



MAGYAR AGRÁR- ÉS  
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

TALAJOK ÁLLAPOTÁT ÉS MŰVELHETŐSÉGÉT MEGHATÁROZÓ  
JELLEMZŐK VIZSGÁLATA

Doktori (PhD) értekezés

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

JELÖLÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE.....	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK .....	9
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége .....	9
1.2. Célkitűzések .....	9
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	11
2.1. A precíziós mezőgazdaság .....	11
2.2. A digitális mezőgazdaság.....	13
2.2.1. A Digitális Mezőgazdaság rendszerszemléletű megközelítése .....	14
2.2.2. A mezőgazdasági technológia evolúciója .....	15
2.2.3. Miért van szükség digitalizációra a szántóföldi növénytermesztésben?.....	18
2.3. A precíziós növénytermesztés technikai háttere .....	19
2.3.1. Helymeghatározás és navigáció .....	19
2.3.2. Telemetria, gépzemeltetés .....	21
2.3.3. Térinformatika.....	21
2.3.4. A változékonyság kezelése.....	22
2.3.5. Vezérlési technikák .....	24
2.3.6. Szenzorok, távérzékelés .....	24
2.4. Helyzetelemzés és kitekintés.....	25
2.4.1. A precíziós technológia mint innováció.....	25
2.4.2. A precíziós technológiák elterjedése Magyarországon.....	25
2.4.3. Nemzetközi kitekintés .....	26
2.4.4. Mit várhatunk a jövőtől? .....	28
2.5. Talajtulajdonságok vizsgálata szenzorokkal .....	31
2.5.1. Érzékelők általános csoportosítása a helyspecifikus növénytermesztésben .....	31
2.5.2. Talajvizsgálat mintavétellel.....	31
2.5.3. Távérzékelés (Remote sensing).....	32
2.5.4. Talajközeli érzékelés (Proximal sensing).....	33
2.5.5. Kereskedelemben elérhető leggyakoribb talajszenzorok – A talajszkennerek .....	35
2.6. A talaj elektromos vezetőképesség mérése .....	37
2.6.1. A talaj elektromos vezetőképessége.....	39
2.6.2. A konduktometriás mérések a talajban - a talajok oldható sótartalma.....	40
2.6.3. A talajnedvesség, azaz a talajoldat kémiai összetétele.....	41
2.6.4. A talajoldat összetételének változása .....	41
2.6.5. A talajoldatban leggyakrabban előforduló kationok .....	42
2.6.6. Ionok hidrációja és a hidratburok mérete .....	43
2.6.7. Elektromos vezetőképesség elvén működő talajszenzorok.....	44
2.7. A releváns bibliográfiai adatkeret leíró elemzése .....	45
3. ANYAG ÉS MÓDSZER .....	49
3.1. A mérések körülményei .....	49
3.2. A felhasznált talaj jellemzése .....	49
3.3. A felhasznált oldatok.....	52
3.4. A mérőkörök specifikációja .....	53
3.4.1. A talajpasztával végzett mérések mérőköre .....	53
3.4.2. Mérőkör kétfázisú oldatok vizsgálatához.....	55
3.4.3. A SOURCETRONIC ST2829C precíziós LCR-mérő .....	55
3.5. Az adatfeldolgozás folyamata .....	58
3.5.1. Egyfázisú oldat talajpasztában való mérése .....	58
3.5.2. Kétfázisú keverékoldat mérése.....	62

4.	EREDMÉNYEK.....	66
4.1.	Egyfázisú talajoldatok kation tartalmának meghatározása .....	66
4.1.1.	Kálium referenciatfüggvények meghatározása laboratóriumi méréssel.....	66
4.1.2.	Kalcium referenciatfüggvények meghatározása laboratóriumi méréssel.....	68
4.1.3.	Kálium és kalcium referenciatfüggvények összehasonlítása .....	71
4.1.4.	Ismeretlen egyfázisú talajoldatok kation koncentrációjának meghatározása.....	71
4.2.	Kétfázisú talajoldatok kation arányának meghatározása .....	75
4.2.1.	A változó frekvenciájú EC-mérés mint mérőeszköz.....	75
4.2.2.	Matematikai módszer - a kalibrációs függvény .....	79
4.3.	Új tudományos eredmények.....	83
5.	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK .....	85
6.	ÖSSZEFOGLALÁS .....	86
7.	SUMMARY .....	87
8.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....	88
9.	MELLÉKLETEK.....	89
	M1. Irodalomjegyzék.....	89
	M2. Saját publikációk.....	97
	M3. Ábrajegyzék .....	98
	M4. Táblázatok jegyzéke.....	101
	M5. Talajvizsgálati jegyzőkönyv .....	102

JELÖLÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

Rövid név	Magyar megfelelő, magyarázat	Angol/Német megfelelő
AEF	Az ISO11783 szabványt kezelő szervezet	Agriculture Industry Electronics Foundation
AKI	Agrárgazdasági Kutató Intézet	Agricultural Research Institute
ATP	Mezőgazdasági technológiai szolgáltató	Agricultural Technology Provider
BEIDU	Kína globális navigációs műholdrendszere	Global Navigation Satellite System by China
Big Data	Nagymennyiségű adat feldolgozása	Big Data handling and processing
CAGR	Összevont éves növekedési ráta	Compound Annual Growth Rate
CAN - Canbus	Az erőgépen belüli szabályozó egységeket összekötő hálózat	Controller Area Network
CEC	Kationcserélő képesség	Cation Exchange Capability
CEMA	Európai Mezőgépgyártók Szövetsége	European Agricultural Machinery Association
Cloud	Felhőalapú adatszolgáltatás	Cloud based service
CM	Centiméteres jelpontosság hívjuk még RTK pontosságnak is	Centimeter accuracy
CNH	Case New Holland	Case New Holland
CTF	Ugyanazon művelőutak hosszútávú használata	Controlled Traffic Farming
DAS	Digitális Agrár Stratégia	Digital Agrar Strategy
DGPS	Korrektív jellel pontosított helymeghatározás	Differential Global Positioning System
DIN	Német Szabványügyi Hivatal	Deutsches Institut für Normung
DJP	Digitális Jólét Program	
DM	Deciméteres jelpontosság	Decimeter accuracy
EC	Elektromos vezetőképesség	Electrical Conductivity
ECU	Elektromos vezérlőegység	Electronic Control Unit
EGNOS	Az EU által működtetett SBAS geostacionárius rendszer	European Geostationary Navigation Overlay System
EIP-AGRI	A mezőgazdaság termelékenységét és fenntarthatóságát célzó Európai Innovációs Partnerség	European Innovation Partnership for Agricultural Productivity and Sustainability
EMR	Elektromágneses sugárzás	Electro-magnetic Radiation
ENSZ	Egyesült Nemzetek Szervezete	UN - United Nations

Jelölések, rövidítések jegyzéke

Rövid név	Magyar megfelelő, magyarázat	Angol/Német megfelelő
ESA	Európai Űrügynökség	European Space Agency
EU	Európai Unió	European Union
EULA	Végfelhasználói megállapodás	End-User License Agreement
EUSPA	Európai Unió Űrprogram Ügynöksége	European Union Agency for the Space Programme
FAO	Az ENSZ mezőgazdasági ügyekkel foglalkozó osztálya	Food and Agriculture Organization
FDR	Frekvenciatartományú reflektométer	Frequency-domain reflectometer
FMIS	Farm menedzsment rendszer	Farm Management Info System
GALILEO	Az EU globális navigációs műholdrendszere	Global Navigation Satellite System by EU
GDPR	Az EU általános adatvédelmi rendelete	General Data Protection Regulation
GIS	Farm térképi adatbázisának kezelésére	Geographical Information System
GLONASS	Oroszország globális navigációs műholdrendszere	Global Navigation Satellite System by Russia
GNSS	Globális navigációs műholdrendszer (GPS, GLONASS, GALILEO, stb.)	Global Navigation Satellite System
GPR	talajba hatoló radar	Ground-penetrating radar
GPS	Globális Helymeghatározó Rendszer	Global Positioning System
IBBC	Szabványos Isobus csatlakozó	Isobus Breakaway Connector
ICT	Infó-kommunikációs technológia	Information and Communication Technologies
IDW	Súlyozott számtani közép módszere	Inverz Distance Weighting
IoT	A dolgok internete	Internet of Things
ISO11783	Traktor – munkagép szabványosított kommunikációját leíró szabvány. Ismert még ISOBUS-ként is.	Tractors and machinery for agriculture and forestry—Serial control and communications data network
ISOXML	Az ISO11783 által leírt szabványos adatformátum	Standard data format of ISO11783
JD	John Deere	John Deere
JD SF-1	A John Deere StarFire antennához biztosított ingyenes jelkorrekció (ca. 1 m pontosság)	John Deere Starfire correction signal 1
JD SF-2	A John Deere fizetős StarFire korrekciós jele (ca. 10-15 cm pontosság)	John Deere Starfire correction signal 2

Jelölések, rövidítések jegyzéke

Rövid név	Magyar megfelelő, magyarázat	Angol/Német megfelelő
JD SF-3	A John Deere fizetős StarFire korrekciós jele (ca. 2-4 cm pontosság)	John Deere Starfire correction signal 3
LIDAR	Lézeralapú távérzékelés	Light Detection and Ranging
Me.	Mértékegység	Unit
MIR	Közép infravörös tartomány	Mid-infrared
NASA	Az USA Űrügynöksége	North American Space Agency
NDRE	Normalizált vörös él tartomány	Normalized Difference Red Edge
NDVI	Normalizált differenciált vegetációs index - Számítási módja: $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ , ahol NIR a közeli infravörös és R a látható vörös tartományban mért visszaverődés.	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Közeli infravörös tartomány	Near Infrared
NOAA	Az USA Nemzeti óceáni és légköri hivatala	National Oceanic and Atmospheric Administration
NTRIP	Internet alapú adatközlési megoldás.	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OECD	Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet	Organisation for Economic Cooperation and Development
OM	Szervesanyag tartalom	Organic Matter
OSI	Nyitott rendszerek kapcsolata	Open System Interconnected
PA	Precíziós mezőgazdaság és szinonimái	Precision Agriculture
pH	Kémhatás	potential for hydrogen
RTK	Valós idejű helymeghatározás rövidítése	Real Time Kinematik
SBAS	Műhold alapú korrekciós jel rendszer (WAAS, EGNOS, stb.)	Satellite-based Augmentation System
SC	Szakaszvezérlés	Section Control
SM	Méteres jelpontosság	Submeter accuracy
SSCM	Helyspecifikus gazdálkodás	Site-specific Crop Management
TC	Feladatkezelő egység	Task Controller
TDR	időtartományú reflektométer	Time-domain reflectometer
TIM	Munkagép vezérelte traktor funkció	Tractor Implement Management
URE	Helymeghatározás eredő hibája	User Equivalent Range Error
USA	Amerikai Egyesült Államok	United States of America
USDA	Az USA Mezőgazdasági minisztériuma	United States Department of Agriculture

Jelölések, rövidítések jegyzéke

<b>Rövid név</b>	<b>Magyar megfelelő, magyarázat</b>	<b>Angol/Német megfelelő</b>
UT	Közös terminál	Universal terminal
VDMA	Gépészmérnökök Iparági Szervezete Németországban	Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau
VIS	Látható fény tartománya	Visible spectrum
VRA	Differenciált kijuttatás	Variable Rate Application
VRC	Differenciált szabályzása az erőgépben	Variable Rate Control
VRS	Differenciált vetés	Variable Rate Seeding
VRT	Differenciált kijuttatási technológia	Variable Rate Technologies
WAAS	Az USA SBAS rendszere	Wide Area Augmentation System



## 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 (UN, 2015). Változik a lakosság elhelyezkedése és összetétele is. Az urbanizáció ugyanolyan masszív trend, mint a népesség növekedése: az emberiség többsége ma már városokban, köztük sokmillió megapoliszokban él, ahol bonyolult ellátási láncokat kell megszervezni és működtetni. Egyes fejlődő országokban (így elsősorban Indiában és Kínában) új, nagy létszámú városi középosztály emelkedett ki az általános szegénységből, amelynek tagjai magasabb színvonalú élelmezésre tartanak igényt, ami viszont nagyobb terheket ró a növénytermesztésre, mert a magasabb fehérje tartalmú ételeknek általában fokozottabb hús felhasználása van. A több hús az állattenyésztésben felhasznált takarmány minőségére és mennyiségére lesz hatással. A helyzetet bonyolítja, hogy míg a demográfiai robbanás egyes fejlődő régiókra jellemző, a világ több fejlett országa lakóinak elöregedésével, népességfogyással küszködik.

A fenti számokat és trendeket átgondolva arra a következtetésre juthatunk, hogy a lépéstartás érdekében a mezőgazdasági termelésnek néhány évtized alatt 50 – 100 % növekedést kellene mutatnia, legalábbis az előrejelzések e két szélsőérték között mozognak (BÖGEL, 2018). Beláthatatlan társadalmi következményei lehetnek annak, ha a kínálat nem tud lépést tartani a kereslettel. Ezért a fogyóeszközöket tudatosabban és okosabb módon kell felhasználni, hogy ezekkel maximális hatást érjenek el.

Ezeket a tényeket a mezőgazdasági gépipar általánosan elismeri, és szinte valamennyi, a mezőgazdasági ágazatban működő vállalat éves jelentéseiben megtalálható. 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 (STEENSLAND, 2019). A fenntarthatósági cél elérésében a mezőgazdaság digitalizálása kulcsszerepet játszik. A digitalizálás elterjedésével az ember-gép kapcsolat egyre fontosabbá válik (SZABÓ et al., 2017, 2018, 2019). A mezőgazdasági gépek szempontjából az egyéni megoldások, például az automatikus kormányzási rendszerek váltak standarddá. Meg kell jegyezni, hogy minél "kézzelfoghatóbb" egy megoldás előnye, annál gyorsabb az alkalmazásának elterjedése a mezőgazdasági gépeken. A mezőgazdaságban rejlő potenciál az adatfelhasználás terén a nagyméretű adatbázis (Big Data) megközelítés miatt sokkal nagyobbak tekinthető, mint amit eddig a fedélzeti technológiákkal értek el. Ezért a potenciál felszabadításához kulcsfontosságú a gazdaságban alkalmazott gépek és rendszerek szabványosítása és kompatibilitása. Új megoldásokat és szolgáltatásokat fejlesztenek ki ezen lehetőségek kiaknázása érdekében a felhasználók azaz a gazdálkodók bevonásával.

### 1.2. Célkitűzések

A talajoldatok elektromos vezetőképességének (Electrical Conductivity - EC) vizsgálata már hosszú ideje eszköze a precíziós mezőgazdaságnak. Az elektromos vezetőképességet felhasználó konduktometriás mérés technika a vezetőképesség direkt értékéből nyer analitikai információkat a talaj sótartalmáról, agyagtartalmáról. 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(pasza) könnyen mérhető EC értéke és a talaj relatív sótartalma között. Kísérleteimben vizsgálom, hogy adott frekvenciasorozaton mérve az elektromos vezetőképességet 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.

Dolgozatom keretét a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézetében történő módszertani fejlesztés adta. A fejlesztés arra irányult, hogy a lassú, bonyolult és viszonylag drága laboratóriumi sótartalom meghatározást hogyan lehet minél több helyszíni méréssel helyettesíteni. Jelenlegi ismereteink szerint a talajszenzorokkal végzett vezetőképesség-vizsgálatok önmagukban nem elegendőek egy adott terület sótartalmi tulajdonságaira való következtetéshez. A mérést befolyásolja a különböző tápanyagok egyenlőtlen eloszlása, az eltérő pH-értékek, az eltérő szemcseösszetétel, a szervesanyag-tartalom vagy akár a hőmérséklet különbségei (CORWIN és LESCH, 2005).

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

### 2.1. A precíziós mezőgazdaság

A precíziós mezőgazdaság (Precision Agriculture - PA) számos lehetőséget kínál a termelékenység és jövedelmezőség növelésére, szűkülő környezeti források mellett is. 2000 májusában a Bill Clinton elnök vezette amerikai kormányzat elrendelte, hogy megszüntetik a GPS 24 műholdból álló globális helymeghatározó rendszerének mesterséges zavaró jeleit, amelyre korábban nemzetbiztonsági okokból volt szükség. A döntés egy csapásra megváltoztatta a mezőgazdasági gépesítés lehetőségeit és teret nyitott a precíziós technológiák fejlődésének. Ma már a legmodernebb traktorok és kombájnok akár már az önálló (autonóm, azaz kezelő nélküli) munkavégzésre is képesek a műholdas helymeghatározási technológia használatával. A mezőgazdaságigép-gyártók az elmúlt évtizedekben arra törekedtek, hogy egyre nagyobb méretű és teljesítményű erőgépeket fejlesszenek, amelyek képesek elhúzni, működtetni és vezérelni a szintén egyre terjedelmesebbé váló munkagépeket. A közelmúltban viszont a digitalizáció térhódításával egyre több cég próbálkozik a „rovarméretű” mezőgazdasági robotok előállításával. Az elektromos, kisméretű és kevés energiát fogyasztó, akár önálló döntéshozatalra képes kezelő nélküli mezőgazdasági robotokra lehet bízni a vetést, az öntözést. Akár arra is alkalmasak, hogy már a kezdeti időszakban elkülönítsék a gyomokat a haszonnövényektől és egy menetben ki is tudják irtani azokat (POPP et al., 2018).

A digitalizáció immár elkerülhetetlen, de pozitív irányban ható része az életünknek. A mezőgépekbe bekerülő információs technológia új lehetőségeket teremt a teljes agronómiai értéklánc területén, de fel is borítja az eddig jól bejáratott gyakorlatokat. A fejlett technológiájú mezőgépek digitális kiszolgálását a gépek kezelői egyre kevésbé képesek ellátni, nagyobb rugalmasságra, alkalmazkodóképességre és tudásvágyra van szükség a részükről. A gazdálkodók, farmerek a hagyományos gazdálkodási lépések mellett mindinkább rászorulnak a külső szakemberek szolgáltatásaira a mezőgazdasági táblán végzett és jövőben végzendő munkafolyamatok elemzése és a precíziós gazdálkodási ajánlások kidolgozása céljából.

Az Agrárgazdasági Kutató Intézet „Precíziós Szántóföldi Növénytermesztés Összehasonlító Vizsgálata” (GAÁL et al., 2017) a precíziós növénytermesztést a következőképp definiálja: Olyan műszaki, informatikai és termesztéstechnológiai alkalmazások összessége, amelyek lehetővé teszik a táblán belül változó körülményeknek megfelelő művelést, ezáltal hatékonyabbá teszik a termelést, csökkentik az inputanyagok felhasználását, valamint a feleslegesen kijuttatott szerek csökkentésével segítik a környezetkímélő gazdálkodást (GYŐRFFY, 2000; STOMBAUGH et al., 2001; EIP-AGRI, 2015). Tamás megfogalmazásában a precíziós mezőgazdaság az információs társadalomnak a mezőgazdasági szakterületen való leképzése (TAMÁS, 2002).

Az Európa Parlament megrendelésére készült összefoglaló elemzés szerint a precíziós mezőgazdaság egy teljeskörű farmgazdálkodási megközelítés, amely magában foglalja a digitalizációt azaz az információtechnológiát, műholdas helymeghatározási (GNSS) adatokat használ távoli érzékelésre és közvetlen adatgyűjtésre. A technológia célja az inputok megtérülésének optimalizálása, miközben potenciálisan csökkentik a környezeti hatásokat. (ZARCO-TEJADA et al., 2014).

A precíziós mezőgazdaság Milics et al. szerint egy olyan menedzsment stratégia, amely időbeli, térbeli és egyedi adatokat gyűjt, dolgoz fel és elemez, valamint azokat egyéb információkkal egészíti ki, annak érdekében, hogy támogassa a táblán belüli változatosságot kezelő döntéstámogatási folyamatokat, növelve ezzel az erőforrások felhasználásának hatékonyságát, a produktivitást, a minőséget, a jövedelmezőséget és a fenntarthatóságot a mezőgazdasági termelés során (MILICS et al., 2021). Egyszerűbben: precíziós eszközöket alkalmazunk a jobb eredmények eléréseért. A PA-t néha precíziós gazdálkodásnak, műholdas mezőgazdaságnak, szükség szerinti gazdálkodásnak és helyspecifikus növénygazdálkodásnak (site-specific crop management -

SSCM) is nevezik (VÉRTESY, 2023). De sajnos olyan Precíziós Gazdálkodási Kisokos, amelyet fellapozva minden gazdálkodó 100%-os iránymutatásra talál a saját gazdálkodására specifikus kérdései tekintetében, nem kapható. Mert az egyenlet többváltozós. Számos megfelelő erőgép/munkagép párosítás létezik ugyanarra a feladatra, a színskála minden színében, hiszen a gyártók versenyeznek a vásárlók pénzéért. Elmondható, hogy a legkorszerűbb gépkínálat áll a gazdálkodók rendelkezésére itthon is. A korszerű gépek hatékony kihasználásának egyik módja lehet a precíziós növénytermesztés, amely a munkaerő teljesítményének növelési lehetősége. 10 évvel ezelőtt még hazánk a precíziós gazdálkodás megvalósítása, széleskörű elterjesztése előtt állt (TÓTH és DARÓCZI, 2013), de az elmúlt években ez a terület óriási fejlődésen ment keresztül, köszönhetően a precíziós technikák fejlesztésére fordított magyar és EU-s forrású, nagy keretösszegű támogatásoknak, mint például a 2021-ben kiírt VP2-4.1.8-21 MEZŐGAZDASÁG DIGITÁLIS ÁTÁLLÁSÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PRECÍZIÓS FEJLESZTÉSEK TÁMOGATÁSA pályázat.

A precíziós technológiák, fejlesztések mögött a fenntarthatóság elve áll. Tekintsünk úgy a precíziós technológiákra, mint:

- **innovációra**, amely a klasszikus értelmezés szerint gazdaság fejlődésének motorja. Különösen versenykörnyezetben nagy jelentőségű az, hogy ki mennyire képes tevékenységének, valamint termékeinek/szolgáltatásainak folyamatos megújítására, valamint az egyre újabb kihívásokhoz való igazodásra, valamint
- **stratégiai befektetésre**, amely lehetővé teszi a szűkös erőforrások átgondolt elosztását.

Azonban az a gazdálkodó, aki RTK pontos műholdas automata kormányzást, a szakaszvezérlést, a differenciált kijuttatást alkalmaz, még nem gazdálkodik precíziósan. A technológia által elérhető funkciók használata nem fedi le a precíziós gazdálkodás fogalmát. A technológia használata csak eszköz és nem a cél megvalósítása. A műszaki fejlesztés sohasem lehet öncélú, mindig a gazdasági fejlődésre és a kitűzött termelési célok elérésére kell irányulnia, elsődleges feladata a kutatási eredmények gyakorlati keretek közötti megvalósítása. A műszaki fejlesztések végső soron a jövedelemtermelő képesség fokozását eredményezik és végső céljuk a gazdasági növekedés (KAPRONCZAI, 2011).

A precíziós mezőgazdaság alapvető célja az eltérő termőképességű területek kezelése. Alapfeltétele, hogy ismerjük meg a saját mezőgazdasági tábláinkat, tárjuk fel a heterogenitásokat és a kezelést határozzuk meg az ésszerű mértékben lehatárolt, tulajdonságok alapján zónákra bontott homogén egységekre. A szezon végén értékeljük ki az eredményeket és a jövedelmezőségét a tevékenységünknek, hogy folyamatában lássuk a változást. Ebben segít a mezőgépekben elérhető digitális technológia. Segítségével a talajon elvégzendő munkáink folyamata rugalmas és felhasználóbaráttá lesz, a munkavégzés későbbi elemzések céljára dokumentálhatóvá és 2 cm pontos pozícióra bármikor megismételhetővé válik. Így tudunk a precíziós technológiákkal értéket teremteni.

A téma aktualitása a fentiek alapján egyértelmű, mivel a talaj tulajdonságai, valamint a műveléssel módosítható paraméterek, jellemzők nagyban befolyásolják a természetű növénykultúrát, a növénykultúrához szükséges talajművelést és végső soron az elérhető hozamot. A talaj okszerű műveléséhez megválasztott gépkapcsolatokat a precíziós technológia konzisztens alkalmazása tudja korszerűvé, valamint használatukat még gazdaságosabbá tenni. A centiméter pontos automata kormányzási rendszerek és az ISO 11783 szabvány (Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network, ISOBUS szabvány) fejezeteiben definiált funkciókon alapuló technológia térnyerésével a kijuttatási térképek alkalmazása a művelési döntések valóságban való leképzésének a fontos gyakorlati módszerévé vált a gazdálkodók körében. A farmerek túlnyomó része jelenleg még gazdasági/technológiai/szakmai hiányosságokból eredően nem tudja, vagy nem akarja használni

az ISOBUS-on keresztül elérhető differenciált kijuttatási technológiát. Azzal azonban majdnem mindenki egyetért, hogy a differenciált kijuttatási technológia gazdaságon belüli bevezetéséig is már a lehető legtöbb adatot be kell gyűjteni a táblákról, mert ha a technológia megérkezik a gazdaságba, akkor létfontosságú lesz az RTK pozícióra rendezett adattömeg. Ezért jelenleg a legfontosabb kijelentés a precíziós gazdálkodás technológiai oldalán: „Menj és gyűjts már most (helyspecifikus) adatot a tábláidról, mert később biztosan hasznát veszed!”

Nagyapáink helyspecifikus gazdálkodók voltak. Sőt, a növénytermesztés kialakulásánál fogva csak helyspecifikus gazdálkodók lehettek, hiszen minden műveletet kézzel, kézi eszközökkel végeztek. Idővel elindult a növénytermesztés gépesítése, egyre inkább előtérbe került a területteljesítmény és a hatékonyság (MESTERHÁZI, 2016). Az egyetlen előttünk álló út a hatékonyság növelése, valamint a termelési kockázatok csökkentése. Ennek egyik talán legfontosabb eszköze a digitalizáció, azaz az informatikai forradalom, amely már sok szektorban lezajlott és most zajlik a mezőgazdaságban (HERDON et al., 2015). Az agrárvállalkozások egyre nagyobb mértékben kihasználják az információs rendszerek által nyújtott lehetőségeket más területeken is, mint például a vállalati kontrolling tevékenység alkalmazása (HÁGEN és KONDOROSINÉ, 2012).

Termőhelyünk megismerési folyamata, azaz a digitalizáció nyújtotta adatfeldolgozási és adathasználati előnyök figyelembevételével kialakított irányítási rendszere 5 folyamat egységeként működik (POPP et al., 2018):

- **Adatfelvételezés:** a táblára, táblarészekre vonatkozó adatok mérése és rögzítése;
- **Adatgyűjtés és tárolás:** az adott táblára, táblán belüli konkrét helyre vonatkozó adatok összegyűjtése;
- **Adatfeldolgozás:** hasznos információk szolgáltatása a döntéshozatal számára;
- **Döntéshozatal:** egyes műveletekre lebontott részletességgel határozza meg a termesztési technológiát, továbbá a talajművelés, a tápanyag-utánpótlás, a vetés és egyéb műveletek egyes részleteit, együtt a jellemző paraméterekkel és beállítási adatokkal;
- **Művelet elvégzése:** a döntéshozatal eredményének gyakorlati megvalósítása.

Manapság a precíziós gazdálkodás belépő szintje a centiméteres visszatérési pontossággal dolgozó automata kormányzás az erőgépekben, de rögtön a második helyen a traktor és a munkagép szabványos adatszeréjét leíró ISO 11783 szabvány szerinti megoldások állnak. Az ún. ISOBUS szabvány az AEF (Agricultural Industry Electronics Foundation) azaz egy nonprofit alapítvány kezelésében áll, amely lefedi majdnem a teljes mezőgépgyártó ipart, mert manapság már több mint 280 gyártó és intézmény dolgozik együtt (AEF HONLAP).

## 2.2. A digitális mezőgazdaság

A digitális gazdálkodás leírja a mezőgazdaság és a mezőgazdasági technika fejlődését a precíziós gazdálkodástól a kapcsolódó, tudásalapú gazdálkodási rendszerekig. A digitális gazdálkodás a precíziós gazdálkodás technológiáját használja, emellett intelligens hálózatokat és adatkezelési eszközöket is igénybe vesz. A digitális gazdálkodás célja az összes rendelkezésre álló információ és szakértelem felhasználása a fenntartható folyamatok automatizálására a mezőgazdaságban.

A precíziós gazdálkodás akkor kezdődött, amikor a GPS jeleket elérhetővé tették a nagyközönség számára. A precíziós gazdálkodás lehetővé teszi a járművezetést, valamint a helyspecifikus figyelést és ellenőrzést. A telematikával és az adatkezeléssel kombinálva a precíziós gazdálkodás javítja a műveletek pontosságát, és lehetővé teszi a terepi (vagy állományon belüli) variációk kezelését. A cél az, hogy minden növény (vagy állat) pontosan megkapja azt, amire szüksége van

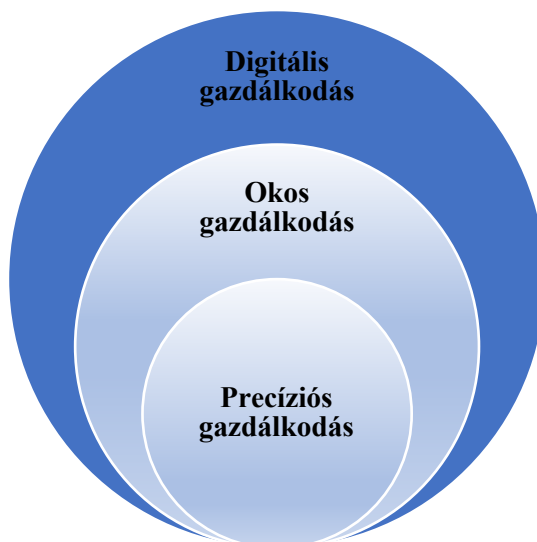
az optimális növekedéshez, azzal a céllal, hogy javítsa az agronómiai termelést, miközben csökkenti az inputot („többet hoz kevesebbel”).

A digitális gazdálkodás a mezőgazdaság minden területét lefedi. A dolgozatomban azonban a szántóföldi helyspecifikus növénytermesztésre kívánok elsősorban koncentrálni.

### 2.2.1. A Digitális Mezőgazdaság rendszerszemléletű megközelítése

A Digitális Mezőgazdaság még mindig fiatal koncepció. A szinonim kifejezése a Mezőgazdaság 4.0; az intelligens gazdálkodás, helyspecifikus növénytermesztés vagy a precíziós gazdálkodás, kifejezéseket evolúciónak kell tekinteni, ez utóbbi kifejezés egészen a 90-es években nyúlik vissza. Griepentrog (2017) az 1. ábrán ábrázolva a következők szerint teremt kapcsolatot a kategóriák között:

- A **Precíziós gazdálkodás** a helyspecifikus feldolgozásra összpontosít, amelyben a növekedési feltételeket érzékelők és alkalmazástechnika révén optimalizálják.
- Az **Intelligens** vagy **Okos gazdálkodás** hozzáadott szintű döntéstámogatást biztosít a fúzió és az információk elemzése révén.
- A **Digitális mezőgazdaság** vagy **Digitális gazdálkodás** (vagy a **Mezőgazdaság 4.0**) magában foglalja a tárgyak internetét (IoT), valamint a felhőalapú számítástechnikát (Cloud) és a nagyméretű adatok kezelését (Big Data).



1. ábra A Precíziós gazdálkodástól a Digitális gazdálkodásig (GRIEPENTROG, 2017 magyar felirattal)

Az automatizált kormányzási rendszerek, műtrágyák és növényvédő szerek helyspecifikusan célzott kijuttatása már nem a jövő technológiája. A terepi robotok, a drónok és a különféle elven működő talajelemző szenzorok okszerű használata után már az autonóm vezetés is megérkezett a mezőgazdasági gyakorlatba. A gazdatársadalom által feltett kérdés az, hogy a digitális technológiák egyre növekvő átvétele a mezőgazdaságban átok vagy áldás? Egy dolog biztos: a gazdasági potenciál hatalmas - és nem zárja ki az ökológiai előnyöket. A digitalizálás egyértelműen megteremti a feltételeket a sikeres mezőgazdasági gyakorlatokhoz. A **Mezőgazdaság 4.0** a digitális agrárgazdaság, szűkebb értelemben a precíziós mezőgazdaság, az információs és kommunikációs technológiák, a nagytömegű adatok gyűjtésére, feldolgozására alapuló döntéstámogatás, továbbá az automatizálás és a robotizáció egyre szorosabb összefonódását, illetve a termelés, az üzemirányítás, a termékpályák üzleti modelljeinek megváltozását eredményező technológiai és vezetés- irányítási reform összefoglaló neve (DAS, 2019).

A digitalizáció egyre gyorsuló ütemben növekszik a mezőgazdaságban. A digitális fejlődésre vonatkozó adatok magukért beszélnek, különösen a mezőgazdaság területén: 2015-ben a mezőgazdasági gépekkel létrehozott érték 30 %-a világszerte szoftverekből, elektronikából és érzékelőkből származott, háromszor meghaladja az autóiparban létrehozott értéket (GIESLER, 2018). A gazdálkodók és a környezet szempontjából elengedhetetlen, hogy a folyamatokat hozzáigazítsák a digitális technológiai koncepcióhoz, mivel az innovatív folyamatok potenciálisan eredményes, hatékony és erőforrás-barát fenntartható gazdálkodást eredményezhetnek. A digitális koncepció gyakorlati megvalósítása a 2. ábrán, a FENDT traktorok legújabb generációs FendtOne terminálján is beazonosítható.



2. ábra FendtOne terminál a kijuttatási tervvel, az elvégzett munkával és a munkagép vezérléssel

### 2.2.2. A mezőgazdasági technológia evolúciója

A mezőgazdasági gépek digitális termékei nem az utóbbi évek találmányai, néhányuk több mint 30 éves múltra tekint vissza (SCHMITZ, 2017). A digitálisan támogatott mezőgazdasági gépek a szántóföldön dolgoznak. A szenzortechnológia helyes és okszerű használatával a termőhelyek folyamatos vizsgálata során a mezőgazdasági termelők jobban megérthetik növényeiket, talajaikat miközben erőforrásokat takaríthatnak meg és csökkenthetik a környezetre gyakorolt hatásokat (HORVÁTH és SCHMITZ, 2019).

Az Európai Mezőgépgyártók Szövetsége a következőképp adja meg az evolúció mérföldköveit (CEMA, 2017):

#### 1. Mezőgazdaság 1.0:

A XX. század elejének állapota. Munkaintenzív mezőgazdaság alacsony produktivitással. Képes volt ellátni a lakosságot élelmiszerrel, de ehhez nagyon nagyszámú, kisméretű gazdaság volt szükséges, amelynek működtetése a lakosság egyharmadát igényelte.

#### 2. Mezőgazdaság 2.0:

A Zöld Forradalomnak nevezett fázis, amely az ötvenes évek végén kezdődött. Ekkor a mezőgazdasági gyakorlatban megjelent a „plusz” nitrogén és egyéb új szintetikus anyagok, mint a műtrágyák, a növényvédő szerek, valamint a sokkal hatékonyabb speciális gépek, amelyek relatív olcsó inputként jelentkeztek, és amelyek által drámaian megnövekedett a termelési potenciál és termelékenység. A Zöld Forradalommal, mint a digitalizáció egyik katalizátorával az 1.2.1. fejezetben részletesebben is foglalkoztam.

### 3. Mezőgazdaság 3.0:

A Precíziós Gazdálkodás a helymeghatározási technológia polgári célú felszabadításával meg tudott jelenni. Az elérhető megoldások:

- Iránytartás (automatikus kormányzás): az 1990-es években a GPS jeleket a manuális iránytartásra használták. A technológia fejlődésének eredményeként a légi permetezésnél jelent meg. Az első automatikus kormányzás a 90-es évek végén valósult meg. A 2000-es évek során az iránytartás pontossága elérte az 1 cm-t.
- Érzékelés és szabályzás: az 1990-es években a gabona betakarító gépekbe építettek terménymennyiség monitort, amelyek a GPS helymeghatározáson alapultak. Az első változó mennyiségű kijuttatás (VRT) szintén ezekben az években indult. Az első években a VRT alkalmazás talajminta vételezésen alapult, elterjedését viszont a termésmennyiség adatok on-the-go érzékelése gyorsította fel.
- Telemetria/távérzékelés: A telemetria technológiája a járműpark megfigyelésén alapul. Ez az eljárás a 2000-es évek elején tűnt fel a szállítási feladatok igénye alapján. A módszer alapja a hálózati technológia, amelynek segítségével a gazdaságok logisztikai folyamatai optimalizálhatók.
- Adatfeldolgozás: A mezőgazdasági farmok
  - térképi adatbázisának kezelésére szolgáló térinformatikai szoftvere (GIS) és
  - a menedzsment feladatait támogató szoftvere (FMIS) a 80-as évek elején a személyi számítógépek megszületésével vált széleskörűen használhatóvá.

A precíziós gazdálkodás a műveletek pontos végzését teszi lehetővé, a táblán belüli változások követését a táblaszintű beállítások helyett, illetve az állati egyedek kezelését a teljes állomány helyett. A cél az egyes növényi egyedek optimális fejlődéséhez szükséges igények kielégítése, vagyis az agronómiai teljesítmény optimalizálása a ráfordítások csökkentésével („többet kevesebb” elv). A Mezőgazdaság 3.0 tulajdonképpen a precíziós gazdálkodási technológiák által elérhető előnyök fokozatos megvalósítása. A célkitűzés a hatékonyság általi költségsökkentéstől elmozdulni a profitabilitás irányába, amely a tárgyilagos és kreatív eljárások által megvalósítható alacsonyabb költségek és jobb minőség vagy az új különféle termékek kifejlesztésében nyilvánul meg. Az intelligens megoldások megjelenése a kulcskérdés.





### 4. Mezőgazdaság 4.0:

A precíziós mezőgazdaság jelentősége a 2010-es évek elején felerősödött, köszönhetően egyes technológiai elemek fokozott fejlődésének:

- Olcsó és fejlett szenzorok
- Alacsony költségű mikroprocesszorok
- Szélessávú hálózati kommunikáció
- Felhő alapú infó-kommunikációs technológia (ICT) rendszerek
- Big Data (adat dömpling) analitikák

A 3. ábrán összefoglalva láthatók a mezőgazdasági technológia evolúciós lépései:



1.0 „Munkaintenzív”	2.0 „Zöld forradalom”	3.0 „Precíziós gazdálkodás”	4.0 „Smart farming”
			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Munkaintenzív mezőgazdaság alacsony produktivitással</li> <li>• Képes volt ellátni a lakosságot élelmiszerekkel, de a működtetése a lakosság egyharmadát igényelte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Megjelentek a műtrágyák, a növényvédő szerek, valamint a sokkal hatékonyabb speciális gépek, amelyek relatív olcsó inputként jelentkeztek, és amelyek által drámaian megnövekedett a termelékenység</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A precíziós gazdálkodás a műveletek pontos végzését teszi lehetővé, a táblán belüli változások követését a táblaszintű beállítások helyett, illetve az állati egyedek kezelését a teljes állomány helyett.</li> <li>• Automatikus kormányzás, pontossága elérte az 1 cm-t.</li> <li>• Érzékelés és szabályzás, betakarítás termésmennyiség mérése, változó mennyiségű kijuttatás (VRT).</li> <li>• Telemetria/távérzékelés, a gazdaságok logisztikai folyamatai optimalizálása.</li> <li>• Adatfeldolgozás</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A Mezőgazdaság 4.0 a mezőgazdasági műveletek külső és belső hálózati integrációján alapul</li> <li>• Felhő szolgáltatások lehetővé teszik a nagy mennyiségű adatok feldolgozását</li> <li>• okos technológiák szinte szabványként jelentek meg a traktorokon, betakarító gépeken és egyéb eszközökön</li> <li>• Olcsó és fejlett szenzorok</li> <li>• Felhő alapú szolgáltatások</li> <li>• Big data analitikák</li> <li>• Új algoritmusok amelyek az adatokat értékes információvá alakítják, hogy optimalizálják a terméket és a termelési folyamatot</li> </ul>

3. ábra A mezőgazdaság technológiai evolúciója (DAS, 2019)

Világszerte nagy kihívást jelent az a sajátosság, hogy az evolúciós fázisokból az utolsó három gyakran egyszerre van jelen a növénytermesztésben. Ez azt jelenti, hogy például Európában a legújabb technológia mindenhol elérhető, csak a felhasználó pénztárcája szab határt a használatának. Másfelől egy török farmer a kabin nélküli egyszerű 30 kW-os erőgéppel nem gondolkozhat differenciált vetés használatán.

A 2010-es években az okos technológiák szinte szabványként jelentek meg a traktorokon, betakarító gépeken és egyéb eszközökön (CEMA, 2017):

- Okos szabályzású műszerek (fedélzeti számítógépek).
- Nagyszámú szenzor a gépüzemeltetésben és a termelési műveletekben.
- Előnyös automatizálási képességek (kormányzás, mag elhelyezés, permetezés).
- Járművekbe beépített kommunikációs technológia (telematika).

További megoldások is bevezetésre kerültek (CEMA, 2017):

- Új algoritmusokkal működő, nem fizikai szolgáltatásokat fejlesztettek ki, amelyek az adatokat értékes információvá alakítják annak érdekében, hogy optimalizálják a terméket és a termelési folyamatot, csökkentsék a veszélyeket, limitálják a külső káros hatásokat, mint a gépmeghibásodás, az időjárás problémák, a betegségek.
- Létrejötték olyan mezőgazdasági ökoszisztémák, amelyek képesek a különböző forrásokból (táblán/gazdaságban működő szenzorok vagy eszközök, ill. külső források) származó adatok kombinálására. A gazdálkodók a műszerfalon keresztül valós vagy majdnem valós időben hozzájutnak az információkhoz, és ezáltal képesek minőségi döntést hozni a pénzügyi eredmények növelése érdekében.
- A különböző mezőgazdasági és élelmiszeripari résztvevők közötti kooperáció. Az élelmiszerlánc ellátásában érdekelt ökoszisztémák résztvevői közötti kapcsolat alapját a digitális adatok jelentik. Azonos adathalmaz alapján a szolgáltatók eltérő szolgáltatást ajánlanak a különböző résztvevőknek.

Ezen vívmányok eredményeként, a mezőgazdasági gép nemcsak egy eleme a komplett termelési rendszernek, hanem a kitüntetett elemévé vált. Nemcsak a legnagyobb adatgeneráló, hanem

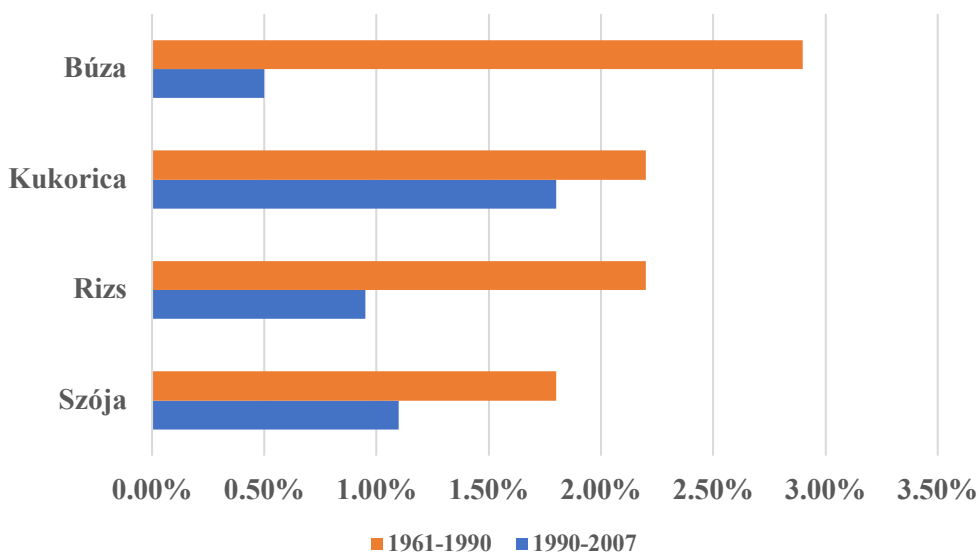
megvalósítója is az adatplatformok és agronómiai modellek által generált kijuttatási terveknek és előírásoknak a kijuttatási terveknek (CEMA, 2017).

Mezőgazdaság 4.0 a digitális agrárgazdaság, szűkebb értelemben a precíziós mezőgazdaság, az információs és kommunikációs technológiák, a nagytömegű adatok gyűjtésére, feldolgozására alapuló döntéstámogatás, továbbá az automatizálás és a robotizáció egyre szorosabb összefonódását, illetve a termelés, az üzemirányítás, a termékpályák üzleti modelljeinek megváltozását eredményező technológiai és vezetés- irányítási reform összefoglaló neve (DAS, 2019).

### 2.2.3. Miért van szükség digitalizációra a szántóföldi növénytermesztésben?

A világ mezőgazdaságában a 2. világháborút követő évtizedekben zajlott le az úgynevezett „zöld forradalom”, ami számos kutatás-fejlesztési erőfeszítésnek és oktatási (technológiai transzfer) programnak köszönheti a kibontakozását (HESSER, 2006). A zöld forradalom egyrészt a természet- és műszaki tudományokban, másrészt a gazdálkodásban és a vezetési módszerekben kereste a megoldást a termelékenység problémájára. Hibrid vetőmagokat fejlesztettek ki, modern eszközöket és infrastruktúrát alkalmaztak, szorgalmazták a szintetikus műtrágyák és növényvédő szerek használatát. Gazdálkodási és vezetési szempontból „fordista” átalakulásról volt szó: a munkaszervezésben, az irányításban, az adminisztrációban modern megoldásokat és rendszereket kell alkalmazni, hasonló módon, ahogy az ipari vállalatoknál történik (BÖGEL, 2018).

A zöld forradalom eredményessége jól látszik a terméshozamok növekedésében az 1960-tól 1990-ig tartó periódusban, ami a tudományban és a gazdálkodásban bekövetkezett változások „aratási időszakának” tekinthető. A The Economist a terméshozamok témájával foglalkozó cikkében szereplő grafikonjából készített 4. ábrából ugyanakkor az is kiderül, hogy a kilencvenes években és az új évezred elején a növekedés lendülete megtört, a legfontosabb termények esetében határozott visszaesés tapasztalható. Feltételezhető, hogy gazdálkodási szempontból a csökkenő hozadék törvényének érvényesüléséről van szó: a felhasznált inputok és gazdálkodási módszerek segítségével növelni lehetett a hozamokat és a termelékenységet, de nem minden határon túl, és egyre több környezeti kárt okozva. Sajátos helyzet alakult tehát ki: miközben sok fejlődő országban különböző okokból a zöld forradalom által kínált előnyöket még ma sem tudják kihasználni, új megoldásokat kellett találni a szükséges (fenntartható) növekedés biztosítására (THE ECONOMIST, 2011).



4. ábra A globális termésmennyiség éves növekedési rátája a fontosabb termények esetében (THE ECONOMIST, 2011 magyar felirattal)

A lehetséges új megoldások egyike a mezőgazdaság digitális transzformációja, vagyis az adatok, információk informatikai alapokra való helyezése (BŐGEL, 2018). A digitalizáció miatt az agrárüzemeltetés paradigmaváltásának elején vagyunk. A digitális mezőgazdaság kulcsnak tekinthető e kihívás leküzdésében.

A digitalizáció fontosságát Magyarország Kormánya is felismerte és a Digitális Jólét Program (DJP) keretében elkészült Magyarország Digitális Agrár Stratégiája 2019-2022 (DAS) nevű dokumentum. A dokumentum célja, hogy az információk gyűjtésével, feldolgozásával, a technológiai műveletek automatizálásával és robotizálásával hozzájáruljon a mezőgazdasági termelés jövedelmezőségének növeléséhez a rendelkezésre álló környezeti erőforrások hatékony felhasználása mellett (DAS, 2019).

### 2.3. A precíziós növénytermesztés technikai háttere

#### 2.3.1. Helymeghatározás és navigáció

A térbeli változatosságot figyelembe vevő művelésmódot csak akkor lehet megvalósítani, ha megfelelő helymeghatározó rendszer is rendelkezésre áll. A lézer, mikrohullám, illetve rádióhullámok alkalmazásával végzett kísérletek után a Globális műholdas helymeghatározó rendszer (GPS) megjelenése volt kiemelt jelentőségű az 1990-es években (STAFFORD és AMBLER, 1994).

A rendszer használatának elterjedését nagyban elősegítette, hogy Bill Clinton 2000-ben megszüntette a polgári felhasználású kód további zavarását, az úgynevezett Selective Availability technikát, így a valós idejű helymeghatározás pontossága 20 m körülire csökkent (TAMÁS, 2002). A műholdas helymeghatározás adott időközönként meghatározza az aktuális pozíciót és lehetővé teszi a terület térbeli változékonyságának rögzítését, ezáltal a mezőgazdasági táblákról a korábbiaknál sokkal részletesebb adatbázis állítható elő (NEMÉNYI ET AL., 2003).

A globális műholdas helymeghatározó rendszereket a 2000-es évektől összefoglaló néven GNSS-nek (Global Navigation Satellite System) nevezzük, mely gyűjtőnévként magába foglalja valamennyi műholdrendszert (GPS, GLONAS, GALILEO, BEIDU, stb.). Ezekre a GNSS-re épülő korrekciós szolgáltatások használata tette általánossá a műholdas helymeghatározást és a járművek navigációját (ÁDÁM, 2007).

Általánosságban elmondható, hogy csak a valamely GNSS-t használó rendszerek méteres pontosságú helymeghatározást és irányítást tesznek lehetővé. A helymeghatározás pontatlansága a következőkre vezethető vissza:

- műhold időmérésének a csúszása,
- műholdvevő időmérésének a csúszása,
- az ionoszférában található töltött részecskék miatt késedelem
- a műholdak röppályáinak eltérései,
- a troposzférában lévő víz (felhő, csapadék) miatti késedelem,
- a (tereptárgyakról) visszaverődő jelek (multipath error avagy többutas jelterjedés),
- a műholdvevő (receiver) technikai zaja,

A zavarok eredője az ún. UERE (User Equivalent Range Error) amely saját tapasztalat alapján elérheti a 10 métert is. Mezőgazdasági felhasználásra ez a jelponosság nem elegendő ezért **korrekciós jeleket** kell használni. Ilyenkor DGPS rendszerekről beszélünk.

Milics és Tamás szerint a helymeghatározás pontossága több tényezőtől függ: az eszköztől (jelvevő), a vevő által „látott” műholdak számától, a mérési módszertől és az alkalmazott korrekciós jelektől. Ezért a hétköznapi életben használt, néhány méter pontosságú navigációs

GNSS a helyspecifikus gazdálkodásban nagyon korlátozottan használható (MILICS és TAMÁS, 2007). Minden korrekció alapja az, hogy több, fix pontra telepített jelvevő, pontosan „ismeri” a saját pozícióját, és megkapja ugyanazt a zavaró tényezők miatt pontatlan jelet, mint az autókban, traktorunkban, vagy más eszközünkben használt GPS. Így a fix ponton lévő vevő meg tudja állapítani az adott pillanatban lévő hiba mértékét és irányát, melyet közölnie kell a területen mozgó egységgel. Elmondható, hogy a korrekciós jelek költsége a jelek pontosságával egyenes arányban növekszik.

A növénytermesztésben általánosan használt korrekciós jelek fajtái forrás szerint:

- Műholdról érkező korrekciós jelforrás: ilyen megoldást nyújtanak az SBAS szignálok, mint Európában az EGNOS, az OmniStar, a JD SF-1 és a JD SF-2, Trimble Centerpoint RTX, Novatel Terrastar-C korrekciós jelek.
- Rádióhullámon érkező RTK korrekciós jelforrás - viszonylag szűk körzetben (10-15 km) hasonló pontosság érhető el saját RTK-bázisállomás használatával is.
- Interneten érkező korrekciós jelforrás azaz NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol). Ilyen szolgáltatást nyújt a gazdálkodók számára Magyarországon a Földmérési és Távérzékelési Intézet GNSSnet.hu hálózata (FarmRTK), a Geotrade GNSS, az AXIÁL mAXI-NET 2.0, valamint az Agromatic RTK-mindenkiNET és AgroVRS rendszere.

Pontossági osztály ismételhetőség szerint:

- Dinamikus pontosság: a műholdvevő jeltartása 15 percen belül. Jellemzően a műholdról származó szubméteres korrekciós jelek ilyenek (pld. EGNOS). Akkor használjuk, ha a cél az, hogy abban a pillanatban egyenesben menjen az erőgép.
- Statikus pontosság vagy visszatérési pontosság: amikor a műholdvevő napon túl is visszatér ugyanarra a pozícióra pontossági osztályának megfelelően. A nagy pontosságú (RTK) helymeghatározó rendszerrel felszerelt munkagépek évről évre néhány cm pontosan ugyanazt a nyomvonalat tudják végigjárni (NAGY, 2012).

A korrekciós jeleket pontossági osztályokba soroljuk:

- Subméter (SM) – pontosság  $\pm 15-30$ cm
- Deciméter (DM) – pontosság  $\pm 10$ cm
- Centiméter (CM vagy RTK) - pontosság  $\pm 2$  cm. Alapfeltétele a precíziós gazdálkodásnak. Több művelet, például vetés, műtrágyaszórás, permetezés, ugyanazon művelőutak hosszútávú használata (Controlled Traffic Farming – CTF) esetén elengedhetetlen a néhány centiméteres pontosság, ami a valós idejű kinematikus (RTK) rendszerek alkalmazásával érhető el.

A korrekciós jeleket összefoglalóan az 5. ábrán mutatom be:

	SBAS (EGNOS)	TerraStar-L	RangePoint RTX	CenterPoint RTX	TerraStar-C	RTK NTRIP RTK Radio
<u>Pontossági osztály</u>	SM	SM	SM	DM	DM	CM (RTK)
<u>Dinamikus pontosság</u>	±20-30cm	±15 cm	±15 cm	±4cm	±4cm	±2cm
<u>Statikus pontosság</u>	±150cm	±50 cm	±50 cm	±4cm	±4cm	±2cm

5. ábra Korrekciós jelek osztályba sorolása

Megjegyzések:

- Könnyen belátható, hogy akkor gazdálkodunk precízen (helyspecifikusan) ha időkorlát nélkül vissza tudunk találni egy pozícióra. Ezért a precíziós gazdálkodás mindig az RTK statikus pontosságú automata kormányzás használatával kezdődik.
- A pontosság (érvényesség, validitás) és a precizitás (megbízhatóság) két ellentmondó, egymást kiegészítő fogalom a metrológiában. A pontosság valódi értéktől való eltérés, a precizitás pedig a jel szórása.

### 2.3.2. Telemetria, gépüzemeltetés

A precíziós gazdálkodásban a nagy értékű erő- és munkagépek megfelelő üzemeltetése is fontos feladat. A pozíció-alapú flottakövetés segítségével ellenőrizhető a gépek útvonala. Az erőgépek CAN (Controller Area Network) rendszeréről számos fontos üzemeltetési jellemző gyűjthető akár menet közben, online. Ilyen például gépterheltség, munkasebesség, motorterhelés, fordulatszám, kerékcsúszás és üzemanyag-fogyasztás. Betakarítógépek esetén ezek kiegészülhetnek a cséplési hézag és a cséplési fordulatszám, permetezőknél a permetezési idő és nyomás adataival. Az adatokból napi, havi, szezonális vagy éves jelentések készíthetők, melyek hasznos információt szolgáltatnak a szervizeléshez, a gépüzemeltetés optimalizálásához és a hatékony munkaszervezéshez. Az adatok felhasználhatók a karbantartási ütemterv összeállításához, a gépek összehasonlításához, a gépek kihasználtsága és az állásidők vizsgálatához, valamint a munkafegyelem ellenőrzésére.

A telemetria rendszerek lehetővé teszik, hogy a gazdálkodó vagy a szaktanácsadó bármikor távolról is ellenőrizhesse a gépek üzemelési adatait telefonon, táblagépen vagy irodai számítógépen keresztül. A közel valós időben észlelt problémákról és a javasolt beállításokról a vezető a monitoron keresztül azonnal értesíthető. A távdiagnosztika segítségével már az irodából felmérhető, hogy mi okozza az esetleges meghibásodást, így a szervizes célirányosan, az adott problémára felkészülten érkezik a helyszínre, ezáltal csökkenthető a munkából kieső idő.

Ilyen funkciókat lát el a John Deere JDLink rendszere, az AGCO (FENDT, MF, Valtra) AgcoConnect rendszere, valamint a CLAAS Telematics rendszere.

### 2.3.3. Térinformatika

A térinformatika magában foglalja a térbeli adatok gyűjtését, kezelését, elemzését és megjelenítését. A helyspecifikus adatok kezelése, a különböző adatrétegek (pl. tápanyag-ellátottság és hozam) közötti összefüggések vizsgálata, a hozam- és profitterképek, valamint kijuttatási tervek készítése térinformatikai módszerekkel és speciális programokkal (GIS) történő

adatkezelést és feldolgozást kíván (SZABÓ et al., 2007). Tamás (2002) szerint információtechnológiai értelemben a precíziós mezőgazdaság alkalmazott térinformatikaként fogható fel. Ezzel összhangban Stombaugh et al. (2001) egy térinformatikai program beszerzését a precíziós növénytermesztés bevezetésének első és legfontosabb lépéseként említi.

Folyamatos adatrögzítés során akár másodpercenként történik adatgyűjtés koordinátára rendezve. A pontok összekötésével visszakövethető az erőgép megtett útja. A pontszerűen felvételezett adatok (pl. talajmintavétel) esetén a jelenség térbeli folyamatosságának leírásához szükség van a mért adatok közti interpolációra is. Ezt leggyakrabban a távolságokkal fordított súlyozásos (IDW) vagy a krigeléses interpolációval végzik, a módszer választása függ a vizsgált adatok változékonyságától (SZABÓ et al., 2007). A mai térinformatikai programok általában az interpolációs módszereket beépített modulként tartalmazzák, de az eredmények értékeléséhez megfelelő szaktudásra van szükség.

Az adatrétegek közti elemzés és ezek alapján a beavatkozási tervek elkészítése térbeli statisztikai és modellezési feladatokat igényel. Egyre több olyan GIS típusú alkalmazás jelenik meg a piacon, amellyel a gazdálkodó maga is megtervezheti a talajvizsgáló útvonalat, elkészítheti az elemzést és a kijuttatási térképet, kiértékelheti a hozamtérképet, azonban a gazdálkodók – szaktudás hiányában – sokszor inkább szolgáltatásként veszik igénybe a térinformatikai elemzéseket.

Mindezekből megállapítható, hogy a precíziós gazdálkodás olyan szakterület, amely komplex és multidiszciplináris tudást igényel hiszen az ezzel foglalkozni kívánó szakembernek:

- rendelkeznie kell agronómiai ismeretekkel,
- ismernie kell a használatban lévő erő- és munkagépek technológiai lehetőségeit,
- térinformatikai ismeretekkel kell rendelkezzen, készség szinten használnia kell egy GIS szoftvert.

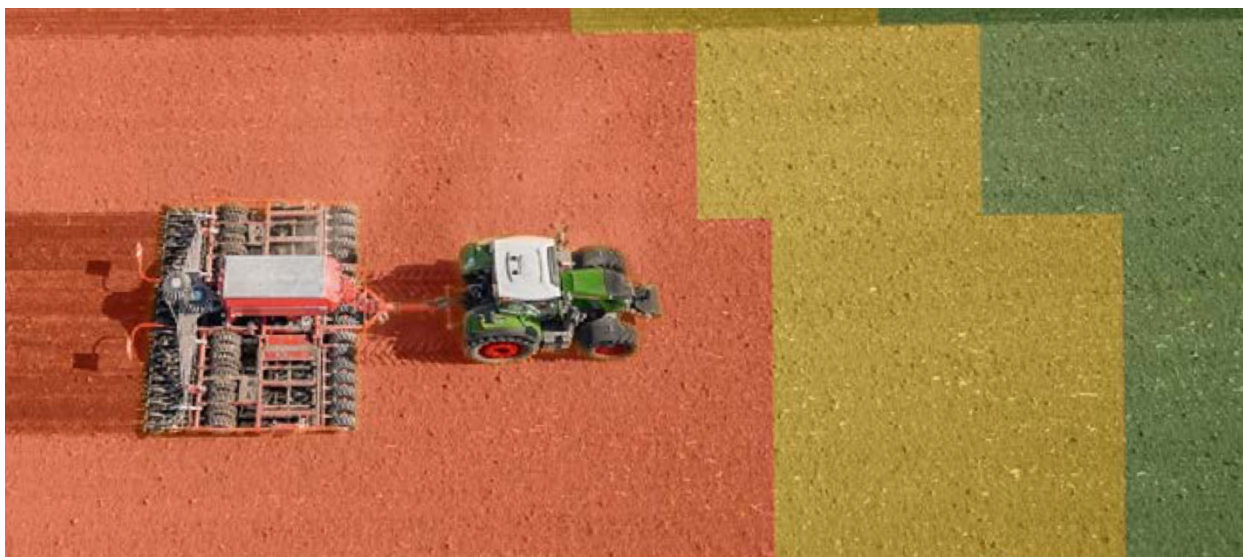
Ha ez a komplex tudás és a GIS eszköz rendelkezésre áll akkor már „csak” releváns térinformatikai adatbázisra van szüksége a szakembernek, hogy következtetéseket tudjon levonni. Térinformatikai adatbázisra kétféle módon lehet szert tenni

- a saját adatokat szisztematikusan gyűjtve fel lehet építeni a saját adatbázist, amely egy viszonylag hosszú ideig tartó folyamat vagy
- külső adat szolgáltatótól kell megvásárolni, amelynek viszont költsége van.

Mindkét módszer erőforrásigényes, ezért észszerűen szükséges a térinformatikai adatok gyűjtése akkor is, ha éppen akkor még nem kíván az adatokkal dolgozni a gazdálkodó. Így amikor szükség lesz az adatokra, mert helyspecifikusan akar dolgozni, akkor azok rendelkezésére fognak állni.

#### *2.3.4. A változékonyság kezelése*

A hagyományos gazdálkodás a mezőgazdasági táblát egy egységként veszi figyelembe és azon homogén kezeléseket valósít meg, így nem minden terület kapja az optimális kezelést, például tápanyagutánpótlás esetén lesznek túl-, illetve alul dozírozott területek. A precíziós gazdálkodás célja a táblán belüli heterogenitások feltérképezése, mint az a 6. ábrán látható, és az ennek megfelelő agrotechnikai beavatkozások elvégzése. A módszer azokon a területeken hatékony, ahol a táblán belüli eltérések jelentősek.



6. ábra A megművelt terület változékonyság (FENDT SMART FARMING)

A tervezett kezelés szempontjából homogén területet menedzsmentzónának, művelési zónának vagy résztáblának (part field) nevezi a szakirodalom. A menedzsmentzónák száma és elhelyezkedése a különböző agrotechnikai folyamatok, valamint az évek során jellemzően eltér, lehatárolásukra pedig többféle módszer alkalmazható. A hozamterkép általában jó indikátor a talajtulajdonságokkal és tápanyag-ellátottsággal kapcsolatban, használhatók hagyományos légi felvételek, multispektrális felvételek, a tervezett kezelésnek megfelelő terepi (pl. gyom) felvételezések, valamint a gazdálkodók tapasztalatai (ZHANG et al., 2010). Sok esetben – például belvízre hajlamos vagy talajerózióknak kitett tábláknál – fontos a domborzat figyelembevétele is.

A kezelési egységek mérete függ:

- a vizsgált adatok változékonyságától,
- az adatfelvételezés pontosságától,
- a munkagép jellemzőitől (művelési szélesség, kijuttató egységek osztása).

A differenciált kijuttatási technológia (VRT) során menet közben lehet módosítani a kijuttatott anyagok mennyiségét (dózisát) és/vagy összetételét. Egyaránt használható műtrágya, növényvédő szer, vetőmag, de akár öntözővíz kijuttatása esetén. Régebben a traktor kezelője a traktor terminálján látta, hogy mikor kell nyitni vagy zárni az adott szakaszt. Manapság már a fedélzeti számítógép automatikusan végzi a kijuttatás mennyiségi vezérlését térkép (előíró térkép - prescription map) alapján. Ilyenkor az RTK pontos automata kormányzással üzemelő erőgép számítógépe folyamatosan figyeli és meghatározza a munkagép kijuttató elemeinek helyzetét a táblán belül és a betáplált kijuttatási terv alapján módosítja az adott táblarészre megadott kijuttatási mennyiséget, mint ahogyan ennek a gyakorlati megvalósulását látjuk a 7. ábrán egy Fendt traktor FendtOne terminálján.



7. ábra Differenciált kijuttatás vezérlése egy Fendt traktor FendtOne terminálján

Az utóbbi évek új kihívása a több applikációs térkép egyidejű kezelése, például változó tőszámú vetés mellett a starter műtrágya kijuttatása egy menetben.

### 2.3.5. Vezérlési technikák

Az ISO 11783 szabvány elterjedése jelentősen segítette a precíziós gazdálkodást, mert lehetővé teszi a különböző szenzorok, az adatfeldolgozó és vezérlőegységek közötti szabványos adatcserét. Lehetővé teszi, hogy egyetlen univerzális terminállal megoldható legyen bármelyik gyártó ISOBUS-t támogató eszközének ellenőrzése és vezérlése. A felhasználó egy gombnyomással kiválaszthatja, hogy a terminálon a munkagép vagy valamelyik eszköz (vetőgép, permetező, műtrágyaszóró) kezelőfelületét szeretné látni. Az ISOBUS-hálózat alkalmazásával nemcsak adatok, hanem vezérlőjelek is érkehetnek a munkagépről a traktor számára.

Minden precíziós agrotechnika magában foglalja az adatgyűjtés, a feldolgozás és a helyspecifikus terepi beavatkozás folyamatát. Aszerint, hogy ezek a folyamatok időben és eszközrendszerükben együtt vagy elkülönülten valósulnak meg, két típus különböztethető meg (KUROLI et al., 2007; ZHANG et al., 2010; REISINGER, 2012):

- **Offline azaz térképi adatbázison alapuló vezérlés**, precíziós gazdálkodás esetén az adatgyűjtés, az adatok feldolgozása és a beavatkozás elvégzése elkülönülten történik. Ilyen például a talajmintavételezés alapján kidolgozott tápanyag-utánpótlási terv készítése, a kijuttatási terv betáplálása a fedélzeti számítógépbe, majd az alapján a helyspecifikus trágyázás megvalósítása. Ez esetben az adatok feldolgozására, esetleges korrekciók elvégzésére több idő áll rendelkezésre.
- **Online azaz valós idejű (szenzoralapú, menet közbeni, azaz on-the-go) vezérlés** alkalmazása esetén az adatgyűjtés, a feldolgozás és a beavatkozás (szinte) egyszerre történik. Ilyenkor az erőgépre szerelt szenzor adata alapján a fedélzeti számítógép vagy a szenzorba épített önálló számítógép azonnal kiértékeli az adatokat és megtörténik a beavatkozás. Példaként említhető a NDVI növény szenzorok alkalmazásával végzett N-trágyázás vagy gyomirtás.

Minden művelet során a rendszer rögzíti a kijuttatott anyagok mennyiségét is az adott pozíciókhoz rendelt, így térinformatikai alapokon a tervezett (prescription map) és a ténylegesen kijuttatott (as-applied map) mennyiség letárolható és a későbbiekben összehasonlítható, ellenőrizhető.

### 2.3.6. Szenzorok, távérzékelés

A precíziós technológia leggyorsabban fejlődő ága a különböző szenzorokkal (érzékelőkkel) történő helyspecifikus adatgyűjtés. A szenzorok terén nagyon dinamikus a fejlődés. Mivel a

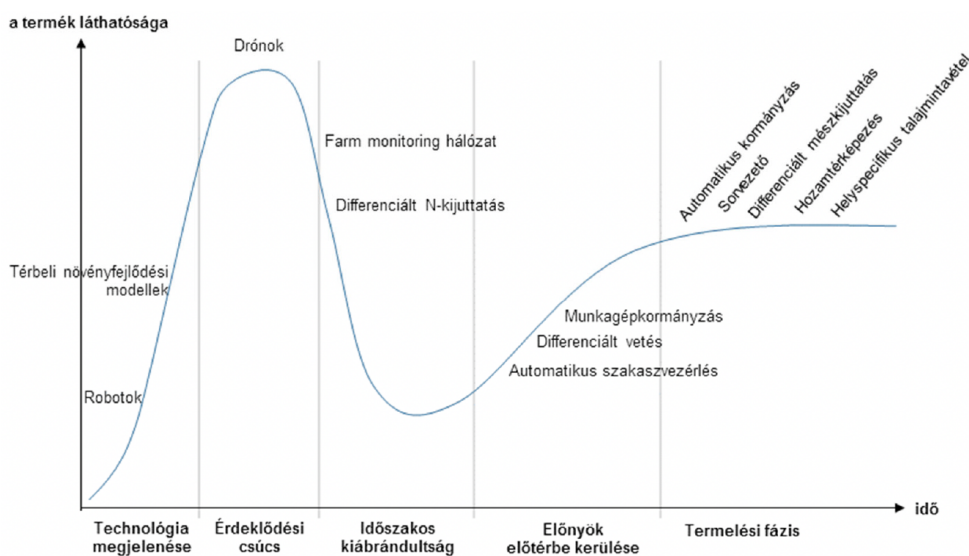


dolgozatom későbbi fejezeteiben részletesen foglalkozom a szenzoralapú méréstechnológiával, a témakört itt csak megemlítem.

## 2.4. Helyzetelemzés és kitekintés

### 2.4.1. A precíziós technológia mint innováció

Az innovációk elterjedése kapcsán gyakran használják a Gartner-féle hiperciklus görbét. Egy új technológia megjelenése általában fokozott érdeklődéssel jár, majd a gyakran túlzott elvárások miatt az érdeklődési csúcstól szinte törvényszerűen egy időszakos kiábrándultság következik. A technológia finomítása után annak alkalmazhatósága javul, a kockázatok helyett az előnyök kerülnek előtérbe, ami a termelésben való elterjedéséhez vezet. A precíziós mezőgazdaság elemeit (BLACKMORE, 2016) a 8. ábra szerint helyezi el a görbén.

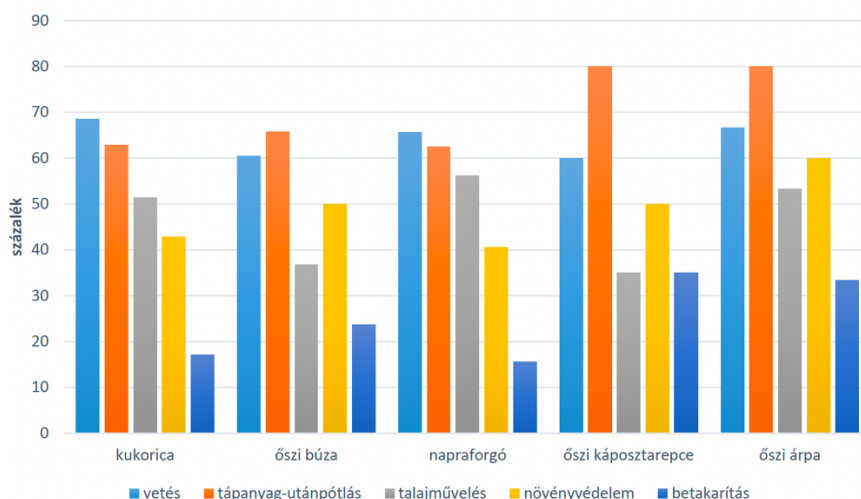


8. ábra A precíziós technológiák helye a Gartner-féle hiperciklus görbén (BLACKMORE, 2016; GAÁL et al., 2017)

A jármű-navigáció, a hozamtérképezés és a helyspecifikus talajmintavétel már elfogadottnak tekinthető a gyakorlatban, a munkagépkormányzás, a differenciált vetés és az automatikus szakaszvezérlés is egyre terjed. Az érdeklődési csúcson jelenleg a drónok állnak, a kutatók pedig a robotok fejlesztésére, valamint a növényfejlődési modellek integrációs lehetőségeire fókuszálnak (GAÁL et al., 2017).

### 2.4.2. A precíziós technológiák elterjedése Magyarországon

Az Agrárgazdasági Kutató Intézet (most Agrárközgazdasági Intézet) reprezentatív mintán elvégzett kérdőíves felmérése alapján (GAÁL et al., 2017) készített egy összefoglalást amelynek grafikus összegzését a 9. ábra mutatja be.



9. ábra Az alkalmazott precíziós technológiai elemek aránya a főbb növénykultúrákban (GAÁL et al., 2017)

Elmondható, hogy Magyarországon a precíziós technológia alkalmazása a tápanyag utánpótlásban és a vetésben volt a legjellemzőbb. Előbbi esetében a vizsgálatban részt vett gazdaságok átlagosan 70,2 %-a, míg utóbbinál 64,3 %-a használt valamilyen precíziós elemet. Az alkalmazás gyakorisága tekintetében sorrendben a következő elem a növényvédelem (48,7%) és a talajművelés (46,6%) volt, a legkevésbé gyakorinak pedig a precíziós betakarítás bizonyult, a kitöltők egynegyede végzett mindössze precíziós tevékenységet a betakarítás során (GAÁL et al., 2017).

#### 2.4.3. Nemzetközi kitekintés

A precíziós gazdálkodás elterjedtsége nem egyforma a világon. Az elterjedését egyaránt befolyásolják a társadalmi-gazdasági tényezők, az agroökológiai adottságok, technológiai, szervezeti és emberi tényezők, valamint a rendelkezésre álló információk. Általában a nagyobb területtel rendelkező, fiatal, magasabb iskolai végzettségű, tőkeerős mezőgazdasági termelők alkalmazzák szívesen az új technológiákat.

A precíziós gazdálkodás elsőként az USA-ban, Európában és Ausztráliában terjedt el, majd Argentínában, Braziliában és néhány ázsiai országban is elfogadottá vált (FOUNTAS et al., 2005). Jelenleg az USA piaci részesedése a legnagyobb, - közel 50 % (BUSINESS INTELLIGENCE AND STRATEGY RESEARCH, 2015) - ahol a magas munkaerőköltség is ösztönzi a technológia terjedését. Azonban itt a legnagyobb az állami támogatottsága is, az USA mezőgazdasági minisztériuma (USDA), a Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal (NASA) és a Nemzeti Óceáni és Légköri Hivatal (NOAA) is hozzájárul a nagyüzemi precíziós gazdálkodás terjedéséhez (TECHNAVIO, 2015).

Amerikában a technológiák közül kezdetben a hozamtérképezés és a differenciált műtrágya kijuttatás volt a leginkább elterjedt, jelenleg az automatikus kormányzás a legnagyobb piaci részesedés. A szója- és kukoricatermesztők már 2006-ban a területek több mint 40 %-án végeztek hozamtérképezést, differenciált kijuttatást pedig 8, illetve 12 %-os arányban alkalmaztak. Őszi búza esetén 2009-ben a területek 35 %-án végeztek hozamtérképezést és 14 %-án differenciált kijuttatást (SCHIMMELPFENNING és EBEL, 2011). A precíziós technológiák használata azonban más növényeknél is elterjedt. Az USDA adatai szerint 2013-ban a rizstermesztő gazdaságok 53 %-a használt jármű-navigációt, 18 %-a hozamtérképezést, 16 %-a differenciált műtrágya- kijuttatást és 12 %-a helyspecifikus talajtérképezést. Ugyanekkor a földimogyoró-termesztők körében a jármű-navigáció csak 42 % volt, de nagyobb arányban használtak talajtérképezést (25 %) és differenciált műtrágyázást (22 %).

A nebraskai egyetem felmérése szerint (CASTLE et al., 2015) a mezőgazdasági termelők 75 %-a mintavételi háló alapján végzi a talajmintavételt. A precíziós technológiák közül leginkább a hozamtérképezés és az automatikus navigáció terjedt el, ezeket a mezőgazdasági termelők több mint 80 %-a használja. Ezt követi a kijuttatási térképek készítése és a differenciált kijuttatás (68 %), míg a műhold- vagy légi felvételek (30 %), illetve a növény szenzorok alkalmazása (< 10 %) még kevésbé elterjedt.

Argentínában gyorsan terjed a precíziós technológia és nagy területeken alkalmazzák. A 33 millió hektár vetésterület 21,6 %-át művelik precíziós módszerekkel. Nagy arányban alkalmaznak vetésellenőrző monitorokat, sorvezetőket és hozamtérképezést, az automatikus kormányzás még kevésbé elterjedt (INTA, 2013).

Braziliában elsősorban a szója és kukorica (82 %), illetve a búza (22 %) és bab (13 %) termesztésében terjedt el. A mezőgazdasági termelők azonban nem használják ki a meglévő precíziós eszközeiket, átlagosan csak a területük 65 %-án használják. A járműnavigáció (sorvezető 42 %, automatikus kormányzás 37 %), valamint a differenciált kijuttatás (vetés és műtrágyázás 49,4%) a leggyakrabban alkalmazott technológia, hozamtérképezést csak 19 %-ban végeznek (BERNARDI és INAMASU, 2014).

Ausztráliában a gabonatermelők 20 %-a dolgozott precíziósan 2012-ben (OECD, 2016), de a nagy területen gazdálkodók körében jóval nagyobb ez az arány (LLEWELLYN és OUZMAN, 2014). Az 500 hektár feletti gabonatermelők 77 %-a használ automatikus kormányzást és 33 % végez hozamtérképezést. A termelők 35 %-a rendelkezik differenciált kijuttatásra alkalmas munkagéppel, de csak 15 %-a használja. A technológiák eredményességére utal, hogy a felhasználók közül 94 % ajánlaná másoknak az automatikus kormányzást, 77 % a hozamtérképezést és 80 % a differenciált műtrágyázást.

Az EU tagországok az USA és Ausztrália után a harmadik helyet foglalják el a precíziós mezőgazdaság piacán. A nem EU-tagok (Norvégia, Svájc, Ukrajna és Oroszország) – elsősorban az utóbbi két ország révén – is jelentős piaci értéket képviselnek (Business Intelligence and Strategy Research, 2015). Ennek legfőbb oka a gazdaságok méretében mutatkozó különbségek – míg a nyugat-európai (elsősorban a francia és olasz) gazdaságok sokkal kisebbek, mint az amerikaiak, az ukrán és orosz gazdaságok általában nagy területen termelnek, a hatékony gazdálkodás következtében a befektetés hamarabb megtérül (MALER, 2015).

Az Európai Űrügynökség (ESA) vezetésével kidolgozott TalkingFields rendszer is a precíziós gazdálkodás támogatására jött létre. 2009-től német és orosz nagyüzemekben kezdték alkalmazni. Azóta több országban, köztük Magyarországon is elérhető. Segítségével 20×20 méteres felbontásban kaphat a mezőgazdasági termelő a terület heterogenitását mutató alaptérképet, a talajvizsgálathoz felhasználható zónatérképet, valamint őszi búza, cukorrépa és kukorica esetén biomasszatérképet. Az ESA 2015-ben illetve 2017-ben felbocsájtott Sentinel-2 ikerműholdjai 10x10 méteres felbontású optikai felvételeket nyújtanak a szárazföldmonitoring-szolgáltatásokhoz (SENTINEL ONLINE).

Az Európai Mezőgazdasági Gépforgalmazók Szövetsége (CEMA) szerint az utóbbi tíz évben a precíziós gazdálkodás jó gyakorlattá vált. Az új mezőgazdasági gépek 70 - 80 %-a rendelkezik valamilyen precíziós képességgel, a monitorok és vezérlők integrációja pedig segíti az egyszerű és költséghatékony felhasználást.

Országokként csak kevés adat áll rendelkezésre a precíziós technológiák alkalmazásáról:

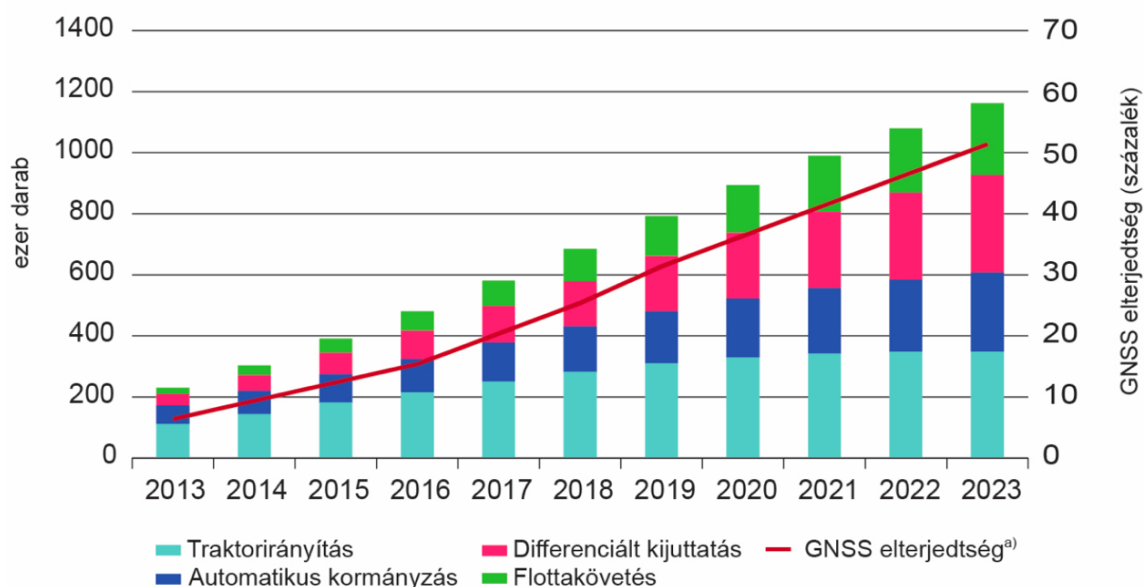
- Angliában egy 2012-es felmérés szerint (DEFRA, 2012) a mezőgazdasági termelőknek csak 22 %-a használt GPS-es jármű-navigációt, 20 % talajtérképezést, 16 % differenciált kijuttatást és 11 % hozamtérképezést.

- Franciaországban a mezőgazdasági termelők 25,4 %-a használt GPS-t 2013-ban (VIGANI et al., 2015). EurActiv 2016-os adatai szerint Franciaországban 150 000 hektáron folytatnak precíziós gazdálkodást és a traktorok fele van monitorral felszerelve.
- Németországban csak 11 % volt a precíziós gazdálkodók aránya 2006-ban (OECD, 2016), de 2018-ban már sok mezőgazdasági termelő megérti a digitális technológiák mezőgazdasági alkalmazásának előnyeit. A digitális termékek és üzleti modellek globális piaci potenciálja hatalmas. A tendencia a csúcstechnológiai rendszerekre való áttéréshez gyorsan növekszik.

#### 2.4.4. Mit várhatunk a jövőtől?

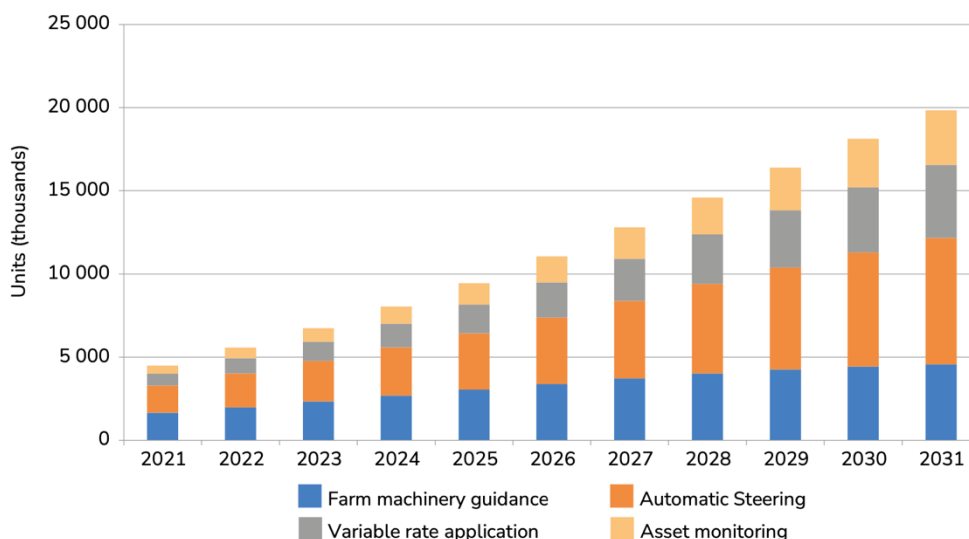
A növekvő népesség nagyobb élelmiszerigénye, a mezőgazdasági területek csökkenése, valamint a vízhiány miatt egyre hatékonyabb termesztési módokra van szükség, és ez a precíziós gazdálkodás gyors terjedését segítheti elő. A technológiák terjedésére vonatkozóan több nagy piackutató cég próbált előrejelzést adni az elmúlt években.

A Roland Berger (DRESSLER et al., 2015) évi 12 %-os növekedést várt 2020-ig. Hasonló jelentős növekedést jelezett a BIS Research (2016) is, becslésük szerint 2016 és 2022 között évente átlagosan 12,7 %-kal nő a precíziós gazdálkodás piaca, míg a Technavio 2015-ben évi 14,43 %-os növekedést várt 2019-ig. A 10. ábrán látható 2015-ben készített European GNSS Agency riport szerint 2023-ra a nagy teljesítményű traktorok több mint 50 %-ban lesz navigációs rendszer világszerte úgy, kb. 1,2 millió mezőgazdasági eszközben lesz valamilyen GNSS alapú megoldás. Az alkalmazások nagy részét a jövőben is az automatikus kormányzás jelenti majd, de a gazdálkodók nagyobb arányban fordulnak a további megoldások (pl. differenciált kijuttatás) felé.



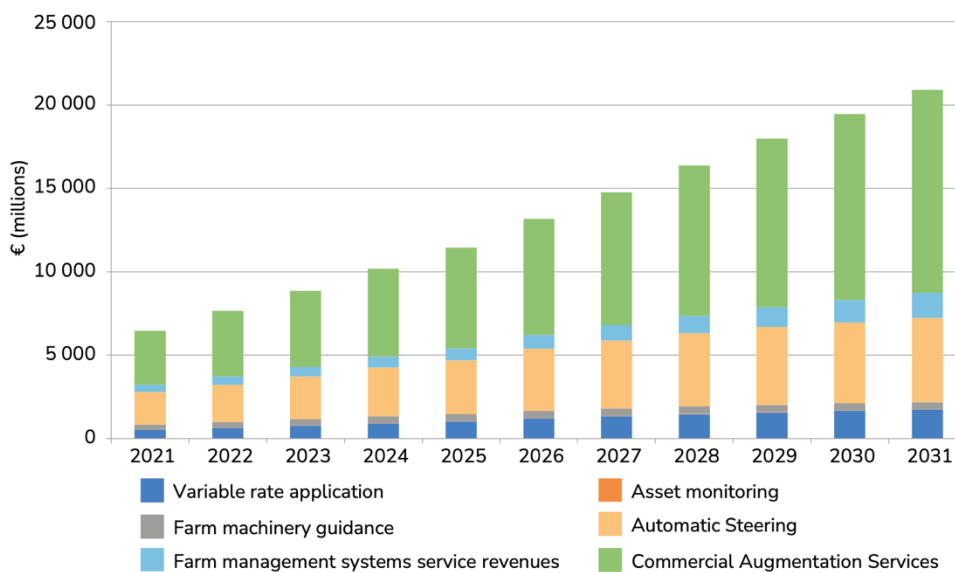
10. ábra A GNSS-eszközök alkalmazásának változása (EUROPEAN GNSS AGENCY, 2015; GAÁL et al., 2017)

2024-ben elmondható, hogy ezen piackutató cégek jellemzően alábecsülték a piac méretét és a technológia elterjedését. Az Európai Unió Űrprogram Ügynöksége (European Union Agency for the Space Programme, EUSPA) 2022-ben kiadott riportja szerint a valóság a 11. ábrán látható. Már 2021-ben a piac mérete közelítette az 5 millió GNSS eszköz használatát a világ mezőgazdaságában, amelynek a nagy része itt az európai kontinensen került beüzemelésre.



11. ábra A telepített GNSS eszközök alkalmazásonként (EUSPA, 2022)

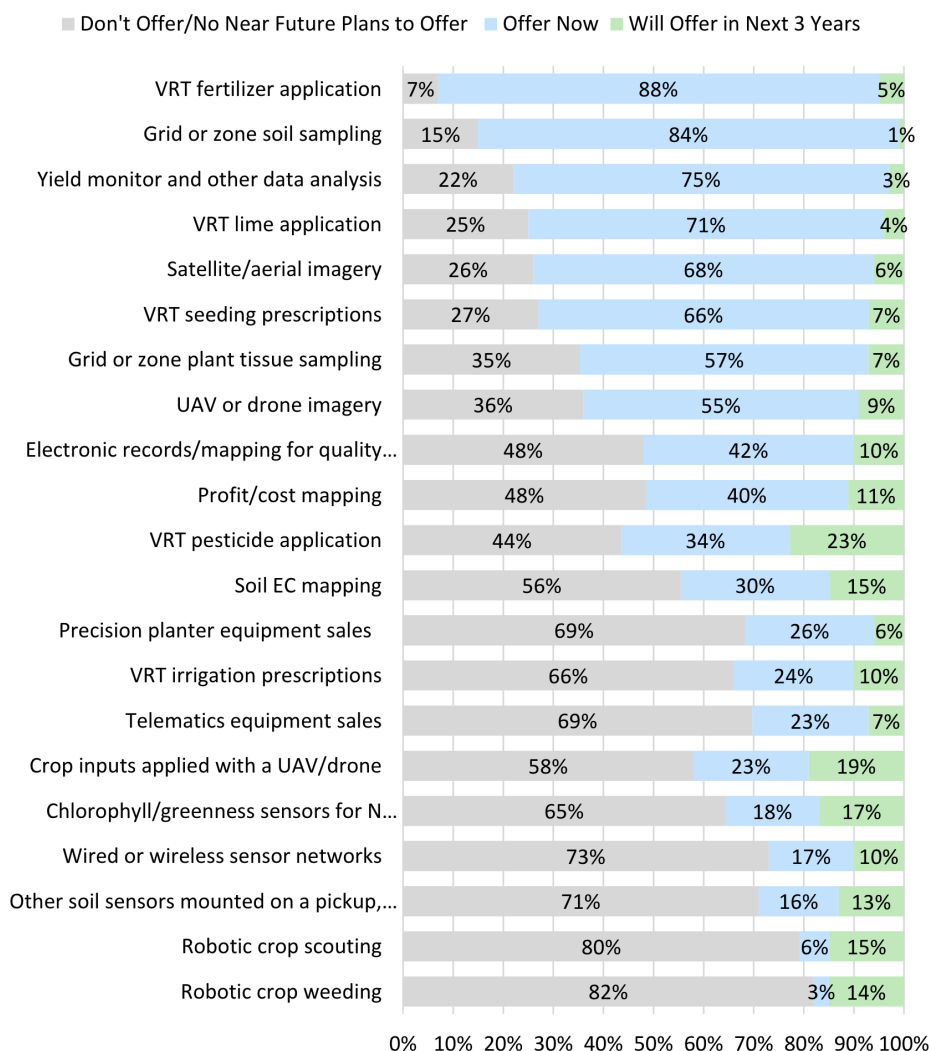
A MarketsandMarkets 2020-ban kiadott jelentése szerint 2025-ig évente átlagosan 12,7 %-os növekedés várható a precíziós gazdaság piacán, és az összes GNSS eladásból származó árbevétel 2025-ra elérheti a 12,8 milliárd dollárt (MARKETSANDMARKETS, 2020). A 12. ábrán látható EU Űrprogram Ügynöksége riportja ugyanezt az előrejelzést adja a piac méretére 2025-ben.



12. ábra A GNSS-eszközök értékesítéséből és szolgáltatásaiból származó bevételek alkalmazás szerint (EUSPA, 2022)

2022. év februárban és márciusban a CropLife magazin és a Purdue Egyetem Agrárgazdasági és Agronómiai tanszékei immáron 22. alkalommal végezték el reprezentatív, de mértékadó felmérésüket a precíziós mezőgazdasági technológiák használatáról a növénytermesztési inputanyagokkal kereskedő cégek körében az Egyesült Államokban (USA). A márkakereskedők természetesen üzleti megfontolásokból építik fel a digitális termék portfóliójukat és várják a precíziós technológiákból származó üzleti eredményt. Ez egy nagyon jó tükör annak vonatkozásában, hogy globálisan az egyik legnagyobb méretű precíziós gazdálkodási piac szereplői miben látják a digitális termékeknek hasznosulását. 2022-ben az USA-ban a kereskedők által az egyedi növényvédőszer- és műtrágyakijuttatáshoz használt irányítási technológiák kínálata a piac érését jelzi: a kereskedők 85 %-a használ GPS alapú automatikus kormányzást (ERICKSON

és LOWENBERG-DEBOER, 2022). Erickson-ék a válaszadó kereskedőket felkérték, hogy jelenítsék meg a precíziós szolgáltatások jelenlegi kínálatát és azt, hogy mit kínálnak majd három év múlva, 2025-ben. A válaszokat a 13. ábra mutatja be:



13. ábra A választ beküldő márkakereskedők precíziós szolgáltatási kínálat a felmérés szerint, a jelenlegi kínálat szerint rangsorolva. A kerekítés miatt a sorok összege nem biztos, hogy 100 % (ERICKSON és LOWENBERG-DEBOER, 2022).

Látható, hogy a differenciált tápanyag-visszapótlás (88 %) a kereskedők kínálatában az élen jár, és a differenciált vetés (66 %) is az ajánlati rangsor első harmadában helyezkedik el. A talajok elektromos vezetőképesség (EC) alapú felmérése, térképezése pedig ismételten fókuszba kerül, mivel 15 %-a kereskedőknek fel szeretné venni a portfólióba a következő 3 évben.

Nagyon könnyen felismerhető, hogy mind a 3 terület a szenzortechnológia adaptációján alapul. A helyspecifikus növénytermesztés jövője az érzékelő alapú megközelítés felé mutat, de az még nem teljesen egyértelmű, hogy a talaj felső rétegének a tulajdonságait figyelő talajközeli szenzorok, avagy valamilyen típusú optikai érzékelő vagy a növények valamilyen tulajdonságát távolról érzékelő szenzorok lesznek-e a befutók (LOWENBERG-DEBOER és ERICKSON, 2019). A következő fejezetben bemutatom milyen érzékelők elterjedésével érdemes számolni a helyspecifikus növénytermesztésben.

## 2.5. Talajtulajdonságok vizsgálata szenzorokkal

Manapság az érzékelő technológia az egyik leggyorsabban növekvő technológiai terület. Általános értelemben a szenzor egy olyan eszköz, ami valamely természeti mennyiséget műszaki, illetve emberi környezetben jobban kezelhető, jobban kiértékelhető jellé alakít át. A megfigyelendő, mérendő jel egyaránt lehet fizikai, kémiai, biológiai, technológiai, stb. jellegű. Megfigyelendő mennyiség lehet pl. hőmérséklet, távolság, nyomás, pH érték, vércukorszint, vagy akár szerszámélesség is. A szenzor kimeneti jele ma általában elektromos, de lehet pneumatikus, hidraulikus, vagy más mennyiség is. A magyar nyelvű szakirodalomban a szenzor, és az érzékelő, ill. ritkábban a detektor elnevezés egyaránt használatos (BÁNLAKI és LOVAS, 2012).

A mezőgazdasági szenzorok globális piacának értéke 1,23 milliárd USD volt 2018-ban és 2026-ra várhatóan eléri a 2,56 milliárd USD-t 11,04 % -os CAGR-értéken (REPORTS AND DATA, 2020). A szenzortechnológia révén a precíziós mezőgazdaságban olyan adatokhoz juthatunk, amelyek segítenek a gazdáknak a növények megfigyelésében és az inputanyagok optimalizálásában, valamint a változó környezeti tényezőkhöz való alkalmazkodásban. A precíziós mezőgazdaságban számos érzékelési technológiát használnak, amelyek olyan adatokat szolgáltatnak, amelyek segítenek a gazdáknak a növények megfigyelésében és optimalizálásában, valamint a változó környezeti tényezőkhöz való alkalmazkodásban (SCHRIBER, 2020).

### 2.5.1. Érzékelők általános csoportosítása a helyspecifikus növénytermesztésben

A szenzoros mérésen alapuló rendszereknél a növénytermesztésben a következő általános érzékelő csoportokkal találkozhatunk:

- **Növény szenzorok.** Olyan érzékelők, amelyek a növény fejlettségi állapotát figyelik.
- **Környezeti szenzorok.** Ilyenek például a légáram-érzékelők, amelyek mérik a talaj légáteresztő képességét továbbá a piaci forgalomban kapható mezőgazdasági önálló vagy hálózatba kapcsolt meteorológiai állomások. A Trimble cég kifejlesztette az ISOBUS-ra kapcsolható mikro-meteorológiai állomását, amely menet közbeni mérésre is alkalmas.
- **Működés ellenőrző szenzorok.** Az erőgépeken, munkagépeken alkalmazott érzékelőtechnológia az ISOBUS adatátvitellel szabványosított csatornán bekötve az erőgép fedélzeti számítógépébe és onnan a felhőn keresztül elküldve a farmer gazdasági adatait kezelő rendszerébe (Farm Management System, FMIS) a mai korszerű szántóföldi növénytermesztésben használt összes munka- és erőgépen és munkaműveletben alkalmazásra kerül a legegyszerűbb, pl. fordulatszám-jeladótól a bonyolultabb méréseken, pl. hűtőhőmérséklet alapján történő automatikus távvezérlésig, illetve adatrögzítésig és feldolgozásig. Mindezek mellett a szenzortechnológia által szolgáltatott jelet használják fel az elektronikus üzemvitelben.
- **Talajszenzorok.** A talajszenzor a talaj tulajdonságait mérő érzékelő. Olyan eszköz, amely a hobbikertészeketől a növénytermesztést hivatásszerűen végzőkig minden földhasználó segítségére van a talaj olyan paramétereinek megfigyeléséhez és további vizsgálatához, melyek vizuálisan vagy érintéssel nehezen felmérhetők.

### 2.5.2. Talajvizsgálat mintavétellel

A legpontosabb talajvizsgálati módszer a **direkt talajmintavétel**. A talajvizsgálat egyik legkritikusabb szempontja a reprezentatív talajminták beszerzése, azaz megfelelő térbeli sűrűséggel megfelelő mélységben és a megfelelő időben gyűjtött minták begyűjtése (Adamchuk et al., 2004). A talajmintavétel jelenlegi precíziós gazdálkodási gyakorlatban a legdrágább és leglassabb mintavételi eljárás. Ezért van létjogosultsága a helyspecifikus növénytermesztésben olyan eszközök fejlesztésének, amelyek a talaj mechanikai, fizikai és kémiai tulajdonságait

képesek folyamatosan, menet közben (on-the-go) mérni és a mérési eredményeket azonnal szolgáltatni. A mérés történhet távolról azaz távérzékeléssel (Remote Sensing) avagy talajközeli méréssel (Proximal Sensing).

A talajvizsgálatok eredményei fontos tényezők a műtrágyák, mész és egyéb talajjavító anyagok nyereséges felhasználásához. Ha a talajvizsgálati eredményeket összekapcsolják a különféle növények számára rendelkezésre álló tápanyagokkal kapcsolatos információkkal, megbízható alapot lehet létrehozni a kijuttatási tervek elkészítéséhez. A talajminta vizsgálat magában foglalja a rendelkezésre álló foszfor (P), cserélhető kálium (K), kalcium (Ca) és magnézium (Mg) meghatározását, telítettségük százalékát, a pH-t és a mészigényt. Elvégezhető teszt a kationcserkapacitás (T vagy az angol szakirodalomban CEC), a szerves anyag (OM) tartalomra, a sótartalmat, nitrátra, a szulfátra, illetve nehézfémekre is. Tovább vizsgálni lehet a talaj fizikai tulajdonságait, mint a textúráját (homok, iszap és agyagtartalom), a talaj tömörödöttségének a szintjét, nedvességtartalmát és egyéb más mechanikai és fizikai tulajdonságait.

### 2.5.3. Távérzékelés (Remote sensing)

A precíziós mezőgazdaság az 1980-as évek közepéig nyúlik vissza. A **távérzékelés** olyan adatgyűjtési módszer, amely rögzíti a földön lévő tárgyak által visszavert vagy kibocsátott elektromágneses sugárzás (EMR) mennyiségét változó hullámhosszon (GRUNWALD et al., 2015). A precíziós mezőgazdaságban végzett távérzékelési alkalmazások a talaj szervesanyag tartalmának érzékelőivel kezdődtek, és gyorsan diverzifikálódtak. Jelenleg megkülönböztetünk műholdas, légi, kézi vagy erőgépre szerelt érzékelőket.

Minden felszínnek/tárgynak sajátos elnyelési és visszaverési spektruma van, amely az adott objektum fizikai és kémiai tulajdonságaitól, valamint geometriai viszonyaitól függ. A zöld növények klorofilltartalmuk miatt gyengén verik vissza a látható vörös sugarakat, ugyanakkor erősen visszaverik a közeli infravörös sugarakat. Ezt a tulajdonságot használják fel a különböző vegetációs indexek számításához, amelyek közül a legismertebb a normalizált differenciál vegetációs index (NDVI) és az normalizált differenciál vörös él index (NDRE) a különbség az, hogy az NDRE a látható vörös tartomány helyett egy kicsit hosszabb hullámhosszon dolgozik (vörös él tartomány). A vegetációs indexek alapján vizsgálható a vegetáció típusa, a növényállomány állapota, fejlődése, esetleges károsodása, és hatékony eszköz a térbeli eltérések kimutatásában (TAMÁS, 2013). Felhasználható a nitrogén-, valamint a vízigény számítása során (MOGYORÓSI et al., 2011; MONTGOMERY et al., 2015), a termésbecslésben (AMBRUS et al., 2015) és a gyomnövények detektálásában is (REISINGER, 2012).

A növények szöveti felépítése meghatározó az infravörös tartományban megfigyelhető visszaverődésnél, így ez a tartomány alkalmas a növényfajok elkülönítésére. A középső infravörös tartományban mért visszaverődés elsősorban a növények víztartalmával van összefüggésben, de befolyásolja a levelek lignin- és cellulóztartalma is.

A betegségek vagy kártevők által okozott sérülések hatására pár fokkal megemelkedik a növények hőmérséklete, ami infravörös kamerával vizsgálható (MILICS et al., 2006; MESTERHÁZI, 2013; TAMÁS, 2013).

A növények/gyomok felismerése történhet a mesterséges látásra alapozva is (MILICS és NEMÉNYI, 2007), amikor egy nagy felbontású kamera által készített képet dolgoz fel a fedélzeti számítógép. A drónokra szerelt nagy felbontású kamerák képeit a gyümölcsösök termésbecslésében lehet használni (WULFSOHN és ZAMORA LAGOS, 2014).

Az aktív távérzékelési technikák gyorsan fejlődő ága a lézeres szkennelés (Light Detection and Ranging, LIDAR), aminek adataiból háromdimenziós modell készíthető a vizsgált objektumról. A talajok összetételének vizsgálatára a látható, valamint az infravörös tartományokban végzett távérzékelés is alkalmazható (JUNG et al., 2015).



Az egyre növekvő számú lehetséges adatforrás, amely alapja az terület-specifikus alkalmazási arány ellenőrzésének, jelentősen növeli a távérzékelési eszközök használatának a fontosságát az elkövetkező években. Például a Copernicus program keretében az EU ingyenes Sentinel műholdas adatokat kínál. Ezen felül a drónok segítségével végzett légi fényképezés egyre népszerűbbé válik. Mind a drónok, mind az érzékelők piaci ára jelentősen csökkent az elmúlt években, és így szélesebb közönség számára is elérhetővé váltak.

#### 2.5.4. Talajközeli érzékelés (Proximal sensing)

A **talajközeli (proximális) érzékelés** meghatározása szerint a terepen használatos szenzorok felhasználásával információhoz jutunk a talajból úgy, hogy az érzékelő mérőegysége a talajjal érintkezik vagy annak közelében (2 m-en belül) tartózkodik (VISCARRA ROSSEL et al., 2011). A talajközeli szenzorokkal való mérés a kapcsolódó tudományokban magában foglalja többek között a talaj feltérképezését és megfigyelését, a precíziós mezőgazdaságot és a mezőgazdasági döntések előkészítését, a környezetszennyezés értékelését.

A mérési technológia különböző működési elveken, például elektromos, mechanikai, optikai, kémiai, akusztikus stb. érzékelőket használ a célzott talajtulajdonságok észlelésére vagy mérésére. Amint azt a 14. ábra szemlélteti, a talajközeli érzékelést kilenc kategóriába sorolják, amelyek a működési mód (mobil/statikus), a mérés típusa és környezete (érintkezés nélkül illetve érintkezve in situ/ex situ), a külső energiaforrás használata (passzív/aktív) és a következtetés típusa (közvetett/közvetlen) alapján határozhatók meg. A kategóriák közül a mobil működés csak akkor lehet előnyös, ha az érzékelő válaszüzeje gyorsabb, mint az adatgyűjtés sebessége. A közvetlen következtetésen alapuló érzékelők előnyben vannak a közvetett módon működő érzékelőkkel szemben, mivel a kalibrációs modelleket laboratóriumban elemzett adatok felhasználásával kell kidolgozni. A kalibrációs modellek kidolgozásához és a mérőműszerek kalibrálásához azonban hagyományos talajmintavétel és a minták laboratóriumi elemzése szükséges. A laboratóriumi vizsgálatok szükségességének száma idővel várhatóan csökkenni fog (VISCARRA ROSSEL et al., 2011).



14. ábra A talajközeli szenzorok csoportosítása (VISCARRA ROSSEL et al., 2011, magyar felirattal)

Például a direkt talajkapcsolattal dolgozó eszközökkel végzett mérések (pl. VERIS MSP3) érintkezéses azaz invazív és in situ mérések, ahol a szenzor aktív energiaforrást használ, menet közben működik, és a talaj tulajdonságaitól függően az elektromos vezetőképességet közvetlenül méri.

A talajadatok gyűjtése során a következő mérési elveket, szenzorokat különböztetjük meg a gyakorlatban (GRUNWALD et al., 2015):

- **Elektromos vezetőképességen alapuló mérés:** Elektromos vezetőképesség (EC) az anyag azon képessége, hogy elektromos áramot vezessen. A talaj egy háromfázisú rendszer, amely vízből, levegőből, valamint szerves és ásványi anyagból áll, és több útvonalat kínál a különböző EC-vel rendelkező fázisok közötti vezetéshez. Kétféle típusú érzékelő létezik, amelyek mérik az EC-t: egy elektródalapú és elektromágneses indukciós alapú.
- **Behatoló radar és visszaverődést mérő eszközök (reflektométerek):** A talajba hatoló radar (Ground Penetrating Radar, GPR), az időtartományú reflektométer (Time-Domain Reflectometer, TDR) és a frekvenciatartományú reflektométer (Frequency-Domain Reflectometer, FDR) méri a talaj dielektromos állandóját, amely azt írja le, hogy a talajban milyen könnyen generálható elektromos mező amikor áramot vezetünk bele. Ugyanazt a mérési elvet követik, mint az EC-mérő, de elektromos erő alapján működnek, nem pedig az áramerősség alapján.
- **Diffúz visszaverődés-érzékelők:** A látható (VIS) vagy közeli infravörös (NIR) vagy közép infravörös (MIR) diffúziós spektrométerek mérik a talaj reflektanciáját, azaz a bejövő és visszaverődő fény arányát, amelyet a talaj visszatükröz. A mesterséges fényforrás által kibocsátott beeső energia (fény) kölcsönhatásba lép a talajjal, és a visszatükrözött energiát (fény) megméri és feldolgozza egy folyamatos spektrális görbe előállításához, a visszaverődést ábrázolva hullámhosszon. A talaj reflektanciája attól függ, hogy alkotóelemei hogyan lépnek kölcsönhatásba (azaz abszorbeálják, továbbítják vagy verik vissza a fényből vett energiát (DOBOS, 2013)
- **Mágneses érzékenységi érzékelők:** A mágneses érzékenység érzékelők megméri, hogy egy anyag mágnessé válik-e egy mágneses mező alkalmazásakor. Jellemzően a vas-ásványokat is tartalmazó talajban a mágnesség az ásványok típusától és koncentrációjától függ, amelyek mágnesezhetők. A talajban található magas ásványianyag tartalmú vas-ásványok a magnetit és a maghemit, ám más alacsony ásványi anyagú ásványok nagyobb koncentrációban fordulnak elő, beleértve a hematitot és a goetit. Ezek a vas tartalmú ásványi anyagok társulnak más talaj alkotóelemekhez (ásványi és szerves), és koncentrációik a kiindulási anyag eredeti koncentrációihoz kapcsolódnak. Ezen mágneses vas ásványok képződését és oldódását a talaj pH-ja és a talaj vízelvezetése szabályozza (amely magában foglalja a nedvességtartalmat és a textúrát). Így a talajok mágnessége felhasználható a talajban található ásványi anyagok, de a talaj egyéb alkotóelemeinek koncentrációjának korrelációval való becslésére is.
- **Gammasugár-spektrométer vagy gamma-radiométerek** gamma-sugárzás segítségével mérik a talaj által kibocsátott energiát. A gammasugárzás körülbelül 0,001 - 0,1 nm hullámhosszú a talajban természetesen jelen lévő radioaktív izotópok bomlásából származik. Ezek közül a geofizikában a legnagyobb mennyiségben előforduló és gyakorlatilag hasznosítható a kálium ( $^{40}\text{K}$ ), a bizmut ( $^{214}\text{Bi}$ ) és a tallium ( $^{208}\text{Tl}$ ), ahol a  $^{214}\text{Bi}$  és a  $^{208}\text{Tl}$  az urán ( $^{238}\text{U}$ ) és a tórium ( $^{232}\text{Th}$ ) bomlásának termékei, illetve ezen elemek koncentrációjának becslésére szolgálnak. Ezen kívül néha mérik az ember alkotta céziumot ( $^{137}\text{Cs}$ ) amely a metastabilis báriumra ( $^{137}\text{Ba}$ ) bomlik. A gammasugárzás mérők úgy működnek, hogy a kinetikus energiát általában 0 és 3 MeV közötti energiaszinteken mérik. A gammasugár-spektrumokat akár teljes egészében hasonlóan a VIS-NIR-MIR spektrumokhoz többváltozós elemzéssel is elemezhetjük. A gamma-radiometria szerepet kapott a digitális talajtérképek elkészítésében, mivel képes jellemezni a talaj tulajdonságait (VAN EGMOND, 2010).

- **Egyéb ígéretes mérési elvek:** Jelenleg a következő talajszenzorokkal, mérési elvekkel történnek kutatások a teljesség igénye nélkül: röntgen sugaras, ionszelektív elektródokat használó, fotoakusztikus spektroszkópia, lézer-indukált fluoreszcencia spektroszkópia, rugalmatlan neutronszórás.
- Természetesen a különböző szenzorokat lehet tetszés szerint kombinálni ilyenkor beszélünk **multi-szenzor** használatról, ilyenkor egy menetben több tulajdonságot is lehet térképezni.

Megállapítható, hogy az elektromos vezetőképesség mérése a precíziós gazdálkodáshoz szükséges talajvizsgálatok in situ eszköze. Kutatásaim arra irányultak, hogyan lehetne kiváltani a lassabb, bonyolultabb és így viszonylag költséges laboratóriumi méréseket. Önmagukban a talajszenzorokkal végzett vezetőképesség-vizsgálatok nem elegendők ahhoz, hogy egy adott tábla tulajdonságaira következtessünk. A mérésre hatással van a különféle tápelemek egyenlőtlen eloszlása, az eltérő pH viszonyok, a különféle szemcseösszetétel, a szervesanyag-tartalom vagy akár a hőmérséklet különbsége is (CORWIN és LESCH, 2005).

#### 2.5.5. Kereskedelemben elérhető leggyakoribb talajszenzorok – A talajszkennerek

Egyre elterjedőben vannak a talajközeli szenzorok gyakorlati, üzleti alkalmazásai, amelyek rövid idő alatt elvégezhető gyors, teljesen gépesített talajvizsgálati és talajtérkép-készítő megoldásokat tesznek lehetővé. Az 1. táblázat a talajközeli szenzorokat foglalja össze jellemző tulajdonságaik alapján. A talajközeli szenzorok mérési pontossága ugyan elmarad az egyedi talajmintavételből származó laborvizsgálatoktól, de megfelelnek a gyakorlati igényeknek, mert gyorsak és fajlagosan olcsóbbak. A közelmúltig a következő eszközökkel lehetett a precíziós mezőgazdasági gyakorlatban találkozni:

- **Veris MSP3 traktorra szerelhető mobil talajszkenner** (15. ábra). Méri a talaj elektromos vezetőképességét, optikai úton méri a talaj szervesanyag (humusz)-tartalmát és meghatározza a talaj pH-értékét.



15. ábra Veris MSP3 munkában (VERIS HONLAP)

- **SoilExplorer talajszkenner**, a CNH résztulajdont vásárolt az osztrák Geoprospectors GmbH cégben, amelynek az egyik fő terméke az általuk kifejlesztett talajszkenner (16. ábra). Ez a szkenner elektromágneses indukció elvén dolgozik és a talaj vezetőképességét (EC) négy tekercs méri négy különböző mélységben. Amikor a szenzor 40 cm-rel van a talaj felett, akkor ezek a rétegek a következők: 0 – 25 cm, 15 – 60 cm, 55 – 95 cm és 85 – 115 cm. . A szenzor nem érintkezik a talajjal, így viszonylag nagy sebességgel végezhető el a mérések a területen. A berendezés ISOBUS-kompatibilis (SOILEXPLORER PROSPEKTUS).



16. ábra SoilExplorer munkahelyzetben

- **Geonics EM38 MK2 talajszkenner**, a kanadai Geonics Limited által kifejlesztett berendezés is elektromágneses indukció elven működik. Az elektromágnesei által kibocsátott erővonalak 0 – 0,5 m és 0 – 0,9 m mélységben járják be a talajszelvényt és mérik a talaj vezetőképességét (EC) ezekben a rétegekben. A vezetőképességi index alapján lehet következtetni a talaj fizikai összetételére, tömörségére, humusztartalmára, tápanyag- és vízellátottságára. Ez a berendezés is a talajon vontatva azzal kontaktusban végzi a méréseket.
- **SoilOptix talajszkenner**, egy direkt talajkapcsolat nélküli, előkalibrált gammasugárzás szenzort használ, amelyet járműre szerelnek kb. 60cm-re a talajtól a  $^{137}\text{Cézium}$ ,  $^{238}\text{Urán}$ ,  $^{232}\text{Torium}$  és  $^{40}\text{Kálium}$  mérésére a talaj felső részében. A szenzorok különféle időjárási körülmények között működhet és pontosságát nem befolyásolja a növényi maradványok jelenléte. A SoilOptix szenzor hektáronként 827 adatpontot szolgáltat, amely lehetővé teszi a mezők nagy felbontású megjelenítését. A mérési eredményeket, akár 25 térképrétegben, a saját szoftver szolgáltatja, utólagos adatfeldolgozással (SOILOPTIX)
- **Medusa MS-2000 talajszkenner** fejlesztője a Medusa Radiometrics BV Hollandiából. Ők fejlesztették ki a Gröningeni Egyetemmel közös projektben a fent bemutatott SoilOptix talajszkennerrel. 2019-ben úgy döntöttek, hogy saját jogon is kereskedelmi forgalomba hozzák a szenzort.

1. táblázat A talajszkennerek összehasonlítása (HORVÁTH et al., 2021)

Szenzor típus	VERIS MSP3	SoilExplorer	GEONICS EM38 MK2	SoilOptix	MS-2000
Gyártó	Veris Technologies Inc.	Geoprospectors GmbH	Geonics Ltd.	SoilOptics Inc	Medusa Radiometrics BV
Ország	USA	Ausztria	Kanada	Kanada	Hollandia
Mért paraméterek	EC OM pH	Multi Coil Array (RX / Tx)	EC	pH, OM, P, K, Ca, Mg, % agyag, % homok, % iszap, rendelkezésre álló víz	pH, OM, P, K, Ca, Mg, % agyag, % homok, % iszap, rendelkezésre álló víz
Mérési elv	Elektromos ellenállás Optikai szenzor pH elektróda	Elektromágneses indukció	Elektromágneses indukció	Gamma-spektorszkópia	Gamma-spektorszkópia
Talajbatholás	akár 0,9 m	akár 1,1 m	akár 1,5m		
Talajkapcsolat méréshez	kontakt	kontakt nélkül 25-40 cm-ről	kontakt	kontakt nélkül max. 60cm-ről	kontakt nélkül max. 60cm-ről
Munkasebesség	7-13 km/h	elméleti max. 50 km/h	N/A	N/A	N/A
Munkaszélesség	15-24 m	18 m	N/A	N/A	N/A
Területteljesítmény	8-26 ha/h	36 ha/h 20 km/h-val számolva	N/A	N/A	N/A
Tömeg	635 kg	32 kg	5,4 kg	N/A	12 kg
Adatrögzítés	saját szoftver	saját szoftver	saját szoftver	saját szoftver	saját szoftver
ISOBUS kapcsolat	nincs	opcionálisan lehetséges	nincs	nincs	nincs
Adatfeldolgozás	valós időben (real-time)	valós időben (real-time)	valós időben (real-time)	utólagosan	utólagosan
Adatformátum	N/A	OGC (GIS consortium) megfelelő formátum, SHP, GTIFF vagy ISOXML	N/A	SHP, CSV	SHP, CSV
Külső GNSS vevő	szükséges	szükséges	szükséges	szükséges	szükséges
Felszerelés	traktor, quad	traktor, quad	kézi	traktor, quad	traktor, quad
Web	<a href="https://www.veristech.com/the-sensors/msp3">https://www.veristech.com/the-sensors/msp3</a>	<a href="http://www.geoprospectors.com">http://www.geoprospectors.com</a>	<a href="http://www.geonics.com/html/em38.html">http://www.geonics.com/html/em38.html</a>	<a href="https://soiloptix.com">https://soiloptix.com</a>	<a href="https://medusa-online.com/en/about/">https://medusa-online.com/en/about/</a>

## 2.6. A talaj elektromos vezetőképesség mérése

A talaj tulajdonságai gyakran jelentősen eltérnek egy-egy területen belül, és a precíziós mezőgazdaság egyik kihívása az, hogy elegendő talajadatot gyűjtsünk ahhoz, hogy ezt a változatosságot pontosan meg tudjuk határozni. A talaj elektromos vezetőképessége (EC) széles körben használt eszközzé vált a talaj szántóföldeken belüli változatosságának feltérképezésére. A talaj EC-mérések jellemzően a talajszerkezettel, a nedvességgel és a sótartalommal korrelálnak. A talajszerkezet fontos tényező a terméshozamok szempontjából, mivel összefügg a víztartó kapacitással, a kationcserélő kapacitással, a gyökérszint mélységével, a vízelvezetéssel és más, a növénytermesztést befolyásoló tulajdonságokkal (LUND, 2008).

**A konduktometria az oldatok elektromos vezetőképességének mérésén alapuló analitikai módszer.** Az analitikai kémiában az elektrolitoldatok elektromos vezetőképességét konduktometriás módszerekkel mérik, és ebből, valamint annak a kémiai reakciók hatására bekövetkező változásaiból analitikai információkat vezetnek le. Az anyagok vezetőképessége (jele **G**, mértékegysége **siemens, S**) az elektromos (ohmos) ellenállásuk (jele **R**, mértékegysége **ohm, Ω**) reciproka. Az elektromos vezetéshez olyan töltéshordozók (pl. elektronok vagy anionok és kationok) jelenléte szükséges, amelyek az elektromos tér hatására képesek mozogni. Az oldatban az elektromos tér hatására bekövetkező ionvándorlás az oka az oldatok elektromos vezetésének. Ennek alapján megkülönböztetünk elektromos vezetőket, félvezetőket és szigetelőket. A tiszta (desztillált) víz, mivel csak nagyon kis mértékben tartalmaz töltéshordozókat az autoprotolízisnek

megfelelő  $[H^+] = [OH^-] \approx 10^{-7} \text{ mol l}^{-1}$  koncentrációban, csak nagyon kis mértékben vezet az elektromosságot, ezért szigetelőnek tekinthető. Az elektrolitok vizes oldataiban azonban a kationok és anionok koncentrációja jelentős lehet, így azok az elektrolit disszociáció mértékétől függően többnyire vezetőképeseek (GALBÁCS et al., 2008, BURGER, 2012).

A vezetőképesség definíció szerint az ellenállás reciproka, ha egy elektrolit oldatba két azonos méretű, sík felületű, párhuzamos elektródlap (pl. Pt-lap) merül, amelyek felületének nagysága  $A$ , a köztük lévő távolság pedig  $l$ , akkor az így kapott *vezetőképességi cellára* igaz, hogy

$$G = \frac{1}{R} = \kappa \frac{A}{l} = \frac{\kappa}{K} \quad (1)$$

Tehát a vezetőképessége egyenesen arányos  $A$ -val és fordítottan arányos  $l$ -lel. Az  $A/l$  hányados reciprokát ( $K$ ), ami a vezetőképességi cella alakjától (geometriai kiképzésétől) függő mennyiség, cellaállandónak is nevezzük. A fenti kifejezés magában foglal egy, az adott elektrolitoldatra jellemző  $\kappa$  arányossági tényezőt, az ún. *fajlagos* (egyek források szerint *specifikus*) vezetőképességet, ami megadja a két, egységnyi ( $1 \text{ cm}^2$ ) felületű, egymástól egységnyi távolságra ( $1 \text{ cm}$ -re) levő elektród között lévő elektrolitoldat vezetőképességét. Az egyenletben  $G$  a vezetőképesség ( $[G] = S = \Omega^{-1}$ ),  $R$  az ellenállás ( $[R] = \Omega$ ),  $A$  az elektródok felülete ( $[A] = \text{m}^2$ ),  $l$  az elektródok távolsága ( $[l] = \text{m}$ ),  $\kappa$  a fajlagos vezetőképesség ( $[\kappa] = \text{Sm}^{-1}$ ). A fajlagos vezetőképesség additív az oldat komponenseire (oldószer és oldott anyagok) nézve:

$$\kappa = \sum_{i=1}^N \kappa_i \quad (2)$$

Egy kétkomponensű (tehát egy oldószerből és egy elektrolitból álló) oldat vezetőképessége az oldatban lévő kationok és anionok vezetőképességeinek összegeként számítható, a többkomponensű (kettő vagy több elektrolitot tartalmazó) oldatoké pedig az egyes elektrolitok vezetőképességeinek összegeként adható meg. Az oldatok vezetőképessége tehát **additív tulajdonság**. A vezetőképesség nyilvánvalóan függ az oldat térfogategységében lévő ionok számától (tehát a koncentrációtól), valamint az ionok mozgékonyaságától (vagyis attól a sebességtől, amellyel egy adott ion az elektromos tér hatására mozogni képes). A koncentráció hatásának figyelembevételére vezették be az **ekvivalens (egyek források szerint moláris fajlagos) vezetőképesség ( $\Lambda$ )** fogalmát, amivel az egyes ionok vezetőképessége már külön-külön jellemezhető:

$$\Lambda = \frac{1000\kappa}{c} \quad (3)$$

Ennek az az oka, hogy a töltéshordozók véges koncentrációjú oldatokban egymás elektrosztatikus (vonzó ill. taszító) terében kénytelenek mozogni. Az ionok egymástól teljesen függetlenül csak végtelen híg oldatokban vándorolnak. Végtelen híg oldatok esetén a teljes ekvivalens vezetőképesség közelítőleg az egyes ionok ekvivalens vezetőképességeinek az összege (ennek oka, hogy ilyen oldatokban a disszociáció teljesen tekinthető, az anionok és kationok egymástól függetlenül mozognak). Az ilyen oldatokra (nulla koncentrációra történő extrapolációval) megadott vezetőképességi adat ( $\Lambda_0$ ) már csak az elektrolit ionjaira jellemző állandó, amely értéke csak a hőmérséklettől és az oldószertől függ. Az oldatban lévő minden egyes ion valamilyen mértékben hozzájárul a vezetőképesség értékéhez. Ezek egymástól elválaszthatatlanok, ezért a

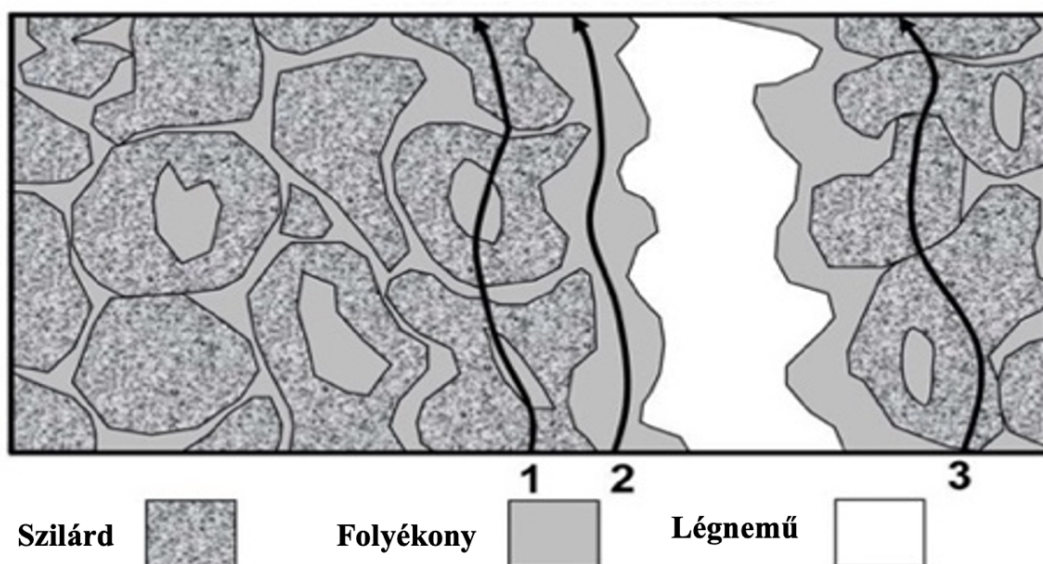
konduktometria, a szakirodalom szerint, nem alkalmas az egyes ionok szelektív mérésére, azaz nem ion-specifikus módszer (GALBÁCS et al., 2008, BURGER, 2012). Ezért analitikai alkalmazása olyan rendszerek vizsgálatára korlátozódik, amelyek

- csak egyetlen elektrolitot tartalmaznak (így a "háttér" hozzájárulása elhanyagolható) vagy,
- kémiai reakciók zajlanak bennük, amelyek során a rendszert alkotó ionok mozgékonyasága jelentősen megváltozik a nem nulla "háttérhez" képest (Galbács et. al., 2008).

Kétféle konduktometriás mérést különböztethetünk meg: konduktometriás módszerrel homogén (tisza) elektrolitoldatok koncentrációja közvetlenül is meghatározható (direkt konduktometria), sokkal elterjedtebb a konduktometria alkalmazása titrálások végpontjelzésére (konduktometriás titrálás). Erre akkor van lehetőség, ha a titrálás során az ionkoncentráció jelentősen változik, vagy állandó ionkoncentráció mellett különböző mozgékonyaságú ionok cseréje játszódik le (GALBÁCS et. al., 2008).

### 2.6.1. A talaj elektromos vezetőképessége

Vajon mi a helyzet az olyan speciális oldatokkal mint a talaj? A vezetőképesség mérések csak a talajban található összes sótartalomról adnak információt és tényleg nem alkalmasak ionszelektív mérésekre ahogyan azt a szakirodalom állítja? A mért vezetőképesség tehát csak hozzávetőleges információ (CORWIN és LESCH, 2005). A 17. ábra a töltött részecskék elmozdulásának lehetséges irányait mutatja a 3-fázisú, telítetlen talaj vezetőképesség-mérés során. A levegő szigetelő közegként viselkedik (CORWIN és LESCH, 2005; RHOADES et. al., 1989). A talaj EC-értékéhez három áramlási útvonal járul hozzá: (1) egy szilárd-folyékony fázisú útvonal elsősorban az agyagásványokhoz kapcsolódó cserélhető kationokon keresztül, (2) egy folyékony fázisú útvonal a talajvízben található, a nagy pórusokat elfoglaló oldott szilárd anyagokon keresztül és (3) egy szilárd útvonal az egymással közvetlen és folyamatos kapcsolatban lévő talajrészecskéken keresztül (RHOADES et. al, 1999). Az áramlásnak ezt a három útját szemlélteti a 17. ábra, a levegő fehérrel, a folyadék szürkével, a talajrészecskék pedig pontozva vannak ábrázolva (RHOADES et. al., 1989).



17. ábra Az elektromos áramvezetés iránya a 3 fázisú talajban (RHOADES et al., 1989; CORWIN és LESCH, 2005)

Mindazonáltal az EC mérések használatának robbanásszerű elterjedése a 90-es évek óta 2 okra vezethető vissza. Egyrészt a mérési technológia fejlődésével a vezetőképesség mérő eszközök mérete jelentősen csökkent és mobil eszközként is elérhetővé váltak. Másrészt a műholdas helymeghatározó rendszerek is mindennapi eszközzé váltak. Így a geopozícióhoz rendelt vezetőképesség a térinformatikai (Geographic Information Systems, GIS) szoftverek segítségével könnyen vizualizálható és könnyen feldolgozható, felhasználható adatbázissá vált.

### 2.6.2. A konduktometriás mérések a talajban - a talajok oldható sótartalma

Filep és Wafi (1993) bebizonyította, hogy a talaj elektromos vezetőképessége és a sókoncentrációja közötti összefüggést az alábbi képlet fejezi ki:

$$c \text{ (mg/l)} = 797,1 EC_e \quad (4)$$

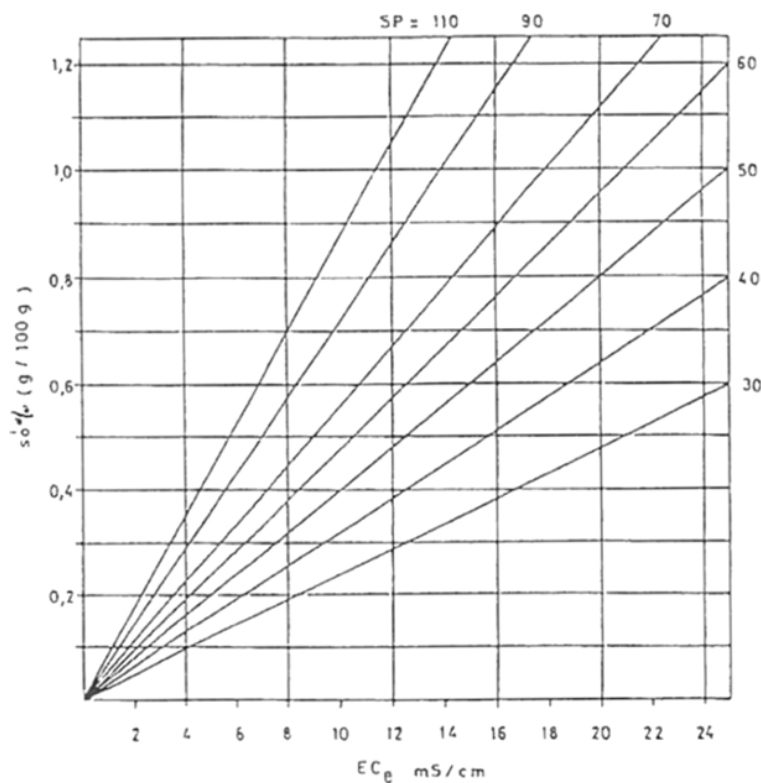
ahol:

$$EC_e \text{ (mS/cm)} \quad (5)$$

A 6. képlet alapján számítható a tömeg %-ban kifejezett sótartalom, ahol a

$$s\% = EC_e \frac{SP}{1000} 0,797 \quad (6)$$

ahol  $SP$  = a telítési paszta víztartalma (az ún. telítési % = saturation percentage). A só% és az elektromos vezetőképesség (EC) közötti összefüggést a 18. ábra mutatja különféle vízfelvevő képességű (SP-értékű) talajoknál.



18. ábra A talaj sótartalma (só %) és a telítési kivonat elektromos vezetőképessége (EC) közötti összefüggés a 6. képlettel számolva (FILEP és WAFI, 1993)

A telítési kivonat vezetőképességére alapozott kategorizálás a 2. táblázatban található. Látható, hogy a vezetőképesség, illetve a sótartalom növekedése a növények fejlődésére is kihat. Az egyre magasabb sótartalom negatívan befolyásolja a növények fejlődését.



2. táblázat A talaj sótartalom szerinti kategorizálása és a növények fejlődése (STEFANOVITS et al., 1999)

A telítési kivonat vezetőképessége, mS/cm (Sótartalom %)*	A talaj sótartalom szerinti csoportosítása	Hatása a növények fejlődésére
< 2 (< 0,1 %)	nem sós	a mezőgazdasági növények fejlődését nem gátolja
2 – 4 (≈ 0,1 – 0,25 %)	gyengén sós	néhány nagyon sóérzékeny növény fejlődése gyenge
4 – 8 (≈ 0,25 – 0,5 %)	közepesen sós	a legtöbb termesztett növény termése csökken, csupán a sótűrő növények fejlődése zavartalan
8 – 16 (≈ 0,5 – 1,0 %)	sós	csak a sótűrő növények fejlődnek megfelelően
> 16 (> 1,0 %)	igen sós	csak néhány nagyon sótűrő növény él meg

\*A só %-ra a hazai módszer szerint kapott értékek csak az SP = 80 körüli talajoknál egyeznek meg a telítési kivonat EC-jéből számíthatóval

### 2.6.3. A talajnedvesség, azaz a talajoldat kémiai összetétele

A talajnedvességben különböző szervesetlen sók, szerves anyagok és gázok vannak feloldva. Az oldott ásványi sók, pozitív és negatív töltésű ionokra disszociáltan találhatóak, és az ionokat hidratburok veszi körül. A talajoldatban főként az alábbi ionok fordulnak elő:

- $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  és egyes talajoknál  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , vagy  $\text{Fe}^{2+}$  (kationok),
- $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  (anionok).

Az oldott szerves vegyületek zömét szerves savak és kis molekulájú humuszanyagok alkotják, az oldott gázok közül pedig a  $\text{CO}_2$  és az  $\text{O}_2$  a legjelentősebb.

A talajban található oldható anyagok többnyire a mállás és a talajképződés termékei, de a felszínhez közeli talajvízzel is kerülnek sók a talajoldatba. A mezőgazdaságilag hasznosított területeken ezen kívül a műtrágyák, illetve az öntözővízzel bevitt vegyületek is módosítják a talajoldat sótartalmát és sóösszetételét. Az oldott anyagok mennyisége és minősége talajonként változó. Kisebb sótartalmú talajoknál az oldat koncentrációja 1 – 2 g/l (erdőtalajok, csernozjom) vagy valamivel kisebb, szikes talajoknál viszont 15 – 20 g/l, vagy ennél is magasabb lehet. Nagy sótartalmú talajokban a talajoldat ozmózis nyomása olyan nagy, hogy a növények vízfelvételét erősen gátolja (STEFANOVITS et al., 1999).

### 2.6.4. A talajoldat összetételének változása

Nemcsak talajtípusonként találunk jellemző különbségeket, de időszakonként – a nedvességtartalom ingadozásától, a talaj biológiai tevékenységétől, a hőmérséklettől stb. függően – ugyanannál a talajnál is számottevően változhat az oldott sók mennyisége és az ionösszetétel.

Amikor a nedvesség elpárolgása nagymértékű, a talajoldat töménysége nő, csapadékos időszakban viszont jelentősen csökken a sókoncentráció. A felhígított oldatban a kevésbé oldható sók (pl.  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) is számottevően oldódhatnak, beszáradáskor viszont éppen ezek válnak ki legkönnyebben szilárd só formájában. A sók oldhatóságuk fordított sorrendjében válnak ki. A talajok vízben oldható sótartalmának mennyiségi és minőségi meghatározása mindenütt fontos, ahol a talaj sókészlete egy bizonyos értéket meghalad, vagy ennek lehetősége valószínűsíthető (pl. öntözött területen). Nyáron, a talaj melegedésekor, csökken a gázok ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) oldhatósága is, és ez is elősegíti a karbonátok (elsősorban a  $\text{CaCO}_3$ ) kicsapódását.

Egy-egy só oldhatóságára a jelenlévő többi vegyület is hatással van. Általában egy anyag oldhatóságát azok a sók csökkentik, amelyek vele azonos kationt vagy aniont tartalmaznak. Növekszik viszont az oldhatóság olyan elektrolit jelenlétében, melyben az adott sóval közös ionok nincsenek. Pl. a  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  növeli a  $\text{CaCO}_3$  oldhatóságát, de a  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ -ét – bizonyos koncentrációhatárok között – gátolja (STEFANOVITS et al., 1999).

#### 2.6.5. A talajoldatban leggyakrabban előforduló kationok

Stefanovits társaival 1999-ben az alábbiak szerint definiálta a talajokban leggyakrabban előforduló kationokat:

- **Kálium:** A kálium forrása a talajban elsősorban a földpát és a csillámok. Az Al-szilikátokból hidrolízissel szabadul fel. Természetes vegyületei a közül kloridja, szulfátja és borátja is ismert. A másodlagos ásványok közül az illit a legfontosabb. A talaj összes káliumtartalma 0,2 - 3,3 % között van. A talajokban 4 formában fordul elő: ionos formában a talajoldatban és a kolloidokon adszorbeálódva, fixálva az agyagásványokban és az ásványok kristályrácsaiban. A talajoldatban lévő és a kicserélhető kálium közötti egyensúlyt mindenekelőtt a megkötő helyekért versengő kationok (elsősorban a  $\text{Ca}^{2+}$  és a  $\text{Mg}^{2+}$ ), a talajkolloidok káliumtelítettsége, és a káliummegkötés erőssége is befolyásolják.
- **Kalcium:** A kalcium elsődleges forrása a kalcit, az aragonit, a dolomit és a gipsz. Az apatitban, és a plagioklászban is megtalálható a kalcium. A mérsékelt égövi nedves területek talajaiban 1–2 % kalcium található. A kalciumásványok az átlagos talajásványoknál valamivel gyorsabban mállanak, ezért idővel fokozatosan csökken a kalciumtartalom. A kimosódás mértékét csökkenti, hogy a  $\text{Ca}^{2+}$  és a  $\text{Mg}^{2+}$  erősen kötődik a kationcserélő helyekhez, mivel a  $\text{Ca}^{2+}$ -ionnak a  $2+$  töltéséhez képest viszonylag kicsi a hidratáltion-mérete. A kalcium teszi ki a mérsékelt égövi talajok kicserélhetőbázis-tartalmának 75 – 85 %-át. Ez egyensúlyban van a talajoldat igen csekély oldott kalcium-tartalmával. A talajoldatban a  $\text{Ca}^{2+}$  ionként vagy  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , vagy  $\text{Cl}^-$ -ionokkal képzett ionok alakjában található meg. Ha sok van a talajban, akkor kalcitként kicsapódhat.
- **Magnézium:** A magnéziumot az amfibolok, piroxének, olivinek, biotitek, valamint a kloritok, vermikulitok tartalmazzák. Emellett megtalálható a dolomitban, a magnezitban, a kalcitban, és keserűs formájában is. Átlagosan a talajok magnéziumtartalma kb. 0,5 %. A talajoldatban kétértékű magnéziumionként, vagy  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  és  $\text{Cl}^-$ -ionokkal képzett ionpárokban van jelen. A talajban a kicserélhető magnézium a legfontosabb forrás. Viselkedése a  $\text{Ca}^{2+}$ -hoz hasonló. A nem hidratált  $\text{Mg}^{2+}$  befér az ásványi szerkezet oktaédes üregeibe. A hidratált Mg-ion nagyobb mint a hidratált Ca-ion, így gyengébben kötődik a talajkolloidokon. A talajok magnéziumtartalma hamarabb merül ki, mint a kálium-, nátrium- és kalciumtartalma. A hidratált magnézium mérete miatt a sok  $\text{Mg}^{2+}$  tartalmazó talajkolloidoknak jobb a duzzadóképesége. Ez akkor következik be, ha a kationcserélő kapacitás több, mint 30 %-át a kicserélhető magnéziumionok adják. A talajoldatban kicsi a koncentrációja,

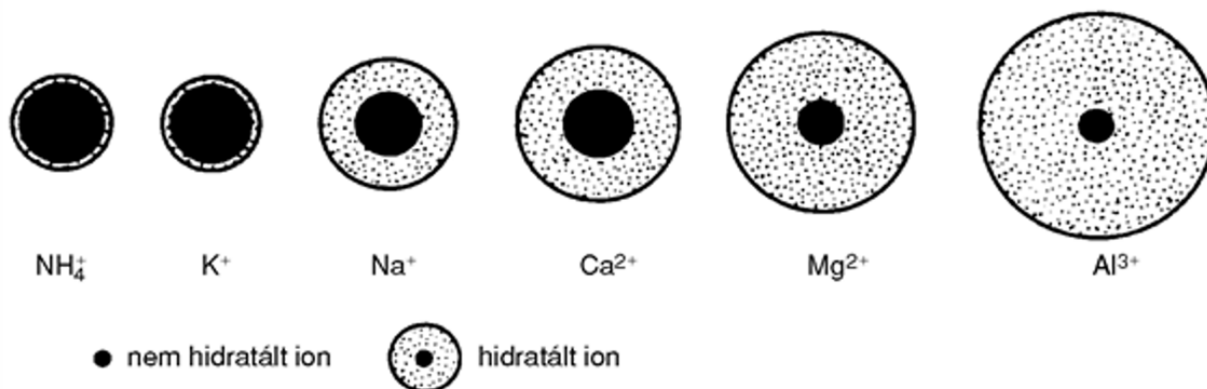
mivel a kalciumhoz hasonlóan a kationcserélő helyeken van adszorbeálódva többségében.

- **Nátrium:** Oldatokban a káliumhoz hasonlóan viselkedik, azonban a talajban már nem. A nátriumföldpátok gyorsabban bomlanak, mint a káliumföldpátok. A Na-ionok kevésbé kötődnek a kationcserélő helyeken, mint a többi bázikus kation, ezért könnyebben kimosódnak a talajból, és nagy részük végül a tengerbe kerül NaCl formájában. Száraz területeken emiatt felhalmozódhat a Na, mely diszpergálja a kolloidokat, és ez talajszerkezet romláshoz, sós és szikes talajok keletkezéséhez vezethet.

#### 2.6.6. Ionok hidrációja és a hidratburok mérete

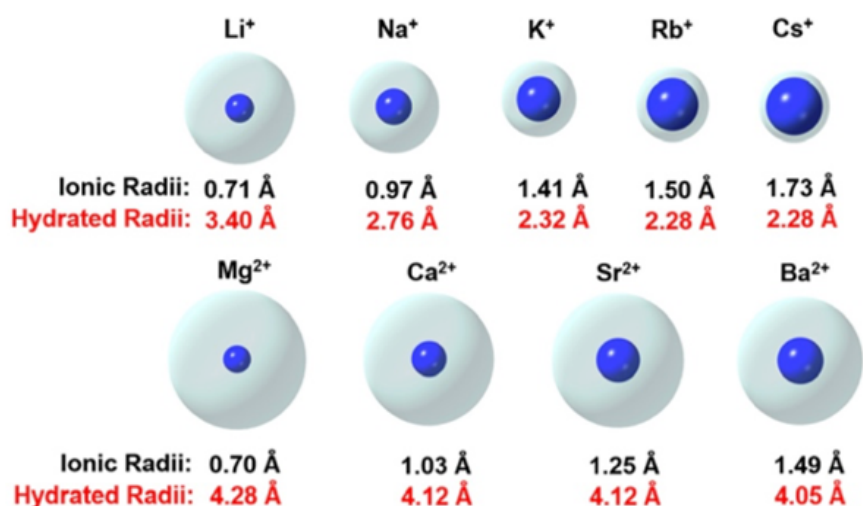
Az oldott ionok és a víz közötti kölcsönhatás nagy érdeklődésre tart számot a különböző kémiai, biológiai és környezeti folyamatokban betöltött jelentősége miatt (WALUYO et. al, 2011). Különböző kísérleti és elméleti tanulmányokban vizsgálták az ionok vizes oldatait. Az ionok elhelyezkedését vizsgálva azt találták, hogy az ionok mind az ömlesztett (OHTAKI és RADNAI, 1993; RODE et. al., 2004; MARCUS, 2009), mind a határfelületeken (GHOSAL et. al., 2005; JUNGWIRTH és TOBIAS, 2006; CRAIG és HENRY, 2009) megtalálhatók. Elméleti szempontból az egyszerű sóoldatok termodinamikai elemzése azt a képet adja, hogy az ionok inkább a folyadék tömegében, mintsem a vizes/gőz határfelületen találhatók (CHATTORAY és BIRDI, 1985; XANTHEAS és VOHT, 2009).

A hidratburok méretét vizes oldatban a 19. ábra szemlélteti. Minél kisebb a dehidratált kation átmérője és minél nagyobb a töltése, annál vastagabb hidratátszféra veszi körül vizes oldatban. Ez befolyásolja a hidratált ionok mobilitását is. A kálium a talajban a legmobilisabb elem, és mint ilyen könnyen hozzáférhető a növények számára, azonban nagyfokú mobilitása miatt ügyelni kell arra, hogy ne mosódjon ki a talaj telítetlen (vadózus) zónájából (DAYO-OLAGBENDE és EWULO, 2021).



19. ábra A vizes hidratburok nagysága az egyes elemeknél a talajban (STEFANOVITS et al., 1999)

Rengasamy 1998-ban kimutatta, hogy a Na diszpergáló hatása nagyobb, mint a K-é, és hogy a Ca flokkuláló hatása nagyobb, mint a Mg-é. Ezeket a kationokat hagyományosan bázis- vagy bázisképző kationoknak nevezzük (RENGASAMY, 2016). Ezért a 20. ábrán bemutatott hidratburok méretek a talaj összetétele szempontjából döntő fontosságúak.



20. ábra Néhány gyakori ion és hidratált sugár (effektív méret) angströmben (LUO et. al., 2019)

Összehasonlítva ezeket az elemeket a hidratáló mérete alapján elmondható, hogy a Na és Ca könnyen helyet cserélnek a talajokban, míg K és a Mg végérvényesen beépülnek az ásványi alkotórészekbe.

#### 2.6.7. Elektromos vezetőképesség elvén működő talajszenzorok

A talajok szikesedése az egyik kritikus globális probléma, amely a földterületek termelékenységét fenyegeti (HOSSAIN, 2019). A világ több mint 100 országából jelentették a sós talajok előfordulását, és több mint 1 125 millió hektárnyi területet fed le (WICKE et. al., 2011). A problémára már a nyolcvanas években Massoud (1981) felhívta a figyelmet. A FAO-nak készített jelentésében megállapította, hogy a talajok szikesedése évente körülbelül 1 - 2 %-kal növekszik, és a becslések szerint 2050-re a rendelkezésre álló szántóföldek 50 %-át érintve lehet benne, ami komoly veszélyt jelentene a globális mezőgazdaság fenntartható fejlődésére.

A geoelektromos módszerek bebizonyították, hogy képesek a fontos fizikai-kémiai talajparaméterek térbeli változásának hatékony kimutatására. Az elektromos paraméterek (elektromos vezetőképesség vagy fajlagos ellenállás) és más talajtulajdonságok közötti kapcsolatok azonban nem mindig következetesek a különböző területeken. Ez bizonyos mértékig a talajtérképezéshez használt műszerek jellemzőiből adódhat (GEBBERS et al., 2009). Az elektromos vezetőképesség (EC) mérése a precíziós gazdálkodáshoz szükséges talajvizsgálat egyik in situ eszköze, és ennek megfelelően az EC-érzékelők fejlesztésének nagyszámú szakirodalmi van. Ezek a detektorok jellemzően és hagyományosan 4 elektródával rendelkeznek (LI et al., 2006; SEIFI et al., 2010; PEI et al., 2012). A hagyományos áram-feszültség négy elektródás módszer alkalmas a helyszíni mérésre, és célul tűzhető ki egy olyan helyszíni talaj EC-detektor kifejlesztése, amely alacsony árú, könnyen kezelhető, nagy mérési pontosságú, integrált ellenőrzési eljárásokkal és adatfeldolgozási eljárásokkal rendelkezik (PEI et al., 2012). A talaj látszólagos elektromos vezetőképessége az egyik legegyszerűbb, legkevésbé költséges talajmérés, amellyel hasznos információkat nyerhetünk a talaj jellemzőiről, amelyeknek létfontosságú szerepük van a precíziós mezőgazdaságban (SEIFI et al., 2010).

A talajok EC-értékének értékelésére szolgáló érzékelők használata lehetőséget kínál e korlátok leküzdésére. Ezek az érzékelők három elektromágneses jelenségen alapulnak, nevezetesen az elektromos ellenálláson, az elektromágneses indukción és a reflektometrián (VISCONTI és DE PAZ, 2016). A többfrekvenciás (Multi-frequency, MF) és a többtekercses (Multi-coil, MC) a kereskedelmi forgalomban kapható elektromágneses indukciós érzékelők két típusa. Bár működési elvük hasonló, elméleti és tényleges vizsgálati mélységük, valamint felbontóképességük eltérő lehet. Tekintettel arra, hogy a talaj tulajdonságainak nem invazív feltérképezésére a közelmúltban

nagy hangsúlyt fektettek, a legmegfelelőbb műszer kiválasztása kritikus fontosságú az EC és a megcélzott tulajdonságok közötti szilárd összefüggések támogatása szempontjából. Az MC érzékelő teljesítményét kevésbé befolyásolták a változó időjárási körülmények, és összességében erősebb korrelációt mutatott mind az időben stabil, mind a változó talajtulajdonságokkal (ALTDORFF et al., 2020). A talaj elektromos vezetőképessége számos tényezőtől függ, beleértve a talaj fizikai és kémiai tulajdonságait, a nedvességtartalmat és az oldott sók jelenlétét. A terepen ezek a tényezők jelentősen eltérhetnek a különböző talajtípusok, mélységek és helyszínek között. Ennek eredményeképpen az EC és a talajtulajdonságok közötti kapcsolat megértése kulcsfontosságú a hatékony talajgazdálkodás és a precíziós mezőgazdaság szempontjából (ADAMCHUK et al., 2004; JOHNSON et al., 2005; KIM és PARK, 2021).

## 2.7. A releváns bibliográfiai adatkeret leíró elemzése

A szakirodalom kritikai értékelésére a kutatásomban mértékadó **angol nyelvű** tudományos publikációkat gyűjtöttem és klasztereztem. Eszközként a szcientometriai és bibliometriai kvantitatív elemzéséhez a *bibliometrix* GPL-3 szabad licenyes szoftver beépített függvénykészletét alkalmaztam. A *bibliometrix* a négy fő bibliográfiai adatbázisból származó adatokkal dolgozik. Ezek a SCOPUS, a Clarivate Analytics Web of Science, a Cochrane Database of Systematic Reviews (CDSR) és RISmed PubMed/MedLine. Én a SCOPUS adatbázisát használtam az elemzésre. A *bibliometrix* eszköz az idézettség, a kapcsolódás, a tudományos együttműködés és a társszavak elemzése céljából. (ARIA és CUCCURULLO, 2017).

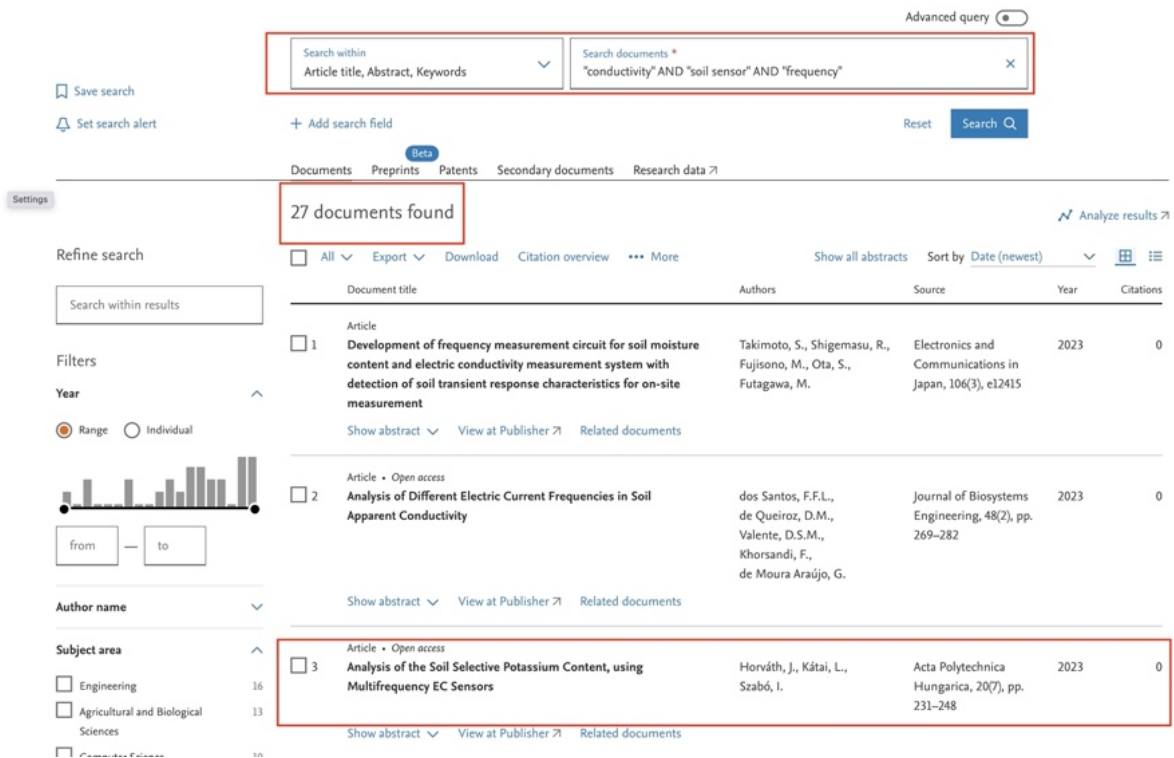
A 2004-ben alapított SCOPUS (<https://www.scopus.com>) nagyfokú rugalmasságot kínál a bibliometriai felhasználók számára, lehetőséget biztosít a különböző mezőkre történő lekérdezésre, mint például címek, összefoglalók, kulcsszavak, hivatkozások stb. A SCOPUS viszonylag könnyen lehetővé teszi az adatlekérdezések letöltését, bár vannak bizonyos korlátok a nagyon nagy eredményhalmazok esetében. A forrásadatbázis elkészítése és a keresőszavak alapján szűkítése nagyon fontos lépés a megfelelő elemzés elkészítéséhez. A szűkítés lépcsőit és a keresés eredményeit a SCOPUS-ban a 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat Találatok a keresőszavakra és azok volatilitása

Keresőszavak, kapcsolatok	Találatok száma a keresés időpontjával (db)					
	2023.11.24	2023.12.18	2023.12.27	2024.01.01	2024.01.15	2024.01.31
agriculture	457 024	460 247	461 592	461 794	463 804	465 696
precision AND agriculture	19 596	19 847	19 951	19 961	20 114	20 278
precision AND agriculture AND soil	5 826	5 903	5 929	5 929	5 966	5 999
precision AND agriculture AND soil AND sensor	1 885	1 915	1 924	1 924	1 939	1 950
precision AND agriculture AND soil AND sensor AND conductivity	224	227	229	229	232	232
soil AND sensor AND conductivity	1 928	1 944	1 948	1 949	1 960	1 971
"soil sensor" AND conductivity	137	137	137	137	138	138
"soil sensor" AND conductivity AND frequency	27	27	27	27	27	27

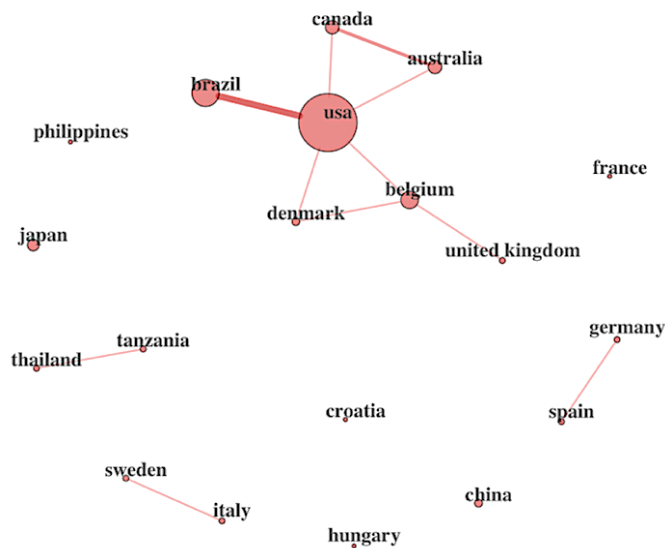
Az adatbázis elemzésének a lépései:

- **Adatok lekérdezése** a SCOPUS-ban kulcsszavak alapján és forrásadatbázis készítése. a *talajszenzor*, *konduktivitás* és *frekvencia kulcsszavakkal*. Ez a forrásadatbázis tartalmazza a kutatási területemhez szorosan kapcsolódó 27 közleményt ahogyan a 21. ábra is mutatja.



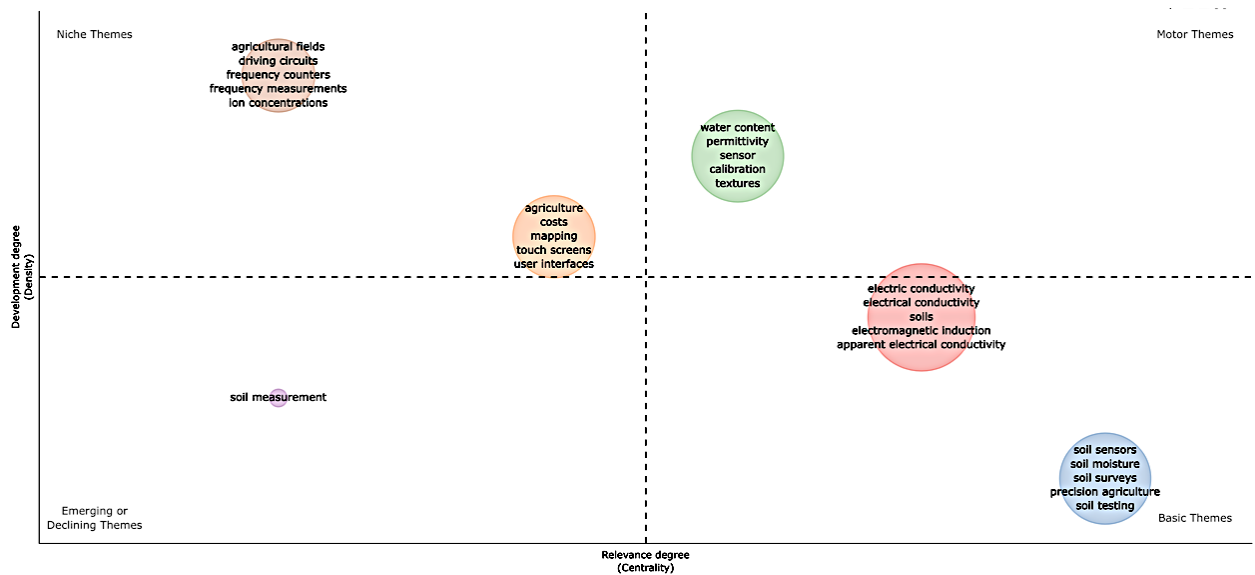
21. ábra Képernyőkép a lekérdezésről a SCOPUS adatbázisban

- **Adatok feltöltése a bibliometrix** elemzőszoftverbe és az adatbázis konvertálása
- **Bibliometriai elemzés elkészítése** a beépített függvényekkel
  - Adatelemzés
  - Országok együttműködési diagramja (22. ábra) ahol az országok klaszterek mérete a publikációk számával arányos és az összekötő élek pedig megmutatják a hálózati élek méretét. Látható, hogy a legtöbb publikáció egyesült államokbeli kutatáson alapul erős kollaborációban brazil, kanadai, ausztrál belga és dán műhelyekkel.



22. ábra Országok kollaborációs diagramja Kamada-Kawai módszerrel





25. ábra Tematikus térkép a kulcsszavak előfordulására

Összeségében megállapítható, hogy a kutatási terület, azaz a talajok ásványianyag ellátottságának megmutatása és a megmutatás technológiájának kidolgozása releváns kutatási téma, hiszen a 3. táblázat elkészítéséig (2024.01.31) 1 971 kötődő publikáció született a talaj konduktivitás alapú szenzoros kutatása témakörben. Megállapítható, hogy a témakör még nem teljesen feltárt stádiumban van, mert csak 27 olyan publikáció található a SCOPUS adatbázisában amely a címszavak alapján a mérési frekvenciát is változónak tekintette. A szakirodalom a bibliometriai elemzés is igazolja, hogy a kutatásom újszerű megközelítése okszerű és időszerű.



### 3. ANYAG ÉS MÓDSZER

#### 3.1. 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.

#### 3.2. 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 26. ábrán látható talajmintát Gödöllő-Szárítópusztán a MATE Tangazdaságának a területéről, szántóföld 0-20 cm-es rétegéből gyűjtöttem (47° 35' 47,65" É, 19° 21' 18,54" K) 232 m tengerszint feletti magasságból. A talaj textúrája homok volt kevesebb mint 0,5 % humusz tartalommal. A felhasznált talajt, mint méréseim munkadarabját a MATE ÖVKI Környezetanalitikai Vizsgálólaboratórium vizsgálta be. A vizsgálati jegyzőkönyvet az 5. Mellékletben mutatom be.



26. ábra A kísérletekhez felhasznált talaj előkészítése a laboratóriumban

A talajmintán szitaanalízist végeztem a szemcsés halmazok frakció szerinti szétválasztásának elvén. A vizsgálatba bevont minta a 27. ábrán bemutatott gravitációs erőterben vibrációs asztalra helyezett fokozatosan csökkenő lyukbőségű rostákon esik át. Ebből következően különböző mennyiségű és szemcseméretű dara marad fent az egyes rostákon. A rostán fentmaradt szemcsék mennyiségi aránya a felöntött kiinduló mennyiséghez képest jellemző az eredetileg vizsgált halmazra.



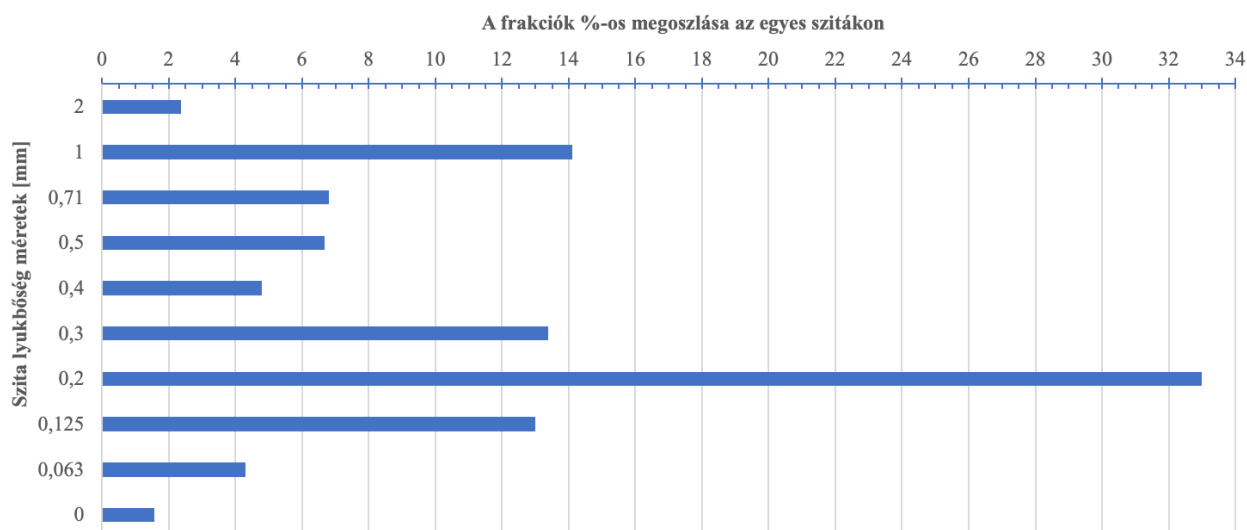
27. ábra A CISA BA200N laboratóriumi szita (CISA BA200N prospektus)

A szakszerűen vett ismert mennyiségű mintát felöntve a felső szitára a vibrációs asztalt működtetve az előírt várakozási időt követően CISA BA200N szitagépről egyesével leemelt szitákon fennmaradt frakció tömegét mértem a KERN PCB analitikai mérlegen. A mérlegen a felső szitán fennmaradt frakció tömegét feljegyezve hozzáöntöttem és lemértem a következő szitán fennmaradt frakció tömegét. Ezt a folyamatot az utolsó (vakszita) szitaelem esetében is elvégeztem. Ekkor minimális veszteséggel vissza kell kapni az ismert tömegű mintánk mennyiségét ezzel is ellenőrizve a mérési folyamat menetét. A rögzített adatok alapján meghatároztam a kiindulási (100 %) frakcióhoz képest az egyes szitákon fennmaradó frakció százalékos arányát. Az egyes szitákon fennmaradt dara tömege és az adott szita lyukbőssége alapján megállapítottam a szitamaradék halmaz sűrűségfüggvényét. A szita lyukbősségét a mérlegen mért dara tömegét, a tára értékével csökkentett számított értéket a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat A szitaanalízis eredménye

Szita	Szita sorozat (mm)	Szita köz $(X_i + X_{i+1})/2$ (mm)	Szitán fennmaradt mennyiség (g)	Szitán fennmaradt kumulált mennyiség (g)	Szitamaradék (%)
1. szita	2	2	8,94	8,94	2,37
2. szita	1	1,5	53,25	62,19	14,11
3. szita	0,71	0,855	25,7	87,89	6,81
4. szita	0,5	0,605	25,19	113,08	6,68
5. szita	0,4	0,45	18,11	131,19	4,80
6. szita	0,3	0,35	50,45	181,64	13,37
7. szita	0,2	0,25	124,45	306,09	32,98
8. szita	0,125	0,1625	49,06	355,15	13,00
9. szita	0,063	0,094	16,25	371,4	4,31
10. szita	0	0,0315	5,92	377,32	1,57
<b>Összesen (g):</b>			<b>377,32</b>		
<b>Veszteség (g):</b>			<b>-0,01</b>		
<b>Ellenőrzés (g):</b>			<b>377,31</b>		

A szitán fennmaradt szemcsék tömegének és méretének ismeretében jellemeztem a mintahalmazt. Ábrázoltam a szitamaradék százalékos eloszlását a szemcseméret (szita lyukméret) függvényében. (28. ábra) A diagramból leolvashatók a szita lyukbősség függvényében az adott szitákon fennmaradt anyagmennyiség % - os értéke.



28. ábra A szitammaradék százalékos eloszlása a szemcseméret (szita lyukméret) függvényében

### 3.3. A felhasznált oldatok

A méréseim során a talajnedvességben oldott sók kationjainak a koncentrációját kívántam vizsgálni természetes körülmények között. Méréseimhez olyan sókat (5. táblázat) 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, keverékben. 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 5. táblázatban leírt sókat használtam fel.

5. táblázat a vizsgálatban szereplő sók jellemzése

Oldat	CAS	Moláris tömeg (g mol <sup>-1</sup> )	Elnevezés	Ásványtani elnevezés	Jellemzői	Oldódás energiája
KCl	7447-40-7	74,550	kálium- klorid	szilvin	fehér színű kristályok	endoterm
CaCl <sub>2</sub>	10043-52-4	110,980	kalcium- klorid		fehér színű, apró lemezes	erősen exoterm

- A következő kétkomponensű oldatokat készítettem el és használtam a mérésekhez:
  - 100 % KCl – 0 % CaCl<sub>2</sub>.
  - 80 % KCl – 20 % CaCl<sub>2</sub>
  - 60 % KCl – 40 % CaCl<sub>2</sub>
  - 50 % KCl – 50 % CaCl<sub>2</sub>
  - 40 % KCl – 60 % CaCl<sub>2</sub>
  - 20 % KCl – 80 % CaCl<sub>2</sub>
  - 0 % KCl – 100 % CaCl<sub>2</sub>

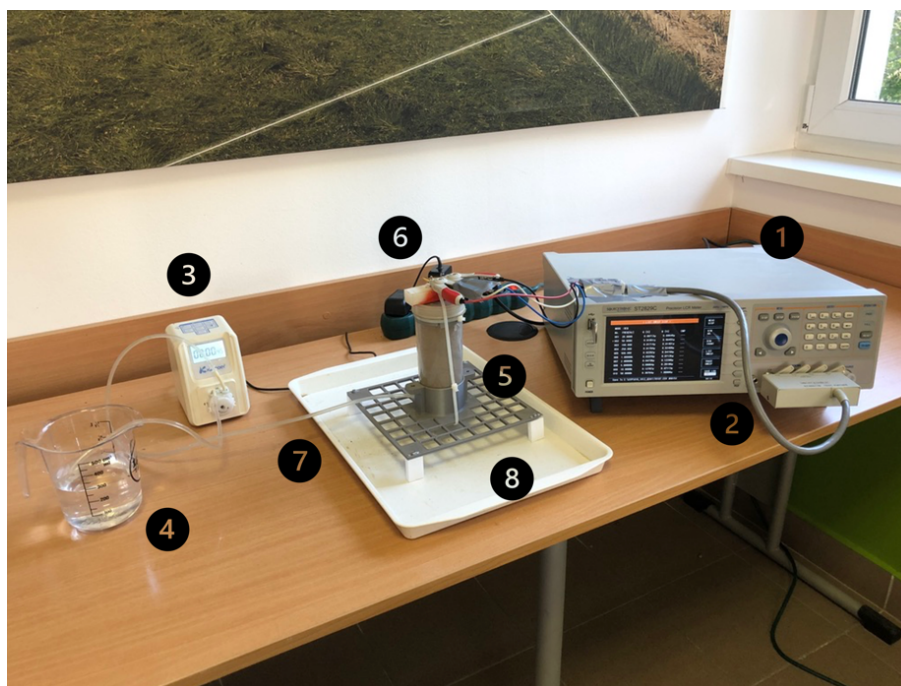
A mérések között desztillált vízzel öblítettem a mérőeszközöket, hogy az előző mérés során az elektródákön fennmaradó ionok ne szennyezzék a következő mérés oldatait.

### 3.4. A mérőkörök specifikációja

#### 3.4.1. A talajpasztával végzett mérések mérőköre

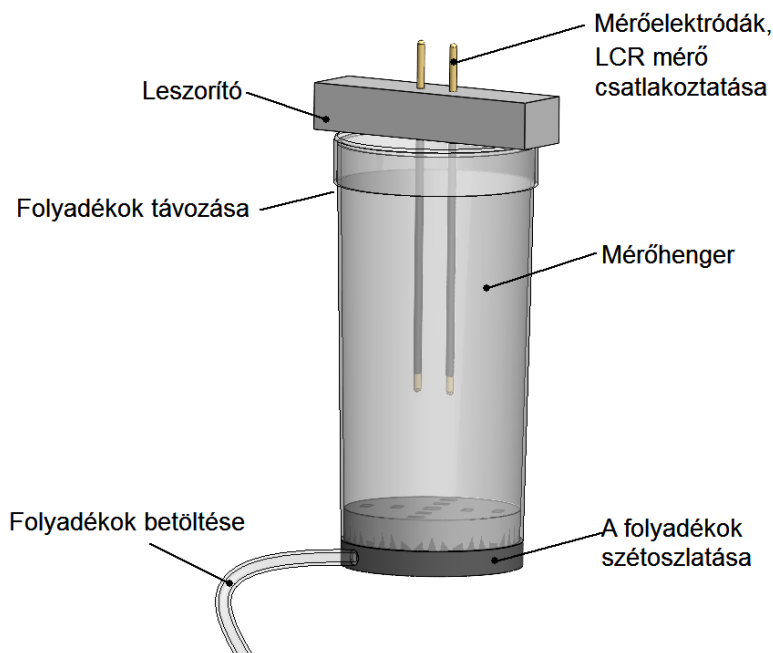
A 29. ábrán látható mérőkört építettem meg, melynek elemei:

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. A mérőhengert a 30. ábrán részletesen is bemutatom
6. Mérőelektródák 2 db, Ø2 mm, hossza: 80 mm teljes hosszban szigetelt, szigetetlen rész hossza 5 mm, szondatávolság 12 mm, anyaga rozsdamentes acél
7. Csővezeték, belső Ø3 mm
8. Tálca emelővel



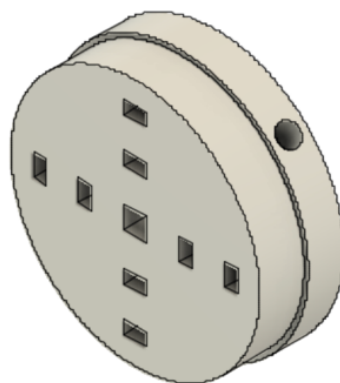
29. ábra A mérőkör a talajpasztával végzett kísérletekhez

A mérőhenger kialakítását szemlélteti a 30. ábra. A mérések során az előre bekevert oldatot a KSP-F01A perisztaltikus adagolószivattyú nyomta a talajjal előzetesen megtöltött mérőhenger alján kialakított belépési ponton keresztül a mérőhengerbe.



30. ábra A mérőhenger

Az oldat a 31. ábrán látható, 3D nyomtatással készített, egyedi elosztófejen keresztül került a KSP-F01A perisztaltikus adagolószivattyú segítségével bepréselésre a henger teljes keresztmetszetén. Az elosztófej biztosította az oldat egyenletes betöltését a mérőhenger teljes keresztmetszetén, hogy a mérőhengerbe zárt talaj egyenletesen telítődése biztosított legyen.



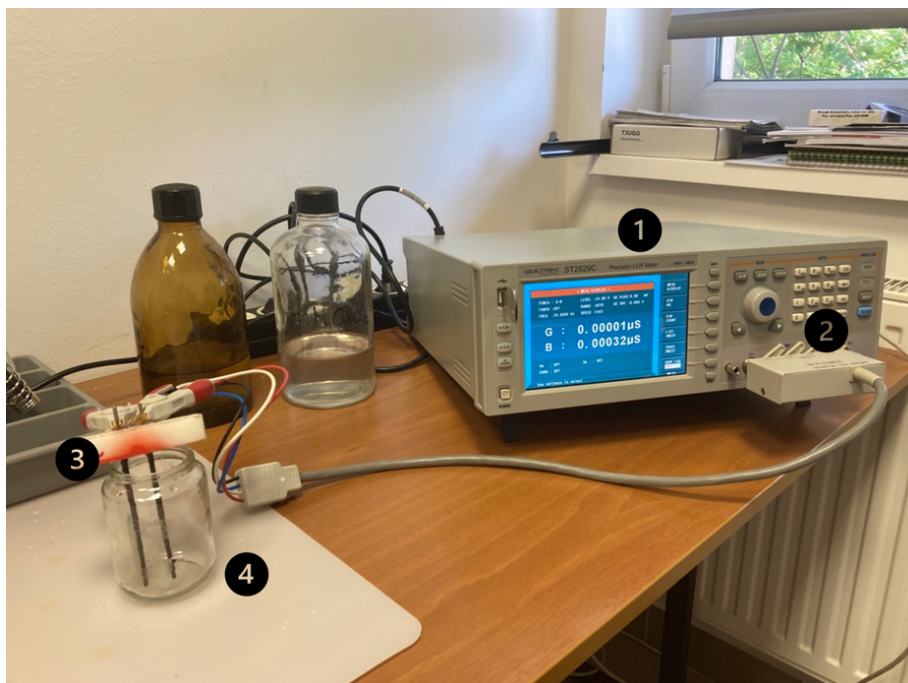
31. ábra A folyadék egyenletes elosztására szolgáló elosztófej

Az oldat a mérőhenger tetején kialakított perforáción hagyta el a mérőhengert, és a mérőhenger alatti tálcán gyűlt össze, ahonnan a felhasznált kimeneti folyadékot folyamatosan ürítettem.

### 3.4.2. Mérőkör kétfázisú oldatok vizsgálatához

A keverék oldat méréséhez a 29. ábra szerint mérőkört egyszerűsítettem és használtam az előre bekevert oldatok méréséhez. A mérőkör elemei a 32. 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, szigetetlen rész hossza 5 mm, szondatávolság 12 mm, anyaga rozsdamentes acél
4. 100 ml űrtartalmú mérőpohár



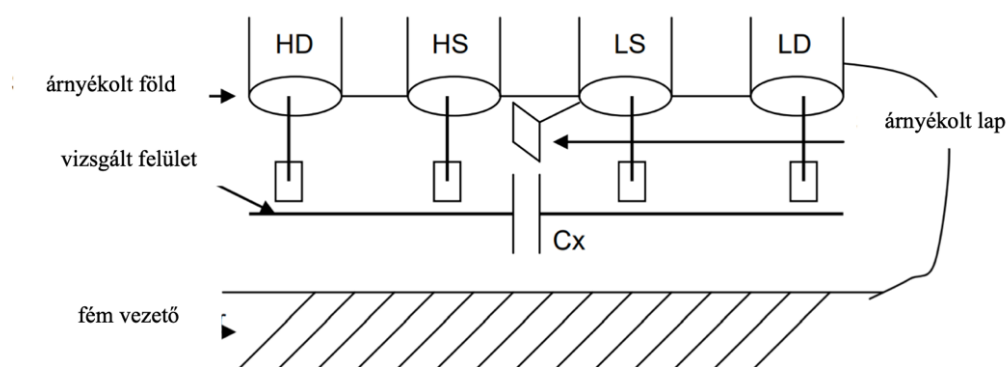
32. ábra A mérőkör átalakítása a kétfázisú oldatokhoz

### 3.4.3. 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 tekintem. 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 (ALTDORFF et al., 2020). 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 33. ábra mutatja be.



33. ábra A zavaró jelek kiküszöbölésére szolgáló mérési módszer (SOURCETRONIC)

A mérési elv lényege, hogy a mérőpont megfelelő kialakításával és árnyékolt vezetékek használatával a mérési pontatlanság csökkenthető. A mérőműszer és a szondák pontos csatlakozását a 34. ábrán látható SOURCETRONIC ST26011B műszerbekötés biztosította.



34. ábra SOURCETRONIC ST26011B műszerbekötés



A műszer a kimenetére ismert frekvenciájú ismert amplitúdójú és ismert periódus idejű jelsorozatot állít elő a beállított paramétereknek megfelelően. A műszer méri a kimeneti függvény és a válaszfüggvény közötti fáziseltolás ( $\phi$ ) mértékét és számítja a következő értékeket:

- $|Z|$  – Látszólagos ellenállás (Abszolút impedancia) [ $\Omega$ ];
- $|Y|$  – Látszólagos vezetés (Abszolút admittancia) [Siemens];
- $R$  – Ellenállás (Rezisztencia) [ $\Omega$ ];
- $G$  – Egyenáramú vezetés (Konduktancia) [Siemens];
- $B$  – Vezetőképesség, /tekeres, kondenzátor/ (Susceptancia) [Siemens];

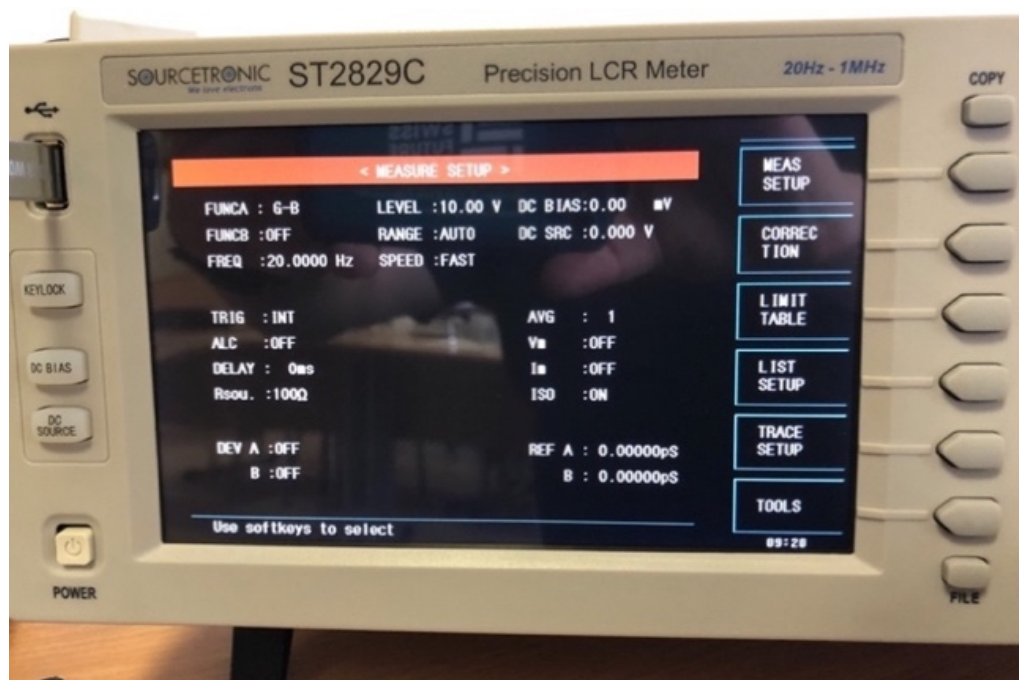
A látszólagos ellenállás meghatározása a következő összefüggéssel írható le:

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G+jB} [\Omega] \quad (7)$$

A látszólagos vezetés meghatározása a következő összefüggéssel határozható meg:

$$|Y| = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} [\text{Siemens}] \quad (8)$$

A mérés során a műszer automata üzemmódban a kimenetén kiadja az előre beprogramozott frekvencia sort és méri az arra kapott válaszfüggvény értékeit. A műszert „G–B” azaz „Konduktancia-Susceptancia” funkcióban használtam, azaz a mérés G és B értékeit tároltattam le a mérőeszközzel az USB-portra csatlakoztatott háttértárolóra. A műszer felbontása 0,00001 nS, az alappontosság 0,05 %. A mérés során az elektródák feszültségét 10 V DC-re állítottam. A műszer kimeneti impedanciája 100  $\Omega$  volt ahogyan a 35. ábrán látható *Measure Setup* azaz mérés beállítását összefoglaló képernyőkép is bemutatja.



35. ábra A mérés paraméterezése

A 36. ábra a mérés során a műszer képernyőképét mutatja egy rész-mérési szekvenciával.



36. ábra Egy mérés képernyőképe

A mérés feldolgozásánál, elemzésénél a G-Konduktanciára a talajoldat, mint ellenállás reciprok értékére azaz az elektromos vezetőképesség értékére voltam kíváncsi, a B-Susceptanciával azaz a tekercs induktív, látszólagos ellenállásával nem dolgoztam tovább. A dolgozatom további részében a G-konduktancia értékre mint EC értékre hivatkozom.

### 3.5. Az adatfeldolgozás folyamata

#### 3.5.1. Egyfázisú oldat talajpasztában való mérése

Az adatok kinyerését és a feldolgozását egy mintarekordon mutatom be. Először összeállítottam a 29. ábrán bemutatott mérőkört a vizsgálatomhoz. Minden új mérést a KSP-F01A perisztaltikus adagolószivattyú (37. ábra) 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 (30. ábra) alján kialakított belépési ponton, az adagolófejen (31. ábra) keresztül a mérőhengerbe.



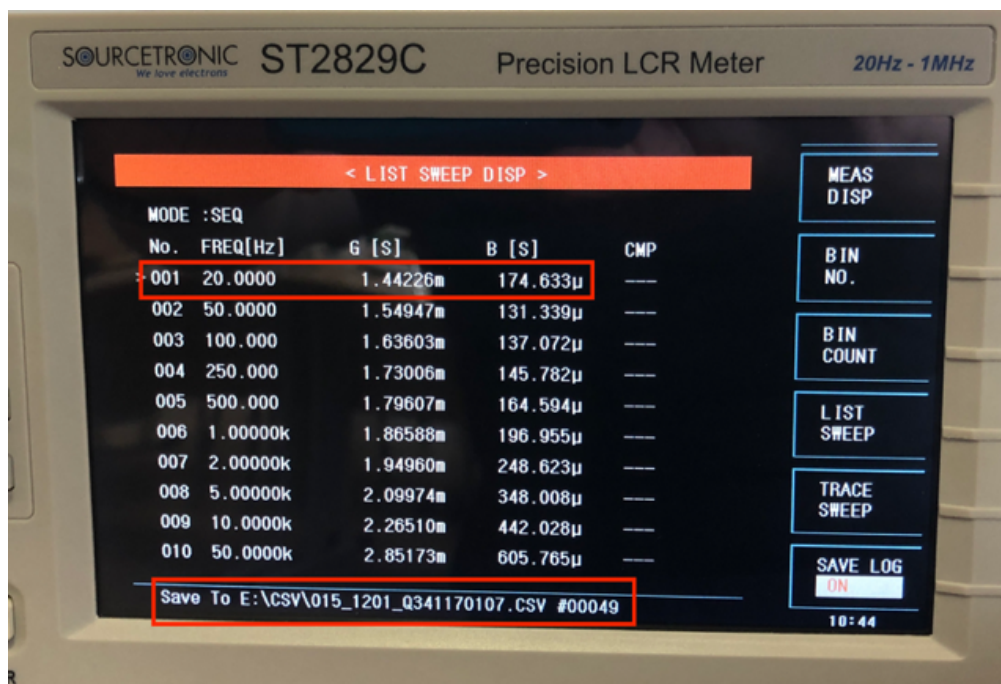
37. ábra KSP-F01A perisztaltikus adagolószivattyú

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 mS érték alá, további 100 ml-ként adagolt desztillált vízzel folytattam az átmosást. A méréseket 38. ábrán látható módon dokumentáltam a kísérletek reprodukálhatósága miatt.

<p style="text-align: center;"><b>Mérési Napló</b> Készítette: Horváth János 2021.12.01</p> <p>Általános:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• LCR mérő beállítás: HJ10 paramétertábla beolvasása</li><li>• Perisztaltikus pumpa kalibrálás: 0.5ml/s azaz 50mg folyadék 100s alatt</li></ul> <p>MÉRÉS: 0,5M KCl bemérése</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Mérés – Maradvány<ul style="list-style-type: none"><li>• Kezdeti időpont: 11:04</li><li>• Fájl: 015_1201_Q341170107</li><li>• Mérés rekord: 000</li><li>• Felhasznált oldat: nincs, az utolsó mérés utáni maradvány értékek felvétele</li><li>• Mennyiség:</li></ul></li><li>2. Mérés – Vízzel betöltés<ul style="list-style-type: none"><li>• Kezdeti időpont: 11:08</li><li>• Fájl: 015_1201_Q341170107</li><li>• Mérés rekord: 890</li><li>• Felhasznált oldat: desztillált víz</li><li>• Mennyiség: 300ml</li></ul></li><li>3. Mérés – KCl feltöltés<ul style="list-style-type: none"><li>• Kezdeti időpont: 11:17</li><li>• Fájl: 015_1201_Q341170107</li><li>• Mérés rekord: 2100</li><li>• Felhasznált oldat: 0,5M KCl</li><li>• Mennyiség: 300ml</li></ul></li><li>4. Mérés – Vízzel betöltés<ul style="list-style-type: none"><li>• Kezdeti időpont: 11:27</li><li>• Fájl: 015_1201_Q341170107</li><li>• Mérés rekord: 2950</li><li>• Felhasznált oldat: Desztillált víz</li><li>• Mennyiség: 300ml</li></ul></li></ol>
---

38. ábra A szkennelt mérési jegyzőkönyv

Jelen folyamat a 0,5 M koncentrációjú egyfázisú KCl talajoldat mérését követi végig egy rekordon. Mérés közben a SOURCETRONIC ST2829C LCR mérőkészüléken nyomon követhető a mérés lefolyása. A 39. ábrán látható pillanatfelvételen a készülék éppen a 49. rekordot méri és menti a külső USB meghajtóra a *015\_1201\_Q341170107.csv* fájlba. Ez a rekord a 20 Hz mérőáram frekvenciánál  $G = 1,44226$  mS értékkel tér vissza.



39. ábra A mérés pillanatfelvétele

A mérés eredményként kapott *015\_1201\_Q341170107.csv* fájlt a Microsoft Excel táblázatkezelőjével dolgoztam fel. A fájlt beolvasása után a 40. ábrán látható képernyőmentésben az előzőekben hivatkozott adatrekord és a fájl neve az Excel munkalapján.

31	List,FREQ[Hz],250.000k, 3.49841e-03, 5.49377e-04, 0, 0,11,1mt ,,
32	List,FREQ[Hz],500.000k, 3.71147e-03, 5.14833e-04, 0, 0,12,1mt ,,
33	List,FREQ[Hz],750.000k, 3.82021e-03, 5.16976e-04, 0, 0,13,1mt ,,
34	List,FREQ[Hz],1.00000M, 3.89549e-03, 5.34095e-04, 0, 0,14,1mt ,,
35	List,FREQ[Hz],20.0000, 1.44226e-03, 1.74633e-04, 0, 0,0,1mt ,,
36	List,FREQ[Hz],50.0000, 1.54947e-03, 1.31339e-04, 0, 0,1,1mt ,,
37	List,FREQ[Hz],100.000, 1.63603e-03, 1.37072e-04, 0, 0,2,1mt ,,
38	List,FREQ[Hz],250.000, 1.73006e-03, 1.45782e-04, 0, 0,3,1mt ,,
39	List,FREQ[Hz],500.000, 1.79607e-03, 1.64594e-04, 0, 0,4,1mt ,,
40	List,FREQ[Hz],1.00000k, 1.86588e-03, 1.96955e-04, 0, 0,5,1mt ,,
41	List,FREQ[Hz],2.00000k, 1.94960e-03, 2.48623e-04, 0, 0,6,1mt

015\_1201\_Q341170107 +

40. ábra A .csv fájl beolvasása

Beolvasás után a fájlt konvertáltam és kialakítottam az 41. ábrán látható nyers adatbázist.

Belső Rekord	Pozíció	ID#	Rekord	Frekvencia [Hz]	G [mS]	B [mS]
2	11	2,11	44	100k	3,149990	0,605285
2	12	2,12	45	250k	3,498410	0,549377
2	13	2,13	46	500k	3,711470	0,514833
2	14	2,14	47	750k	3,820210	0,516976
2	15	2,15	48	1000k	3,895490	0,534095
3	1	3,1	49	20	1,442260	0,174633
3	2	3,2	50	50	1,549470	0,131339
3	3	3,3	51	100	1,636030	0,137072
3	4	3,4	52	250	1,730060	0,145782
3	5	3,5	53	500	1,796070	0,164594
3	6	3,6	54	1k	1,865880	0,196955
3	7	3,7	55	2k	1,949600	0,248623
3	8	3,8	56	5k	2,099740	0,348008
3	9	3,9	57	10k	2,265100	0,442028
3	10	3,1	58	50k	2,851730	0,605765

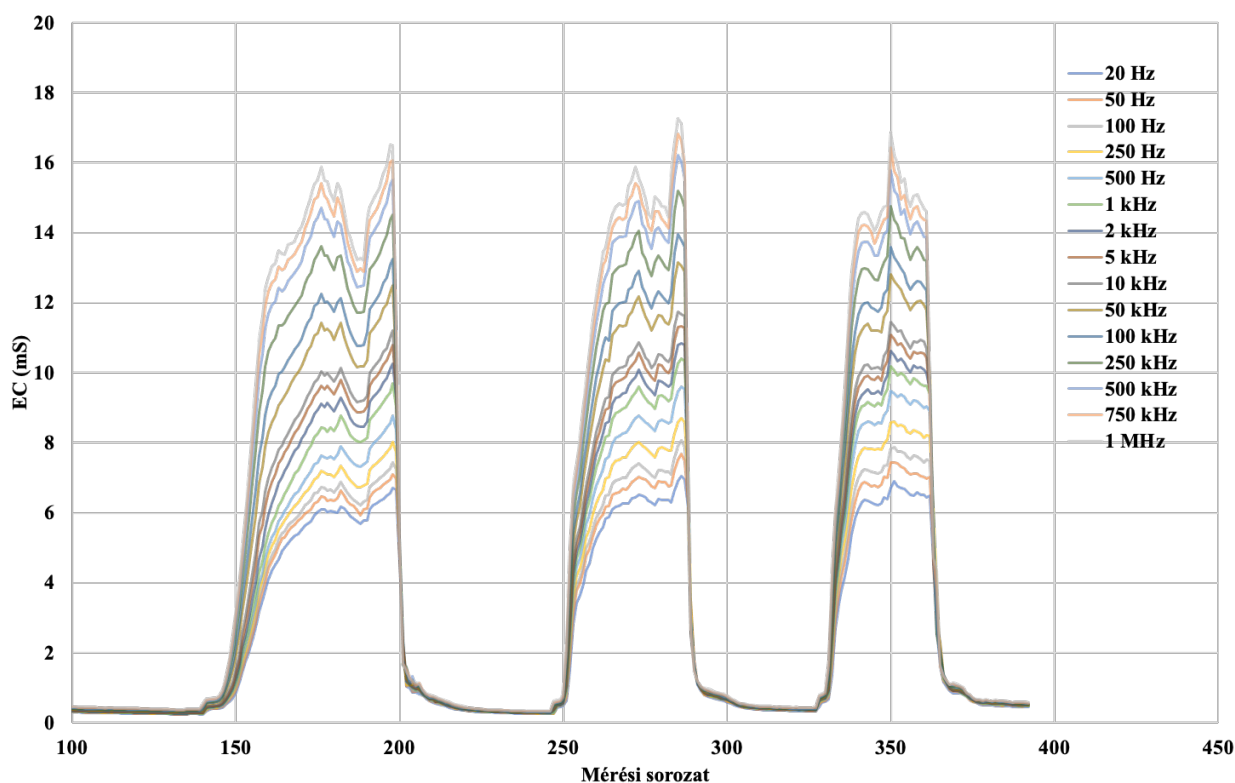
41. ábra Az adatbázis

A nyers adatbázisból kimutatást (pivot táblát) készítettem, amely egy olyan mátrix amely értelemszerűen összerendezi az eddigi táblázatos adatbázis G értékét a megadott paraméterre, ebben az esetben a mérési frekvenciákra. Ettől a ponttól kezdve rekordnak az egy mérési szekvencián (a teljes frekvencia mérési sorozaton) történő méréseket nevezem. Az 42. ábrán látható a kitüntetett rekord a kimutatásba berendezve.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		20 Hz	50 Hz	100 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz
2	1	1,42994	1,56066	1,62348	1,7184	1,7845	1,85581	1,9409	2,09383	2,26
3	2	1,43692	1,56757	1,63096	1,7253	1,7913	1,8616	1,94586	2,09748	2,2
4	3	1,44226	1,54947	1,63603	1,73006	1,79607	1,86588	1,9496	2,09974	2,2
5	4	1,4466	1,57883	1,64147	1,73531	1,80078	1,87011	1,9537	2,10336	2,26
6	5	1,45078	1,58081	1,65636	1,74011	1,80577	1,87525	1,9583	2,10751	2,27
7	6	1,45537	1,57866	1,66038	1,74414	1,80963	1,87885	1,96148	2,11026	2,27
8	7	1,45884	1,58573	1,66461	1,7479	1,81318	1,88229	1,96474	2,11266	2,27
9	8	1,46153	1,57072	1,66731	1,75073	1,81589	1,88835	1,96982	2,11662	2,27
10	9	1,46498	1,58308	1,66161	1,75422	1,81898	1,88816	1,97017	2,1171	2,27
11	10	1,46747	1,57987	1,66553	1,75808	1,8228	1,89182	1,97375	2,1204	2,28

42. ábra A pivot tábla részlete a kitüntetett mérési eredménnyel

Az így megformált adatbázisból elkészíthető a mérésre jellemző diagram, amely az 43. ábrán látható. A diagramon látható, hogy az adott koncentrációval minden mérési frekvencián 3-szor ismétlem az oldattal való feltöltést úgy, hogy a mérések között desztillált vízzel átmostam a mérőkört.



43. ábra Az 0,5 M koncentrációjú KCl talajoldat mérési szekvenciánkénti EC érték diagramja

A kimutatásdiagramból készítettem el a rekordok eltérésvizsgálatát. Az 1 MHz-es adatsort vizsgáltam, mindig az előző rekordban lévő értékkel hasonlítottam össze a mérést mindig a szomszédos értékeket vizsgáltam. Az értékvizsgálatot mutatom be a 44. ábrán.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Mérés	Rekor <sup>+</sup>	20 Hz	50 Hz	100 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	50 kHz	100 kHz	250 kHz	500 kHz	750 kHz	1 MHz	Mérés	Eltérésvizsgál <sup>+</sup>
0.5M	1	1,42994	1,56066	1,62348	1,7184	1,7845	1,85581	1,9409	2,09383	2,26141	2,85479	3,15235	3,50121	3,71459	3,82331	3,89849	Viz feltöltés	
0.5M	2	1,43692	1,56757	1,63096	1,7253	1,7913	1,8616	1,94586	2,09748	2,2637	2,8533	3,14999	3,49841	3,71147	3,82021	3,89549	Viz feltöltés	0,077%
0.5M	3	1,44226	1,54947	1,63603	1,73006	1,79607	1,86588	1,9496	2,09974	2,2651	2,85173	3,14758	3,49564	3,70856	3,81732	3,89245	Viz feltöltés	0,078%
0.5M	4	1,4466	1,57883	1,64147	1,73531	1,80078	1,87011	1,9537	2,10336	2,26738	2,85151	3,14682	3,49436	3,70705	3,81567	3,8911	Viz feltöltés	0,035%
0.5M	5	1,45078	1,58081	1,65636	1,74011	1,80577	1,87525	1,9583	2,10751	2,27075	2,85176	3,14572	3,49256	3,70511	3,81354	3,88865	Viz feltöltés	0,063%
0.5M	6	1,45537	1,57866	1,66038	1,74414	1,80963	1,87885	1,96148	2,11026	2,27249	2,85141	3,14481	3,49102	3,70323	3,81185	3,88704	Viz feltöltés	0,041%

44. ábra A mérési rekordok értékvizsgálata

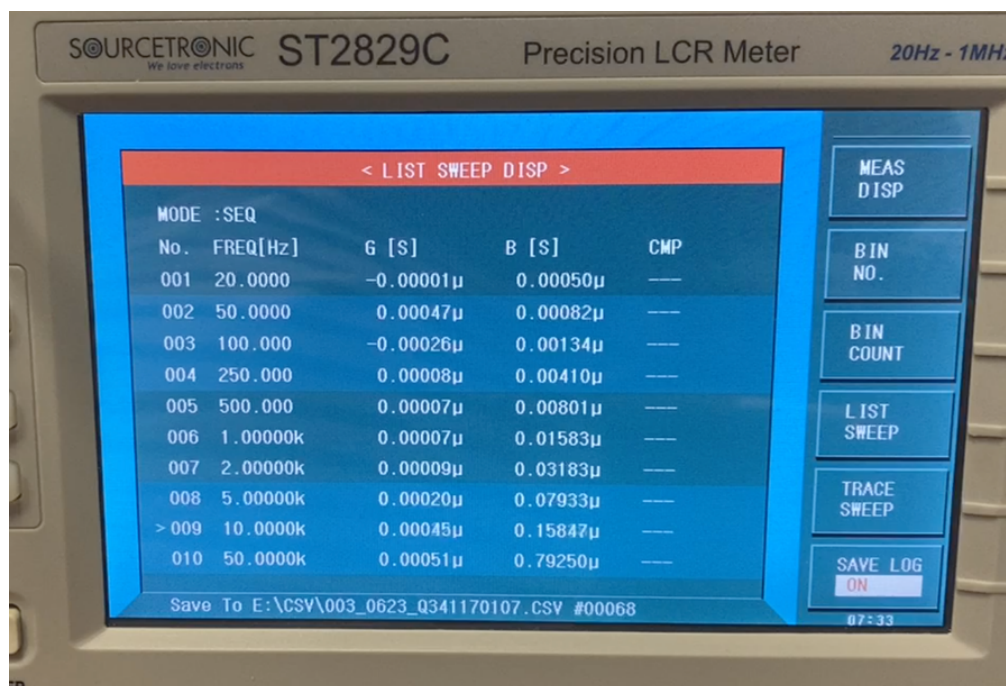
Csak azokat a mérési értékeket vontam be a számtani átlag kiszámításába ahol a következő szekvencián a változás nem haladta meg az 5 %-ot ( $\Delta < 5\%$ ). Így meghatároztam a teljes mérés frekvenciafüggő számtani átlagait. A számítások elvégzése után lehetőség nyílt a számított értékek elemzésére, amelyet a 4.1. fejezetben mutatok be. A funkcionális elemzéseket a Microcal Origin szoftverben értékeltem ki.

### 3.5.2. Kétfázisú keverékoldat mérése

Az adatok kinyerését és a feldolgozását egy mintarekordon mutatom be. Először összeállítottam a 32. 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 a 38. ábrán látható módon mérési jegyzőkönyvben dokumentáltam a kísérletek reprodukálhatósága miatt.

Mérés közben a SOURCETRONIC ST2829C LCR mérőkészüléken nyomon követhető a mérés lefolyása. A 45. ábrán látható pillanatfelvételen a készülék éppen a 68. rekordot méri és menti a külső USB meghajtóra a *003\_0623\_Q341170107.csv* fájlba.



45. ábra A mérés pillanatfelvétele

A mérés eredményként kapott fájlokat a Microsoft Excel táblázatkezelőjével dolgoztam fel. A fájl neve: *008\_0623\_Q341170107A.csv*. A mérés menetét az 50 % KCl – 50 % CaCl<sub>2</sub> keverékoldaton és egy kiválasztott adatrekordon keresztül ismertetem. A fájl nyers adatformátumát a kiválasztott adatrekorddal a 46. ábrán látható Excel képernyőmentés mutatja meg:

278	List,FREQ[Hz],5.00000k,4.57488e-02,1.02201e-02,0,0,7, lmt ,,
279	List,FREQ[Hz],10.0000k,4.96072e-02,1.23463e-02,0,0,8, lmt ,,
280	List,FREQ[Hz],50.0000k,6.41581e-02,1.97663e-02,0,0,9, lmt ,,
281	List,FREQ[Hz],100.000k,7.40015e-02,2.29451e-02,0,0,10, lmt ,,
282	List,FREQ[Hz],250.000k,9.10346e-02,2.41340e-02,0,0,11, lmt ,,
283	List,FREQ[Hz],500.000k,1.06336e-01,1.98998e-02,0,0,12, lmt ,,
284	List,FREQ[Hz],750.000k,1.16224e-01,1.25020e-02,0,0,13, lmt ,,
285	List,FREQ[Hz],1.00000M,1.22668e-01,-2.22441e-03,0,0,14, lmt ,,
286	List,FREQ[Hz],20.0000,-3.02841e-01,1.10735e-01,0,0,0, lmt ,,
287	List,FREQ[Hz],50.0000,2.54861e-02,7.64499e-03,0,0,1, lmt ,,
288	List,FREQ[Hz],100.000,2.92834e-02,7.15397e-03,0,0,2, lmt ,,

◀ 008\_0623\_Q341170107 + ▶

46. ábra A .csv fájl beolvasása

Beolvasás után a fájlt konvertáltam és kialakítottam az 47. ábrán látható nyers adatbázist.

Belső Rekord	Pozicio	ID#	Rekord	Frekvencia [Hz]	G [mS]	B [mS]
19	8	19,8	278	5k	45,748800	10,220100
19	9	19,9	279	10k	49,607200	12,346300
19	10	19,1	280	50k	64,158100	19,766300
19	11	19,11	281	100k	74,001500	22,945100
19	12	19,12	282	250k	91,034600	24,134000
19	13	19,13	283	500k	106,336000	19,899800
19	14	19,14	284	750k	116,224000	12,502000
19	15	19,15	285	1000k	122,668000	-2,224410
20	1	20,1	286	20	-302,841000	110,735000
20	2	20,2	287	50	25,486100	7,644990
20	3	20,3	288	100	29,283400	7,153970
20	4	20,4	289	250	33,367700	7,156880
20	5	20,5	290	500	36,140100	7,273000

47. ábra Az adatbázis

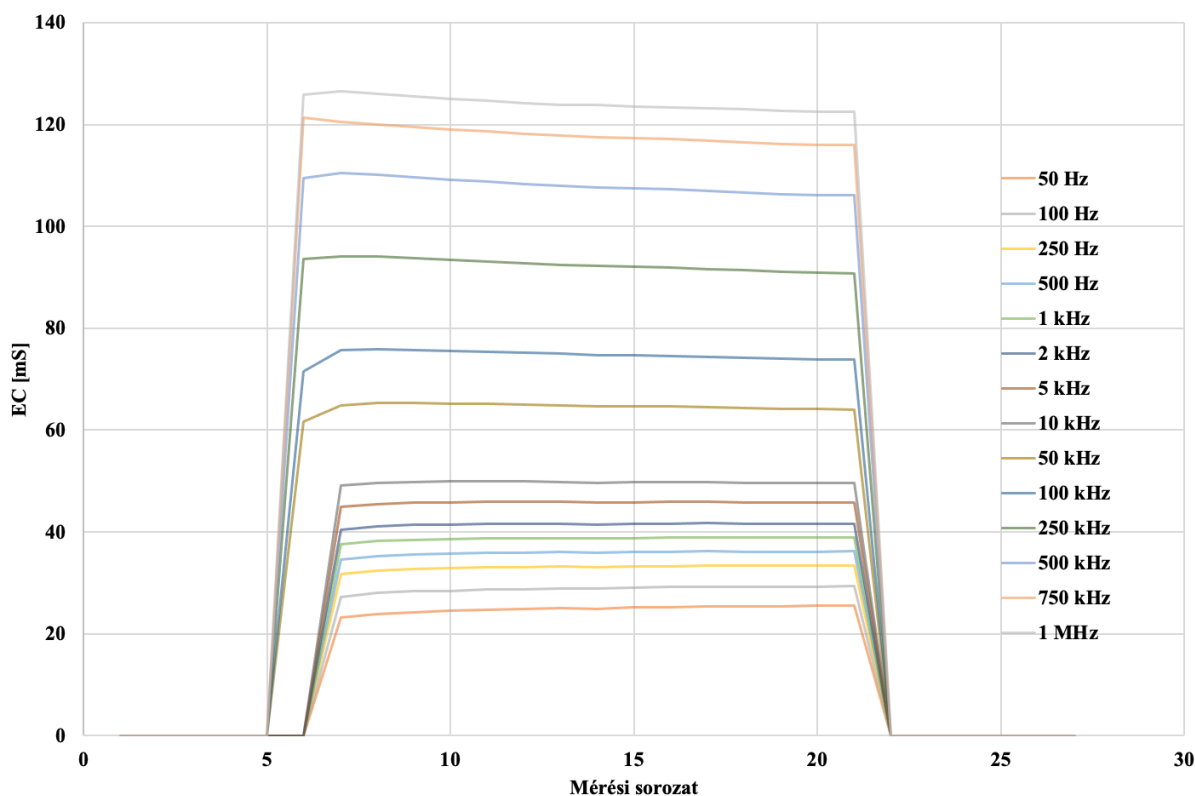
A nyers adatbázisból kimutatást (pivot táblát) készítettem, amely egy olyan mátrix amely értelem szerűen összerendezi az eddigi táblázatos adatbázis G értékét a megadott paraméterre, ebben az esetben a mérési frekvenciákra. Ettől a ponttól kezdve rekordnak az egy mérési szekvencián (a teljes frekvenciasoron) történő méréseket nevezem. Az 48. ábrán látható a kitüntetett rekord a kimutatásba berendezve.

A	I	J	K	L	M	N	O	P
	Hz	10 kHz	50 kHz	100 kHz	250 kHz	500 kHz	750 kHz	1 MHz
9	45,713	49,8054	65,2653	75,7505	93,7741	109,584	119,508	125,47
10	45,8276	49,8881	65,213	75,5995	93,4262	109,1	118,979	124,989
11	45,8759	49,9087	65,1367	75,4445	93,1463	108,749	118,629	124,687
12	45,8762	49,875	64,9649	75,2048	92,7614	108,289	118,144	124,265
13	45,8753	49,85	64,8427	75,0059	92,4576	107,956	117,809	123,89
14	45,6917	49,6529	64,6296	74,7688	92,2011	107,671	117,541	123,787
15	45,8155	49,7547	64,6363	74,6989	92,006	107,423	117,308	123,582
16	45,8646	49,7803	64,583	74,5932	91,8396	107,226	117,109	123,432
17	45,8559	49,7512	64,4366	74,3804	91,5658	106,917	116,809	123,171
18	45,8212	49,6984	64,3254	74,2161	91,3373	106,675	116,558	122,96
19	45,7488	49,6072	64,1581	74,0015	91,0346	106,336	116,224	122,668
20	45,7343	49,5797	64,0788	73,8779	90,8673	106,157	116,05	122,53
21	45,7253	49,5562	64,0177	73,8066	90,7717	106,077	116,006	122,516
22	4,45E-07	1,00251E-06	2,26E-08	-8,34853E-07	-1,13972E-05	-0,000102	-0,000174	0,000376
23	3,36E-07	4,92858E-07	7,52464E-07	1,27732E-06	-9,79912E-06	-0,000106	-0,000196	0,000334
24	4,4E-07	3,68481E-07	6,07417E-07	-3,51308E-08	-1,11397E-05	-0,000104	-0,000187	0,000381

48. ábra A pivot tábla részlete a kitüntetett mérési eredménnyel

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 a 49. ábrán látható. A diagramon látható, hogy az adott keverékoldattal legalább 10 mérési sorozatot, azaz 10 mérési szekvenciát futtattam.





49. ábra Az 50 % KCl – 50 % CaCl<sub>2</sub> keverékoldat mérési szekvenciánkénti EC érték diagramja

A mérések közül az utolsó 5 teljes mérési szekvenciát választottam ki (50. ábra) és a mérési értékeket frekvenciánként átlagoltam.

A	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	50 Hz	100 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	50 kHz	100 kHz	250 kHz	500 kHz	750 kHz	1 MHz
17	25,3346	29,2198	33,3337	36,1596	38,9127	41,6826	45,8559	49,7512	64,4366	74,3804	91,5658	106,917	116,809	123,171
18	25,3876	29,2191	33,3444	36,1428	38,8767	41,6545	45,8212	49,6984	64,3254	74,2161	91,3373	106,675	116,558	122,96
19	25,4322	29,1989	33,3526	36,14	38,8523	41,6125	45,7488	49,6072	64,1581	74,0015	91,0346	106,336	116,224	122,668
20	25,4861	29,2834	33,3677	36,1401	38,8687	41,606	45,7343	49,5797	64,0788	73,8779	90,8673	106,157	116,05	122,53
21	25,5367	29,3116	33,3919	36,159	38,8652	41,6124	45,7253	49,5562	64,0177	73,8066	90,7717	106,077	116,006	122,516
	25,4354	29,2466	33,3581	36,1483	38,8751	41,6336	45,7771	49,6385	64,2033	74,0565	91,1153	106,432	116,329	122,769

50. ábra A mérési rekordok értékvizsgálata

Így meghatároztam a teljes mérés frekvenciafüggő számtani átlagait. A számítások elvégzése után lehetőség nyílt a számított értékek elemzésére, amelyet a 4.2. fejezetben mutatok be. A funkcionális elemzéseket a Microcal Origin szoftverben értékeltem ki.

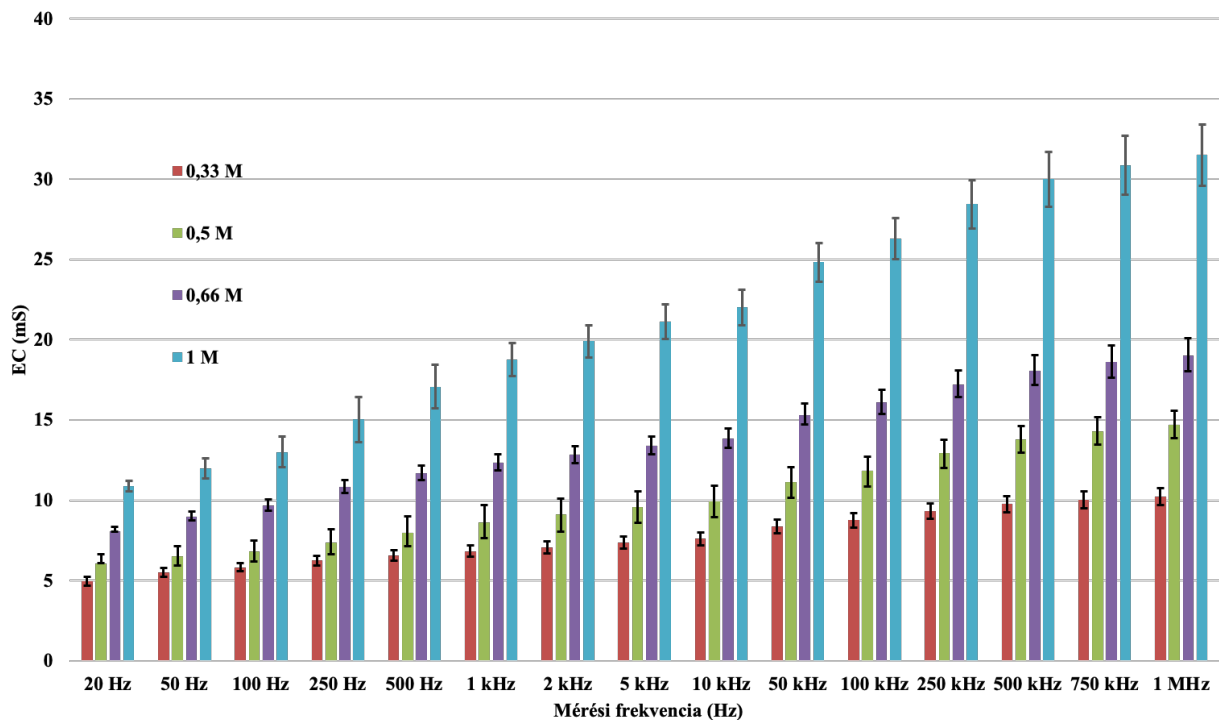
## 4. EREDMÉNYEK

## 4.1. Egyfázisú talajoldatok kation tartalmának meghatározása

A kationtartalom detektálásához először laboratóriumban a 3.5.1. alfejezetben bemutatott folyamatban az előre meghatározott oldatkoncentrációkkal végzett mérésekkel határoztam meg az adott talajra jellemző referencia EC telítési görbéket.

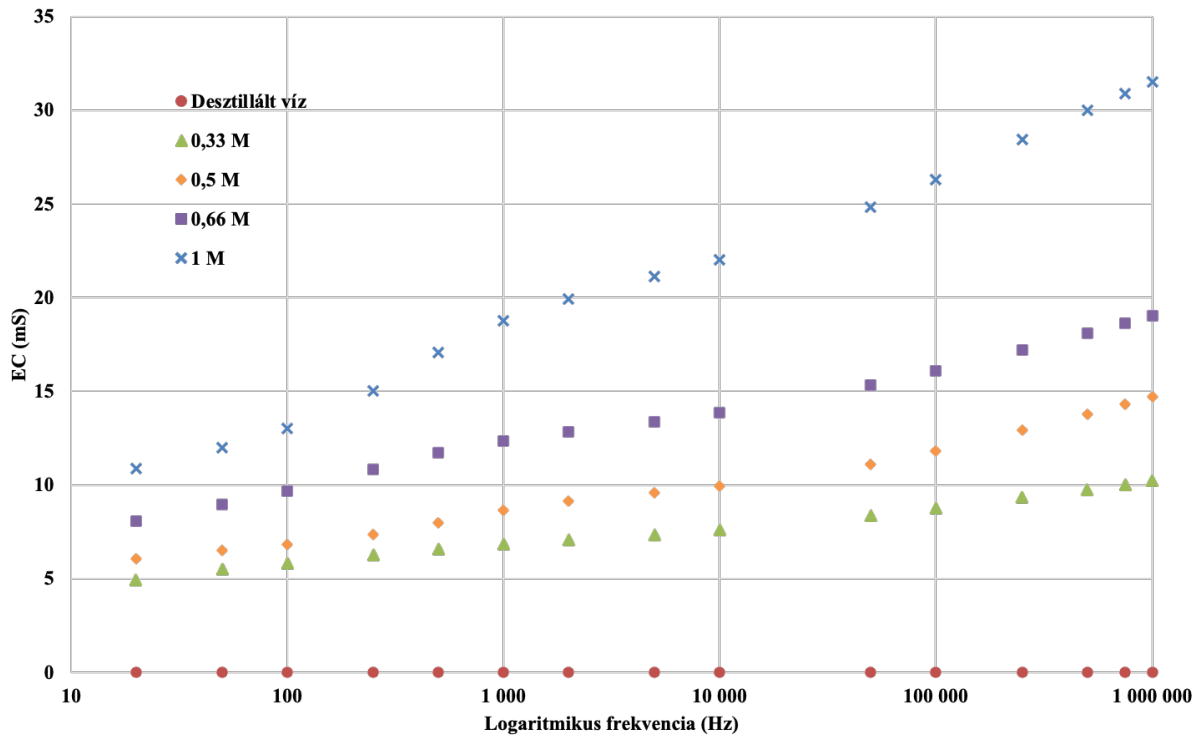
## 4.1.1. Kálium referenciad függvények meghatározása laboratóriumi méréssel

Az adatok tisztítása és feldolgozása után lehetőség nyílt a feldolgozott adatok mérési eredményeinek elemzésére kationonként, koncentrációnként és mérési frekvenciánként történő rögzítésére. A feldolgozás eredményét az 51. ábrán szemléltetem úgy, hogy a származtatott adatok minőségét az átlagos szórás alapján vizsgáltam. Megjegyzem, hogy a referencia 0 M, desztillált víz adatsor, a gyakorlatilag 0 értékek miatt, nem került feltüntetésre.



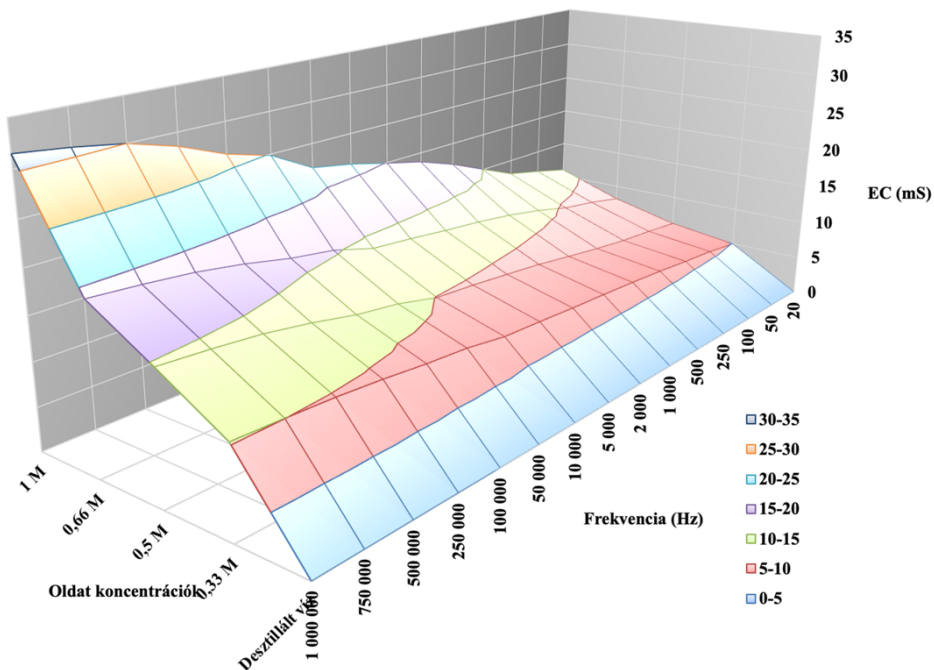
51. ábra Az EC-értékek különböző koncentrációjú KCl talajoldatokra

Szemléletesebb a diagram, ha a vizsgált koncentrációjú oldatok EC-változását a logaritmikus gyakoriság függvényében ábrázolom. Az 52. 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.



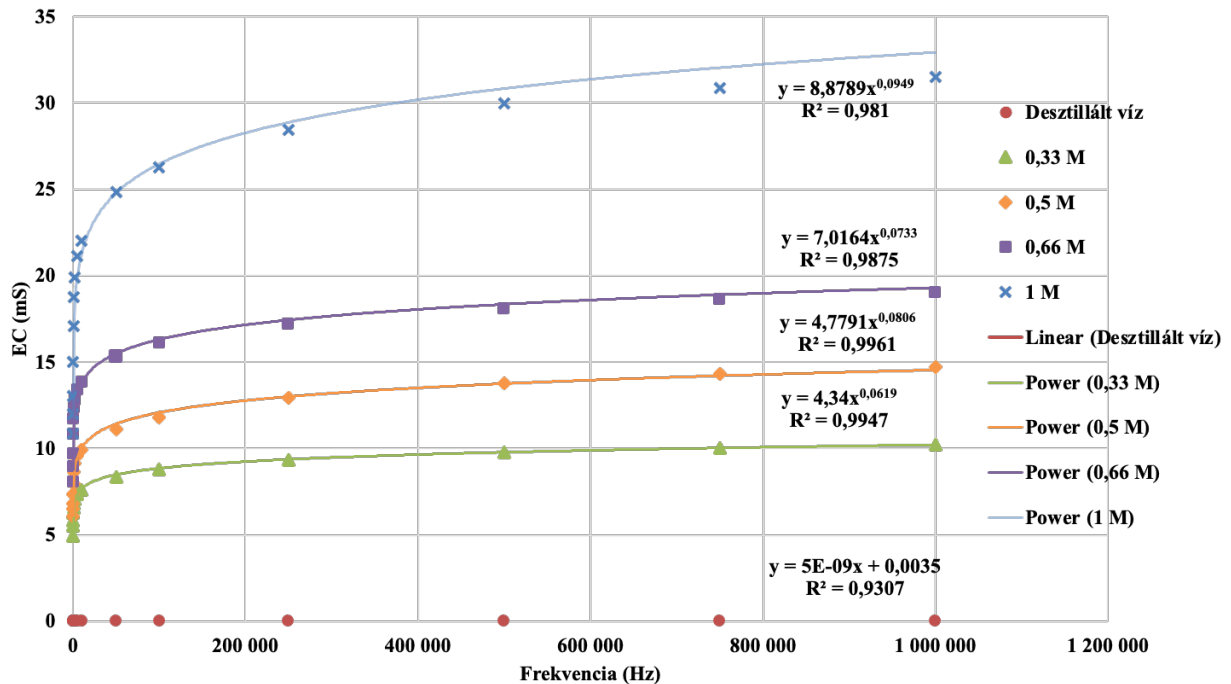
52. ábra EC a logaritmusikus mérési frekvencia függvényében különböző koncentrációjú KCl-lel áztatott talajoldatok esetében

A mérési eredményeket a két változó (oldatkoncentráció és mérési frekvencia) függvényében ábrázolva a következő, 53. ábrán látható diagram rajzolható meg. A diagramról leolvasható, hogy 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.



53. ábra Az EC a  $K^+$  koncentráció és a frekvencia függvényében

Legvégül, a 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. Ezzel megkapjuk a különböző  $K^+$  kation koncentrációk referenciafüggvényeit. A függvényeket az 54. ábra mutatja be.



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

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

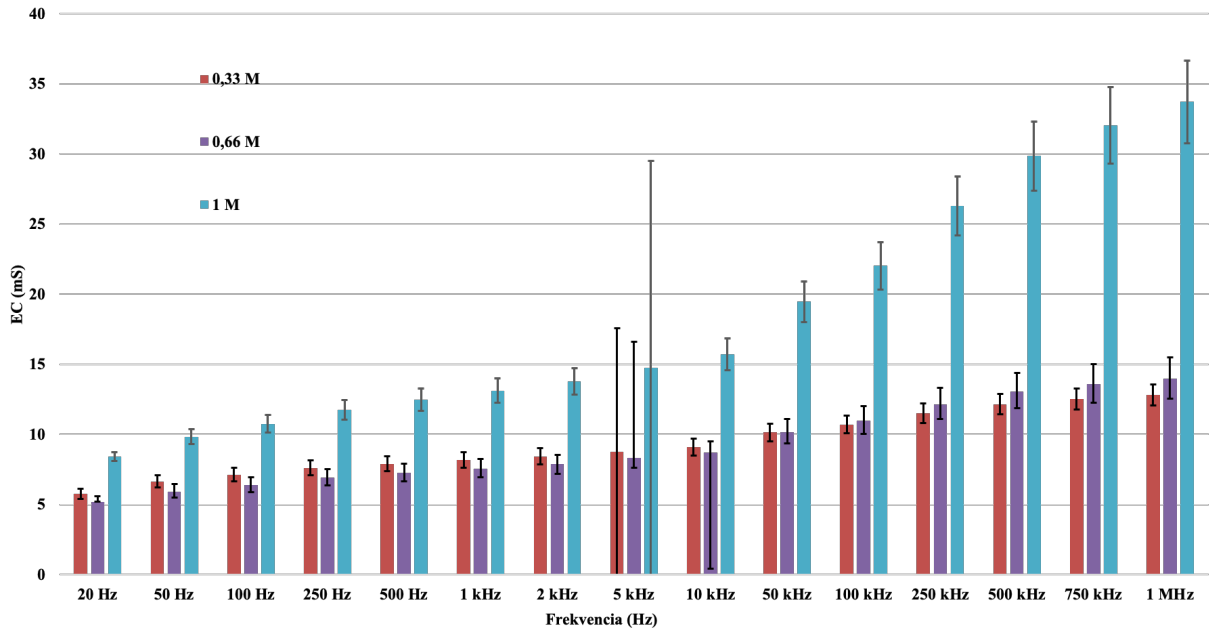
- 1 M oldat esetében az  $f(x) = 8,8789x^{0,0949}$  úgy, hogy az  $R^2 = 0,981$
- 0,66 M oldat esetében az  $f(x) = 7,0164x^{0,0733}$  úgy, hogy az  $R^2 = 0,9875$
- 0,5 M oldat esetében az  $f(x) = 4,7791x^{0,0806}$  úgy, hogy az  $R^2 = 0,9961$
- 0,33 M oldat esetében az  $f(x) = 4,34x^{0,0619}$  úgy,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

#### 4.1.2. Kalcium referenciafüggvények meghatározása laboratóriumi méréssel

Ugyanazt a számítási módot követtem az adatsor előállításához, amit előzőleg a káliummal való mérések esetében bemutatam. A kalciumoldatokkal történő mérés esetében is meghatároztam a teljes mérés frekvenciafüggő számtani átlagait. A számítások elvégzése után lehetőség nyílt a számított adatsorok mérési eredményeinek iononként, koncentrációnként és mérési frekvenciánként történő rögzítésére, amely összefoglalást az 55. ábrán szemléltetek úgy, hogy a származtatott adatok minőségét az átlagos szórás alapján vizsgáltam. Megjegyzem, hogy

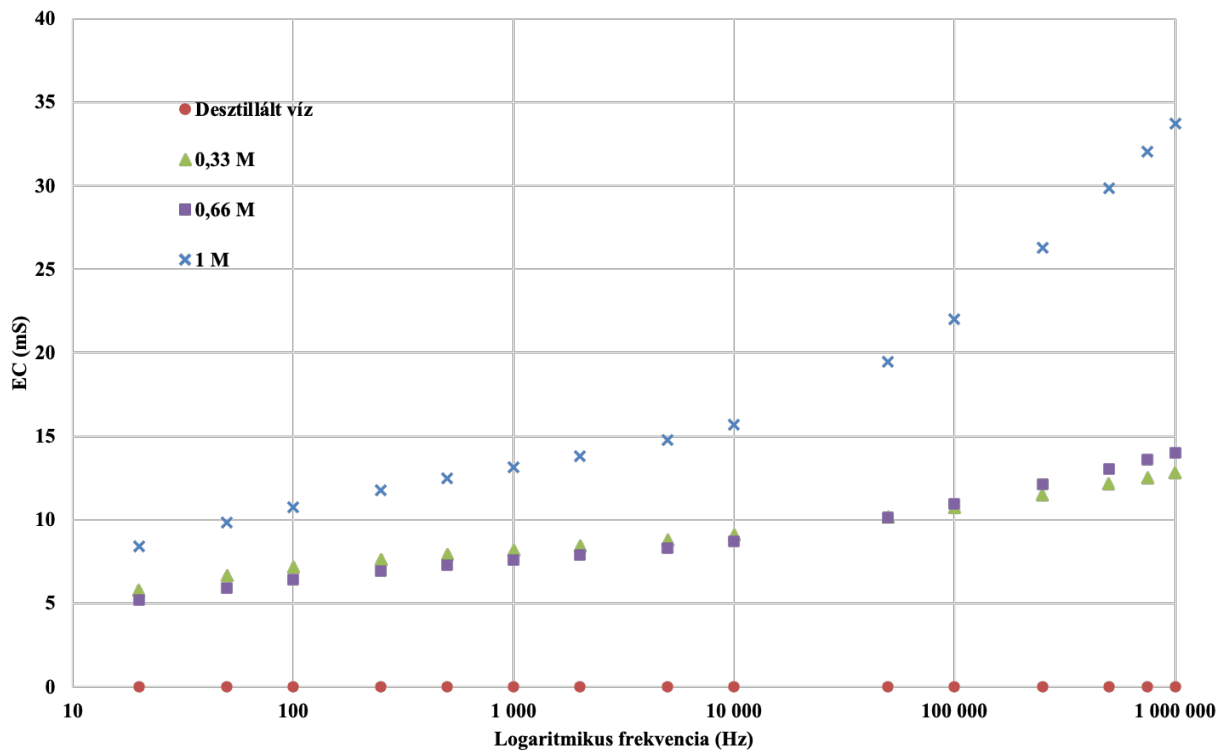
- 0,5 M mérés nem volt értékelhető technikai okok miatt illetve
- A desztillált víz (0 M) azaz a referencia adatsor, a gyakorlatilag 0 értékek miatt, a diagram léptéke miatt nem került jelölésre

- Az 5 kHz frekvencián történt mérés hibás amely látható a szórások méretéből



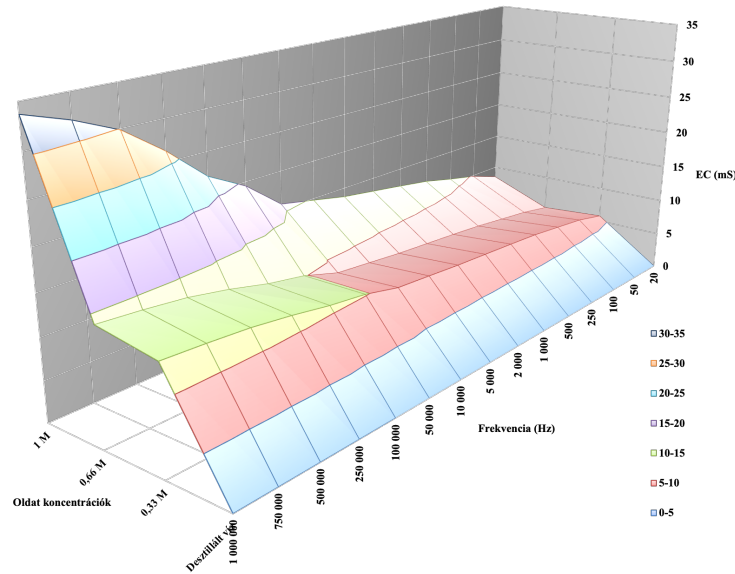
55. ábra Az EC-értékek különböző koncentrációjú  $\text{CaCl}_2$  talajoldatokra

Informatívabb a diagram, ha a vizsgált koncentrációjú oldatok EC-változását a logaritmikus gyakoriság függvényében ábrázolom. Az 56. 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.



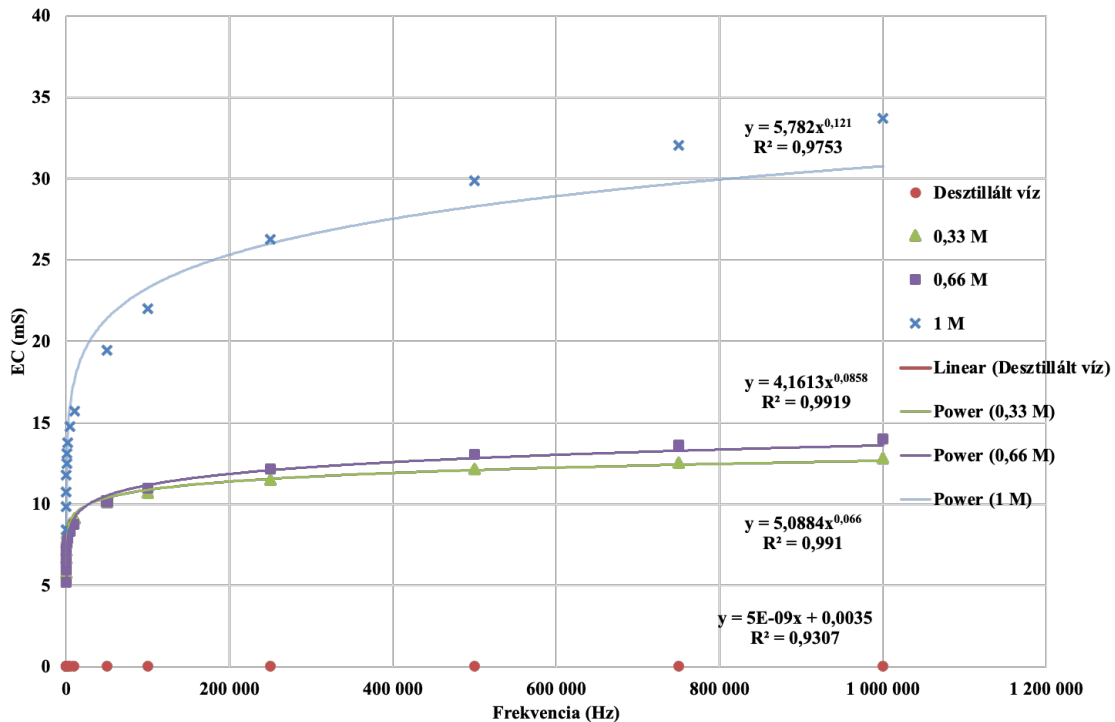
56. ábra EC a logaritmikus mérési frekvencia függvényében különböző koncentrációjú  $\text{CaCl}_2$ -vel áztatott talajoldatok esetében

A mérési eredményeket a két változó (oldatkoncentráció és mérési frekvencia) függvényében ábrázolva a következő, 57. ábrán látható diagram rajzolható meg. A függvényből leolvasható, hogy 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.



57. ábra Az EC a  $\text{Ca}^{2+}$  koncentráció a talajban és a mérési frekvencia függvényében

Legvégül, 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. Ezzel megkapjuk a különböző  $\text{Ca}^{2+}$  kation koncentrációk referenciafüggvényeit. A függvényeket az 58. ábra mutatja be.



58. ábra EC telítési görbe különböző  $\text{Ca}^{2+}$  koncentrációjú talajoldatokhoz természetes skálán ábrázolva

Így a felállított mérési modellre vonatkoztatott kalcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) 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.

#### 4.1.3. Kálium és kalcium referenciafüggvények összehasonlítása

A következő 6. táblázatban bemutatom a referenciafüggvények összehasonlítását.

6. táblázat Referenciafüggvények összehasonlítása

Koncentráció	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$
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	$f(x) = 4,34x^{0,0619}$	$f(x) = 5,0884x^{0,066}$
Desztillált víz (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 oldatkonzentráción történő összehasonlítása során megállapítható, hogy az oldatok a változó mérési frekvenciára adott válaszaik 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.

#### 4.1.4. 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 a referenciaértékek interpolációjával.
- Az oldat koncentráció meghatározása a referenciaértékek regressziós függvényeinek az interpolációjával

Előfeltevések:

- A konduktometria ilyen való analitikai alkalmazása olyan rendszerek vizsgálatára korlátozódik, amelyek csak egyetlen elektrolitot tartalmaznak tehát a "hátér" hozzájárulása elhanyagolható.

- Egy teljes mérésnek a teljes frekvenciasorozaton végrehajtott mérést tekintek.
- Méréshez mindig ugyanazokat a frekvenciákat használom.

**Megoldás#1 – Koncentráció meghatározása a referenciaértékek interpolációjával**

Legyenek:

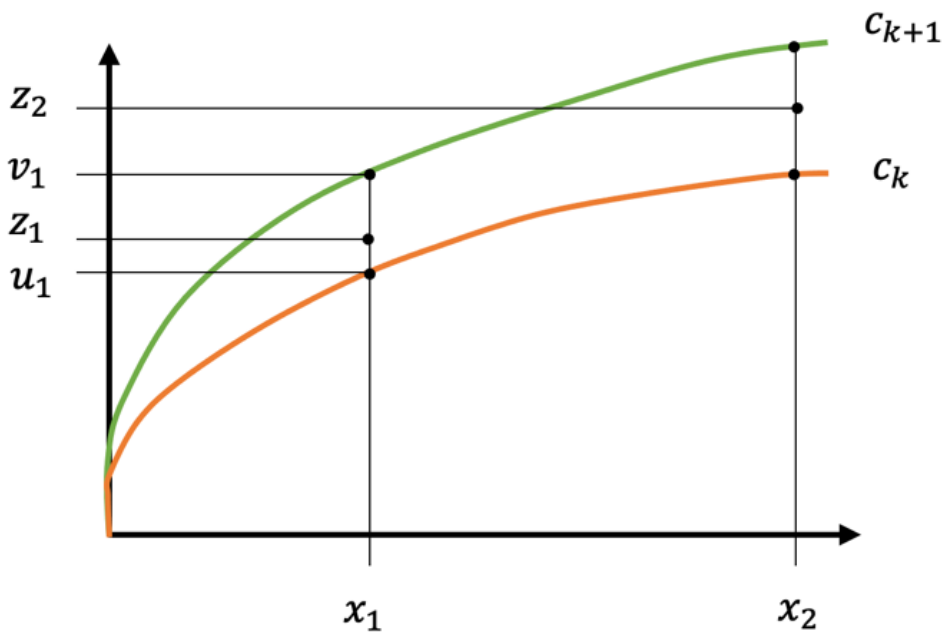
- $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  az előzetes mérési frekvenciák,
- $z_1 < z_2 < \dots < z_n$  egy mérési sorozatban a mérési frekvenciákhoz tartozó EC-értékek.

Tekintettel az 59. ábrára, adott  $x_l$  frekvencián a korábban mért referencia EC értékek közül legyen  $u_l$  és  $v_l$  az a referenciaérték, amely közrefogja a mért  $z_l$  értéket, azaz:

$$u_1 \leq z_1 \leq v_1 \tag{9}$$

és így tovább.  $x_n$ -ben  $u_n$  és  $v_n$  az, amely közrefogja  $z_n$  értéket, azaz

$$u_n \leq z_n \leq v_n \tag{10}$$



59. ábra A koncentráció meghatározása a referenciaértékek interpolációjával

Tegyük fel, hogy minden  $(x_i, z_i)$  pont ugyanazon két szomszédos EC-görbe közé esik. Legyen:

- $i=1,2,\dots,n$  rögzített, és
- e két görbe a  $c_k$  és a  $c_{(k+1)}$  koncentrációnak megfelelő.

Keresünk olyan  $x_i \in [0,1]$  számot, amelyre

$$z_i = x_i u_i + (1 - x_i) v_i \tag{11}$$



Innen

$$x_i = \frac{v_i - z_n}{v_i - n_i} \quad (12)$$

ahol  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Az  $x_i$  interpolációs konstansok átlaga

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

Ezzel interpolálunk a  $c_k$  és a  $c_{(k+1)}$  referencia-koncentrációk közé

$$\bar{c} = \bar{x}c_k + (1 - \bar{x})c_{k+1} \quad (14)$$

Tehát a mért ismeretlen oldat koncentrációjának mértéke az egy mérésben előforduló mérési frekvenciánként a referenciamérések által adott EC értékek közé ily módon interpolált koncentrációk átlaga lesz.

### Megoldás#2 – Koncentráció meghatározása a referenciaértékek regressziós függvényeinek az interpolációjával

Tegyük fel azt, hogy a menetközben (on-the-go) alkalmazott  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  EC mérési frekvenciák **nem feltétlenül egyeznek az előzetesen alkalmazott mérési frekvenciákkal**. Legyenek a regressziós függvények

$$y_k(x) = \beta_k x^{\gamma_k} \quad (15)$$

ahol  $k = 1, 2, \dots, K$  és amelyek leírják az EC-t az  $x$  frekvencia függvényében a referenciaméréskre illesztve, a  $c_k$  koncentráció esetén, ahol

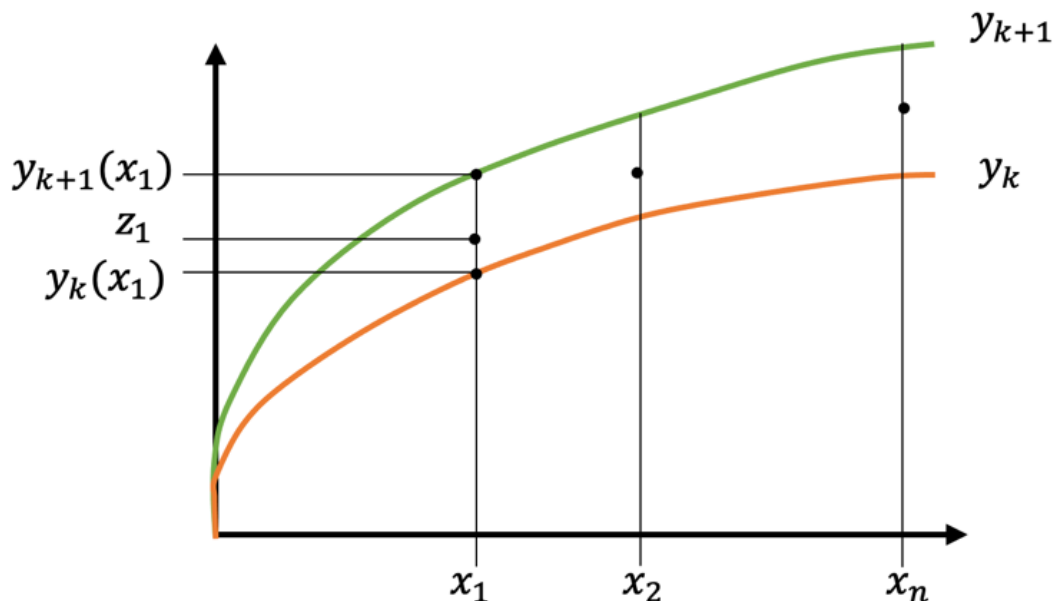
$$c_1 < c_2 < \dots < c_K \quad (16)$$

Tegyük fel, hogy  $k = 1, 2, \dots, K$  olyan, hogy a mozgás során az  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  frekvenciák mellett mért  $z_1, z_2, \dots, z_n$  EC értékek esetén (60. ábra)

$$y_k(x_1) \leq z_1 \leq y_{k+1}(x_1) \quad (17)$$

és

$$y_k(x_n) \leq z_n \leq y_{k+1}(x_n) \quad (18)$$



60. ábra A koncentráció meghatározása a referenciaértékek regressziós függvényeinek az interpolációjával

Legyen:

- $i = 1, 2, \dots, n$  rögzített, és
- keressünk olyan  $\mu_i \in [0,1]$  számot, amelyre igaz

$$z_i = \mu_i y_k(x_i) + (1 - \mu_i) y_{k+1}(x_i) \quad (19)$$

Innen

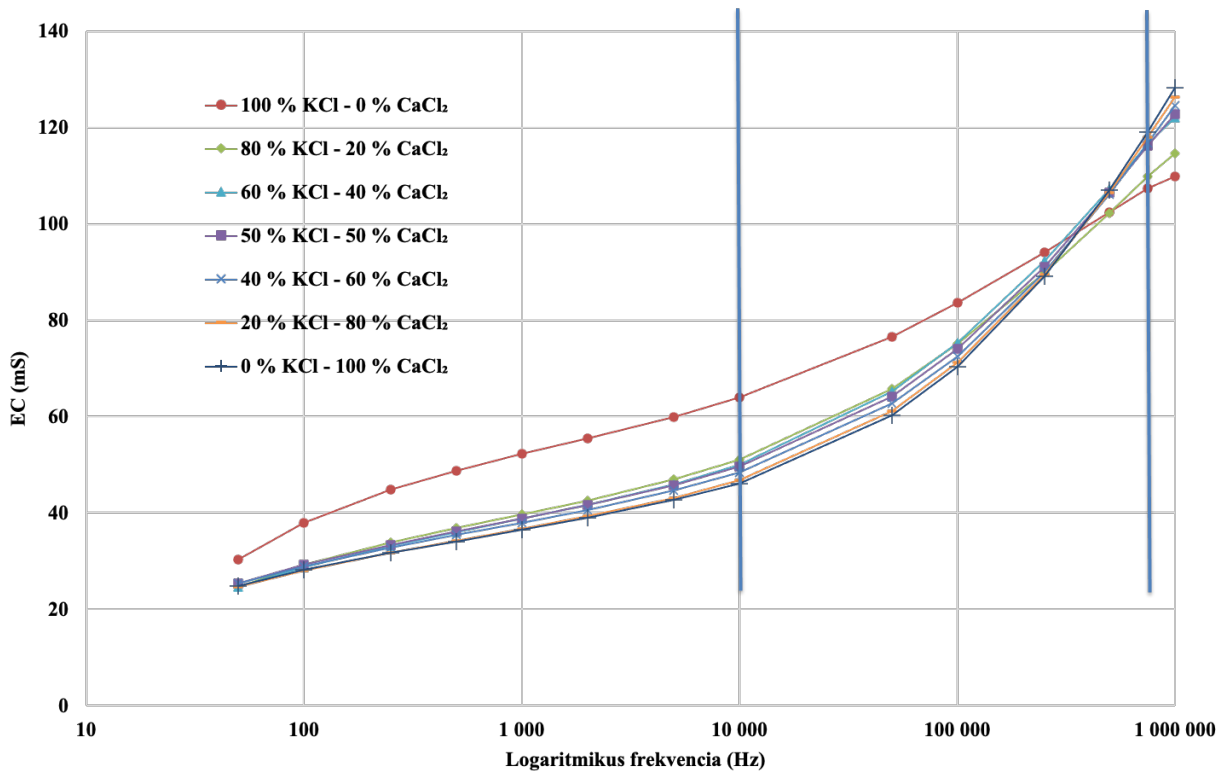
$$\mu_i = \frac{y_{k+1}(x_i) - z_i}{y_{k+1}(x_i) - y_k(x_i)} \quad (20)$$

Ezáltal a mért ismeretlen oldat koncentrációja az egy mérésben előforduló mérési frekvenciánként a referenciamérések által adott EC értékekre illesztett függvények közé interpolálható és így meghatározható.

## 4.2. Kétfázisú talajoldatok kation arányának meghatározása

### 4.2.1. 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 3.5.2. alfejezetben bemutatott folyamatban előállítottam keverék oldatok EC-értékeit a beállított frekvenciákon. A mérések eredményét a 61. ábra szerint ábrázoltam a logaritmusos frekvencia függvényében. Az oldatok kation koncentrációjához tartozó EC értékeket a 7. táblázatban foglaltam össze.



61. ábra A különböző keverékek EC-méréseinek összehasonlítása logaritmusos frekvencián

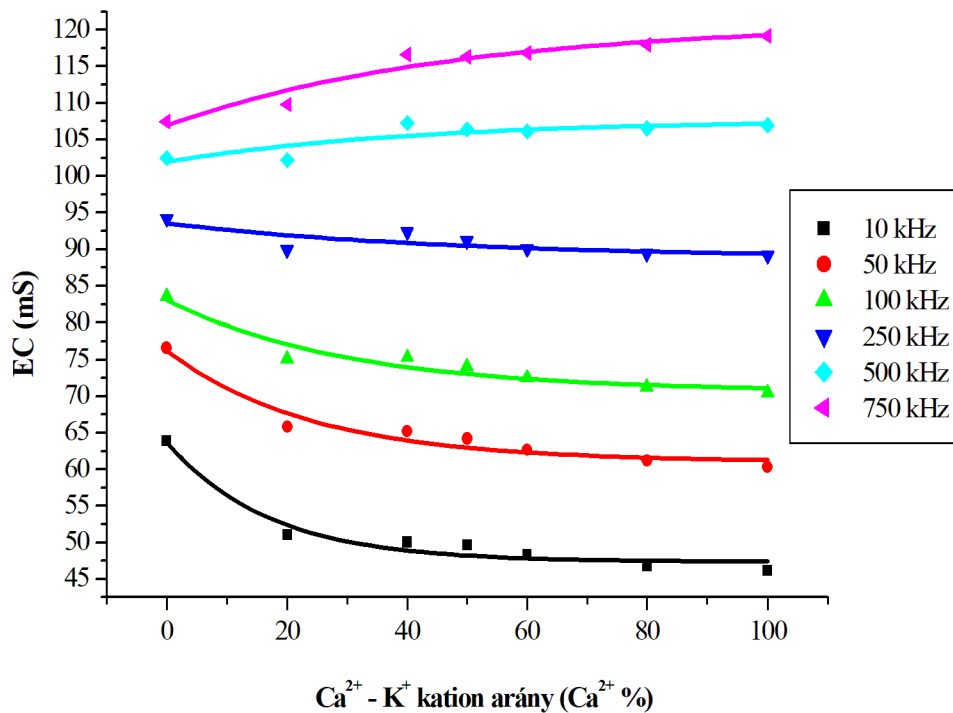
Az a mérési eredményekből egyértelműen megállapítható, hogy

- 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.

7. táblázat A mérési eredmények

Frekvencia (Hz)	Az oldatok kation koncentrációjához tartozó EC (mS)						
	100 % KCl - 0 % CaCl <sub>2</sub>	80 % KCl - 20 % CaCl <sub>2</sub>	60 % KCl - 40 % CaCl <sub>2</sub>	50 % KCl - 50 % CaCl <sub>2</sub>	40 % KCl - 60 % CaCl <sub>2</sub>	20 % KCl - 80 % CaCl <sub>2</sub>	0 % KCl - 100 % CaCl <sub>2</sub>
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 (62. ábra).



62. ábra A különböző keverékek EC-méréseinek összehasonlítása és a különböző frekvenciákon végzett mérések függvényillesztése

Dolgozatomban az exponenciális függvényeket a következő formában használtam illesztett függvényként (MITSCHERLICH, 1909; MITSCHERLICH, 1928), és ennek a függvénynek a paraméteres elemzését végeztem el bizonyításként:

$$f(x) = y_0 + Ae^{-\frac{x}{t}} \quad (21)$$

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 8. táblázat foglalja össze:

8. táblázat Az exponenciális függvény illesztésének paramétereit és determinációs együtthatója

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.

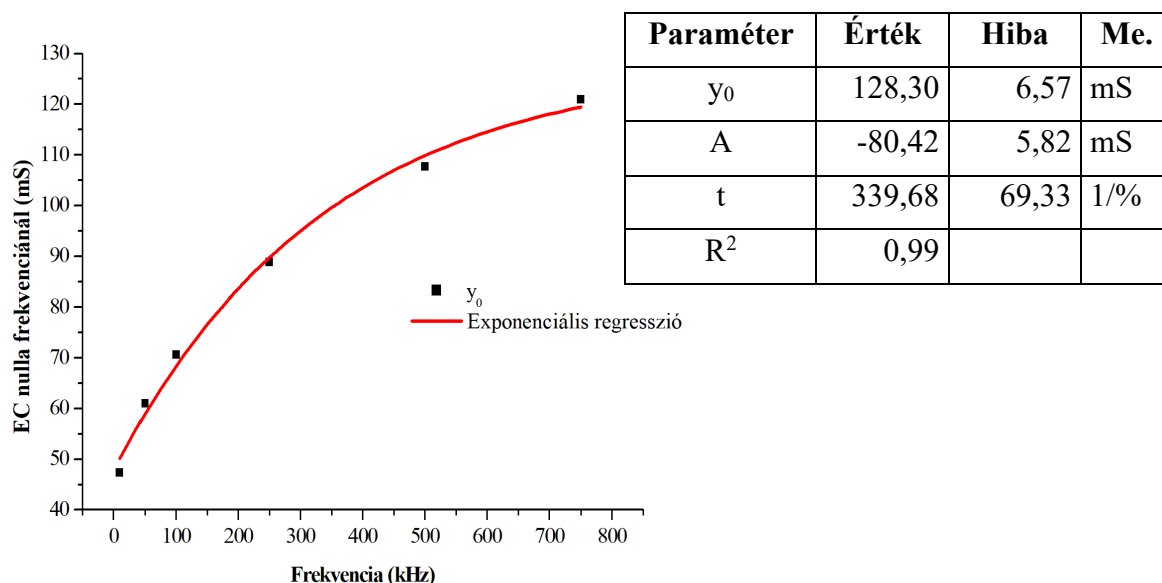
$$f(x) = A + Bx \quad (22)$$

A 9. táblázat a lineáris illesztéssel kiszámított paramétereket mutatja be.

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

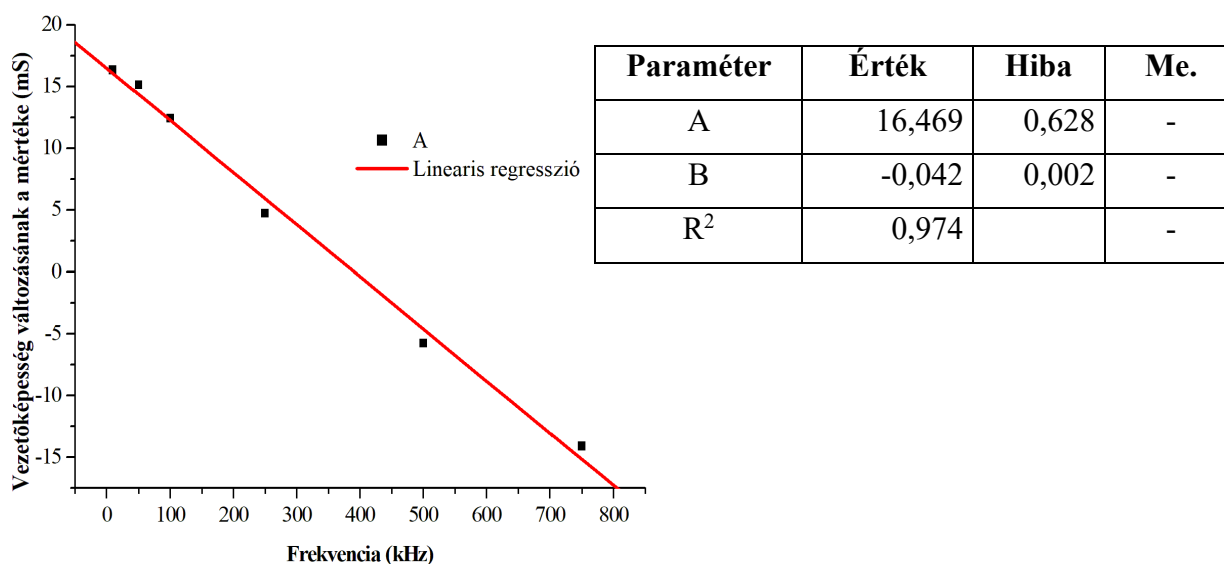
Mérési frekvencia	$A$	$B$	$R^2$
250 kHz	92,93	-0,04	0,5929
500 kHz	102,97	-0,04	0,6084

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 63. ábrán látható.



63. 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 64. ábrán látható.

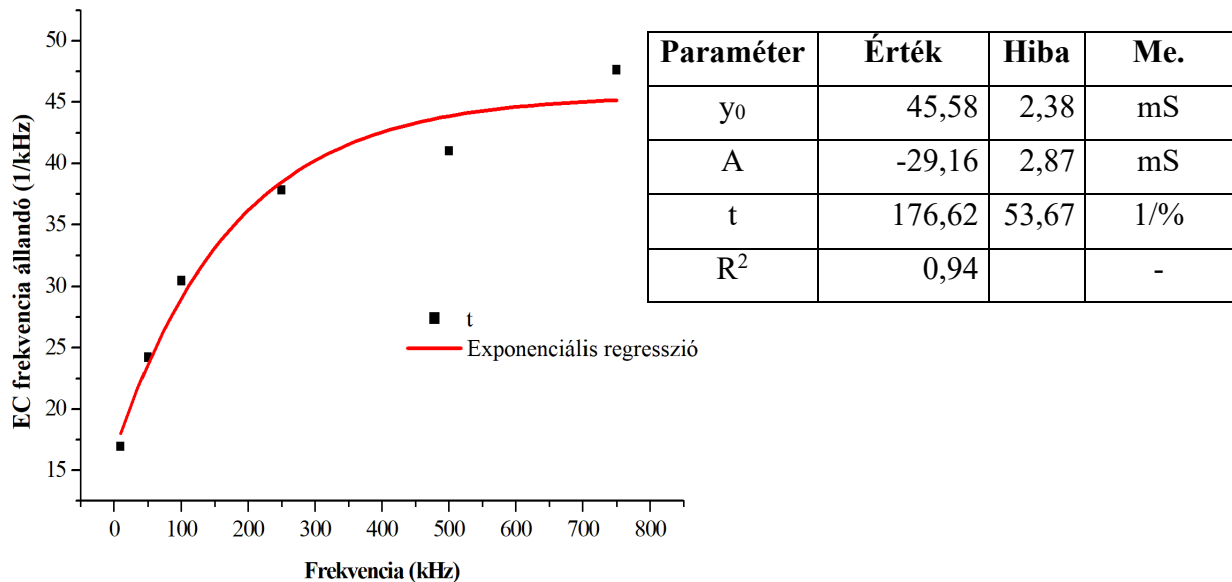


64. ábra A változás mértékének értékei a mérési gyakoriságok és a lineáris függvény illesztésének függvényében

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 62. 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 65. ábra szemlélteti.



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

#### 4.2.2. 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 (FRIEDMAN, 2005; CORWIN és LESCH, 2005). Jelenlegi megközelítésem keretét, útmutatást adhat további elemzésekhez és laboratóriumi háttérrel biztosít az EC-mérésen alapuló, menet közbeni talajszenzorok további fejlesztéséhez.

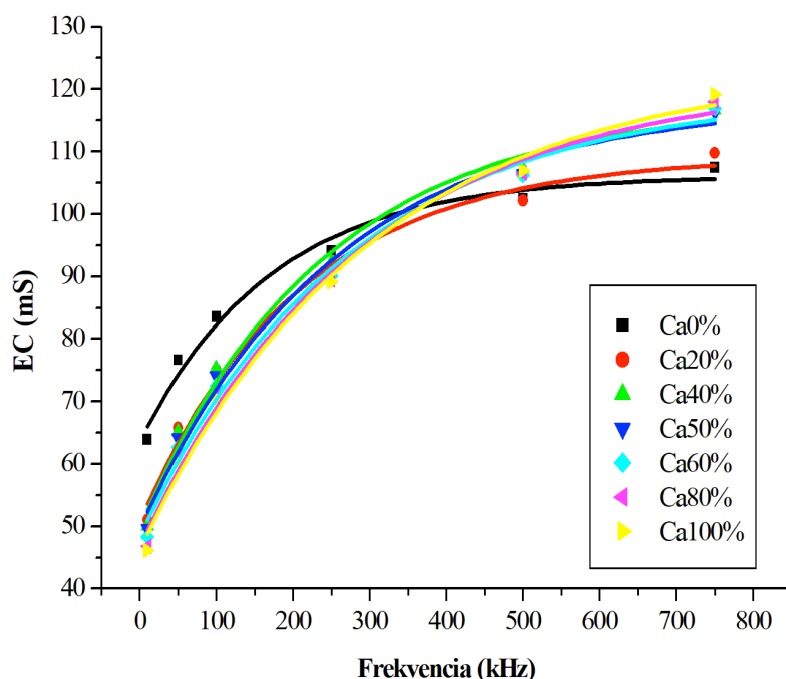
Az EC szántóföldön történő meghatározására általánosan használt frekvenciatartomány körülbelül 100 Hz-től néhány kHz-ig terjed, mivel alacsonyabb frekvenciákon az elektródok polarizációja zavarja a leolvasást, magasabb frekvenciákon (kilo- és megahertz) pedig az úgynevezett diszperzió jelensége léphet fel. Ráadásul a nagyfrekvenciás vezetőképességmérők drágák (FRIEDMAN, 2005). Alacsony frekvenciákon, azaz 1 MHz alatt a mérőelektródokon fellépő kapacitív és elektrolitikus hatások, és emellett az erősítő torzításai elkerülhetők, míg az ellenállásos hatások

túlnyomórészt hozzájárulnak a jelhez, mint a tisztán egyenáramú (DC) mérésnél (JOHNSON, 2007; GROOM, 2008; VISCONTI és DE PAZ, 2016).

A legtöbb elektromágneses indukciós (EMI) érzékelő a 300 kHz alatti alacsony frekvenciatartományban működik (ŠPIKIĆ et al., 2022). Az alacsony frekvenciájú EMI-vel ellentétben a nagyfrekvenciás elektromágneses indukciós (HFEMI) érzékelők a 300 kHz és 30 MHz közötti frekvenciatartományban működnek (STEWART et al., 1994). A változó frekvenciaértékekkel végzett mérésorozat elvét az a feltételezés motiválta, hogy a különböző méretű ionok a frekvencia változásának függvényében eltérő vezetőképességet mutatnak, így lehetőséget biztosítanak a szelektív detektálásra. Mivel mind az alacsony, mind a középfrekvenciás EK-válaszokat vizsgálni kívántuk, és a rendelkezésre álló laboratóriumi berendezések felső határa 1 MHz volt, a 10-es logaritmus alapú mérések mellett döntöttem. A mérési eredmények megerősítették ezt az elméletet, lásd a 66. ábrát.

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, 61. 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 21. képlet szerinti exponenciális regresszióval illesztjük, a 66. ábrán látható ábrát kapjuk. Az exponenciális függvények illesztési paramétereit a 10. táblázat foglalja össze.



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

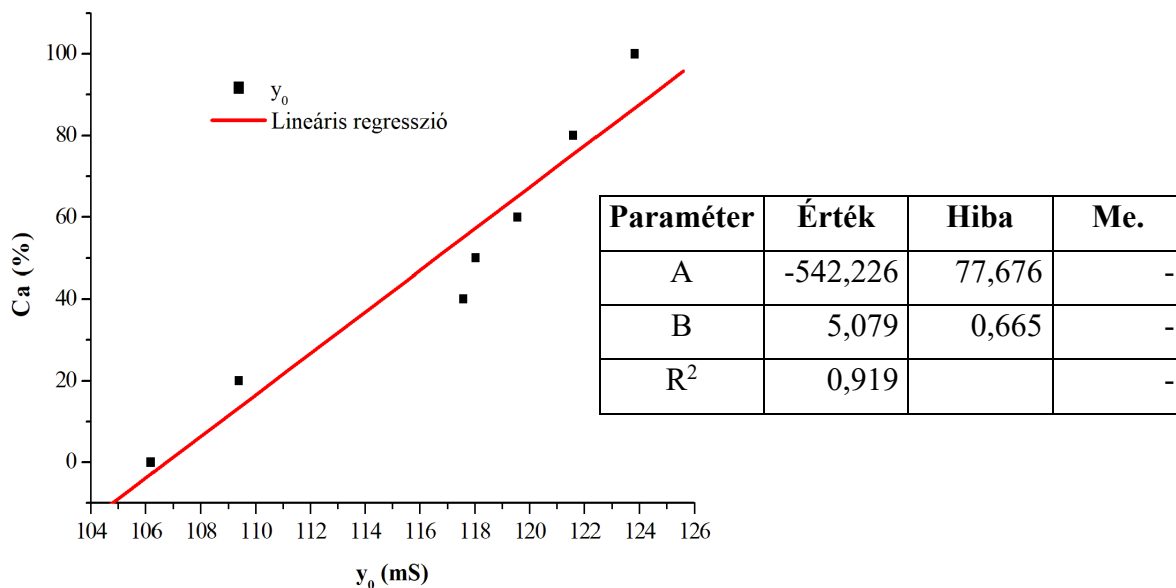


10. táblázat A függvények illeszkedési paraméterei és a determinációs együttható

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

A determinációs együttható nagyon erős, mivel még a legkisebb együttható is 0,94 feletti értéket mutat, tehát a regressziós görbék illeszkedése megfelelő.

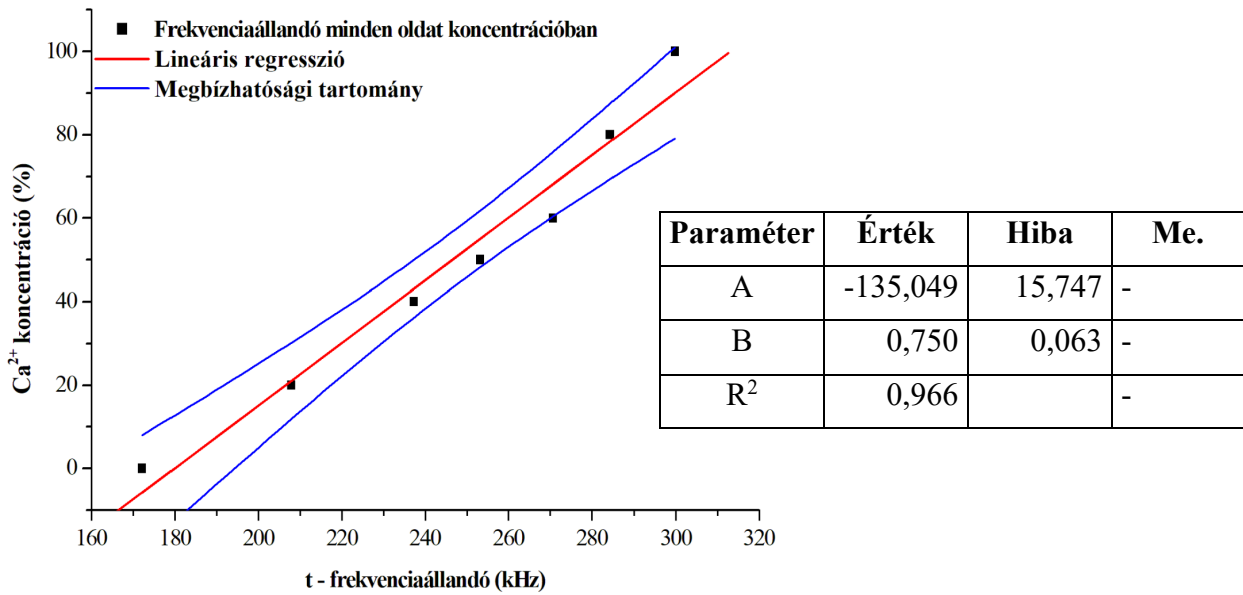
Az előzőekben ismertetett statisztikai elemzés alapján létrehoztam egy kalibrációs egyenest, ahol a Ca-koncentráció a vezetőképesség ( $y_0$ ) nullfrekvenciára extrapolált értékeinek függvényében határozható meg. Ehhez az  $y_0$  értékeket  $y_0$  - Ca% koordinátarendszerben ábrázoltam, és a pontokra lineáris regressziós görbét illesztettem (67. ábra):



67. ábra A Ca - K ionkeverék Ca-tartalma a nulla frekvenciára extrapolált vezetőképesség ( $y_0$ ) függvényében

$$f(x) = -542,226 + 5,079x \quad (23)$$

Az illesztett görbék függvényei segítségével létrehoztam a Ca - K kétkomponensű oldat kalibrációs görbét 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 (68. ábra).



68. ábra A frekvenciaállandó ( $t$ ) a kétkomponensű oldat  $\text{Ca}^{2+}$  koncentrációjának függvénye

Így a lineárisan illesztett kalibrációs függvény képlete:

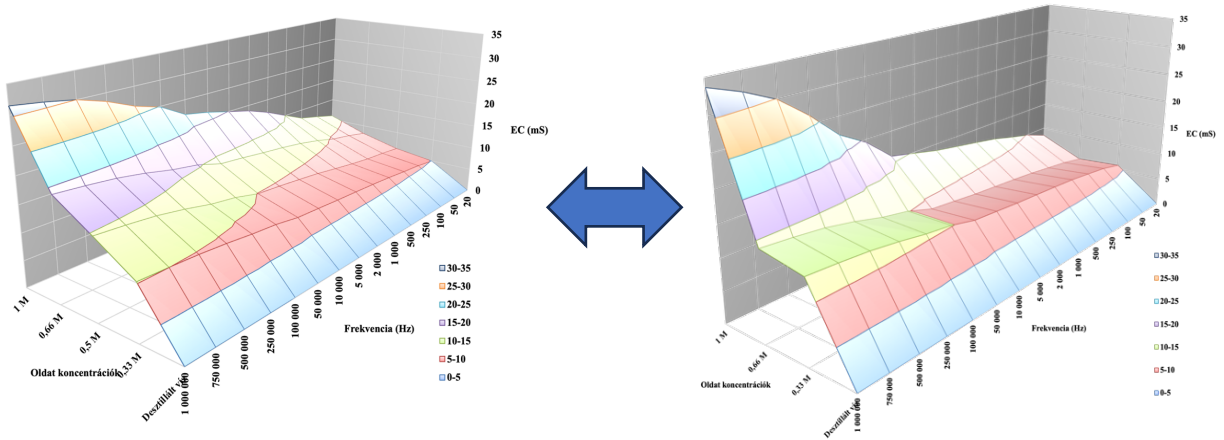
$$f(x) = -135,049 + 0,75x \quad (24)$$

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  $\text{K}^+$  és  $\text{Ca}^{2+}$  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 66. ábra szerinti ábrázolom.
- A mérési pontokra a 21. függvény szerinti Mitscherlich-egyenlet segítségével egyparaméteres exponenciális függvényt illesztetek a 66. ábra szerint.
- A megkapott  $t$  paraméterrel megoldom a 24. képletet, így megkapom a kétkomponensű oldat  $\text{Ca}^{2+}$  komponensének arányát a  $\text{K}^+$  -  $\text{Ca}^{2+}$  kationok teljes mennyiségéhez viszonyítva.

### 4.3. 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 69. ábrán is látható.

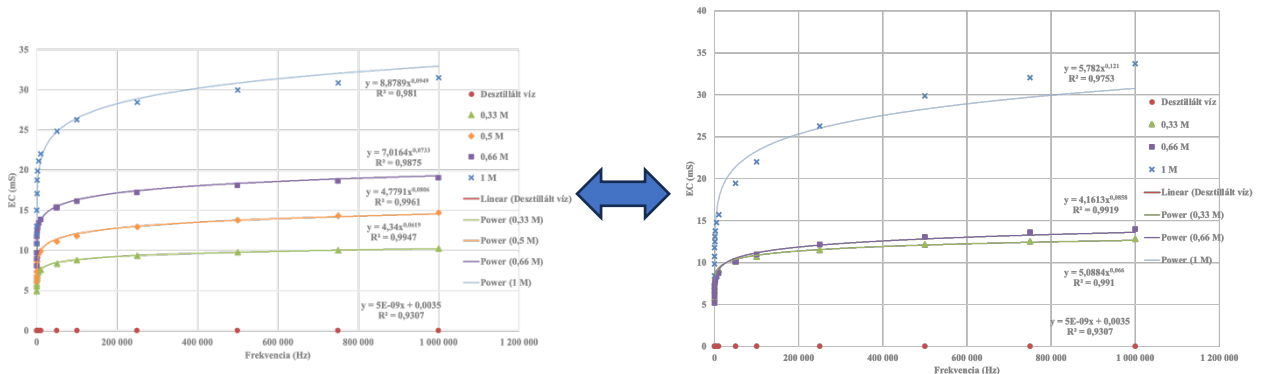


69. ábra Az EC és a koncentráció a talajban és a mérési frekvencia függvényében – K és Ca összehasonlítás

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 frekvenciartományhoz 0,33 – 1,0 M értéktartományba tartozó koncentrációval rendelkező talajoldatokra meghatároztam a jellemző kálium ( $K^+$ ) és kalcium ( $Ca^{2+}$ ) kation referenciafüggvényeket (54. és 58. ábra) amelyek hatványfüggvénnyel írhatóak le és amelyek egyértelműen eltérnek mint ahogyan azt a 70. ábra is bemutatja.



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

A referenciafüggvényeket tetelesen a 6. táblázatban bemutatam 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 oldatra 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 oldatétól, 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 dolgozatomban bemutatott kutató munkám alapján javaslatot teszek a  $K^+$  és  $Ca^{2+}$  kationokkal történt méréseim alapján megállapított összefüggések kiterjesztésére a liotrop 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 disszertációmiban 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 függvénnyel 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. SUMMARY

The approaches of my research have demonstrated that there is room for improvement in the measurement technique using electrical conductivity, which has been used in agricultural practice for several decades. Challenging established principles using a new approach may open up development opportunities for the use of electrical conductivity across a broader spectrum of precision agriculture practices.

In my PhD thesis, I demonstrate, on the one hand, that the electrical conductivity of soil saturated with cationic solutions follows different functions as a function of the measurement frequency and, on the other hand, that the electrical conductivity of soil is a function of the measurement frequency. Furthermore, I show that by reasonably varying the frequency of electrical conductivity measurements in a two-component solution, the proportion of cations in the soil can be determined by measuring the electrical conductivity. From the results obtained, I draw the appropriate conclusions and give a mathematical model for the determination of the cation ratio in solution by laboratory experimental method. The correlations revealed by my work will facilitate the development of an on-the-go measurement tool for precision agriculture practice that can determine soil nutrient content by measuring electrical conductivity.

With the proliferation of soil sensors, it will be possible to measure soil properties on-the-go, giving farmers instant information on the condition of the most important resource - soil - which can save resources and reduce environmental impact. The use of soil sensors enables fast, immediate, and cost-effective soil testing and nutrient mapping solutions.

In this thesis, I sought to answer the question whether one of the simplest, most popular, and cheapest measurement methods, electrical conductivity measurement, with a novel approach to re-thinking the measurement technique, offers the potential for laboratory measurement of selective salinity. My experiments have shown that there is a correlation between soil salt concentration, measurement frequency and measured EC. As the frequency increased, the measured EC of soil saturated with solutions of a given concentration varied according to the functions published in the results, i.e. EC varied according to different functions when the soil was saturated with solutions containing the same concentration of cations ( $K^+$  and  $Ca^{2+}$ ) as a function of the measurement frequency.

I have also developed a computational model that can provide guidance for calculating the selective salinity of soil under laboratory conditions using conductometry analytically. The model shows that by consistently varying the measurement frequencies, the selective salinity of a known soil can be determined under laboratory conditions by EC measurements. For solutions containing the same concentration of cations, EC saturates according to different functions depending on the measurement frequency.

My thesis also sought to answer the question whether a novel approach to the measurement of electrical conductivity offers the possibility of measuring selective salinity in the laboratory. I have demonstrated and mathematically derived that it is possible to determine the selective salinity of a two-component solution containing  $K^+$  and  $Ca^{2+}$  cations by measuring the electrical conductivity at a variable frequency, and I have also determined which frequency range is relevant for the measurability of the functions published in the results and given the calibration function for phase separation. It has become evident that a computational model can provide guidance for the calculation of the selective salinity of a two-component solution under laboratory conditions by the analytical application of conductometry. The model shows that by varying the measurement frequencies consistently, the selective salinity can be determined by EC measurement under laboratory conditions.

## 8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek Dr. Szabó István és Dr. Kátai László egyetemi tanároknak hogy bevezettek a tudományos élet szépségeibe és kihívásaiba, és a kutatásom során folyamatosan támogattak szakmailag.

Köszönöm Dr. Czinkota Imre egyetemi docensnek az ötleteit és a folyamatos konzultációkat.

Köszönettel tartozom Dr. Korzenszky Péter egyetemi docensnek a talaj adottságainak vizsgálatához nyújtott értekezés támogatásért.

Köszönettel tartozom Dr. Milics Gábor egyetemi tanárnak az iránymutató, mélyreható beszélgetéseinket.

Köszönöm Dr. Varga Zoltán professor emeritusnak a matematikai módszer kidolgozásában nyújtott segítségét.

Köszönöm Dr. Takács Anitának, a Talajtani Intézet tudományos munkatársának az agrokémiai segítségét.

Köszönöm Lágymányosi Attila egyetemi adjunktusnak és Nagy István mesteroktatónak a hasznos tanácsait, amellyel hozzájárultak a mérőkör megépítéséhez.

Köszönöm Berze Claudia intézeti titkárnak a folyamatos adminisztrációs segítséget.

Köszönöm az AGCO Corporation igazgatójának, Dr. Bernhard Schmitz-nek és az AGCO Hungary Kft. volt ügyvezetőjének, Szakács Emesének a lehetőséget, hogy a napi munkám mellett is folytathattam a tudományos tevékenységem.

Köszönettel tartozom Kiss András barátomnak, aki támogatásával, és szakmai hozzáértésével hozzájárult a 3D modell elkészítéséhez.

Hálásan köszönöm páromnak Nyárai Tímeának és gyermekeimnek Horváth Lilinek és Horváth Áronnak, hogy támogattak és elviseltek a legnehezebb napokon is.

Végül, de nem utolsó sorban hálával és köszönettel tartozom a szüleimnek, hogy mindvégig mellettem álltak és támogattak ebben a nehéz és embert próbáló időszakban.



## 9. MELLÉKLETEK

**M1. Irodalomjegyzék**

1. ADAMCHUK, V. I., HUMMEL, J. W., MORGAN, M. T. et al. (2004): On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 71–91 p. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002>
2. AEF HONLAP - Agricultural Industry Electronics Foundation – <https://www.aef-online.org/membership/memberlist.html> (letöltve: 2024.02.08.)
3. AIOTI (2015): Smart farming and food safety Internet of Things applications – Challenges for large scale implementations. *Alliance for Internet of Things Innovation (AIOTI)*, Brussels, 49p., <https://aioti.eu/wp-content/uploads/2017/03/AIOTIWG06Report2015-Farming-and-Food-Safety.pdf> (letöltve: 2020.05.30.)
4. ALTDORFF, D., SADATCHARAM, K., UNC, A. et al. (2020): Comparison of Multi-Frequency and Multi-Coil Electromagnetic Induction (EMI) for Mapping Properties in Shallow Podsollic Soils. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(8), 2330 p. <https://doi.org/10.3390/s20082330>
5. AMBRUS, A., BURAI, P., LÉNÁRT, CS. et al. (2015): Estimating biomass of winter wheat using narrowband vegetation indices for precision agriculture. *Journal of Central European Green Innovation* 3 (2): 13–22 p.
6. ARIA, M., CUCCURULLO, C. (2017): bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis, *Journal of Informetrics*, Elsevier 11(4), 959-975 p. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
7. ÁDÁM, J. (2007): Globális geodéziai megfigyelőrendszer. *Magyar Tudomány* 167 (5): 563–576 p.
8. BÁNLAKI P., LOVAS A. (2012): Szenzorika és anyagai. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Typotex Kiadó, Budapest. ISBN 978-963-279-629-1 [https://oszkdk.oszk.hu/storage/00/00/60/42/dd/1/Banlaki\\_Lovas\\_Szenzorika\\_es\\_anyagai.pdf](https://oszkdk.oszk.hu/storage/00/00/60/42/dd/1/Banlaki_Lovas_Szenzorika_es_anyagai.pdf)
9. BERNARDI, A. C. DE C., INAMASU, R. Y. (2013): Adoção da agricultura de precisão no Brasil.
10. BLACKMORE, S. (2016): Farming with robots. PREGA konferencia, 2016. 02. 22., Budapest.
11. BÖGEL, GY. (2018): Digitális Transzformáció A Mezőgazdaságban. *Magyar Tudomány* 179(2018)5, 693–701 DOI: 10.1556/2065.179.2018.5.12
12. BURGER, K. (2012): Az analitikai kémia alapjai 7. kiadás, Budapest: Semmelweis Kiadó. 642 p.
13. BUSINESS INTELLIGENCE AND STRATEGY RESEARCH (2015): Precision Irrigation Market - By System (Sprinkler System, Center Pivot System, Variable Rate Irrigation, & Service); Application (Agriculture, Sport, Public Park, Garden, Lawn, and Greenhouse & Nursery) - Global Analysis & Forecast, 2015 to 2020
14. CASTLE, M., LUBBEN, B. D., LUCK, J. (2015): Precision agriculture usage and big agriculture data. Cornhusker Economics. University of Nebraska, [https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1725&context=agecon\\_cornhusker](https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1725&context=agecon_cornhusker) (letöltve: 2020.05.19.)
15. CEMA (2017): Digital Farming: what does it really mean? [https://www.cema-agri.org/images/publications/position-papers/CEMA\\_Digital\\_Farming\\_-\\_Agriculture\\_4.0\\_13\\_02\\_2017\\_0.pdf](https://www.cema-agri.org/images/publications/position-papers/CEMA_Digital_Farming_-_Agriculture_4.0_13_02_2017_0.pdf) (letöltve: 2020.05.19.)
16. CISA BA200N prospektus - <https://www.cisa.net/wp-content/uploads/2020/06/ENG-BA200N.pdf> (letöltve 2024.02.18.)
17. CHATTORAJ, D. K., BIRDI, K. S. (1984): Adsorption and the Gibbs Surface Excess; Plenum: New York

18. CORWIN, D. L., LESCH, S. M. (2005): Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3), 11–43 p. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>
19. CRAIG, V. S. J., HENRY, C. L. (2009): Specific Ion Effects at the Air–Water Interface: Experimental Studies. In: W. Kunz (szerk.): *Specific Ion Effects* World Scientific. 191–214 p. [https://doi.org/10.1142/9789814271585\\_0007](https://doi.org/10.1142/9789814271585_0007)
20. DAYO-OLAGBENDE, G.O., EWULO, B.S. (2021): Ionic Mobility of Cations as Affected by Redox Status of Two Different Soil Textures. *Bulgarian Journal of Soil Science*, 6(1), 18–32 p. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4887052>
21. DAS - Magyarország Digitális Agrár Stratégiája 2019-2022 (2019) In: *Digitális Jólét Program*, <https://digitalisjoletprogram.hu/files/24/2e/242e263bd2b441f6f30cf400e06e1e4a.pdf> (letöltve: 2024.02.07.)
22. DEFRA (2012): Farm practices survey October 2012 – Current farming issues. Department for Environment, Food & Rural Affairs, UK.
23. DOBOS, A. CS. (2013): Precíziós Növénytermesztés, Debreceni Egyetem. Agrár- és Gazdálkodástudományok Centruma, ISBN 978-963-473-698-1 (online), [https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/12423/2011-0085\\_precizios\\_novenytermesztes.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/12423/2011-0085_precizios_novenytermesztes.pdf?sequence=2&isAllowed=y) (letöltve: 2024.02.10.)
24. DRESSLER, N., GUNDERMANN, S., KEESE, S. et al. (2015): Business opportunities in Precision Farming: Will big data feed the world in the future? Roland Berger Strategy Consultants GmbH [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/roland\\_berger\\_business\\_opportunities\\_in\\_precision\\_farming\\_20150803.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_business_opportunities_in_precision_farming_20150803.pdf) (letöltve: 2020.05.19.)
25. EIP-AGRI (2015): Precision Farming Final Report, [https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri\\_focus\\_group\\_on\\_precision\\_farming\\_final\\_report\\_2015.pdf](https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri_focus_group_on_precision_farming_final_report_2015.pdf) (letöltve: 2020.05.19)
26. ERICKSON, B., LOWENBERG-DEBOER, J. (2022): 2022 Precision Agriculture Dealership Survey, Departments of Agronomy and Agricultural Economics, Purdue University, [https://ag.purdue.edu/digitalag/\\_media/croplife-report-2022.pdf](https://ag.purdue.edu/digitalag/_media/croplife-report-2022.pdf) (letöltve: 2024.02.10.)
27. EURACTIV (2016): Precision agriculture: future of the CAP? Stakeholder conference. <https://www.euractiv.com/section/agriculture-food/video/precision-agriculture-future-of-the-cap/> (letöltve: 2024.02.12.)
28. EUROPEAN GNSS AGENCY (2015): GNSS Market Report, Issue 4. – Agriculture. Publication Office of the EU, Luxemburg, 56–63. [https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/GNSS-Market-Report-2015-issue4\\_0.pdf](https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/GNSS-Market-Report-2015-issue4_0.pdf) (letöltve: 2020.05.19.)
29. EUSPA - EUROPEAN UNION AGENCY FOR THE SPACE PROGRAMME (2022). *EUSPA EO and GNSS Market Report. 2022/Issue 1*, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2878/94903>
30. FENDT SMART FARMING PROSPEKTUS - <https://www.fendt.com/int/geneva-assets/article/120796/664151-fendtsmartfarming-2001-en-web-v2.pdf>(letöltve: 2024.01.16.)
31. FILEP, GY., WAFI, M. J. K. (1993): A talajoldat sókoncentrációjának és a talaj nátriumtelítettségének (EPS) számítása a telítési kivonat jellemzőiből. *Agrokémia és talajtan*, 42(3–4), 245-256 p. ISSN 0002-1873
32. FOUNTAS, A., PEDERSEN, S. M., BLACKMORE, S. (2005): ICT in Precision agriculture - diffusion of technology. In: Gelb, E., Offer, A. (szerk.): *ICT in agriculture: perspective of technological innovation*,

- [https://economics.agri.huji.ac.il/sites/default/files/agri\\_economics/files/gelb-pedersen-5.pdf](https://economics.agri.huji.ac.il/sites/default/files/agri_economics/files/gelb-pedersen-5.pdf) (letöltve: 2020.05.19.)
33. FRIEDMAN, S. P. (2005): Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1), 45–70 p. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.001>
  34. GAÁL, M., KISS, A., PÉTER, K. et al. (2017). A precíziós szántóföldi növénytermesztés összehasonlító vizsgálata. (Kemény, G., Lámfalusi, I., Molnár, A. szerk). Budapest: Agrárgazdasági Kutató és Informatikai Intézet. Budapest. 170 p. <http://doi.org/10.7896/ak1703>
  35. GALBÁCS, G., GALBÁCS, Z., SIPOS, P. (2008): Műszeres analitikai kémiai gyakorlatok (3. kiadás). Szeged: JATEPress. [http://www2.sci.u-szeged.hu/inorg/muszi\\_v3.pdf](http://www2.sci.u-szeged.hu/inorg/muszi_v3.pdf) (letöltve: 2024.01.18.)
  36. GEBBERS, R., LÜCK, E., DABAS, M. et al. (2009): Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale. *Near Surface Geophysics*, 7(3), 179–190 p. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2009011>
  37. GEONICS LTD. HONLAP: <http://www.geonics.com/html/em38.html> (letöltve: 2020.06.01.)
  38. GEOPROSPECTORS GMBH HONLAP: <http://www.geoprospectors.com/gb/products-services/agriculture/> (letöltve: 2020.06.01.)
  39. GHOSAL, S., HEMMINGER, J. C., BLUHM, H. et al. (2005): Electron Spectroscopy of Aqueous Solution Interfaces Reveals Surface Enhancement of Halides. In: *Science*, 307(5709), 563–566 p. <https://doi.org/10.1126/science.1106525>
  40. GIESLER, S. (2018): Bioeconomy BW - Digitisation in agriculture - from precision farming to farming 4.0, <https://www.bioekonomie-bw.de/en/articles/dossiers/digitisation-in-agriculture-from-precision-farming-to-farming-40> (letöltve: 2020.05.19.)
  41. GRIEPENTROG, H.W. (2017): Smart Crop Farming; Landwirtschaftlicher Hochschultag, Landinfo 3/2017, 13-14 p.
  42. GROOM, D. (2008): Common misconceptions about capacitively-coupled resistivity (CCR) what it is and how it works. 21st EEGS Symposium, cp-177.
  43. GRUNWALD, S., VASQUESY, G.M., RIVEROX, R. G. (2015): Fusion of Soil and Remote Sensing Data to Model Soil Properties, *Advances In Agronomy Vol.131*. ISBN: 978-0-12-802136
  44. GYÖRFFY, B. (2000): A biogazdálkodástól a precíziós mezőgazdaságig. *Agrofórum* 11 (2): 1–4.
  45. HÁGEN, I. ZS., KONDOROSI, F.-NÉ (2012): Az agrárvállalkozások stabilizálása controllinggal. *A Controller*, 8. 15-19 p.
  46. HERDON, M., BOTOS, SZ., VÁRALLYAI, L. (2015): Decreasing the Digital Divide by Increasing E-Innovation and E-Readiness Abilities in Agriculture and Rural Areas. *International Journal of Agricultural And Environmental Information Systems*, 6./1. 1-18 p.
  47. HESSER, L. (2006): The Man Who Fed the World: Nobel Peace Prize Laureate Norman Borlaug and His Battle to End World Hunger. Dallas: Durban House
  48. 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>
  49. HORVATH, J., KÁTAI, L., SZABÓ, I. (2021) Menet közbeni talajszenzorok a precíziós mezőgazdaságban. *Mezőgazdasági technika*, 62(10), 2–5 p.
  50. HOSSAIN, S. (2019): Present Scenario of Global Salt Affected Soils, its Management and Importance of Salinity Research. *International Journal of Biological Sciences*, 1(1), 1–3 p.
  51. INTA: Competitividad y eficiencia – Tecnología precisa. INTA informa Año XII. #135. <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-tecnologia-precisa.pdf> (letöltve: 2020.05.19.)

52. ISO 11783 - [https://en.wikipedia.org/wiki/ISO\\_11783](https://en.wikipedia.org/wiki/ISO_11783) (letöltve: 2020.05.19.)
53. JOHNSON, C., EIGENBERG, R., DORAN, J. et al. (2005): Status of Soil Electrical Conductivity Studies by Central State Researchers. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 48(3), 979–989 p. <https://doi.org/10.13031/2013.18510>
54. JOHNSON, P. M. S. C. (2007): The Design of an Integrated Soil Moisture Sensor for Agriculture [Griffith thesis, Griffith University]. <https://doi.org/10.25904/1912/3681>
55. JÓRI, J. I., FARKAS, ZS., KERÉNYI, GY. et al. (2007): A talajművelő gépek feladatai, lehetőségei és műszaki megoldásai a számítógéppel támogatott mezőgazdaságban (CAF). OTKA Munkabeszámoló. [http://real.mtak.hu/1032/1/43355\\_ZJ1.pdf](http://real.mtak.hu/1032/1/43355_ZJ1.pdf) (letöltve: 2020.05.18.)
56. JUNG, A., VOHLAND, M., THIELE-BRUHN, S. (2015): Use of a portable camera for proximal soil sensing with hyperspectral image data. *Remote Sensing* 7: 11434–11448 p. <https://doi.org/10.3390/rs70911434>
57. JUNGWIRTH, P., TOBIAS, D. J. (2006): Specific Ion Effects at the Air/Water Interface. *Chemical Reviews*, 106(4), 1259–1281 p. <https://doi.org/10.1021/cr0403741>
58. KAPRONCZAI, I. (2011): A magyar agrárgazdaság az EU-csatlakozástól napjainkig. Budapest: Szaktudás Kiadó Ház. 190 p.
59. KIM, H. N., PARK, J. H. (2021): Research Trends Using Soil Sensors for Precise Nutrient and Water Management in Soil for Smart Farm. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 54(3), 366–382 p. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2021.54.3.366>
60. KUROLI, G., LEHOCZKY, É., PÁLMAI, O. et al. (2007): A precíziós növényvédelem. In: Németh T., Neményi M., Harnos Zs. (szerk.): *A precíziós mezőgazdaság módszertana*. JATE PRESS – MTA TAKI, Szeged, 77–137 p.
61. LI, M., WANG, M., WANG, Q. (2006): Development and performance test of a portable soil EC detector. *Applied Engineering in Agriculture*, 22(2), 301–307 p.
62. LLEWELLYN, R., OUZMAN, J. (2014): Adoption of precision agriculture-related practices: status, opportunities and the role of farm advisers. Report for Grain Research and Development Corporation. CSIRO Agriculture Flagship, [https://grdc.com.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0024/208653/adoption-of-precision-agricultural-related-practices-status-opportunities-and-the-role-of-farm-advisers-2014.pdf.pdf](https://grdc.com.au/_data/assets/pdf_file/0024/208653/adoption-of-precision-agricultural-related-practices-status-opportunities-and-the-role-of-farm-advisers-2014.pdf.pdf) (letöltve: 2020.05.25.)
63. LOWENBERG-DEBOER, J., ERICKSON, B. (2019): Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption, *Agronomy Journal*, <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>
64. LUND, E. D. (2008): Soil Electrical Conductivity. In: *Soil Science Step-by-Step Field Analysis*, 137–146 p. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/2008.soilsciencestepbystep.c11>
65. LUO, J., YE, S., LI, T. ET AL. (2019). Distinctive Trend of Metal Binding Affinity via Hydration Shell Breakage in Nanoconfined Cavity. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(23), 14825–14833 p. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b03004>
66. MALER, T. (2015): Interview: EU precision farming needs policy support to grow. *Agra Europe*. <https://iegpolicy.agribusinessintelligence.informa.com/PL027845/Interview-EU-precision-farming-needs-policy-support-to-grow> (letöltve: 2020.05.25.)
67. MARCUS, Y. (2010): Effect of ions on the structure of water. *Pure and Applied Chemistry*, 82(10), 1889–1899 p. <https://doi.org/10.1351/PAC-CON-09-07-02>
68. MARKETSandMARKETS (2020): Precision Farming Market by Technology (Guidance Systems, Remote Sensing, and Variable Rate Technology), by Hardware (Display, GPS/GNSS Devices, Yield Monitor, and Sensor) and Software & Services, *Application, and Geography – Global Forecast to 2025*. <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/precision-farming-market-1243.html> (letöltve: 2020.05.19.)
69. MASSOUD, F.I. (1981): Salt affected soils at a global scale for control. *FAO Land and Water Development Division Technical Paper*, Rome, Italy, 21 p.

70. MESTERHÁZI, P. Á. (2013): Development of measurement technique for GPS-aided plant production. Doctoral Dissertation (University of West-Hungary). 143 p.
71. MESTERHÁZI, P. Á. (2016): A helyspecifikus növénytermesztés létjogosultsága. Precíziós Gazdálkodás. *Digitalizáció innen és túl*. Opal Media és Kommunikációs Bt. Budapest.
72. MILICS, G., NEMÉNYI, M., MESTERHÁZI, P. Á. (2006): Növényi kártevők érzékelése infraszenzorral. In: Takácsné György K. (szerk.): *Növényvédő szer használat csökkentés gazdasági hatásai*. Szent István Egyetemi Kiadó, Gödöllő, 41–45 p.
73. MILICS, G., NEMÉNYI, M. (2007): Az adatgyűjtés műszaki és informatikai háttere. In Németh T., Neményi M., Harnos Zs. (szerk.): *A precíziós mezőgazdaság módszertana*. JATE PRESS – MTA TAKI, Szeged, 139–158 p.
74. MILICS, G., TAMÁS, J. (2007): Helymeghatározás. In: Németh T., Neményi M., Harnos Zs. (szerk.): *A precíziós mezőgazdaság módszertana*. JATE PRESS – MTA TAKI, Szeged, 15–37 p.
75. MILICS, G., NEMÉNYI, M., BORSICZKY I. et al. (2021): Precision Ag Definition. International Society of Precision Agriculture (<https://ispag.org/about/definition>)
76. MITSCHERLICH, E. A. (1909): Das gesetzmäßige des minimums und das gesetzmäßige des abnehmenden bodenertrages. *Landwirtsch Jahrbuch*, 38, 537-552 p.
77. MITSCHERLICH, E. A. (1928): Die zweite Annäherung des Wirkungsgesetzes der Wachstumsfaktoren. *Zeitschrift Für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, 12(5), 273–282 p. <https://doi.org/10.1002/jpln.19280120502>
78. MOGYORÓSI, B., SCHMIDT, R., GERGELY, I. et al. (2011): OptRXTM szenzor alkalmazásával meghatározott nitrogénfejtárgya-adagok hatása az őszi búza nedvessikértartalmára. *Acta Agronomica Óváriensis* 53 (2): 3–14 p.
79. MONTGOMERY, J., HORNBUCKLE, J., HUME, I. et al. (2015): IrriSAT – weather based scheduling and benchmarking technology. In Acuña, T., Moeller, C., Parsons, D., Harrison, M. (szerk.): *Building Productive, Diverse and Sustainable Landscapes*. Proceedings of the 17th Australian Agronomy Conference 2015, Hobart, Tas. [http://www.agronomyaustraliaproceedings.org/images/sampled/2015\\_Conference/pdf/agronomy2015final00449.pdf](http://www.agronomyaustraliaproceedings.org/images/sampled/2015_Conference/pdf/agronomy2015final00449.pdf) (letöltve: 2020.05.25.)
80. MUNNS, R. (2002): Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment*, 25(2), 239–250 p. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x>
81. NAGY, B. (2012): Megéri-e GPS-t használni a mezőgazdasági növénytermesztésben? *Agrárágazat* 2012. február, 78–80 p.
82. NEMÉNYI, M., MESTERHÁZI, P. Á., PECZE, ZS. et al. (2003): The role of GIS and GPS in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture* 40: 45–55 p.
83. OECD (2016): Farm Management Practices to Foster Green Growth, OECD Green Growth Studies, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264238657-en>
84. OHTAKI, H., RADNAI, T. (1993): Structure and dynamics of hydrated ions. *Chemical Reviews*, 93(3), 1157–1204 p. <https://doi.org/10.1021/cr00019a014>
85. PEI, X., ZHENG, L., ZHAO, Y. et al. (2012): Development and Performance Test for a New Type of Portable Soil EC Detector. AICT-392(Part I), 418 p. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36124-1\\_50](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36124-1_50)
86. POPP, J., ERDEI, E., OLÁH, J. (2018): A precíziós gazdálkodás kilátásai Magyarországon. *International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS)* Vol. 3. No. 1.
87. REISINGER, P. (2012): A precíziós növénytermesztés hazai helyzete, eddig elért fejlesztési eredmények és perspektívák. *Magyar Gyomkutatás és Technológia XIII.* (1): 3–19 p.
88. RENGASAMY, P. (1998): Processes involved in sodic behaviour. In: Sumner M.E., R Naidu R. (szerk.) *Sodic soils. Distribution, properties, management, and environmental consequences*. New York: New York Press. 35–50 p.
89. RENGASAMY, P. (2016): Soil Chemistry Factors Confounding Crop Salinity Tolerance—A Review. *Agronomy*, 6(4), 53. <https://doi.org/10.3390/agronomy6040053>

90. REPORTS AND DATA (2020): Agricultural Sensors Market Analysis, By Type By Application Forecasts To 2026, <https://www.reportsanddata.com/report-detail/agricultural-sensors-market> (letöltve: 2020.05.30.)
91. RHOADES, J. D., MANTEGHI, N. A., SHOUSE, P. J. et al. (1989): Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2), 433–439 p.
92. RHOADES, J., CORWIN, D., LESCH, S. (1999): Geospatial Measurements of Soil Electrical Conductivity to Determine Soil Salinity and Diffuse Salt Loading from Irrigation. In: *Geophysical Monograph Series*. 197–215 p. <https://doi.org/10.1029/GM108p0197>
93. RODE, B. M., SCHWENK, C. F., TONGRAAR, A. (2004): Structure and dynamics of hydrated ions—New insights through quantum mechanical simulations. *Journal of Molecular Liquids*, 110(1), 105–122 p. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2003.09.016>
94. SCHIMMELPFENNING, D. (2011): On the doorstep of the information age: Recent adoption of precision agriculture. *Economic Information Bulletin No. (EIB-80) USDA-Economic Research Service* 31 p.
95. SCHMITZ, B. (2017): Digitale Landwirtschaft aus der Sicht eines Landmaschinenherstellers, Ackerbau – technische Lösungen für die Zukunft, *Landtechnische Jahrestagung* 21-26 p.
96. SCHRIBER, S. (2020): Smart Agriculture Sensors: Helping Small Farmers and Positively Impacting Global Issues, Too; Sensor Technology on Mouser Electronics homepage, <https://www.mouser.co.uk/applications/smart-agriculture-sensors/> (letöltve: 2020.05.31)
97. SEIFI, M. R., ALIMARDANI, R., SHARIFI, A. (2010): Design and development of a portable soil electrical conductivity detector. *Asian Journal of Agricultural Sciences*, 2(4), 168–173 p.
98. SENTINEL ONLINE - <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/overview> (letöltve: 2024.02.10)
99. SOILEXPLORER PROSPEKTUS - <https://www.agrotec.hu/getattachment/5d0d1f5a-406d-4634-bf7c-b8760375c3a4/soilxplorer-talajszkenner.aspx>, (letöltve: 2024.02.10.)
100. SOILOPTIX CASE STUDY - <https://soiloptix.com/wp-content/uploads/2021/11/SoilOptix-Case-Study-From-Start-To-Finish-How-SoilOptix-Works.pdf> (letöltve: 2024.02.10.)
101. SOURCETRONIC ST2829 LCR MEASURING BRIDGE HASZNÁLATI ÚTMUTATÓ, <https://www.sourcetric.com/shop/uk/lcr-measuring-bridge-st2829c-1mhz.html> (letöltve: 2024.01.18.)
102. ŠPIKIĆ, D., ŠVRAKA, M., VASIĆ, D. (2022): Effectiveness of Electrostatic Shielding in High-Frequency Electromagnetic Induction Soil Sensing. *Sensors*, 22(8):3000, <https://doi.org/10.3390/s22083000>
103. STAFFORD, J. V., AMBLER, B. (1994): In-field location using GPS for spatially variable field operations. *Computers and Electronics in Agriculture* 11: 23–36 p.
104. STEENSLAND, A. (2019): 2019 Global Agricultural Productivity Report: Productivity Growth for Sustainable Diets, and More. In: Thompson, T.(szerk.): *Virginia Tech College of Agriculture and Life Sciences*. <https://globalagriculturalproductivity.org/wp-content/uploads/2019/01/2019-GAP-Report-FINAL.pdf> (letöltve: 2020.05.30.)
105. STEFANOVITS, PÁL., FILEP, GY., FÜLEKY, GY. (1999): Talajtan. Mezőgazda Kiadó, Budapest. 470 p.
106. STEWART, D. C., ANDERSON, W. L., GROVER, T. P. et al. (1994): Shallow subsurface mapping by electromagnetic sounding in the 300 kHz to 30 MHz range; model studies and prototype systems assessment. *Geophysics*, 59(8), 1201–1210 p. <https://doi.org/10.1190/1.1443678>
107. STOMBAUGH, T. S., MUELLER, T. G., SHEARER, S. A. ET AL. (2001): Guidelines for adopting precision agricultural practices. PA-2. *Cooperative Extension Service*, University of Kentucky, 4 p.

108. SZABÓ, I., HUSHKI, M., BÁRTFAI, Z. et al. (2017): Operator's behaviour measuring methodology inside off-road vehicle cabin operator's focusing scheme. *Agronomy Research*, Volume 15. No. 5. 2017. 2172-2182 p. ISSN1406-894X, <https://doi.org/10.15159/AR.17.033>
109. SZABÓ, I., HUSHKI, M., BÁRTFAI, Z. et al. (2018): Modelling of operator's focusing scheme along working hours: Windrowing and cultivating operations. *Agronomy Research*, Volume 16. No. 4. 2018. 1885-1895 p. ISSN 1406-894X <https://doi.org/10.15159/AR.18.155>
110. SZABÓ, I., HUSHKI, M., BÁRTFAI, Z. et al. (2019): Modelling of operator's focusing scheme along working hours: harvesting operation. *Agronomy Research*, Volume 17. No. 1. 2019. 271-280 p. ISSN 1406-894X, <https://doi.org/10.15159/AR.19.026>
111. SZABÓ, J., MILICS, G., TAMÁS, J. et al. (2007): Térinformatika a precíziós mezőgazdaságban (GIS). In: Németh T., Neményi M., Harnos Zs. (szerk.): *A precíziós mezőgazdaság módszertana*. JATE PRESS – MTA TAKI, Szeged, 39–62 p.
112. SZABÓ, S., MILICS, G. (2016): Zérótól a precíziós gazdálkodásig III. - Nitrogén-kijuttatási és tőszámterkép, vetőmag-ellenőrzés, talajhőmérséklet figyelés. *AGRO NAPLÓ*, 20(5), 73–76 p.
113. TAMÁS, J. (2002): *Precíziós mezőgazdaság*, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó. Budapest.
114. TAMÁS, J. (2013): *Precision Agriculture*. University of Debrecen, Service Sciences Methodology Centre, Debrecen, 109 p.
115. TECHNAVIO (2015): *Global precision agriculture market 2015-2019*, (letöltve: 2020.05.19.)
116. THE ECONOMIST (2001): *How Much Is Enough? A Special Report on Feeding the World*. *The Economist*, 26 February, 5–9 p. <https://www.economist.com/node/18200702> (letöltve: 2020.05.19.)
117. TÓTH, R., DARÓCZI, M. (2013): *A növénytermesztés gépesítés fejlesztésének tendenciái*. *Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka*. XVIII. Kolozsvár, 415-418 p.
118. UN - UNITED NATIONS (2015): *World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, Working\_Paper/ESA/P/WP.241. [https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key\\_finding\\_s\\_wpp\\_2015.pdf](https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key_finding_s_wpp_2015.pdf) (letöltve: 2020.05.19)
119. VAN EGMOND, F.M., LOONSTRA, E.H., LIMBURG, J. (2010): Gamma-ray sensor for topsoil mapping; the Mole, *Proximal Soil Sensing* 323-332 p. DOI: 10.1007/978-90-481-8859-8\_27
120. VERIS - Veris Technologies Inc. honlap: <https://www.veristech.com/sensing> (letöltve: 2024.02.10.)
121. VÉRTESY, L. (2023): *Precíziós mezőgazdaság: helyzetkép és gazdasági megfontolások : Műhelytanulmány*. In: Boros A. (szerk.) *Körforgásos gazdaság*. MATE Press, Gödöllő. 60 p. ISBN 978-963-623-039-5. <https://doi.org/10.54597/mate.0092>
122. VIGANI, M., CREZO, E. R., BARERO, M. G. (2015): The determinants of wheat yields: The role of sustainable innovation, policies and risks in France and Hungary. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC95950/ipts%20jrc%2095950%20web.pdf> (letöltve: 2020.05.30.)
123. VISCARRA ROSSEL R. A., ADAMCHUK V. I., SUDDUTH K. A. et al. (2011): Chapter Five - Proximal Soil Sensing: An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time, In: Spark D. L. (szerk.) *Chapter 5. Advances in Agronomy*, Volume 113, 243-291 p., <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386473-4.00005-1>
124. VISCONTI, F., DE PAZ, J. M. (2016): Electrical Conductivity Measurements in Agriculture: The Assessment of Soil Salinity. In: *New Trends and Developments in Metrology*. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/62741>

125. VLUGT, P. V. D. (2017): ISOBUS: State of the Art and Future Directions, 27th Club of Bologna Members' Meeting Hanover, 12-13. November 2017.
126. WALUYO, I., HUANG, C., NORDLUND, D. et al. (2011): The structure of water in the hydration shell of cations from x-ray Raman and small angle x-ray scattering measurements. *The Journal of Chemical Physics*, 134(6): 064513. <https://doi.org/10.1063/1.3533958>
127. WICKE, B., SMEETS, E., DORNBURG, V. et al. (2011): The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. *Energy & Environmental Science*, 4(8), 2669–2681 p. <https://doi.org/10.1039/C1EE01029H>
128. WINSTEAD, A., FULTON, J., MULLENIX, D. (2010): Considerations for Adopting & Implementing Precision Ag Technologies; *Cornell Precision Agricultural Series*. [http://nydairyadmin.cce.cornell.edu/pdf/submission/pdf161\\_pdf.pdf](http://nydairyadmin.cce.cornell.edu/pdf/submission/pdf161_pdf.pdf) (letöltve: 2020.05.19.)
129. WULFSOHN, D., ZAMORA LAGOS, I. (2014): The use of a multirotor and high-resolution imaging for precision horticulture in Chile: an industry perspective. 12th International Conference on Precision Agriculture, Sacramento, California, USA, Paper No. 1688., 15 p.
130. XANTHEAS, S. S., VOTH, G. A. (2009): Aqueous Solutions and Their Interfaces. *The Journal of Physical Chemistry B*, 113(13), 3997–3999. <https://doi.org/10.1021/jp900202a>
131. ZARCO-TEJADA P. J., HUBBARD N., LOUDJANI P (2014): Precision Agriculture: An Opportunity For Eu Farmers - Potential Support With The Cap 2014-2020, [http://ict-agri.eu/sites/ict-agri.eu/files/IPOL-AGRI\\_NT%282014%29529049\\_EN.pdf](http://ict-agri.eu/sites/ict-agri.eu/files/IPOL-AGRI_NT%282014%29529049_EN.pdf) (letöltve: 2020.05.30.)
132. ZHANG, X., SHI, L., JIA, X. ET AL. (2010): Zone mapping application for precision-farming: a decision support tool for variable rate application. *Precision Agriculture* 11: 103–114., DOI 10.1007/s11119-009-9130-4



**M2. Saját 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.

**M3. Ábrajegyzék**

1. ÁBRA A PRECÍZIÓS GAZDÁLKODÁSTÓL A DIGITÁLIS GAZDÁLKODÁSIG (GRIEPENTROG, 2017 MAGYAR FELIRATTAL).....	14
2. ÁBRA FENDTONE TERMINÁL A KIJUTTATÁSI TERVVEL, AZ ELVÉGZETT MUNKÁVAL ÉS A MUNKAGÉP VEZÉRLÉSSEL.....	15
3. ÁBRA A MEZŐGAZDASÁG TECHNOLÓGIAI EVOLÚCIÓJA (DAS, 2019) .....	17
4. ÁBRA A GLOBÁLIS TERMÉSMENNYISÉG ÉVES NÖVEKEDÉSI RÁTÁJA A FONTOSABB TERMÉNYEK ESETÉBEN (THE ECONOMIST, 2011 MAGYAR FELIRATTAL).....	18
5. ÁBRA KORREKCIÓS JELEK OSZTÁLYBA SOROLÁSA .....	21
6. ÁBRA A MEGMŰVELT TERÜLET VÁLTOZÉKONY (FENDT SMART FARMING).....	23
7. ÁBRA DIFFERENCIÁLT KIJUTTATÁS VEZÉRLÉSE EGY FENDT TRAKTOR FENDTONE TERMINÁLJÁN.....	24
8. ÁBRA A PRECÍZIÓS TECHNOLÓGIÁK HELYE A GARTNER-FÉLE HIPERCIKLUS GÖRBÉN (BLACKMORE, 2016; GAÁL ET AL., 2017).....	25
9. ÁBRA AZ ALKALMAZOTT PRECÍZIÓS TECHNOLÓGIAI ELEMELK ARÁNYA A FŐBB NÖVÉNYKULTÚRÁKBAN (GAÁL ET AL., 2017) .....	26
10. ÁBRA A GNSS-ESZKÖZÖK ALKALMAZÁSÁNAK VÁLTOZÁSA (EUROPEAN GNSS AGENCY, 2015; GAÁL ET AL., 2017) .....	28
11. ÁBRA A TELEPÍTETT GNSS ESZKÖZÖK ALKALMAZÁSONKÉNT (EUSPA, 2022) .....	29
12. ÁBRA A GNSS-ESZKÖZÖK ÉRTÉKESÍTÉSÉBŐL ÉS SZOLGÁLTATÁSAIBÓL SZÁRMAZÓ BEVÉTELEK ALKALMAZÁS SZERINT (EUSPA, 2022) .....	29
13. ÁBRA A VÁLASZT BEKÜLDŐ MÁRKAKERESKEDŐK PRECÍZIÓS SZOLGÁLTATÁSI KÍNÁLATA A FELMÉRÉS SZERINT, A JELENLEGI KÍNÁLAT SZERINT RANGSOROLVA. A KERÉKÍTÉS MIATT A SOROK ÖSSZEJE NEM BIZTOS, HOGY 100 % (ERICKSON ÉS LOWENBERG-DEBOER, 2022).....	30
14. ÁBRA A TALAJKÖZELI SZENZOROK CSOPORTOSÍTÁSA (VISCARRA ROSSEL ET AL., 2011, MAGYAR FELIRATTAL) .....	33
15. ÁBRA VERIS MSP3 MUNKÁBAN (VERIS HONLAP).....	35
16. ÁBRA SOILEXPLORER MUNKAHELYZETBEN .....	36
17. ÁBRA AZ ELEKTROMOS ÁRAMVEZETÉS IRÁNYA A 3 FÁZISÚ TALAJBAN (RHOADES ET AL., 1989; CORWIN ÉS LESCH, 2005).....	39
18. ÁBRA A TALAJ SÓTARTALMA (SÓ %) ÉS A TELÍTÉSI KIVONAT ELEKTROMOS VEZETŐKÉPESSÉGE (EC) KÖZÖTTI ÖSSZEFÜGGÉS A 6. KÉPLETTEL SZÁMOLVA (FILEP ÉS WAFI, 1993) .....	40
19. ÁBRA A VIZES HIDRÁTBUROK NAGYSÁGA AZ EGYES ELEMELKNÉL A TALAJBAN (STEFANOVITS ET AL., 1999).....	43
20. ÁBRA NÉHÁNY GYAKORI ION ÉS HIDRATÁLT SUGÁR (EFFEKTÍV MÉRET) ANGSTRÖMBEN (LUO ET. AL., 2019) .....	44
21. ÁBRA KÉPERNYŐKÉP A LEKÉRDEZÉSÉRŐL A SCOPUS ADATBÁZISÁBAN .....	46
22. ÁBRA ORSZÁGOK KOLLABORÁCIÓS DIAGRAMJA KAMADA-KAWAI MÓDSZERREL .....	46

23. ÁBRA LEGGYAKORIBB KULCSSZAVAK EGYÜTTES ELŐFORDULÁSI HÁLÓZATA FRUCHTERMAN-REINGOLD MÓDSZERREL .....	47
24. ÁBRA LEGGYAKORIBB KULCSSZAVAK EGYÜTTES ELŐFORDULÁSI HÁLÓZATA KAMADA- KAWAI MÓDSZERREL .....	47
25. ÁBRA TEMATIKUS TÉRKÉP A KULCSSZAVAK ELŐFORDULÁSÁRA.....	48
26. ÁBRA A KÍSÉRLETEKHEZ FELHASZNÁLT TALAJ ELŐKÉSZÍTÉSE A LABORATÓRIUMBAN .....	50
27. ÁBRA A CISA BA200N LABORATÓRIUMI SZITA (CISA BA200N PROSPEKTUS).....	50
28. ÁBRA A SZITAMARADÉK SZÁZALÉKOS ELOSZLÁSA A SZEMCSEMÉRET (SZITA LYUKMÉRET) FÜGGVÉNYÉBEN .....	52
29. ÁBRA A MÉRŐKÖR A TALAJPASZTÁVAL VÉGZETT KÍSÉRLETEKHEZ.....	54
30. ÁBRA A MÉRŐHENGER.....	54
31. ÁBRA A FOLYADÉK EGYENLETES ELOSZTÁSÁRA SZOLGÁLÓ ELOSZTÓFEJ .....	55
32. ÁBRA A MÉRŐKÖR ÁTALAKÍTÁSA A KÉTFÁZISÚ OLDATOKHOZ .....	55
33. ÁBRA A ZAVARÓ JELEK KIKÜSZÖBÖLÉSÉRE SZOLGÁLÓ MÉRÉSI MÓDSZER (SOURCETRONIC) .....	56
34. ÁBRA SOURCETRONIC ST26011B MŰSZERBEKÖTÉS.....	56
35. ÁBRA A MÉRÉS PARAMÉTEREZÉSE.....	57
36. ÁBRA EGY MÉRÉS KÉPERNYŐKÉPE.....	58
37. ÁBRA KSP-F01A PERISZTALTIKUS ADAGOLÓSZIVATTYÚ.....	58
38. ÁBRA A SZKENNELT MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV .....	59
39. ÁBRA A MÉRÉS PILLANATFELVÉTELE .....	60
40. ÁBRA A .CSV FÁJL BEOLVASÁSA .....	60
41. ÁBRA AZ ADATBÁZIS .....	61
42. ÁBRA A PIVOT TÁBLA RÉSZLETE A KITÜNTETETT MÉRÉSI EREDMÉNNYEL.....	61
43. ÁBRA AZ 0,5 M KONCENTRÁCIÓJÚ KCL TALAJOLDAT MÉRÉSI SZEKVENCIÁNKÉNTI EC ÉRTÉK DIAGRAMJA .....	62
44. ÁBRA A MÉRÉSI REKORDOK ÉRTÉKVIZSGÁLATA.....	62
45. ÁBRA A MÉRÉS PILLANATFELVÉTELE .....	63
46. ÁBRA A .CSV FÁJL BEOLVASÁSA .....	63
47. ÁBRA AZ ADATBÁZIS .....	64
48. ÁBRA A PIVOT TÁBLA RÉSZLETE A KITÜNTETETT MÉRÉSI EREDMÉNNYEL.....	64
49. ÁBRA AZ 50 % KCL – 50 % CaCl <sub>2</sub> KEVERÉKOLDAT MÉRÉSI SZEKVENCIÁNKÉNTI EC ÉRTÉK DIAGRAMJA .....	65
50. ÁBRA A MÉRÉSI REKORDOK ÉRTÉKVIZSGÁLATA.....	65
51. ÁBRA AZ EC-ÉRTÉKEK KÜLÖNBÖZŐ KONCENTRÁCIÓJÚ KCL TALAJOLDATOKRA.....	66
52. ÁBRA EC A LOGARITMIKUS MÉRÉSI FREKVENCIA FÜGGVÉNYÉBEN KÜLÖNBÖZŐ KONCENTRÁCIÓJÚ KCL-LEL ÁZTATOTT TALAJOLDATOK ESETÉBEN .....	67
53. ÁBRA AZ EC A K <sup>+</sup> KONCENTRÁCIÓ ÉS A FREKVENCIA FÜGGVÉNYÉBEN.....	67

54. ÁBRA EC TELÍTÉSI GÖRBE KÜLÖNBÖZŐ $K^+$ KONCENTRÁCIÓJÚ TALAJOLDATOKHOZ TERMÉSZETES SKÁLÁN ÁBRÁZOLVA.....	68
55. ÁBRA AZ EC-ÉRTÉKEK KÜLÖNBÖZŐ KONCENTRÁCIÓJÚ $CaCl_2$ TALAJOLDATOKRA.....	69
56. ÁBRA EC A LOGARITMIKUS MÉRÉSI FREKVENCIA FÜGGVÉNYÉBEN KÜLÖNBÖZŐ KONCENTRÁCIÓJÚ $CaCl_2$ -VEL ÁZTATOTT TALAJOLDATOK ESETÉBEN .....	69
57. ÁBRA AZ EC A $Ca^{2+}$ KONCENTRÁCIÓ A TALAJBAN ÉS A MÉRÉSI FREKVENCIA FÜGGVÉNYÉBEN	70
58. ÁBRA EC TELÍTÉSI GÖRBE KÜLÖNBÖZŐ $Ca^{2+}$ KONCENTRÁCIÓJÚ TALAJOLDATOKHOZ TERMÉSZETES SKÁLÁN ÁBRÁZOLVA.....	70
59. ÁBRA A KONCENTRÁCIÓ MEGHATÁROZÁSA A REFERENCIAÉRTÉKEK INTERPOLÁCIÓJÁVAL .....	72
60. ÁBRA A KONCENTRÁCIÓ MEGHATÁROZÁSA A REFERENCIAÉRTÉKEK REGRESSZIÓS FÜGGVÉNYEINEK AZ INTERPOLÁCIÓJÁVAL .....	74
61. ÁBRA A KÜLÖNBÖZŐ KEVERÉKEK EC-MÉRÉSEINEK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA LOGARITMIKUS FREKVENCIÁN .....	75
62. ÁBRA A KÜLÖNBÖZŐ KEVERÉKEK EC-MÉRÉSEINEK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA ÉS A KÜLÖNBÖZŐ FREKVENCIÁKON VÉGZETT MÉRÉSEK FÜGGVÉNYILLESZTÉSE .....	76
63. ÁBRA A VEZETŐKÉPESSÉG NULLFREKVENCIÁRA EXTRAPOLÁLT ÉRTÉKEI A MÉRÉSI FREKVENCIÁK ÉS AZ EXPONENCIÁLIS FÜGGVÉNY ILLESZTÉSÉNEK FÜGGVÉNYÉBEN .....	78
64. ÁBRA A VÁLTOZÁS MÉRTÉKÉNEK ÉRTÉKEI A MÉRÉSI GYAKORISÁGOK ÉS A LINEÁRIS FÜGGVÉNY ILLESZTÉSÉNEK FÜGGVÉNYÉBEN .....	78
65. ÁBRA A FREKVENCIAÁLLANDÓ ÉRTÉKEI A MÉRÉSI FREKVENCIÁK FÜGGVÉNYÉBEN ÉS AZ EXPONENCIÁLIS FÜGGVÉNY ILLESZTÉSE.....	79
66. ÁBRA A KÜLÖNBÖZŐ KÉTKOMPONENSŰ KEVERÉKEK MÉRÉSEINEK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA A FREKVENCIA FÜGGVÉNYÉBEN .....	80
67. ÁBRA A $Ca - K$ IONKEVERÉK $Ca$ -TARTALMA A NULLA FREKVENCIÁRA EXTRAPOLÁLT VEZETŐKÉPESSÉG ( $\gamma_0$ ) FÜGGVÉNYÉBEN.....	81
68. ÁBRA A FREKVENCIAÁLLANDÓ ( $t$ ) A KÉTKOMPONENSŰ OLDAT $Ca^{2+}$ KONCENTRÁCIÓJÁNAK FÜGGVÉNYE .....	82
69. ÁBRA AZ EC ÉS A KONCENTRÁCIÓ A TALAJBAN ÉS A MÉRÉSI FREKVENCIA FÜGGVÉNYÉBEN – $K$ ÉS $Ca$ ÖSSZEHAJONLÍTÁS .....	83
70. ÁBRA A KÁLIUM ( $K^+$ ) ÉS KALCIUM ( $Ca^{2+}$ ) REFERENCIAFÜGGVÉNYEK ELTÉRNEK.....	83

**M4. Táblázatok jegyzéke**

1. TÁBLÁZAT A TALAJSZKENNEREK ÖSSZEHASONLÍTÁSA (HORVÁTH ET AL., 2021) .....	37
2. TÁBLÁZAT A TALAJ SÓTARTALOM SZERINTI KATEGORIZÁLÁSA ÉS A NÖVÉNYEK FEJLŐDÉSE (STEFANOVITS ET AL., 1999).....	41
3. TÁBLÁZAT TALÁLATOK A KERESŐSZAVAKRA ÉS AZOK VOLATILITÁSA.....	45
4. TÁBLÁZAT A SZITAANALÍZIS EREDMÉNYE .....	51
5. TÁBLÁZAT A VIZSGÁLATBAN SZEREPLŐ SÓK JELLEMZÉSE .....	53
6. TÁBLÁZAT REFERENCIAFÜGGVÉNYEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA .....	71
7. TÁBLÁZAT A MÉRÉSI EREDMÉNYEK.....	76
8. TÁBLÁZAT AZ EXPONENCIÁLIS FÜGGVÉNY ILLESZTÉSÉNEK PARAMÉTEREI ÉS DETERMINÁCIÓS EGYÜTTHATÓJA.....	77
9. TÁBLÁZAT A LINEÁRIS FÜGGVÉNYILLESZTÉS PARAMÉTEREI ÉS A DETERMINÁCIÓS EGYÜTTHATÓ A 250 KHZ-EN ÉS 500 KHZ-EN VÉGZETT MÉRÉSEKHEZ. ....	77
10. TÁBLÁZAT A FÜGGVÉNYEK ILLESZKEDÉSI PARAMÉTEREI ÉS A DETERMINÁCIÓS EGYÜTTHATÓ	81

## M5. Talajvizsgálati jegyzőkönyv

 <b>MATE</b> MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM	<b>MATE Egyetemi Laborközpont</b> <b>ÖVKI Környezetanalitikai</b> <b>Szakterület</b> 5540 Szarvas, Anna-liget u. 35.	Dok. Azonosító: Fny7.8-3
		Kiadás száma: 9.
		Kiadás dátuma: 2022.01.03
		Változat száma: 2.
A NAH által NAH-1-1586/2022 számon akkreditált vizsgálólaboratórium.		Változat dátuma: 2023.11.20
<b>VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV</b> Azonosító: t 72--2024		

Megrendelő: MATE Egyetemi Laborközpont  
 Jártassági minta

Beérkezés ideje: 2024.02.09  
 Vizsgálat kezdete: 2024.02.09  
 Vizsgálat befejezése: 2024.02.15

Mintavétel: nem akkreditált  
 Mintavétel helye: Szárítópusztá  
 Mintavétel ideje: 2024.02.06  
 Mintavevő neve: Horváth János

Minta laboratóriumi sorszáma	Minta jele	Minta típusa	Megjegyzés
t72/2024	Szárítópusztá	talaj	

A vizsgálati jegyzőkönyv tartalma:  
 -Vizsgálati eredmények táblázata  
 -Vizsgálati módszerek táblázata

A vizsgálati jegyzőkönyvben foglalt eredmények csak a behozott mintákra vonatkoznak.  
 A Laboratórium írásbeli engedélye nélkül a vizsgálati jegyzőkönyv csak teljes terjedelmében másolható.  
 A mintákat a jegyzőkönyv kiadása után 20 munkanapig őrizzük meg; észrevételeit szíveskedjen ezen időn belül megtenni.

Szarvas, 2024.02.15



Szabó Gábor  
 szakterületvezető

 <b>MATE</b> MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM	<b>MATE Egyetemi Laborközpont</b> <b>ÖVKI Környezetanalitikai</b> <b>Szakterület</b> 5540 Szarvas, Anna-liget u. 35.	Dok. Azonosító: Fny7.8-3
		Kiadás száma: 9.
		Kiadás dátuma: 2022.01.03
		Változat száma: 2.
A NAH által NAH-1-1586/2022 számon akkreditált vizsgálólaboratórium.		Változat dátuma: 2023.11.20
<b>VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV</b> Azonosító: t 72--2024		

Vizsgált paraméter	Mértékegység	Minták laboratóriumi száma					
		t72/2024					
pH (KCl)		6,26					
Arany-féle kötöttségi szám (K <sub>A</sub> )		<25					
Vízben oldható összes só	m/m % légsz.	<0,02					
Szénsavas mész	m/m % légsz.	<0,5					
Humusz	m/m % légsz.	<0,5					
Nitrit + nitrát - N (KCl)	mg / kg légsz.	3,45					
Foszfor-pentoxid (AL)	mg / kg légsz.	78,7					
Kálium-oxid (AL)	mg / kg légsz.	72,2					
Magnézium (KCl)	mg / kg légsz.	80,2					
Szulfáttartalom (KCl)	mg / kg légsz.	20,1					
pH (H <sub>2</sub> O)		7,16					
Na-BaCl <sub>2</sub> *	mg / kg légsz.a.	9,05					
Na-BaCl <sub>2</sub> *	mgeé /100g	0,039					
K-BaCl <sub>2</sub> *	mg / kg légsz.a.	102					
K-BaCl <sub>2</sub> *	mg /100g	0,260					
Ca-BaCl <sub>2</sub> *	mg / kg légsz.a.	696					
Ca-BaCl <sub>2</sub> *	mgeé 100g	3,472					
Mg-BaCl <sub>2</sub> *	mg / kg légsz.a.	116					
Mg-BaCl <sub>2</sub> *	mgeé 100g	0,953					

\*A vizsgálatra a laboratórium a NAH által nem akkreditált.



 <b>MATE</b> MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM	<b>MATE Egyetemi Laborközpont</b> <b>ÖVKI Környezetanalitikai</b> <b>Szakterület</b>  5540 Szarvas, Anna-liget u. 35.	Dok. Azonosító: Fny7.8-3
		Kiadás száma: 9.
		Kiadás dátuma: 2022.01.03
		Változat száma: 2.
		Változat dátuma: 2023.11.20
A NAH által NAH-1-1586/2022 számon akkreditált vizsgálólaboratórium.		
<b>VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV</b>		
Azonosító: t 72--2024		

Vizsgált paraméter	A vizsgálat típusa	A vizsgálati módszer
pH (KCl)	potenciometria	MSZ-08-0206-2:1978 2.1.szakasz
Arany-féle kötöttségi szám (K <sub>A</sub> )	plaszticitás	MSZ-08-0205:1978 5.1.szakasz
Vízben oldható összes só	konduktometria	MSZ-08-0206-2:1978 2.4.szakasz
Szénsavas mész	volumetria	MSZ-08-0206-2:1978 2.2.szakasz
Humusz	fotometria	MSZ-08-0210:1977 2.1.szakasz
Nitrit + nitrát - N (KCl)	FIA spektrofotometria	MSZ 20135:1999 5.4.5.szakasz
Foszfor-pentoxid (AL)	FIA spektrofotometria	MSZ 20135:1999 5.4.2.szakasz
Kálium-oxid (AL)	FAAS	MSZ 20135:1999 5.2.szakasz
Magnézium (KCl)	FAAS	MSZ 20135:1999 5.2.szakasz
Szulfáttartalom (KCl)	spektrofotometria	MSZ 20135:1999 5.4.1.1.szakasz
pH (H <sub>2</sub> O)	potenciometria	MSZ-08-0206-2:1978 2.1.szakasz
Na-BaCl <sub>2</sub> *	FAAS	MSZ-08-0214-2:1978
K-BaCl <sub>2</sub> *	FAAS	MSZ-08-0214-2:1978
Ca-BaCl <sub>2</sub> *	FAAS	MSZ-08-0214-2:1978
Mg-BaCl <sub>2</sub> *	FAAS	MSZ-08-0214-2:1978

\*A vizsgálatra a laboratórium a NAH által nem akkreditált.

Vizsgálati jegyzőkönyv vége

