



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

TALAJOK ÁLLAPOTÁT ÉS MŰVELHETŐSÉGÉT MEGHATÁROZÓ JELLEMZŐK VIZSGÁLATA

DOI: 10.54598/005470

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Horváth János

Gödöllő

2024

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki Tudományok

vezetője: Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
MATE
Műszaki Intézet

Témavezetők: Prof. Dr. Szabó István
egyetemi tanár, PhD
MATE
Műszaki Intézet

Prof. Dr. Kátai László
egyetemi tanár, PhD
MATE
Műszaki Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezetők jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1.	BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	4
1.1.	A téma időszerűsége és jelentősége	4
1.2.	Célkitűzések	4
2.	ANYAG ÉS MÓDSZER.....	6
2.1.	A mérések körülményei	6
2.2.	A felhasznált talaj jellemzése.....	7
2.3.	A felhasznált oldatok.....	7
2.4.	A mérőkörök specifikációja	8
2.4.1.	A talajpasztával végzett mérések mérőköre.....	8
2.4.2.	Mérőkör kétfázisú oldatok vizsgálatához	9
2.4.3.	A SOURCETRONIC ST2829C precíziós LCR-mérő	10
2.5.	Az adatfeldolgozás folyamata.....	11
2.5.1.	Egyfázisú oldat talajpasztában való mérése.....	11
2.5.2.	Kétfázisú keverékoldat mérése	12
3.	EREDMÉNYEK	14
3.1.	Egyfázisú talajoldatok kation tartalmának meghatározása	14
3.1.1.	Kálium referenciadüggvények meghatározása laboratóriumi méréssel.....	14
3.1.2.	Kalcium referenciadüggvények meghatározása laboratóriumi méréssel.....	15
3.1.3.	Kálium és kalcium referenciadüggvények összehasonlítása	17
3.1.4.	Ismeretlen egyfázisú talajoldat kation koncentrációjának meghatározása	18
3.2.	Kétfázisú talajoldatok kation arányának meghatározása	18
3.2.1.	A változó frekvenciájú EC-mérés mint mérőeszköz.....	18
3.2.2.	Matematikai módszer - a kalibrációs düggvény	23
4.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	26
5.	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	29
6.	ÖSSZEFOGLALÁS.....	31
7.	AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK.....	33

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

Földünk lakosainak száma folyamatosan növekszik, a 20. században gyakorlatilag megháromszorozódott, az ezredfordulón pedig már elérte a hatmilliárdot. Az ENSZ előrejelzése szerint 2050-ben 9,7 milliárd ember él majd a Földön, vagyis a mezőgazdaságnak ennyi embert kell majd élelmeznie. A trendeket átgondolva arra a következtetésre juthatunk, hogy a lépéstartás érdekében a mezőgazdasági termelésnek néhány évtized alatt 50–100 % növekedést kellene mutatnia. Beláthatatlan társadalmi következményei lehetnek annak, ha a kínálat nem tud lépést tartani a kereslettel. Ezért a fogyasztókat tudatosabban és okosabb módon kell felhasználni, hogy ezekkel maximális hatást érjenek el. Annak érdekében, hogy a jövőben meg tudjunk felelni ezeknek a kihívásoknak, olyan globális agrár stratégiára van szükség, amely azt hangsúlyozza, hogy a szükséges termelékenységnövekedés úgy kell, hogy hozzájáruljon a termelők és a fogyasztók igényeinek kielégítéséhez, hogy megőrizze a mezőgazdaság környezeti, gazdasági és társadalmi fenntarthatóságát a következő generációk számára. A fenntarthatósági cél elérésében a mezőgazdaság digitalizálása kulcsszerepet játszik.

1.2. Célkitűzések

A talajoldatok elektromos vezetőképességének (Electrical Conductivity - EC) vizsgálata már hosszú ideje eszköze a precíziós mezőgazdaságnak. A szakirodalom tanulmányozása során felkeltette a figyelmemet, hogy a kutatók tényként kezelik, hogy az elektromos vezetőképesség mérése az additivitása miatt nem ionszelektív módszer, így kizárólag a talaj összes sótartalmának a kimutatására tartják alkalmas eszköznek a gyakorlatban. Úgy találtam továbbá, hogy a kutatások és a gyakorlati mérés technikában használatos mérőeszközök nem foglalkoznak behatóan egy nagyon fontos elektromos mérés technikai paraméterrel a mérőáram frekvenciájával. Ezért vizsgálataimmal bizonyítani kívántam:

- **Szelektíven, egyszerre egy ismert koncentrációjú elektrolittal dúsított talajnak az elektromos vezetőképessége függ a mérőáram frekvenciájától, a különböző elektrolitok EC válaszfüggvényei eltérnek.** Tehát a különböző kationt tartalmazó oldatok másképp viselkednek ugyanolyan környezetben, ugyanolyan mérési paraméterek mellett. Ennek vizsgálatára egy ismert tulajdonságú talajon, állandó frekvenciasorozatot felvéve mérem az elektromos vezetőképességet, miközben a talajmintát

ismert koncentrációjú K és Ca sók vizes oldatával nedvesítem és a kapott válaszfüggvényeket összehasonlítom.

- **A mérési frekvencia változása hat a mérőkörre és változtat a mérés kimeneti értékén, azaz az elektromos vezetőképességen.** Szignifikáns összefüggés van a talaj(paszta) könnyen mérhető EC értéke és a talaj relatív sótartalma között. Kísérleteimben vizsgálom, hogy adott frekvenciasorozaton mérve az elektromos vezetőképességét a különféle koncentrációjú kationos oldattal eláztatott talajmintának, lehet-e összefüggést találni a mért EC érték a mérési frekvencia és az ismert koncentráció között.
- **A konduktometria azaz az elektromos vezetőképesség mérése lehet mérési és matematikai módszertan az oldatok ionszelektív mérésre,** mert az EC mérési frekvenciájának ésszerű változtatásával az egy ismert oldatban lévő K^+ és Ca^{2+} komponensek arányának leírására van matematikai módszer és az egyes komponensek részaránya függvénnyel leírható.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. A mérések körülményei

A szakirodalom feldolgozásából megismertem, hogy az elektromos vezetőképesség mérése nem alkalmas ionszelektív mérésre, így jelenleg analitikai alkalmazása olyan rendszerek vizsgálatára korlátozódik, amelyek csak egyetlen elektrolitot tartalmaz tehát a “háttér” hozzájárulása elhanyagolható. Ezért vizsgálataimban arra voltam kíváncsi, hogy

- **Egyfázisú talajoldat.** Mi történik a talajban, ha a szelektíven, egyszerre egy elektrolittal dúsított talajnak mérem az elektromos vezetőképességét úgy, hogy a mérés közben változtatom az áram frekvenciáját. Arra szerettem volna választ kapni, hogy hogyan hat a mérési frekvencia a modellre és van-e szignifikáns összefüggés a talaj(paszta) könnyen mérhető EC értéke és a relatív sótartalom között, ha a méréseknél változtatom a mérőáram frekvenciáját. Ezért **egy állandó frekvenciasorozatot használva különböző frekvenciákon vizsgáltam meg a vezetőképességét egy ismert tulajdonságú talajnak, miközben a talajmintát K és Ca sók vizes oldatával mostam át.** Vizsgáltam egy előre meghatározott adott frekvenciasoron mérve a különféle koncentrációjú kationos oldattal eláztatott talajmintának az elektromos vezetőképességét, és összefüggéseket kerestem a mért EC érték a mérési frekvencia és az ismert koncentráció között.
- **Kétfázisú/kétkomponensű oldat.** Megvizsgáltam, hogy a mérési frekvencia okszerű változtatásával **egy oldatban lévő K^+ és Ca^{2+} kation koncentrációk szétválaszthatók-e elektromos vezetőképesség mérésekkel.** A kereskedelmi gyakorlatban kapható statikus frekvenciamérő konduktométerekkel szemben váltakozó frekvenciájú mérésekkel vizsgáltam meg a desztillált vízben oldott, ismert koncentrációjú sókeverék vezetőképességét. Azt mértem, hogy különböző frekvenciákat használva a vezetőképesség mérésére, tudok-e következtetni az egyes kationok koncentrációjára, esetleg a különböző ionok relatív mennyiségére, illetve annak változására.

A méréseket a MATE Műszaki Intézet Gödöllői Laboratóriumában végeztem. A labor hőmérséklete állandó 22 °C-ra volt beállítva. A felhasznált oldatok és a talaj 22 °C hőmérsékleten kerültek felhasználásra a mérés során.

2.2. A felhasznált talaj jellemzése

A talajpasztával végzett kísérletekhez modell-talajként egy semleges $pH_{H_2O} = 7,16$ talajt választottam, amelynek nem volt kimutatható $CaCO_3$ -tartalma. A talajmintát Gödöllő-Száritópusztán a MATE Tangazdaságának a területéről, szántóföld 0-20 cm-es rétegéből gyűjtöttem ($47^\circ 35' 47,65''$ É, $19^\circ 21' 18,54''$ K) 232 m tengerszint feletti magasságból. A talaj textúrája homok volt kevesebb mint 0,5 % humusz tartalommal.

2.3. A felhasznált oldatok

A méréseim során a talajnedvességben oldott sók kationjainak a koncentrációját kívántam vizsgálni természetes körülmények között. Méréseimhez olyan sókat választottam, amelyek felhasználásának ésszerű pótlása a kultúrnövények termesztése során aktuális és költséges kérdés.

- **Kálium**, a sók és a kloridok vízben jól oldódnak, ezért a kísérlethez a K^+ kation klórsóit választottam. Készítettem 1 M koncentrációjú ($1\text{ M} = 1\text{ mol dm}^{-3}$) törzsoldatokat Kálium-kloridból (KCl), ACS Reagent, 99,0 - 100,5 % CAS: 7447-40-7. Ezeket az oldatokat a hígítási sorozattal tovább hígítottam: 1 M; 0,66 M; 0,5 M; 0,33 M és desztillált vízzel, azaz 0 M volt a referenciamérés. A mérések között mindig desztillált vízzel mostam át a rendszert, hogy az előző mérés során az elektródon maradt ionok ne okozzanak mérési hibát.
- **Kalcium**, ezeket az ionokat vízben oldódó sók formájában kellett a talajoldatba juttatnom. A sók és a kloridok vízben jól oldódnak, ezért a kísérlethez a Ca^{2+} kation klórsóit ($CaCl_2$) választottam. Készítettem 1 M koncentrációjú ($1\text{ M} = 1\text{ mol dm}^{-3}$) törzsoldatokat kalcium-kloridból, 99,0 - 103,0 %, CAS: 10043-52-4. Ezeket az oldatokat, hasonlóan a KCl oldathoz hígítási sorozattal tovább hígítottam: 1 M; 0,66 M; 0,33 M és desztillált vízzel, azaz 0 M volt a referenciamérés. A mérések között desztillált vízzel történt a rendszer átmosása annak érdekében, hogy az előző mérés során az elektródon maradt ionok ne okozzanak mérési hibát.
- **Kétfázisú keverék oldat**, kísérleteimben az oldott sók kationjainak hatását vizsgáltam természetes körülmények között, keverékekben. A sók és a kloridok vízben jól oldódnak, ezért a kísérletben a K^+ és Ca^{2+} kationok klórsóit használtam. A sókból megközelítőleg 1 M koncentrációjú ($1\text{ M} = 1\text{ mol dm}^{-3}$) törzsoldatokat készítettem és 50 ml-es egységekben használtam fel az oldatokat. Az 1. táblázatban leírt sókat használtam fel.

1. táblázat a vizsgálatban szereplő sók jellemzése

Oldat	CAS	Moláris tömeg (g mol ⁻¹)	Elnevezés	Jellemzői
KCl	7447-40-7	74,550	kálium- klorid	fehér színű kristályok
CaCl ₂	10043-52-4	110,980	kalcium- klorid	fehér színű, apró lemezes

- A következő kétkomponensű oldatokat készítettem el és használtam a mérésekhez:
 - 100 % KCl – 0 % CaCl₂.
 - 80 % KCl – 20 % CaCl₂
 - 60 % KCl – 40 % CaCl₂
 - 50 % KCl – 50 % CaCl₂
 - 40 % KCl – 60 % CaCl₂
 - 20 % KCl – 80 % CaCl₂
 - 0 % KCl – 100 % CaCl₂

A mérések között desztillált vízzel öblítettem a mérőeszközöket, hogy az előző mérés során az elektródákon fennmaradó ionok ne szennyezzék a következő mérés oldatait.

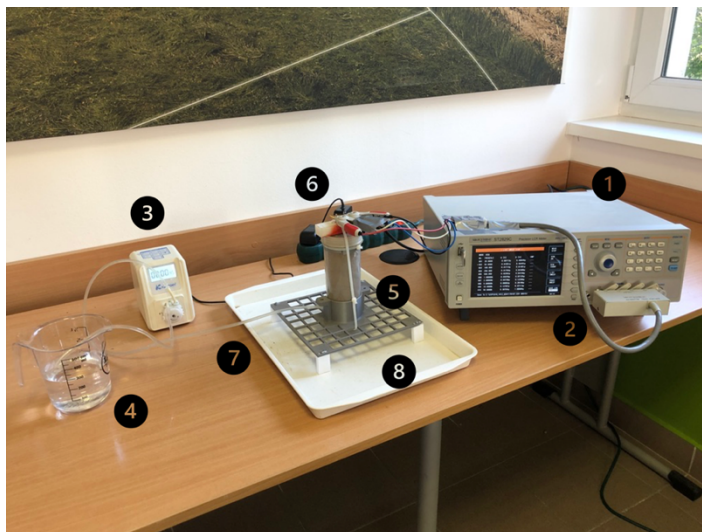
2.4. A mérőkörök specifikációja

2.4.1. A talajpasztával végzett mérések mérőköre

A 1. ábrán látható mérőkört építettem meg, melynek elemei:

1. SOURCETRONIC ST2829C precíziós LCR-mérő USB-memóriával
2. SOURCETRONIC ST26011B bekötés
3. KSP-F01A perisztaltikus adagolószivattyú
4. 500 ml-es mérőpohár (50 ml-es skálázással) a bemeneti oldat tárolására
5. Mérőhenger Ø61 mm × 137 mm.

6. Mérőelektrodák 2 db, $\varnothing 2$ mm, hossza: 80 mm teljes hosszban szigetelt, szigeteletlen rész hossza 5 mm, szondatávolság 12 mm, anyaga rozsdamentes acél
7. Csővezeték, belső $\varnothing 3$ mm
8. Tálca emelővel

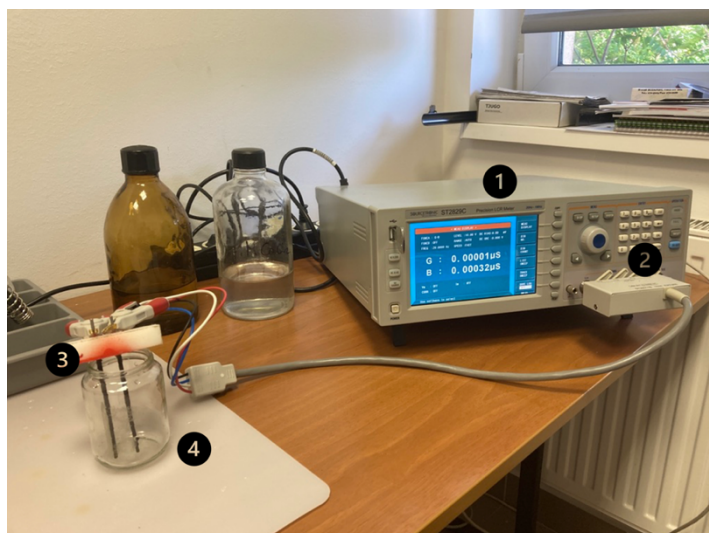


1. ábra A mérőkör a talajpasztával végzett kísérletekhez

2.4.2. Mérőkör kétfázisú oldatok vizsgálatához

A keverék oldat méréséhez az 1. ábra szerint mérőkört egyszerűsítettem és használtam az előre bekevert oldatok méréséhez. A mérőkör elemei a 2. ábra szerint:

1. SOURCETRONIC ST2829C precíziós LCR-mérő USB-memóriával
2. SOURCETRONIC ST26011B bekötés
3. Mérőelektrodák 2 db, $\varnothing 2$ mm, hossza: 80 mm teljes hosszban szigetelt, szigeteletlen rész hossza 5 mm, szondatávolság 12 mm, anyaga rozsdamentes acél
4. 100 ml űrtartalmú mérőpohár

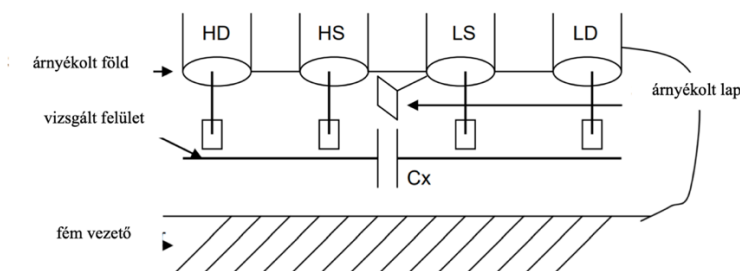


2. ábra A mérőkör átalakítása a kétfázisú oldatokhoz

2.4.3. A SOURCETRONIC ST2829C precíziós LCR-mérő

A nagy pontosságú SOURCETRONIC márkájú, ST2819C típusú LCR-mérő műszer működési elve, hogy négyvezetékes mérőrendszeren keresztül mindig állandó gerjesztést biztosít a kimenetén és a talajszenzorról érkező válaszfüggvényt detektálja. A SOURCETRONIC ST2829C az elektromos vezetőképességet (G, Siemens) mérte a földpasztába helyezett két rozsdamentes acél elektróda között, előre programozott frekvenciasorozaton azaz szekvencián majd a mérési sorozat befejeztével újraindította a mérési ciklust. A SOURCETRONIC ST2829C precíziós LCR-mérő lehetővé teszi több frekvencia sorozatos rögzítését egy mérési ciklusban. Egy mérésnek egy teljes mérési szekvencia lefutását tekintetem. A túl sok frekvencia kiválasztása azonban csökkenti az egyes frekvenciajelek erősségét, következésképpen csökkenti a felbontást. A mérésimhez 14 jellemző frekvenciát programoztam be a készülékbe, amely lefedi a gyártók által ajánlott frekvenciatartományt. A mérésekhez használt frekvenciaértékek: 50, 100, 250, 500, 1 000, 2 000, 5 000, 10 000, 50 000, 100 000, 250 000, 500 000, 750 000, 1 000 000 Hz.

A mérőműszer rendkívül érzékeny a környezetből érkező zavaró jelekre ezért ezek kiküszöbölésére speciális mérési módszert fejlesztettek ki. A zavaró (kapacitív jellegű) jelek kiküszöbölésére szolgáló négyvezetékes mérési módszert a 3. ábra mutatja be.



3. ábra A zavaró jelek kiküszöbölésére szolgáló mérési módszer

A dolgozatom további részében a G-konduktancia értékre mint EC értékre hivatkozom.

2.5. Az adatfeldolgozás folyamata

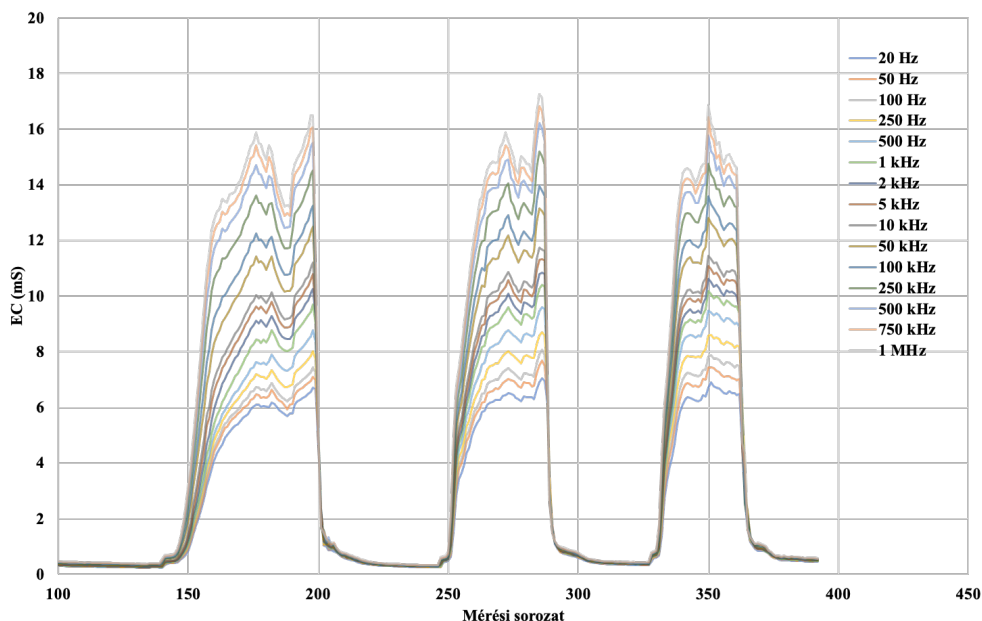
2.5.1. Egyfázisú oldat talajpasztában való mérése

Először összeállítottam az 1. ábrán bemutatott mérőkört a vizsgálatomhoz. Minden új mérést a KSP-F01A perisztaltikus adagolószivattyú kalibrálásával kezdtem. A szivattyú folyadékszállítását $0,5 \text{ g s}^{-1}$ értékre állítottam be. Minden új oldattal történő mérés megkezdése előtt a talajpasztát a mérőhengerben legalább 300 ml desztillált vízzel mostam át, hogy az előző mérés után maradvány ionok ne befolyásolják a mérési eredményeket. A mérések során az előre bekevert koncentrációjú oldatot a KSP-F01A perisztaltikus adagolószivattyú nyomta a talajjal előzetesen megtöltött mérőhenger alján kialakított belépési ponton, az adagolófejen keresztül a mérőhengerbe.

Minden koncentráción, minden oldattal a méréseket háromszoros ismétléssel végeztem úgy, hogy 300 ml-ként adagoltam oldatot és minden feltöltést minimum 300 ml desztillált vízzel való átmosás, semlegesítés követett. Ha a talajpaszta átmosása során az mért EC érték nem csökkent le $0,1 \text{ mS}$ érték alá, további 100 ml-ként adagolt desztillált vízzel folytattam az átmosást. A méréseket dokumentáltam a kísérletek reprodukálhatósága miatt.

A mérés eredményként kapott .csv kiterjesztésű fájlt a Microsoft Excel táblázatkezelőjével dolgoztam fel. Az Excelbe való beolvasás után a fájlt konvertáltam és kialakítottam az adatfeldolgozáshoz az adatbázist. A nyers adatbázisból kimutatást készítettem, amely egy olyan mátrix amely értelemszerűen összerendezi az eddigi táblázatos adatbázis G értékét a megadott paraméterre, ebben az esetben a mérési frekvenciákra. Egy rekordnak az egy mérési szekvencián (a teljes frekvencia mérési sorozaton) történő méréseket nevezem. Az így megformált adatbázisból elkészíthető a mérésre jellemző diagram, amely a 4. ábrán látható. A diagramon látható, hogy az adott koncentrációval minden mérési frekvencián 3-szor ismételttem

az oldattal való feltöltést úgy, hogy a mérések között desztillált vízzel átmostam a mérőkört.



4. ábra A talajoldat mérési szekvenciánkénti EC érték diagramja

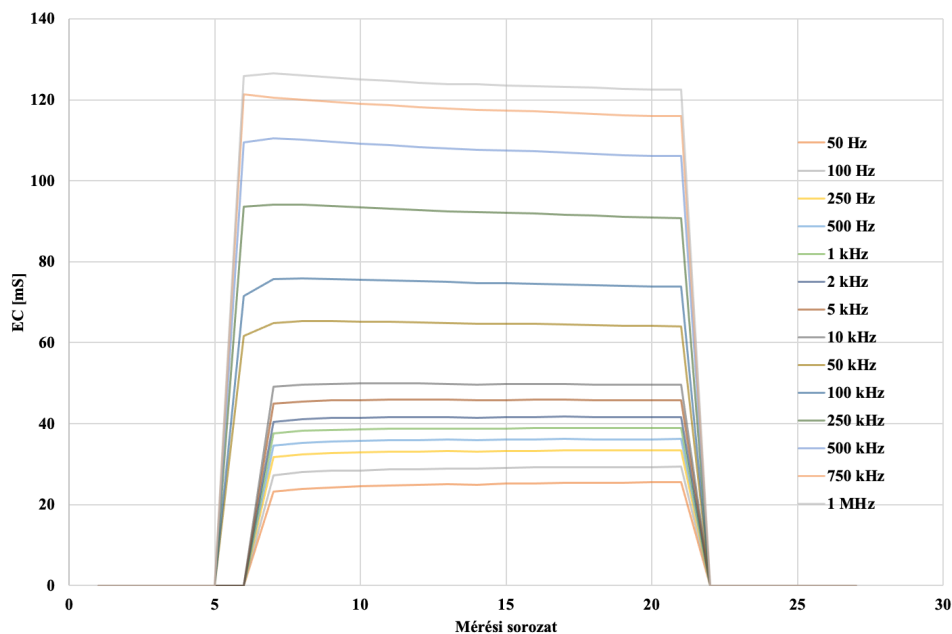
A kimutatásdiagramból készítettem el a rekordok eltérésvizsgálatát. Csak azokat a mérési értékeket vontam be a számtani átlag kiszámításába ahol a következő szekvencián a változás nem haladta meg az 5 %-ot ($\Delta < 5\%$). Így meghatároztam a teljes mérés frekvenciafüggő számtani átlagait. A számítások elvégzése után lehetőség nyílt a számított értékek elemzésére, amelyet a 3.1 fejezetben mutatok be. A funkcionális elemzéseket a Microcal Origin szoftverben értékeltem ki.

2.5.2. Kétfázisú keverékoldat mérése

Először összeállítottam a 2. ábrán bemutatott mérőkört a vizsgálatomhoz. Minden új oldattal történő mérés megkezdése előtt a mérőpoharat desztillált vízzel átmostam, hogy az előző mérés után maradvány ionok ne befolyásolják a mérési eredményeket. A sókból megközelítőleg 1 M koncentrációjú ($1\text{ M} = 1\text{ mol dm}^{-3}$) törzsoldatokat készítettem és 50 ml-es egységekben használtam fel az oldatokat. Minden mérést, minden kétkomponensű keverékoldattal legalább tízszeres mérési szekvenciában (mérési sorozatban) végeztem. A méréseket mérési jegyzőkönyvben dokumentáltam a kísérletek reprodukálhatósága miatt.

A mérés eredményként kapott .csv kiterjesztésű fájlt a Microsoft Excel táblázatkezelőjével dolgoztam fel. Az Excelbe való beolvasás után a fájlt konvertáltam és kialakítottam az adatfeldolgozáshoz az adatbázist. A nyers adatbázisból kimutatást készítettem, amely egy olyan mátrix amely értelemszerűen összerendezi az eddigi táblázatos adatbázis G értékét a megadott paraméterre, ebben az esetben a mérési frekvenciákra. Egy rekordnak az egy mérési szekvencián (a teljes frekvencia mérési sorozaton) történő méréseket nevezem. Az adatfeldolgozás során észleltem, hogy a 20 Hz frekvenciával elvégzett összes mérés értéke a negatív értéket mutat, így a 20 Hz-et kivettem a vizsgálatból.

Az így megformált adatbázisból elkészíthető a mérésre jellemző diagram, amely az 5. ábrán látható. A diagramon látható, hogy az adott keverékoldattal legalább 10 mérési sorozatot, azaz 10 mérési szekvenciát futtattam.



5. ábra Az 50 % KCl – 50 % CaCl₂ keverékoldat mérési szekvenciánkénti EC érték diagramja

A mérések közül az utolsó 5 teljes mérési szekvenciát választottam ki és a mérési értékeket frekvenciánként átlagoltam. Így meghatároztam a teljes mérés frekvenciafüggő számtani átlagait. A számítások elvégzése után lehetőség nyílt a számított értékek elemzésére, amelyet a 3.2. fejezetben mutatok be. A funkcionális elemzéseket a Microcal Origin szoftverben értékeltem ki.

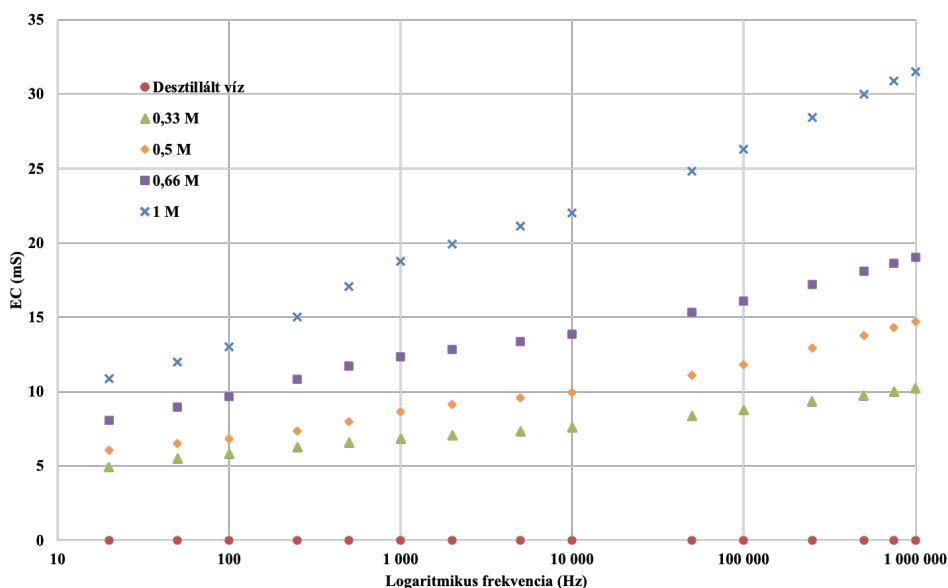
3. EREDMÉNYEK

3.1. Egyfázisú talajoldatok kation tartalmának meghatározása

A kationtartalom detektálásához először laboratóriumban a 2.5.1 alfejezetben bemutatott folyamatban az előre meghatározott oldatkoncentrációkkal végzett mérésekkel határoztam meg az adott talajra jellemző referencia EC telítési görbéket.

3.1.1. Kálium referenciad függvények meghatározása laboratóriumi méréssel

Az adatok tisztítása és feldolgozása után lehetőség nyílt a feldolgozott adatok mérési eredményeinek elemzésére kationonként, koncentrációnként és mérési frekvenciánként történő rögzítésére. A 6. ábra azt mutatja be, hogy az EC a koncentráció növekedésével valamilyen függvény szerinti összefüggésben növekszik, és jól látható, hogy ha a mérési frekvenciát növeljük, az EC-érték akkor is növekedést mutat.

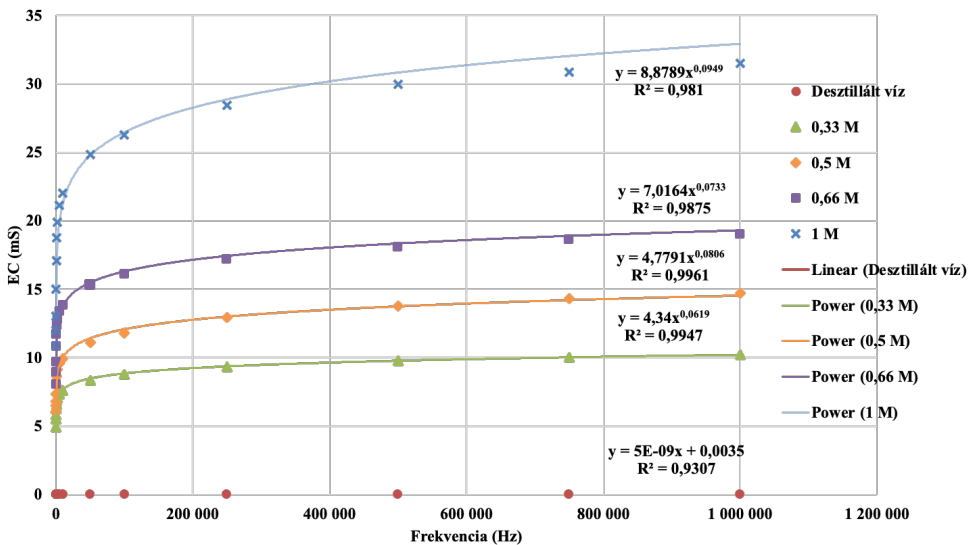


6. ábra EC a logaritmusos mérési frekvencia függvényében különböző koncentrációjú KCl-lel áztatott talajoldatok esetében

A 7. ábrán különböző koncentrációjú oldatok EC-mérési eredményeit lineáris skálán ábrázolom a frekvencia függvényében. A kapott pontokra olyan szigorúan monoton növekvő hatványfüggvényeket tudtam illeszteni, amelyek a determinációs együtthatója $R^2 > 0,98$, tehát szoros illeszkedést mutatnak.

Így a felállított mérési modellre vonatkoztatott kálium (K^+) kation referenciad függvények nagyon jó illeszkedéssel a következők:

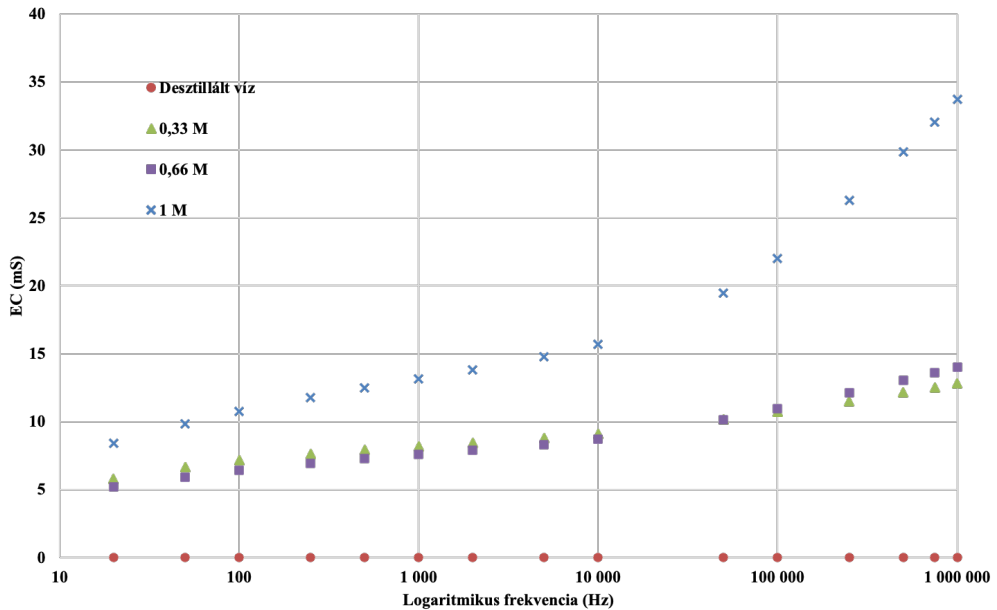
- 1 M oldat esetében az $f(x) = 8,8789x^{0,0949}$ úgy, hogy az $R^2 = 0,981$
- 0,66 M oldat esetében az $f(x) = 7,0164x^{0,0733}$ úgy, hogy az $R^2 = 0,9875$
- 0,5 M oldat esetében az $f(x) = 4,7791x^{0,0806}$ úgy, hogy az $R^2 = 0,9961$
- 0,33 M oldat esetében az $f(x) = 4,34x^{0,0619}$ úgy, hogy az $R^2 = 0,9947$
- 0 M oldat azaz desztillált víz esetében az $f(x) = 5E - 09x + 0,0035$ úgy, hogy az $R^2 = 0,9307$



7. ábra EC telítési görbe különböző K^+ koncentrációjú talajoldatokhoz természetes skálán ábrázolva

3.1.2. Kalcium referenciafüggvények meghatározása laboratóriumi méréssel

Ugyanazt a számítási módot követtem az adatsor előállításához, amit előzőleg a káliummal való mérések esetében bemutatam. A számítások elvégzése után lehetőség nyílt a számított adatsorok mérési eredményeinek iononként, koncentrációnként és mérési frekvenciánként történő rögzítésére. A 8. ábra nemcsak azt mutatja, hogy az EC a koncentráció növekedésével valamilyen függvény szerinti összefüggésben növekszik, hanem az is jól látható, hogy ha a mérési frekvenciát növeljük, az EC-érték akkor is növekedést mutat és kifejezetten a magas mérési frekvenciák látszanak alkalmasak a Ca tartalom detektálására magasabb koncentráció mellett.

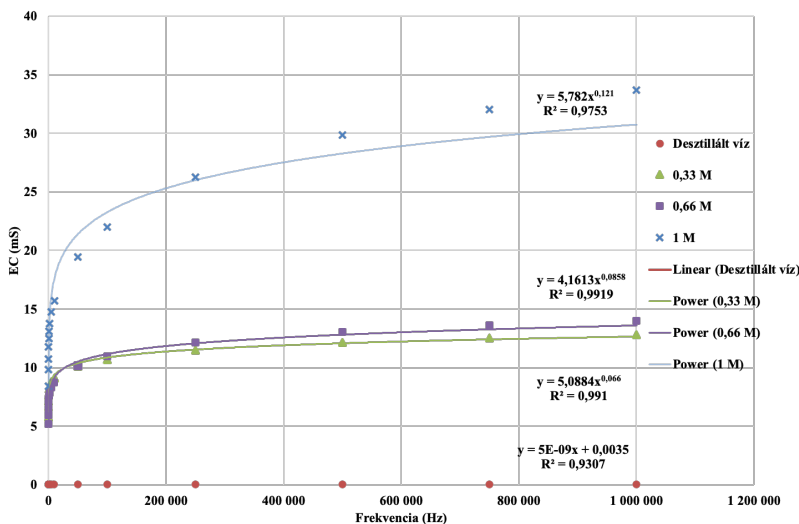


8. ábra EC a logaritmikus mérési frekvencia függvényében különböző koncentrációjú CaCl_2 -vel áztatott talajoldatok esetében

A 9. ábrán a különböző koncentrációjú oldatok EC-mérési eredményeit lineáris skálán ábrázolom a frekvencia függvényében. A kapott pontokra olyan szigorúan monoton növekvő hatványfüggvényeket illesztettem, amelyek a determinációs együtthatója $R^2 > 0,97$, tehát szoros illeszkedést mutatnak.

Így a felállított mérési modellre vonatkoztatott kalcium (Ca^{2+}) kation referenciafüggvények nagyon jó illeszkedéssel a következők:

- 1M oldat esetében az $f(x) = 5,782x^{0,121}$ úgy, hogy az $R^2=0,9753$
- 0,66M oldat esetében az $f(x) = 4,1613x^{0,0858}$ úgy, hogy az $R^2=0,9919$
- 0,33M oldat esetében az $f(x) = 5,0884x^{0,066}$ úgy, hogy az $R^2=0,991$
- **0M oldat** azaz desztillált víz esetében az $f(x) = 5E - 09x + 0,0035$ úgy, hogy az $R^2=0,9307$ amely nyilván ugyanaz mint az előző, káliumos mérési sorozat esetén.



9. ábra EC telítési görbe különböző Ca^{2+} koncentrációjú talajoldatokhoz természetes skálán ábrázolva

3.1.3. Kálium és kalcium referenciafüggvények összehasonlítása

A következő 2. táblázatban bemutatom a referenciafüggvények összehasonlítását.

2. táblázat Referenciafüggvények összehasonlítása

Koncentráció	K^+	Ca^{2+}
1 M	$f(x) = 8,8789x^{0,0949}$	$f(x) = 5,782x^{0,121}$
0,66 M	$f(x) = 7,0164x^{0,0733}$	$f(x) = 4,1613x^{0,0858}$
0,5 M	$f(x) = 4,7791x^{0,0806}$	
0,33 M	$f(x) = 4,34x^{0,0619}$	$f(x) = 5,0884x^{0,066}$
0 M	$f(x) = 5E - 09x + 0,0035$	$f(x) = 5E - 09x + 0,0035$

Méréseim egyértelműen bebizonyították, hogy a szelektíven, egyszerre egy ismert koncentrációjú elektrolittal dúsított talajpasztának mérve az elektromos vezetőképességét úgy, hogy okszerűen változtatom a mérőáram frekvenciáját, elektrolitonként különbözőek lesznek az EC válaszfüggvényei. A válaszfüggvények azonos oldatkoncentráción történő összehasonlítása során megállapítható, hogy az oldatok a változó mérési frekvenciára adott válaszai eltérő viselkedést mutatnak, mert a szigorúan monoton növekvő hatványfüggvények kitevői koncentrációpáronként eltérnek. A kitevők eltérése megmagyarázza a kationok eltérő viselkedését. Tehát az ugyanolyan koncentrációjú kálium- és kalciumoldatok másképp viselkednek ugyanolyan

környezetben, azonos mérési paraméterek mellett, mivel a hidratált kationok mérete jelentősen eltér egymástól, így adott elektromos tér hatására eltérő sebességgel mozognak az azonos viszkozitású közegben.

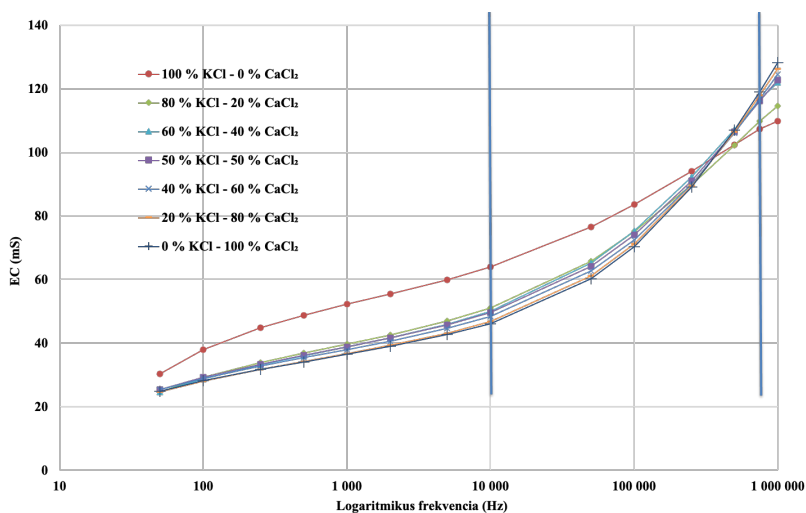
3.1.4. Ismeretlen egyfázisú talajoldat kation koncentrációjának meghatározása

Előzőekben mérésekkel meghatároztam a kálium és kalcium elektrolitoknak a referenciafüggvényeit azaz meghatároztam, hogy milyen EC értékekkel tér vissza a válaszfüggvény változó frekvencián a teljes mérési szekvencián mérve. Ha ismerem az egyfázisú talajoldat összetételét akkor a felvett referenciafüggvények alapján matematikai módszerrel meg tudom határozni az egyfázisú talajoldat koncentrációját. A megoldásra két lehetséges matematikai módszert fejlesztettem: Az oldat koncentrációjának meghatározása (i) a referenciaértékek interpolációjával illetve (ii) a referenciaértékek regressziós függvényeinek az interpolációjával.

3.2. Kétfázisú talajoldatok kation arányának meghatározása

3.2.1. A változó frekvenciájú EC-mérés mint mérőeszköz

Először egy függvényvizsgálatot végeztem, mellyel azt kívántam bizonyítani, hogy a változó frekvenciájú EC-mérés eszközként használható kétfázisú oldatok koncentrációjának meghatározására. A 2.5.2 alfejezetben bemutatott folyamatban előállítottam keverék oldatok EC-értékeit a beállított frekvenciákon. A mérések eredményét a 10. ábra szerint ábrázoltam a logaritmikus frekvencia függvényében. Az oldatok kation koncentrációjához tartozó EC értékeket a 3. táblázatban foglaltam össze.



10. ábra A különböző keverékek EC-méréseinek összehasonlítása logaritmikus frekvencián

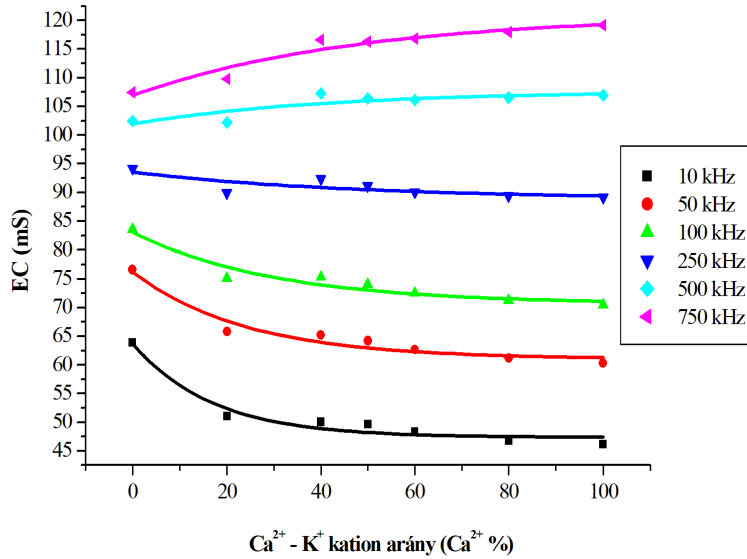
Az a mérési eredményekből egyértelműen megállapítható, hogy

- A mérési frekvencia növekedésével nő az EC értéke.
- A K^+ kationokat tartalmazó oldat vezetőképessége különbözik a Ca^{2+} kationokat tartalmazó oldatétól, mivel a hidratált kationok mérete jelentősen eltér egymástól, így adott elektromos tér hatására eltérő sebességgel mozognak az adott viszkozitású közegben.
- Látható, hogy 10^4 Hz frekvenciáig a frekvenciaváltozás hatására bekövetkező EC-változás lineáris, és nem különbözik jelentősen a Ca és K-ionok különböző arányát tartalmazó oldatok esetében. A 10 kHz és 750 kHz frekvenciatartományban azonban a mért elektromos vezetőképesség függ az oldat kalcium/káliumion arányától.

3. táblázat A mérési eredmények

Frekvencia (Hz)	Az oldatok kation koncentrációjához tartozó EC (mS)						
	100 % KCl - 0 % $CaCl_2$	80 % KCl - 20 % $CaCl_2$	60 % KCl - 40 % $CaCl_2$	50 % KCl - 50 % $CaCl_2$	40 % KCl - 60 % $CaCl_2$	20 % KCl - 80 % $CaCl_2$	0 % KCl - 100 % $CaCl_2$
50	30,30	24,72	24,64	25,44	25,42	24,62	24,86
100	37,85	29,25	28,70	29,25	28,97	28,06	28,15
250	44,84	33,78	33,07	33,36	32,80	31,75	31,73
500	48,73	36,80	35,98	36,15	35,42	34,22	34,10
1 000	52,25	39,69	38,81	38,88	38,02	36,75	36,54
2 000	55,40	42,61	41,67	41,63	40,65	39,28	39,00
5 000	59,99	46,99	45,98	45,78	44,63	43,14	42,78
10 000	63,92	51,07	50,04	49,64	48,34	46,79	46,15
50 000	76,62	65,81	65,20	64,20	62,66	61,17	60,33
100 000	83,58	75,06	75,31	74,06	72,52	71,23	70,43
250 000	94,16	89,89	92,34	91,12	90,05	89,42	89,14
500 000	102,49	102,18	107,26	106,43	106,17	106,53	106,97
750 000	107,46	109,80	116,64	116,33	116,87	117,98	119,16
1 000 000	109,83	114,60	122,13	122,77	124,50	126,33	128,33

A 10 kHz-es és 750 kHz-es frekvenciatartományban statisztikai elemzéseket és függvényvizsgálatokat végeztem az oldatok koncentrációjának függvényében mért vezetőképességi értékekre különböző mérési frekvenciák esetén (11. ábra).



11. ábra Mérések összehasonlítása és a függvényillesztés

Dolgozatomban az exponenciális függvényeket a következő formában használtam illesztett függvényként, és ennek a függvénynek a paraméteres elemzését végeztem el bizonyításként:

$$f(x) = y_0 + Ae^{-\frac{x}{t}} \quad (1)$$

ahol y_0 - a nulla frekvenciára, azaz a rendszer kiindulási pontjára extrapolált vezetőképesség; A - a változás sebességét mutatja és t - a frekvenciaállandó. Az így kapott illesztett görbék egyenleteinek paramétereit a 4. táblázat foglalja össze:

4. táblázat Az exponenciális függvény illesztésének paramétereit és determinációs együtthatóját

Mérési frekvencia	y_0	A	t	R^2
10 kHz	47,36	16,34	16,97	0,9329
50 kHz	61,04	15,15	24,23	0,9124
100 kHz	70,64	12,42	30,47	0,8699
250 kHz	88,82	4,74	37,85	0,3990
500 kHz	107,69	-5,74	41,03	0,5246
750 kHz	120,99	-14,08	47,64	0,8800

A determinációs együttható (R^2) két méréstől eltekintve 0,8699 és 0,9329 közötti értékeket adott, ami megfelelő. A 250 kHz-es és 500 kHz-es mérések esetében a lineáris illesztés megfelelőbb.

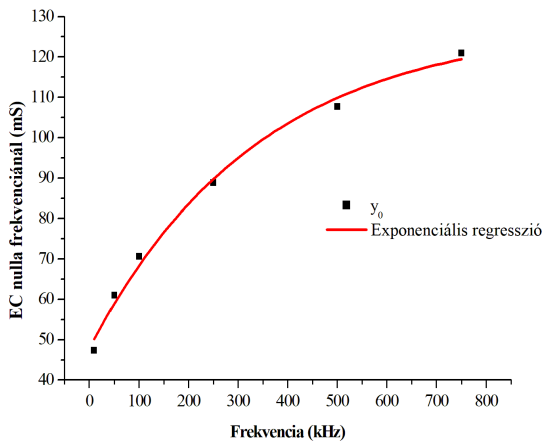
$$f(x) = A + Bx \quad (2)$$

Az 5. táblázat a lineáris illesztéssel kiszámított paramétereket mutatja be.

5. táblázat A lineáris függvényillesztés paraméterei és a determinációs együttható a 250 kHz-en és 500 kHz-en végzett mérésekhez.

Mérési frekvencia	A	B	R^2
250 kHz	92,93	-0,04	0,5929
500 kHz	102,97	-0,04	0,6084

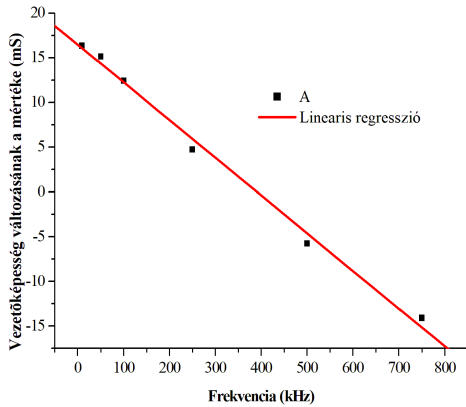
Először a függvények kezdőpontját (y_0) elemeztem, ahol a vezetőképesség a nulla frekvenciára, azaz egyenáramra lett extrapolálva, a mérési frekvenciák függvényében. A pontokra exponenciális függvényt illesztettem. A függvényvizsgálat eredménye a függvény paramétereivel a 12. ábrán látható.



Paraméter	Érték	Hiba	Me.
y_0	128,30	6,57	mS
A	-80,42	5,82	mS
t	339,68	69,33	1/%
R^2	0,99		

12. ábra A vezetőképesség nullfrekvenciára extrapolált értékei a mérési frekvenciák és az exponenciális függvény illesztésének függvényében

Az illesztett függvény megmutatja, hogy a K - Ca arányok kezdeti értékei jelentősen eltérnek egymástól, olyan módon, amely egy függvénnyel leírható, ha észszerűen különböző mérési gyakoriságokat használunk. Ezután a függvények nullfrekvenciára (végtelenre) extrapolált kezdőpontjainak különbségét (A), azaz a változás mértékét ábrázoltam a mérési frekvencia függvényében. A pontokra egy lineáris függvényt illesztettem. A függvényvizsgálat eredménye a 13. ábrán látható.

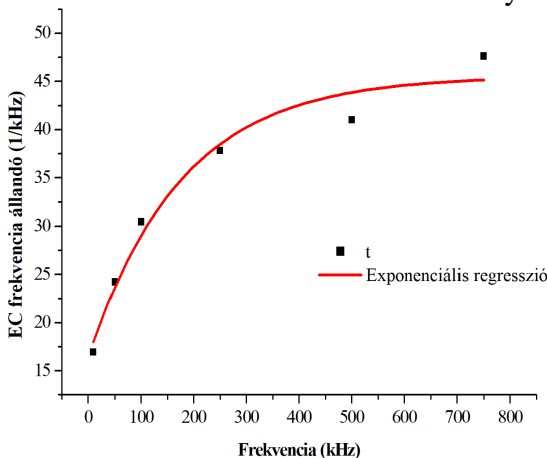


Paraméter	Érték	Hiba	Me.
A	16,469	0,628	-
B	-0,042	0,002	-
R ²	0,974		-

13. ábra A változás mértékének értékei a mérési gyakoriságok és a lineáris függvény illesztésének függvényében

Az illesztett függvény megmutatja, hogy a különböző K - Ca arányú keverékek mérései szignifikánsan, függvénnyel leírható módon eltérnek egymástól, ha változó mérési frekvenciát használunk. Az illesztett függvényt nullára megoldva kiderül, hogy az EC értéke a **392,11 kHz** frekvencián veszi fel a nulla értéket. A 11. ábra értelmezésében az így megrajzolt függvény ezen a frekvencián vízszintes lesz, az EC értéke nem változik a keverék összetételének változtatásával. **Ezért a kísérlet frekvenciatartományát helyesen határoztuk meg.**

A következő lépésben a frekvenciaállandó (t) elemzésére került sor. A t paraméter vagy a frekvenciaállandó azt a frekvenciaváltozást mutatja, amely során a vezetőképesség eltérése az aszimptotikus értéktől az e exponens esetében csökken. Az elemzés eredményét a 14. ábra szemlélteti.



Paraméter	Érték	Hiba	Me.
y_0	45,58	2,38	mS
A	-29,16	2,87	mS
t	176,62	53,67	1/%
R ²	0,94		-

14. ábra A frekvenciaállandó értékei a mérési frekvenciák függvényében és az exponenciális függvény illesztése

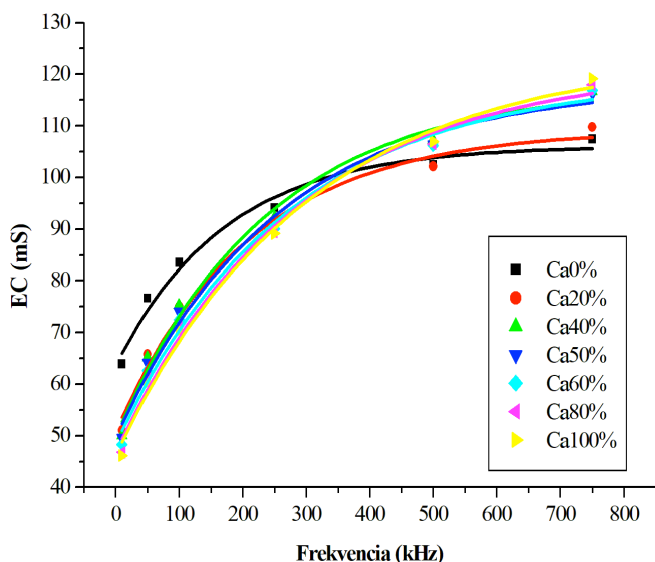
3.2.2. Matematikai módszer - a kalibrációs függvény

Az illesztett függvénnyel ismét bebizonyítottam, hogy a K - Ca arányú keverékeknél mért EC-értékek jelentősen, függvénnyel leírható módon eltérnek egymástól, ha változó mérési frekvenciájú EC mérést alkalmazunk. **A változó frekvenciájú EC-mérés tehát alkalmas eszköz a K^+ - Ca^{2+} kationokat tartalmazó oldatok koncentrációjának meghatározására.** Változó frekvenciaként a kHz-es frekvenciatartomány tűnik a legmegfelelőbb mérési tartománynak.

Dolgozatom egyik célkitűzése arra összpontosít, hogyan lehetne a lassabb, bonyolultabb és ezért viszonylag drága laboratóriumi sótartalom-meghatározást a lehető legtöbb helyszíni méréssel helyettesíteni. A talaj EC-értékének a talaj tulajdonságaitól való függése a terepen azért fontos, mert értékes információkat szolgáltat a talaj sótartalmáról, víztartalmáról, textúrájáról és szerkezetéről. Ezek az információk felhasználhatók a talajkezeléssel és a növénytermesztéssel kapcsolatos megalapozott döntések meghozatalához. Jelenlegi megközelítésem keretét, útmutatást adhat további elemzésekhez és laboratóriumi háttérrel biztosít az EC-mérésen alapuló, menet közbeni talajszenzorok további fejlesztéséhez.

Dolgozatomban azt vizsgáltam, hogyan lehet meghatározni a K^+ és Ca^{2+} kationkoncentrációt egy kétkomponensű KCl - $CaCl_2$ oldatban. Egy mérést teljes beállított mérési szekvencián, azaz frekvenciasorozaton értelmeztem, majd a két nem független változó, egy frekvenciasorozat és a frekvenciáknak megfelelő EC értékek lesznek az adott mérés kimeneti paraméterei. **Ezeket a szekvenciákat egy kétkomponensű oldat komponenseinek szétválasztására használtam. Ehhez egy kalibrációs görbét kellett meghatározni, amely kifejezetten az egyik komponens koncentrációját adja meg az ismeretlen oldatban.**

Ha újra elővesszük a kiinduló, 10. ábrán ábrázolt mérést, amely a különböző oldatok EC-értékeit mutatja a mérési frekvencia függvényében, de most már csak a 10 kHz és 750 kHz közötti frekvenciatartományra koncentrálunk, és a mérési pontokat az 1. képlet szerinti exponenciális regresszióval illesztjük, a 15. ábrán látható ábrát kapjuk. Az exponenciális függvények illesztési paramétereit a 6. táblázat foglalja össze.

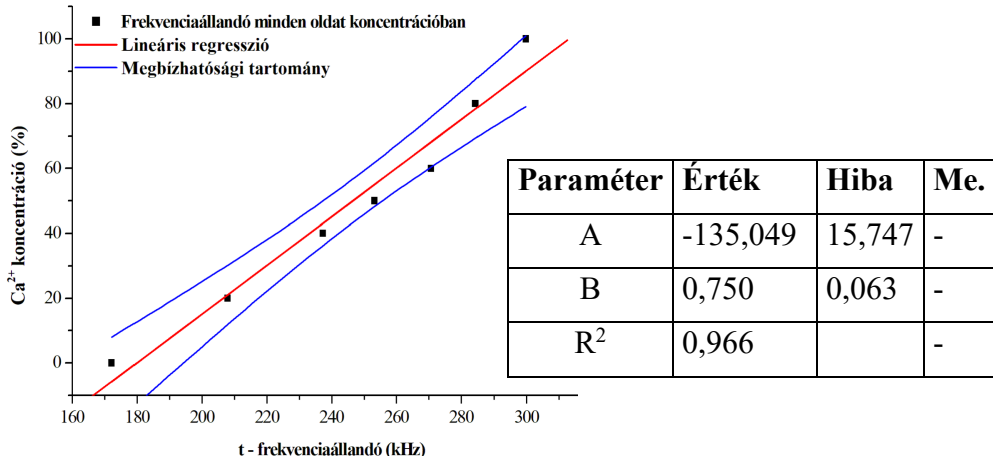


15. ábra A különböző kétkomponensű keverékek méréseinek összehasonlítása a frekvencia függvényében

6. táblázat A függvények illeszkedési paraméterei és a determinációs együttható

Oldat összetétel	y_0	A	t	R^2
100 % KCl – 0 % CaCl ₂	106,17613	-42,62836	172,20536	0,98492
80 % KCl – 20 % CaCl ₂	109,38066	-58,54349	207,90067	0,99916
60 % KCl – 40 % CaCl ₂	117,57815	-67,63566	237,28209	0,94130
50 % KCl – 50 % CaCl ₂	118,03697	-68,38452	253,19429	0,99186
40 % KCl – 60 % CaCl ₂	119,55523	-71,11624	270,70152	0,99247
20 % KCl – 80 % CaCl ₂	121,59095	-74,66261	284,33045	0,99302
0 % KCl – 100 % CaCl ₂	123,8331	-77,5342	299,80215	0,99362

A determinációs együttható nagyon erős, mivel még a legkisebb együttható is 0,94 feletti értékeket mutat, tehát a regressziós görbék illeszkedése megfelelő. Az illesztett görbék függvényei segítségével létrehoztam a Ca - K kétkomponensű oldat kalibrációs görbáját úgy, hogy felvettem a Ca^{2+} koncentrációkat az előzőekben ismertetett illesztésekből származó t - exponenciális frekvenciaállandók függvényében és a kapott pontokra lineáris függvényt illesztettem. A két paraméter közötti kapcsolatot leíró lineárisan illesztett függvény determinációs együtthatója $R^2 = 0,966$, tehát a függvény jól illeszkedik és statisztikai megbízható a vizsgált tartományban (16. ábra).



16. ábra A frekvenciaállandó (t) a kétkomponensű oldat Ca^{2+} koncentrációjának függvénye

Így a lineárisan illesztett kalibrációs függvény képlete:

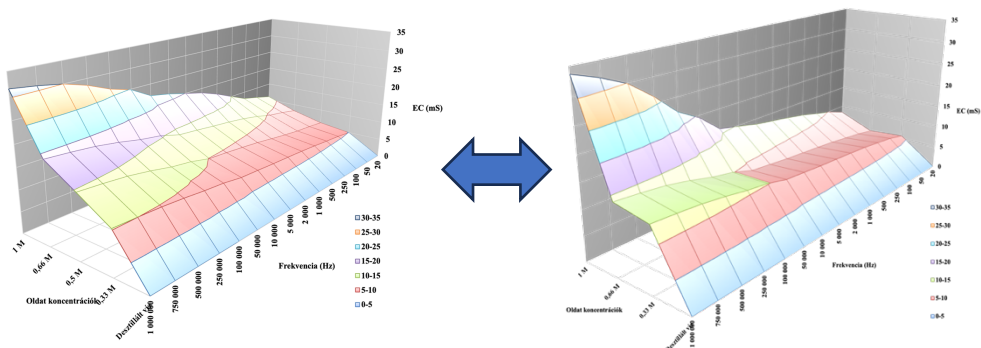
$$f(x) = -135,049 + 0,75x \quad (3)$$

A kalibrációs függvény ismeretében a $\text{Ca}\%$ két lépésben kiszámítható az adott frekvenciákon egy mérési sorozatban, egy mérési szekvencián mért EC-értékekből. A számítási módszer alkalmas egy ismeretlen összetételű K^+ és Ca^{2+} kationokat tartalmazó oldat összetevő arányainak meghatározására, ahol jelen kísérlet esetében 6 ismert frekvencián mértem az elektromos vezetőképességet. Így a megoldás:

- Az EC-értékeket egy mérési szekvenciában a 15. ábra szerinti ábrázolom.
- A mérési pontokra az 1. függvény szerinti Mitscherlich-egyenlet segítségével egyparaméteres exponenciális függvényt illeszték a 15. ábra szerint.
- A megkapott t paraméterrel megoldom a 3. képletet, így megkapom a kétkomponensű oldat Ca^{2+} komponensének arányát a $\text{K}^+ - \text{Ca}^{2+}$ kationok teljes mennyiségéhez viszonyítva.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Tézis#1 - Laboratóriumi vizsgálataimmal igazoltam, hogy az egyfázisú kálium illetve egyfázisú kalcium ionokat tartalmazó talajoldatok esetében is a mérési frekvencia növelésével a talajoldatok növekvő elektromos konduktivitás (EC) értéket mutatnak amint az a 17. ábrán is látható.

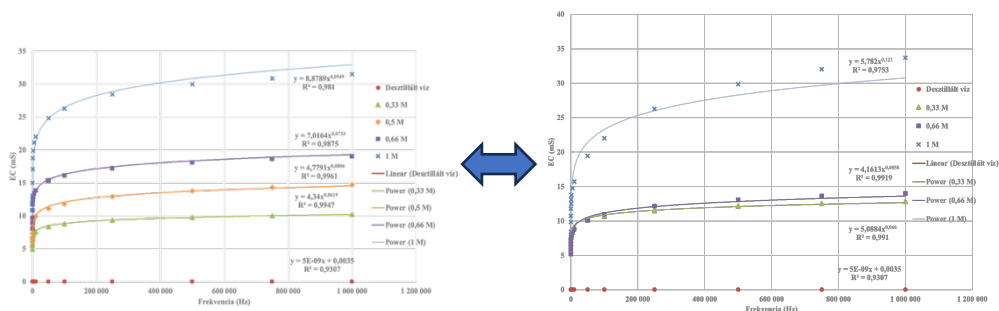


17. ábra Az EC és a koncentráció a talajban és a mérési frekvencia függvényében – K és Ca összehasonlítás

A diagramokról egyértelműen leolvasható, hogy 0,33 – 1,0 M értéktartományba tartozó koncentrációval rendelkező talajoldatoknál az azonos oldat koncentrációnál a mérési frekvencia növekedésével arányosan a mérés kimeneti értéke azaz az EC érték is növekszik. Továbbá minél nagyobb az oldat ionkoncentrációja, minél sósabb az oldat, annál nagyobb lesz a válaszfüggvényből számítható EC értéke.

Tézis#2 - Méréseim egyértelműen bebizonyították, hogy a szelektíven, egyszerre egy ismert koncentrációjú elektrolittal dúsított talajpasztának mérve az elektromos vezetőképességét úgy, hogy okszerűen változtatom a mérőáram frekvenciáját, elektrolitonként különbözőek lesznek az EC válaszfüggvényei. Tehát az ugyanolyan koncentrációjú kálium és kalcium oldatok másképp viselkednek ugyanolyan környezetben, azonos mérési paraméterek mellett.

Adott vizsgálati frekvenciatartományhoz 0,33 – 1,0 M értéktartományba tartozó koncentrációval rendelkező talajoldatokra meghatároztam a jellemző kálium (K^+) és kalcium (Ca^{2+}) kation referenciafüggvényeket (7. és 9. ábra) amelyek hatványfüggvénnyel írhatóak le és amelyek egyértelműen eltérnek mint ahogyan azt a 18. ábra is bemutatja.



18. ábra A kálium (K^+) és kalcium (Ca^{2+}) referenciafüggvények eltérnek

A referenciafüggvényeket tételesen a 2. táblázatban bemutattam és összehasonlítottam.

Tézis#3 - Laboratóriumi vizsgálataimmal megállapítottam, hogy a konduktometria, mint mérési módszer, változó frekvencia értékek alkalmazásával a megfelelően megválasztott frekvencia tartományban, adott körülmények között, alkalmazható ionszelektív mérésre. Ezt kétfázisú, kálium és kalcium ionokat tartalmazó oldaton végzett vizsgálattal igazoltam. A tesztelt kétfázisú oldalra meghatároztam a vizsgálati frekvencia tartományt, amely 10 kHz és 750 kHz közötti érték.

Megállapítottam, hogy a K^+ kationokat tartalmazó oldat vezetőképessége különbözik a Ca^{2+} kationokat tartalmazó oldattól, használva a felismerést, hogy a hidratált kationok mérete jelentősen eltér egymástól. Így adott elektromos tér hatására a különböző ionok eltérő sebességgel mozognak az adott viszkozitású közegben.

Tézis#4 - Matematikai modellt és módszert dolgoztam ki, a kétkomponensű oldat koncentráció arányának a meghatározására. Vizsgáltam, hogyan lehet meghatározni a K^+ és Ca^{2+} kationkoncentrációt egy kétkomponensű KCl - $CaCl_2$ oldatban. Egy mérést teljes beállított mérési szekvencián, azaz frekvenciasorozaton értelmeztem, majd a két nem független változó, egy frekvenciasorozat és a frekvenciáknak megfelelő EC értékek lesznek az adott mérés kimeneti paraméterei. Ezeket a szekvenciákat egy kétkomponensű oldat komponenseinek szétválasztására használtam. Ehhez egy kalibrációs görbét határoztam meg, amely kifejezetten az egyik komponens koncentrációját adja meg az ismeretlen összetételű oldatban. Megállapítottam, hogy a koncentráció arányt az

$$f(x) = -135,049 + 0,75x$$

kalibrációs függvény írja le. Amelynek ismeretében a Ca % két lépésben kiszámítható az adott frekvenciákon egy mérési sorozatban, egy mérési szekvencián mért EC-értékekből. A számítási módszer alkalmas egy

ismeretlen összetételű K^+ és Ca^{2+} kationokat tartalmazó oldat összetevő arányainak meghatározására.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A kutatásom több területen is jól hasznosítható új tudományos eredményeket tartalmaz. Kutatómunkám során az oldatokkal végzett elektromos konduktivitás elvét használó mérés technikai kísérleteim és fejlesztéseim bebizonyították, hogy az elektromos vezetőképesség, mint mérési technikának a jelen precíziós mezőgazdasági gyakorlatban helye van és további fejlesztési lehetőségek vannak e területen.

Ahhoz, hogy az eddigi paradigmákból ki lehessen törni, laboratóriumi mérési módszertant fejlesztettem. Dolgozatom részletezi egy új laboratóriumi mérési módszertan kidolgozását, amely kationokkal telített talaj elektromos vezetőképességét méri. Kutatásom megmutatta, hogy az elektromos vezetőképesség mérési frekvenciájának okszerű változtatásával a kationok aránya egy kétkomponensű oldatban meghatározható. Ezen mérési elv továbbfejlesztésével lehetőség nyílik hatékonyabb, gyorsabb és olcsóbb talajszenzorokat fejleszteni helyspecifikus mezőgazdasági alkalmazásokhoz. Ezzel erőforrásokat takaríthatunk meg és csökkenthetjük a művelés és a tápanyag visszapótlás környezeti hatásait. Az ilyen talajszenzorok használatával a talaj tulajdonságai menetközben mérhetők, ami lehetővé teszi az azonnali információszolgáltatást a talaj állapotáról. Ez az új módszer lehetőséget rejt a talaj tápanyagtartalmának meghatározására akár menet közben az erőgép-munkagép kapcsolaton valós időben.

Dolgozatom arra is rávilágít, hogy az elektromos vezetőképesség mérésének újszerű megközelítése alkalmas lehet a szelektív sótartalom laboratóriumi mérésére. A frekvencia változtatásával és matematikai modellek alkalmazásával a különböző kationokat tartalmazó oldatok szelektív sótartalma meghatározható.

Meghatároztam és kifejlesztettem egy számítási modellt, amely matematikai háttérrel nyújt a talaj szelektív sótartalmának laboratóriumi körülmények közötti kiszámításához a konduktometria analitikus alkalmazásával.

Következtetéseim arra mutatnak, hogy a kutatásom eredményei hozzájárulnak a precíziós mezőgazdasági gyakorlat hatékonyságának a növeléséhez és új lehetőségeket kínálnak a talajvizsgálatok terén az elektromos vezetőképesség mint mérési módszer újszerű megközelítésével.

A dolgozomban bemutatott kutató munkám alapján javaslatot teszek a K^+ és Ca^{2+} kationokkal történt méréseim alapján megállapított összefüggések kiterjesztésére a liotróp sor további elemeivel, így a Mg^{2+} és a Na^+ kationok és kation-kombinációknak a vizsgálatba történő bevonásával. Annak érdekében, hogy gyakorlatban is használható „fekete dobozt” azaz mérési

módszert lehessen létrehozni, érdemesnek látom a módszeremmel több talajtípuson is kidolgozni a kalibrációs függvényeket és finomítani az algoritmust abból a célból, hogy a magyar gyakorlatnak megfelelő általános modellt létre lehessen hozni. A következő lépésként javaslom a laboratóriumban kidolgozott algoritmust elektromos vezetőképesség mérésre alkalmas szántóföldi munkaeszközre telepíteni és szántóföldi körülmények között tovább finomítani a modellt, hogy a változó frekvenciás mérési elv a gyakorlatban is alkalmazható legyen.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásom megközelítései igazolták, hogy több évtizede a mezőgazdasági gyakorlatban használt az elektromos vezetőképességet felhasználó méréstechnikának is vannak fejlesztési lehetőségei. A tényként kezelt elvek megkérdőjelezése új megközelítés használatával fejlesztési lehetőségeket nyithat az elektromos vezetőképesség szélesebb spektrumon való használatához a precíziós mezőgazdasági gyakorlatban.

Doktori disszertációmban egyrészt új laboratóriumi mérési módszert kidolgozva bebizonyítom, hogy kationokat tartalmazó oldatokkal a talajt telítve a mérési frekvencia függvényében a talaj elektromos vezetőképessége eltérő függvények szerint alakul. Továbbá bemutatom, hogy az elektromos vezetőképesség mérési frekvenciájának okszerű változtatásával egy kétkomponensű oldatban a kationok aránya az elektromos vezetőképesség mérésével meghatározható. A kapott eredményekből levonom a megfelelő következtetéseket és matematikai modellt adok az oldatban lévő kationarány meghatározására laboratóriumi kísérleti módszerrel. A munkám által feltárt összefüggések elősegítik olyan, a precíziós mezőgazdasági gyakorlatban használható menet közbeni mérőeszköz fejlesztését, amely elektromos vezetőképesség mérésével meg tudja határozni a talaj tápanyagtartalmát.

A talajszenzorok elterjedésével lehetővé válik a talaj tulajdonságainak mérése menetközben, így a termelők azonnali tájékoztatást kaphatnak a legfontosabb erőforrás, a talaj állapotáról, ami erőforrásokat takaríthat meg és csökkentheti a környezetre gyakorolt hatást. A talajszenzorok használata gyors, azonnali és költségtakarékos talajvizsgálati és tápanyagtérképezési megoldásokat tesz lehetővé.

Jelen dolgozatomban arra kerestem a választ, hogy az egyik legegyszerűbb, legnépszerűbb és egyben a legolcsóbb mérési módszer, azaz az elektromos vezetőképesség mérése, egy újszerű megközelítéssel, újra gondolt mérési technikával lehetőséget nyújt-e a szelektív sótartalom laboratóriumi mérésére. Kísérleteim bebizonyították, hogy a talaj sókoncentrációja, a mérési frekvencia és a mért EC között függvényekkel leírható összefüggés van. A frekvencia növelésével az adott koncentrációjú oldatokkal telített talaj mért EC értéke az eredményekben közzétett függvényeknek megfelelően változott tehát az azonos koncentrációjú kationokat (K^+ és Ca^{2+}) tartalmazó oldatokkal a talajt telítve a mérési frekvencia függvényében az EC eltérő függvények szerint alakul.

Kifejlesztettem egy olyan számítási modellt is, amely útmutatást adhat a talaj szelektív sótartalmának laboratóriumi körülmények közötti kiszámításához a konduktometria analitikus alkalmazásával. A modell azt mutatja, hogy a

mérési frekvenciák következetes változtatásával egy ismert talaj szelektív sótartalma EC-méréssel laboratóriumi körülmények között meghatározható. Azonos koncentrációjú kationokat tartalmazó oldatok esetén az EC a mérési frekvenciától függően különböző függvények szerint telítődik.

Dolgozatom arra a kérdésre is kereste a választ, hogy az elektromos vezetőképesség mérésének újszerű megközelítése lehetőséget nyújt-e a szelektív sótartalom laboratóriumi mérésére. Bebizonyítottam és matematikailag levezettem, hogy a K^+ és Ca^{2+} kationokat tartalmazó kétkomponensű oldat szelektív sótartalmának meghatározása lehetséges az elektromos vezetőképesség változó frekvencián történő mérésével, és azt is meghatároztam, hogy a mérhetőség szempontjából melyik frekvenciatartomány releváns az eredményekben közzétett függvények szempontjából és megadtam a kalibrációs függvényt a fázisok szétválasztásához. Nyilvánvalóvá vált, hogy egy számítási modell útmutatást ad a kétkomponensű oldat szelektív sótartalmának laboratóriumi körülmények között történő kiszámításához a konduktometria analitikus alkalmazásával. A modell azt mutatja, hogy a mérési frekvenciák következetes változtatásával a szelektív sótartalom EC-méréssel laboratóriumi körülmények között meghatározható.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. **HORVÁTH, J., KÁTAI, L., SZABÓ, I.** (2024): Compatibility analysis of the soil calcium content by multifrequency ec sensors. *International Journal of Research - GRANTHAALAYAH*, 11(12), 175–187 p. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v11.i12.2023.5437>
2. **HORVÁTH, J., KÁTAI, L., CZINKOTA, I., SZABÓ, I.** (2023): Using multi-frequency electrical conductivity measurement to determine the selective salinity in a two-component salt solution. *Agronomy Research* 21(3), 1228–1142 p. <https://doi.org/10.15159/ar.23.069>
3. **HORVÁTH, J., KÁTAI, L., SZABÓ, I.** (2023): Analysis of the Soil Selective Potassium Content, using Multifrequency EC Sensors. *Acta Polytechnica Hungarica*, 20(7), 231–248 p. <https://doi.org/10.12700/APH.20.7.2023.7.13>
4. **HORVÁTH, J., KORZENSZKY, P., KÁTAI, L., SZABÓ, I.** (2022): On the go soil sensor development in AGIT FIEK programme. *Mechanical Engineering Letters: R And D: Research And Development*, 23, 33–48 p.
5. **HORVÁTH, J., SCHMITZ, B.** (2019): Digitalisation in agriculture – From the perspective of a global agricultural machinery producer. *Hungarian Agricultural Engineering*, 36, 63–68 p. <https://doi.org/10.17676/HAE.2019.36.63>

Lektorált cikk magyar nyelven

6. **HORVÁTH, J., KÁTAI, L. SZABÓ, I.** (2021): Menet közbeni talajszenzorok a precíziós mezőgazdaságban. *Mezőgazdasági technika*, 62(10), 2–5 p.
7. **SZABÓ, I., HORVÁTH, J.** (2020): Ikervélemény – Dr. Szabó István és Horváth János. *Agronapló*, 24, 72–74 p.

Nemzetközi konferencia abstract

8. **HORVÁTH, J., SZABÓ, I., KÁTAI, L.** (2021): Evaluation of multi-frequency electrical conductivity measurements to determine the soil nutrient cation concentration. In 12th International Conference on Biosystems Engineering 2021: Book of abstracts.