

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Kovács Flórián

Budapest

2026



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

A bioimpedancia spektroszkópia alkalmazhatósága a növények nitrogén-ellátottságának megfigyelésére

Kovács Flórián

Budapest

2026

A doktori iskola

megnevezése: Agrár- és Élelmiszertudományok Doktori Iskola

tudományága: Növénytermesztési és kertészeti tudományok

vezetője: **Prof. Dr. Kovács Melinda**

egyetemi tanár, az MTA rendes tagja

Témavezetők: **Dr. Juhos Katalin**

egyetemi docens,
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Budai
Campus, Agrárkörnyezettani Tanszék,
Környezettudományi Intézet

Dr. Vizvári Zoltán

egyetemi adjunktus
Óbudai Egyetem, Neumann János Informatikai Kar
Biomatika és Alkalmazott Mesterséges Intelligencia
Intézet, Óbudai Egyetem, Egyetemi Kutató és
Innovációs Központ, Bioimpedancia Technológiák
Kutatóközpont

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

Dr. Juhos Katalin

.....
A témavezető jóváhagyása

Dr. Vizvari Zoltán

1. A munka előzményei, célkitűzések

Az intenzív zöldségtermesztésben a nitrogén (N) alapvetően meghatározza a növények növekedését, fotoszintetikus aktivitását és termésképzését. A kijuttatott N mennyisége azonban gyakran meghaladja a növények tényleges igényét, ami gazdasági veszteséget és környezeti kockázatot okozhat, különösen a nitrát (NO_3^-) talajvízbe jutása révén. Ezért a hatékony N-gazdálkodás egyik alapfeltétele a növényi N-állapot gyors, megbízható és lehetőleg nem destruktív meghatározása. A jelenleg alkalmazott analitikai módszerek pontosak, de destruktívak és időigényesek, míg az optikai szenzorok a N-ellátottságot többnyire közvetetten, a klorofilltartalom alapján becsülik. Emiatt szükség van olyan mérési megközelítésekre, amelyek közvetlenebb kapcsolatban állnak a sejtszintű élettani folyamatokkal.

A bioimpedancia spektroszkópia (BIS) a növényi szövetek elektromos tulajdonságait vizsgálja, és lehetőséget ad az extracelluláris, intracelluláris és vakuólumhoz kapcsolódó elektromos komponensek elkülönített értelmezésére. A BIS-paraméterek információt hordozhatnak a sejtek hidratáltságáról, ioneloszlásáról és membránállapotáról, ezért alkalmasak lehetnek a N-hiány sejtszintű kimutatására. A módszer tápanyagdiagnosztikai értéke, különösen N-hiány esetén, azonban még kevésbé tisztázott. Különösen fontos kérdés, hogy az extracelluláris ellenállás mennyiben tükrözi az apoplasztikus NO_3^- -koncentrációt, a vakuólum-ellenállás hogyan kapcsolódik a NO_3^- -tároláshoz, valamint a sejtmembrán-kapacitás milyen kapcsolatban áll a membránstabilitással. A BIS-paraméterek értelmezését tovább nehezíti, hogy a szövetek vízállapota is jelentősen befolyásolja az ionmozgást és a vezetőképességet, ezért a N- és vízellátottság hatásainak elkülönítése alapvető módszertani kérdés.

Kutatásom célja egy minimálisan invazív, *in vivo* diagnosztikai megközelítés kidolgozása volt, amely a BIS és az optimalizált impedanciamodellezés kombinációjával alkalmas a növények N-ellátottságához kapcsolódó sejtszintű elektromos változások feltárására. Alaphipotézisem szerint a sejtkompartment-specifikus BIS-paraméterek kvantitatív kapcsolatban állnak a növények N-ellátottságával, különösen a NO_3^- sejten kívüli és sejten belüli eloszlásával.

A kutatás során az alábbi célkitűzéseket fogalmaztam meg:

1. Olyan bioimpedancia-spektroszkópiai (BIS) mérési protokoll kidolgozása és validálása, amely alkalmas a növényi N-állapot gyors, minimálisan invazív vizsgálatára.
2. Az extracelluláris NO_3^- tartalom és extracelluláris folyadék ellenállás közötti kapcsolat vizsgálata és kvantitatív jellemzése.
3. Az extracelluláris, intracelluláris és vakuólum-kompartmentekhez tartozó ellenállásparaméterek változásainak elemzése különböző nitrogénellátottsági szintek mellett.
4. A sejtmembrán kapacitás változásainak vizsgálata különböző nitrogénellátottsági feltételek mellett, valamint annak értelmezése a membránállapot szempontjából.
5. A BIS-paraméterek és a klasszikus növényélettani mutatók (NO_3^- - tartalom, összes nitrogéntartalom, klorofilltartalom, relatív víztartalom) közötti összefüggések feltárása a módszer élettani értelmezésének és diagnosztikai potenciáljának alátámasztására.
6. A BIS módszer alkalmasságának vizsgálata a korai N-hiány kimutatására, valamint a vízállapot és a N-ellátottság együttes hatásainak értékelése a BIS-paraméterek változásán keresztül.

2. Anyag és módszer

2.1. Kísérleti körülmények és növényanyag

A BIS növényélettani alkalmazhatóságának vizsgálatához több, egymásra épülő kísérleti rendszert alkalmaztunk. A vizsgálatok célja egyrészt a mérési eljárás és a modellezési megközelítések validálása, másrészt a N-ellátottság, a vízhiány, valamint ezek együttes biofizikai és növényélettani hatásainak feltárása volt. A növénynevelés és a mérések szabályozott környezeti feltételek mellett, főként fényszobában és üvegházban történtek.

A vizsgálatok első fázisában étkezési paprika (*Capsicum annuum* L.) növényeket alkalmaztunk a BIS-mérési eljárás, valamint a ZFIT- és PSO-alapú Double-Shell modellezés validálására vízstressz-körülmények között.

Ezt követően a kutatás fókusz a N-ellátottság bioimpedancia-alapú értelmezésére helyeződött át, amelyhez fejes saláta (*Lactuca sativa* L.) növényeket használtunk. A saláta kísérleti rendszer lehetővé tette a BIS-paraméterek, a növényi N-állapot és a levél NO_3^- -tartalma közötti összefüggések vizsgálatát.

A további kísérletekben uborka (*Cucumis sativus* L.) növényeket alkalmaztunk annak értékelésére, hogy a salátában feltárt összefüggések más növényfajban és eltérő genotípusok esetében is kimutathatók-e. Az uborkakísérletek különösen a korai N-hiány felismerésére, valamint a N-forma és a vízellátottság együttes hatásainak vizsgálatára irányultak. A kísérleti felépítés így fokozatosan épült fel: a paprika a módszertani validációt, a saláta a N-specifikus élettani kapcsolatok feltárását, az uborka pedig a módszer diagnosztikai értékének és általánosíthatóságának értékelését szolgálta.

2.1.1. A bioimpedancia-mérés kísérleti beállítása vízhiányos körülmények között

A vízhiány bioimpedancia-paraméterekre gyakorolt hatását étkezési paprika (*Capsicum annuum* L. 'Redskin') növényeken vizsgáltuk. A növényeket fényszobában, szabályozott körülmények között neveltük. A hőmérséklet $24 \pm 1,5$ °C, a relatív páratartalom $75 \pm 1\%$, a CO₂-koncentráció 380–420 ppm, a fotoperiódus 18/6 óra világos/sötét ciklus volt. A megvilágítást teljes spektrumú LED-lámpák biztosították, $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD értékkel. A növényeket 1 literes edényekben, tőzeg és perlit 2:1 arányú keverékében neveltük, és feles töménységű Hoagland-oldattal öntöztük.

A vízhiány hatását három egymást kiegészítő kísérleti fázisban vizsgáltuk. Az első fázisban kilenches paprikanövényeket állítottunk be három vízellátottsági szinten: normál vízellátottság mellett naponta öntözött növényeket, közepes vízstressz esetén háromnaponta öntözött növényeket, míg erős vízstressz esetén 10 napos teljes vízmegvonásnak kitett növényeket vizsgáltunk. A kezelésekhez tartozó talajnedvességi értékek rendre 68,70%, 53,00% és 39,80% voltak, amelyeket PMS710 talajnedvesség-érzékelővel ellenőriztünk.

A második és harmadik kísérleti fázisban leválasztott, 5×5 cm-es paprikalevél-minták száradását követtük nyomon fényszobai körülmények között. A második fázisban a BIS-méréseket háromórás időközönként, míg a harmadik fázisban óránként végeztük. A harmadik fázisban minden mérési pontnál rögzítettük a tömegvesztéséget és az impedanciaspektrumokat is.

2.1.2. Eltérő nitrogéndózisok beállítása két fejes saláta fajtában

Az eltérő N-ellátottsági szintek bioimpedancia-alapú vizsgálatát kontrollált fényszobai körülmények között nevelt fejes saláta (*Lactuca sativa* L.) növényeken végeztük. A salátakísérletek célja elsősorban a BIS-paraméterek és a levél NO_3^- -tartalma közötti kapcsolat feltárása volt.

A fejes salátán végzett vizsgálatokat két egymásra épülő szakaszban végeztük. Az előzetes vizsgálat célja azoknak a frekvenciatartományoknak az azonosítása volt, amelyek a legérzékenyebben követik a levelek NO_3^- -dinamikáját. A kísérletben a ‘Kobak’ fajtát alkalmaztuk, amelyet fényszobai körülmények között, Hoagland-tápoldattal neveltünk. A négy lombleveles fejlettségi állapot elérésekor a növényeket öt napra N-mentes tápoldatba helyeztük, majd $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ formájában 5 mM NO_3^- -ot adagoltunk a tápoldathoz. A BIS-méréseket a NO_3^- -visszapótlást megelőzően, majd az adagolást követő korai időszakban, 1–6 órás mérési tartományban végeztük. Az impedanciaspektrumokat 1 Hz és 100 kHz között rögzítettük, majd Bode-diagramokon értékeltük.

Az előzetes vizsgálat eredményeire alapozva állítottuk be a fő salátakísérletet, amelyben két fejes salátafajtát, a ‘Kobak’ és a ‘Május királya’ fajtákat vizsgáltuk eltérő N-ellátottsági szintek mellett. A két fajta kiválasztását eltérő NO_3^- -felhalmozási jellemzőik indokolták: a ‘Kobak’ nagyobb, míg a ‘Május királya’ alacsonyabb NO_3^- -akkumulációs hajlammal jellemezhető.

A növényeket kőzetgyapot kockákba vetettük, majd perlitet tartalmazó edényekben neveltük tovább. A csíráztatást követően a növényeket fényszobába helyeztük, ahol $20 \pm 1,5$ °C hőmérsékletet, $67 \pm 1\%$ relatív páratartalmat, 380–420 ppm CO_2 -koncentrációt és 18/6 órás világos/sötét fotoperiódust biztosítottunk. A megvilágítás PPFD értéke $170 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

volt. Az eltérő N-ellátottsági szinteket ötféle módosított Yamazaki-tápoldattal állítottuk be, amelyek a standard N-tartalom 25, 50, 75, 100 és 125%-ának feleltek meg. A kezeléseket N0, N1, N2, N3 és N4 jelöléssel különítettük el. A tápoldatozást kétnaponta végeztük, a tápoldatok pH-ját minden trágyázási napon ellenőriztük, és 5,8–6,0 közötti értékre állítottuk be.

2.1.3. Eltérő nitrogéndózisok beállítása uborkanövényeken üvegházi körülmények között

Az eltérő N-dózisok hatását üvegházi körülmények között uborka (*Cucumis sativus* L.) növényeken is vizsgáltuk, az 'ES2217 F₁' genotípus felhasználásával. A kísérletet Pusztaföldváron állítottuk be, összesen 20 növényvel, öt ismétlésben. A vetést kőzetgyapot kockákba végeztük, majd a két valódi leveles fejlettségi állapot elérése után a növényeket üvegházi körülmények között neveltük tovább.

A kísérlet során a maximális nappali PPFD 1520,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ volt. A nappali hőmérséklet 25–33 °C között változott, átlagosan 28 °C volt, míg az éjszakai hőmérséklet nem csökkent 20 °C alá. A nappali relatív páratartalom 30–93,1% között alakult, átlagosan 63,8% értékkel.

A tápoldatozást a kiültetést követően kezdtük meg. A kezdeti tápoldatot Solinure 5 General Purpose 20-20-20+TE műtrágyával állítottuk elő, amelynek teljes N-koncentrációja 6,94 mM, becsült összes N-tartalma pedig 97 mg L⁻¹ volt. A két-három valódi leveles fejlettségi állapotot követően emelt N-szinteket alkalmaztunk KNO₃-oldat hozzáadásával. A kezelések négy N-szintet foglaltak magukban: N1: 1,64 mM; N2: 3,29 mM; N3: 4,92 mM; N4: 6,56 mM. A kezelések a viszonylag alacsony ellátottságtól a magasabb N-szintekig terjedtek, lehetővé téve az uborkanövények N-ellátottságra adott növényélettani és bioimpedancia-válaszainak értékelését. Az öntözés során a

kijuttatott tápoldat mennyiségét a növények fejlődéséhez igazítottuk, 70–80 mL/alkalom mennyiségről fokozatosan 150–200 mL/alkalom értékre növelve.

2.1.4. A korai nitrogénhiány vizsgálatának kísérleti beállítása

A korai nitrogénhiány kimutatására irányuló kísérletet két uborkagenotípuson (*Cucumis sativus* L.), az ‘ES2217 F₁’ és a ‘Nairobi F₁’ felhasználásával állítottuk be. A két genotípus bevonása lehetővé tette a BIS-paraméterek genotípusfüggő válaszainak értékelését. A magokat 75 × 75 × 65 mm-es közetgyapot kockákba vetettük, majd a növényeket kontrollált fényszobai körülmények között neveltük. A fotoperiódus 16/8 óra világos/sötét ciklus volt, a megvilágítás 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR értéket biztosított, a hőmérsékletet 25 °C-on, a relatív páratartalmat pedig 60–70% között tartottuk.

A növényeket az első valódi levél megjelenéséig desztillált vízzel öntöztük, ezt követően fél töménységű Hoagland-oldatot alkalmaztunk. Az első valódi levelek kifejlődésekor a növényeket két N-ellátottsági csoportba osztottuk: optimális N-ellátottságú kezelésre és alacsony N-ellátottságú kezelésre. Az optimális kezelés 11 mM, az alacsony N-kezelés 2,2 mM összes N-koncentrációt tartalmazott. Az alacsony N-szint limitáló, de nem extrém hiányállapotot biztosított, így alkalmas volt a korai N-hiány bioimpedancia-alapú felismerésének vizsgálatára. A kísérletben minden kezelési csoportba 25 véletlenszerűen kiválasztott növény került. A növényélettani és BIS-méréseknél egyedenként három technikai ismétlést végeztünk, ezek átlagát használtuk a statisztikai értékeléshez. Összesen 100 növény adatai képezték a vizsgálat alapját. A kísérlet célja annak meghatározása volt, hogy a BIS-paraméterek képesek-e elkülöníteni az alacsony és optimális N-ellátottságú növényeket még a korai fejlődési szakaszban.

2.1.5. A vízhiány és az eltérő nitrogénformák együttes vizsgálatának kísérleti beállítása

A vízhiány és a N-forma együttes hatását uborka (*Cucumis sativus* L.) növényeken, az 'ES2217 F₁' genotípus felhasználásával vizsgáltuk. A kísérlet célja annak feltárása volt, hogy a különböző N-formák miként módosítják a növények vízhiányra adott bioimpedancia-választát, illetve elkülöníthetők-e az egyes N-kezelésekre jellemző elektromos mintázatok stresszkörülmények között.

A magokat 1 literes, talajjal töltött edényekben csíráztattuk és neveltük. A kísérlethez meszes vályogtalajt használtunk, amely enyhén lúgos kémhatású és megfelelő makrotápanyag-ellátottságú volt. A növényeket fényszobában, 16/8 órás világos/sötét fotoperiódus mellett neveltük, 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PAR értéken.

A kísérletben négy kezelést alkalmaztunk: kontrollt (CTRL), nitrátkezelést (NO_3^-), kombinált ammónium-nitrát-kezelést (NH_4NO_3), valamint gyapjúpellet-kezelést (WP). A kezelések hatását négy egymást követő kísérleti fázisban követtük nyomon: maximális tápanyagellátás (S1), csökkentett tápanyagellátás (S2), csökkentett tápanyagellátás vízhiánnyal kombinálva (S3), majd rehidratáció (S4).

Ez a kísérleti felépítés lehetővé tette a N-forma, a vízhiány és a rehidratáció együttes hatásának értékelését a BIS-paraméterek és a növényélettani válaszok alapján.

2.2. Alkalmazott növényélettani és talajtani vizsgálati módszerek

2.2.1. Relatív víztartalom meghatározása

A relatív víztartalmat (RWC) Karim et al. (2025) módszere alapján, kezelésként öt ismétléssel határoztuk meg. A levélminták friss tömegét, telítési tömegét és száraz tömegét mértük, majd ezek alapján számítottuk ki az RWC értékét.

2.2.2. Pigmenttartalom és klorofill-fluoreszcencia meghatározása

A klorofill-a, klorofill-b, összes klorofill- és karotinoidtartalmat friss levélszövetből, 80%-os acetonos extrakciót követően, spektrofotometriás módszerrel határoztuk meg Mackinney (1941) alapján. A levél klorofilltartalmát nem destruktív módon Apogee MC-100 műszerrel is mértük.

A klorofill-fluoreszcencia-paramétereket hordozható FluorPen FP 110-LM/D fluorométerrel határoztuk meg Li et al. (2024) protokollja szerint, sötétadaptációt követően. Az értékelés során az F_v/F_m , F_o/F_m , $Y(II)$, ETR_{II} , qP és NPQ paramétereket használtuk.

2.2.3. Összes nitrogén- és nitrát-tartalom meghatározása

Az összes N-tartalmat Kjeldahl-féle roncsolásos módszerrel határoztuk meg Nelson és Sommers (1980) alapján, az eredményeket szárazanyag-tömegre vonatkoztatva fejeztük ki. A levél NO_3^- -tartalmát szalicilsav-kénsav módszerrel mértük Hesari et al. (2023) alapján, spektrofotometriás detektálással, $NaNO_3$ standard görbe felhasználásával.

2.2.4. Apoplasztikus nitrátkoncentráció meghatározása

Az apoplasztikus NO_3^- -koncentrációt Nikolic et al. (2012) módszere szerint határoztuk meg. A főér nélküli levéllemezekből vákuuminfiltrációt és centrifugálást követően apoplasztikus mosófolyadékot nyertünk, majd annak

NO_3^- -tartalmát spektrofotometriás módszerrel mértük. A vizsgálatot a ‘Kobak’ salátafajta esetében, az N0–N4 kezelésekben végeztük el.

2.2.5. Antioxidáns kapacitás és összes polifenol-tartalom meghatározása

Az összes polifenol-tartalmat Folin–Ciocalteu reagenssel, galluszsav standard alapján határoztuk meg Singleton (1981) módszere szerint. Az antioxidáns kapacitást FRAP-módszerrel mértük Benzie és Strain (1996) alapján, növényi mintákra adaptált eljárással (Ficzek et al. 2025) szerint. A kalibrációhoz aszkorbinsav standard oldatokat használtunk.

2.2.6. Membránstabilitási index meghatározása

A membránstabilitási indexet (MSI) elektrolit-szivárgáson alapuló módszerrel határoztuk meg Khanna-Chopra és Selote (2007), valamint Czékus et al. (2023) protokollja alapján. A levélkorongokat desztillált vízben inkubáltuk, majd a kezdeti és a hőkezelést követő elektromos vezetőképesség alapján számítottuk a membránstabilitást.

2.2.7. Növényi biomassa meghatározása

A kísérletek végén meghatároztuk a növények friss és száraz biomasszáját. A teljes növényi anyagot betakarítottuk, friss tömegét azonnal megmértük, majd szárítószekrényben állandó tömegig szárítottuk. A friss és száraz biomassa arányát Gao et al. (2023) alapján számítottuk.

2.2.8. Talaj nitrogéntartalmának és pH-értékének meghatározása

A vízhiány és az eltérő N-formák együttes vizsgálatában a kísérlet végén talajmintákat gyűjtöttünk. A friss talajmintákat +4 °C-on tároltuk Kabalan et al. (2024) protokollja szerint. Az ásványi N-formák közül a NO_3^- -tartalmat 0,1 M CaCl_2 -os kivonatból, spektrofotometriás módszerrel határoztuk meg

Monteiro et al. (2003) alapján. A talaj pH-értékét a talajkémiai értékelés részeként határoztuk meg.

2.3. Bioimpedancia-spektroszkópiai mérések és adatfeldolgozás

2.3.1. A bioimpedancia-mérőműszer jellemzése

A BIS-méréseket egy négycsatornás, akkumulátoros táplálású, digitális *lock-in elven* működő, egyedileg fejlesztett bioimpedancia-analizátorral végeztük. A mérőrendszert kifejezetten biológiai, illetve növényi szövetek vizsgálatára fejlesztették ki, részletes műszaki leírását Vizvári et al. (2020) és Odry et al. (2021) ismertetik. A négycsatornás mérési elrendezés célja az elektródpolarizációból és kontaktimpedanciából származó hibák mérséklése volt (Jinyang et al., 2016). A mérőrendszer három üzemmódban alkalmazható: frekvenciasöpréses impedanciaspektroszkópiai mérés, FFT-alapú spektrális mérés, valamint rögzített frekvenciás bioimpedancia-mérés. A készülék monokromatikus szinuszjelet generál, majd a mért jel amplitúdóját és fázisát digitális *lock-in* algoritmussal határozza meg. A növényi mérésekhez négy darab, 24 karátos arannyal bevont tüelektrodát alkalmaztunk. A mérési elrendezés mechanikailag minimálisan invazívnak, elektromos szempontból pedig nem destruktívnak tekinthető.

2.3.2. A mérőrendszer validálása Double-Shell fantommal

A BIS-mérőrendszer pontosságát és megbízhatóságát egy ismert paraméterekkel rendelkező Double-Shell fizikai fantom segítségével ellenőriztük. A fantom lehetővé tette a mérőrendszer biológiai mintától független validálását, mivel elméleti impedanciaspektruma és ekvivalens áramköri paraméterei előre meghatározhatók voltak. A validáció során a mért és az elméleti impedanciaértékeket, valamint a visszanyert DBS-

modellparamétereket hasonlítottuk össze. A méréseket 0,01 Hz és 100 kHz közötti frekvenciatartományban, eltérő frekvenciafelbontásokkal végeztük, minden beállítás esetében tíz ismétléssel. A validáció célja annak igazolása volt, hogy a mérőrendszer alkalmas a növényi szövetekből származó impedanciaspektrumok megbízható rögzítésére és a modellparaméterek pontos becslésére.

2.3.3. Bioimpedancia-mérési beállítás és Double-Shell modell

A növényi BIS-méréseket 1 Hz és 100 kHz közötti frekvenciatartományban végeztük. A mérések során 25 dB-lel csillapított gerjesztő jelet alkalmaztunk, az elektródákat pedig négypólusú konfigurációban csatlakoztattuk a BIS-analizátorhoz. A négy aranyelektródát egymástól 1,5 cm távolságra rögzítettük Li et al. (2017) alapján. Az érintkezési impedancia csökkentése érdekében kis mennyiségű EKG-gélt alkalmaztunk Serrano-Finetti et al. (2023) szerint. A méréseket egészséges, sérülésmentes leveleken, a főértől távolabbi levélrészen végeztük Meiqing et al. (2016) és Li et al. (2017) alapján. Minden mérést ötször ismételtünk. A BIS-adatok értelmezéséhez Double-Shell modellt alkalmaztunk. A modell a növényi sejtet két fő membránhatárfelülettel, a plazmamembránnal és a tonoplaszttal írja le, így lehetővé teszi az extracelluláris, intracelluláris és vakuólumhoz kapcsolódó elektromos tulajdonságok elkülönített értelmezését. A modellben az R_1 az extracelluláris folyadék ellenállását, az R_2 az intracelluláris folyadék ellenállását, az R_4 a vakuólumfolyadék ellenállását, míg a Q_3 és Q_5 a sejtmembránhoz, illetve a tonoplaszthoz kapcsolódó konstans fáziselemeket jelöli. Az α és β paraméterek a membránok nem ideális kapacitív viselkedését jellemzik (López-Villanueva és Rodríguez Bolívar, 2022).

2.3.4. Impedancia-paraméterek kinyerése

A DBS-modell paramétereit numerikus optimalizációval határoztuk meg. A paraméterkivonáshoz részecske-raj-optimalizáción alapuló algoritmust alkalmaztunk MATLAB R2023a környezetben. Az optimalizáció célja a mért és a szimulált impedanciaspektrumok közötti relatív hiba minimalizálása volt, miközben regularizációs tag segítette a paraméterbecslés stabilizálását. Az optimalizált paraméterek az R_1 , R_2 , R_4 ellenállások, a Q_3 és Q_5 CPE-paraméterek, valamint az α és β exponens-paraméterek voltak. Az optimalizációt 1 Hz és 100 kHz közötti tartományban, 10 frekvenciapont/dekád felbontással végeztük. A módszer lehetővé tette a BIS-spektrumokból származó, sejtszintű elektromos paraméterek kvantitatív becslését és növényélettani értelmezését.

2.3.5. Statisztikai kiértékelés

A növényélettani és BIS-paraméterek statisztikai kiértékelését R 4.2 környezetben végeztük; a kezeléshatásokat MANOVA-val, Wilks-féle λ alapján értékeltük, az előfeltételeket Box-féle M, Shapiro–Wilk és Levene-tesztekkel ellenőriztük. A hatásméreteket parciális eta-négyzettel becsültük (Levine és Hullett, 2002), a csoportátlagok összehasonlítására Tukey-féle post hoc tesztet alkalmaztunk. A BIS-paraméterek és a növényélettani mutatók kapcsolatát Pearson-korrelációval és lineáris regresszióval vizsgáltuk, míg a korai N-hiány diagnosztikai elkülönítését ROC-analízissel, AUC-értékekkel és Youden-index alapján meghatározott küszöbértékekkel értékeltük (Youden, 1950).

3. Eredmények és megvitatása

3.1. A vízstressz és levélszáradás hatása bioimpedancia-alapú megközelítéssel

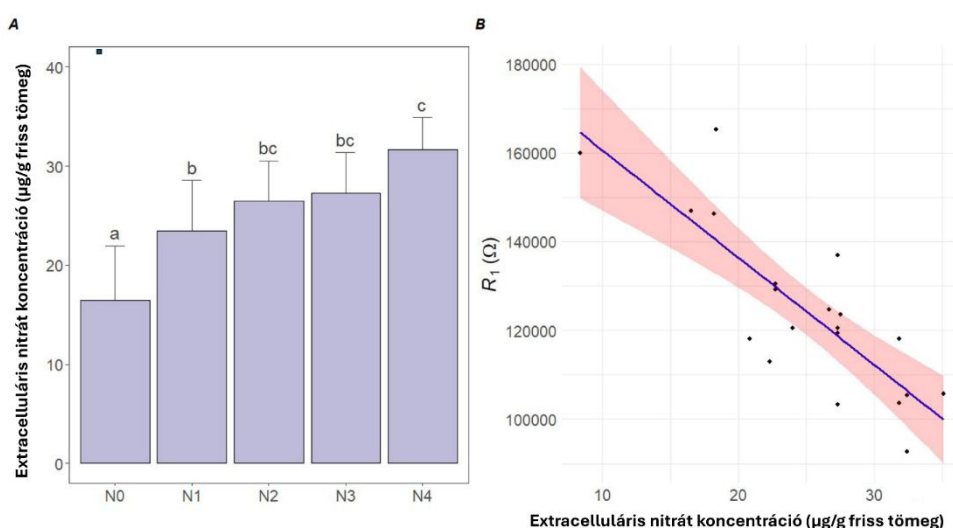
A vízhiány szignifikánsan befolyásolta a paprikanövények növényélettani állapotát. Az erős vízstressznek kitett növényekben csökkent az RWC, a levélvastagság, a CCI és az F_v/F_m értéke. Az MSI szintén csökkenő tendenciát mutatott, bár a kezelések közötti különbség ebben az esetben nem volt szignifikáns. A BIS-adatok modellezése során a ZFIT- és PSO-alapú illesztési eljárásokat hasonlítottuk össze. A Double-Shell modell PSO-alapú, kombinált célfüggvénnyel végzett illesztése stabilabb paraméterbecslést adott, mint a hagyományos PSO- vagy ZFIT-alapú Double-Shell illesztés. Ez alapján a további értékelésekhez a PSO-alapú Double-Shell megközelítés bizonyult a legalkalmasabbnak, mivel a paraméterek kisebb variabilitása mellett élettanilag jobban értelmezhető eredményeket szolgáltatott.

3.2. Eltérő nitrogénellátottsági szintek hatása két fejés salátafajta esetében

A rövid távú NO_3^- -visszapótlási vizsgálatban az öt napos N-megvonást követően a ‘Kobak’ salátafajta leveleinek impedancia-modulusa ($|Z|$) megnövekedett, különösen az alacsony frekvenciatartományban. A $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ adagolását követően az $|Z|$ értéke csökkent, ami arra utal, hogy az alacsony frekvenciatartomány érzékenyen követte a levélszövet ionállapotának gyors változását. Ez összhangban van azzal, hogy alacsony frekvencián a sejtmembrán kapacitív akadályként viselkedik, ezért az áram döntően az extracelluláris, apoplasztikus téren keresztül halad (Prasad és Roy 2020). Ennek alapján az alacsony frekvenciájú BIS-válasz elsősorban az R_1 ellenállás és az apoplasztikus ionkoncentráció változását tükrözheti, amelyben a NO_3^- szerepe kiemelt (Nikolic et al. 2012; Li et al. 2017).

Az eredmények azt mutatták, hogy az alacsony N-ellátottságú kezelésekben szignifikánsan kisebb apoplasztikus NO_3^- koncentráció halmozódott fel ($p <$

0,05), mint a magasabb N3-N4 szinteken. A legalacsonyabb extracelluláris NO_3^- koncentrációt az N0 kezelésben mértük, amely szignifikánsan eltért ($p < 0,05$) a többi N-kezelési szintektől (**1. ábra A**). Továbbá az apoplasztikus NO_3^- koncentráció és az R_1 ellenállás között szignifikáns kapcsolat volt kimutatható ($R^2 = 0,67$, $p < 0,01$; **1. ábra B**), ami megerősíti, hogy az extracelluláris tér ionösszetételében bekövetkező változások közvetlenül és érzékenyen befolyásolják az R_1 ellenállás értékét.

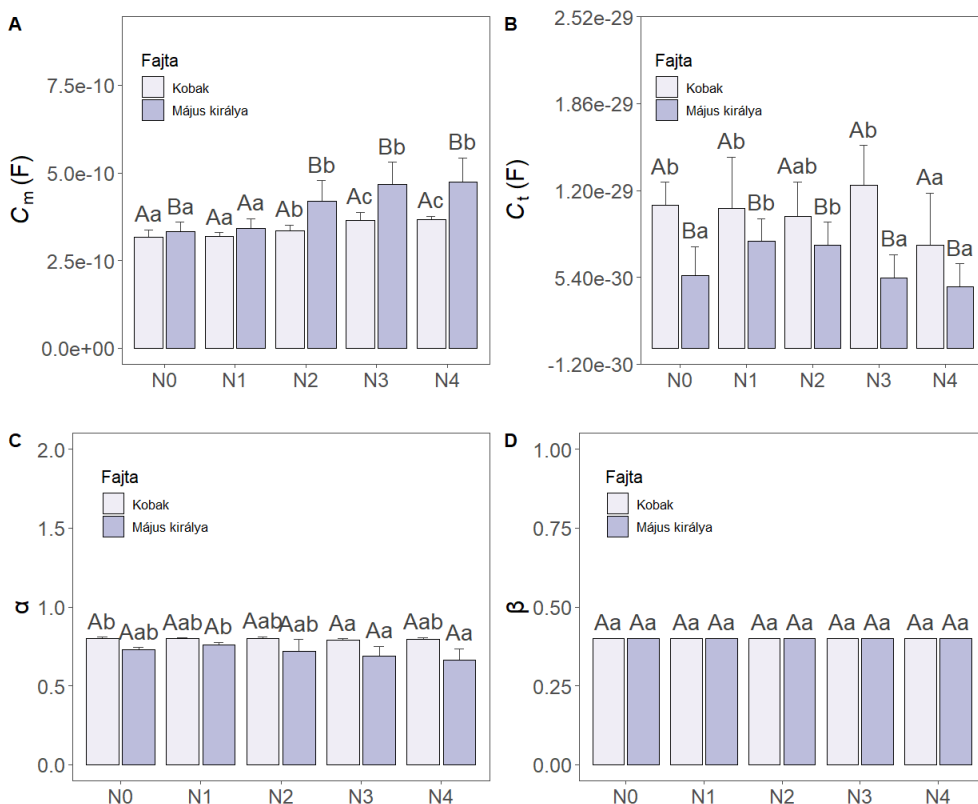


1. ábra: A) A különböző nitrogénkezelések (N0-N4) hatása az extracelluláris NO_3^- koncentrációra a ‘Kobak’ salátafajta leveleiben. **B)** Lineáris kapcsolat az extracelluláris NO_3^- koncentráció és az extracelluláris folyadék ellenállása (R_1) között. Az A ábra esetében az oszlopok az átlagot $\pm$ szórást (SD) jelölik. Az oszlopok felett látható különböző betűk a kezelések közötti szignifikáns eltéréseket mutatják a Tukey-féle post hoc teszt alapján ($p < 0,05$). A B ábra esetében a kék vonal a lineáris regressziót jelöli, míg a körülötte látható árnyékolt terület a 95%-os konfidenciaintervallumot mutatja.

A N-ellátás szignifikáns hatást gyakorolt a levél összes N- és NO_3^- -tartalmára, a földfeletti biomasszára, valamint a klorofill- és karotinoid tartalomra, valamint a membránstabilitási indexre. Eredményeink összhangban állnak korábbi tanulmányokkal, amelyek kimutatták, hogy a N-ellátás alapvetően

meghatározza a klorofillszintézist és a növényi produktivitást (Huang et al. 2014; Zhao et al. 2017).

Alacsony N-ellátottság mellett az R_1 ellenállás mindkét fajtában növekedett (**2.ábra A**), ami az apoplasztikus ionkoncentráció, különösen a NO_3^- -ionok mennyiségének csökkenésével magyarázható. Ez összhangban van azzal, hogy alacsony frekvenciatartományban az áram főként az extracelluláris/apoplasztikus térben halad (Prasad and Roy, 2020). A ‘Kobak’ fajtában a levél NO_3^- -tartalma és az R_1 között erős negatív korrelációt találtunk ($r = -0,76$), valamint az összes levél-N-tartalom és az R_1 között is erős negatív kapcsolat mutatkozott ($r = -0,73$). A ‘Május királya’ esetében a NO_3^- -tartalom és az R_1 kapcsolata gyenge volt ($r = -0,23$), míg az összes levél-N-tartalom és az R_1 kapcsolata továbbra is erős negatív volt ($r = -0,77$). Ez összhangban áll a két fajta eltérő NO_3^- -felhalmozási sajátosságaival (Yaseen és Takács-Hájos, 2022). Az R_2 ellenállás kisebb mértékben változott (**2.ábra B**), és nem mutatott szoros kapcsolatot a levél NO_3^- -tartalmával, ami a citoplazmatikus NO_3^- -szint gyors szabályozásával magyarázható (Masclaux-Daubresse et al. 2010; Xu et al. 2012). Az R_4 ellenállás ezzel szemben érzékenyebben reagált (**2.ábra C**): a levél NO_3^- -tartalma és az R_4 között a ‘Kobak’ fajtában közepesen erős negatív korreláció volt kimutatható ($r = -0,60$), míg a ‘Május királya’ esetében gyengébb kapcsolat jelentkezett ($r = -0,44$). Ez arra utal, hogy a ‘Kobak’ esetében a vakuólum NO_3^- -készlete erősebben járult hozzá az intracelluláris ionvezetéshez.



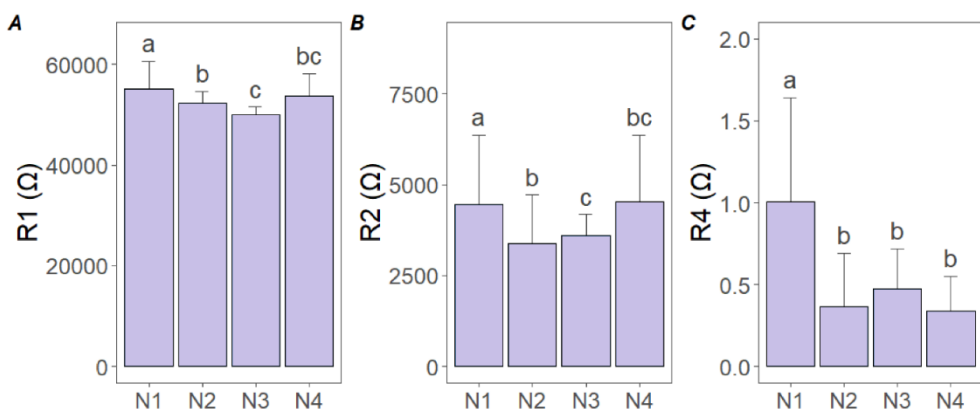
3. ábra: A különböző N-kezelések hatása az elektromos kapacitásparaméterekre: **A)** sejtmembrán kapacitása (C_m), **B)** vakuólum-membrán kapacitása (C_t), **C)** az α paraméter (a vakuólum-membránhoz kapcsolódó exponens paraméter), **D)** a β paraméter (a plazmamembránhoz kapcsolódó exponens paraméter). A nagybetűk az azonos nitrogénkezelésen belül a fajták közötti szignifikáns különbségeket jelzik. A kisbetűk az egyes fajtákon belül, az eltérő nitrogénszintek között mutatnak szignifikáns különbséget. (Tukey-féle post hoc teszt, $p < 0,05$).

3.3. Eltérő nitrogénellátottsági szintek hatása a bioimpedancia- és növényélettani paraméterekre uborkanövényeken üvegházi körülmények között

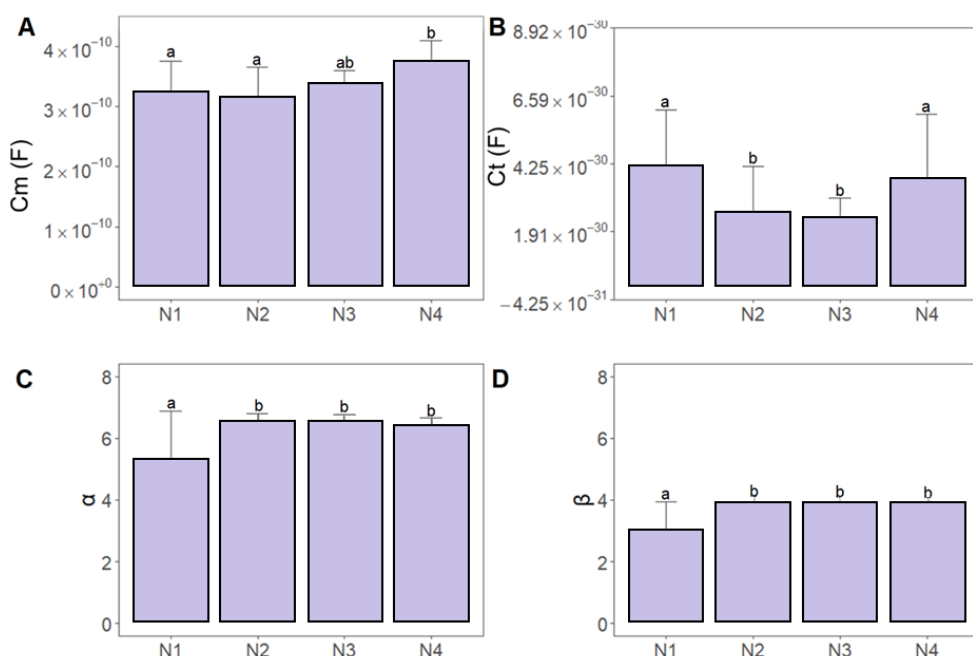
Az üvegházi uborkakísérletben a N-kezelések szignifikánsan befolyásolták a növényélettani paramétereket a 6–7 leveles fejlettségi állapotban ($F_{(3,32)} = 28,03$; $p < 0,001$; Wilks' $\lambda = 0,27$; $\eta^2 = 0,72$). A legalacsonyabb CCI, összes levél-N és levél NO_3^- -tartalom az N1 kezelésben volt kimutatható, míg a

legmagasabb értékeket az N3 és N4 kezelések adták. Az N3 és N4 kezelések között több paraméter esetében már nem volt szignifikáns különbség, ami a magasabb N-ellátottsági tartományban kialakuló telítődési válaszra utal. Ez összhangban van a N-felvétel és NO_3^- -homeosztázis szabályozottságával (Li et al. 2022; Hesari et al. 2023).

A BIS-spektrumok alapján az alacsony N-ellátottságú kezelésekben (N1–N2) nőtt az impedancia-modulus, míg a magasabb N-szintek (N3–N4) alacsonyabb impedanciát eredményeztek, ami a csökkent ionvezető képességgel magyarázható (Li et al. 2017). A DBS-paraméterek közül az R_1 , R_2 , R_4 és C_m egyaránt szignifikánsan reagáltak a N-ellátottság változására (4.ábra). Az R_1 az apoplasztikus NO_3^- -ellátottság csökkenését, az R_2 az intracelluláris ionkészlet mérséklődését, az R_4 pedig a vakuólum NO_3^- -készletének változását jelezte (Cookson et al., 2005; Nouaze et al., 2022; Prasad and Roy, 2020). A C_m csökkenése alacsony N-ellátottság mellett (5.ábra) a membrán töltéstároló képességének és dielektromos stabilitásának romlására utalhat (Azzarello et al. 2012; Liu et al. 2020).



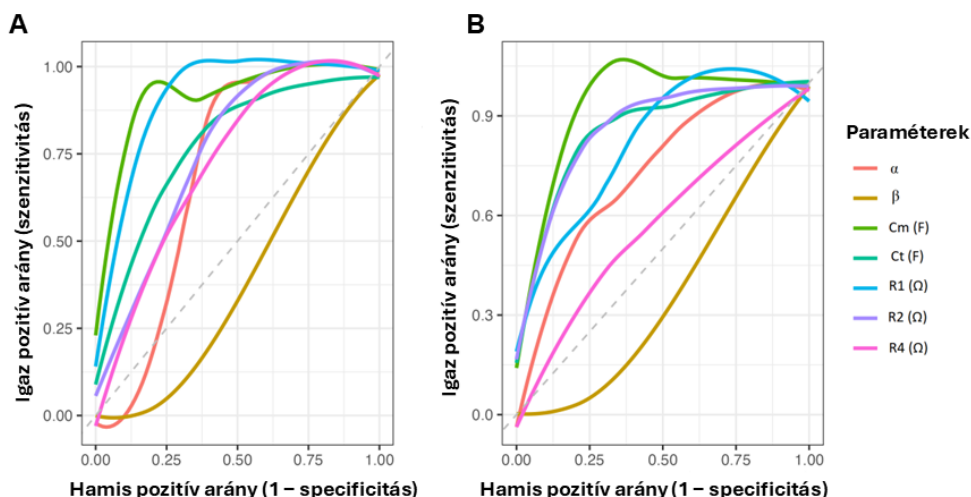
4. ábra: A N-kezelések hatása a sejt elektromos ellenállási paramétereire: **A)** extracelluláris folyadék ellenállása (R_1), **B)** intracelluláris folyadék ellenállása (R_2), **C)** vakuólumfolyadék ellenállása (R_4) uborkanövényeken (Tukey's HSD, $p < 0.05$).



5. ábra: A különböző N-kezelések hatása az elektromos kapacitásparaméterekre: **A)** sejtmembrán kapacitása (C_m), **B)** vakuólum-membrán kapacitása (C_t), **C)** az α paraméter (a vakuólum-membránhoz kapcsolódó exponens paraméter), **D)** a β paraméter (a plazmamembránhoz kapcsolódó exponens paraméter). (Tukey's HSD, $p < 0.05$).

3.4. Korai nitrogénhiány hatása a bioimpedancia- és növényélettani paraméterekre

A ROC-analízis alapján a BIS-paraméterek alkalmasak voltak a korai N-hiány elkülönítésére, de a diagnosztikai teljesítmény genotípusfüggő volt. Az 'ES2217 F₁' esetében az R_1 és a C_m mutatta a legerősebb elkülönítő képességet (AUC = 0,91) (**6.ábra A**), míg a 'Nairobi F₁' genotípusban a C_m bizonyult a legjobb prediktornak (AUC = 0,92), amelyet az R_2 követett (AUC = 0,86) (**6.ábra B**). A β paraméter mindkét genotípusban gyenge diagnosztikai értéket mutatott.



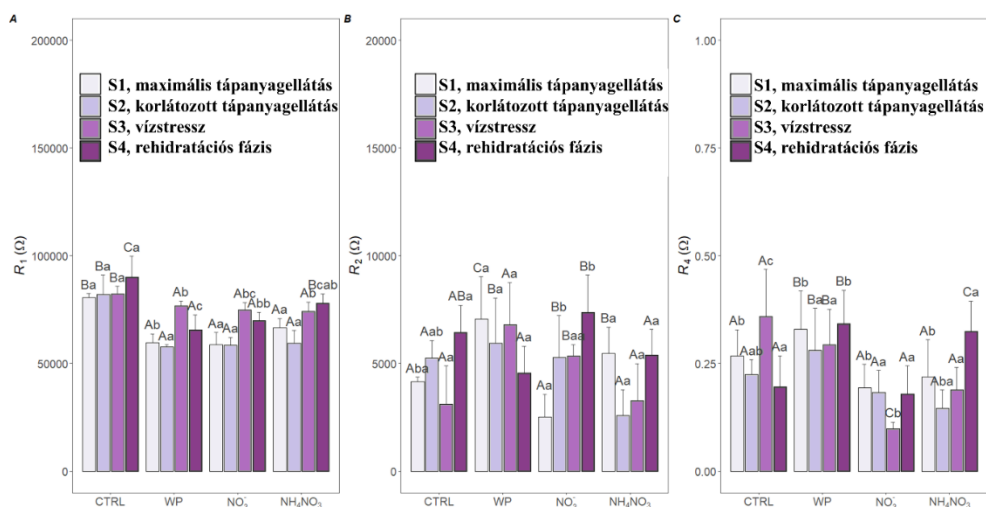
6. ábra: **A)** A BIS-modell paramétereinek diszkriminációs teljesítménye a különböző nitrogénellátottsági szintek (optimális N, alacsony N) elkülönítésében az ‘ES2217 F₁’ uborka genotípus esetében ROC-analízis alapján. **B)** A BIS-modell paramétereinek diszkriminációs teljesítménye a különböző nitrogénellátottsági szintek (optimális N, alacsony N) elkülönítésében az ‘Nairobi F₁’ uborka genotípus esetében ROC-analízis alapján. Extracelluláris folyadék ellenállása (R_1), intracelluláris folyadék ellenállása (R_2), vakuólumfolyadék ellenállása (R_4), sejtmembrán kapacitása (C_m), vakuólummembrán kapacitása (C_t), α paraméter (vakuólummembrán), β paraméter (plazmamembrán).

Összességében az eredmények azt igazolták, hogy a BIS alkalmas lehet a korai N-hiány *in vivo* felismerésére, ugyanakkor a módszer értelmezésénél figyelembe kell venni a genotípusfüggő elektrofiziológiai válaszokat és azt is, hogy a BIS nem ion-specifikus módszer.

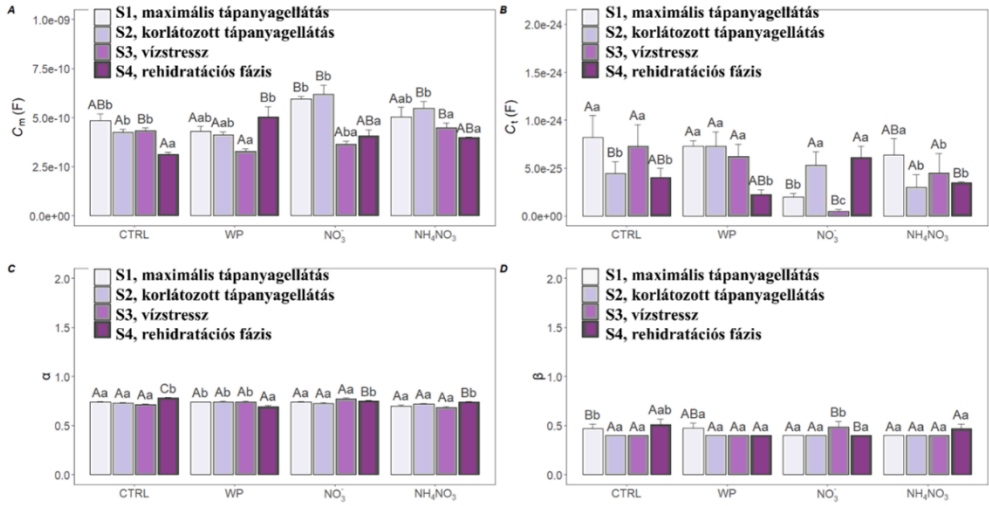
3.5. Eltérő nitrogénellátottság és szárazságstressz együttes hatása a bioimpedancia- és növényélettani paraméterekre

A DBS-paraméterek közül az R_1 , R_4 és C_m bizonyultak a leginformatívabbnak. Az R_1 ellenállás a kontroll és vízhiányos kezelésekben magasabb volt, ami az apoplasztikus ionvezetés csökkenését jelzi. Az R_4 ellenállás különösen érzékenyen reagált a N- és vízellátás változásaira: a magasabb R_4 értékek csökkent vakuólum-iontartalomra, míg az alacsonyabb értékek intenzívebb

NO_3^- -raktározásra utalhatnak, mivel a vakuólum a levél NO_3^- fő tárolóhelye (Crawford és Glass, 1998; Masclaux-Daubresse et al. 2010). Az **7. ábra** alapján az R_1 és R_4 jól követte a kezelések közötti különbségeket, ezért ezek a paraméterek a kombinált N- és vízstressz fontos biofizikai indikátorainak tekinthetők.



A C_m értéke a N-ellátottság és a stresszfázis függvényében szignifikánsan változott (**8. ábra**). A magasabb C_m értékek jobb membránállapotra és nagyobb töltéstároló képességre, míg az alacsonyabb értékek a membrán dielektromos tulajdonságainak romlására utalnak (Jamaludin et al. 2015; Jinyang et al. 2016; Zhang et al. 2024). A kísérlet végén a levél NO_3^- -tartalma erős negatív kapcsolatot mutatott az R_4 értékével ($r = -0,74$), míg az R_1 esetében mérsékelt negatív korreláció jelentkezett ($r = -0,32$).



8. ábra: Az N-kezelések hatása az uborka levél sejtek elektromos kapacitás paramétereire a fiziológiai fázisok során: **A)** sejtmembrán kapacitása (C_m), **B)** vakuólum-membrán kapacitása (C_t), **C)** az α paraméter (a vakuólum-membránhoz kapcsolódó exponens paraméter), **D)** a β paraméter (a plazmamembránhoz kapcsolódó exponens paraméter). (Tukey-féle post hoc teszt alapján, $p < 0.05$).

4. Következtetések és a javaslatok

Összefoglalva megállapítható, hogy a négyelektródás, *in vivo* növénymérésre alkalmas bioimpedancia-spektroszkópia (BIS) a Double-Shell (DBS) sejtmodellel és a részecskeraj-optimalizáláson (PSO) alapuló paraméterkinyeréssel együtt alkalmas a növények N-ellátottságával és vízállapotával összefüggő biofizikai változások minimálisan invazív, sejtszintű vizsgálatára. A DBS-PSO megközelítés stabil és reprodukálható paraméterbecslést biztosított. A PSO a növényélettani kutatásokban gyakran használt ZFIT eljárásnál kisebb paraméterszórást eredményezett, ami közvetlenül növelte a biológiai értelmezések megbízhatóságát, valamint lehetővé tette, hogy a BIS-paraméterek statisztikai modellekben (pl. MANOVA, ROC-analízis, korrelációk) diagnosztikai változóként is konzekvensen szerepeljenek.

Eredményeim igazolták, hogy az egyes BIS-paraméterek eltérő és részben kiegészítő élettani információt hordoznak. A levél extracelluláris ellenállása (R_1) érzékenyen reagált az apoplasztikus ionösszetétel változásaira, és a jelen kísérleti rendszerben szoros kapcsolatot mutatott az apoplasztikus, illetve levél- NO_3^- -tartalommal. Az alacsony frekvenciatartományban az R_1 ellenállás különösen jól követte a N-ellátottsággal összefüggő iondinamikai változásokat. Ezzel párhuzamosan a vakuólumfolyadék ellenállása (R_4) szoros kapcsolatot mutatott a levelek NO_3^- -tartalmával, így a vakuólum iontartalmának és annak változásainak értelmezéséhez nyújthat információt. A sejtmembrán kapacitása (C_m) pedig a membránintegritás és a dielektromos állapot indikátoraként írható le, így a stresszhez köthető membránállapot-változások (beleértve a vízellátottság hatását is) érzékeny leírására alkalmas.

A N- és vízstressz bioimpedanciában mérhető hatásai részben átfednek, ami önmagában indokolja a többparaméteres és többváltozós kiértékelést. Ugyanakkor az eredmények arra is rámutatnak, hogy megfelelő paraméterkombinációk alkalmazásával a két stresszválasz bizonyos mértékű elkülönítése lehetséges. Ennek gyakorlati üzenete az, hogy a BIS-diagnosztikát nem egyetlen indikátorra, hanem minimum az $R_1 - R_4 - C_m$ paraméterek együttes értelmezésére célszerű felépíteni, mivel ezek kombinációja bizonyult a leginformatívabbnak.

A korai N-hiány elkülönítésében a legerősebb prediktorok genotípusfüggők voltak, ami azt támasztja alá, hogy a BIS-alapú N-diagnosztika fejlesztéséhez genotípus-specifikus kalibráció szükséges.

A BIS különösen az alacsony és közepes N-tartományban használható hatékonyan diagnosztikai célra, míg magasabb N-szinteken (N3-N4) a visszacsatolt NO_3^- -homeosztázis következtében kisebb bioimpedanciaalapú különbségek jelentkezhetnek. Ennek megfelelően a módszer gyakorlati beállítását (mintavételi stratégia, küszöbök, döntési szabályok) célszerű a korai hiányállapot felismerésére optimalizálni.

Eredményeim alapján a következő gyakorlati és módszertani javaslatokat fogalmaztam meg:

- 1) A levél N-ellátottságának diagnosztikai értelmezéséhez elsődlegesen az R_1 ellenállás, az R_4 ellenállás és a C_m kapacitás együttes alkalmazása javasolt. Az egyes BIS-paraméterek izolált értékelése helyett célszerű a paraméterek kombinációs mintázataira építeni, mivel ezek hordozzák a legnagyobb élettani információt.
- 2) Mivel a BIS-paraméterek értékei és diagnosztikai érzékenysége fajtaként és genotípusonként eltérő, a mérési protokoll, valamint a

döntési küszöbértékek genotípus- és vizsgálati cél specifikus kalibrálása indokolt.

- 3) A paraméterbecslés során tapasztalt varianciacsökkenés és nagyobb interpretációs stabilitás alapján a DBS-modell paramétereinek kinyerésére a PSO-alapú illesztési eljárás alkalmazása javasolt, különösen olyan esetekben, amikor a cél élettani jelentésű BIS-paraméterekre épülő diagnosztika kialakítása.

Összességében a bemutatott eredmények arra utalnak, hogy a BIS megfelelő modellezéssel és kalibrációval ígéretes eszköz lehet a levél N-ellátottságával és vízállapotával összefüggő változások nem destruktív, sejtszintű vizsgálatára.

5. Új tudományos eredmények

1. Igazoltam, hogy a PSO algoritmus a növényélettani kutatásokban széles körben használt ZFIT algoritmushoz képest szignifikánsan kisebb szórást eredményez a Double Shell sejtmodellel -paraméterekre, ami közvetlenül növeli a biológiai interpretáció megbízhatóságát.
2. Elsőként igazoltam, hogy a vizsgált körülmények között az extracelluláris ellenállás (R_1) az apoplasztikus NO_3^- -ellátottság legérzékenyebb indikátora, ami szoros negatív korrelációt mutat a levél- és apoplasztikus NO_3^- -tartalommal, és alacsony frekvenciatartományban (1-4000 Hz) elkülöníti a N-hiányos és az optimálisan N-ellátott növényi levelek impedanciagörbéit.
3. Elsőként igazoltam, hogy a vakuólum ellenállás (R_4) - ideális egyéb tápanyagellátottság mellett-, a NO_3^- szint változtatása során a levélszövet NO_3^- tartalmával mutat szoros kapcsolatot: minden esetben szignifikánsan magasabb R_4 ellenállás növekedését figyeltem meg, amikor a növények NO_3^- koncentrációja alacsonyabb volt.
4. Elsőként igazoltam, hogy N-hiányos körülmények között a sejtmembrán kapacitása (C_m) szoros kvantitatív összefüggést mutat a membránstabilitási indexszel (MSI), ami arra utal, hogy az N-hiány a membrán töltéstároló képességének mérhető romlásával jár. A tonoplasztkapacitás (C_t) mérsékeltebb érzékenységet mutat, értékei részben követik a levél NO_3^- -tartalom változásait, de diagnosztikai teljesítménye a C_m -nél gyengébbnek bizonyult.
5. Kimutattam, hogy a vizsgált kísérleti rendszerben a vakuólum ellenállása (R_4) erős negatív összefüggést mutat a levél NO_3^- -tartalmával, és a vizsgált N-források (NO_3^- , NH_4NO_3 , valamint szerves N-t biztosító gyapjúpellet) közötti különbségek jelzésében a

legérzékenyebb bioimpedancia-paraméternek bizonyult. Ezzel szemben az extracelluláris ellenállás (R_1) és a sejtmembrán kapacitás (C_m) nemcsak az N-ellátottság változásaira, hanem a levélszövet vízállapotára is érzékenyen reagált.

6. Az értekezés témaköréhez tartozó publikációk

Első szerzős impakt faktoros folyóiratcikkek

1. Kovács F, Juhos K, Odry Á, et al (2025) Early detection of nitrogen status in cucumber plants using bioimpedance spectroscopy. *Smart Agric Technol* 12:101610. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2025.101610>, **Q1: Impact Factor: 5.7**
2. Kovács F, Juhos K, Vizvári Z, et al (2025) Bioimpedance Analysis of Cucumber Plants Exposed to Different Nitrogen Doses Under Greenhouse Conditions. *Sensors* 25:.. <https://doi.org/10.3390/s25082486>, **Q1: Impact Factor: 3.5**
3. Kovács F, Odry Á, Vizvári Z, et al (2025) Electrical bioimpedance spectroscopy as a tool for non-destructive monitoring nitrogen supply in two lettuce genotypes. *Sci Hortic (Amsterdam)* 349:114229. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2025.114229>, **D1: Impact Factor: 4.2**
4. Kovács F, Odry Á, Vizvári Z, et al (2025) A novel approach to water stress assessment in plants: New bioimpedance method with PSO-optimized Cole-Cole impedance modeling. *Comput Electron Agric* 234:110167. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110167>, **D1: Impact Factor: 8.9**
5. Kovács, F., Odry, Á., Vizvári, Z. *et al.* Advancing nitrogen diagnostics in plants through bioimpedance spectroscopy: current evidence and future perspectives—a review. *Planta* 263, 62 (2026). <https://doi.org/10.1007/s00425-026-04934-y>, **Q1, Impact Factor: 3.8**
6. Kovács, F., Odry, Á., Vizvári, Z. *et al.* (2026) Bioimpedance spectroscopy highlights bioelectrical mechanisms of nitrogen and water interactions in cucumber leaves. *Sci Hortic (Amsterdam)*. 114810. *HORTI* 114810. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2026.114810> **D1: Impact Factor: 4.2**

Első szerzős konferencia közlemények

1. Kovács F, Odry Á, Vizvári Z, Gyalai IM, Szarvas A, Odry P, Juhos K (2025) Short-term nitrate uptake and its impact on the bioelectrical impedance spectrum of lettuce leaves. In: Gyalai IM, Czóbel Sz (szerk.) 22nd Wellmann International Scientific Conference: Book of Abstracts. University of Szeged Faculty of Agriculture, Hódmezővásárhely, pp. 78–78.
2. Kovács F, Odry Á, Vizvári Z, Chen H, Gyalai I, Kabalan S, Papdi E, Odry P, Juhos K (2024) Measuring the nitrogen supply capacity using electrical bioimpedance spectroscopy. In: Gyalai IM, Czóbel Sz (szerk.) 21st Wellmann International Scientific Conference: Book of Abstracts. University of Szeged Faculty of Agriculture, Hódmezővásárhely, pp. 117–117.
3. Kovács F, Papdi E, Veres A, Szegő A, Juhos K (2024) Gyapjúhulladék alkalmazása a kertészetben és a talajerő-gazdálkodásban. In: Buró B, Molnár M (szerk.) XIX. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia. Absztrakt füzet = 19th Carpathian Basin Environmental Science Conference. Book of Abstracts. HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen, p. 9.
4. Kovács F, Papdi E, Veres A, Juhos K (2024) Effect of wool pellet on soil biological activity and biomass production depending on soil organic matter content. In: Fodor M, Bodor-Pesti P, Deák T (szerk.) A 2023. évi Lippay János – Ormos Imre – Vas Károly Tudományos Ülésszak tanulmányai. Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Budai Campus, Budapest, pp. 194–200.

5. Kovács F, Papdi E, Veres A, Juhos K (2024) Effect of sheep wool pellet on nitrogen uptake by plants depending on the organic matter content and biological activity of soil. In: 100 Years of Soil Science – Past Achievements and Future Challenges: Centennial Celebration and Congress of the International Union of Soil Sciences: Abstract Book. International Union of Soil Sciences, Florence, p. 137915.
6. Kovács F, Papdi E, Kotroczó Zs, Veres A, Juhos K (2024) Effect of wool pellet on nitrogen utilization and soil biological activity depending on the organic matter content of soil. In: Program of the 9th International Symposium on Soil Organic Matter. p. 13.
7. Kovács F, Papdi E, Juhos K (2023) Alternative approaches to horticultural nitrogen fertilisation in sandy soils. In: Beloev H, Popov G (szerk.) International Scientific Conference “Conserving Soils and Water” Program. p. 13, Paper 68.
8. Kovács F, Papdi E, Veres A, Juhos K (2023) Innovative strategies for nitrogen fertilization in sandy horticultural soils. Budapest, 151 p.

7. Irodalomjegyzék

- Azzarello, E., Masi, E., Mancuso, S., 2012. Electrochemical impedance spectroscopy. *Plant Electrophysiol. Methods Cell Electrophysiol.* 205–223. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29119-7_9
- Benzie, I.F.F., Strain, J.J., 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay. *Anal. Biochem.* 239, 70–76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Cookson, S.J., Williams, L.E., Miller, A.J., 2005. Light-dark changes in cytosolic nitrate pools depend on nitrate reductase activity in *Arabidopsis* leaf cells. *Plant Physiol.* 138, 1097–1105. <https://doi.org/10.1104/pp.105.062349>
- Crawford, N.M., Glass, A.D.M., 1998. Molecular and physiological aspects of nitrate uptake in plants. *Trends Plant Sci.* 3, 389–395. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01311-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01311-9)
- Czékus, Z., Milodanovic, D., Koprivanacz, P., Bela, K., López-Climent, M.F., Gómez-Cadenas, A., Poór, P., 2023. The role of salicylic acid on glutathione metabolism under endoplasmic reticulum stress in tomato. *Plant Physiol. Biochem.* 205. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108192>
- Ficzek, G., Mehmeti, S., Bujdosó, G., Magyar, Á., Simon, G., 2025. Assessing the Post-Brief-Storage Fruit Quality and Sensory Characteristics of Old, Local Apple Cultivars from the Carpathian Basin. *Plants* 14. <https://doi.org/10.3390/plants14132005>
- Gao, Y., Shao, G., Cui, J., Lu, J., Tian, L., Song, E., Zeng, Z., 2023. Effects of Drought Hardening and Saline Water Irrigation on the Growth, Yield, and Quality of Tomato. *Agronomy* 13. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092351>

- Hesari, N., Szegő, A., Mirmazloum, I., Pónya, Z., Kiss-Bába, E., Kolozs, H., Gyöngyik, M., Vasas, D., Papp, I., 2023. High-Nitrate-Supply-Induced Transcriptional Upregulation of Ascorbic Acid Biosynthetic and Recycling Pathways in Cucumber. *Plants* 12, 1292. <https://doi.org/10.3390/plants12061292>
- Huang, W., Yang, S., Pu, R., Yang, S., 2014. Estimation of nitrogen vertical distribution by Bi-Directional canopy reflectance in winter wheat, in: *Sensors (Switzerland)*. IOP Publishing, pp. 20347–20359. <https://doi.org/10.3390/s141120347>
- Jamaludin, D., Abd Aziz, S., Ahmad, D., Jaafar, H.Z.E., 2015. Impedance analysis of *Labisia pumila* plant water status. *Inf. Process. Agric.* 2, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.07.004>
- Jinyang, L., Meiqing, L., Hanping, M., Wenjing, Z., 2016. Diagnosis of potassium nutrition level in *Solanum lycopersicum* based on electrical impedance. *Biosyst. Eng.* 147, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.04.005>
- Kabalan, S., Kovács, F., Papdi, E., Tóth, E., Juhos, K., Biró, B., 2024. Residues of Symbiont Cover Crops Improving Corn Growth and Soil-Dependent Health Parameters. *Agric.* 14. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091601>
- Karim, E., Beáta, G., Zsuzsanna, P., 2025. Essential oils under stress: How drought and salinity shape the physiological and biochemical profile of *Thymus ×citriodorus*. *Ind. Crops Prod.* 233, 121368. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121368>
- Khanna-Chopra, R., Selote, D.S., 2007. Acclimation to drought stress generates oxidative stress tolerance in drought-resistant than -susceptible wheat cultivar under field conditions. *Environ. Exp. Bot.* 60, 276–283.

<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2006.11.004>

- Levine, T.R., Hullett, C.R., 2002. Eta Squared, Partial Eta Squared, and Misreporting of Effect Size in Communication Research. *Hum. Commun. Res.* 28, 612–625. <https://doi.org/10.1093/hcr/28.4.612>
- Li, J. zhi, Li, B., Guan, Q., Gao, J. ming, 2022. Signal molecules controlling nitrate uptake by roots. *J. Plant Interact.* 17, 301–308. <https://doi.org/10.1080/17429145.2022.2037763>
- Li, M.Q., Li, J.Y., Wei, X.H., Zhu, W.J., 2017. Early diagnosis and monitoring of nitrogen nutrition stress in tomato leaves using electrical impedance spectroscopy. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 10, 194–205. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171003.3188>
- Li, S., Liu, X., Yin, L., Wang, S., Deng, X., 2024. Alteration in lipid metabolism is involved in nitrogen deficiency response in wheat seedlings. *Plant Physiol. Biochem.* 214. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108883>
- Liu, X., Wang, S., Deng, X., Zhang, Z., Yin, L., 2020. Comprehensive evaluation of physiological traits under nitrogen stress and participation of linolenic acid in nitrogen-deficiency response in wheat seedlings. *BMC Plant Biol.* 20, 1–16. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02717-5>
- López-Villanueva, J.A., Rodríguez Bolívar, S., 2022. Constant Phase Element in the Time Domain: The Problem of Initialization. *Energies* 15. <https://doi.org/10.3390/en15030792>
- Mackinney, G., 1941. Absorption of Light By Chlorophyll Solutions. *J. Biol. Chem.* 140, 315–322. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(18\)51320-x](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(18)51320-x)
- Masclaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., Suzuki, A., 2010a. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: Challenges for sustainable and productive

- agriculture. Ann. Bot. 105, 1141–1157.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcq028>
- Masclaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., Suzuki, A., 2010b. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. Ann. Bot. 105, 1141–1157.
<https://doi.org/10.1093/AOB/MCQ028>
- Meiqing, L., Jinyang, L., Hanping, M., Yanyou, W., 2016. Diagnosis and detection of phosphorus nutrition level for *Solanum lycopersicum* based on electrical impedance spectroscopy. Biosyst. Eng. 143, 108–118.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.005>
- Monteiro, M.I.C., Ferreira, F.N., De Oliveira, N.M.M., Ávila, A.K., 2003. Simplified version of the sodium salicylate method for analysis of nitrate in drinking waters. Anal. Chim. Acta 477, 125–129.
[https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(02\)01395-8](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(02)01395-8)
- Narasimhan, R., Wang, G., Li, M., Roth, M., Welti, R., Phytochemistry, X.W.-, 2013, undefined, n.d. Differential changes in galactolipid and phospholipid species in soybean leaves and roots under nitrogen deficiency and after nodulation. Elsevier.
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1980. Total Nitrogen Analysis of Soil and Plant Tissues. J. AOAC Int. 63, 770–778.
<https://doi.org/10.1093/jaoac/63.4.770>
- Nikolic, M., Cesco, S., Monte, R., Tomasi, N., Gottardi, S., Zamboni, A., Pinton, R., Varanini, Z., 2012. Nitrate transport in cucumber leaves is an inducible process involving an increase in plasma membrane H⁺-ATPase activity and abundance. BMC Plant Biol. 12.
<https://doi.org/10.1186/1471-2229-12-66>

- Nouaze, J.C., Kim, Jae Hyung, Jeon, G.R., Kim, Jae Ho, 2022. Monitoring of Indoor Farming of Lettuce Leaves for 16 Hours Using Electrical Impedance Spectroscopy (EIS) and Double-Shell Model (DSM). *Sensors* 22, 9671. <https://doi.org/10.3390/s22249671>
- Odry, A., Vizvari, Z., Gyorfi, N., Kovacs, L., Eigner, G., Klincsik, M., Sari, Z., Odry, P., Toth, A., 2021. Application of Heuristic Optimization in Bioimpedance Spectroscopy Evaluation, in: SACI 2021 - IEEE 15th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Proceedings. IEEE, pp. 105–112. <https://doi.org/10.1109/SACI51354.2021.9465617>
- Prasad, A., Roy, M., 2020. Bioimpedance analysis of vascular tissue and fluid flow in human and plant body: A review. *Biosyst. Eng.* 197, 170–187. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.06.006>
- Serrano-Finetti, E., Castillo, E., Alejos, S., León Hilario, L.M., 2023. Toward noninvasive monitoring of plant leaf water content by electrical impedance spectroscopy. *Comput. Electron. Agric.* 210. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107907>
- Singleton, V.L., 1981. Naturally occurring food toxicants: Phenolic substances of plant origin common in foods. *Adv. Food Res.* 27, 149–242. [https://doi.org/10.1016/S0065-2628\(08\)60299-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2628(08)60299-2)
- Vizvari, Z., Gyorfi, N., Odry, A., Sari, Z., Klincsik, M., Gergics, M., Kovacs, L., Kovacs, A., Pal, J., Karadi, Z., Odry, P., Toth, A., 2020. Physical validation of a residual impedance rejection method during ultra-low frequency bio-impedance spectral measurements. *Sensors (Switzerland)* 20, 1–20. <https://doi.org/10.3390/s20174686>
- Xu, G., Fan, X., Miller, A.J., 2012. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annu. Rev. Plant Biol.* 63, 153–182.

<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532>

- Yaseen, A.A., Takacs-Hajos, M., 2022. Evaluation of moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaf extract on bioactive compounds of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown under glasshouse environment. *J. King Saud Univ. - Sci.* 34. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101916>
- Youden, W.J., 1950. Index for rating diagnostic tests. *Cancer* 3, 32–35. [https://doi.org/10.1002/1097-0142\(1950\)3:1<32::AID-CNCR2820030106>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1097-0142(1950)3:1<32::AID-CNCR2820030106>3.0.CO;2-3)
- Zhang, B., Dong, Z., Sui, X., Gao, J., Feng, L., 2024. Detection of water content in tomato stems by electrical impedance spectroscopy: Preliminary study. *Comput. Electron. Agric.* 219. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108755>
- Zhao, L.S., Li, K., Wang, Q.M., Song, X.Y., Su, H.N., Xie, B. Bin, Zhang, X.Y., Huang, F., Chen, X.L., Zhou, B.C., Zhang, Y.Z., 2017. Nitrogen Starvation Impacts the Photosynthetic Performance of *Porphyridium cruentum* as Revealed by Chlorophyll a Fluorescence. *Sci. Rep.* 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08428-6>