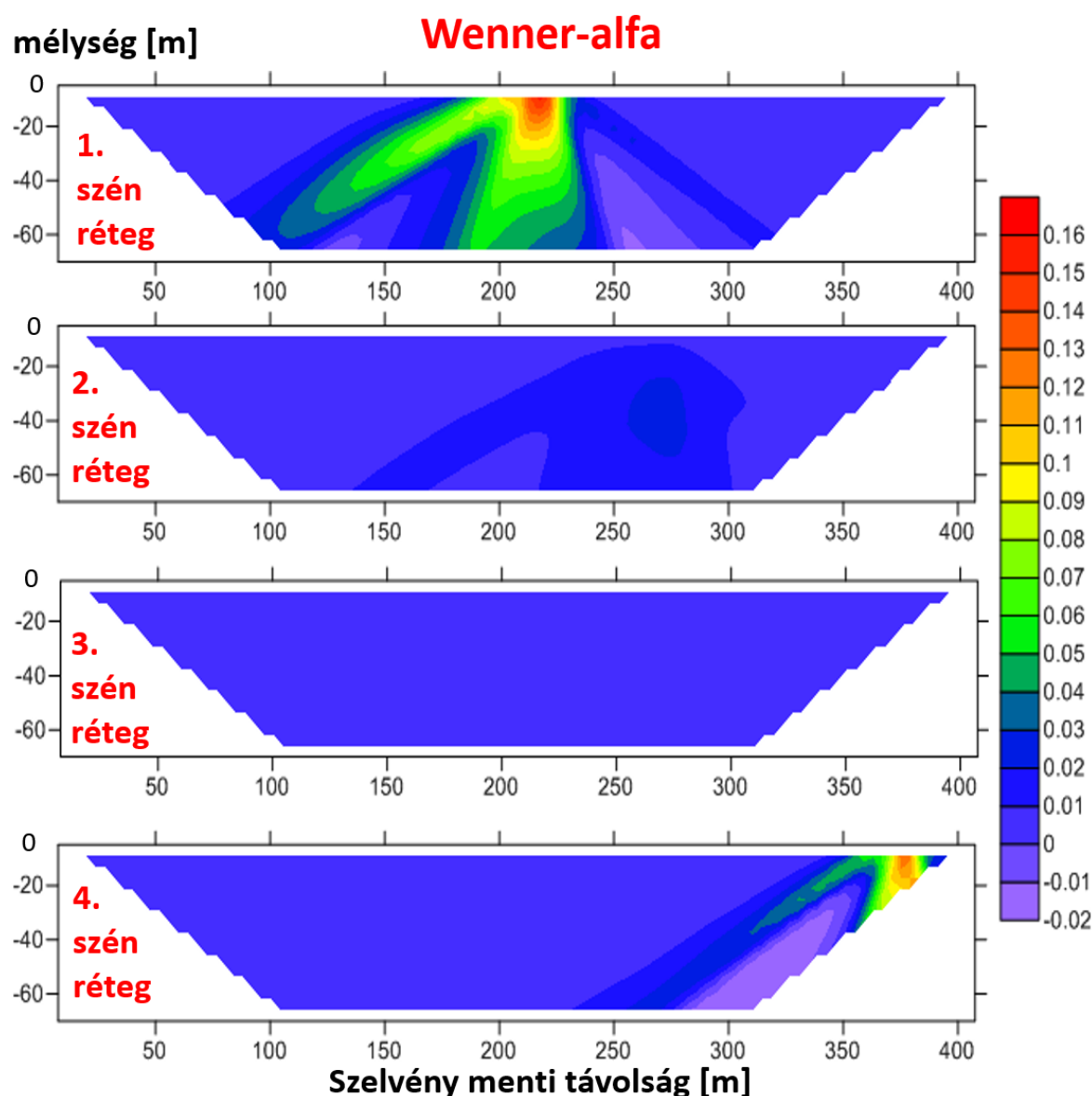
A RES2DINV szoftverrel inverziót végeztem annak vizsgálatára, hogy a modellben szereplő szénrétegek a mérési adatokból rekonstruálhatók-e. A négy különböző elektródaelrendezéshez tartozó inverziós eredményeket a 24. ábra mutatja.



24. ábra: A 4 különböző elektródaelrendezésben vizsgált előremodellezést követő inverziós eredmények a fajlagos ellenállásra A: Wenner-alfa; B: Wenner-béta; C: Wenner-Schlumberger; D: Dipol-Dipol (szerző saját szerkesztése)

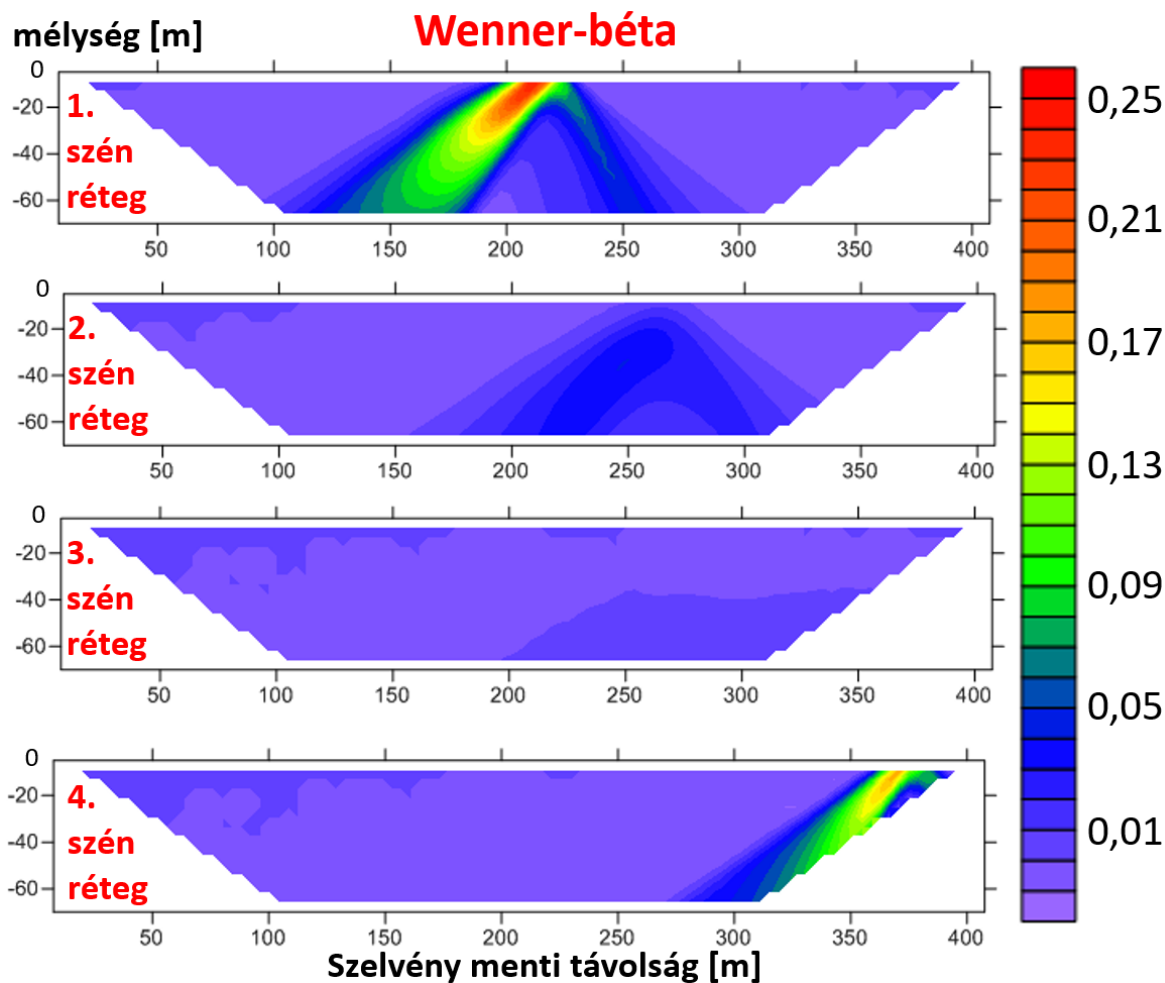
A paraméterérzékenységet úgy vizsgáltam, hogy a négy szénréteg (11. ábra) ellenállását egyenként módosítottam, és elemeztem a hatásukat a feltérben, különböző elektródaelrendezések esetén.

Annak értéke a Wenner-alfa elrendezésnél nem kifejezetten magas, de azért számottevő érzékenységet (0,16) mutat (25. ábra), főként az első és negyedik szénrétegnél, bár még a második szénrétegnél keletkezett anomáliának az alakja hasonló az előző kettőéhez, viszont értéke csaknem egy nagyságrenddel alacsonyabb. A tesztmodell képében (17/A ábra) látható kettős irányultság (a jobb és a bal alsó sarokba tartó), a szénrétegek dőlése miatt főképp csak az egyik irányban fedezhetők fel, viszont ott is kétfelé szakad a paraméterérzékenységi csúcsosodás, de nagyjából egy irányba. Rétegdőlésre megközelítőleg adhat ugyan jó eredményt, de ennek precizitása ugyanakkor megkérdőjelezhető.



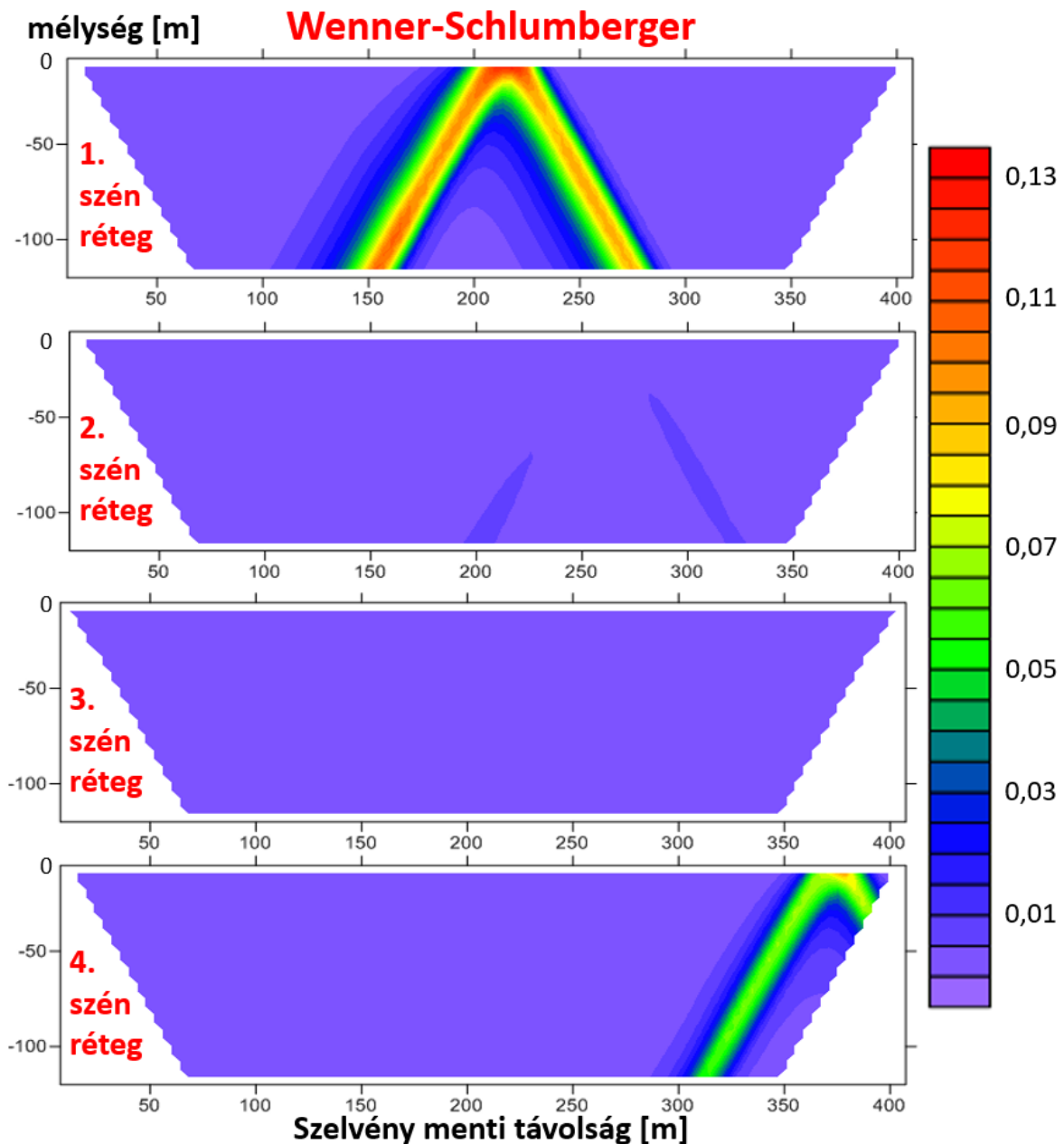
25. ábra: Az első 4 szénréteg paraméterérzékenysége külön-külön Wenner-alfa elrendezésben (szerző saját szerkesztése)

A Wenner-béta elrendezésnél már relatíve magas érzékenységi értékek (0,25) adódnak (26. ábra). Az első és a negyedik szénréteg nagyon érzékeny, de a többi módszerhez képest a 2. szénréteg is meghatározó (0,05) érzékenységgű, míg a harmadik réteg, itt sem érzékeny annak mélyebb elhelyezkedése miatt. A tesztmodellhez (17/B ábra) képesti összehasonlítás alapján itt is látható, hogy amerre az adott réteg dől, csak azok a területek érzékenyek nagyon. A Wenner-alfához képest itt az érzékenységi anomália nem szakad még újabb kétfelé, ebből adódóan pedig a dőlt réteg jól kimutatható.



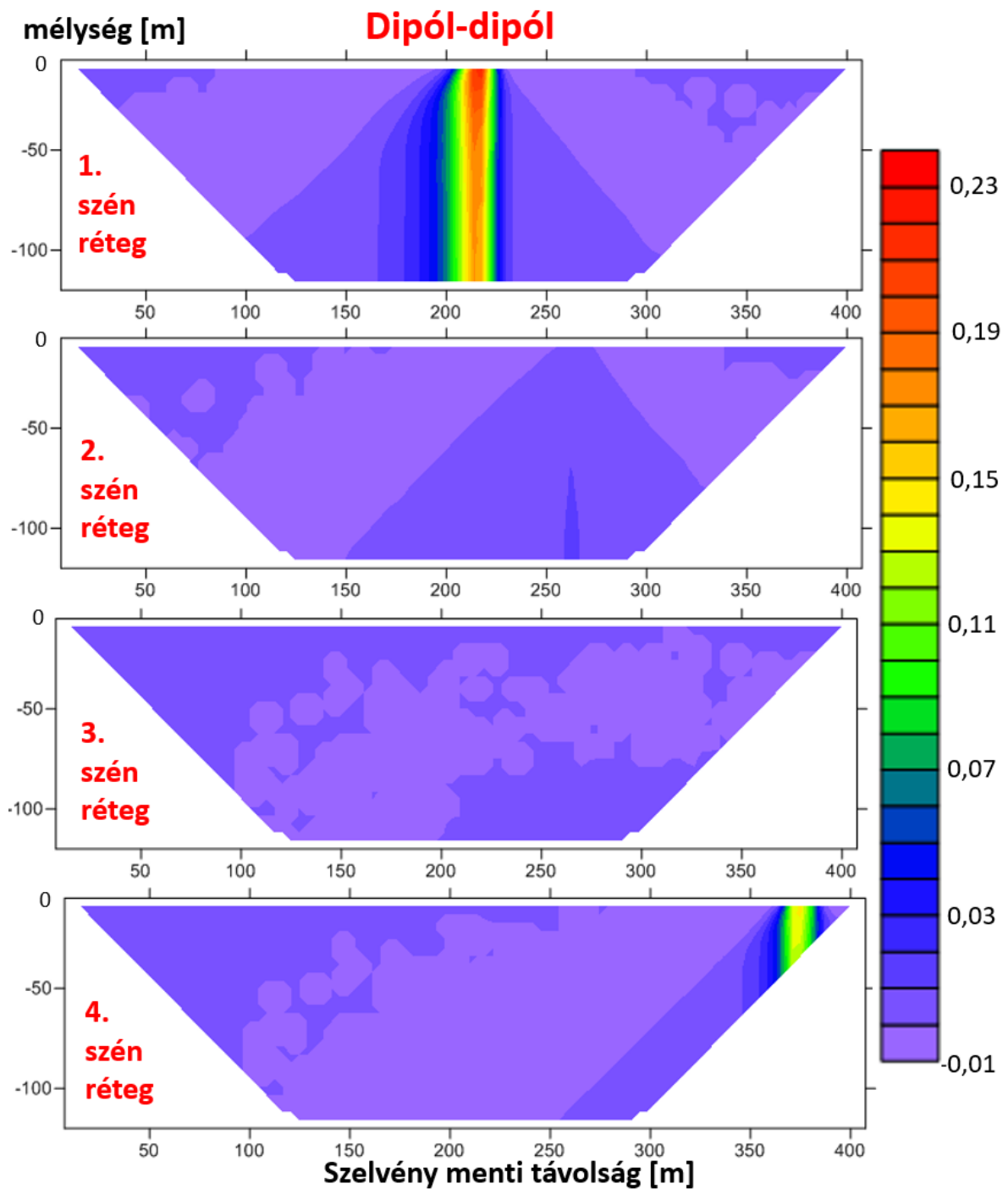
26. ábra: Az első 4 szénréteg paraméterérzékenysége külön-külön Wenner-béta elrendezésben (szerző saját szerkesztése)

A Wenner-Schlumberger elrendezés esetén tapasztalható a legkisebb maximumú (0,13) paraméterérzékenység a 4 módszer közül (27. ábra). Az első és a negyedik szénréteg a másik kettőhöz képest nagyon domináns. A tesztmodellben (17/C ábra) tapasztalható fordított „V” alak a réteg dőlése ellenére is megmarad a szelvényeken, ezért a dőlt rétegek nehezen mutathatók ki ezzel a módszerrel, mert a látszólagos fajlagos ellenállás nemcsak a réteg dőlésének irányában változik meg, hanem arra 60°-os irányban is képez egy ugyanolyan erősségű látszólagos elváltozást, ami veszélyes lehet.



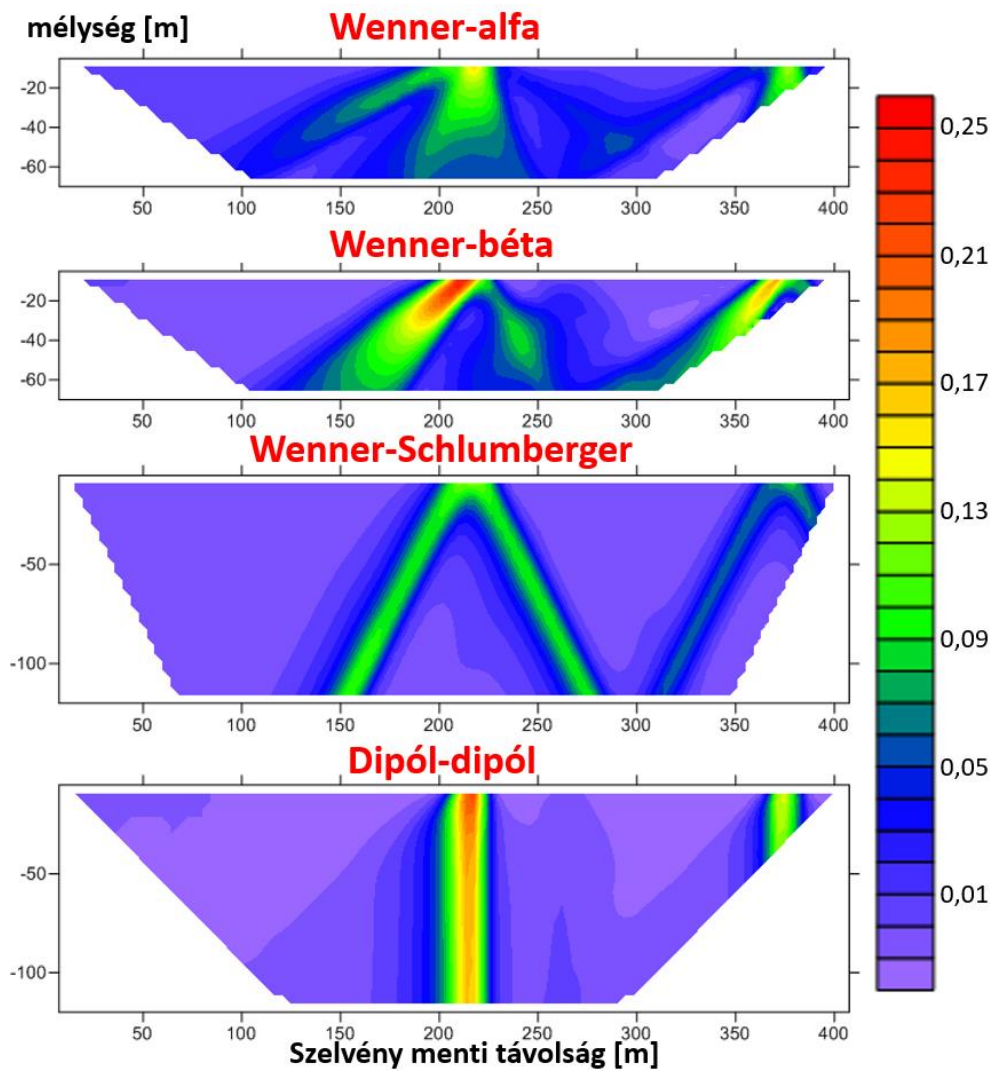
27. ábra: Az első 4 szénréteg paraméterérzékenysége külön-külön Wenner-Schlumberger elrendezésben (szerző saját szerkesztése)

A dipól-dipól módszernél szintén egy erősebb érzékenységi maximum érték (0,23) tapasztalható (28. ábra). A tesztmodellből (17/D ábra) látszik, hogy a ható az alatta lévő területet befolyásolja érzékenységre. A szelvényeken viszont az látható, hogy ezt a „csóvát” a rétegdőlés irányában meghajlítja, csak azért nem látszik a réteg mentén végig, mert minél mélyebben vagyunk annál érzéketlenebb, és a kisebb értékek már nem láthatók dominánsan. A réteg dőlésének indulását jó irányban érzékeli, viszont annak a lefelé történő folytatását már nem kellőképpen.



28. ábra: Az első 4 szénréteg paraméterérzékenysége külön-külön dipól-dipól elrendezésben (szerző saját szerkesztése)

Az összes szénréteg együttes vizsgálata alapján (29. ábra) a Wenner-béta és a dipól-dipól elrendezések mutatják a legnagyobb paraméterérzékenységet.



29. ábra: A négy elektródaelrendezés összes szénrétegének paraméter érzékenysége (szerző saját szerkesztése)

Az első és a negyedik szénréteg minden elrendezés esetében jól kimutatható. A dőlés legjobban a dipól–dipól és a Wenner-béta elrendezésekben jelenik meg. A második réteg már csak a Wenner-béta (és részben a Wenner-alfa) esetében azonosítható megbízhatóan, míg a Wenner–Schlumberger és a dipól–dipól elrendezésekben gyengén vagy egyáltalán nem jelenik meg. A harmadik, mélyebb szénréteg egyik elrendezésnél sem mutatható ki, ami a módszer mélységgel csökkenő érzékenységét igazolja. A vizsgálatok alapján a szénrétegek kimutatására a Wenner-béta elrendezés javasolható hasonló geológiájú területeken. Amennyiben a rétegdőlés pontos meghatározása is cél, a dipól–dipól elrendezés kiegészítő alkalmazása indokolt. A Wenner–Schlumberger elrendezés alkalmazása nem javasolt dőlt rétegek esetében, mivel a jellegzetes „V” alakú érzékenységi mintázat félreértelmezhető szerkezetet eredményezhet. Az így meghatározott optimális mérési elrendezések közvetlen alapot biztosítanak a következő alfejezetekben bemutatott valós terepi adatok értelmezéséhez.

4.2 Vezetőképességi változások vizsgálata – egy zagytározó környezete

A kontroll modellen végzett validációt követően az integrált módszertani rendszert (3.9 fejezet, 23. ábra) egy valós, környezeti szennyezéssel érintett területen is alkalmaztam. Ebben az esetben a vizsgálat fókuszában a vezetőképességi változások állnak, amelyek alkalmasak a szennyezőanyag-terjedés térbeli követésére, és lehetőséget adnak a módszer terepi környezetben történő értékelésére.

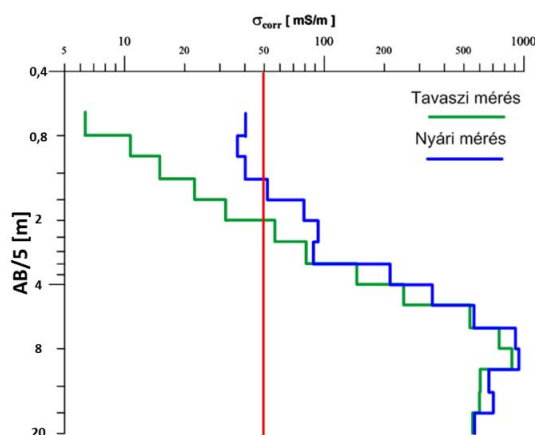
Összesen 22 mérési ponton (30. ábra) lett végezve VESZ és GP mérés Schlumberger elektrodaelrendezésben (Kearey et al., 2002), $AB_{min} = 4-100$ m tartományban (AB: a két tápelektroda közti távolság). A GP mérések során 15 mélységszinten, négy időpillanatban (0,1; 0,3; 0,9; 1,5 s) lett rögzítve a lecsengő jel a gerjesztő áram kikapcsolása után.



30. ábra: A geoelektromos mérések elhelyezkedése a zagytározó környezetében (szerző saját szerkesztése)

4.2.1 Időbeli összehasonlítás mérési pontonként

A 13. mérési pont példáját a 31. ábra mutatja. A piros vonal az 50 mS/m-es küszöbértéket jelöli, amely felett az altalaj már erősen szennyezettnek tekinthető.

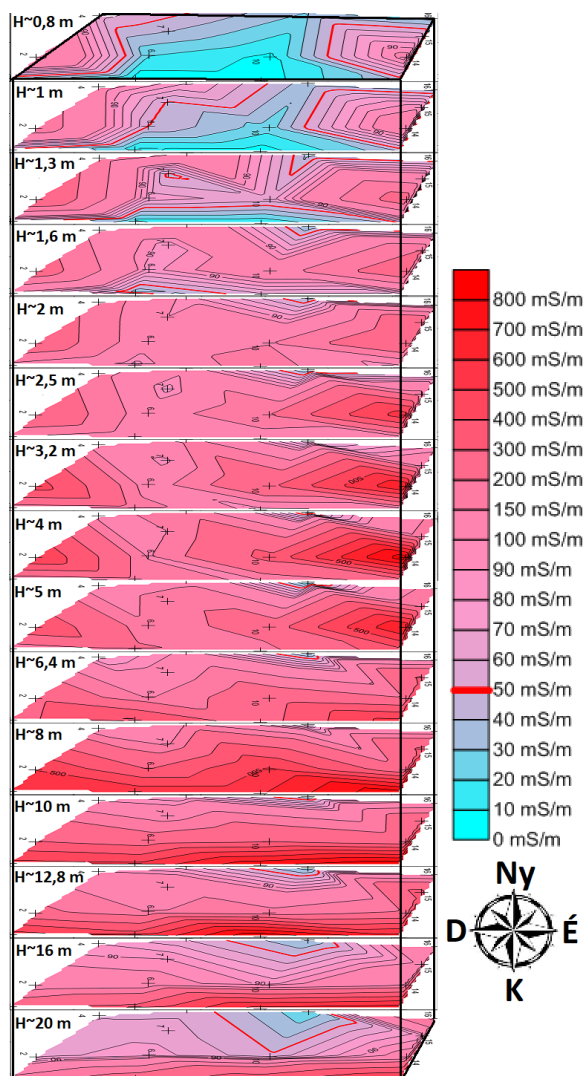


31. ábra: A látszólagos vezetőképesség mértéke a 13. mérési ponton (szerző saját szerkesztése)

A tározóhoz közeli mérési pontnál a vezetőképesség ~ 8 m mélységben maximumot mutat, ami a szennyezőanyag kiáramlására utal.

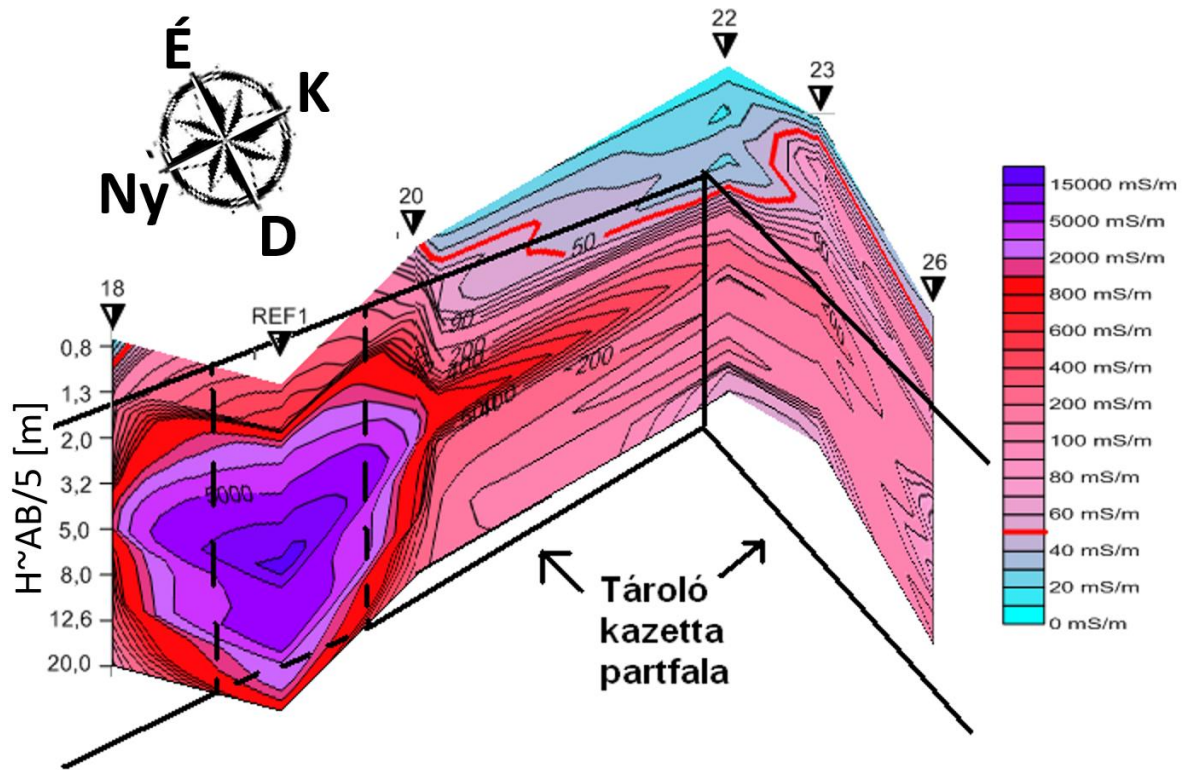
4.2.2 A vezetőképesség térbeli ábrázolása

A többi mérési pontnál is megfigyelhető a vezetőképesség növekedése, amely a tározótól távolodva csökken. A magassági adatok hiánya miatt a korábban bemutatott topográfia-korrigált szeletelési módszer itt nem volt alkalmazható. A Schlumberger elrendezésnél a vizsgálati mélység közelítőleg az $AB/5$ értéknek felel meg, így 15 mélységszinten álltak rendelkezésre adatok. Ezekből az adatokból 15 mélységszinten vezetőképességi térképeket készítettem krigeléssel (32. ábra). A legmagasabb vezetőképességű zónák a keleti oldalon jelennek meg, főként ~ 8 – $12,8$ m mélységben.



32. ábra: A vezetőképesség térbeli eloszlása mélységszintenként megjelenítve a kazetta keleti oldala melletti terület alatt (szerző saját szerkesztése)

A REF1 pont a tározó belsejében szolgált referenciaértékként, míg a REF2 (30. ábra területétől ~300 m nyugatra található) pont a háttér (nem szennyezett) viszonyokat reprezentálta. Az axonometrikus ábrázolás (33. ábra) jól mutatja a vezetőképesség térbeli csökkenését a tározótól távolodva. A tározóban mért magas vezetőképességű anyagok fokozatos kiáramlása egyértelműen kimutatható a környező rétegekben is.



33. ábra: A REF1 referencia pontot tartalmazó szelvény alatt a vezetőképesség mélységi eloszlása (szerző saját szerkesztése)

A geoelektromos módszer a vezetőképességi kontrasztokon keresztül hatékonyan képes a szennyezőanyag-terjedés térbeli követésére, ami közvetlen kapcsolatot teremt a módszertani fejlesztések és a környezeti alkalmazások között.

4.3 Diffúz szennyezési környezet – rekultivált hulladéklerakó

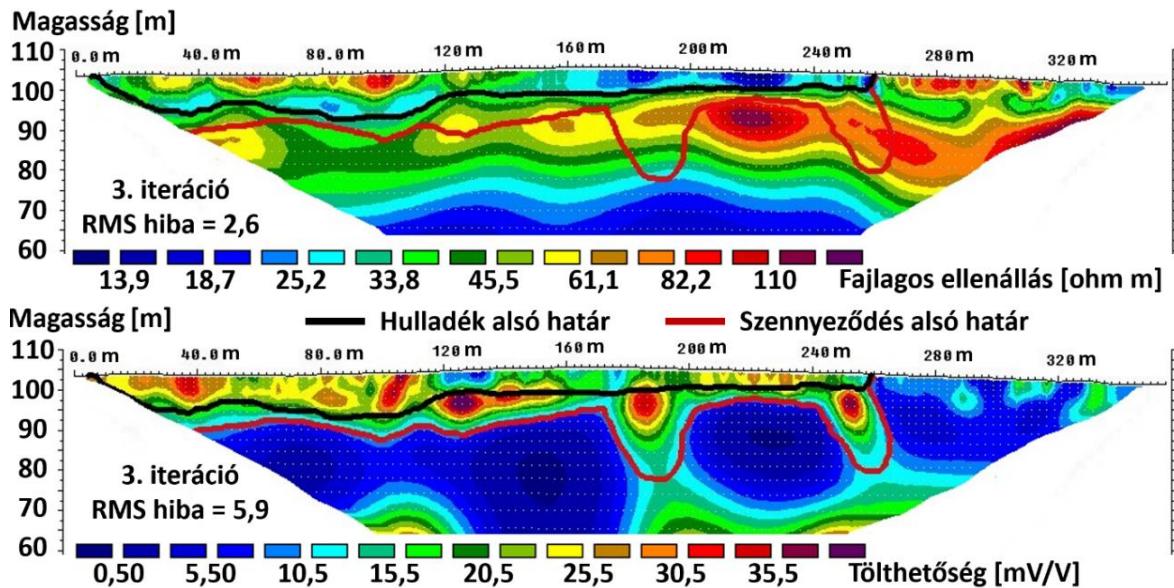
A kontroll modellen és az egyszerűbb terepi validációs példán bemutatott eredményeket követően az integrált módszertani rendszer egy összetettebb, diffúz szennyezési környezetben kerül alkalmazásra (3.9. fejezet, 23. ábra). Ebben a fejezetben már nem egy-egy módszerelem, hanem a teljes feldolgozási és értelmezési folyamat együttes alkalmazása valósul meg. A cél annak vizsgálata, hogy a fajlagos ellenállás és a gerjesztett polarizáció kombinált értelmezésével miként határozható le a hulladéktest, valamint az ahhoz kapcsolódó szennyeződésterjedés térbeli kiterjedése.

4.3.1 2D-s vertikális szelvények elemzése

Az inverzió után kapott vertikális szelvényeken a színskála mindig az adott szelvény minimum és maximum értékeihez igazodik, ami az egyes anomáliák helyi elkülönítését segíti. Az egyes szelvények közvetlen összehasonlítása így korlátozott, ezért a későbbi feldolgozási lépésekben abszolút színskálát is alkalmaztam (45–46. ábrák).

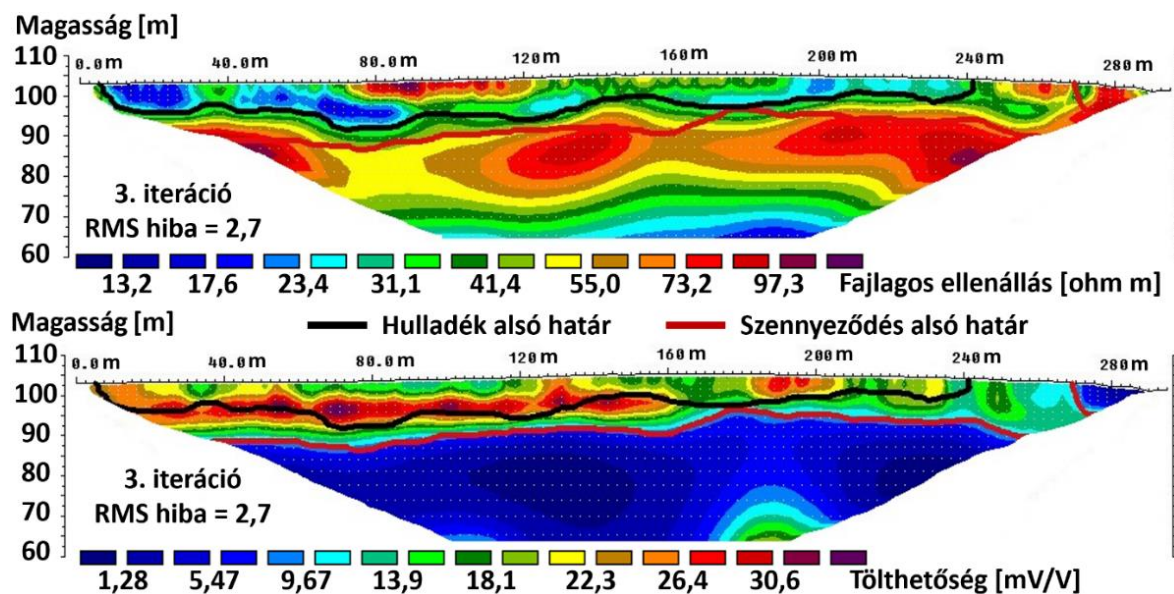
A hulladéktest a fajlagos ellenállás-szelvényeken jellemzően alacsony fajlagos ellenállású zónaként jelenik meg. A priori információk alapján a hulladék egy korábbi kavicsbánya aljzatába került, amely alatt természetes vízzáró agyagréteg található. Ennek megfelelően a kavicsréteg magasabb, az agyag alacsonyabb fajlagos ellenállással jellemezhető. A GP tölthetőségi szelvényeken a tiszta kavicsréteg alacsony értékű, míg a hulladéktest és a csurgalékvíz által érintett kavicszónák magasabb tölthetőséget mutatnak. A közös értelmezés érdekében a hulladéktest becsült alsó határát 30 Ωm , a potenciálisan szennyezett zóna alsó határát 10 mV/V küszöbérték alapján jelöltem ki, és mindkét paraméter szelvényein feltüntettem. A nyári, száraz időszak miatt a felső talajrétegek fajlagos ellenállása megemelkedett, ami elsősorban a szelvények legfelső részén jelentkezik.

Az 1. szelvényen a hulladéktest az első 260 m-en követhető, 5–12 m vastagságban, míg a szennyezett zóna helyenként 15 m mélységig terjed (34. ábra). A 190 m és 250 m környezetében lokális, mélyebbre hatoló szennyeződési gócok is megjelennek.



34. ábra: Az 1. szelvény inverziós modellje. Félül a fajlagos ellenállás, alul a gerjesztett polarizáció tölthetőségi eloszlása látható. A fekete vonal a hulladéktest becsült alsó határát, a piros vonal a potenciálisan szennyezett feltételezett alsó határát jelöli. (szerző saját szerkesztése)

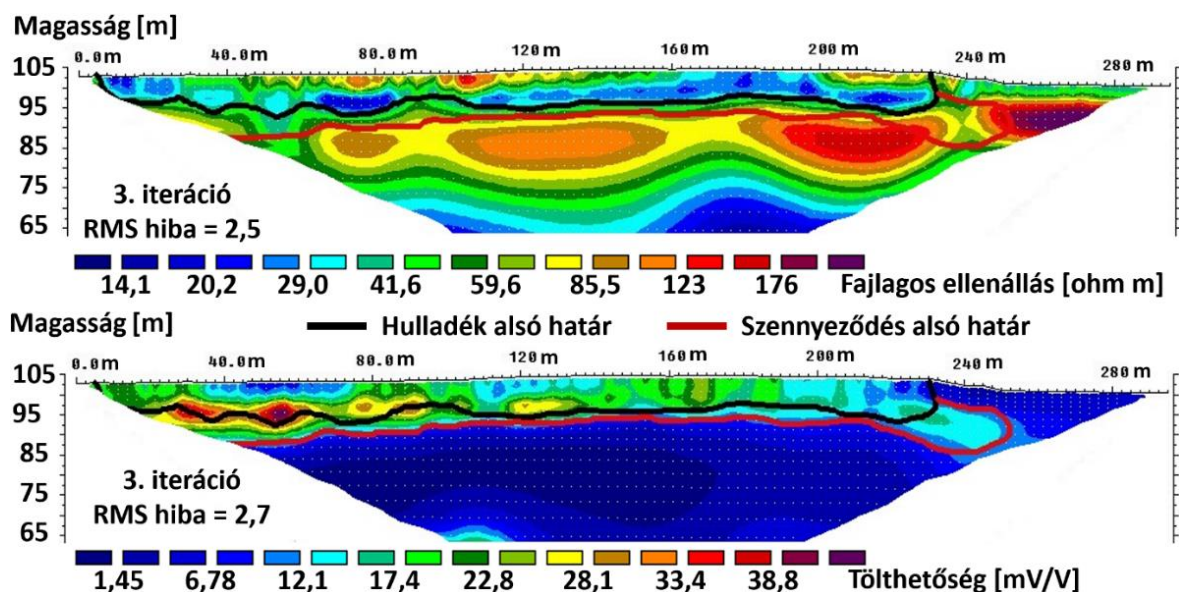
A 2. szelvényen a hulladéktest mintegy 240 m hosszan követhető, jellemzően 5–10 m mélységig (35. ábra). A GP szelvény alapján a szennyezett zóna ennél mélyebbre is lenyúlik, helyenként ~15 m-ig, és a 240–270 m közötti szakaszon egy kimosódási zóna is kirajzolódik.



35. ábra: A 2. szelvény inverziós modellje. Félül a fajlagos ellenállás, alul a gerjesztett polarizáció tölthetőségi eloszlása látható. A fekete vonal a hulladéktest becsült alsó határát, a piros vonal a potenciálisan szennyezett feltételezett alsó határát jelöli. (szerző saját szerkesztése)

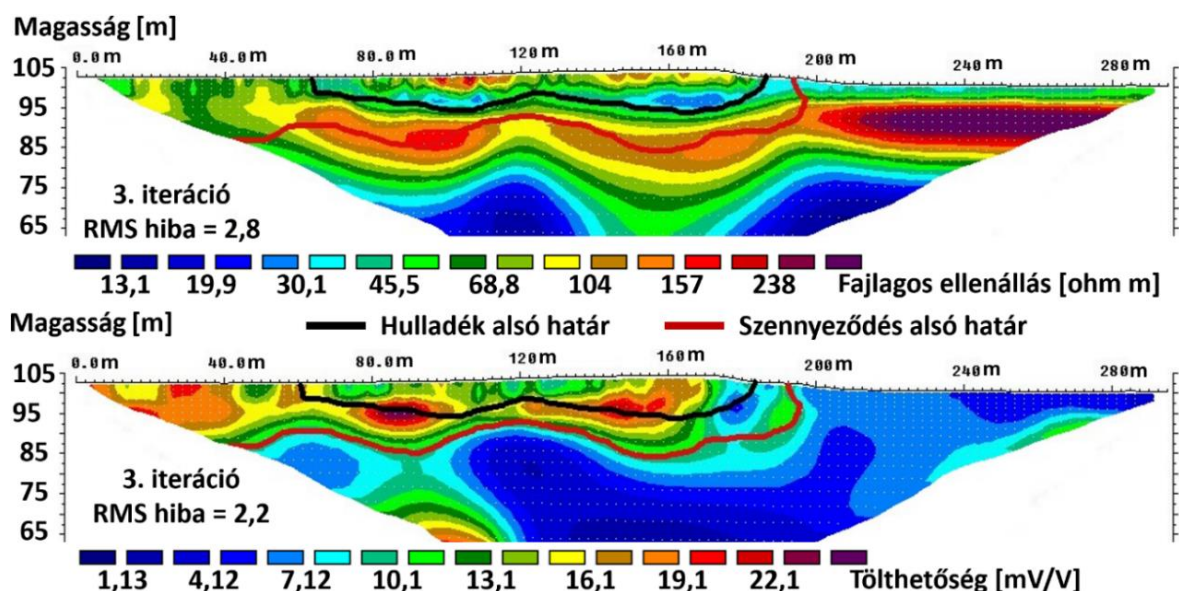
A 3. szelvényen a hulladéktest mélységi kiterjedése az előző szelvényekhez hasonló, horizontális elterjedése azonban valamivel kisebb (36. ábra). A topográfiával együtt értelmezve jól látható, hogy a hulladéktest peremén meredek domborzati átmenet

jelentkezik. A GP szelvény alapján a szelvény elején mélyebbre hatoló szivárgás, a keleti végén pedig oldalirányú kimosódás figyelhető meg.



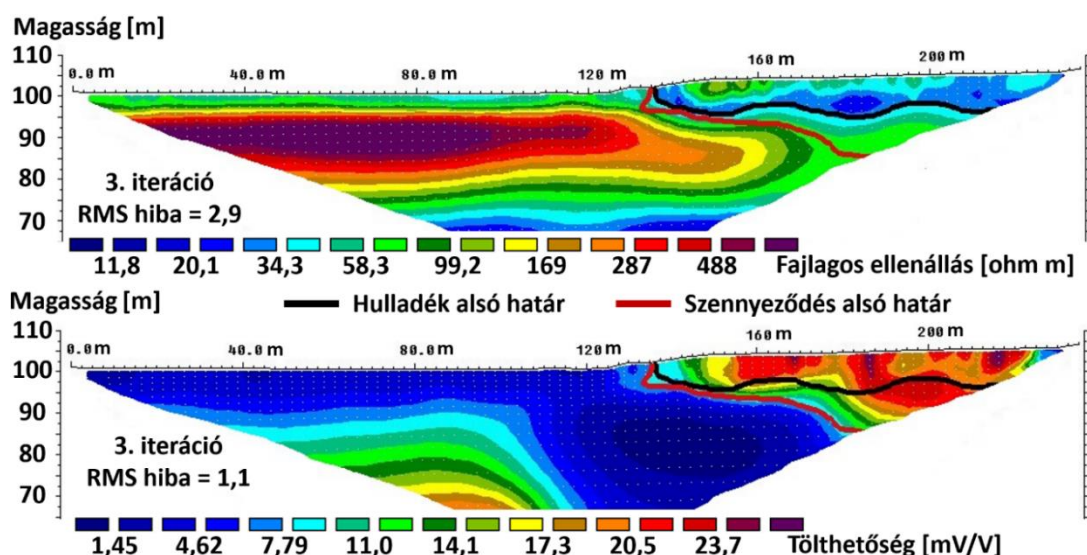
36. ábra: A 3. szelvény inverziós modellje. Felül a fajlagos ellenállás, alul a gerjesztett polarizáció tölthetőségi eloszlása látható. A fekete vonal a hulladéktest becsült alsó határát, a piros vonal a potenciálisan szennyezett feltételezett alsó határát jelöli. (szerző saját szerkesztése)

A 4. szelvényen a hulladéktest horizontális kiterjedése tovább csökken, megközelítőleg 60–180 m között jelenik meg (37. ábra). A GP-adatok itt is a keleti irányú szennyeződésterjedést jelzik, ami összhangban van a helyi felszín alatti vízmozgásra vonatkozó hidrogeológiai információkkal.



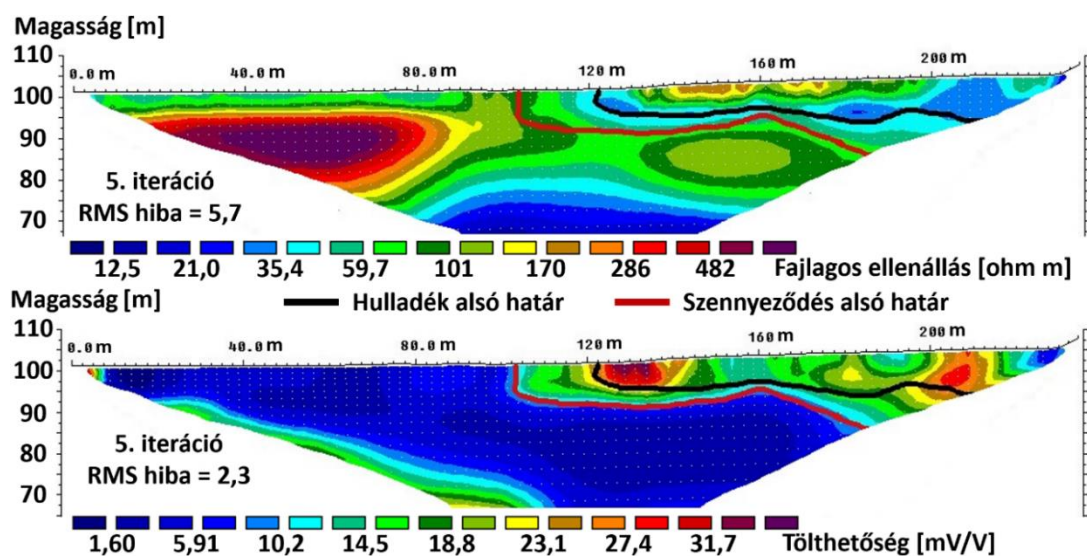
37. ábra: A 4. szelvény inverziós modellje. Felül a fajlagos ellenállás, alul a gerjesztett polarizáció tölthetőségi eloszlása látható. A fekete vonal a hulladéktest becsült alsó határát, a piros vonal a potenciálisan szennyezett feltételezett alsó határát jelöli. (szerző saját szerkesztése)

Az 5. keresztmetszeten a hulladéktest a szelvény végén, 130 m-től kezdődően egyértelműen megjelenik, és valószínűsíthetően a mérési tartományon túl is folytatódik (38. ábra). A szelvény meghosszabbítását a 35-ös főút fizikai akadályként korlátozta. A GP szelvényen a hulladéktest alatti kimosódás egyértelműen megfigyelhető. A szelvény déli (bal) oldalán magasabb fajlagos ellenállású, feltételezhetően kavicsos zóna jelenik meg.



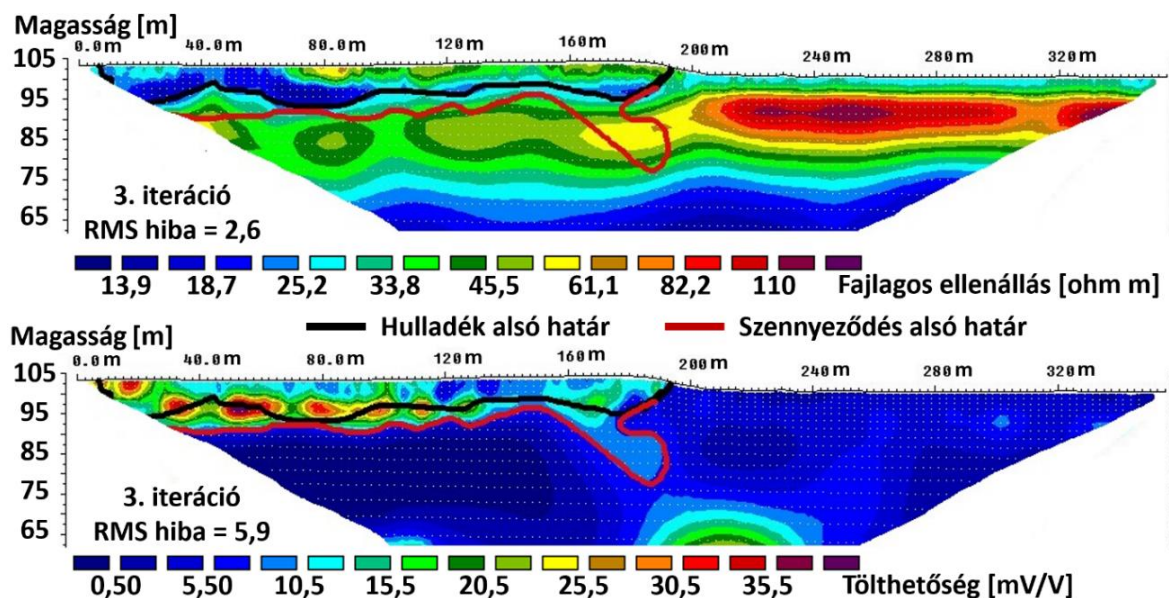
38. ábra: Az 5. szelvény inverziós modellje. Felül a fajlagos ellenállás, alul a gerjesztett polarizáció tölthetőségi eloszlása látható. A fekete vonal a hulladéktest becsült alsó határát, a piros vonal a potenciálisan szennyezett feltételezett alsó határát jelöli. (szerző saját szerkesztése)

A 6. szelvény az 5. szelvényhez hasonló karakterisztikát mutat, azonban a hulladéktest itt hosszabban, mintegy 100 m-en követhető a szelvény jobb oldalán (39. ábra). A GP szelvény alapján a szennyezett zóna horizontálisan mintegy 15 m-rel túlterjed a hulladéktesten.



39. ábra: A 6. szelvény inverziós modellje. Felül a fajlagos ellenállás, alul a gerjesztett polarizáció tölthetőségi eloszlása látható. A fekete vonal a hulladéktest becsült alsó határát, a piros vonal a potenciálisan szennyezett feltételezett alsó határát jelöli. (szerző saját szerkesztése)

A 7. átlós szelvényen a hulladéktest az első 190 m-en összefüggően, 8–10 m mélységig jelenik meg, a többi szelvényhez viszonyítva itt a legkarakteresebben (40. ábra). A GP szelvény alapján a függőleges szivárgás mellett a hulladéktest keleti peremén egy mélyebbre húzódó, oldalirányú szennyeződési nyúlvány is azonosítható.

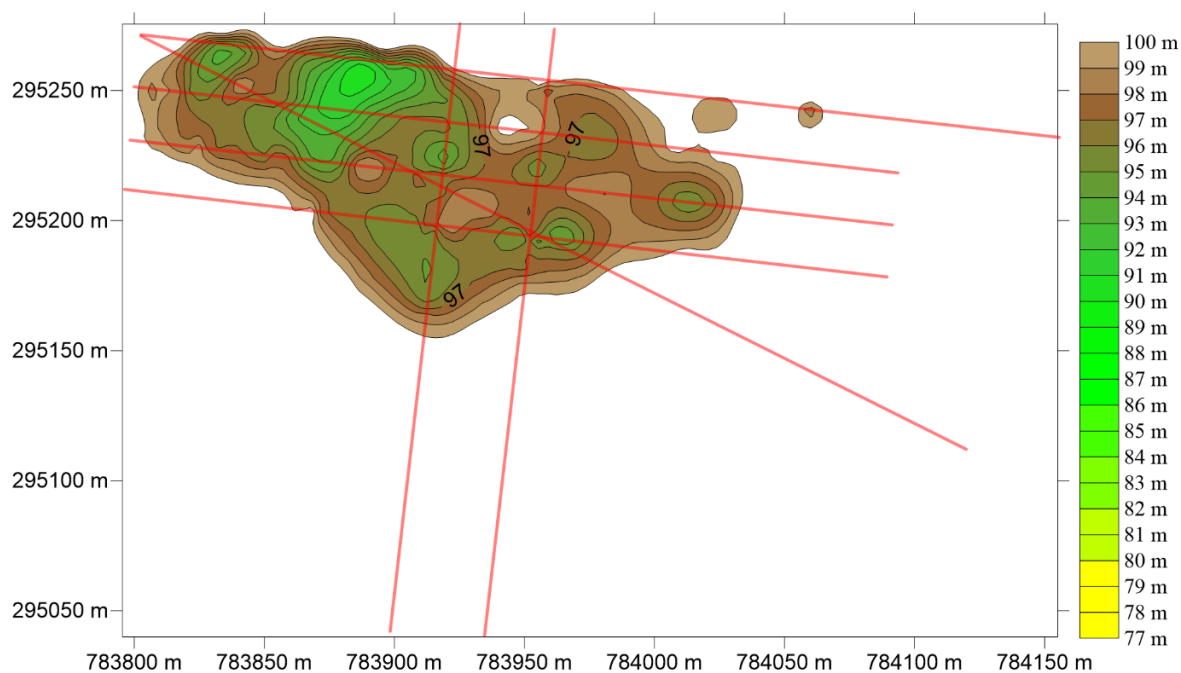


40. ábra: A 7. szelvény inverziós modellje. Felül a fajlagos ellenállás, alul a gerjesztett polarizáció tölthetőségi eloszlása látható. A fekete vonal a hulladéktest becsült alsó határát, a piros vonal a potenciálisan szennyezett feltételezett alsó határát jelöli. (szerző saját szerkesztése)

A hét szelvény együttes értelmezése elősegíti, hogy a hulladéktest geometriáját és a szennyeződésterjedés fő irányait több nézőpontból, egymást ellenőrző módon vizsgáljam. A vertikális szelvények együttesen azt mutatják, hogy a fajlagos ellenállás elsősorban a hulladéktest geometriai lehatárolására, míg a GP a kapcsolódó szennyeződés mélyebb és oldalirányú terjedésének követésére alkalmas. Ez a két paraméter komplementer jellege alapozza meg a következő fejezetekben bemutatott térbeli és statisztikai értelmezést.

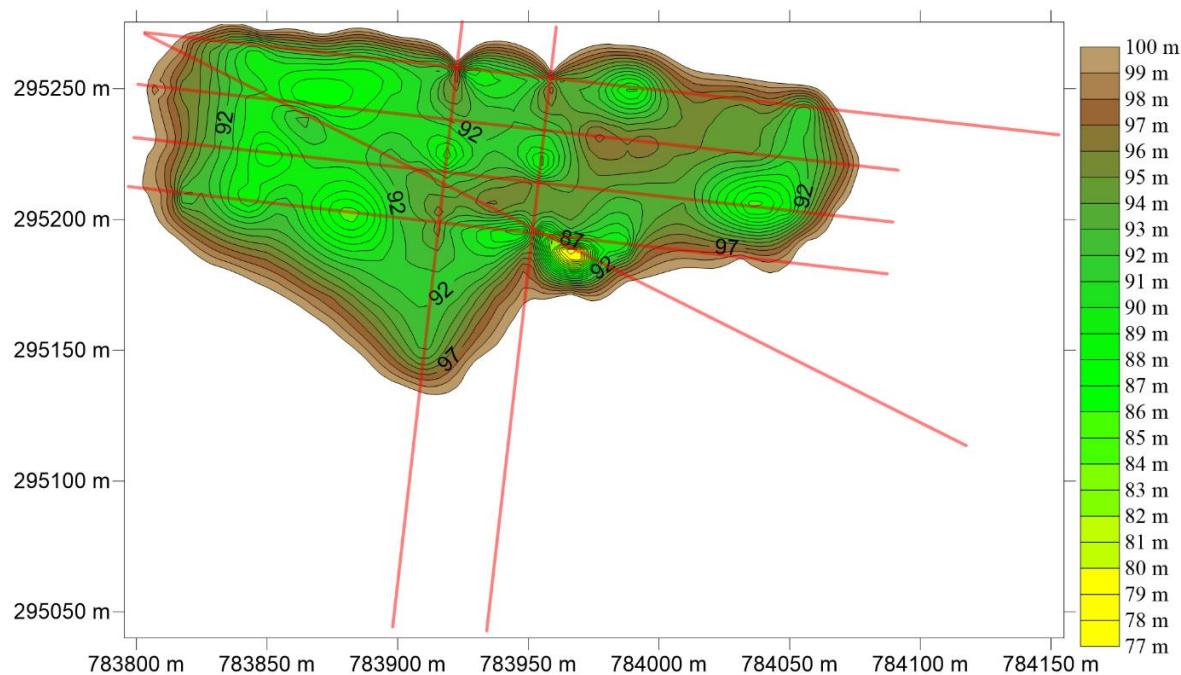
4.3.2 Aljzat- és vastagságtérképek

A 3. fejezetben bemutatott geometriai lehatárolási és térbeli adatbázis-építési eljárások alkalmazásával a hulladéktest és a potenciálisan szennyezett zónák térbeli jellemzői kvantitatív módon is meghatározhatók. Miután mind a hét szelvény mentén meghatároztam az aljzat pontjait, azokat egységes adatbázisba rendeztem. Az aljzatfelület (41. ábra) térképezéséhez krigelés interpolációt alkalmaztam (Surfer). A Z koordináták Balti alapszintre vonatkoztatott abszolút magasságok [mBf]. A piros vonalak a mérési szelvények elhelyezkedését jelölik. A mérési hálózat Dél és Kelet felől megfelelő sűrűséggel lefedi a vizsgált területet, míg Észak és Nyugat irányában a közút és a vasút korlátozta a kiterjesztést.



41. ábra: A hulladéktest becsült alsó határának izovonalas térképe [mBf]. A piros vonalak a geoelektromos mérési szelvények elhelyezkedését mutatják. (szerző saját szerkesztése)

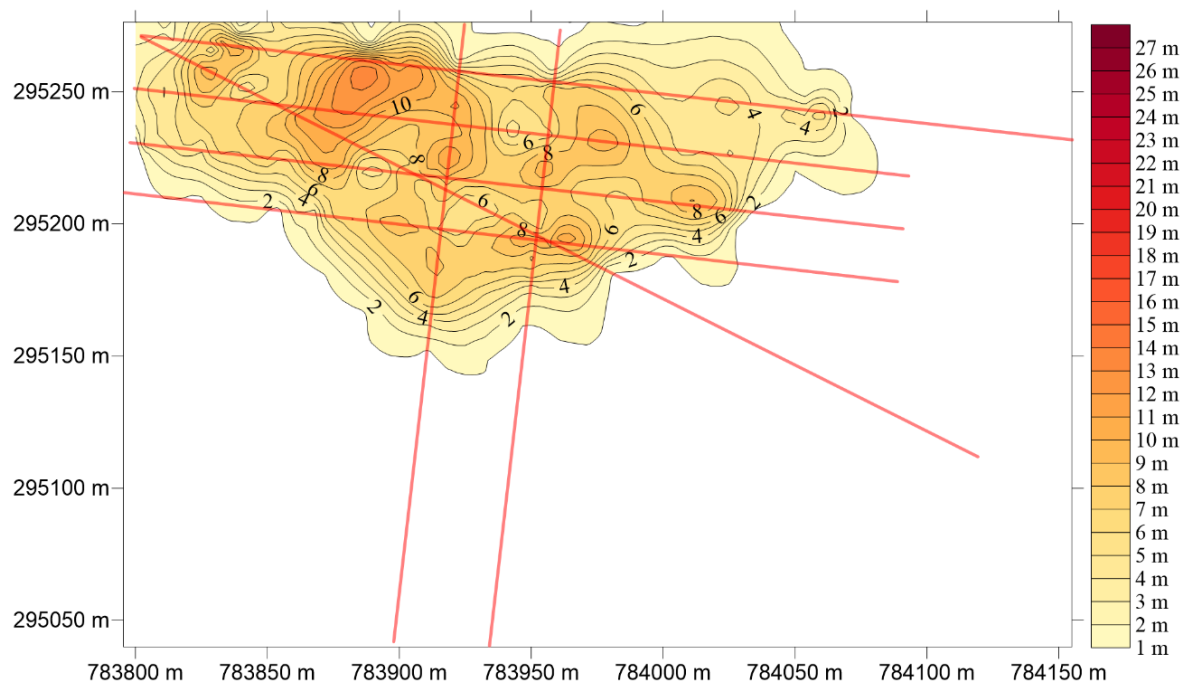
A 41. és 42. ábrák egységes színskálával készültek az összehasonlíthatóság érdekében. A hulladéktest aljzata jellemzően 94–96 mBf között helyezkedik el, lokálisan ~91 mBf minimumértékkel. Ugyanezen módszert alkalmaztam a GP töltheségi adatokra, mint a potenciálisan szennyezett zónák indikátorára. A potenciálisan szennyezett zónák lehatárolásához 10 mV/V küszöbértéket alkalmaztam.



42. ábra: A potenciálisan szennyezett zóna becsült alsó határának izovonalas térképe [mBf]. A piros vonalak a geoelektromos mérési szelvények elhelyezkedését mutatják. (szerző saját szerkesztése)

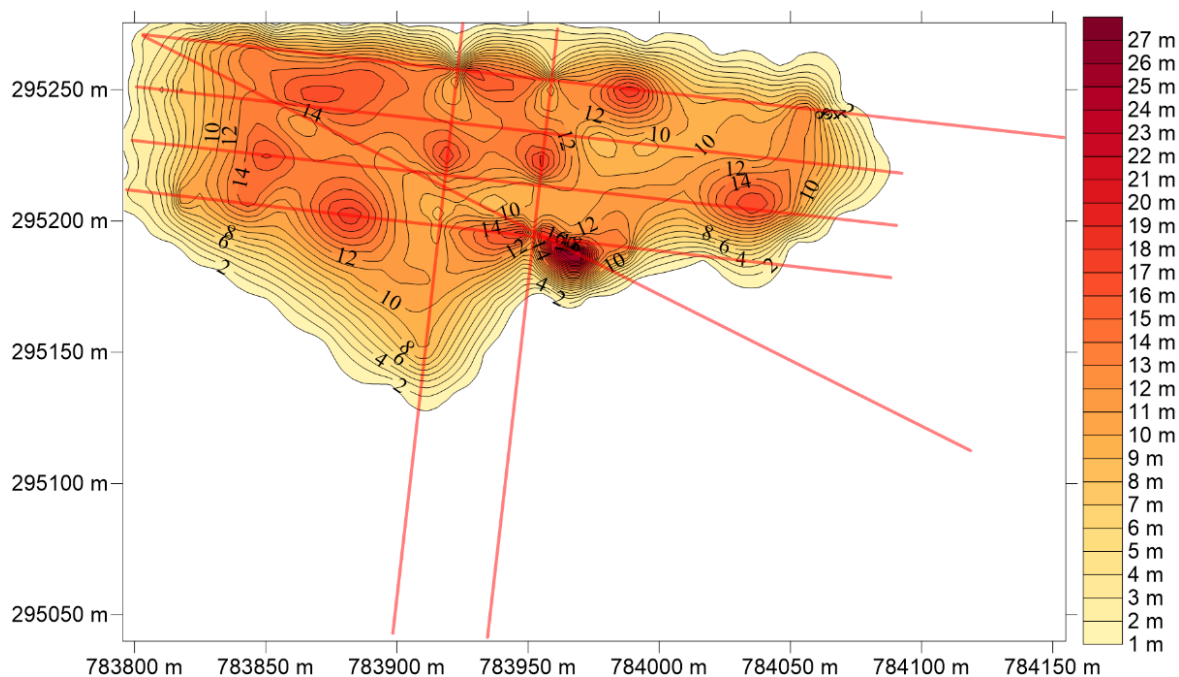
Az annál nagyobb számadattal rendelkező terület szennyezettnek lett minősítve, az annál kisebb értékűek viszont nem szennyezettnek, legalábbis kritikusan szennyezettségük nem bizonyítható. A szennyezett zóna kiterjedése mind oldalirányban, mind mélységben meghaladja az eredeti hulladéktestét. Ez a mintázat a potenciálisan szennyezett anyagok környező közegbe történő migrációjára utalhat. Az átlagos alsó mélysége a szennyezett területnek 88-92 méter között változik, ami átlagosan akár több mint 5 méter differenciaként jelentkezik a szeméttesthez képest, az aljzat elhelyezkedését illetően. Egy lokális minimum (~77 mBf) csak a 7. szelvényben jelentkezett. Bár térben kiterjedt, más szelvények nem erősítik meg egyértelműen, ezért értelmezése bizonytalan.

A következő lépésben a hulladéktest vastagságát becsültem a fajlagos ellenállás szelvények adataiból (43. ábra). Az 1–2 m vastagságú peremzónák a kimutathatósági határ közelében vannak, ezért megbízhatóságuk alacsonyabb. A hulladékréteg jellemző vastagsága 4–8 m, lokálisan elérheti a ~13 m-t.



43. ábra: A hulladékréteg becsült vastagságának izovonalas térképe [m]. A piros vonalak a geoelektromos mérési szelvények elhelyezkedését mutatják. (szerző saját szerkesztése)

A hulladéktest vastagságát kiegészítettem a GP alapján lehatárolt szennyezett zónák vastagságával. Ezáltal az összes olyan zóna kijelölésre került, amely szemetet és szennyező anyaggal valószínűsíthetően beborított térrészt tartalmaz. Az ilyen zónáknak a vastagságtérképe a 44. ábrán látható. A vizsgált területen átlagosan 10-15 méter vastagságú térrész érintett a természetes háttértől eltérő fizikai tulajdonságú anyaggal.



44. ábra: A potenciálisan szennyezett zóna becsült vastagságának izovonalas térképe [m]. A piros vonalak a geoelektromos mérési szelvények elhelyezkedését mutatják. (szerző saját szerkesztése)

A vastagságértékekből térfogatokat lehetett számolni a Surfer szoftver segítségével. Az alsó lehatároló felület (41. és 42. ábrák) és a felső határoló felület, mint a felszín (8. ábra) közötti térfogatot tudja a szoftver kiszámolni. A térfogatszámításhoz a felületek geometriájának összehangolása és a grid-ek fedése szükséges volt. Ennek érdekében kisebb geometriai korrekciókat végeztem, hogy utána a szoftver zökkenőmentesen el tudja végezni a számításokat. A számításokból becsült szeméttest térfogata 127000 m^3 -re adódott, amely tartalmazza a szeméttestet vékonyan beborító fedő talajréteget. A számításokból becsült szeméttest és az alatta elszennyezett térrész és a fedő talajréteg össztérfogata 266000 m^3 -re adódott. A térfogatértékek becslések, bizonytalanságuk elérheti a $\pm 20\%$ -ot, ugyanakkor nagyságrendi értelmezésük megbízható, de azt a tényt nem befolyásolja, hogy a területen nagy mennyiségű hulladék található, és annak környezetében potenciálisan szennyezett zónák jelenléte valószínűsíthető.

4.3.3 Horizontális szelettérképek értelmezése

A 3.6 fejezetben bemutatott topográfia-korrigált szeletelési eljárás alkalmazásával a 3D adatbázis (3.4 fejezet) horizontális irányú értelmezése is biztosított. A nyékládházi területen a hét vertikális szelvényből származó pontok száma 9863. Az 5. táblázatban látható, hogy a használt szeletelési mélységekhez tartozó pontok számossága a mélyebb zónákban is viszonylag egyenletes ponteloszlás figyelhető meg. A magasabban fekvő területeken azért

kiseb az ismert pontok száma, mivel több zónában abban a magasságban nem tartoznak értelmezhető altalajbeli pontokhoz. A mélyebb zónákat pedig csak a szelvények közepén található részek érintik, így emiatt csökken a számosságuk. Egy ilyen felszíni tulajdonságokkal bíró területnek a felszeleteléséhez ezen elektródaelrendezés mellett 29 szelet alkalmazása bizonyult optimálisnak. Ha ennél sűrűbben történne a szeletelés, akkor már túl ritka lenne egyes szinteken a pontsűrűség. Amennyiben pedig kevesebb szint állna rendelkezésre az ismert pontok szétosztására, akkor pedig ugyanazon (X, Y) pozícióhoz több eltérő paraméterérték tartozna. Az ilyen túlhatározott probléma esetében egy szűréssel ugyan eltávolíthatóak a felesleges adatok, de így szükségtelen adatvesztéshez vezetne. A nyékládházi vizsgált terület $Z_{max} - Z_{min}$ értéke közel 8 méter, ezért alkalmaztam a 3.6 fejezetben bevezetett (12) algoritmust.

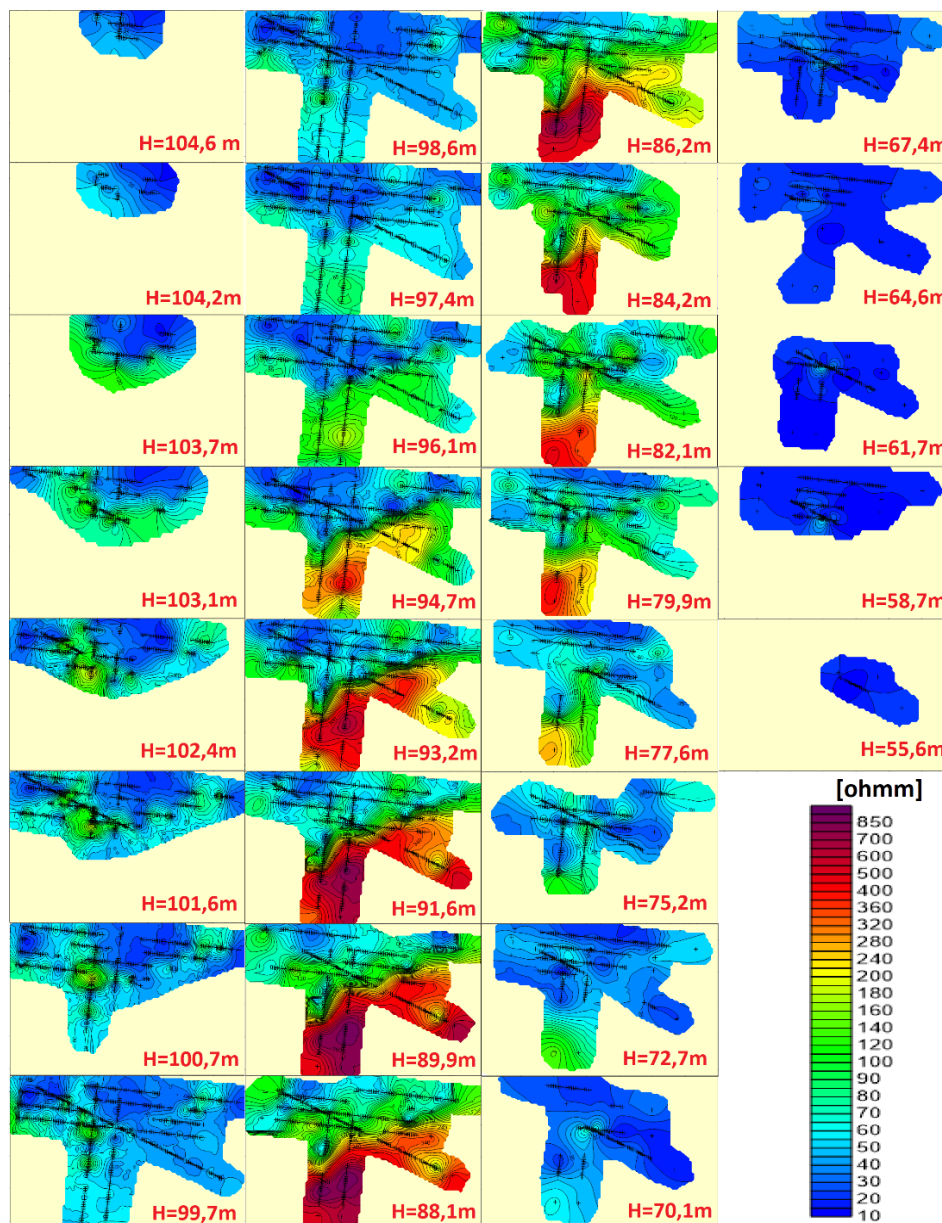
5. táblázat: A mintaterülethez tartozó szeletelési mélységek, azokhoz tartozó Balti tenger feletti magasságuk és az azon mélységhez kötődő mért geofizikai pontok számossága (szerző saját szerkesztése)

i	H (r = 5 m)	A szintek abszolút magassága [m]	A pontok száma szintenként [db]
2	0,3	104,6	59
3	0,7	104,2	50
4	1,2	103,7	96
5	1,8	103,1	216
6	2,5	102,4	277
7	3,3	101,6	396
8	4,2	100,7	375
9	5,2	99,7	618
10	6,3	98,6	584
11	7,5	97,4	629
12	8,8	96,1	559
13	10,2	94,7	523
14	11,7	93,2	596
15	13,3	91,6	529
16	15	89,9	438
17	16,8	88,1	482
18	18,7	86,2	503
19	20,7	84,2	365
20	22,8	82,1	324
21	25	79,9	411
22	27,3	77,6	285
23	29,7	75,2	292
24	32,2	72,7	308
25	34,8	70,1	149
26	37,5	67,4	305
27	40,3	64,6	158
28	43,2	61,7	128
29	46,2	58,7	182
30	49,3	55,6	26

A szeletelési eljárás hatását kvantitatív módon is értékeltem az eredeti és az új szeletelési rendszer összehasonlításával. A módszertani fejezetben bemutatott normalizált szeletpozíció-alapú eltérés számítása alapján meghatároztam a pontok relatív vertikális

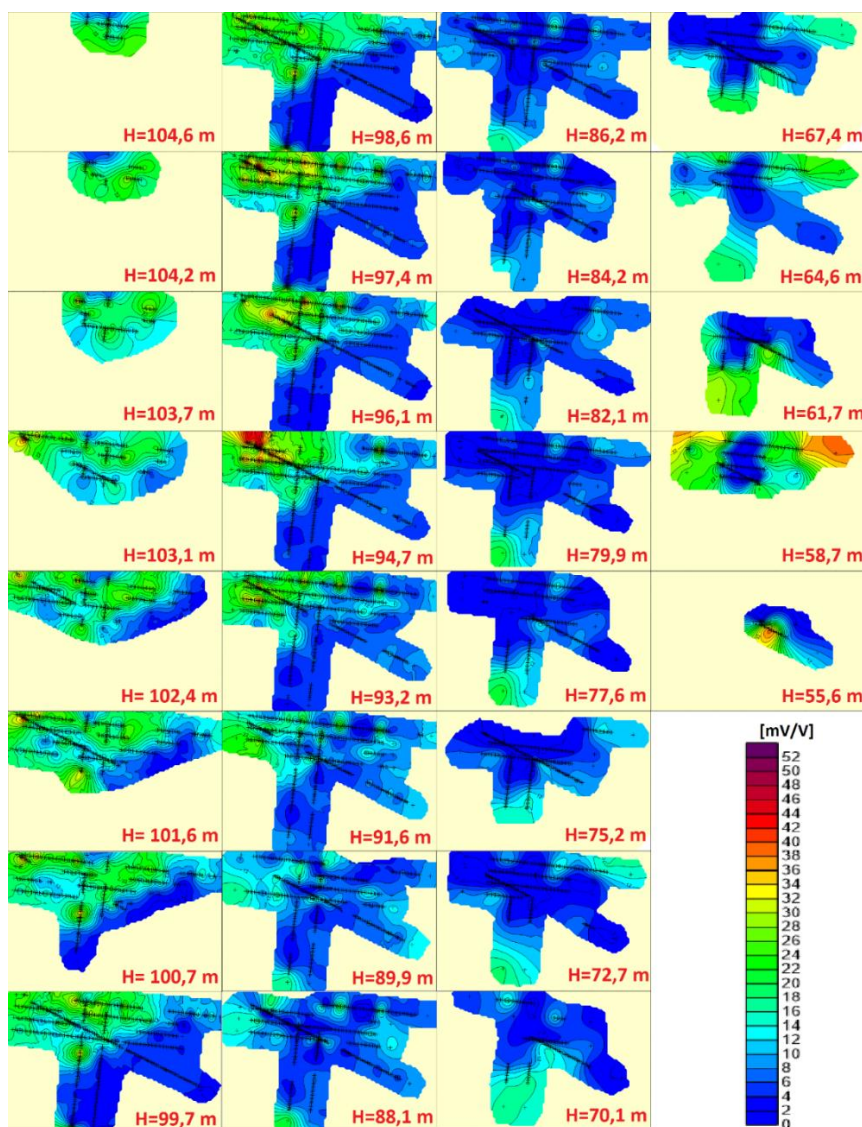
átrendeződésének mértékét. A vizsgált területen az átlagos eltérés 1,17 rétegnek, a medián 0,86 rétegnek, míg a maximális eltérés 4,14 rétegnek adódott. A topográfia-korrigált szeletelési eljárás a pontok többségét csak kis mértékben rendezi át a vertikális struktúrában, ugyanakkor képes lehet korrigálni a felszín változékonyságából eredő geometriai torzításokat. A nagyobb eltérések elsősorban a nagyobb topográfiai különbségekkel jellemezhető területrészekben jelentkeztek, mert az eljárás érzékenyen reagál a valós felszíni viszonyokra. A szeletelési algoritmus nem mutat mesterséges torzításra utaló jeleket az adatrendszerben, hanem annak geometriai konzisztenciáját javítja.

A 45. és 46. ábrákon láthatóak azok a horizontális szelvények, amelyek a szeletelési módszerből adódtak.



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

Az egyes mozaik csempéken a felhasznált adatok helyei fekete keresztekkel, vonalak mentén figyelhetők meg. Ezen pontokból krigeléssel interpoláltam a felületeket, majd körbe vágtam a túlzottan extrapolált térrészeket a Surfer programban. Ilyen formában áttekinthetővé válik a különböző mélységekben kialakult horizontális változások térbeli elhelyezkedése. A különálló vertikális szelvények együttes kiértékelése is biztosítottá válik. A külön elkészített horizontális szelvényeknél, az összehasonlíthatóság érdekében egységes színskálát alkalmaztam azért, hogy a közös értelmezés lehetséges legyen. A 45. ábrán a sötétkékekkel színezett zónák jelölik a potenciálisan hulladékhhoz köthető, alacsony fajlagos ellenállású zónákat a felszín közelében, illetve a mélyebb zónában jelen lévő jó vezetőképességű réteget. A $H=96,1$ méteres szinten látszódik még az egybefüggő, hulladéktesthez köthető zóna, a következő kettő szinten ($H=94,7$ m, $H=93,2$ m) már egyre kevesebb pontcsoportban jelenik meg az alacsony fajlagos ellenállás ($<30 \Omega\text{m}$).

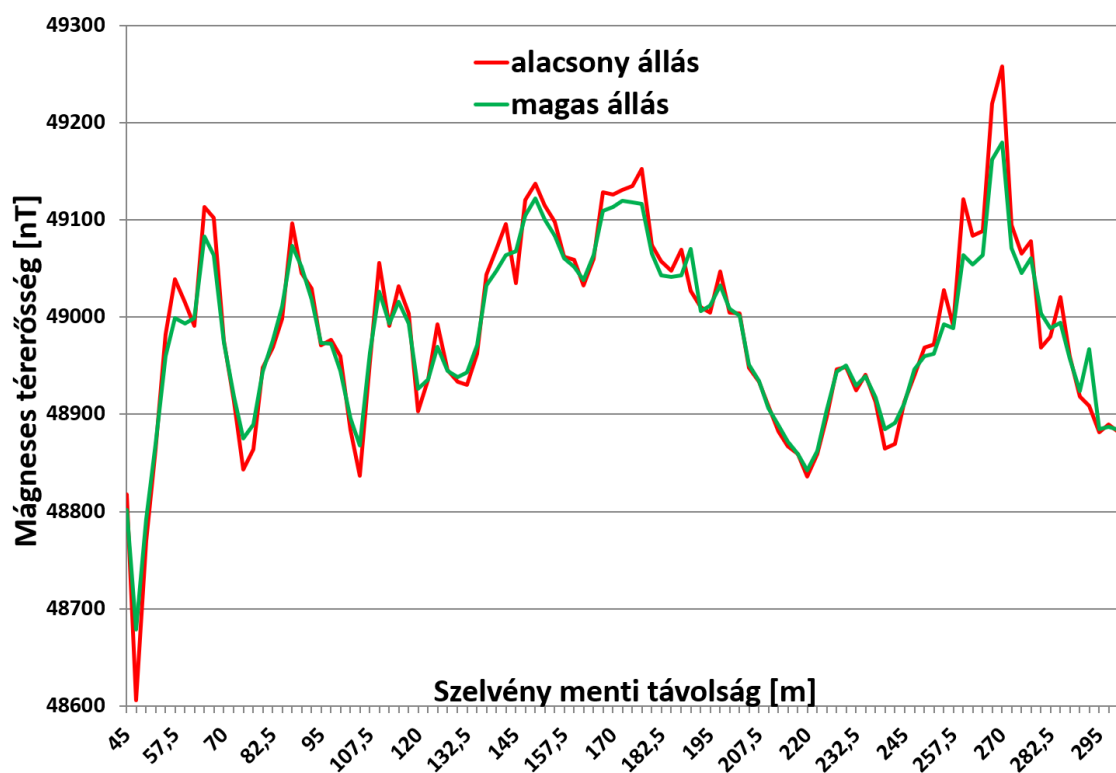


46. ábra: A gerjesztett polarizáció tölthetőségi horizontális eloszlástérképei különböző magassági szinteken. (szerző saját szerkesztése)

A 46. ábrán pedig pont a nem sötétkék zónák jelölik a közepesen és erősen polarizálódó térrészeket. A hulladéklerakó helyén egészen a felszíntől a $H=93,2$ méteres szeletig összefüggő a potenciálisan szennyezett zóna képe. Utána már érződik, hogy nem mindenhol egyenletesen egységes a vertikális anyagáramlás, de az foltokban egészen a $H=82,1$ méteres szeletig észlelhető. A mélyebb rétegekben tapasztalható magasabb értékek valószínűsíthetően nem feltétlenül a felsőbb zónákból származó hatásokhoz köthetők, hanem az ott eredetileg is jelen lévő, polarizációt okozó anyagokhoz köthetők. A horizontális szelettérképek így a vertikális szelvényekben azonosított jelenségek térbeli kiterjedésének konzisztens értelmezését biztosítják.

4.3.4 Mágneses mérési eredmények

A geoelektromos eredmények (4.3.1–4.3.3 fejezetek) kiegészítéseként a mágneses mérések a felszínközeli, potenciálisan fémtartalmú zónák további jellemzését alapozták meg. A hulladéktest helyzete a nyékládházi 2. szelvény mentén a geoelektromos mérések alapján a szelvény ~240 m-es szelvénytávolság környékében határozható le. A mágneses mérések (47. ábra) alapján a 177,5 métertől kezdve egészen a 220. méterig a hatóknak egy konstans csökkenése tapasztalható, ami a potenciálisan fémtartalmú anyagok mennyiségének csökkenésére utalhat. A 240 és a 300 méteres pontok között egy nagy amplitúdójú mágneses anomália figyelhető meg, amelynek maximuma ~272,5 m-nél jelentkezik.



47. ábra: A 2. szelvény menti mágneses gradiens mérés diagramja alacsony és magas állásnál (szerző saját szerkesztése)

Az anomália forrása a mágneses adatok alapján potenciálisan fémtartalmú objektumokhoz köthető, azonban közvetlen anyagazonosítás hiányában ez az értelmezés bizonytalanságot hordoz. A mágneses eredmények így kiegészítő információt szolgáltatnak a geoelektromos módszerekkel lehatárolt zónák értelmezéséhez, főként a felszínközeli heterogenitások tekintetében.

4.3.5 Többparaméteres osztályozás eredményei

A korábbi fejezetekben bemutatott geometriai és fizikai paramétereken alapuló értelmezést ebben a részben többparaméteres statisztikai megközelítéssel egészítem ki, amely lehetőséget ad a különböző tulajdonságú zónák objektív elkülönítésére.

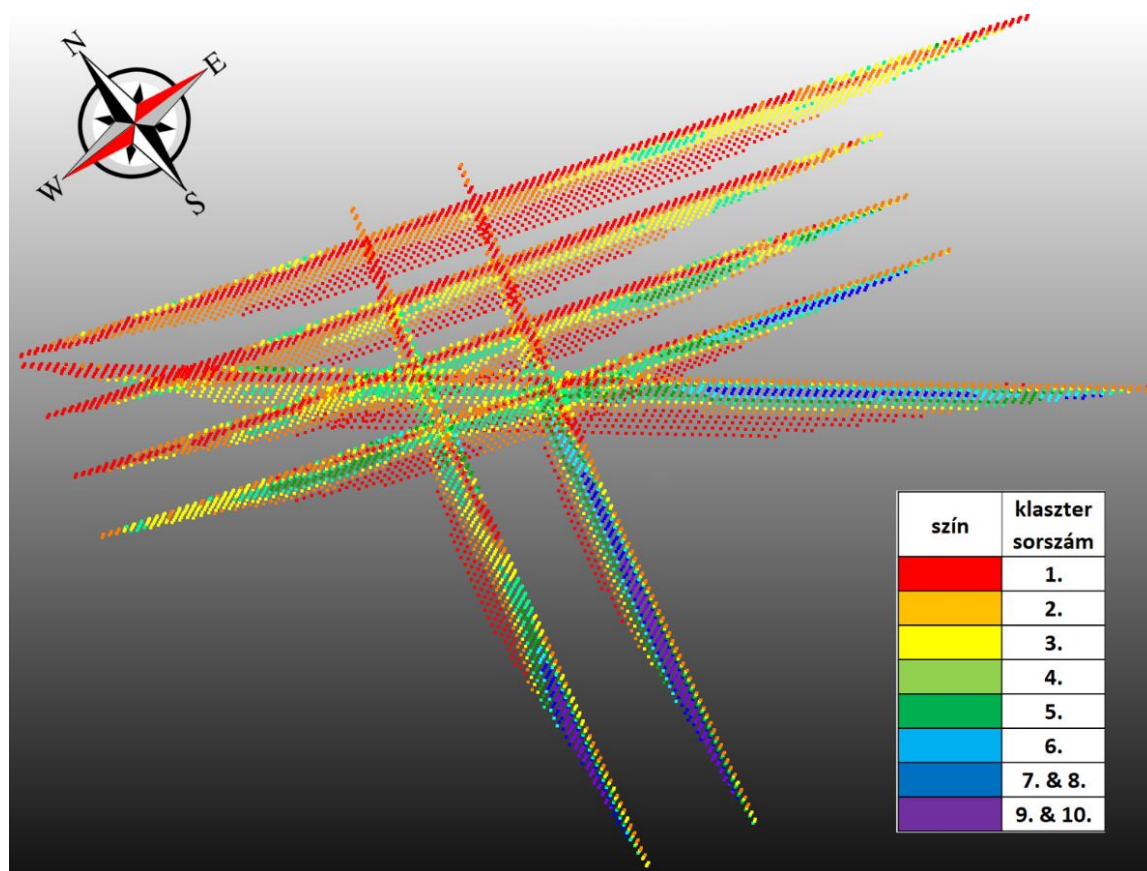
4.3.5.1 Klaszteranalízis eredményei

A centroid sorszámok cellaszínei a 48. ábra színskáláját tükrözik a 6. táblázatban. A pirossal feltüntetett 1. klaszternek a centroidja 28 ohmm-nél és 16,4 mV/V-os értéknél található, ami jól közelíti a korábban alkalmazott határértékeket. A narancssárgával jelölt 2. klaszter centroidja már 47 ohmm-es értéket vesz fel, amely már magasabb a korábban alkalmazott 30 ohmm-es határértéknél, viszont a GP tölthetőség centroidja 9,7 mV/V-os értéket mutat, ami még a potenciálisan szennyezett zónák jellemző tartományába esik. Ez a klaszter a hulladéktest alatti, potenciálisan szennyezett zónákat jelöli. A 3. citromsárgával jelölt klaszter centroidjának a fajlagos ellenállás értéke egyértelműen magas, ezáltal kizárható az ott jelen lévő egybefüggő szeméttest, viszont a tölthetőségi értékének a centroidja még mindig a mérsékelten emelkedettebb kategóriába tartozik. Az ebbe a klaszterbe tartozó pontok az enyhén szennyezett és az alacsony polarizációs aktivitású, háttérjellegű területeknek feleltethetők meg. A világos- és sötétzölddel jelölt 4. és 5. klaszterek már a szennyezetlen területre jellemző alacsonyabb, bár 7 mV/V-os érték körüli tölthetőséget mutatnak, fajlagos ellenállás értékük pedig közepes (100-150 ohmm). A világos- és sötétkékkel jelölt 6., 7. és a 8. klaszterekre már 7 mV/V-nál alacsonyabb tölthetőség jellemző, és a közepesen magas fajlagos ellenállás (200-500 ohmm) is, ami szintén nem utalhat a jelenlévő polarizációs hatásokra. A lilával jelölt 9. és 10. klaszterek egészen magas fajlagos ellenállással (600-900 ohmm) és alacsony tölthetőségi értékekkel (~6,5 mV/V) rendelkeznek, ami nem utal számottevő polarizációs hatásra.

6. táblázat: A fajlagos ellenállás és GP tölthetőségi paraméterekre elvégzett klaszteranalízis eredménye 10 db klaszterszámra, a paraméterek klaszterekhez tartozó centroid értékeinek és számosságának a feltüntetésével (szerző saját szerkesztése)

Centroid sorszámok	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fajlagos ellenállás [ohmm]	28	47	72	103	153	241	363	494	687	878
GP tölthetőség [mV/V]	16,4	9,7	8,6	7,3	7,4	6,6	6,7	6,8	6,8	6,1
Pontok száma [db]	2896	2682	1845	1032	433	291	211	90	98	52
Fajlagos eloszlás [%]	30,1	27,9	19,2	10,7	4,5	3,0	2,2	0,9	1,0	0,5

A 48. ábrán megfigyelhető az, ami a korábbi ábrákon is, hogy a szeméttest és az alatta létrejött potenciálisan elszennyeződött térrészek a kiválasztott klaszterek segítségével elkülönülnek. A pontokat egy szabad hozzáférésű pontfelhő ábrázolására szolgáló szoftverben (Cloud Compare 2025) mutatom be. A pirossal jelölt 1. klaszter pontjai a felszín közelében is megjelennek, amelyek a lerakott szeméttestet reprezentálják, illetve a mérések alsó vonatkoztatási szintjeinél is, a más hatásokból kialakult hasonló paraméterekkel jellemezhető részeknél is. A 2. (narancssárga) és 3. (citromsárga) klaszterek főképp a piros részek alatt közvetlenül jelentkeznek, amelyek potenciálisan szennyezett zónákra utalhatnak. A zöld, kék és lila zónák pedig a legkevésbé érintett háttérterületek. A kék és lila színű pontok kifejezetten a mezőgazdasági területek alatt Délkeleten figyelhetők meg.



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

A 10 klaszteres felbontás részletes képet ad, azonban több klaszter geofizikai jelentése hasonló, ezért azok összevonása indokolt. A kisebb klaszterszámok a főbb szerkezeti egységeket már jól leírják, azonban a részletesebb felbontás interpretációs szempontból hasznos információkat hordoz. 6 db is elégnek tűnik, utómunkával ugyanis a zöldeket (4. és 5. klaszter), a kékkeket (6., 7. és a 8. klaszter), valamint a lilákat (9. és 10. klaszter) össze is lehetne vonni. Ebből kifolyólag a szoftverrel elvégeztem a 6 db klaszterre is az elemzést, amelynek az eredménye a 7. táblázatban látható. A várt eredmény azonban nem következett be, ugyanis az automatikus klaszterezés azonban nem a geofizikailag hasonló, kisebb elemszámú klasztereket vonta össze, hanem a nagy elemszámúak, amelyeknek az eddigi szeparált megjelenése éppen értékes információt hordozott. Ennek az oka feltehetőleg a fajlagos ellenállás értékek relatív nagy eltérései lehetnek, amelyek a kevés elemszámuk ellenére is különálló klaszterekbe kényszerítik azokat a pontcsoportokat. Ezért a végső interpretáció során manuális összevonást alkalmaztam.

7. táblázat: A fajlagos ellenállás és GP tölthetőségi paraméterekre elvégzett klaszteranalízis eredménye 6 db klaszterszámra, a paraméterek klaszterekhez tartozó centroid értékeinek és számosságának a feltüntetésével (szerző saját szerkesztése)

Centroid sorszámok	1	2	3	4	5	6
Fajlagos ellenállás [ohmm]	40	94	216	383	630	848
GP tölthetőség [mV/V]	12,8	7,8	6,6	6,8	6,9	5,9
Pontok száma [db]	6145	2572	452	274	119	68
Fajlagos eloszlás [%]	63,8	26,7	4,7	2,8	1,2	0,7

A klaszterszám további növelése (pl. $k = 12$) már nem vezetett új, geofizikailag értelmezhető csoportok megjelenéséhez (8. táblázat), hanem a meglévő klaszterek felaprózódását eredményezte.

8. táblázat: A fajlagos ellenállás és GP tölthetőségi paraméterekre elvégzett klaszteranalízis eredménye 12 db klaszterszámra, a paraméterek klaszterekhez tartozó centroid értékeinek és számosságának a feltüntetésével (szerző saját szerkesztése)

Centroid sorszámok	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fajlagos ellenállás [ohmm]	31	57	93	148	241	363	490	637	714	775	842	916
GP tölthetőség [mV/V]	14,9	9,1	7,6	7,6	6,6	6,7	6,7	7,4	6,7	5,1	6,2	6,4
Pontok száma [db]	3845	2871	214	1643	52	519	21	15	294	90	29	37
Fajlagos eloszlás [%]	39,9	29,8	2,2	17,1	0,5	5,4	0,2	0,2	3,1	0,9	0,3	0,4

A klaszteranalízis eredményei alapján jól látható, hogy a klaszterszám megválasztása lényegesen befolyásolja az interpretáció részletességét és szerkezetét. Ugyanakkor a jelen fejezetben bemutatott eredmények önmagukban még nem biztosítják a klaszterszám objektív, kvantitatív optimalizálását, mivel az értelmezés megbízhatóságának megítélése több, eltérő jellegű esettanulmány összehasonlítását igényli. Ennek megfelelően a klaszterszám hatásának részletes, kvantitatív értékelését a következő validációs területen kapott eredményekkel együtt, összehasonlító módon a 4.4.5 fejezetben végzem el.

4.3.5.2 Korrelációs mátrix és a faktoranalízis eredményei

A klaszteranalízis eredményeinek kiegészítéseként a paraméterek közötti kapcsolatrendszer korrelációvizsgálattal (9. táblázat) és faktoranalízissel (10. táblázat) elemeztem, annak érdekében, hogy feltárjam az egyes mérési módszerek közötti összefüggéseket és redundanciákat.

Az alsó (M_A) és felső (M_F) állásban mért mágneses értékek egymással, valamint az M_V paraméterrel is nagyon erős korrelációt mutatnak. Az M_{AH} és M_{FH} paraméterek (mivel az M_A és M_F értékekből származnak) szintén erős korrelációt mutatnak. A GP és az SP értékek 0,51-es közepes korrelációval jelennek meg, mert a jelen lévő természetes polarizációs hatást okozó anyagok valamelyest átfedést mutatnak olyan anyagokkal, amik mesterséges indukció során polarizálódnak. A GP paraméter $-0,63$ értékű közepesen erős negatív korrelációt mutat a fajlagos ellenállással, mert az alacsonyabb ellenállású zónákban jellemzően magasabb GP -értékek jelennek meg. A mágneses és a geoelektromos paraméterek között csak gyenge kapcsolat volt kimutatható (maximum $r = 0,19$), mert a két módszer eltérő fizikai tulajdonságokat reprezentál, és egymást kiegészítő információt szolgáltat.

9. táblázat: Korrelációs mátrix a 2. szelvény mért és számolt paramétereivel (szerző saját szerkesztése)

Paraméterek	M_A	M_F	M_V	M_{AH}	M_{FH}	R	Sp	GP
M_A	1,00	0,99	0,83	-0,33	-0,28	0,16	-0,05	-0,10
M_F	0,99	1,00	0,76	-0,29	-0,25	0,19	-0,06	-0,11
M_V	0,83	0,76	1,00	-0,46	-0,37	0,03	0,03	-0,04
M_{AH}	-0,33	-0,29	-0,46	1,00	0,94	0,08	0,13	0,00
M_{FH}	-0,28	-0,25	-0,37	0,94	1,00	0,01	0,11	0,11
R	0,16	0,19	0,03	0,08	0,01	1,00	-0,29	-0,63
SP	-0,05	-0,06	0,03	0,13	0,11	-0,29	1,00	0,51
GP	-0,10	-0,11	-0,04	0,00	0,11	-0,63	0,51	1,00

A következőkben faktoranalízis alá vettem az előbb ismertetett adatokat. Az első faktor a mágneses paraméterek (M_A , M_F , M_V , M_{AH} , M_{FH}) domináns varianciáját írja le. A második faktor a geoelektromos paraméterek (R , SP , GP) közös varianciáját reprezentálja. A harmadik faktor kisebb fajsúlyú, és elsősorban zaj- vagy maradékvarianciát reprezentál.

10. táblázat: A faktoranalízis eredménye a 2. szelvényen mért és számolt paramétereire (szerző saját szerkesztése)

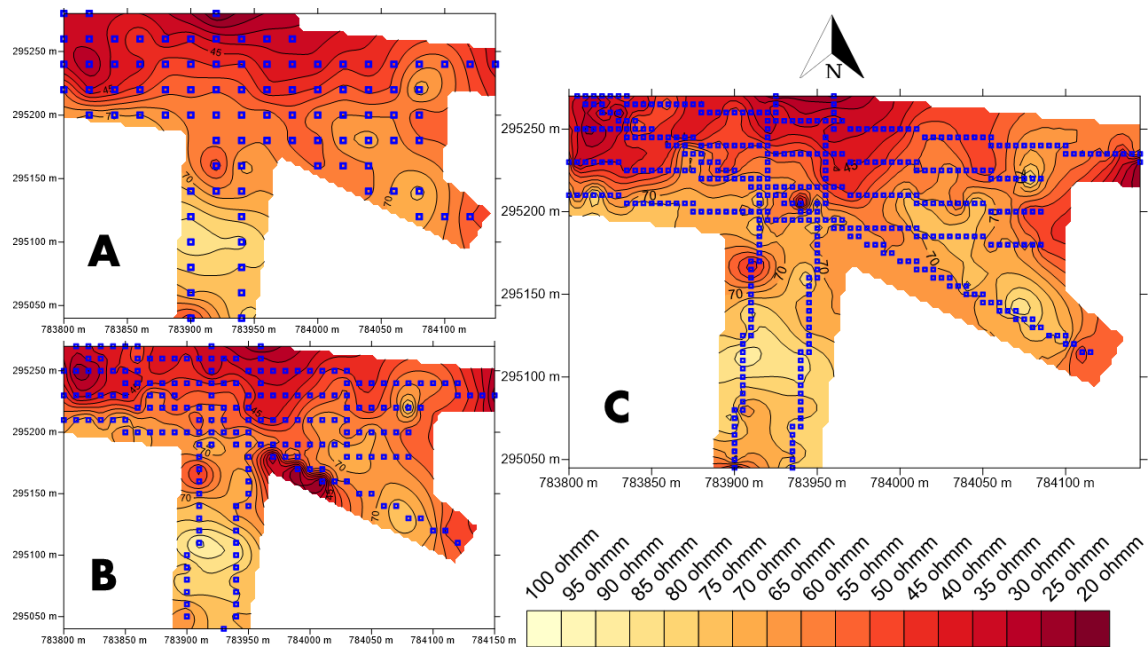
	1	2	3
M_A	-0,90	-0,05	-0,42
M_F	-0,86	-0,01	-0,44
M_V	-0,86	-0,18	-0,24
M_{AH}	0,68	0,24	-0,67
M_{FH}	0,64	0,16	-0,71
R	-0,21	0,79	-0,12
SP	0,18	-0,67	-0,30
GP	0,22	-0,86	-0,11

A mágneses és geoelektromos paraméterek eltérő fizikai információt hordoznak, így azok együttes alkalmazása hozzájárul a vizsgált rendszer komplexebb és megbízhatóbb értelmezéséhez. Ez a megfigyelés összhangban van az integrált értelmezési keretrendszer alapfeltevésével.

4.3.5.3 Fix ε -os MFV módszer térképei

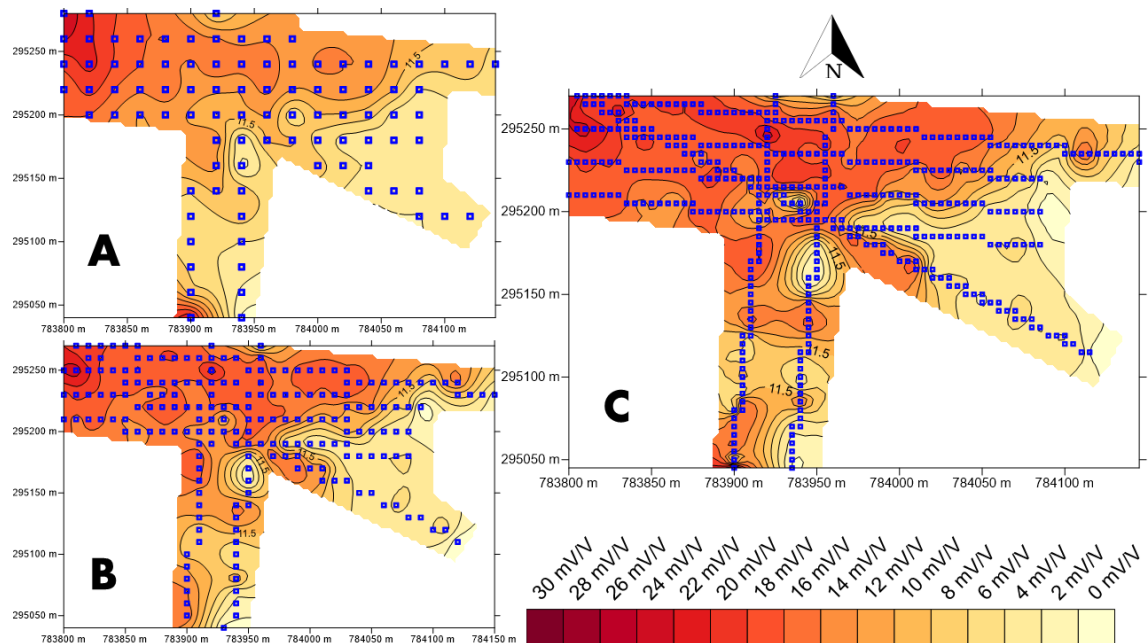
A klaszteranalízis és a korrelációvizsgálat eredményeit követően az MFV alapú feldolgozás térbeli viselkedését vizsgáltam különböző paraméterezések mellett, annak érdekében, hogy meghatározható legyen a domináns fizikai jellemzők robusztus térképezésének módja.

A térképek fokozatosan részletgazdagabbá válnak a cellaméret csökkenésével (49/A-B-C ábra). Egy ritkább mintavételezésnél ugyan jobban dominál a térkép északi részén található hulladéklerakó összhatása önmagában, viszont a hirtelen változásokra kevésbé érzékeny. Az 5 m * 5 m-es felbontásban már egészen részletgazdag, azonban az MFV módszer kiemelhet változékony adatsoroknál nem a domináns trendet képviselő értékeket is, amelyek kis, feltételezhetően lokális kieső értékként jelentkeznek (49/C ábra). Ennél a módszernél ezért a ritkább cellaméretű mintavételezés simító hatása előnyös lehet a geometriai felbontás csökkenése mellett. A közös színskálát a legkisebb és legnagyobb előforduló értékek alapján állítottam be, és minél vörösebb, annál inkább a hulladékokra jellemző fizikai tulajdonságát reprezentálja, csakúgy, mint a GP ábráinál.



49. ábra: Fajlagos ellenállás térképek fix 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)

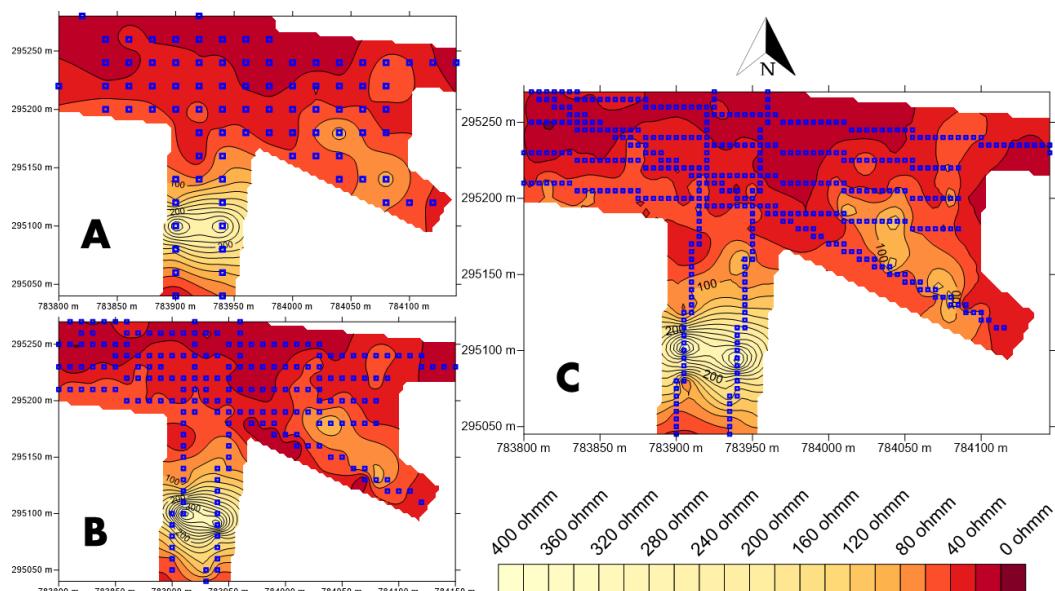
A GP adatok esetében hasonló viselkedés figyelhető meg, azonban érdekes megfigyelni azt, hogy az 50/A ábrán csupán a térkép északnyugati részén emeli ki a módszer a magasabb értékeket, az 50/B-C ábrákon már szétszórva, de összességében dominálnak a hulladékokra jellemző paraméterrel rendelkező cellák. A fix ε -paraméterrel alkalmazott MFV módszer így elsősorban robusztus, zajszűrő jellegű térképezésre alkalmas, amely a domináns térbeli trendek kiemelését támogatja.



50. ábra: GP térképek fix 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)

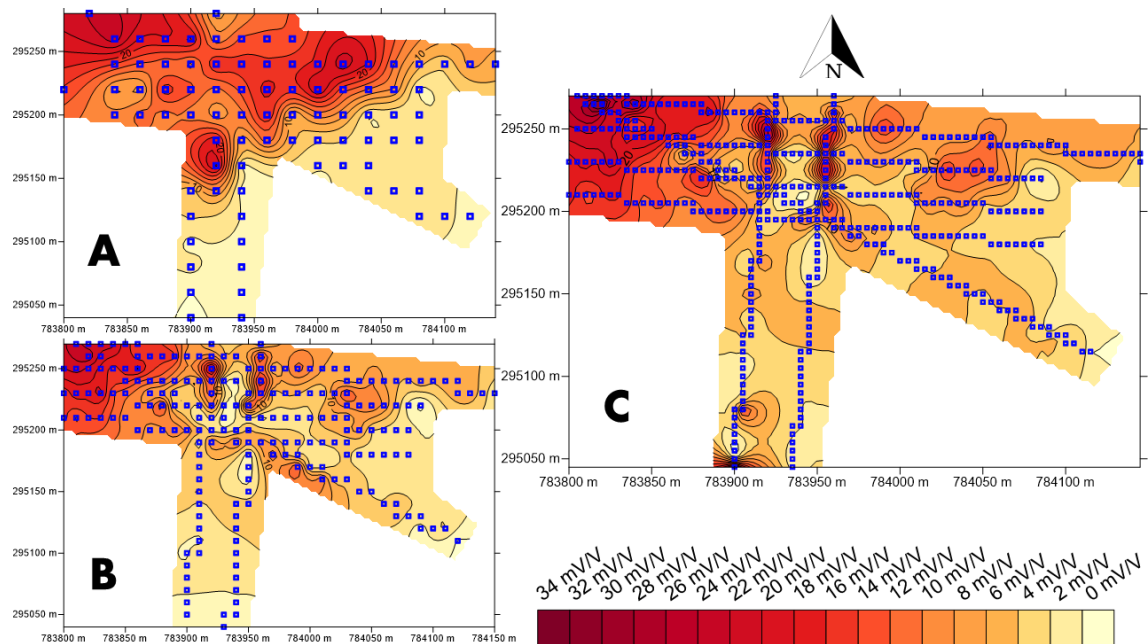
4.3.5.4 Steiner-féle MFV módszer térképei

Az erősebb kontraszt miatt a színskálán nem egyenletesen osztottam szét a színeket, főként a fajlagos ellenállás térképeknél, hogy a különböző jellegzetes hatások megfigyelhetők legyenek. Az 51. ábrán, a 49. ábrán látható 100 ohmm-es maximumhoz képest már 400 ohmm-es maximum látható ugyanazon pontoknál, illetve a minimum értékek is 0 ohmm-hez közelítenek a 20 ohmm helyett. Ezek az értékek az adatok manuális áttekintése után jobban közelítik az adott cellaoszlop domináns értékeit a fix ε -os módszerhez képest. Az 51/A-B-C ábrák felbontásbeli különbségei nem mutatnak akkora eltérést egymás között, a 10 m * 10 m-es felbontáson figyelhető meg a domináns térbeli hatások a helyi kieső számolt értékektől mentesen. Ezek a kieső, akár hibának kinéző adatok, gyakran információ tartalommal bíró értékes adatok, nem minden esetben indokolt azok szűrése.



51. ábra: Fajlagos ellenállás 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)

Az 52. ábrán látható polarizálhatósági adatoknál szintén jobban kiemelkednek a zónákra jellegzetes értékek a 3. ábrához képest. Az 52/B-C ábrákon megfigyelhető, hogy az eltérő irányú szelvények adatai nem minden esetben konvergálnak azonos domináns értékre. Ennek oka, hogy egy cellaoszlop több, eltérő fizikai tulajdonságú mélységi zónát tartalmazhat, ami nem egysúcsú eloszlást eredményez. Ilyen esetekben az MFV módszer több lokális maximum közül választ, ami növeli az eredmény érzékenységét a lokális dominanciára. Ilyen esetekben stabilabb eredményt adhat a fix ε -os MFV módszer. Az 52/A ábrán a kellően nagy cellaméretük elegendően „összekeverik” az adatokat, hogy mindenhol a magas töltetességgel rendelkező értékek válhassanak az oszlopok dominánsaivá, ott jól működik a módszer.



52. 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 vizsgálat célja a fajlagos ellenállás és a gerjesztett polarizációs adatok oszlopokba rendezett térbeli adattömbjeinek robusztus csoportosítása volt az MFV módszer alkalmazásával. A módszer elősegíti, hogy az eltérő mélységből származó, de azonos vetületi (EOV) koordinátákhoz tartozó mérési pontok reprezentatív paraméterértéke meghatározható legyen. A fix ε paraméterrel végzett MFV-iterációk gyors konvergenciát mutattak (átlagosan 4–5 iteráció alatt), és stabil, a mért adatok domináns értéktartományát jól reprezentáló M paraméterhez vezettek. Ezzel szemben a klasszikus Steiner-féle, ε -paramétert is iteráló eljárás esetében a konvergencia lassabbnak bizonyult, és az ε fokozatos csökkenése következtében a súlyozás egyre inkább a sűrűsödési centrum felé koncentrált. Az M paraméter értéke több adattömb esetében eltért a fix ε megoldástól. A Steiner-féle megközelítés így a domináns értékek kiemelésére alkalmas, azonban érzékenyebb a lokális eloszlásformára, ezért alkalmazása körültekintést igényel.

4.3.5.5 Az MFV módszerek kvantitatív összehasonlítása

A két módszer összehasonlítása alapján megfigyelhető, hogy a fix ε eljárás általában stabilabb és reprodukálhatóbb csoportosított értékeket szolgáltat, míg a Steiner-féle iteratív súlyozás érzékenyebb a lokális sűrűsödésekre és a domináns értékek kiemelésére. Az eltérések mértéke azonban nem egységes, hanem az adatrendszer szerkezetétől és a mintavételi sűrűségtől is függ, ami indokolja a kvantitatív összehasonlítás elvégzését (11. táblázat).

11. táblázat: Az MFV módszerek kvantitatív összehasonlítása relatív eltérés és szórás alapján. (szerző saját szerkesztése)

		5 x 5 m		10 x 10 m		20 x 20 m	
		fix ϵ	iter. ϵ	fix ϵ	iter. ϵ	fix ϵ	iter. ϵ
fajlagos ellenállás	Relatív eltérések átlaga [%]	20	21	18	21	22	25
	Relatív eltérések szórása [%]	22	16	24	16	25	16
GP	Relatív eltérések átlaga [%]	43	19	39	19	21	37
	Relatív eltérések szórása [%]	46	17	38	17	17	30

A 11. táblázat a különböző MFV-paraméterezések hatását mutatja a relatív eltérés és annak szórása alapján. A relatív eltérés az MFV és az átlagérték különbségét jellemzi, amely jelen esetben nem hibamértékként, hanem az átlag torzító hatásától való eltérés mértékeként értelmezhető, míg a szórás az adott megközelítés stabilitását jelzi.

A fajlagos ellenállás esetében az iteratív ϵ -paraméterrel számított MFV minden vizsgált felbontásban nagyobb relatív eltérést (21–25%) és kisebb szórást (16%) mutatott, mint a fix ϵ -paraméteres változat (eltérés: 18–22%, szórás: 22–25%). A nagyobb relatív szórású adatrendszerekben az iteratív eljárás hatékonyabban emeli ki a domináns értékeket, miközben stabilabb eredményt biztosít.

A gerjesztett polarizáció esetében ezzel szemben a módszer viselkedése a mintavételi sűrűségtől is függ. Sűrű mintavételezésnél (5×5 m, 10×10 m) a fix ϵ -paraméterrel számított változat alacsonyabb szórást és kiegyensúlyozottabb viselkedést mutatott, míg ritkább mintavételezés (20×20 m) esetén az iteratív ϵ -paraméterrel működő megközelítés mutatott kedvezőbb viselkedést. A kisebb relatív szórású adatrendszerekben az MFV módszer stabil alkalmazásához nagyobb térbeli aggregáció szükséges.

Az adatrendszerek relatív szórásának jellemzésére a variációs együtthatót (*coefficient of variation*, $CV = \text{szórás}/\text{átlag}$) alkalmaztam, amely biztosítja különböző nagyságrendű paraméterek összehasonlítását. A két adatrendszer közötti különbség összefüggésbe hozható a relatív szórással: a fajlagos ellenállás esetében a variációs együttható nagyobb ($CV \approx 1,34$), mint a GP esetében ($CV \approx 0,73$), mert a fajlagos ellenállás adatai heterogénebbek és érzékenyebbek a kieső értékekre. Ennek megfelelően az MFV módszer hatása ott markánsabban és következetesebben jelenik meg.

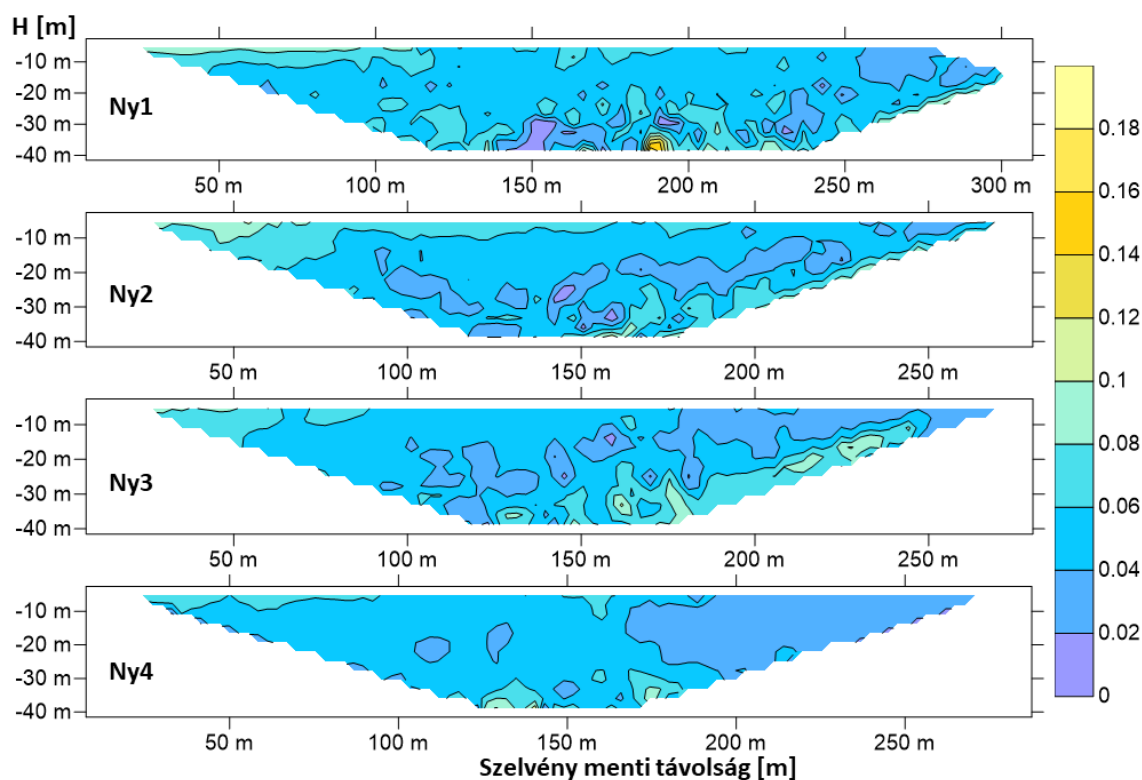
Megállapítható, hogy az MFV módszer optimális alkalmazása nemcsak az algoritmus megválasztásától, hanem az adatrendszer relatív szórásától és a mintavételi sűrűségtől is függ. Ez megerősíti, hogy a módszer paraméterezése a vizsgált rendszer jellegéhez igazítva szükséges, ami összhangban van az integrált értelmezési megközelítés alapjával.

4.3.6 Szennyezési indikátorok a GP spektrum alapján

A korábbi alfejezetekben a hulladéktest és a potenciálisan szennyezett zónák lehatárolása elsősorban a fajlagos ellenállás, a GP tölthetőség és a többparaméteres statisztikai módszerek alapján történt. A jelen részben ezt egészítem ki a GP-idősorok spektrális felbontásával, amely módot ad a különböző polarizációs mechanizmusokhoz köthető térbeli mintázatok elkülönítésére. A GP-idősorok feldolgozása során a jeleket nem klasszikus értelemben vett időablakokra bontottam, hanem WAV-alapú eljárással időállandó-spektrumot képeztem. A továbbiakban a jelölések egyszerűsítése érdekében a $k = 1-5$ komponenseket „időablakként” hivatkozom, azonban ezek valójában eltérő időállandó-tartományokat reprezentálnak.

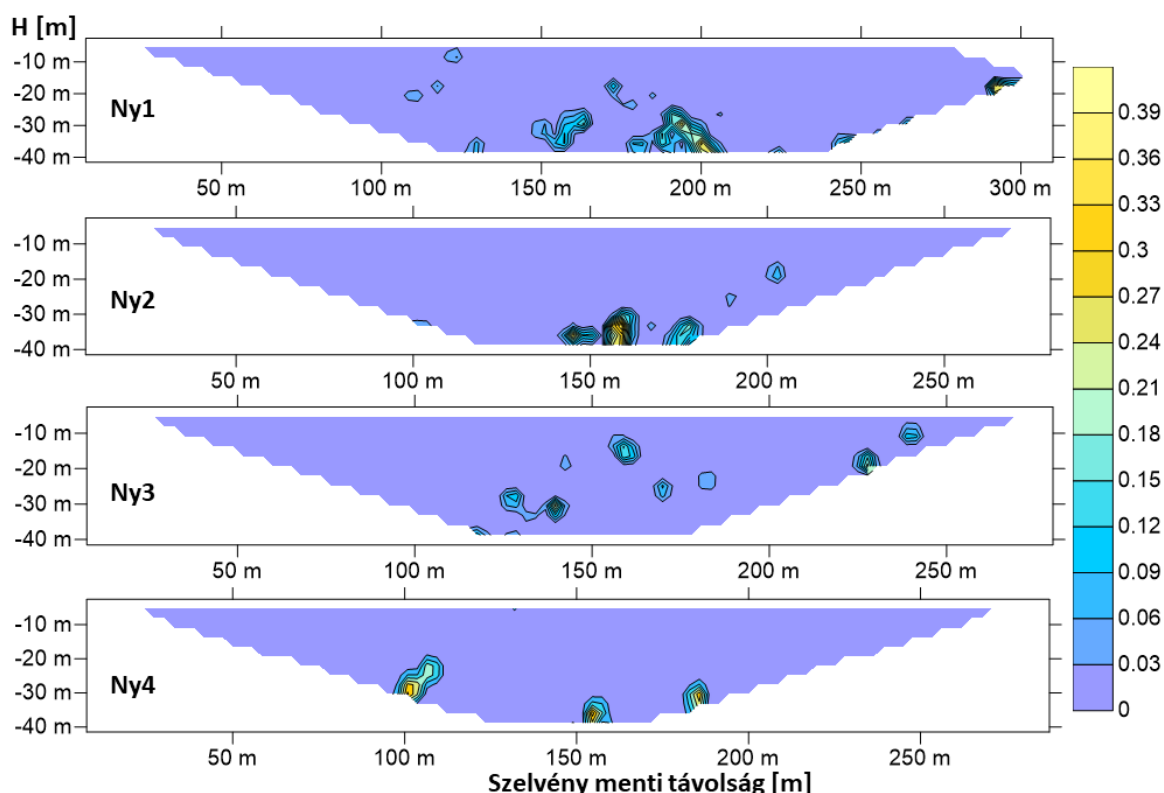
4.3.6.1 A vertikális 2D-s szelvények értelmezése

A $k = 1$ időablakhoz tartozó vertikális GP-szelvények (53. ábra) a legrövidebb csillapítási komponenst reprezentálják, amelyet elsősorban geometriai és gyors polarizációs folyamatok befolyásolnak. A négy párhuzamos szelvény (Ny1–Ny4) mindegyikén az GP-válasz alacsony amplitúdójú és térben viszonylag egyenletes. A megfigyelt kisebb anomáliák nem követhetők egyik szelvényről a másikra, a pozíciójuk és amplitúdójuk változó. Ezek a vertikális GP-szelvények azt jelzik, hogy a vizsgált területen a rövid idejű csillapítási komponensek nem hordoznak specifikus információt a szennyezőanyagok jelenlétéről, ugyanakkor nélkülözhetetlenek a teljes GP-válasz időállandó-alapú szétválasztásában.



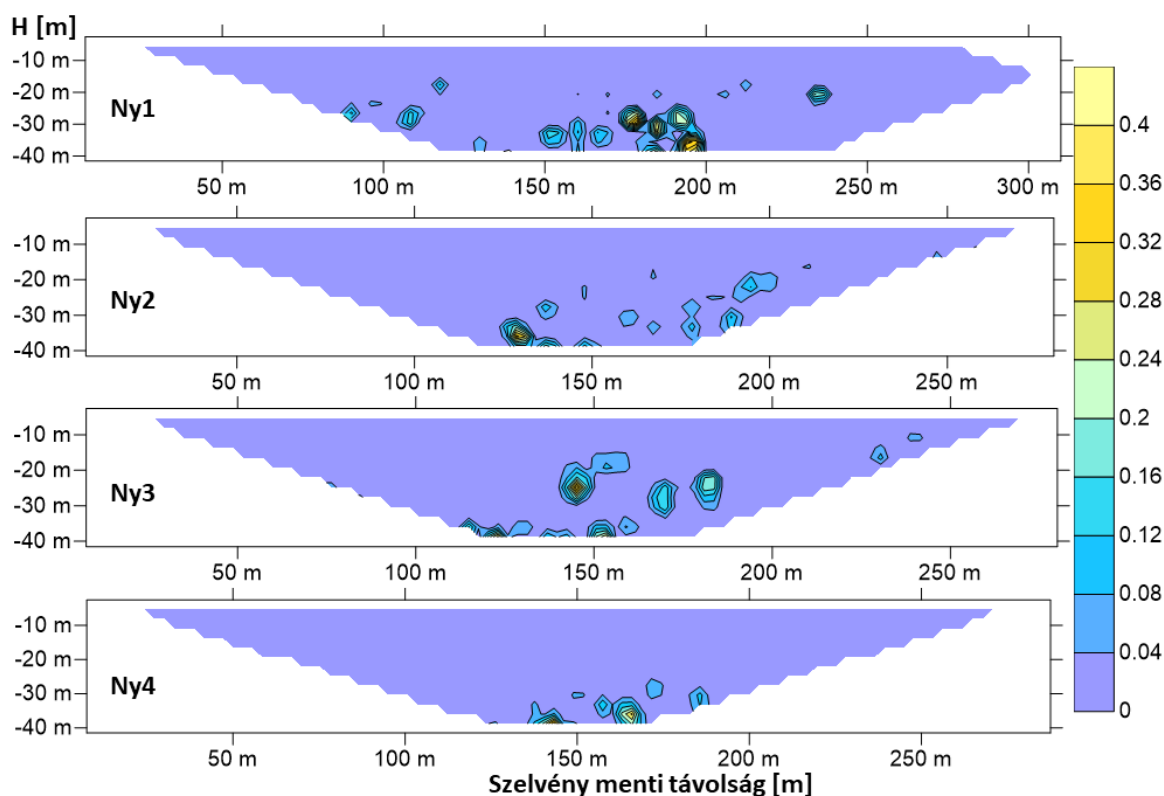
53. ábra: A legrövidebb relaxációs időtartományhoz ($k = 1$) tartozó, normalizált WAV-paraméter vertikális szelvényei az Ny1-4 szelvények mentén. (szerző saját szerkesztése)

A $k = 2$ időállandóhoz tartozó GP-válaszok (54. ábra) elsősorban membrán- és redox polarizációkhoz, és elektrokémiai aktív zónákhoz köthetők. Mind a négy vertikális szelvényen (53. ábra) a háttér GP-válasz alacsony és viszonylag homogén, amelyből lokálisan elkülönülő közepes amplitúdójú anomáliák emelkednek ki. Ezek az anomáliák jellemzően oldalirányban csak néhány tíz méter kiterjedésűek, és főként a felszín alatt 20 méterrel jelentkeznek. A sekélyebb zónákban (-10 m és -20 m) csak elszórtan figyelhetők meg anomáliák, mert a $k = 2$ időablakhoz tartozó polarizációs mechanizmusok ott nem jellemzőek. A párhuzamos szelvények összevetése alapján több, térbeli jelenség is azonosítható. A szelvények középső szakaszán (kb. 130–200 m) megjelenő anomáliák mélységükben és laterális helyzetükben jól korrelálnak. Egyes anomáliák enyhe oldalirányú eltolódást mutatnak a szelvények között, ami háromdimenziós kiterjedésű, lencseszerű zónákra utal. A hulladéklerakó várható inhomogenitását figyelembe véve ez reális eredménynek tekinthető. A több szelvényen követhető anomáliák alkalmasak a hulladéktesthez és a potenciálisan szennyezett zónákhoz kapcsolódó térfogatok térbeli elkülönítésére.



54. ábra: A rövid relaxációs időtartományhoz ($k = 2$) tartozó, normalizált WAV-paraméter vertikális szelvényei az Ny1-4 szelvények mentén. (szerző saját szerkesztése)

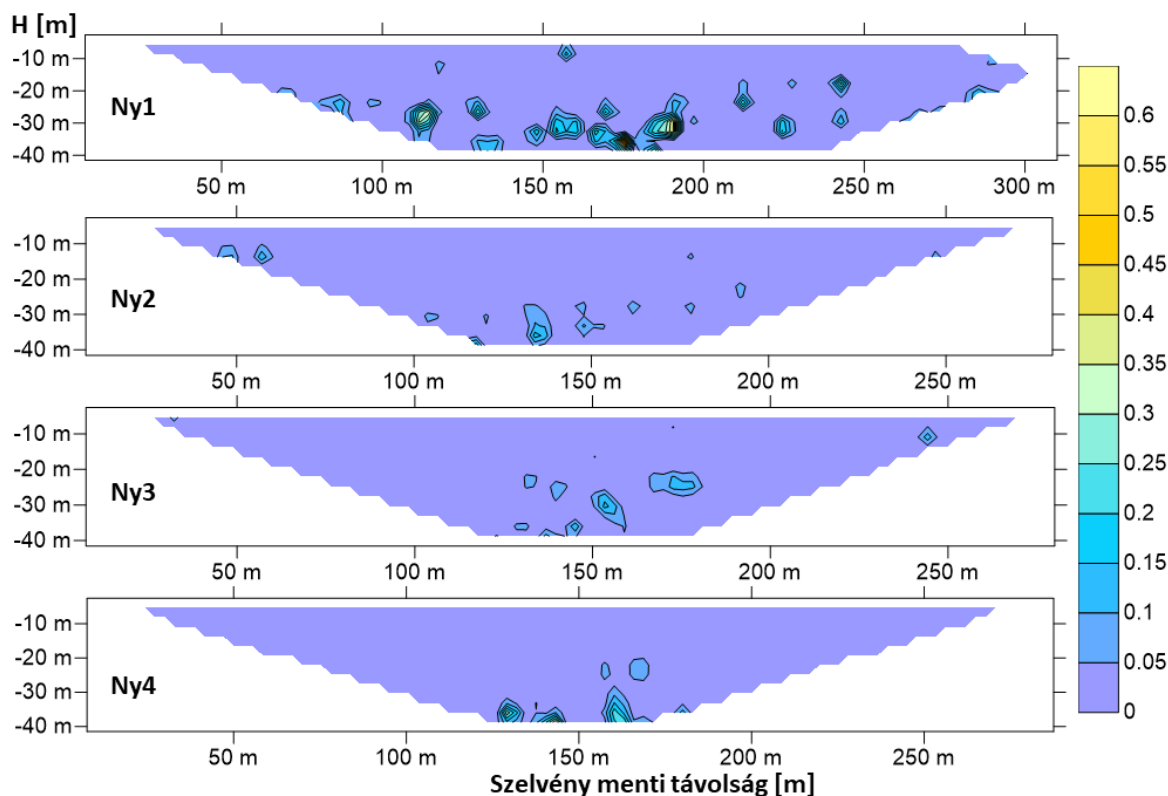
A $k = 3$ időablakhoz tartozó vertikális GP-szelvények (55. ábra) a közepes csillapítási időállandók egy későbbi fázisát reprezentálják, ahol a polarizációs jelenségek már kevésbé domináltak a geometriai és elektrolitikus hatások által, és egyre inkább anyagminőségi, elektrokémiai folyamatokhoz köthetők. A négy szelvény mindegyikén megfigyelhetők elkülönülő, közepesen magas amplitúdójú GP-anomáliák, amelyek térben koncentráltabbak, mint a $k = 2$ esetében. Az anomáliák döntően a -25 m és -40 m közötti mélység és 100–200 m szelvény menti tartományban jelennek meg, míg a felszínközeli zónák nem mutatnak kieső értékeket. A párhuzamos szelvényeknél az anomáliák helyzete jobban korrelál, mint a $k = 2$ esetében. Az Ny1 és Ny3 szelvényeken több, egymáshoz közeli, de elkülönülő maximum figyelhető meg, ami összetett, lencseszerű zónaszerkezetre utal. A másik két szelvényen megjelenő gyengébb, de hasonló mélységű anomáliák valószínűsítik a jelenségek háromdimenziós kiterjedését.



55. ábra: A közepes relaxációs időtartományhoz ($k = 3$) tartozó, normalizált WAV-paraméter vertikális szelvényei az Ny1-4 szelvények mentén. (szerző saját szerkesztése)

A $k = 4$ időablakhoz tartozó vertikális GP-szelvények (56. ábra) a közepes és hosszú csillapítási időállandók közötti átmeneti tartományt képviselik. Ebben a fázisban a rövid időállandójú geometriai és elektrolitikus hatások szerepe már kisebb, így a válaszok inkább tartósabb elektrokémiai folyamatokhoz köthetők. A háttérválasz továbbra is alacsony, ugyanakkor a korábbi időablakokhoz képest ritkább, de kontrasztosabb anomáliák jelennek

meg, főként -30 m és -40 m közötti mélységben. Ezek több esetben térben egybeesnek a $k = 3$ időablak erősebb maximumaival, ugyanakkor amplitúdójuk és kiterjedésük már a $k = 5$ időablakban megfigyelhető mintázathoz közelít. A $k = 4$ komponens ezért fontos átmeneti szerepet tölt be a mélyebb, potenciálisan anyagminőségi különbségekhez köthető zónák lehatárolásában.

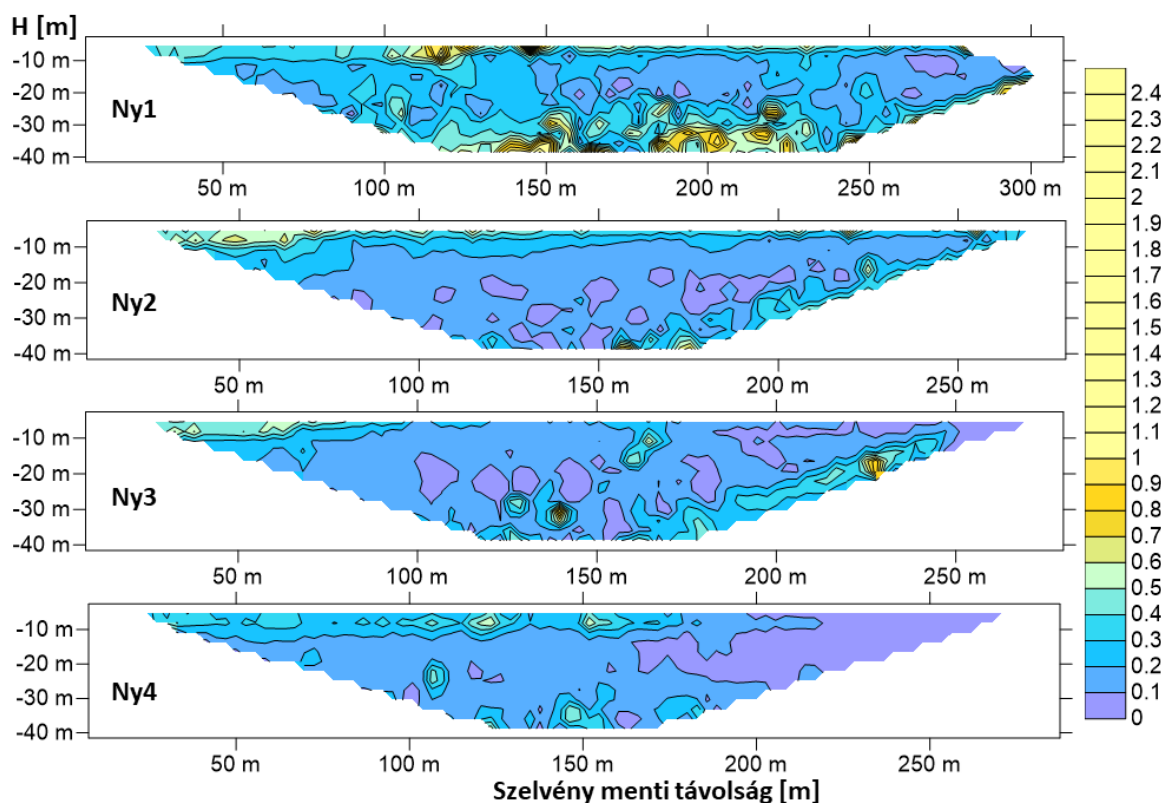


56. ábra: A hosszú relaxációs időtartományhoz ($k = 4$) tartozó, normalizált WAV-paraméter vertikális szelvényei az Ny1-4 szelvények mentén. (szerző saját szerkesztése)

A $k = 5$ időablakhoz tartozó vertikális GP-szelvények (57. ábra) a csillapítási folyamatok leghosszabb komponensét reprezentálják, amely a töltésfelhalmozódás hosszú idejű fennmaradásához kötődik. A WAV-alapú időfelbontás ebben az időablakban éri el legnagyobb diagnosztikai értékét (2,4), amellyel lehetővé válik a potenciálisan szennyezett zónák elkülönítése a pusztán litológiai vagy ásványtani eredetű GP-válaszoktól. Az 57. ábrához tartozó színskálán már az 1-es értékhez társítottam a világossárga színt, hogy a nagyobb amplitúdójú csomópontok ne nyomják el a háttérben megjelenő szintén fontos összefüggő hatásokat. Ebben az időtartományban a mért GP-válasz már elhanyagolható mértékben tartalmaz geometriai vagy rövid elektrolitikus hatásokat, és elsősorban tartós elektrokémiai, biogeokémiai és szennyezőanyag-indukált polarizációs folyamatokat tükröz. A négy párhuzamos szelvény mindegyikén meglehetősen megnövekedett amplitúdótartomány és komplex térbeli mintázat figyelhető meg a korábbi időablakokhoz

képest. A GP-válaszok mind a négy szelvény felső 15 méterében konzisztensen megjelennek egybefüggően, utalva a hulladéklerakóhoz köthető, háromdimenziós kiterjedésű zónára. Mindez az első kettő szelvény mentén kb. 0 - 250 m között horizontális távolságban látható, míg a következők mentén egyre keskenyebb szakaszokon. A -15 m és -40 m közötti mélységtartományban is kimutatható emelkedett polarizációs érték, főként az első szelvény esetében figyelhető meg kiterjedt, laterálisan összefüggő, magas amplitúdójú zóna, amely a teljes mélységtartomány lényeges részét lefedi, és több lokális maximumot is tartalmaz. Ez a mintázat markánsan eltér a $k = 2-4$ időablakokban megfigyelt, izoláltabb anomáliáktól.

A nagy amplitúdójú, kiterjedt anomáliák azt jelzik, hogy a vizsgált területen nem csupán lokális forrásokhoz, hanem kiterjedtebb, potenciálisan anyagfelhalmozódással és áramlással érintett térfogatokhoz köthető folyamatok vannak jelen. Ehhez az időállandóhoz tartozó GP-válaszok elsősorban olyan tartós elektrokémiai és biogeokémiai folyamatokhoz köthetők, amelyek összefüggésbe hozhatók szerves eredetű lebomlási folyamatokkal, illetve ionokban gazdag pórusfolyadékok jelenlétével. Az anomáliák laterális folytonossága és nagy vertikális kiterjedése pedig azt jelzi, hogy a szennyeződés nem pontszerű, hanem kiterjedt, hidrogeológiai rendszerhez kapcsolódhat.

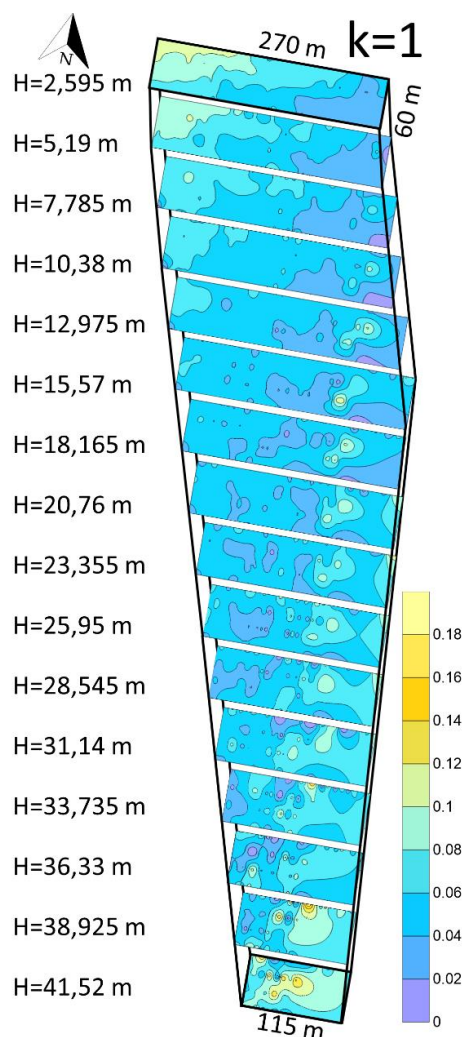


57. ábra: A leghosszabb relaxációs időtartományhoz ($k = 5$) tartozó, normalizált WAV-paraméter vertikális szelvényei az Ny1-4 szelvények mentén. (szerző saját szerkesztése)

4.3.6.2 A horizontális 2D-s szelvények értelmezése

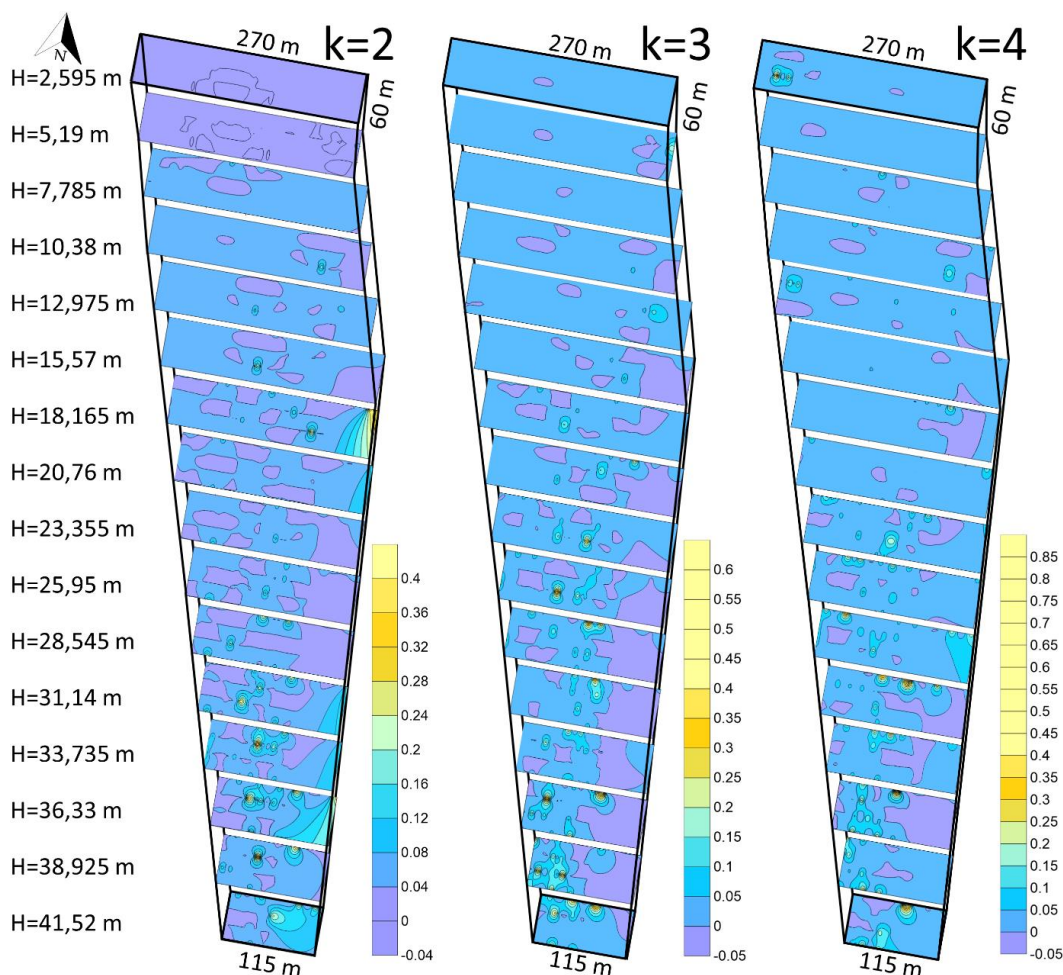
A vertikális szelvényekben azonosított mintázatok térbeli folytonosságának vizsgálatához a WAV-paraméterek horizontális szeleteit is elkészítettem. A négy vertikális szelvény térbeli pontjaiból elkészítettem a különböző mélységszintekhez tartozó horizontális szeleteket mind az öt k időablak esetében. A pontok között a krigelés módszerével sűrítettem be az adatrácshálót. Ezen megjelenítés segítségével jobban szemügyre vehetők az összefüggő jelenségek az egyes szelvények mentén, melyek a vertikális szelvények esetén nem voltak szembetűnőek. Külön megvizsgáltam az első időablak ($k = 1$) eredményeit, a középső háromhoz ($k = 2, 3$ és 4) és az utolsóhoz ($k = 5$) tartozókat is.

A $k = 1$ szelettérképek (58. ábra) döntően alacsony GP-válaszú, viszonylag homogén hátteret mutatnak, amelyet lokálisan kis amplitúdójú anomáliák szakítanak meg. Az amplitúdótartomány szűk, mert ezek a válaszok elsősorban gyors, felszínközeli folyamatokhoz és gyengébb felületi polarizációhoz köthetők.



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

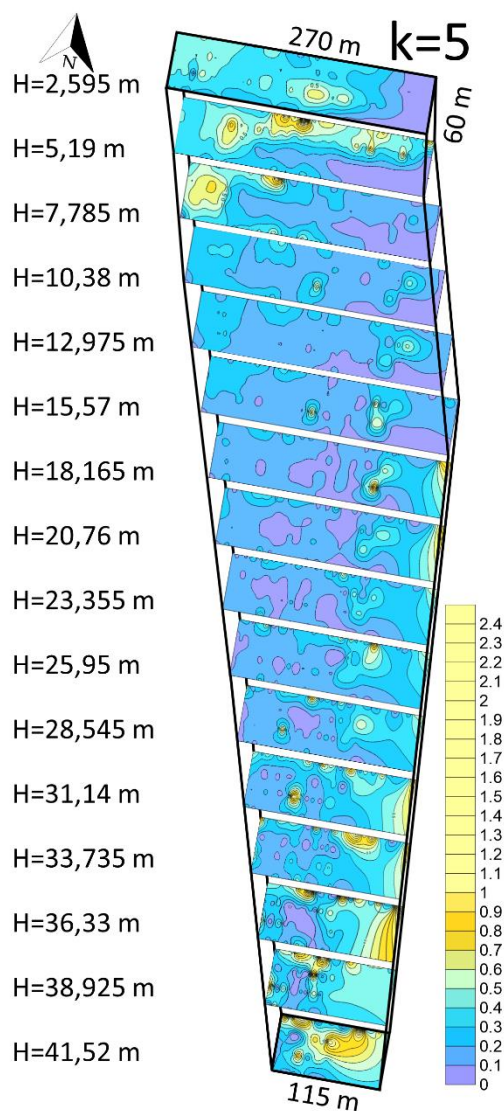
A $k = 2-4$ időablakokban (59. ábra) a GP-válasz amplitúdója és kontrasztja egyértelműen megnövekszik. Mind a három itt bemutatott időablakban 0,4-es értékhez rendelt a világossárga színnel jelölt zónákat, hogy azokat össze lehessen hasonlítani, és ne nyomja el egy-egy helyi amplitúdócsúcs a többi hatás megjelenését.



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

A szeletekben koherens, foltszerű anomáliák jelennek meg, amelyek több mélységben is követhetők, és laterálisan jól korrelálnak. Ezekben az időtartományokban az anomáliák vertikálisan részben folytonosak, és egyes zónák több egymást követő mélységi szeletben is megjelennek. A közepes időállandók elsősorban anyagminőségi különbségekre érzékenyek, és nem pusztán geometriai hatásokat tükröznek.

A $k = 5$ horizontális szelettérképek (60. ábra) markánsan eltérnek az előzőektől. Az amplitúdótartomány lényegesen megnövekszik (2,4), és erősen lokalizált, nagy GP-értékű anomáliák jelennek meg, gyakran éles határokkal. A hosszú időállandók anomáliái gyakran nem korrelálnak közvetlenül az előzőleg bemutatott rövid és közepes időállandók mintázatával.



60. ábra: 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)

Jól megfigyelhető a felső 10-15 méterben szétterülő egybefüggő, a mélységgel fokozatosan gyengülő és csökkenő kiterjedésű anomália, amely a hulladéklerakóhoz köthető jelenséget valószínűsít. A mélység növekedésével azonban megjelennek vertikálisan egybefüggő gócpontok a keleti részén a szelvényeknek, amelyek potenciálisan a módszerre érzékeny anyagok vertikális irányú migrációjára utalhatnak.

4.3.6.3 A WAV-paraméterek dominanciaelemzése

A vertikális és horizontális szelvények kvalitatív értelmezését kiegészítve a domináns időállandó-tartományok megoszlását kvantitatív módon is értékeltem. A módszertani fejezetben (3.8) már ismertettem a WAV-paraméterek standardizált összehasonlításának módszerét. Az eljárás alkalmazásával minden térbeli pontra meghatároztam a domináns időállandó-tartományt a standardizált értékek alapján. A módszert a négy párhuzamos fizikai szelvény adatain alkalmaztam; ezek az öt időablak ($k = 1-5$) szerinti feldolgozás után összesen 2703 térbeli pontot eredményeztek. Az eredmények összesítését a 12. táblázat mutatja.

12. táblázat: *A domináns időállandó-tartományok megoszlása a standardizált WAV-paraméterek alapján (szerző saját szerkesztése)*

Domináns időállandó	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5
pontok száma	995	996	103	156	453
Arány [%]	36,8	36,8	3,8	5,8	16,8

A rövid időállandókhoz tartozó komponensek ($k = 1-2$) a pontok mintegy 74%-ában dominálnak. Ezek a válaszok a vizsgált terület nagy részén jelen vannak, ugyanakkor elsősorban háttérjelenségekhez és gyors polarizációs folyamatokhoz köthetők. A közepes időállandók ($k = 3-4$) a pontok mintegy 10%-ában jelennek meg dominánsan, és térben lokális, jól körülhatárolható zónákhoz kapcsolódnak. Ezek a zónák összhangban állnak a vertikális és horizontális szelvényeken azonosított, lencseszerű szerkezeti egységekkel. A hosszú időállandóhoz tartozó komponens ($k = 5$) a pontok közel 17%-ában mutat dominanciát, amely markáns térbeli jelenlétet jelez. Ezek a zónák a korábbi értelmezések alapján kiterjedtebbek, valamint vertikálisan is folytonosabb szerkezetet mutatnak, és összefüggésbe hozhatók tartós elektrokémiai és biogeokémiai folyamatokkal, valamint potenciálisan szennyezett zónák jelenlétével.

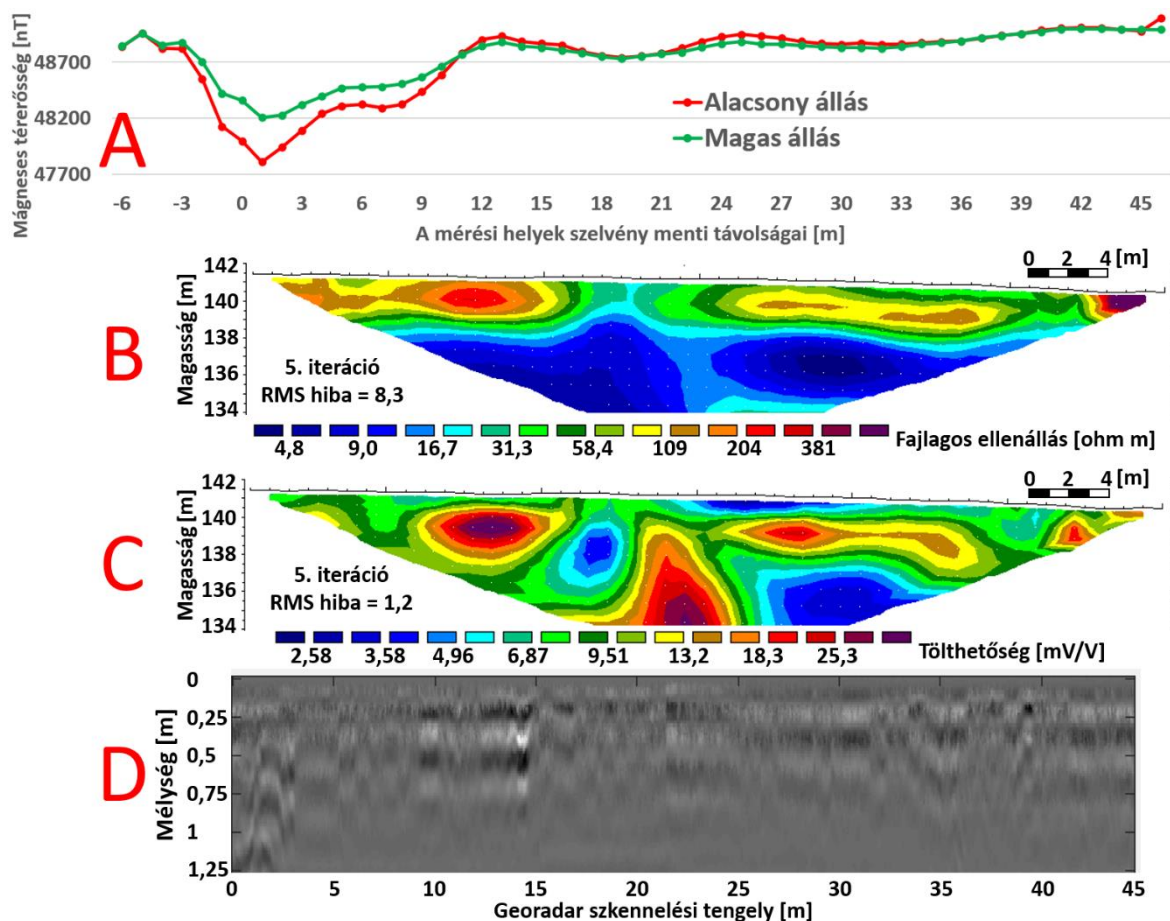
A standardizált dominanciaelemzés kvantitatívan is alátámasztja, hogy a különböző időállandó-tartományok nem csupán amplitúdójukban, hanem térbeli dominanciájukban is eltérnek egymástól. Ez megerősíti, hogy a WAV-alapú feldolgozás alkalmas a különböző polarizációs mechanizmusokhoz köthető térbeli mintázatok elkülönítésére. A GP-spektrum időállandó-alapú felbontása így a nyékládházi területen nemcsak a korábban lehatárolt zónák megerősítését szolgálta, hanem a rövid idejű háttérfolyamatoktól elkülöníthető, hosszabb időállandókhoz köthető komponensek révén azok belső szerkezetének és mélységi differenciáltságának részletesebb értelmezését is biztosította.

4.4 Mesterséges objektumok detektálása – építési terület vizsgálata

A nyékládházi, komplex diffúz szennyezési környezetben elvégzett vizsgálatot követően ebben a fejezetben egy eltérő jellegű, mesterséges objektumokat tartalmazó környezetben vizsgálom a módszertan alkalmazhatóságát.

4.4.1 A geofizikai adatok kiértékelte szelvényei közösen ábrázolva

A terepi geofizikai mérések feldolgozott eredményei (mágneses térerősség, fajlagos ellenállás, tölthetőség és földradar) összehasonlíthatók Nkwabi (2022) diplomamunkájában bemutatott ábrákkal. A mérési adatokat újrafeldolgoztam, és az ábrákat (61. ábra + mellékletek) egységesebb és jobban értelmezhető formában készítettem el. Mivel ugyanazon mérési adatokból származnak, a geofizikai tartalom lényegében nem változott.



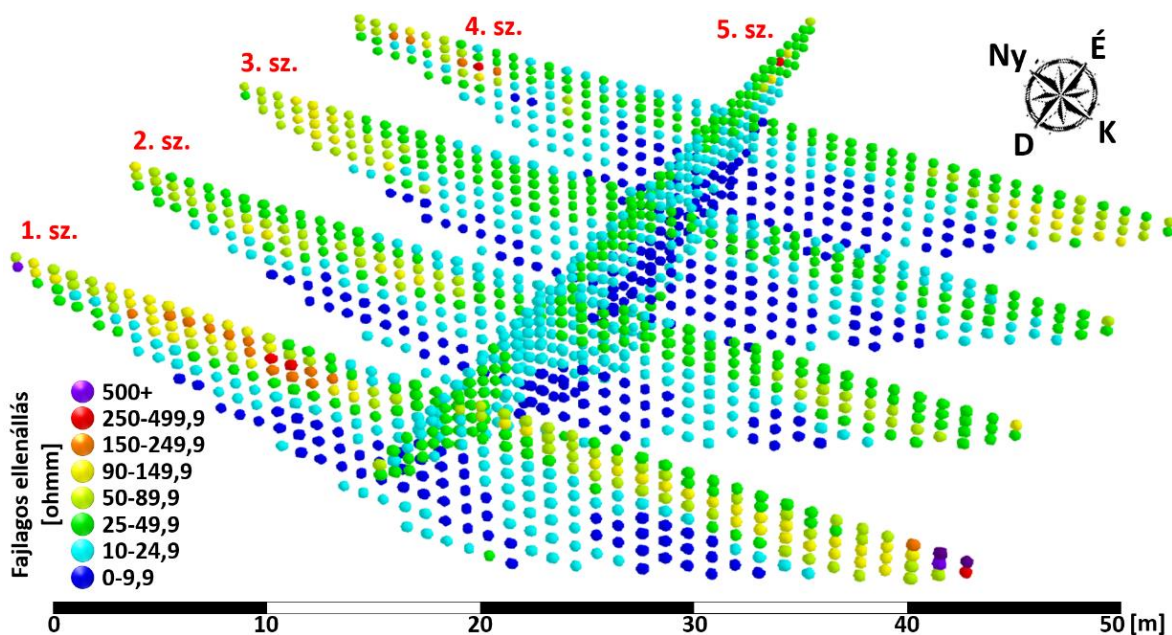
61. ábra: Az 1. kitűzött szelvény méréseinek a feldolgozott ábrái szelvénymenti távolságokkal összhangban: A: mágneses térerősség, B: fajlagos ellenállás, C: tölthetőség, és D: földradar szelvények (szerző saját szerkesztése)

A további ábrák már saját feldolgozási és értelmezési lépéseken alapulnak. Az 1. szelvényen a mért adatokat lehet megtekinteni, figyelve arra, hogy a különböző szelvényhosszak egymáshoz képest helyesen legyenek összehasonlítva.

Megfigyelhető, hogy a mágneses szelvényeken az alacsony és magas állásban mért értékek közötti nagy eltérések antropogén eredetű objektumokra utalnak. Több száz nT különbség esetén nagy valószínűséggel felszínközeli, kiterjedt, mágnesezhető tárgyak jelennek meg. A fajlagos ellenállás szelvényeken az alacsony ellenállású alapkőzet felett, a felső néhány méterben több közepes és magas ellenállású zóna figyelhető meg. Ezek több esetben egybeesnek a tölthetőségi szelvényeken megjelenő magasabb értékű zónákkal. A tölthetőségi szelvényeken emellett a szelvény középső részén, mélyebben is megjelenik egy magas értékű zóna, amely nem minden esetben társul magas fajlagos ellenállással. A radar szelvényen a szelvény harmadánál megjelenő anomália további megerősítést ad a többi módszer által jelzett jelenségekhez. Ugyanakkor a kavicsos-agyagos talaj erős jelcsillapító hatása miatt a mélyebb zónákból nem figyelhető meg markáns visszaverődés. A visszaverődési időket 0,1 m/ns átlagos terjedési sebességgel mélységgé alakítottam. A pontosabb becsléshez talajfizikai mintavétel lenne szükséges, azonban a földradar ebben az esetben kiegészítő mérésneként szerepelt.

4.4.2 A szelvények pontjainak a 3D-s megjelenítése

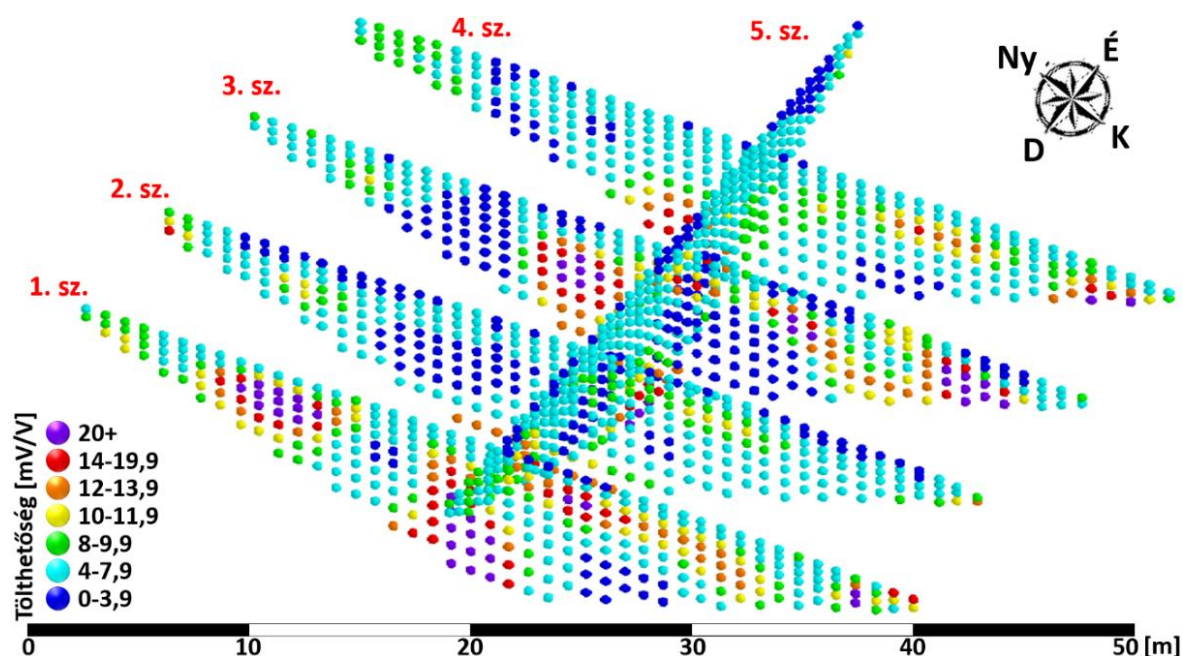
A 2D vertikális szelvények adatait a terepen kitűzött szelvények X–Y koordinátaival kiegészítve 3D-s modellt hoztam létre. A térbeli pontokat a GeoGebra szoftverben ábrázoltam. Először a hozzájuk tartozó fajlagos ellenállás értékek alapján rendelttem hozzájuk színeket a 62. ábrán.



62. ábra: Az 5 db szelvény fajlagos ellenállás értékei GeoGebra szoftverben ábrázolva (szerző saját szerkesztése)

A térben forgatható modell lehetőséget nyújt a több szelvényen átívelő összefüggések felismerésére. Ilyen például a nyugati oldalon megjelenő, felszínközeli magas fajlagos ellenállású zóna, amely egy hosszirányú szerkezetre utal. Igaz ugyan, hogy az első és a negyedik szelvényen magasabb értékekkel jelentkeznek. A keleti oldalon is megtalálható egy közepesen magas fajlagos ellenállású zóna, amely feltételezhetően korábbi építmények maradványaihoz köthető, amik az egyetem építkezésekor épültek oda. Egy évek óta nem használt utat már egy vékonyabb földréteg lepett be. A keleti oldalon megjelenő anomália az első szelvény kijelölésekor nem volt egyértelműen felismerhető, azonban az elektródák nehézkes leszúrása már utalt az út jelenlétére.

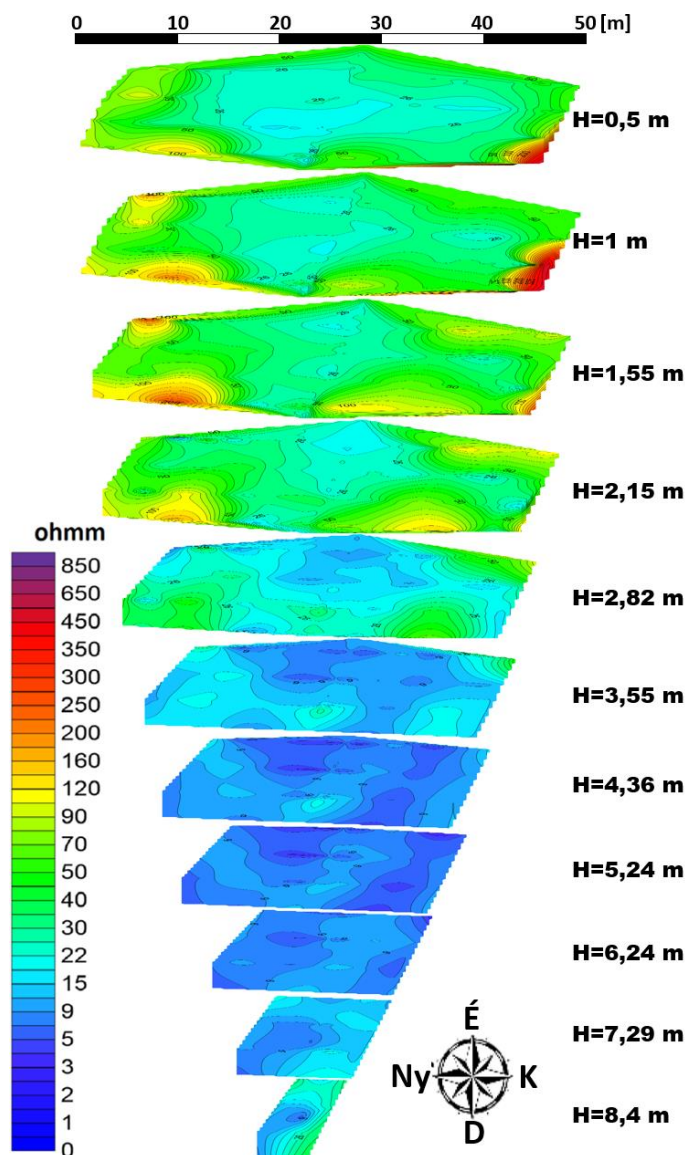
A tölthetőségi adatokat a 63. ábrán ábrázoltam az előző ábrához hasonlóan. A kékekkel és zölddel jelölt pontok alacsony polarizálhatóságú területeket mutatnak, míg a citrom-, narancssárga, piros és lilával jelöltek egyre jobban polarizálhatóságú zónákat jelölnek. A nyugati oldalon itt is megjelenik, az előző ábrához hasonlóan, az a vonalas szerkezet magas polarizálhatósággal. A terület közepén pedig kicsit mélyebben egy egészen magasan polarizálható zóna látható, amely a fajlagos ellenállás szelvényen alacsony értékekkel jelent meg. A feltételezhetően épületmaradványok területén is közepesen erősen polarizálható részek alakultak ki. Előfordulhat, hogy több helyen fémes eredetű emberi hulladék is ott maradt, amelyet a mágneses adatok is igazoltak.



63. ábra: Az 5 db szelvény tölthetőségi értékei GeoGebra szoftverben ábrázolva (szerző saját szerkesztése)

4.4.3 Horizontális paramétertérképek

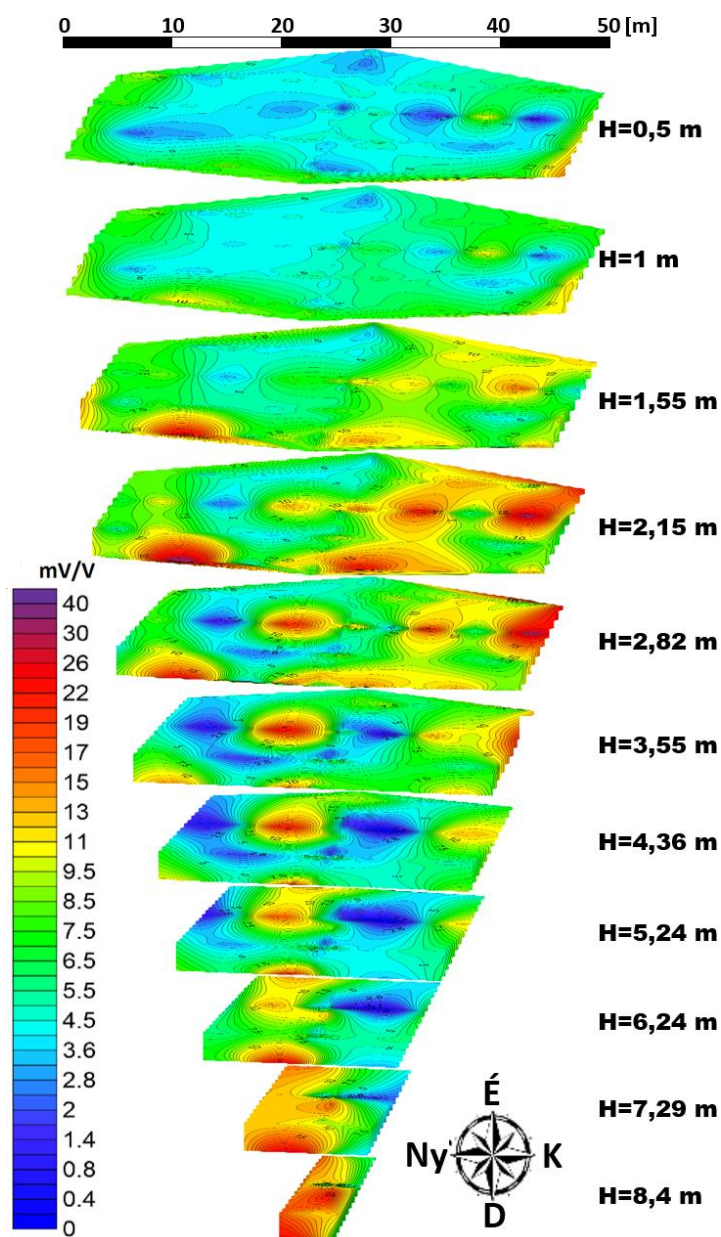
A térbeli pontokból *natural neighbor* interpolációval 11–11 darab horizontális térképet készítettem különböző mélységekben. A térképek jól szemléltetik az egyes mélységekben jelentkező anomáliákat. A 64. ábrán látszik, hogy tulajdonképpen a felső három méterben találhatók magasabb fajlagos ellenállású anyagok, alatta már alacsony értékű ez a paraméter.



64. ábra: A különböző mélységekben lévő fajlagos ellenállás horizontális szelettérképek (szerző saját szerkesztése)

A 65. ábrán megtekinthető polarizáltsági adatokat feltüntető horizontális paramétertérképek jól elkülöníthető zónákat jelölnek ki. A felső egy méter kevésbé mutat anomáliát, viszont alatta egészen magas polarizáltságú zónák figyelhetők meg. 1,55 - 3,55 méter mélység között figyelhető meg nagy kiterjedésű anomália. A térképek közepén 2,15 méter mélységtől egészen a vizsgálati mélység aljáig látható egy összefüggő nagy polarizáltságú vertikális

hengeres alakzat, amely akár egy kútszerű objektum jelenlétére is utalhat, azonban ennek igazolásához *in situ* vizsgálatok szükségesek.



65. ábra: A különböző mélységekben lévő tölthetőségi horizontális szelettérképek (szerző saját szerkesztése)

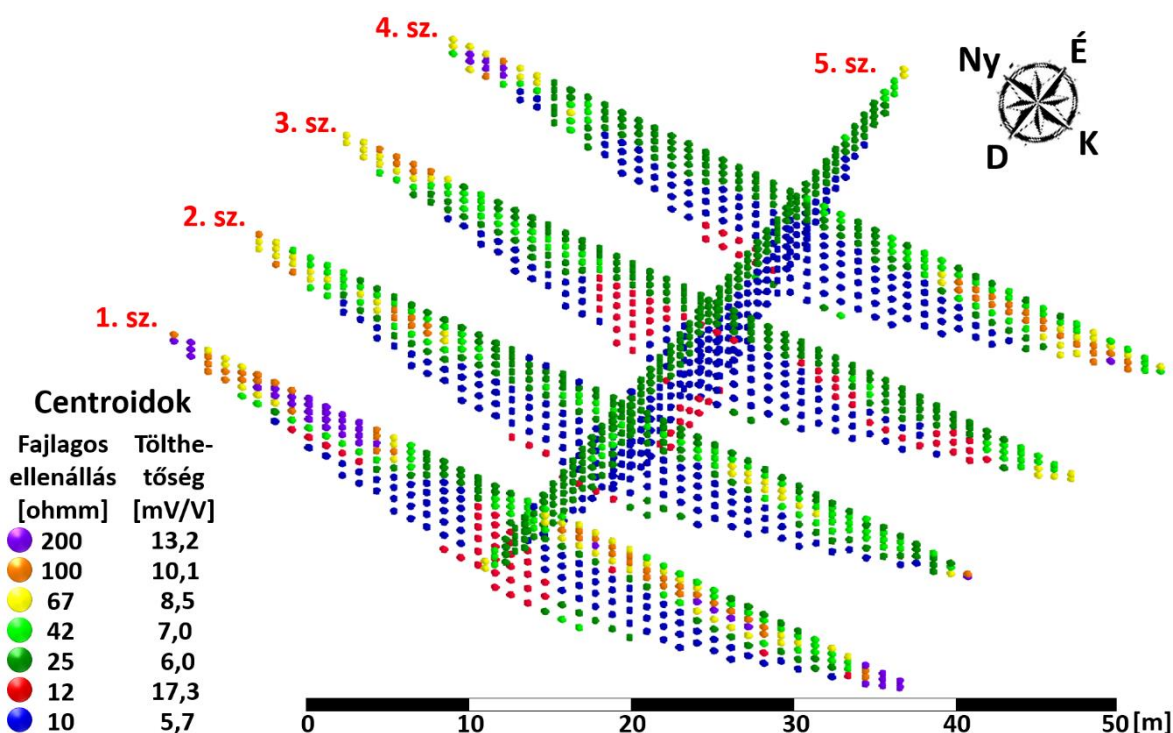
4.4.4 Klaszteranalízis eredménye

Az elemzés során a 10 klaszteres felbontás bizonyult alkalmasnak arra, hogy az algoritmus még megfelelő elemszámú, értelmezhető klasztereket különítsen el. A hasonló tulajdonságú, kis elemszámú klasztereket manuálisan összevontam, amelynek eredményeként a 13. táblázatban bemutatott 7 klaszteres rendszer jött létre. A 7 db klasztert a fajlagos ellenállás centroidok nagysága alapján rendeztem növekvő sorrendbe. Általánosságban elmondható, hogy ezeknél a vizsgált pontok esetében a nagyobb fajlagos ellenálláshoz magasabb tölthetőség tartozik, kivéve a 2-es klaszternél.

13. táblázat: A klaszteranalízis eredménye a fajlagos ellenállás és a tölthetőség figyelembevételével és a klaszterekbe tartozó pontok számával és eloszlásával (szerző saját szerkesztése)

centroid sorszámok	1	2	3	4	5	6	7
fajlagos ellenállás [ohmm]	10	12	25	42	67	100	200
GP tölthetőség [mV/V]	5,7	17,3	6,0	7,0	8,5	10,1	13,2
pontok száma [db]	511	112	542	229	103	77	43
fajlagos eloszlás	31,6%	6,9%	33,5%	14,2%	6,4%	4,8%	2,7%

A térbeli pontokhoz tartozó klaszterekhez színeket rendeltem, majd azokat a GeoGebra szoftverben ábrázoltam (66. ábra). A pirossal megjelölt klaszter foglalja magába azokat a térrészeket, amelyek antropogén eredetű vagy potenciálisan szennyezett zónákhoz köthetők. A kézzel és zöld színekkel jelölt klasztereknél nem valószínűsíthető az emberi tevékenység maradványa. A piroson kívül a sárga, narancs és lila színeknél fokozatos átmenetet képeznek a kevésbé és az erősebben érintett zónák között a föld alatt. A klaszterelemzés jól szemlélteti, hogy több paraméter együttes figyelembevételével hatékonyan kiemelhetők az azonos fizikai tulajdonságokkal jellemezhető térrészek.



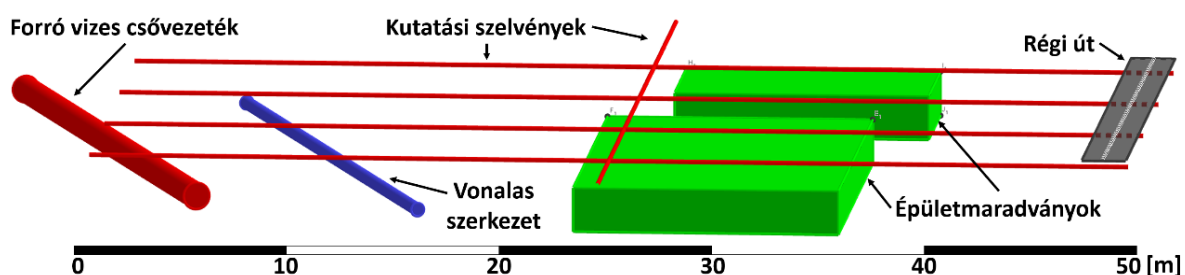
66. ábra: A 7 db klaszter 3D-s ábrázolása GeoGebra szoftverben (szerző saját szerkesztése)

A klaszterszám megválasztásának objektív ellenőrzése érdekében a miskolci adatrendszeren is elvégeztem a klaszterezés minőségének értékelését *silhouette index* segítségével, amelynek részletes bemutatása a következő fejezetben található. Itt is az alacsony klaszterszám-tartomány bizonyult kedvezőnek, míg a klaszterszám növelésével a mutató

értéke folyamatosan csökkent, és $k \geq 6$ esetén negatív tartományba került. Ez a tendencia összhangban van a nyékládházi esettanulmány eredményeivel, és megerősíti a módszer általános alkalmazhatóságát. A nagy klaszterszám nem új, jól elkülöníthető szerkezeti egységek megjelenését eredményezi, hanem elsősorban a paramétertér mesterséges felosztását okozza.

A 10 klaszteres felbontás így ebben az esetben sem tekinthető optimális statisztikai megoldásnak, ugyanakkor alkalmas a paramétertartomány részletes feltárására. Az ezt követő manuális összevonás ezért nem önkényes lépés, hanem a statisztikai és geofizikai szempontok együttes figyelembevételével végzett interpretációs optimalizálás.

A klaszteranalízis eredményeinek térbeli értelmezését kiegészítve elkészítettem a vizsgálati terület integrált, háromdimenziós értelmezési modelljét is (67. ábra), amelyben a különböző geofizikai módszerek alapján azonosított anomáliákhoz feltételezett objektumokat rendeltem.



67. ábra: A miskolci vizsgálati területen az integrált geofizikai értelmezés alapján lehatárolt feltételezett felszín alatti objektumok 3D-s modellje (szerző saját szerkesztése)

A modell bal oldalán pirossal jelölt lineáris elem nagy valószínűséggel csővezetéknek értelmezhető, amely a mágneses szelvényeken egyértelmű anomáliaként jelent meg. A geofizikai eredményekkel összhangban külső információk is alátámasztják ennek jelenlétét, ugyanakkor a pontos nyomvonal korábbi meghatározása bizonytalan volt, ami jól mutatja a geofizikai módszerek gyakorlati jelentőségét. A keleti oldalon azonosított, közepesen magas fajlagos ellenállású és mérsékelt polarizálhatóságú zóna egy korábban is létező útszerkezet maradványaként értelmezhető. A zöld színnel jelölt, néhány méter mélységben elhelyezkedő térrészek a geofizikai paraméterek együttes értelmezése alapján feltételezett épületmaradványokat reprezentálnak. A kézzel jelölt lineáris szerkezet szintén a mért adatok alapján került kijelölésre, azonban annak konkrét fizikai megfelelője nem azonosítható egyértelműen, így értelmezése bizonytalanabb. A bemutatott 3D-s objektumtérkép jól szemlélteti, hogy a különböző geofizikai módszerek együttes alkalmazásával a felszín alatti anomáliák nemcsak elkülöníthetők, hanem azok térbeli kapcsolatai alapján értelmezhetők is, még összetett, mesterséges hatásokkal terhelt környezetben is.

4.4.5 A klaszterszám optimalizálása és összehasonlító értékelése

A klaszterszám hatásának vizsgálatára a *silhouette index* alapján végeztem összehasonlító elemzést a nyékládházi és a miskolci adatrendszerek esetében. Az eredményeket a 14. táblázat foglalja össze.

14. táblázat: *A silhouette index alakulása különböző klaszterszámok esetén két vizsgált területen (szerző saját szerkesztés)*

	db pont	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Nyékládháza	9630	0,66	0,28	0,13	-0,05	-0,06	-0,18	-0,19	-0,28	-0,46	-0,39	-0,43	-0,44	-0,45
Miskolc	1621	0,61	0,48	0,44	0,11	-0,14	-0,17	-0,20	-0,30	-0,32	-0,32	-0,35	-0,37	-0,38

Mindkét vizsgálati területen azonos tendencia figyelhető meg: az alacsony klaszterszámok esetén magasabb *silhouette* értékek adódnak, amelyek jól elkülönülő klaszterstruktúrát jeleznek, míg a klaszterszám növelésével a mutató értéke folyamatosan csökken, és egy adott pont után negatívvá válik. A nyékládházi területen a maximum $k = 3$ klaszternél ($s = 0,66$) jelentkezett, míg a miskolci adatrendszerben szintén az alacsony klaszterszám-tartomány bizonyult kedvezőnek. A nagyobb klaszterszámok esetén mindkét területen a klaszterek közötti átfedés növekedése és a struktúra mesterséges felbontása figyelhető meg.

A klaszterszám növelése egy bizonyos pont után nem javítja a strukturális leírást, hanem a paramétertér túlzott felbontásához vezet. Ugyanakkor a nagyobb klaszterszámok alkalmazása hasznos lehet a paramétertartomány részletes feltárására, ezért ezek inkább exploratív eszközként értelmezhetők. A klaszteranalízis így nem tekinthető teljesen automatikus osztályozási módszernek, hanem olyan interpretációs eszköznek, amelynek eredménye nagymértékben függ a választott klaszterszámtól.

5. Következtetések és gyakorlati alkalmazhatóság

Ebben a fejezetben a dolgozat főbb eredményeit összegzem, és röviden kitérek a módszertani megközelítés gyakorlati alkalmazhatóságára. A kutatás egyik legfontosabb tanulsága az, hogy felszínközeli, heterogén és antropogén hatásokkal terhelt területek vizsgálatánál nem egyetlen geofizikai paraméter vagy egyetlen feldolgozási lépés adja a megbízható értelmezés alapját, hanem a különböző módszerek egymásra épülő, integrált alkalmazása.

A dolgozatban bemutatott vizsgálatok során a mérési tervezéstől kezdve az inverzió, a térbeli adatbázis kialakításán, a horizontális szeletelésen, valamint a statisztikai és spektrális feldolgozáson át egy egységes értelmezési rendszer alakult ki, amely csökkentette az interpretáció bizonytalanságát. A kontroll geológiai modellen végzett paraméterérzékenységi vizsgálatok azt mutatták, hogy az elektródaelrendezés megválasztása alapvetően befolyásolja a különböző mélységben és eltérő dőléssel elhelyezkedő hatók kimutathatóságát. A vizsgált modell esetében a Wenner-béta elrendezés adta a legkedvezőbb kompromisszumot, míg a dipól–dipól elrendezés a rétegdőlés érzékelésében bizonyult hasznos kiegészítésnek. Ez megerősítette, hogy a mérési geometria megválasztása alapvetően meghatározza az értelmezés megbízhatóságát.

A zagytározó környezetében végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a vezetőképességi változások térbeli és mélységi követése alkalmas a potenciálisan szennyezett zónák lehatárolására. Ez az esettanulmány egyszerűbb adatstruktúrája ellenére jól demonstrálta, hogy a geoelektromos módszerek érzékenyen reagálnak a környezeti változásokra, és megfelelően értelmezve hasznos információt adhatnak a felszín alatti állapotokról akkor is, ha a teljes feldolgozási lánc nem minden eleme alkalmazható.

A nyékládházi rekultivált hulladéklerakó vizsgálata során vált a legjobban láthatóvá a kidolgozott módszertani rendszer előnye. A fajlagos ellenállás elsősorban a hulladéktest geometriai lehatárolásában adott használható eredményt, míg a GP tölthetőség és a WAV-alapú spektrális feldolgozás a potenciálisan szennyezett zónák mélységi és oldalirányú kiterjedésének részletesebb értelmezését biztosította. A geodéziai adatokkal támogatott 2D inverziók térbeli összeillesztésével kialakított 3D adatbázis, valamint a topográfiát figyelembe vevő horizontális szeletelés révén lehetővé vált a hulladéktest és a kapcsolódó, potenciálisan szennyezett térrészek kvázi háromdimenziós modellezése. Az aljzat- és vastagságtérképek, valamint a becsült térfogatok meghatározása azt mutatta, hogy a különálló szelvényekből nyert információk integrálása lényegesen többet ad, mint a szelvények önálló értelmezése.

A statisztikai módszerek alkalmazása szignifikáns eredményeket hozott. A klaszteranalízis azt mutatta, hogy a klaszterszám megválasztása befolyásolja az eredmények részletességét és értelmezhetőségét. Az alacsonyabb klaszterszám nem minden esetben adta a geofizikailag legrészletesebb felbontást, míg a nagyobb klaszterszámok inkább a paramétertér finomabb feltárását szolgálták. Ez alapján a klaszteranalízis nem tekinthető teljesen automatikus módszernek, hanem olyan eszköz, amelynél a statisztikai és geofizikai szempontokat együtt kell figyelembe venni. A korrelációvizsgálat és a faktoranalízis azt mutatta, hogy az egyes paraméterek eltérő fizikai tulajdonságokat jelenítenek meg, ezért közös értelmezésük indokolt.

Az MFV módszer alkalmazása szintén lényeges módszertani eredménynek tekinthető. A vizsgálatok azt mutatták, hogy heterogén, kieső értékekkel terhelt geoelektromos adatrendszerek esetén az MFV robusztusabb reprezentatív paramétert adhat, mint az egyszerű átlagolás. A fix ε paraméterrel számított változat általában stabilabb eredményt szolgáltatott, míg a Steiner-féle iteratív eljárás érzékenyebbnek bizonyult a lokális sűrűsödésekre. A két megközelítés közötti különbség nemcsak az algoritmusból, hanem az adatrendszer relatív szórásából és a mintavételi sűrűségéből is adódott, ezért az MFV módszer alkalmazhatósága nem adható meg egységesen minden esetre, hanem az adott adatrendszer jellegéhez kell igazítani.

A GP-idősorok WAV-alapú feldolgozása további releváns eredményt adott. Az időállandó-spektrum szerinti bontás biztosította, hogy a különböző polarizációs mechanizmusokhoz köthető térbeli mintázatok elkülöníthetők legyenek. A rövid időállandókhoz tartozó komponensek döntően háttérjelenségeket és gyors folyamatokat tükröztek, míg a hosszabb időállandókhoz tartozó komponensek a korábbi értelmezésekhez képest érzékenyebben jelezték a potenciálisan szennyezett zónák belső szerkezetét és mélységi differenciáltságát. Ez a feldolgozás nemcsak kiegészítő információt adott, hanem a korábban lehatárolt zónák részletesebb értelmezését is megalapozta.

A miskolci vizsgálati területen végzett mérések azt mutatták, hogy az integrált megközelítés nemcsak diffúz szennyezési környezetben, hanem mesterséges objektumokkal terhelt felszínközeli környezetben is alkalmazható. A geoelektromos, mágneses és földradaros adatok együttes értelmezése alapján olyan anomáliák is felismerhetők voltak, amelyek egyetlen módszerrel kevésbé lettek volna megbízhatóan értelmezhetők. Ez a gyakorlati oldalról is megerősíti, hogy a különböző geofizikai módszerek nem helyettesítik, hanem kiegészítik egymást.

A dolgozatban bemutatott értelmezések minden esetben geofizikai paramétereiből levont, valószínűségi alapú következtetéseknek tekintendők. Közvetlen *in situ* validáció hiányában a potenciálisan szennyezett zónák anyagi összetétele nem igazolható teljes bizonyossággal, ezért az eredmények értelmezésekor ezt a korlátot figyelembe kell venni. Ugyanakkor a különböző módszerekből származó, egymást erősítő térbeli mintázatok alapján több esetben konzisztens és szakmailag jól védhető értelmezés volt adható.

A módszertan gyakorlati fontossága elsősorban felszínközeli környezetföldtani és mérnökgeofizikai problémák vizsgálatában érvényesül. A multielektrodás geoelektromos és GP mérések integrált alkalmazása alkalmas a felszín alatti szerkezet roncsolásmentes feltárására, és költséghatékony alternatívát jelenthet a pontszerű feltárásokkal szemben. A 2D inverziós szelvények térbeli integrálása és a horizontális szeletelési eljárás hasznos lehet olyan területeken, ahol a terepi viszonyok vagy az infrastruktúra nem biztosítják teljes 3D mérési rendszer kialakítását.

A bemutatott megközelítés gyakorlati szempontból elsősorban rekultivált vagy működő hulladéklerakók állapotfelmérésében és monitorozásában, potenciálisan szennyezett területek lehatárolásában, mérnökgeofizikai előkészítő vizsgálatokban, valamint heterogén felszín alatti szerkezetek térbeli modellezésében lehet hasznos. A robusztus statisztikai módszerek alkalmazása a gyakorlatban is előnyt jelenthet, mert csökkentheti a zaj és a kieső értékek torzító hatását, ezáltal stabilabb és reprodukálhatóbb eredményeket adhat. A GP-spektrális feldolgozás további lehetőséget kínál olyan zónák elkülönítésére, amelyek hagyományos értelmezéssel kevésbé egyértelműek.

A továbbfejlesztés egyik kézenfekvő iránya a valódi 3D inverziós feldolgozás összevetése a dolgozatban bemutatott, 2D inverziókból felépített kvázi 3D megközelítéssel. Ugyancsak célszerű lenne a topográfia-korrigált szeletelési algoritmus alkalmazását további, eltérő geometriájú és domborzatú területeken is tesztelni. A jövőbeni kutatásokban indokolt lehet a különböző statisztikai és spektrális feldolgozási lépések még szorosabb integrációja, valamint a mágneses adatok teljesebb lefedettsége azoknál a területeknél, ahol a paraméterek közötti kapcsolatok részletesebb vizsgálata is cél.

Megállapítható, hogy a dolgozatban bemutatott integrált geoelektromos feldolgozási és értelmezési rendszer nemcsak tudományos szempontból jelent előrelépést, hanem a gyakorlatban is alkalmazható eszközt ad komplex felszínközeli problémák vizsgálatához. A módszer legfontosabb előnye nem egyetlen új eljárásban rejlik, hanem abban, hogy a különböző mérési, térinformatikai, statisztikai és spektrális lépések egymást erősítve, közös értelmezési keretben használhatók fel.

6. Tézisek

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 mértékeként, 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 korrigálni 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 szeletpozíciós eljárás a vizsgált területen geometriailag konzisztens és kvantitatívan kontrollált módon módosította az adatelrendezést, ezáltal megbízhatóbb térbeli értelmezést adott változó 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 paraméterter 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 paraméterter 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.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Miskolci Egyetem keretében működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének részeként – a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával valósul meg.

Ezúton fejezem ki mérhetetlen köszönetemet dr. habil. Turai Endrének, aki részt vett a terepi mérésekben és az adatfeldolgozásokban egyaránt és nagyfokú szakmai iránymutatásával segítette ennek a dolgozatnak az elkészülését. Sajnos a dolgozat végleges összeállítását már nem élhette meg, tekintettel arra, hogy 2025. május 14. napján elhunyt.

Szeretném kifejezni hálámat dr. Havasi Istvánnak, aki ugyan csak a munka végén csatlakozott be a közvetlen doktori kutatási témám támogatásába, de kitűnő tudományos hozzáértése, lelkiismeretes, gyors és alapos szakmai tanácsaival segítette a dolgozat sikeres befejezését.

Köszönetemet fejezem ki a Miskolci Egyetem Geofizikai Intézeti Tanszékének oktató, doktorandusz és geofizikus szakirányú hallgatóinak, akik az évek alatt segítségükkel valamilyen formában is hozzájárultak ezen dolgozat elkészültéhez.

Végül szeretnék köszönetet mondani a családom tagjainak, akik szerető gondoskodásukkal és önzetlen segítő szándékukkal módot adtak a doktori munkám kiteljesedéséhez. Édesanyámnak, aki kitaníttatott és biztosította a feltételeket a doktori kutatásaim elkezdéséhez. Feleségemnek, aki a nyugodt családi légkör megteremtése mellett lelkiismeretes lektorálásával is segítette ezt a dolgozatot tökéletesíteni. Gyerekeimnek, akik türelemmel várták a dolgozat elkészültét, hogy utána még több hasznos időt tudjak velük eltölteni.

Irodalomjegyzék

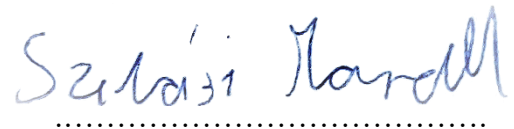
1. **Aizebeokhai, A. P. (2010):** *2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: theory and field design. Scientific Research and Essays*, 5(23), 3592–3605.
2. **Ciampi, P., L. M. Giannini, G. Cassiani, C. Esposito és M. P. Papini (2024):** *Geo-constrained clustering of resistivity data revealing the heterogeneous lithological architectures and the distinctive geoelectrical signature of shallow deposits. Engineering Geology*, Volume 337 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107589>
3. **Cloud Compare** szoftver: <https://www.danielgm.net/cc/> utolsó letöltés dátuma: 2025.05.21.
4. **Dahlin, T. és Bernstone C. (1997):** *A roll along technique for resistivity data acquisition with multi-electrode arrays Proc. SAGEEP 97 (Reno, USA) vol 2 pp 927-35*
5. **Dakhnov, V. N. (1941):** *Каротаж скважин и интерпретация каротажных диаграмм*
6. **Dudek, A. (2020):** *Silhouette index as a clustering evaluation tool. In: Studies in Classification, Data analysis, and Knowledge Organization. Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-52348-0_2*
7. **Ebong, E.D., George, A.M., Ekwok, S.E., Akpan A. E. és Asfahani J. (2021):** *2D electrical resistivity inversion and ground penetrating radar investigation of near surface cave in New Netim area, southeastern Nigeria. Acta Geod Geophys* 56, 765–780. <https://doi.org/10.1007/s40328-021-00364-2>
8. **Fancsik, T., Turai, E., Szabó, N.P., Somogyiné Molnár J., Dobróka T.E. és Dobróka M. (2021):** *Evaluation of induced polarization measurements using a new inversion method. Acta Geod Geophys* 56, 623–643. <https://doi.org/10.1007/s40328-021-00355-3>
9. **Gyulai Á. (1989):** *Parameter Sensitivity of Underground DC Measurements. Geophysical Transactions Vol.35. No.3. pp. 209-225.*
10. **Hampel, F. R., Ronchetti, E. M., Rousseeuw, P. J. & Stahel, W. A. (1986):** *Robust Statistics: The Approach Based on Influence Functions. Wiley, DOI:10.1002/9781118186435*
11. **Huber, P. J. (1981):** *Robust Statistics. Wiley. DOI:10.1002/0471725250*
12. **Kearey, P., Brooks, M. és Hill, I. (2002):** *An Introduction to Geophysical Exploration, Blackwell Publishing Company, Oxford.*

13. **Li, J. és Heap, A. D. (2014):** *Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. Environmental Modelling & Software*, 53, 173–189. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
14. **Loke M. H. és Barker R. D. (1996):** *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting* 44 131-52 <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
15. **Loke M. H. (2000):** *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*
16. **Maronna, R. A., Martin, R. D. és Yohai, V. J. (2019):** *Robust Statistics: Theory and Methods (with R). Wiley.*
17. **Pappné Molnár Zs. és Török I. (1997):** *Kommunális hulladéklerakók vizsgálata geofizikai módszerekkel. Miskolci Egyetem – TDK munka*
18. **Nkwabi D. S. (2022):** *Application of high resolution geoelectrical and geomagnetic methods in near surface investigation. Miskolci Egyetem, Diplomamunka*
19. **Nuamah, D. O. B. és Dobróka, M. (2019):** *Inversion-based fourier transformation used in processing non-equidistantly measured magnetic data. Acta Geod Geophys* 54, 411–424. <https://doi.org/10.1007/s40328-019-00266-4>
20. **Paasche, H., Tronicke, J. és Holliger, K. (2015):** *Integration of geophysical data for improved subsurface characterization: a clustering approach. Near Surface Geophysics*, 13(1), 19–29. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2014010>
21. **Prosys II szoftver** <https://www.iris-instruments.com/download.html> utolsó letöltés dátuma: 2025.05.21.
22. **Püspöki, Z. és társai. (2009):** *Máza-Váralja-Dél feketekőszén-kutatás. Földtani kutatási zárójelentés I-III köt. Calamites Kft. – Debreceni Egyetem, Pécs-Debrecen.*
23. **Real Statistics beépülő Excel statisztikai szoftver csomag:** <https://real-statistics.com/> utolsó letöltés dátuma: 2025.05.21.
24. **Res2DInv szoftver 3.59.100 Semidemo:** <https://www.aarhusgeosoftware.dk/res2dinv> utolsó letöltés dátuma: 2025.05.21.
25. **Res2DMod szoftver 3.03 (2016)** <https://res2dmod.software.informer.com/download/> utolsó letöltés dátuma: 2025.05.21.
26. **Reynolds, J. M. (2011):** *An Introduction to Applied an Environmental Geophysics. 2nd edition Wiley-Blackwell* 535-618.
27. **Rotaqua Kft. (1991):** *Fúrési napló a Kővágószőlősi fúrásokról.*

28. **Rousseeuw, P. J. (1987):** *Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53-65. DOI: 10.1016/0377-0427(87)90125-7
29. **Rousseeuw, P. J. és Lerov, A. M. (1987):** *Robust Regression and Outlier Detection. Wiley*. DOI:10.1002/0471725382
30. **Sasaki, Y. (1992):** *Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.
31. **Schlumberger, C. (1920):** *Etude sur la prospection électrique du sous-sol. V. Gauthier, Paris.*
32. **Stern, W. (1929):** *Versuch einer elektrodynamischen Dickenmessung von Gletscher-Eis. Gerlands Beiträge zur Geophysik*, 23: 292–333.
33. **Steiner, F. (1988):** *Most Frequent Value Procedures (a short monograph). Geophysical Transactions*. 34, 139-260.
34. **Steiner, F. (1992):** *The Most Frequent Value: Introduction to a Modern Conception of Statistics. Akadémiai Kiadó. ISBN: 963-05-5687-1*
35. **Surfer** szoftver: <https://www.goldensoftware.com/products/surfer/> utolsó letöltés dátuma: 2025.05.21.
36. **Szabó, N. P. (2012):** *Bevezetés a geostatistikába. egyetemi jegyzet, Miskolci Egyetem*
37. **Szabó, N. P., Balogh, G. P. és Stickel, J. (2018):** *Most frequent value-based factor analysis of direct-push logging data, Geophysical Prospecting*, 66, 530-548. DOI:10.1111/13652478.12573
38. **Szabó, N. P. (2020):** *Mérnöki statisztika, egyetemi jegyzet, Miskolci Egyetem*
39. **Szabó, N. P., Kilik, R. és Dobróka, M. (2023):** *Robust reservoir identification by multi-well cluster analysis of wireline logging data. Heliyon*, 9, e15957.
40. **Szalai, S., Novák, A. és Szarka, L (2009):** *Depth of Investigation and Vertical Resolution of Surface Geoelectric Arrays. Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 14(1): 15-23 DOI:10.2113/JEEG14.1.15
41. **Szilvási, M. (2015):** *Talaj- és talajvíz szennyezettségi csóvák tér és időbeli lehatárolása geoelektromos geofizikai módszerekkel. Diplomamunka. Miskolci Egyetem.*
42. **Szilvási, M. és Turai, E. (2018):** *Geodéziai alapok kialakítása egy rekultivált hulladéklerakó geofizikai felméréséhez és kiértékeléséhez. LVII. Bányamérő Továbbképző és Tapasztalatcsere*. 55-61.

43. **Szilvási, M. (2023):** *Horizontális szeletelési módszer geofizikai geoelektromos szelvényezéshez. Új eredmények a műszaki föld- és környezettudományban 2023* 480 p. 168-175.
44. **Szilvási, M., Szamosi, A., Farkas, D. és Szalontai, L. (2023):** *Mérőállomás, drónos légifotogrammetria és iPhone LIDAR mérési technikák összehasonlítása egy terepi objektum felmérésekor* In: Szabó, Norbert Péter; Virág, Zoltán (szerk.) *Új eredmények a műszaki föld- és környezettudományban 2023* Miskolc-Egyetemváros, Magyarország: Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar 480 p. 151-159.
45. **Szilvási, M. (2024):** *Egy LiDAR-ral felszerelt mobiltelefon használhatósága.* In: Wéber, József; Pál-Sebestyén, Sarolta (szerk.) *LXII. Bányamérő Konferencia: "Útkeresés a bányamérésben".* Előadások Budapest, Magyarország: OMBKE 100p. 1-7.
46. **Szilvási, M. (2025):** *A geodézia támogató szerepe begyűjtött geofizikai adatok feldolgozásánál.* *LXIII. Bányamérő Konferencia: „Technológiaváltás a bányamérésben”* 7p.
47. **Szűcs, P., Turai, E., Máдай, V. et al. (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, 2267-2284. DOI:10.1007/s10040-022-02560-y
48. **Tóth, Á. és Szabó, N. P. (1999):** *Kommunális hulladéklerakó geofizikai vizsgálata.* Miskolci Egyetem – TDK munka
49. **Turai, E. (1981):** *GP time-domain görbék TAU-transzformációja,* *Magyar Geofizika* XXII/1, 29-36.
50. **Turai, E. és Dobróka, M. (2001):** *A New Method for the Interpretation of Induced Polarization Data – the TAU-Transform Approach.* In: 63rd EAGE Conference, *Extended Abstracts*, 049/1-049/4
51. **Turai, E. (2004):** *IP Data processing results from using TAU-transformation to determine time-constant spectra,* *Geophysical Transactions*, vol. 44, No. 3-4., 301-312.
52. **Turai, E. (2011):** *Data Processing Method Developments using TAU-transformation of time domain IP data: II. Interpretation results of Field measured data,* *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 46:(4) 391-400.
53. **Turai, E. és Dobróka, M. (2011):** *Data Processing Method Developments using TAU-transformation of time domain IP data: I. theoretical basis.* *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 46(3), 283-290, DOI: 10.1556/AGeod.46.2011.4.2.

54. **Turai, E. és Szilvási, M. (2017):** *Rekultivált hulladéklerakó szennyezettségének vizsgálata. Műszaki Földtudományi Közlemények, Miskolci Egyetemi Kiadó 181-192. ISSN: 2063-5508*
55. **Tzanis, A. (2010):** *matGPR Release 2: A freeware MATLAB® package for the analysis & interpretation of common and single offset GPR data, FastTimes, 15 (1), 17-43.*
56. **Yehualaw, E., Haile, T., Mickus, K., Beardsmore G. és Nigusse W. (2024):** *Electrical resistivity and magnetic methods in mapping groundwater on the western margin of the Central Main Ethiopian Rift- A case study in the Belesa area, eastern Lemmo Woreda, Ethiopia. Acta Geodaetica et Geophysica 59, 441-461. <https://doi.org/10.1007/s40328-024-00449-8>*

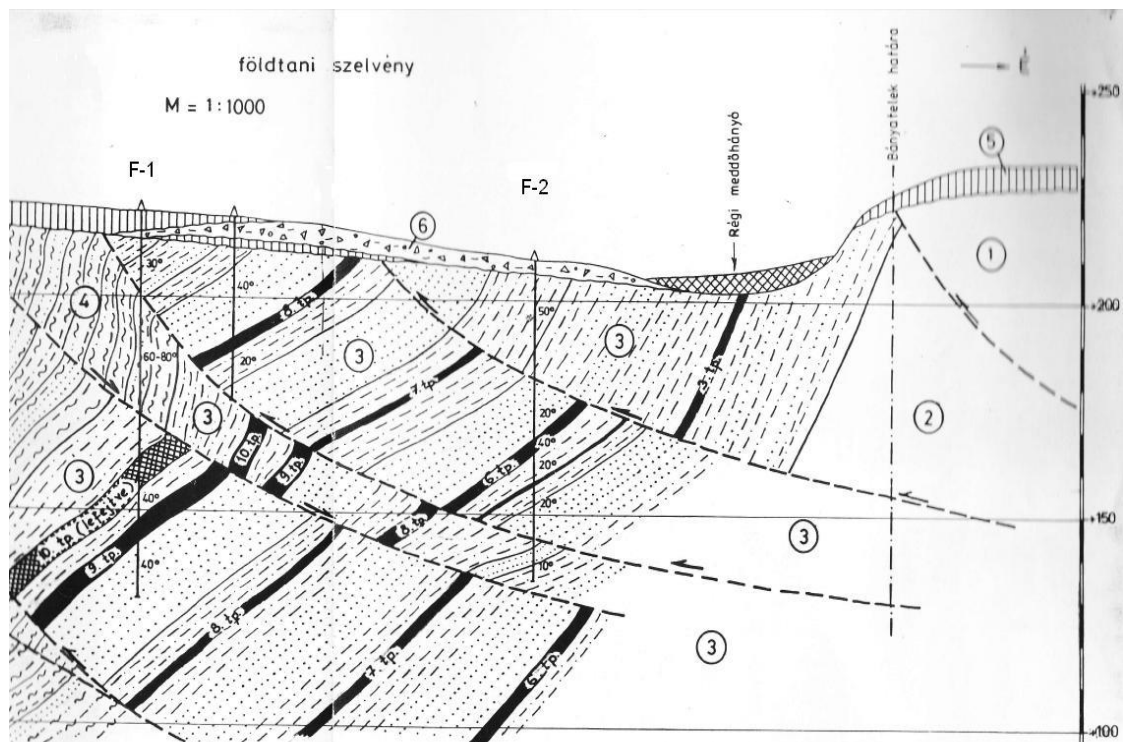


.....
Szilvási Marcell

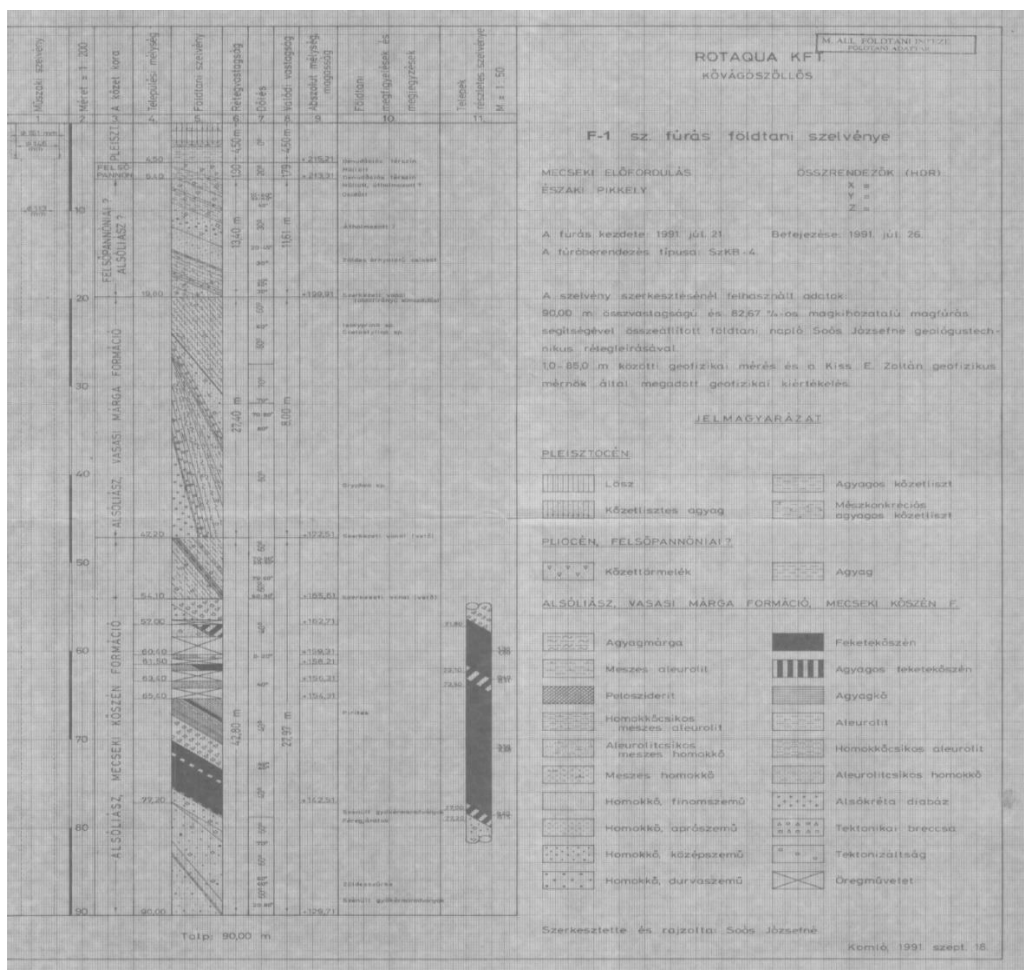
doktorjelölt

Mikoviny Sámuel Doktori Iskola

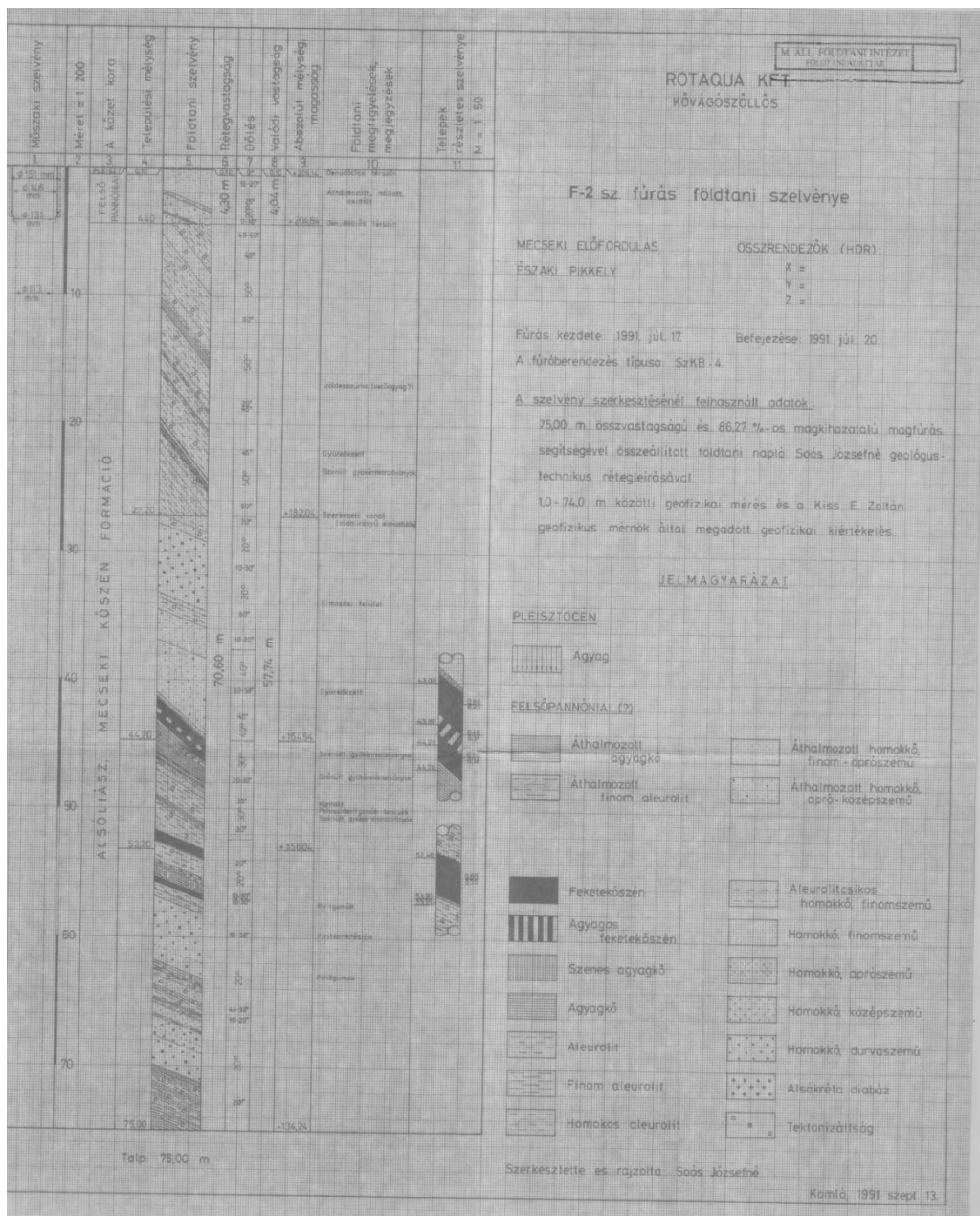
Mellékletek



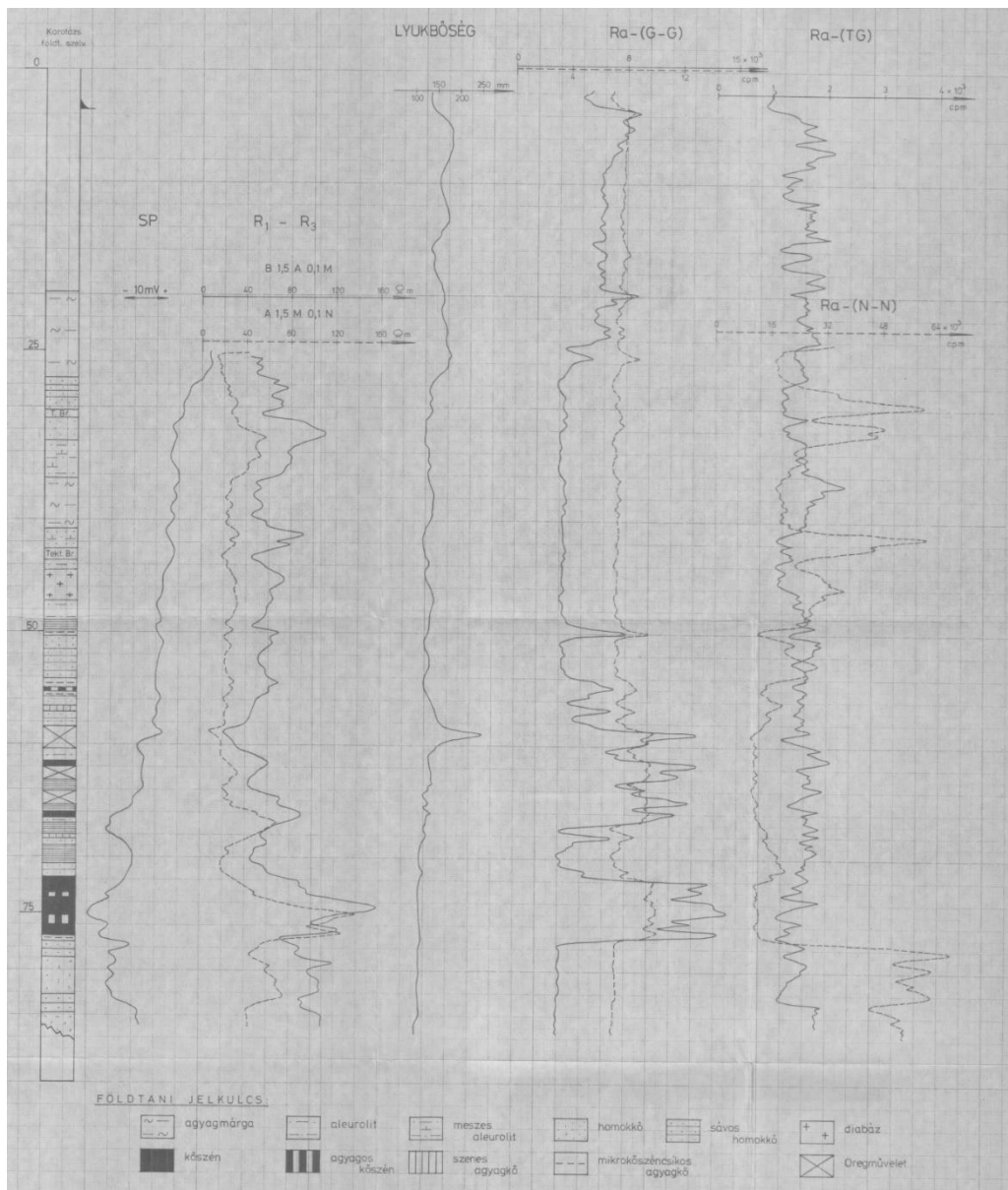
1. melléklet: A mintaterület földtani szelvénye (Püspöki Zoltán 2009)



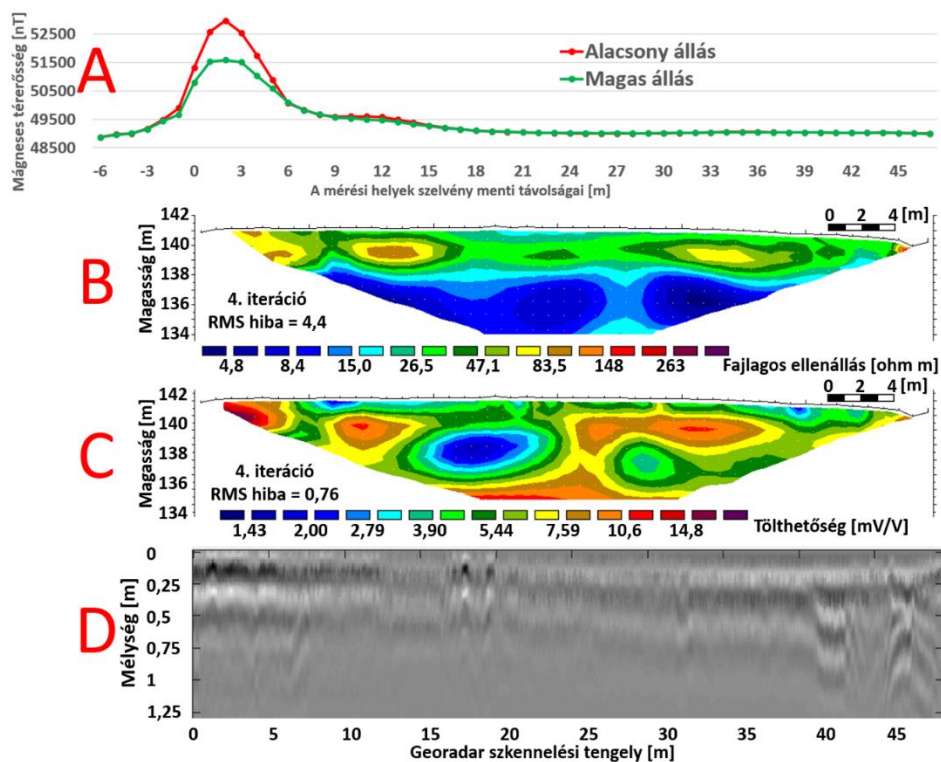
2. melléklet: F-1 fúrás földtani szelvény (ROTAQUA 1991)



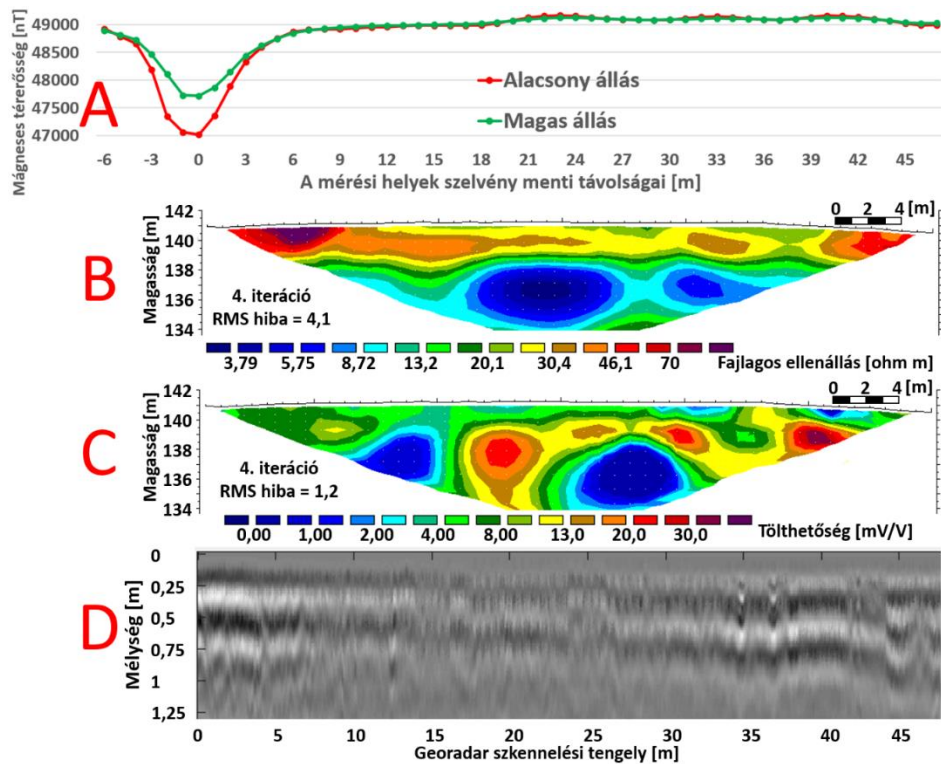
3. melléklet: F-2 fúrás földtani szelvénye (ROTAQUA 1991)



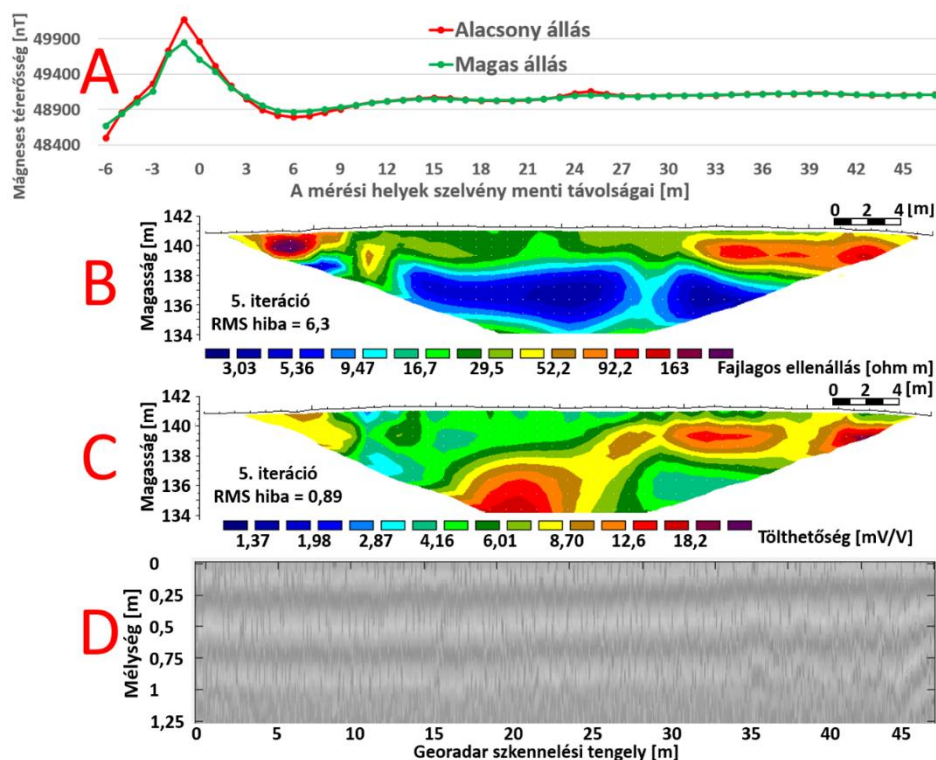
4. melléklet: F-1 fúrás karotázs szelvénye (ROTAQUA 1991)



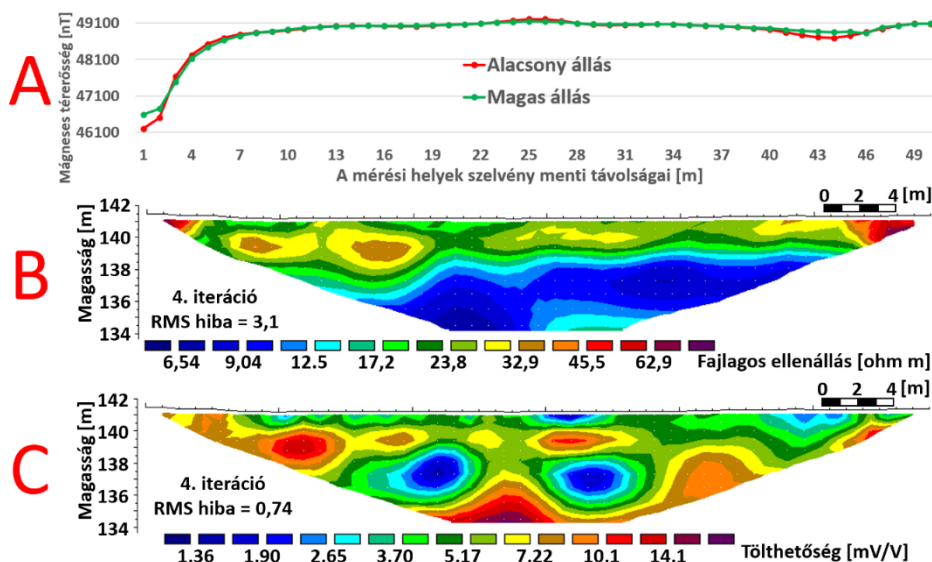
5. melléklet: A 2. kitűzött szelvény méréseinek a feldolgozása fentről lefelé haladva: fajlagos ellenállás, tölthetőség, mágneses térerősség és földradar szelvények (szerző saját szerkesztése)



6. melléklet: A 3. kitűzött szelvény méréseinek a feldolgozása fentről lefelé haladva: fajlagos ellenállás, tölthetőség, mágneses térerősség és földradar szelvények (szerző saját szerkesztése)



7. melléklet: A 4. kitűzött szelvény méréseinek a feldolgozása fentről lefelé haladva: fajlagos ellenállás, tölthetőség, mágneses térerősség és földradar szelvények (szerző saját szerkesztése)



8. melléklet: Az 5. kitűzött, kereszt-szelvény méréseinek a feldolgozása fentről lefelé haladva: fajlagos ellenállás, tölthetőség és mágneses térerősség szelvények (szerző saját szerkesztése)