

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

NÉMETH ATTILA

MOSONMAGYARÓVÁR

2026

**SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM
ALBERT KÁZMÉR MOSONMAGYARÓVÁRI KAR
NÖVÉNYTUDOMÁNYI TANSZÉK**

**WITTMANN ANTAL NÖVÉNY-, ÁLLAT- ÉS ÉLELMISZER-TUDOMÁNYI
MULTIDISZCIPLINÁRIS
DOKTORI ISKOLA**

**HABERLANDT GOTTLIEB NÖVÉNYTUDOMÁNYI DOKTORI
PROGRAM**

**DOKTORI ISKOLAVEZETŐ:
DR. VARGA LÁSZLÓ DSc
EGYETEMI TANÁR**

**PROGRAMVEZETŐ:
DR. PINKE GYULA DSc EGYETEMI TANÁR**

**TÉMAVEZETŐK:
DR. MOLNÁR ZOLTÁN PhD
EGYETEMI TANÁR
DR. HORVÁTH NÁNDOR PhD**

**ÉRTEKEZÉS CÍME
MIKROALGA- ÉS CIANOBAKTÉRIUM-ALAPÚ BIOSTIMU-
LÁNS BIOMASSZA ALKALMAZÁSA A *PELARGONIUM* NÖVE-
KEDÉSÉNEK ÉS FEJLŐDÉSÉNEK BEFOLYÁSOLÁSÁRA FÓ-
LIASÁTRAS TERMESZTÉSI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT**

**KÉSZÍTETTE:
NÉMETH ATTILA**

**MOSONMAGYARÓVÁR
2026**

**Mikroalga- és cianobaktérium-alapú biostimuláns biomassa alkalmazása
a *Pelargonium* növekedésének és fejlődésének befolyásolására fóliasátras
termesztési körülmények között**

Írta:
NÉMETH ATTILA

**Készült a Széchenyi István Egyetem Wittmann Antal Növény-, Állat- és
Élelmiszer-tudományi Multidiszciplináris Doktori Iskola
Haberlandt Gottlieb Növénytudományi Doktori Programja keretében**

Témavezető: Dr. Molnár Zoltán PhD

**Elfogadásra javaslom (igen / nem)
(aláírás)**

Témavezető: Dr. Horváth Nándor PhD

**Elfogadásra javaslom (igen / nem)
(aláírás)**

A jelölt a doktori komplex vizsgán megfelelt.

Mosonmagyaróvár,

**.....
a Komplex Vizsga Bizottság elnöke**

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen/nem)

Első bíráló (Dr.) igen/nem

(aláírás)

Második bíráló (Dr.) igen/nem

(aláírás)

Esetleg harmadik bíráló (Dr.) igen/nem

(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján%-ot ért el.

Mosonmagyaróvár,

A Bírálóbizottság elnöke

Doktori (PhD) oklevél minősítése.....

Az EDT elnöke

Ezt a doktori (PhD) disszertációt nagyszüleimnek ajánlom, akik kisgyermekkoromtól kezdve hittek bennem, kitartásra, kíváncsiságra, és az önmagamba vetett hitre tanítottak. Szeretetük, bátorításuk és példamutásuk végigkísérte életemet, tanulmányaimat, és segített felismerni és megbecsülni azokat a lehetőségeket, amelyek számukra nem adattak meg.

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	1
TÁBLÁZATJEGYZÉK	7
ÁBRAJEGYZÉK	8
SZÓJEGYZÉK.....	11
RÖVIDÍTÉSEK	14
KIVONAT.....	15
ABSTRACT	17
1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS.....	18
1.1 A kedvező hatású mikroorganizmusok szerepe a fenntartható növénytermesztésben	19
1.2 A dísnövények jelentősége a kertészeti rendszerekben	20
1.3 Kutatási kérdések	23
1.4 Kutatási hipotézisek	24
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	24
2.1 Növény–mikroorganizmus kölcsönhatások: komplexitás és jelentőség a modern kertészetben.....	24
2.1.1 Mikroba–növény jelátvitel és kommunikáció a rizoszférában	26
2.1.1.1 A tápanyag-mobilizáció kedvező hatású mikroorganizmusok által közvetített mechanizmusai	28

2.1.1.2 A tápanyagfelvétel és -szállítás mikrobiális szabályozása a növényekben.....	29
2.1.1.3 A mikroorganizmusok közvetett hatása a tápanyag-hozzáférhetőségre a rizoszféra módosításán keresztül.....	30
2.1.2 A mikroba–növény jelátvitel funkcionális következményei a kertészeti rendszerekben	30
2.2 A növény–mikroorganizmus kölcsönhatások kémiai és metabolikus mechanizmusai	32
2.2.1 Mikroalga-alapú biostimulánsok élettani hatásai a növényekre a rizoszférában.....	35
2.2.2 A fitohormon-szerű vegyületek szerepe a mikroba–növény kölcsönhatásokban	35
2.2.2.1 Mikroalgákból származó fitohormonok.....	36
2.2.2.2 Aminosavak és fehérjehidrolizátumok.....	37
2.2.2.3 Poliszacharidok és extracelluláris polimer anyagok	39
2.2.2.4 A poliaminok, mint újonnan előtérbe kerülő szabályozók a mikroalga–növény kölcsönhatásokban	39
2.3 A dísnövények élettani válaszai a mikroalga-kezelésekre	40
2.3.1 Az élettani válaszok jelátvitel-közvetített szabályozása dísnövényekben	41
2.3.2 Hatás a fotoszintézisre és a pigmentösszetételre.....	42
2.3.3 Vízgazdálkodási kapcsolatok és a növény vízállapota.....	42
2.3.4 Stresszélettan és alkalmazkodási válaszok mikroalga-kezelések hatására.....	43

2.4 A biostimuláns kezelésekhez kapcsolódó lehetséges metabolit válaszok.....	44
2.4.1 A mikrobiális és mikroalga-alapú biostimulánsok általános hatásmódjai.....	45
2.4.2 A biostimulánsok hatása a növényi növekedésre és a biomassa eloszlására	46
2.4.3 A biostimulánsok által kiváltott stressztűrési mechanizmusok erősödése	46
2.4.4 A biostimulánsok hatása a növények élettani és biokémiai válaszáira.....	47
2.4.5 A dísnövénytermesztés szempontjából releváns biostimuláns hatások összegzése	47
3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK.....	49
3.1 Kísérleti rendszer, növényi anyag és környezeti monitoring	49
3.1.1 Biostimuláns mikroalgák kijuttatása és az adatgyűjtés végrehajtása.....	54
3.1.2 A növekedési és fejlődési paraméterek hosszú távú monitorozása	57
3.1.3 A környezeti paraméterek monitorozása.....	58
3.1.4 Végponti mérések.....	59
3.2 Levélpigment-tartalom meghatározása	61
3.3 Metabolit-alapú mintavétel és kiegészítő analízis.....	64
3.3.1 Növényyszövet-mintavétel metabolit vizsgálatokhoz.....	64
3.3.2 Metabolit minták előkészítése és minőségellenőrzése	65

3.3.3 A metabolit minták fogalmi integrációja az élettani mérésekkel	65
3.4 A hosszú távú adatsorok statisztikai elemzése	66
3.4.1 Az adatszerkezet és az előfeldolgozás	67
3.4.2 Statisztikai elemzés	67
3.4.3 A környezeti háttér adatok interpretációs szerepe.....	68
3.4.4 Metabolitprofilok feltáró jellegű értékelése	68
3.5 Kiegészítő fogyasztói attitűd-felmérés a csökkentett vegyszerhasználatú dísznövények megítéléséről	69
4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK	72
4.1 A kísérleti időrend és az adatsorok áttekintése	72
4.2 Hosszú távú növekedési és fejlődési paraméterek	73
4.2.1 A növénymagasság alakulása	74
4.2.2 A bimbóképződés dinamikája	76
4.2.3 A levélszám alakulása	78
4.2.4 A hosszú távú mérések összefoglaló statisztikai áttekintése..	80
4.3 Végponti biomassa- és morfológiai tulajdonságok	81
4.3.1 Friss növényi tömeg	83
4.3.2 Száraz növényi tömeg	83
4.3.3 Végző növénymagasság	85
4.3.4 Gyökértömeg	86
4.3.5 Gyökérnyaki átmérő	87

4.3.6 Gyökérhossz	89
4.4 Levélpigment-tartalom	89
4.5 Feltáró jellegű végponti metabolitprofil-vizsgálatok	92
4.5.1 Genotípus szerint feloldott poliamin mintázatok	92
4.5.2 Kezelésszintű összefoglaló mintázatok	94
4.5.3 A poliamin mintázatok összegző értékelése.....	95
4.5.4 Hormon- és fenolvegyület-profilok ugyanazon végponti mintakészletben	96
4.5.5 A poliamin mintázatok összegző értékelése.....	99
4.6 Környezeti háttér integrált értelmezése	99
4.6.1 Első szint: Országos referencia: klímaanomália-térképek az 1991–2020-as időszakhoz viszonyítva.....	100
4.6.2 Második szint: Regionális makroklíma-adatok.....	102
4.6.3 Harmadik szint: Helyszíni környezeti háttér a fóliasátorban	104
4.6.4 A környezeti adatok szerepe az eredmények értelmezésében	106
4.7 Kiegészítő fogyasztói attitűd-felmérés eredményei és azok gyakorlati értelmezése	106
4.7.1 A felmérés szerepe a kutatásban	106
4.7.2 A kérdőív felépítése és az alkalmazott elemzési módszer ...	107
4.7.3 A válaszadók jellemzői és vásárlási szokásai	107
4.7.4 A csökkentett növényvédőszer-használat fontossága	108

4.7.5 Felárvállalási hajlandóság a csökkentett vagy vegyszermentes termesztésű dísnövényekért.....	109
4.7.6 Gyakorlati gazdasági értelmezés	110
4.7.7 Módszertani korlátok.....	111
4.7.8 A fejezet következtetése.....	111
5. AZ EREDMÉNYEK MEGVITATÁSA	112
5.1 Mikroalga-biostimulánsok alkalmazásának kontextusa és indokoltsága a dísnövénytermesztésben.....	112
5.2 Kísérleti logika és értelmezési keret.....	113
5.3 Hosszú távú növekedési pályák.....	114
5.4 Végponti biomassa és morfológia	114
5.5 A levélpigment-eredmények értelmezése	115
5.6 A feltáró metabolit-eredmények értelmezése.....	116
5.7 A környezeti háttér integrált értelmezése.....	116
5.8 Statisztikai elemzés és modell-diagnosztika	117
5.9 A vizsgálat fókusza és korlátai.....	119
5.10 Gyakorlati jelentőség.....	120
5.11 További kutatási irányok.....	123
6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	124
7. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	128
8. ÖSSZEFOGLALÁS.....	129
9. IRODALOMJEGYZÉK.....	133

PUBLIKÁCIÓK.....	156
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	157
MELLÉKLETEK.....	158

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: Rövidítések jegyzéke	14
2. táblázat: Az MACC-ból kiválasztott mikroalga-törzsek	52
3. táblázat: A kísérletekben alkalmazott Pelargonium fajták	52
4. táblázat: Kísérleti kezelési mátrix	53
5. táblázat: A hosszú távú, ismételt mérések összefoglaló statisztikai eredményei.	81
6. táblázat: Az általános lineáris modell összefoglaló eredményei a biomassza- és strukturális paraméterekre vonatkozóan.	82
7. táblázat: A kiválasztott kulcsmetabolitok kontrollhoz viszonyított relatív eltérése (%) a T1 és T2 kezelésekben.	98
8. táblázat: Környezeti paraméterek leíró statisztikája.....	104
9. táblázat: A GLM-reziduumok normalitásvizsgálata (Ryan–Joiner) és varianciahomogenitási próbája (Levene-próba).....	118

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: Az algák főbb metabolitsoportjainak sematikus áttekintése. Forrás: Bhowmick, Mazumdar és Moulick (2020) alapján szerkesztve.	27
2. ábra: A mikroalgák főbb metabolitsoportjai és ismert ipari, mezőgazdasági, valamint biomedicinális alkalmazásaik (Forrás: Kutasi, 2023).....	34
3. ábra: A MACC laboratóriumi gyűjteménye (Forrás: saját felvétel) ...	49
4. ábra: Kísérleti terület (Forrás: Google Maps)	51
5. ábra: A termesztőközeg eltávolítása és lemosása után, a destruktív feldolgozás előtt álló növények.....	54
6. ábra: A biostimuláns biomassa közvetlen kijuttatása a rizoszférába.	56
7. ábra: Tömegmérések a lemosás után, majd a szárítást követően (forrás: saját felvétel).	61
8. ábra: A pigmentek mennyiségi meghatározásához alkalmazott egyenletek (Forrás: Lichtenthaler, H. K., 1987)	63
9. ábra: Mintagyűjtés klorofillmeghatározáshoz és metabolit-alapú vizsgálatokhoz.....	64
10. ábra: A növénymagasság boxplotja centiméterben a 0. napon.	75
11. ábra: A növénymagasság boxplotja centiméterben a 14. napon.	75
12. ábra: A növénymagasság boxplotja centiméterben a 28. napon	75
13. ábra: A növénymagasság boxplotja centiméterben a 42. napon	76
14. ábra: A bimbószám boxplotja a 0. napon.....	77
15. ábra: A bimbószám boxplotja a 14. napon.....	77
16. ábra: A bimbószám boxplotja a 28. napon.....	77
17. ábra: A bimbószám boxplotja a 42. napon.....	78
18. ábra: A levélszám boxplotja a 0. napon	79

19. ábra: A levélszám boxplotja a 14. napon	79
20. ábra: A levélszám boxplotja a 28. napon	80
21. ábra: A levélszám boxplotja a 42. napon	80
22. ábra: 6 Pelargonium fajta száraz tömege (g) kontroll-, valamint mikroalga-kezelésekben (MACC-612 és MACC-922). A pontok az átlagértékeket, a hibasávok pedig a 95%-os konfidenciaintervallumokat jelölik. Az A–F fajtakódok jelentését a 3. táblázat tartalmazza.	84
23. ábra: 6 Pelargonium fajta növénymagassága (cm) kontroll-, valamint mikroalga-kezelésekben (MACC-612 és MACC-922), három egymást követő termesztési évben (2023–2025). A pontok az átlagértékeket, a hibasávok pedig a 95%-os konfidenciaintervallumokat jelölik. Az A–F fajtakódok jelentését a 3. táblázat tartalmazza.	85
24. ábra: 6 Pelargonium fajta gyökértömege (g) a kontroll-, illetve a mikroalga-kezelésekben (MACC-612 és MACC-922), három egymást követő tenyészidőszakban (2023–2025). A pontok az átlagértékeket, a hibasávok pedig a 95%-os konfidencia intervallumokat jelzik. Az A–F fajtakódok magyarázatát a 3. táblázat tartalmazza.	87
25. ábra: 6 Pelargonium fajta gyökérnyaki átmérője (mm) kontroll-, valamint mikroalga-kezelésekben (MACC-612 és MACC-922), három egymást követő termesztési évben (2023–2025). A pontok az átlagértékeket, a hibasávok pedig a 95%-os konfidenciaintervallumokat jelölik. Az A–F fajtakódok jelentését a 3. táblázat tartalmazza.	88
26. ábra: Levél-klorofill- és karotinoid tartalom (2023)	90
27. ábra: Levél-klorofill- és karotinoid tartalom (2024)	91
28. ábra: Levél-klorofill- és karotinoid tartalom (2025)	91
29. ábra: A destruktív mintavételhez kötött (végponti) változók GC–MS poliamin szintek (DAP, PUT, CAD, SPD, SPM) a 42. napon, azaz a	

destruktív mintavétellel azonos időpontban, fajtakódonként (A–F), T1, T2 és kontroll (K) kezelések alatt, genotípus szerint feloldott oszlopdiaqramon ábrázolva.....	93
30. ábra: A poliaminprofil-vizsgálatokhoz előkészített, laboratóriumi mintavételre sorba rendezett kísérleti növények (forrás: saját felvétel)..	94
31. ábra: A genotípus szerint feloldott poliaminprofilok (DAP, PUT, CAD, SPD, SPM) kezelésszintű összesítése T1, T2 és kontroll (K) kezelések alatt, kiemelve a következetes iránybeli különbségeket és a kezelésekhez kapcsolódó metabolikus mintázatokat a 2025. évi feltáró GC–MS adatsorban.....	95
32. ábra: A 2025. évi végponti mintákban vizsgált főbb fenilpropanoid-, flavonoid- és kapcsolódó fenolos vegyületek sematikus biokémiai kapcsolatrendszere. Az ábra szemléltető céllal készült, és a mért komponensek ismert anyagcsere-kapcsolatait foglalja össze.....	97
33. ábra: A kiválasztott kulcsmetabolitok kontrollhoz viszonyított relatív eltérése a T1 és T2 kezelésekben a 2025. évi végponti minták alapján ..	97
34. ábra: A tavaszi (március–április) középhőmérsékleti anomáliák összehasonlítása Magyarországon 2023 és 2025 között, az 1991–2020-as klimatológiai referencia-időszakhoz viszonyítva (Forrás: HungaroMet, 2025).....	101
35. ábra: Napi középhőmérséklet a 42 napos termesztési időszak alatt (2023–2025).	102
36. ábra: Napi napsütéses időtartam a 42 napos termesztési időszak alatt (2023–2025).	103
37. ábra: Napi globálsugárzás a 42 napos termesztési időszak alatt (2023–2025).....	103
38. ábra: A fóliasátor helyszíni hőmérsékleti alakulása 2023-ban.....	105

39. ábra: A fóliasátor helyszíni hőmérsékleti alakulása 2024-ben.....	105
40. ábra: A fóliasátor helyszíni hőmérsékleti alakulása 2025-ben.....	105
41. ábra: A válaszok megoszlása a következő kérdésre: „Fontosnak tartja-e, hogy az Ön által vásárolt dísznövényeket a lehető legkevesebb vegyszer felhasználásával állítsák elő?”.....	108
42. ábra: A kapcsolódó kérdőívre adott válaszok összesítése a következő kérdésre: „Hajlandó lenne-e magasabb árat fizetni olyan dísznövényekért, amelyeket csökkentett vegyszerhasználattal vagy teljesen növényvédő szerek nélkül termesztettek?”.....	109
43. ábra: Azonos időpontban fényképezett, eltérő fejlettségű Pelargonium egyedek a kertészeti állományban (forrás: saját felvétel)	113
44. ábra: A bősárkányi virágkertészet fóliasátras termesztőtere (forrás: saját felvétel)	117
45. ábra: Díszítőérték szempontjából kedvező megjelenésű, fejlett Pelargonium állomány kertészeti felhasználásban (forrás: saját felvétel)	123

SZÓJEGYZÉK

Abiotikus stressz – Nem élő környezeti tényezők – például hőmérsékleti szélsőségek, szárazság vagy sugárzás – által kiváltott kedvezőtlen hatások a növények növekedésére.

Általános lineáris modell (GLM) – Statisztikai módszer, amelyet a kezelésekre, az évek és ezek kölcsönhatásainak hatására mérhető növényi paraméterek értékelésére alkalmaznak.

Biostimuláns – Olyan anyag vagy mikroorganizmus, amely tápanyagtartalmától függetlenül elősegíti a növények növekedését, a tápanyagfelvételt, a stressztűrést vagy a termés minőségét.

Chlorella vulgaris (Beijerinck) – Egysejtű zöld mikroalga, amelyet biostimuláns tulajdonságai miatt széles körben vizsgálnak mezőgazdasági és kertészeti alkalmazásokban.

Cianobaktériumok – Fotoszintetizáló prokarióta mikroorganizmusok (korábban kék-zöld algáknak nevezték), amelyek potenciális biostimuláns hatással rendelkeznek.

Generatív fejlődés – A növény fejlődési szakasza, amely a reprodukzív szervek – például bimbók és virágok – kialakulásához kapcsolódik.

Gyökér–hajtás arány – A föld alatti (gyökér) és a föld feletti (hajtás) növényi biomasz aránya.

Gyökérnyaki átmérő – A növény szárának vastagsága a gyökér és a hajtás közötti átmeneti zónában, amely a szerkezeti fejlődés egyik mutatója.

Kezelés (T1, T2) – Különböző mikroalga- vagy cianobaktérium-biomassza készítmények alkalmazása.

Kontrollkezelés – Olyan kísérleti csoport, amely nem kap biostimuláns kezelést, és összehasonlítási alapként szolgál.

Metabolomikai vizsgálat – A kis molekulatömegű metabolitok átfogó elemzése a fiziológiai és biokémiai állapotok jellemzésére.

Mikroalga-biomassza – Betakarított és feldolgozott alga szervesanyag, amely biológiailag aktív vegyületeket tartalmaz, és növényi biostimulánsként alkalmazható.

***Nostoc piscinale* (Kütz. ex Bornet & Flahault)** – Fonalszerű cianobaktérium, amelyet a vizsgálatokban biomasszaalapú biostimuláns kezelésként alkalmaztak.

***Pelargonium* (L'Hér. ex Aiton)** – A gólyaorrfélék (Geraniaceae) családjába tartozó növényfaj, amelynek fajtái és hibridjei dísznövényként széles körben termesztettek; köznyelvi nevükön muskátlik.

Poliamin – Kis molekulatömegű, több pozitív töltéssel rendelkező vegyületek (például putreszcin, spermidin, spermin), amelyek szerepet játszanak a növényi növekedés és a stresszszabályozás folyamataiban.

Rizoszféra – A növényi gyökereket körülvevő talaj szűk zónája, amely változatos talaj alatti ökoszisztémának ad otthont; megfigyelések szerint a gyökerek közvetlen környezetében a mikroorganizmusok nagyobb számban fordulnak elő, mint a környező talajban.

Statisztikai szignifikancia – Olyan mutató, amely azt jelzi, hogy a megfigyelt különbségek valószínűleg nem a véletlen hatásának eredményei, meghatározott valószínűségi küszöbértékek alapján.

Végponti mérés – A kísérleti időszak végén végzett végső, gyakran destruktív mérés vagy értékelés.

RÖVIDÍTÉSEK

1. táblázat: Rövidítések jegyzéke

Rövidítés	Jelentés
ACC	1-aminociklopropán-1-karbonsav
DAP	Diaminopropán
DW	Száraz tömeg
FW	Friss tömeg
GC–MS	Gázkromatográfia–tömegspektrometria
GLM	Általános lineáris modell
MACC	Mosonmagyaróvári Algagyűjtemény
MACC - 612	<i>Nostoc piscinale</i> törzsazonosítója a Mosonmagyaróvári Alga Törzsgyűjteményből
MACC - 922	<i>Chlorella vulgaris</i> törzsazonosítója a Mosonmagyaróvári Alga Törzsgyűjteményből
PAR	Fotoszintetikusán aktív sugárzás
RNS	Ribonukleinsav
ROS	Reaktív oxigéngyökök
Mértékegységek	
g	gramm
kg	kilogramm
l	liter

KIVONAT

A doktori kutatás célja annak vizsgálata volt, hogy a *Nostoc piscinale* cianobaktériumból (T1) és a *Chlorella vulgaris* mikroalgából (T2) származó biomassa milyen biostimuláns hatást fejt ki különböző *Pelargonium* fajták növekedésére és fejlődésére fóliasátras termesztési körülmények között. A vizsgálatokat 2023 és 2025 között, három egymást követő termesztési évben végeztem Nyugat-Magyarországon, 6 *Pelargonium* fajta és kezeletlen kontroll bevonásával.

A kísérletek során ismételt, nem destruktív növekedési méréseket, valamint végponti biomassa- és morfológiai vizsgálatokat végeztem, kiegészítve levélpigment- és feltárási poliaminprofil-elemzésekkel. Az értékelés kiterjedt a növekedési dinamika és a biomassa-felhalmozódás főbb paramétereire, továbbá kérdőíves felméréssel a csökkentett vegyszerhasználattal előállított dísznövények fogyasztói megítélésére is.

Az eredmények alapján a kezelések következetesen kedvező hatást gyakoroltak a vizsgált állományra. A legerősebb hatások a száraz növénytömeg, a gyökértömeg és a gyökérnyaki átmérő esetében jelentkeztek: a száraz növénytömeg 19,2% (T1), illetve 33,1% (T2), a gyökértömeg 22,3% és 24,1%, míg a gyökérnyaki átmérő 9,3% és 17,0% növekedést mutatott a kontrollhoz képest. Az ismételt, nem destruktív mérések alapján a hosszú távú kezeléshatás legegységelműbben a levélszám alakulásában jelentkezett, ahol a kezelés főhatása ($F = 4,16$; $p = 0,016$) és a kezelés $\times$ idő interakció ($F = 4,73$; $p < 0,001$) egyaránt szignifikáns volt. A 42. napon a levélszám átlaga a kontroll 14,09-es értékéhez képest T1-ben 14,69-re, T2-ben 14,70-re emelkedett, ami 4,2, illetve 4,3%-os növekedésnek felelt meg. A bimbóképződés esetében a kezelések kedvező irányú, de

statisztikailag nem teljesen megerősített tendenciát mutattak, míg a növénymagasságban a kezeléshatás kisebb mértékben jelentkezett.

A kiegészítő élettani vizsgálatok arra utaltak, hogy a fenotípusos változások mögött biokémiai szintű eltérések is állhatnak, ugyanakkor a hatásmechanizmusra vonatkozó egyértelmű következtetések levonására nem elegendők. A piackutatás jelentős fogyasztói nyitottságot jelzett a csökkentett vegyszerhasználattal előállított dísnövények iránt.

Összességében a mikroalga- és cianobaktérium-alapú biomassza-készítmények ígéretes biostimuláns megoldást jelentenek a *Pelargonium* termesztésében, különösen a biomassza-felhalmozódás és a gyökérfejlődés javítása révén.

ABSTRACT

The aim of this doctoral research was to investigate the biostimulant effects of biomass derived from *Nostoc piscinale* (T1) and *Chlorella vulgaris* (T2) on *Pelargonium* cultivars grown under polytunnel conditions. Experiments were conducted over three consecutive growing seasons (2023–2025) in Western Hungary, using six cultivars and an untreated control.

Repeated non-destructive growth measurements and endpoint biomass and morphological assessments were performed, complemented by leaf pigment analyses and exploratory polyamine profiling. The evaluation covered the main parameters of growth dynamics and biomass accumulation, and also included a questionnaire-based survey on consumer perception of ornamental plants produced with reduced pesticide use.

The treatments resulted in consistent positive effects, particularly on dry plant mass, root mass and root collar diameter. Dry plant mass increased by 19.2% under T1 and 33.1% under T2 compared to the control. Repeated non-destructive measurements showed the clearest long-term treatment effect in leaf number, while bud formation showed a positive but not fully statistically confirmed trend.

Complementary physiological results suggested underlying biochemical differences, although they were not sufficient to draw firm conclusions on the mechanism of action. Market survey data indicated strong consumer openness towards reduced-pesticide ornamental plants. Overall, microalgal and cyanobacterial biomass-based treatments represent promising biostimulant tools in *Pelargonium* cultivation.

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

A mezőgazdasági termelési rendszerekre – beleértve a dísznövénytermesztést is – egyre nagyobb nyomás nehezedik: a termelési igények növekedése mellett a környezeti terhelés mérséklése is alapvető elvárássá vált. A szintetikus műtrágyák és növényvédő szerek rövid távon hatékonyak lehetnek, hosszabb távon azonban hozzájárulhatnak a talajállapot romlásához és az ökológiai kockázatok növekedéséhez. Ezt az irányt Európai Unió szinten is erősítik a növényvédőszer-használat fenntarthatóbbá tételét célzó dokumentumok (pl. 2009/128/EK irányelv). A biostimulánsok a keretrendszerben olyan kiegészítő eszközök lehetnek, amelyek a növényi táplálkozási folyamatok stimulálásán keresztül, a termék tápanyagtartalmától függetlenül járulhatnak hozzá a teljesítmény és a stressztűrés javításához. A mikroalga- és cianobaktérium-eredetű anyagok növényélettani jelentőségét korábbi *in vitro* eredmények is alátámasztották, amelyekben az ilyen eredetű vegyületek a növényi organogenezist befolyásolták (Molnár & Ördög, 2005b).

Ebben az összefüggésben a növényi biostimulánsok iránti érdeklődés folyamatosan erősödik, mivel olyan környezetkímélő eszközöknek tekinthetők, amelyek javíthatják a növények növekedését, a tápanyag-hasznosítás hatékonyságát és a kedvezőtlen környezeti hatásokkal szembeni alkalmazkodást anélkül, hogy jelentős mennyiségű tápanyagot juttatnának ki. A biostimulánsok növénytudományi jelentőségét átfogóan összefoglaló munkák szerint ezek a készítmények a tápanyag-hasznosítás, az abiotikus stressztűrés és a növényi teljesítmény egyenletességének javításán keresztül válhatnak a korszerű kertészeti rendszerek fontos kiegészítő elemeivé (Yakhin et al., 2017). Az *Anabaena* nemzetségbe tartozó

cianobaktériumok jelentős biotechnológiai potenciállal rendelkeznek, mivel növekedést serkentő és stresszmoduláló metabolitok termelésére képesek (Horváth et al., 2016). A biostimulánsok között a mikroalga- és cianobaktérium-alapú készítmények különösen ígéretesek, mivel összetett biokémiai összetételük révén többféle élettani folyamatot befolyásolhatnak (du Jardin, 2015; Chiaiese et al., 2018). E szervezetek számos bioaktív vegyületet – többek között fitohormonokat, aminosavakat, poliszacharidokat és másodlagos metabolitokat – termelnek, amelyek több szinten hathatnak a növények fejlődésére és élettani állapotára (Ördög et al., 2013; Alvarez et al., 2021). Bár a mikroalga-alapú biostimulánsokkal kapcsolatos vizsgálatok száma növekszik, a több éven át érvényesülő hatások, valamint a dísnövénytermesztési körülmények között jelentkező, faj- és fajtánkként eltérő válaszok továbbra sem kellően tisztázottak.

1.1 A kedvező hatású mikroorganizmusok szerepe a fenntartható növénytermesztésben

A kedvező hatású mikroorganizmusok meghatározó szerepet töltenek be a fenntartható mezőgazdasági rendszerekben a növényekkel és a környező talajjal kialakított kölcsönhatásaikon keresztül. A rizoszférában zajló összetett növény–mikroorganizmus kapcsolatok befolyásolják a tápanyagok hozzáférhetőségét, a gyökérfejlődést, a stresszválaszokat és összességében a növény teljesítményét is (Souza et al., 2015). A növények növekedését serkentő mikroorganizmusok – köztük a baktériumok, gombák és fotoszintetizáló mikroorganizmusok – hozzájárulnak a tápanyagok mobilizálásának javításához, a hormonális szabályozás támogatásához, valamint az abiotikus és biotikus stresszhatásokkal szembeni ellenálló képesség fokozásához (Mahmud et al., 2020; Lee & Ryu, 2021).

A cianobaktériumok és a mikroalgák ezen rendszerekben sajátos helyet foglalnak el, mivel elsődleges produkcióra képes szervezetek, amelyek a fotoszintézis révén szén-dioxidot kötnek meg, miközben a növényi növekedést támogató metabolitokat is termelnek. Talaj- és kertészeti rendszerekben alkalmazva hozzájárulnak a nitrogénkötéshez, az exopoliszacharidok termeléséhez, a talajszerkezet javításához és a mikrobiális aktivitás fokozásához (Dineshkumar et al., 2019). Biotrágyaként vagy biostimulánsként történő felhasználásuk számos növénykultúrában együtt járt a növekedés serkentésével, a tápanyagfelvétel javulásával és a stressztűrés fokozódásával (Alvarez et al., 2021; Berthon et al., 2021).

1.2 A dísnövények jelentősége a kertészeti rendszerekben

A dísnövények a kertészeti termelés jelentős szegmensét alkotják, ahol a vizuális minőség, az erőteljes növekedés és a stressztűrés kiemelt gazdasági jelentőségű tulajdonságok. A *Pelargonium* nemzetség fajai a legszélesebb körben termesztett dísnövények közé tartoznak, köszönhetően jó alkalmazkodóképességüknek, esztétikai értéküknek, valamint üvegházi és fóliasátras termesztésben egyaránt meglévő gazdasági jelentőségüknek (Noordergraaf, 1994). A dísnövénykertészetben már a vegetatív növekedés, a virágzás vagy a növényállomány egységes fejlődése téren elért mérsékelt javulásnak is számottevő gazdasági hatása lehet.

Az élelmisznövényekkel szemben a dísnövényeket olyan morfológiai és élettani paraméterek alapján értékelhetjük, mint a biomassza-felhalmozódás, a levélszám, a klorofilltartalom, a gyökérzet fejlettsége vagy a növény általános megjelenése. Éppen ezért különösen nagy jelentősége van azoknak a biostimuláns kezeléseknek, amelyek e tulajdonságokat kedvezően befolyásolják anélkül, hogy a növény egyéb tulajdonságait

(egészségi állapot, növekedési egyensúly) hátrányosan befolyásolnák. A mikroalga-alapú biostimulánsok dísznövényfajok esetében is ígéretes eredményeket mutattak, mivel elősegítették a vegetatív növekedést, a gyökérfejlődést és a stressztűrést (Ördög et al., 2013).

A dísznövények esetében a növekedési habitus, a morfológiai egységesség és a dekoratív érték kialakulása szorosan összefügg a hormonális szabályozással, ezért az ornamentális fajokban a hormonháztartást közvetve befolyásoló biostimuláns hatások különösen relevánsak lehetnek (Plaza et al., 2018).

Mindazonáltal, bár egyre több vizsgálat igazolja a biostimulánsok kedvező fenotípusos hatásait, a háttérben álló élettani és anyagcsere-mechanizmusok – különösen a poliamin-anyagcserével és a metabolit szabályozással összefüggő folyamatok – dísznövények esetében továbbra sem kellően feltártak. A témával kapcsolatos ismeretek bővítése hozzájárul a mikroalga-alapú biostimulánsok tudományos megalapozásához, valamint a dísznövénykertészeti gyakorlatban való célzott és optimalizált alkalmazásukhoz. A biostimulánsok kertészeti kultúrákban történő alkalmazása a növekedési teljesítmény és a termesztési minőség javításához járulhat hozzá (Drobek et al., 2019; Parađiković et al., 2019). A mikroalga-alapú biostimulánsokkal kapcsolatos újabb eredmények arra utalnak, hogy ezek a készítmények a növekedés serkentése mellett a stresszrezisztencia fokozásában is fontos szerepet tölthetnek be a mezőgazdasági és kertészeti növények esetében (Arenas Colarte et al., 2025). Emellett a mikroalga-alapú biostimulánsok agronómiai értékelésében kiemelt jelentősége van a több szezonon át végzett vizsgálatoknak, mivel ezek teszik lehetővé a kezelési hatások stabilitásának és megbízhatóságának megítélését (Ronga et al., 2019; Németh et al., 2024a).

Bár számos tanulmány számolt be mikroalga-alapú kezelések után megfigyelhető kedvező fenotípusos hatásokról, ezek élettani háttere és egyes kapcsolódó biokémiai jelenségei dísnövényekben még nem teljesen ismertek. Emellett az sem tisztázott, hogy a különböző növényfajták és növekedési típusok milyen mértékben és milyen módon reagálnak azonos biostimuláns kezelésekre egy adott fajon belül.

A dísnövénytermesztésben a terméshozam helyett vegetatív növekedés, a gyökérzet fejlettsége, a biomassza-felhalmozódás és a növény esztétikai megjelenése bír kiemelt jelentőséggel. Ennek megfelelően a mikroalga-alapú biostimulánsok értékelése komplex megközelítést igényel, amely a morfológiai, élettani és biokémiai mutatók együttes vizsgálatán alapul. A növekedési paraméterek javulásáról több vizsgálat is beszámolt, kevesebb figyelem irányult a metabolitszintű változásokra – például a poliaminprofil módosulására – és arra, hogy ezek miként járulhatnak hozzá a biostimuláns kezelésekre adott növényi válaszok kialakulásához.

A jelen doktori (PhD) kutatás célja az volt, hogy több vegetációs időszakon keresztül, szabályozott kertészeti körülmények között értékelje kiválasztott mikroalga- és cianobaktérium-biomassza kezelések biostimuláns hatását különböző *Pelargonium* fajtákon. A vizsgálat célja annak feltárása volt, hogy ezek a kezelések miként befolyásolják a vegetatív növekedési paramétereket, az élettani jellemzőket és egyes metabolikus mutatókat. Emellett azt is vizsgáltuk, hogy a fenotípusos változásokon túl ki-mutathatók-e olyan biokémiai és feltáró jellegű metabolit-szintű eltérések, amelyek hozzájárulhatnak az eredmények értelmezéséhez. A kutatás további célja annak vizsgálata volt, hogy a mikroalga-alapú kezelések hatása mennyire tekinthető következetesnek különböző években és

növénytípusok esetében, illetve kimutathatók-e fajta- vagy évjárat függő eltérések a növényi válaszokban. A dolgozat központi kérdése annak tisztázása volt, hogy a mikroalga- és cianobaktérium-alapú biomaszakezelések gyakorlati fóliasátras dísnövénytermesztési körülmények között nemcsak egyszeri, hanem több éven át ismételhető és termesztéstechnológiai szempontból is értelmezhető biostimuláns hatást fejtenek-e ki *Pelargonium* fajtákon.

1.3 Kutatási kérdések

- A vizsgált mikroalga- és cianobaktérium-biomassza kezelések okoznak-e kimutatható változást a *Pelargonium* vegetatív növekedésében és a kísérlet végén mért biomassza- és morfológiai jellemzőiben a kezeletlen kontrollhoz viszonyítva?
- A kezelésekhez kapcsolódó növekedési és biomassza válaszok iránya és mértéke több egymást követő termesztési évben is következetesen megfigyelhető-e, vagyis a hatás ismételhetőnek tekinthető-e eltérő évjárat körülmények között?
- Eltér-e a kezelésekre adott növényi válasz a vizsgált *Pelargonium* csoportok, illetve fajták között, vagyis megfigyelhető-e fajta- vagy csoportspecifikus különbség a biostimuláns hatás mértékében?
- Kapcsolhatók-e a fenotípusos szinten megfigyelt változásokhoz olyan élettani, biokémiai és feltárási jellegű metabolit-szintű eltérések, amelyek hozzájárulnak a kezelések hatásmechanizmusának értelmezéséhez?

1.4 Kutatási hipotézisek

- A mikroalga- és cianobaktérium-biomassza alapú kezelések a kezletlen kontrollhoz képest kedvezően befolyásolják a *Pelargonium* növények vegetatív növekedési paramétereit.
- A biostimuláns kezelések a vizsgált *Pelargonium* fajtákban kedvező irányban befolyásolják a növények egyes élettani és szerkezeti jellemzőit, különösen a gyökérzet fejlettségét és a növényi kondícióval összefüggő paramétereket.
- A biostimuláns hatások mértékét és irányát a növény fajtája és növekedési típusa egyaránt befolyásolja, ezért a különböző *Pelargonium* fajták kezelésekre adott reakciója eltérő lehet.
- A mikroalga-alapú kezelésekhez kapcsolódóan a kezelt és a kontroll növények között olyan poliaminprofil eltérések lehetnek kimutathatók, amelyek hozzájárulhatnak a fenotípusos válaszok biológiai értelmezéséhez.
- Az évjáratí környezeti különbségek befolyásolhatják az abszolút növekedési szinteket, miközben a kezelésekhez kapcsolódó fő tendenciák több évben is fennmaradhatnak.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 Növény–mikroorganizmus kölcsönhatások: komplexitás és jelentőség a modern kertészetben

A növények és a mikroorganizmusok közötti kölcsönhatások a szárazföldi ökoszisztémák meghatározó biológiai folyamatai közé tartoznak.

A szárazföldi növények megjelenése óta a mikroorganizmusok folyamatos kapcsolatban állnak gazdanövényeikkel, és ennek eredményeként szoros működési egységek alakultak ki. Ezt a szakirodalom gyakran holobiontként írja le, utalva arra, hogy a növény és a hozzá kapcsolódó mikrobiális közösség funkcionálisan összekapcsolt ökológiai egységet alkot (Rosenberg & Zilber-Rosenberg, 2018). A mezőgazdasági és kertészeti rendszerekben a növények számos mikroorganizmussal kerülnek kapcsolatba – többek között baktériumokkal, gombákkal, algákkal, protozoonokkal és vírusokkal –, amelyek hatása kedvező, semleges vagy káros is lehet a növények növekedésére és fejlődésére (Backer et al., 2018; Mahmud et al., 2020).

Az elmúlt évtizedek metabolit- és élettani vizsgálatai jelentősen bővítették a növény–mikroorganizmus kölcsönhatásokról alkotott ismereteinket. E kutatások rámutattak arra, hogy a növények nem passzív elszenvedői ezeknek a kapcsolatoknak, hanem aktívan érzékelik a mikrobiális jeleket mintázatfelismerő receptorok és összetett jelátviteli folyamatok segítségével. Ez teszi lehetővé számukra, hogy a kedvező és a kórokozó mikroorganizmusokat eltérően kezeljék (Jones et al., 2016; Zipfel & Oldroyd, 2017). A kedvező kölcsönhatások javíthatják a tápanyagfelvételt, serkentetik a növekedést és hozzájárulhatnak az abiotikus és biotikus stresszhatásokkal szembeni alkalmazkodóképesség javításához, míg a kórokozókkal való kapcsolat védekezési reakciókat és anyagcsere-változásokat vált ki (Hacquard et al., 2017; Cheng et al., 2019). A növény–mikroorganizmus kapcsolatok alakulását a környezeti feltételek jelentős mértékben befolyásolják (Németh et al., 2026). A hőmérséklet, a vízellátottság, a tápanyagellátás, a talajszerkezet és a fényviszonyok egyaránt hatással lehetnek a mikrobiális közösségek összetételére, valamint a növények

válaszkészségére, ezáltal a rizoszféra működésére is (Andronov et al., 2012; Pershina et al., 2015). Az abiotikus stresszhatások – például a szárazság, a sóstressz, a tápanyaghiány, a szélsőséges hőmérséklet vagy a nehézfém-szennyezés – közvetlenül módosíthatják a gyökérzet felépítését és az exudátumok összetételét, ami a mikrobiális közösségek szerkezetére és a gazdanövénnel kialakuló kapcsolatokra is kihat (Hasanuzzaman et al., 2012; Khan et al., 2018). Ezek a változások végső soron a növények egészségi állapotát, növekedését és teljesítményét is befolyásolhatják.

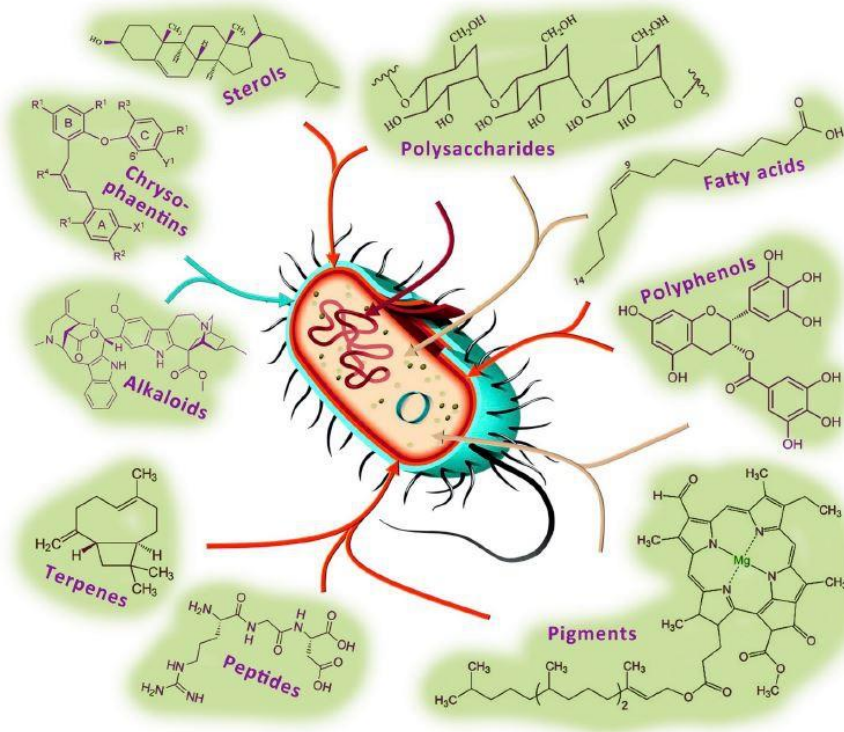
A kertészeti termesztési rendszerekben a növény–mikroorganizmus kölcsönhatások vizsgálata különösen fontos, mivel a termesztési értéket nemcsak a biomassa, hanem a növekedési habitus, a levélfelület és az általános esztétikai megjelenés is meghatározza. A szántóföldi kultúrákkal szemben a dísnövényeket gyakran szabályozott vagy részben szabályozott körülmények között termesztik, ahol már kisebb élettani eltérések is számottevően befolyásolhatják a piaci értéket. Ezért a kedvező hatású mikroorganizmusok biotrágyaként vagy biostimulánsként történő alkalmazása ígéretes lehetőséget jelenthet a növényi teljesítmény javítására, miközben hozzájárulhat a kémiai inputok felhasználásának mérsékléséhez.

2.1.1 Mikroba–növény jelátvitel és kommunikáció a rizoszférában

A növények és a mikroorganizmusok közötti kommunikáció a rizoszférában és a filloszférában cserélődő kémiai vegyületek összetett hálóján keresztül valósul meg. A gyökérhez kapcsolódó mikroorganizmusok reagálnak a növényi exudátumokra, miközben a növények érzékelik a mikrobiális metabolitokat. Ez a kétirányú kommunikáció meghatározó szerepet játszik a növényi növekedés, fejlődés és immunválasz alakulásában (Berendsen et al., 2012; Jamil et al., 2022; Wankhade et al., 2025).

A kedvező hatású mikroorganizmusok a növényi teljesítményt elsősorban három fő úton befolyásolják: javítják a tápanyagok hozzáférhetőségét és felvételét, módosítják a növényi hormonális szabályozást, valamint hozzájárulnak a kórokozó mikroorganizmusok visszaszorításához (van der Heijden et al., 2008; Mendes et al., 2013).

A mikroorganizmusok által termelt bioaktív vegyületek sokféleségének és funkcionális jelentőségének szemléltetésére az 1. ábra az algák főbb metabolit csoportjait foglalja össze.



1. ábra: Az algák főbb metabolitscsoportjainak sematikus áttekintése. Forrás: Bhowmick, Mazumdar és Moulick (2020) alapján szerkesztve.

2.1.1.1 A tápanyag-mobilizáció kedvező hatású mikroorganizmusok által közvetített mechanizmusai

A természetes és mezőgazdasági talajokban az alapvető tápanyagok – például a nitrogén, a foszfor és a kén – jelentős része a növények számára közvetlenül nem hozzáférhető formában van jelen. A talajmikroorganizmusok ezért kulcsszerepet töltenek be a tápanyag-körforgásban, mivel a szerves vegyületeket lebontják, és a tápanyagokat a növények számára felvehető formává alakítják (Richardson et al., 2009). A nitrogénkötésre, foszfátoldásra és kénoxidációra képes baktériumok és gombák közvetlenül hozzájárulnak a növényi tápanyagellátáshoz, és mérsékelhetik a szintetikus műtrágyáktól való függőséget (Grover et al., 2011; Qu et al., 2022).

A növénynövekedést serkentő baktériumok a tápanyagellátás javítását több úton is támogathatják, például biológiai nitrogénkötéssel, foszforoldással, káliummobilizációval és a vasfelvétel elősegítésével (Souza et al., 2015; Backer et al., 2018). Emellett a növények gyökérváladékaik összetételével aktívan befolyásolják a környezetükben kialakuló mikrobiális közösségeket, ezáltal támogatva azon mikroorganizmusok megtelepedését, amelyek kedvezően hatnak tápanyagellátásukra (Glick & Gamalero, 2021).

A mikroalgák és a cianobaktériumok szintén hozzájárulhatnak a tápanyagok jobb hozzáférhetőségéhez. Nemcsak nitrogénkötésük révén fontosak, hanem azért is, mert olyan szerves vegyületeket és exopoliszacharidokat bocsáthatnak ki, amelyek kedvezően befolyásolják a talaj aggregátumképződését, vízmegtartó képességét és mikrobiális aktivitását (Dineshkumar et al., 2019). Talajba juttatva több növénykultúrában is

hozzájárultak a tápanyag-körforgás javulásához és a növényi növekedés fokozásához (Renuka et al., 2018; Németh et al., 2024b).

2.1.1.2 A tápanyagfelvétel és -szállítás mikrobiális szabályozása a növényekben

A növényi hormonális szabályozás alapvető szerepet játszik a növekedés, a fejlődés és a stresszválaszok irányításában. A kedvező hatású mikroorganizmusok képesek befolyásolni ezt az egyensúlyt, akár fitohormonok közvetlen termelésével, akár a növényi hormonszintézis és jelátviteli folyamatok módosításával (Verbon & Liberman, 2016; Großkinsky et al., 2016).

A mikroorganizmusok által termelt auxinok, citokininek, gibberellinek és az etilénhatást módosító enzimek hatással lehetnek a gyökérszet felépítésére, a hajtásfejlődésre és a stressztűrésre (Gimenez-Ibanez et al., 2015; Aloo et al., 2023). Ezek a hatások szintén javíthatják a tápanyagfelvételt és a növekedési teljesítményt. A citokininek például a sejtosztódás és a vegetatív növekedés fenntartásában játszanak szerepet (Ha et al., 2012).

A mikroalgákból származó biostimulánsokról kimutatták, hogy fitohormonokat vagy hormonszerű vegyületeket tartalmaznak, amelyek a magasabb rendű növényekben megfigyeltékhez hasonló szabályozó hatást fejthetnek ki (Stirk et al., 2002; Tarakhovskaya et al., 2007). Növényekre kijuttatva képesek módosítani az endogén hormonszinteket és a jelátviteli hálózatokat, ezáltal hozzájárulhatnak a növekedés és a stressztűrés javulásához (Dhar et al., 2022; Németh et al., 2024a).

2.1.1.3 A mikroorganizmusok közvetett hatása a tápanyag-hozzáférhetőségre a rizoszféra módosításán keresztül

A rizoszféra összetett ökológiai közeg, ahol a mikroorganizmusok folyamatos kölcsönhatásban állnak egymással, és jelenlétüket nagymértékben befolyásolja a tápanyagok és más erőforrások hozzáférhetősége (Tedersoo et al., 2020). Ebben a környezetben a kedvező hatású mikroorganizmusok a gyökérkörnyezet alakításán és a növényi kórokozók visszaszorításán keresztül közvetve is hozzájárulhatnak a növények jobb teljesítményéhez (Hibbing et al., 2010; Mendes et al., 2013).

Egyes baktériumok és gombák emellett indukált szisztematikus rezisztenciát (ISR) válthatnak ki a növényben, ami fokozott védekezési képességgel járhat (Pieterse et al., 2014; Pérez-Montaña et al., 2014).

A kvórumérzékelés és a biofilmképzés szintén fontos szerepet játszik a rizoszféra-működés szabályozásában. A mikrobiális közösségek kémiai vegyületek révén összehangolhatják viselkedésüket, ami befolyásolhatja a biofilmképzést, a másodlagos metabolitok termelését és a mozgékonyságot. (Tariq & Ahmed, 2023). A biofilmek a gyökérfelszínen kedvezőbb mikrobiális környezetet alakíthatnak ki, ami hozzájárulhat a tápanyagcseréhez és a növény–mikroorganizmus kapcsolat stabilitásához (Keren-Paz & Kolodkin-Gal, 2020).

2.1.2 A mikroba–növény jelátvitel funkcionális következményei a kertészeti rendszerekben

A növényeket folyamatosan számos abiotikus és biotikus stresszhatás éri, többek között szárazság, sóstressz, hőmérsékleti szélsőségek, tápanyag-egyensúlyzavar, nehézfémek és patogén szervezetek

formájában. Ezek a tényezők gyakran növekedés csökkenést, élettani zavarokat és termésveszteséget okoznak, és a globális növénytermesztés eredményessége csökkenésének mintegy 30%-áért felelősek (Goswami et al., 2016). A dísznövénykertészetben a stressz közvetlenül rontja a növényminőséget, az egyöntetűséget és az értékesíthetőséget.

A kedvező hatású mikroorganizmusok, például a mikroalgák és a növény-növekedést serkentő baktériumok, hozzájárulhatnak a növények stressztűrésének javításához. E hatások összefoglalóan az indukált szisztematikus tolerancia fogalmával írhatók le (Sharma et al., 2012; Fadiji et al., 2022). Ide tartozik az antioxidáns védekezőrendszer aktiválása, az ozmotitfelhalmozás, a hormonális szabályozás módosítása, valamint a víz- és tápanyagfelvétel javítása. Az antioxidáns aktivitás – beleértve a szuperoxid-diszmutáz szabályozását is – alapvető szerepet játszik az abiotikus stresszhatásokkal szembeni tolerancia kialakításában (Szöllősi, 2014).

A mikroalga-alapú biostimulánsokról kimutatták, hogy kedvezően befolyásolhatják az abiotikus stresszekkel szembeni ellenálló képességet az antioxidáns enzimek aktivitásának növelésével, a sejthártyák stabilizálásával és a stresszre reagáló gének expressziójának módosításával (El Arroussi et al., 2018; Renuka et al., 2018). *Chlorella*- és *Spirulina*-eredetű kivonatok például javították a búza és a paprika sóstressz-tűrését az antioxidáns kapacitás fokozásán és az ionegyensúly fenntartásán keresztül (Guzmán-Murillo et al., 2013). Hasonlóképpen a cianobaktériumok nitrogénkötésük, exopoliszacharid-termelésük és a talajszerkezet kedvező befolyásolása révén járulhatnak hozzá a stresszhatások mérsékléséhez, különösen száraz vagy szikes környezetben (Poveda, 2021).

A növényekhez kapcsolódó baktériumok szintén fontos szerepet töltenek be a stressztűrés kialakításában. Az 1-aminociklopropán-1-

karboxilát-dezamináz aktivitással rendelkező, növénynövekedést serkentő rizobaktériumok mérséklék az etilén felhalmozódását stressz körülmények között, ezáltal enyhítve a gyökérnövekedés gátlását (Glick, 2014). Más baktériumok az ozmotikus egyensúly szabályozásán és a gyökérzet szerkezetének javításán keresztül fokozhatják a szárazság- és sóstressz-tűrést (Egamberdieva et al., 2017; Khan et al., 2018).

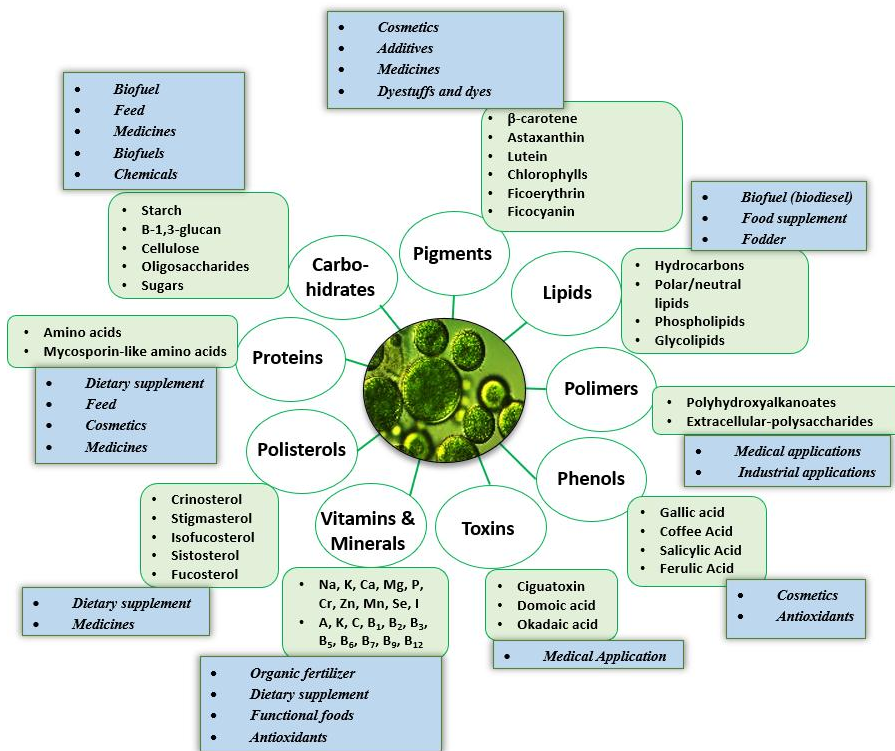
2.2 A növény–mikroorganizmus kölcsönhatások kémiai és metabolikus mechanizmusai

A mikroalgák a fotoszintetizáló mikroorganizmusok rendkívül változatos csoportját alkotják, amelybe az eukarióta mikroalgák és a prokarióta cianobaktériumok egyaránt beletartoznak. Metabolikus sokoldalúságuk és bioaktív vegyület-termelő képességük miatt egyre nagyobb figyelmet kapnak a fenntartható mezőgazdaságban és kertészetben (Khan et al., 2018; Renuka et al., 2018). A mikroalgákat biotrágyák, biostimulánsok és biopeszticidek lehetséges forrásaként vizsgálják, mivel javíthatják a növények növekedését, a tápanyagfelvételt és a stressztűrést, miközben a talaj állapotára is kedvező hatást gyakorolhatnak.

A kertészeti rendszerekben a mikroalgák több szempontból is előnyt jelenthetnek a hagyományos inputokkal szemben. Biomasszájuk nagy mennyiségben tartalmaz fehérjéket, aminosavakat, vitaminokat, pigmenteket, poliszacharidokat és fitohormonokat, amelyek közvetlenül befolyásolhatják a növények élettani folyamatait (Stirk et al., 2013; Michalak & Chojnacka, 2015). Talajba juttatva fokozhatják a mikrobiális aktivitást, a szerves szén mennyiségét és az aggregátumstabilitást, ami javíthatja a talajtermékenységet és a vízmegtartó képességet (Barone et al., 2019). A mikroalga-kivonatok levél- vagy magkezelésként több kertészeti

növényenél serkentették a csírázást, a vegetatív növekedést és a virágzást (González-Pérez et al., 2022). A biostimuláns alapú technológiákat ezért egyre inkább a mezőgazdaság fontos eszközeinek tekintik, amelyek hozzájárulhatnak a környezeti terhelés mérsékléséhez a termelékenység fenntartása mellett (Kabato et al., 2025). Korábbi vizsgálatok azt is igazolták, hogy a biostimuláns mikroalgák kedvezően befolyásolják a dísnövények vegetatív növekedését és morfológiai tulajdonságait (Németh et al., 2024b).

A *Nostoc* nemzetségbe tartozó cianobaktériumok különösen figyelemre méltók nitrogénkötő képességük, poliszacharid-kiválasztásuk és kedvezőtlen környezeti feltételekhez való alkalmazkodóképességük miatt (Yang et al., 2020; Kollmen & Strieth, 2022). Szántóföldi kísérletek megerősítették a *Nostoc piscinale* biomassza biostimuláló hatását a növénynövekedésre és a biomassza-termelésre (Takács et al., 2019). Alkalmazásuk összefüggésbe hozható a növényi növekedés fokozódásával, a tápanyagok jobb hozzáférhetőségével és az abiotikus stresszhatásokkal szembeni nagyobb ellenálló képességgel, ezért ígéretes jelöltek a fenntartható kertészeti termesztési rendszerekben történő felhasználásra (Ördög et al., 2021; Sneha et al., 2021). A 2. ábra a mikroalgák főbb metabolitsoportjait, valamint ismert ipari, mezőgazdasági és biomedicinális alkalmazásaikat mutatja be.



2. ábra: A mikroalgák főbb metabolitscsoportjai és ismert ipari, mezőgazdasági, valamint biomedicinális alkalmazásai (Forrás: Kutasi, 2023)

A mikroalga-alapú biostimulánsok az utóbbi években egyre nagyobb figyelmet kapnak az üvegházi kertészetben, mivel a növényi növekedést nem közvetlen tápanyag-utánpótlás révén, hanem bioaktív metabolitjaik közvetítésével befolyásolhatják. Az átfogó összefoglaló munkák kiemelik, hogy a *Chlorella vulgaris* az egyik leggyakrabban vizsgált faj az alkalmazott növénytermesztési rendszerekben, ami megbízható tenyésztetőségével és jól reprodukálható élettani hatásaival magyarázható (Chabili et al., 2024; Kapoore et al., 2021). Kertészeti körülmények között a Chlorella-eredetű készítmények több esetben is kedvező hatást mutattak a biomassa-felhalmozódásra és a gyökérfejlődésre (Bayona-Morcillo et al.,

2022; Gitau et al., 2021). Korábbi kísérletes eredmények a mikroalgákban és cianobaktériumokban citokinin- és auxinszerű aktivitást is igazoltak (Stirk et al., 2002), míg újabb elemzések szerint a mikroalga-kivonatok befolyásolhatják a gyökérrendszer architektúráját és a biomassza-allokáció mintázatait (Bayona-Morcillo et al., 2022; Chiaiese et al., 2018).

2.2.1 Mikroalga-alapú biostimulánsok élettani hatásai a növényekre a rizoszférában

Vizsgálatok szerint a mikroalga-kivonatok fokozhatják a klorofillszintézist, javíthatják a fotoszintézis hatékonyságát és a tápanyag-aszsimilációt, ami erőteljesebb növekedéshez és kedvezőbb esztétikai minőséghez vezethet (Plaza et al., 2018)

Dísznövényfajokon, köztük *Pelargonium* fajokon végzett kutatások arra utalnak, hogy a mikroalgákból származó készítmények kedvezően befolyásolhatják a növekedést és a fejlődést. Szabályozott termesztési körülmények között a *Chlorella*-biomassza és a cianobaktérium-biomassza alkalmazása különösen kedvezően hatottak a hajtásbiomassza alakulására, a gyökérzet fejlettségére és a stressztűrésre (Németh et al., 2026).

2.2.2 A fitohormon-szerű vegyületek szerepe a mikroba–növény kölcsönhatásokban

A mikroalgák biostimuláns hatása nagyrészt annak tulajdonítható, hogy számos olyan bioaktív metabolitot szintetizálnak és halmoznak fel, amelyek közvetlenül vagy közvetve befolyásolják a növények élettani folyamatait. A hagyományos műtrágyáktól eltérően a mikroalga-alapú készítmények nem egyszerűen tápanyag-utánpótlással hatnak, hanem összetett biokémiai kölcsönhatásokon keresztül, ezért különösen alkalmasak

lehetnek a kertészeti rendszerek finomhangolt növekedés szabályozására (du Jardin, 2015; Bulgari et al., 2019).

A mikroalgák metabolitjai – például fitohormonok, aminosavak, poliaminok, poliszacharidok, vitaminok, pigmentek és huminszerű anyagok – különböző, egymással összefüggő mechanizmusokon keresztül járulhatnak hozzá a növekedés serkentéséhez és a stressztűrés fokozásához (Stirk et al., 2013; Kapoore et al., 2021). Az *Arthrospira platensis* különösen figyelemre méltó ebből a szempontból, mivel biomasszája több olyan bioaktív komponensben gazdag, amelyek növényélettani és biostimuláns alkalmazások szempontjából is relevánsak lehetnek (Notterpek & Ördög, 2021). A *Chlamydomonas* törzsek által termelt extracelluláris poliszacharidok fontos szerepet játszhatnak a növény–mikroorganizmus kölcsönhatásokban, és hozzájárulhatnak a gyökérfejlődés, valamint a tápanyagfelvétel javulásához (Katona et al., 2018).

2.2.2.1 Mikroalgákból származó fitohormonok

Kimutatták, hogy a mikroalgák a növényi hormonok széles körét képesek szintetizálni, beleértve az auxinokat, a citokinineket, a gibberellineket, az abszcizinsavat és az etilénhez kapcsolódó vegyületeket (Tarakhovskaya et al., 2007; Stirk et al., 2002). Bár e hormonok szerepe az alga-sejtekben nem teljesen tisztázott, szerkezeti és funkcionális hasonlóságuk lehetővé teszi, hogy növényekre kijuttatva befolyásolják a növényi jelátviteli folyamatokat. A cianobaktériumok fitohormon-szerű aktivitására korai kísérletes bizonyítékok is rendelkezésre állnak, különösen a citokinszerű hatások tekintetében, ami megerősíti, hogy ezek a szervezetek nemcsak tápanyagforrásként, hanem szabályozó hatású metabolitok hordozóiként is értelmezhetők (Ördög & Pulz, 1996).

Az auxinok – különösen az indol-3-ecetsav – a mikroalga-kivonatokban leggyakrabban kimutatott hormonok közé tartoznak, és kapcsolatba hozhatók a gyökérindukció, az oldalgyökér-képződés és a sejtmegnyúlás fokozódásával (Hashtroudi et al., 2013). A citokininek elősegítik a sejtosztódást, késleltetik a levelek öregedését és támogatják a hajtásfejlődést, míg a gibberellinek elsősorban a szár megnyúlásában és a biomassza-felhalmozódásban játszanak szerepet (Ha et al., 2012; Shrestha et al., 2020). A mikroalgákban kimutatott, abszcizinsavhoz kapcsolódó vegyületek szárazság- vagy sóstressz esetén szerepet játszhatnak a stresszjelzésben és a sztómaműködés szabályozásában (Dhar et al., 2022).

Kísérleti vizsgálatok igazolták, hogy a fitohormonokban gazdag mikroalga-kivonatok több növényfajnál is javították a vegetatív növekedést és az élettani teljesítményt. A *Vicia faba* növényeken alkalmazott *Chlorella kessleri* kivonat növelte a levélfelületet, a pigmenttartalmat és a palánták vitalitását, ami a fotoszintézis és a tápanyag-asszimiláció fokozódására utal (El-Naggar et al., 2005).

2.2.2.2 Aminosavak és fehérjehidrolizátumok

Az aminosavak és fehérjehidrolizátumok a mikroalga-biomassza fontos összetevői, és jelentős szerepet játszhatnak a biostimuláns hatás kialakulásában. Számos mikroalgafaj szárazanyag-alapon 40%-ot meghaladó fehérjetartalommal rendelkezik, ezért gazdag forrása a szabad aminosavaknak és rövid peptideknek (Hempel et al., 2012). Ezek a vegyületek a növényi anyagcserében a fehérjeszintézis alapanyagai, másodlagos metabolitok prekursorai és a stresszválaszok szabályozói. A fehérjehidrolizátum-alapú biostimulánsok hatását több szerző az auxin- és

citokininszabályozás módosulásával, valamint a gyökérarchitektúra és a biomassza-eloszlás kedvező átrendeződésével hozta összefüggésbe (Colla et al., 2016).

Az aminosavakban gazdag biostimulánsok külső alkalmazásáról kimutatták, hogy javíthatják a tápanyagfelvétel hatékonyságát, serkenthetik az enzimaktivitást, és fokozhatják a növények toleranciáját a szárazság, a sóstressz vagy a hőmérsékleti szélsőségek iránt (Calvo et al., 2014; Bulgari et al., 2019). Az olyan vegyületek, mint a prolin és a glicin-betain, ozmoprotektánsként működnek, stabilizálják a sejtszerkezeteket és segítik az ozmotikus egyensúly fenntartását stresszkörülmények között (du Jardin, 2015). Egyes, fehérjehidrolizátumokból származó peptidek emellett hormonszerű aktivitást is mutathatnak, és befolyásolhatják a sejtosztódást, illetve a sejtnyúlást (Colla et al., 2017). A föld alatti biomassza összehangolt növekedése összhangban áll azokkal a modellekkel, amelyek az auxin közvetítő szerepét hangsúlyozzák a gyökérmegnyúlás és az oldalgyökérképződés szabályozásában stresszélettani helyzetekben (Raja et al., 2017; Hasanuzzaman et al., 2012).

A mikroalga-alapú aminosavkészítmények mind üvegházi, mind szabadföldi körülmények között kedvező hatást mutattak a növényi növekedésre és a termelékenységre. Alkalmazásuk javította a biomassza-felhalmozódást, a fotoszintézis hatékonyságát és a környezeti stresszhatásokkal szembeni ellenálló képességet, ezért különösen értékesek lehetnek a dísznövénytermesztésben, ahol a szabályozott növekedés és a vizuális minőség alapvető jelentőségű. A mikroalga-biomassza kezelések szántóföldi körülmények között is kedvező hatást mutattak, ami alátámasztja alkalmazhatóságukat a kontrollált termesztési rendszereken túl is (Molnár et al., 2023).

2.2.2.3 Poliszacharidok és extracelluláris polimer anyagok

A mikroalgák által termelt poliszacharidok a bioaktív vegyületek fontos csoportját alkotják, és hozzájárulhatnak a növények biostimulációjához. Ezek a makromolekulák szerepet játszanak a stresszvédelemben, a sejtszintű jelátvitelben és a talajszerkezet módosításában is. Egyes mikroalgafajok, például a *Porphyridium* és a *Dunaliella*, különösen nagy mennyiségben halmoznak fel poliszacharidokat, amelyek közvetlen és közvetett módon is befolyásolhatják a növények növekedését (Kapoore et al., 2021).

Növényekre kijuttatva a mikroalga-poliszacharidok elősegíthetik a hajtás- és gyökérfejlődést, növelhetik a levélfelületet és javíthatják a növények általános vitalitását. Az *Arthrospira platensis* poliszacharidokban gazdag kivonatának levélkezelésként történő alkalmazása például fokozta a paradicsom- és paprikanövények biomassa-termelését és levélfejlődését (El Arroussi et al., 2018).

2.2.2.4 A poliaminok, mint újonnan előtérbe kerülő szabályozók a mikroalga–növény kölcsönhatásokban

A poliaminok – köztük a putreszcin, a spermidin és a spermin – kis molekulatömegű, több pozitív töltéssel rendelkező vegyületek, amelyek részt vesznek a növényi növekedés, fejlődés és stresszválaszok szabályozásában. Egyre nagyobb figyelem irányul rájuk, mivel nem csupán növekedéssel vagy stresszel összefüggő markerek, hanem a növények élettani állapotának fontos metabolikus jelzői és szabályozói is lehetnek (Alcázar et al., 2010). A poliaminok szerepe ugyanakkor nem merül ki a növekedési folyamatok támogatásában, hanem a programozott sejthalálhoz és a

stresszhez kapcsolódó sejtszintű válaszok szabályozására is kiterjed, ami tovább erősíti jelentőségüket a stresszadaptáció értelmezésében (Moschou & Roubelakis-Angelakis, 2014).

Kimutatták, hogy a mikroalgák poliaminokat is termelhetnek és felhalmozhatnak, amelyek növényekre kijuttatva hozzájárulhatnak biostimuláns hatásukhoz. A poliaminok kapcsolatba lépnek a nukleinsavakkal, a fehérjékkel és a sejtmembránokkal, így szerepet játszhatnak a sejtek osztódásának, specializálódásának és belső oxidatív egyensúlyának szabályozásában. Külön jelentőségük, hogy anyagcseréjük szorosan összefügg a reaktív oxigénformákhoz kapcsolódó jelátviteli folyamatokkal és a hormonális szabályozással, ezért a poliaminok fontos szerepet tölthetnek be a növekedés szabályozásában és a stresszhatásokhoz való alkalmazkodásban (Moschou et al., 2012).

2.3 A dísnövények élettani válaszai a mikroalga-kezelésekre

A dísnövények mikroalga-kezelésekre adott élettani válaszainak vizsgálata fontos a biostimuláns hatások értelmezéséhez. A dísnövénykertészetben a növények teljesítményét nem kizárólag a biomassza mennyisége alapján ítélik meg, hanem olyan összetett tulajdonságok együttesen határozzák meg, mint a növekedési egyensúly, a hajtás- és gyökérfejlődés összhangja, a levélszín, a fotoszintetikus aktivitás, a stressztűrés és az általános esztétikai megjelenés. A mikroalga-alapú biostimulánsok e tulajdonságokat a növényi anyagcsere, a vízháztartás és a szabályozási folyamatok befolyásolásán keresztül módosíthatják (Bulgari et al., 2015; Plaza et al., 2018).

A hagyományos műtrágyákkal szemben, amelyek elsődlegesen a tápanyag-utánpótlást szolgálják, a mikroalga-kezelések inkább összetett

élettani alkalmazkodásokat válthatnak ki. Ezek a változások többnyire a kiegyensúlyozott növekedés, a jobb kondíció és a kedvezőtlen környezeti hatásokkal szembeni nagyobb stabilitás irányába mutatnak, ezért a dísnövénytermesztésben különösen ígéretesek lehetnek (du Jardin, 2015).

2.3.1 Az élettani válaszok jelátvitel-közvetített szabályozása dísnövényekben

A mikroalga-alapú biostimulánsok egyik leggyakrabban leírt hatása a vegetatív növekedés és a biomassa-felhalmozódás kedvező befolyásolása. Ez a hatás azonban jellemzően nem túlzott hajtásmegnyúlásban, hanem a föld feletti és föld alatti szervek közötti kiegyensúlyozottabb növekedésben nyilvánul meg (Stirk et al., 2013; Renuka et al., 2018).

Számos vizsgálat szerint a mikroalga-kezelések elősegíthetik a gyökérzet fejlődését, növelhetik a gyökérhosszt, az elágazódást és a gyökérfelületet, ami kedvezőbb víz- és tápanyagfelvétellel járhat együtt (El Arroussi et al., 2018). A fejlettebb gyökérzet tartósabb hajtásnövekedést és jobb növényi stabilitást tehet lehetővé, ami különösen fontos minőségi szempont olyan dísnövények esetében, mint a *Pelargonium* fajok. Üvegházi kísérletekben a mikroalgákból származó készítmények nagyobb friss- és száraz tömeggel, vastagabb szárral és kedvezőbb növényfelépítéssel jártak együtt a kezeletlen kontrollhoz képest (Németh et al., 2026).

A növekedési válaszok ugyanakkor rendszerint fajfüggők. A mérsékelt kezelési szintek általában kedvezőbb eredményt adnak, míg a túlzott koncentrációk csökkenthetik a hatékonyságot vagy kedvezőtlen növekedési mintázatot idézhetnek elő (Plaza et al., 2018).

2.3.2 Hatás a fotoszintézisre és a pigmentösszetételre

A fotoszintetikus működés és a levélpigmentek állapota érzékenyen jelezheti a mikroalga-alapú biostimulánsok hatását. Több vizsgálat számolt be a klorofill-*a* és klorofill-*b* koncentrációjának növekedéséről mikroalga-kezelések után, ami a fotoszintetikus kapacitás és a fényhasznosítás javulására utalhat (Andrade et al., 2023).

A mikroalga-kivonatok gyakran tartalmazznak klorofilokat, karotinoidokat, fikobiliproteineket, valamint a klorofillképződéshez szükséges mikroelemeket, például magnéziumot és vasat. Ezek az anyagok segíthetik a pigmentrendszer stabilitását és a fotoszintézis fenntartását, különösen kedvezőtlen környezeti feltételek mellett (Michalak & Chojnacka, 2015).

Dísznövények esetében a fotoszintetikus teljesítmény javulása közvetlenül összefügghet az olyan minőségi tulajdonságokkal, mint a levélszín intenzitása, az egyöntetűség és a késleltetett levélöregedés. Mikroalga-alapú biostimulánsokkal kezelt dísznövényeknél mélyebb zöld lomb-szint, nagyobb levélfelületet és kedvezőbb vizuális megjelenést figyeltek meg, ami a piaci érték szempontjából is jelentős lehet (Németh et al., 2026).

2.3.3 Vízgazdálkodási kapcsolatok és a növény vízállapota

A vízellátottság és a vízháztartás stabilitása a növényi teljesítmény meghatározó elemei, különösen a konténeres dísznövénytermesztésben, ahol a gyökértérfogat és a vízpufferelő képesség korlátozott. Irodalmi adatok szerint a mikroalga-kezelések kedvezően befolyásolhatják a növények vízállapotát a gyökér hidraulikus működésének javításán, az ozmotikus

alkalmazkodás támogatásán és a sztómaműködés szabályozása módosításán keresztül (Renuka et al., 2018; Fadiji et al., 2022).

A mikroalga-készítményekben jelen lévő aminosavak, poliaminok és poliszacharidok hozzájárulhatnak az ozmoprotekcióhoz és a membránok stabilizálásához szárazság- vagy sóstressz esetén. A prolin és a glicinbetain például segítheti a sejtek turgorának fenntartását, valamint mérsékelheti a fehérjék és membránok károsodását (du Jardin, 2015).

A mikroalga-alapú biostimulánsok hatását az oxidatív károsodás mérséklődésével is összefüggésbe hozták. Az antioxidáns enzimek aktivitásának és a redox-homeosztázisnak a módosításán keresztül ezek a kezelések hozzájárulhatnak a reaktív oxigéngyökök által kiváltott sejtkárosodás csökkentéséhez, és segíthetik az élettani működés fenntartását stressz-körülmények között (El Arroussi et al., 2018; Moschou et al., 2012).

2.3.4 Stresszélettan és alkalmazkodási válaszok mikroalga-kezelések hatására

Több összefoglaló munka hangsúlyozza a biostimuláns készítmények szerepét az abiotikus stresszhatások mérséklésében, különösen a növényi élettani stabilitás és a növekedési teljesítmény fenntartásának szempontjából (Goñi et al., 2018). A mikroalga-kezelésekre adott válaszok sok esetben olyan anyagcsere- és szabályozási folyamatok módosulásával járnak együtt, amelyek a növekedés és a stresszalkalmazkodás közötti egyensúlyt segítik fenntartani. A biostimuláns hatás ezért inkább kiegyensúlyozottabb élettani állapot kialakulásaként értelmezhető, mintsem a növekedés egyoldalú fokozásaként. Más kertészeti rendszerekben fehérjehidroliátum-alapú biostimulánssal szárazságstressz alatt is javuló teljesítményt és kedvezőbb élettani állapotot írtak le, ami azt jelzi, hogy a

biostimulánsok a stresszadaptáció stabilizálásának fontos kiegészítő eszközei lehetnek (Francesca et al., 2021).

Ebben az összefüggésben a poliaminok kiemelt jelentőségűek lehetnek, mivel kapcsolatban állnak a sejtsztódással, a membránstabilitással és a reaktív oxigéngyökökhöz kötődő jelátviteli folyamatokkal. A mikroalga-kezelésekhez társuló poliaminprofil-változások ezért inkább az élettani állapot módosulásának jelzőiként értelmezhetők, mintsem közvetlen, egyirányú stressz- vagy növekedési markerként (Alcázar et al., 2010).

Ez összhangban áll azokkal a dísnövénykísérletekben tett megfigyelésekkel, amelyek szerint a kedvezőbb növekedési stabilitás és a jobb stressztűrés anélkül is megjelenhet, hogy egyetlen paraméterben szélsőséges változás lenne mérhető.

2.4 A biostimuláns kezelésekhez kapcsolódó lehetséges metabolit válaszok

A mikroalga-alapú biostimuláns kezelésekhez kapcsolódó élettani válaszok háttérében metabolit-szintű szabályozási folyamatok is állhatnak, beleértve a génexpresszió, az RNS-anyagcsere és a jelátviteli hálózatok változásait. A szakirodalomban ugyanakkor ez a terület még jóval kevésbé feltárt, mint a morfológiai vagy biokémiai hatások vizsgálata. A rendelkezésre álló eredmények inkább arra utalnak, hogy a biostimulánsok által kiváltott, növekedéssel és stresszválaszokkal összefüggő hatásokat transzkripciós és poszttranszkripciós szabályozási folyamatok is kísérhetik (Bulgari et al., 2015; Chiaiese et al., 2018).

2.4.1 A mikrobiális és mikroalga-alapú biostimulánsok általános hatásmodjai

Az RNS-anyagcsere a növényi szabályozás egyik központi szintje, amely összekapcsolja a környezeti ingerek érzékelését az élettani alkalmazkodással. A transzkriptumok mennyiségének, az RNS stabilitásának és a transláció hatékonyságának változásai lehetővé teszik, hogy a növények gyorsan alkalmazkodjanak a külső hatásokhoz, köztük a biostimuláns kezelésekhez is (Matsui et al., 2019).

A mikroalga-alapú biostimulánsok várhatóan nem közvetlen genetikai beavatkozás révén hatnak, hanem bioaktív összetevőik közvetítésével módosíthatják az intracelluláris jelátviteli folyamatokat. A fitohormonok, poliaminok és aminosavak olyan szabályozási kaszkádokra hathatnak, amelyek végső soron befolyásolhatják a sejtsztódáshoz, a fotoszintézishez, az antioxidáns védelemhez és a stresszválaszhoz kapcsolódó gének működését. Az ilyen változások azonban többnyire átmenetiek és erősen környezetfüggők. (Matsui et al., 2019; Bulgari et al., 2015).

A biostimulánsokra adott RNS-szintű válaszok értelmezésénél ezért indokolt az óvatos megközelítés. A rendelkezésre álló eredmények alapján a mikroalga-alapú kezelések inkább a növényi anyagcsere finom szabályozóinak tekinthetők, nem pedig olyan tényezőknek, amelyek nagyléptékű és egyirányú átprogramozódást idéznek elő. Ugyanakkor több kultúrnövényenél is kimutatták, hogy a mikroalga-alapú kezelések szignifikánsan befolyásolták a növekedési és fejlődési paramétereket (Khan et al., 2009).

2.4.2 A biostimulánsok hatása a növényi növekedésre és a biomassza eloszlására

A fitohormonok a mikroalga-metabolitok és a növényi szabályozás közötti egyik legfontosabb kapcsolódási pontot jelentik. Az auxinok, citokininek, az abszcizinsav és az etilénhez kapcsolódó jelátviteli útvonalak közismerten szerepet játszanak azoknak a szabályozási hálózatoknak a működésében, amelyek a növekedést, a fejlődést és a stresszválaszokat irányítják (Verbon & Liberman, 2016; Aloo et al., 2023).

A mikroalgákból származó hormonszerű vegyületek és hormonprekursorok befolyásolhatják az endogén hormonháztartást, ami együtt járhat a hormonérzékeny gének működésének módosulásával. Az auxinhoz kapcsolódó útvonalak például a sejtmegnyúlásban, a gyökérarchitektúra kialakításában és az edénynyalábok differenciálódásában részt vevő folyamatokkal állnak kapcsolatban, míg a citokininek a sejtciklushoz és az öregedés szabályozásához kötődnek (Ha et al., 2012; Shrestha et al., 2020).

2.4.3 A biostimulánsok által kiváltott stressztűrési mechanizmusok erősödése

A poliaminok sajátos helyet foglalnak el a metabolit szintű szabályozás és az élettani válaszok határterületén. A putreszcin, a spermidin és a spermin több sejt szintű folyamatban vesz részt, beleértve a DNS stabilizálását, az RNS-hez kapcsolódó folyamatokat, a transzláció szabályozását és a redox-homeosztázist (Moschou et al., 2012). Mindez azért különösen lényeges, mert a reaktív oxigéngyökök kettős szerepet töltenek be a növényi rendszerben: egyrészt jelzőmolekulák, másrészt túlzott

felhalmozódásuk sejtkárosodást idézhet elő, ezért a redox-homeosztázis fenntartása a stressztűrés egyik kulcseleme (Dumanović et al., 2021).

A poliaminok nukleinsavakkal és riboszómákkal kölcsönhatásba lépve befolyásolhatják a transzkripció hatékonyságát, az RNS stabilitását és a fehérjeszintézist. A poliamin-anyagcsere változásai ezért összefüggésbe hozhatók a génexpresszió finom szabályozásával anélkül, hogy ehhez feltétlenül nagymértékű transzkripciós eltolódás társulna (Alcázar et al., 2010).

2.4.4 A biostimulánsok hatása a növények élettani és biokémiai válaszaira

A reaktív oxigéngyökök fontos szerepet játszanak a növények stresszválaszaiban és fejlődési folyamataiban. Szabályozott képződésük jelátviteli funkciót tölthet be, míg túlzott felhalmozódásuk oxidatív károsodáshoz vezethet. A mikroalga-alapú biostimulánsok hatását az antioxidáns rendszer működésével és a redoxfolyamatok szabályozásával is összefüggésbe hozták (El Arroussi et al., 2018).

2.4.5 A dísnövénytermesztés szempontjából releváns biostimuláns hatások összegzése

Összességében a mikroalga-alapú biostimulánsok nem egyetlen útvonalon, hanem egymással összefüggő jelátviteli és anyagcsere-folyamatok komplex szabályozásán keresztül hatnak, hozzájárulva a kiegyensúlyozott növekedéshez, a javuló fotoszintézishez és a fokozott stressztűréshez (Bulgari et al., 2015; Chiaiese et al., 2018), ezek együttesen járulhatnak hozzá az olyan kedvező növényi válaszokhoz.

Ez az összetett hatásmód különösen fontos lehet dísnövényeknél, ahol a stabil növekedés, az egyöntetű megjelenés és a stressztűrés gyakran fontosabb a maximális növekedési ütemnél. A metabolit-szintű folyamatok ebben finom szabályozási réteggént értelmezhetők, amelyek elősegítik a mikroalga-eredetű jelek élettani válaszokká alakulását. A legújabb közlemények szerint a mikroalga-alapú biostimulánsok hatása több bioaktív vegyület – például hormonhatású metabolitok, peptidek, aminosavak, poliszacharidok és antioxidánsok – együttes működésének eredménye (Brito-Lopez et al., 2025; Vangenechten et al., 2025).

A fent ismertetett élettani, biokémiai és lehetséges metabolit-szintű összefüggések a következő fejezetekben bemutatott kísérleti eredmények értelmezéséhez szolgálnak háttérként. A jelen doktori (PhD) értekezés célja annak vizsgálata, hogy a mikroalga-alapú kezelésekhez kapcsolódó fenotípusos változások milyen élettani és feltáró jellegű biokémiai eltérésekkel hozhatók összefüggésbe, és ezek miként járulhatnak hozzá a dísnövények fokozott növekedésének és teljesítményének értelmezéséhez.

3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

3.1 Kísérleti rendszer, növényi anyag és környezeti monitoring

A Széchenyi István Egyetem Albert Kázmér Mosonmagyaróvári Karának Növénytudományi Tanszéke ad otthont a Mosonmagyaróvári Algagyűjteménynek (Mosonmagyaróvár Algal Culture Collection, MACC), valamint a mikroalga-alapú biostimulánsok előállításához, előkészítéséhez és alkalmazásához szükséges laboratóriumi és üvegházi infrastruktúrának. A MACC laboratórium a 3. ábrán látható.



3. ábra: A MACC laboratóriumi gyűjteménye (Forrás: saját felvétel)

A kísérletekhez a Mosonmagyaróvári Algagyűjteményből származó MACC-612 (*Nostoc piscinale*) és MACC-922 (*Chlorella vulgaris*) törzseket használtuk. A törzskultúrákat a gyűjtemény rutinszerű fenntartási és szaporítási protokollja szerint kezeltük. A törzstenyészeteket agarral

szilárdított táptalajon, 15 ± 2 °C-on, gyenge megvilágítás mellett tartottuk fenn, míg a kísérleti tenyészeteket a taxonómiai csoportnak megfelelő folyékony tápközegben indítottuk el (cianobaktériumok: Zehnder-8 vagy BG-11; Chlorophyta/Charophyta: Tamiya vagy Bristol). A tenyésztést szabályozott körülmények között végeztük (6. ábra): 25 ± 2 °C-on, 12:12 órás világos/sötét periódus mellett, megközelítőleg $130 \mu\text{mol foton/m}^2 \cdot \text{s}$. fényintenzitáson, folyamatos steril levegőztetéssel, valamint a világos periódusban 1,5% CO₂-dúsítással, 10 mg/l· száraanyag-koncentrációról indulva. A tenyészeteket a növekedés állandósult szakaszában szüreteltük le, ami a törzstől függően általában 8–21 nap után következett be.

A biomasszát centrifugálással gyűjtöttük össze (2150×g, 15 perc, szobahőmérsékleten; Sigma 6 K15, Sigma Laborzentrifugen GmbH, Németország) majd fagyasztva szárítottuk (Christ Gamma 1-15, Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH, Németország), és felhasználásig –18 °C-on tároltuk. A kezelésekhez a fagyasztva szárított biomasszát desztillált vízben reszuszpendáltuk, homogenizáltuk, majd 3 percig ultrahanggal kezeltük (VirTis VirSonic 600 Ultrasonic Cell Disruptor, SP Scientific, USA). A kísérletekben alkalmazott biomassa szuszpenzió koncentrációját 1 g/l-re állítottuk be. A törzseket szabályozott laboratóriumi körülmények között tenyésztettük, és a biomasszát szüretelés, feldolgozás, valamint szállítás során aseptikusan kezeltük, ugyanakkor az axenitást, azaz a baktériummentességet ebben a vizsgálatban nem ellenőriztük formális mikrobiológiai módszerekkel.

A növénykísérleteket Bősárányban (Győr-Moson-Sopron megye, Magyarország; 47.690455, 17.251585) elhelyezkedő, hozzávetőleg 300 m² alapterületű fóliasátorban végeztük (4. ábra). A helyszín és az infrastruktúra megválasztásának célja az volt, hogy a kísérleteket gyakorlati

dísznövénytermesztési körülmények között, ugyanakkor több egymást követő évben, azonos általános technológiai keretek között lehessen megismételni.



4. ábra: Kísérleti terület (Forrás: Google Maps)

A vizsgálatot három egymást követő termesztési évben, 2023-ban, 2024-ben és 2025-ben állítottuk be. A kiültetésre minden évben a 8. naptári hét pénteki napján került sor, összhangban a kereskedelmi dísznövénytermesztés szokásos ütemezésével. A növényeket az átültetést követő 42. napon vetettük a végponti vizsgálatok alá, közvetlenül az értékesítési állapot elérésekor. Ennek megfelelően a termesztési periódusok 2023-ban 2023.

február 24. és 2023. április 7., 2024-ben 2024. február 23. és 2024. április 5., míg 2025-ben 2025. február 21. és 2025. április 4. közé estek. Az egyes környezeti mérésekre megadott összesítések minden esetben ezekre a 42 napos periódusokra vonatkoztak.

A jelen vizsgálathoz két, korábbi tanszéki kutatási eredmények alapján kiválasztott, eltérő funkcionális csoportot képviselő mikroalga-törzset használtunk. A kezelések jelölését a 2. táblázat foglalja össze; a T a kezelt, a K a kezeletlen kontroll növényeket jelöli.

ID.	MACC	Alga neve	Alga Típusa
T1	612	<i>Nostoc piscinale</i>	Cianobaktérium
T2	922	<i>Chlorella vulgaris</i>	Zöldalga
K	Kontroll	N/A	N/A

2. táblázat: Az MACC-ból kiválasztott mikroalga-törzsek

A kísérleti növények kiválasztásakor arra törekedtünk, hogy kereskedelmi forgalomban elérhető, gyakorlati jelentőségű dísnövényfajtákat használjunk. A mikroalga-alapú kezelések hatását három, kereskedelmi szempontból jelentős *Pelargonium* habituscsoporton vizsgáltuk: az álló (zonale típus), a futó (peltatum típus) és a félfutó (interspecifikus hibridek) muskátlikon. E csoportok botanikai háttere régóta ismert (L'Héritier, 1787–1788). Az alkalmazott növényfajtákat a 3. táblázat mutatja be.

ID.	Típus	Kereskedelmi név
A	<i>Zonale</i>	Andria TM
B	<i>Zonale</i>	Savanna Realy Red TM
C	<i>Peltatum</i>	Great Balls Of Fire TM
D	<i>Peltatum</i>	Atlantic Dark Red TM
E	<i>Hibrid</i>	Classic Single Villa Paris Lilac TM
F	<i>Hibrid</i>	Classic Single Villa Dresden TM

3. táblázat: A kísérletekben alkalmazott *Pelargonium* fajták

Minden termesztési évben minden fajta $\times$ kezelés kombinációban 10 növényt állítottunk be. Ez évente összesen 180 kísérleti egységet jelentett:

$$10 \text{ növény} \times 3 \text{ kezelés} \times 6 \text{ fajta} = 180 \text{ növény/év}$$

A destruktív méréseket fajta $\times$ kezelés $\times$ év bontásban, kombinációnként $n = 6$ növényből álló részhalmazon végeztük. A vizsgált növényeket véletlenszerűen választottuk ki azok közül az egyedek közül, amelyeken a hosszú távú, nem destruktív méréseket a kísérlet teljes időtartama alatt, az árusítás megkezdéséig elvégeztük. A kezelési mátrixot a 4. táblázat szemlélteti.

MACC 612	MACC 922	Kontroll
AT1	AT2	AK
BT1	BT2	BK
CT1	CT2	CK
DT1	DT2	DK
ET1	ET2	EK
FT1	FT2	FK

4. táblázat: Kísérleti kezelési mátrix

A kísérleti elrendezés alapján a mikroalga-alapú kezelések hatásának értékelésére morfológiai, élettani és vizuális paramétereket jelöltünk ki. A nem destruktív mérések közé tartozott a növénymagasság, a levélszám és a bimbószám. A klorofilltartalmat laboratóriumi körülmények között határoztuk meg. A destruktív mintavétellel nyert mérések közé tartozott a gyökérhossz, a gyökérnyaki átmérő, a friss növénytömeg, a friss gyökértömeg és a száraz növénytömeg. Emellett a növényeket rendszeresen ellenőriztük rendellenességek, fitotoxicitási tünetek és egyéb, nem kívánt kezeléshez kapcsolódó hatások szempontjából. Az 5. ábrán látható a 3 kísérleti alany az ültető közeg lemosásos eltávolítása után.



5. ábra: A termesztőközeg eltávolítása és lemosása után, a destruktív feldolgozás előtt álló növények

3.1.1 Biostimuláns mikroalgák kijuttatása és az adatgyűjtés végrehajtása

A 6 *Pelargonium* fajtát képviselő, egységes minőségű, kereskedelmi forgalomban (Beppler Kft., Magyarország) gyökereztetett vegetatív dugványokat Teku VCG cserepekbe (Ø120 mm; 0,69 L) ültettük tőzegalapú termesztőközegbe. A növényeket Hawita™ Uni 20-II termesztőközegben neveltük (Hawita Gruppe GmbH, Németország), amelyet a cserepek feltöltése előtt csapvízzel előnedvesítettünk. A termesztőközeghez 3

g L⁻¹ dózisban tartós hatású műtrágyát (Osmocote™ Exact High K, ICL Specialty Fertilizers, Hollandia) kevertünk, majd az ültetés előtt keverőasztalon homogenizáltuk kézi keveréssel.

Az öntözést a teljes termesztési időszak alatt a környezeti feltételekhez igazítva végeztük csapvíz felhasználásával. Hűvösebb, borult időszakokban heti 1–2 alkalommal, míg meleg, napos és szeles időjárási körülmények között napi 1–2 alkalommal történt öntözés (1 alkalom ~300l az egész területen). A közegbe kevert tartós hatású műtrágya mellett a tápanyag-utánpótlást Dosatron (Dosatron International S.A.S., Franciaország) arányos tápoldat-bekeverő rendszerrel szabályoztuk. Az átültetést követő első két hétben foszfor túlsúlyos tápoldatot alkalmaztunk (N:P:K = 15:30:15) a kezdeti gyökeresedés elősegítésére. Ezt a 3–4. héten nitrogén túlsúlyos összetétel követte a vegetatív fejlődés támogatása érdekében. Az 5. héttől az árusításig kálium túlsúlyos tápoldatot használtunk a növények szilárdságának és általános minőségének javítására.

A tápoldat pH-ját 5,8 értéken tartottuk. Az EC (Electric conductivity, vezetőképesség) szintet kezdetben 1,5 mS/cm· értékre állítottuk be, majd a növények igényének növekedésével fokozatosan 2,0 mS/cm-re emeltük. A kiindulási öntözővíz EC-értéke 0,3 mS/cm· volt. A tápoldat pH-jának 5,8-on tartásához 2000 l öntözővízhez 0,2 l 65%-os salétromsavat adtunk. A tápoldat pH-ját Agrár 2000 pH-mérővel, az EC-értéket GroLine HI98331 EC-mérővel ellenőriztük.

A mikroalga-kezeléseket az átültetés időpontjában, egyszeri alkalommal alkalmaztuk. A kezelő szuszpenziókat minden termesztési szezonban azonos eljárással, frissen készítettük el.

Növényenként 1 ml, 1 g/l koncentrációjú biotermék szuszpenziót juttattunk közvetlenül a gyökérnyaki zónába fecskendő segítségével (lásd 6. ábra).



6. ábra: A biotermék biotermék közvetlen kijuttatása a rizoszférába

A kontroll növények ugyanezzel az eljárással 1 ml desztillált vizet kaptak. A kijuttatási dózis egységességét a biotermék gravimetriás meghatározásával biztosítottuk, hogy az egyes évek között is azonos szervesanyag-alapú dózis kerüljön alkalmazásra. A kísérletet teljesen randomizált faktoriális elrendezésben állítottuk be, az alábbi faktorokkal:

- kezelés: 3 szint (kontroll, MACC-612, MACC-922)
- fajta: 6 szint (A–F)
- év: 3 szint (2023, 2024, 2025)

A növényeket minden szezon elején a fóliasátorban véletlenszerű, vegyes elrendezésben helyeztük el a helyzeti torzítás mérséklése érdekében. A fajta- és kezelés kombinációkat a termesztőtérben elszórtan osztottuk el, blokkszerkezet alkalmazása nélkül. Az egyes szezonok között újrarandomizálást végeztünk, azonban az adott termesztési éven belül a növények helyét nem változtattuk.

3.1.2 A növekedési és fejlődési paraméterek hosszú távú monitorozása

A mikroalga-alapú biostimuláns kezelésekre adott növényi válaszok időbeli dinamikájának értékelésére a teljes termesztési időszak során ismételt, nem destruktív méréseket végeztünk ugyanazon kísérleti egységeken. Ez a megközelítés lehetővé tette, hogy ne csupán egyetlen időpont állapotát, hanem a fejlődési tendenciákat is értékeljük.

A kísérleti időszak alatt ismételten rögzített nem destruktív paraméterek a következők voltak:

- növénymagasság,
- teljesen kifejlődött levelek száma,
- bimbók száma.

A növénymagasságot szabványosított mérési protokoll szerint, a gyökérnyaktól az apikális merisztémáig mértük. A levélszám meghatározásakor a teljesen kifejlett leveleket vettük figyelembe, az öregedő szövetek kizárásával. A bimbószámot a generatív fejlődés és a díszítőérték egyik mutatójaként rögzítettük. A levél- és bimbóparaméterek felvétele azért is indokolt volt, mert korábbi eredmények szerint a mikroalga- és cianobaktérium-kivonatok befolyásolhatják a növekedést és a szervképződést magasabb rendű növények szövettanában is (Molnár és Ördög, 2005a).

A méréseket közvetlenül az ültetés után kezdtük meg, majd előre meghatározott időközönként ismételtük. A teljes termesztési időszak során ugyanazokat a növényeket követtük, hogy a kezeléseken belüli időbeli összehasonlítás lehetővé váljon. A záró időpontban rögzített mérések közé a friss növénytömeg, a száraz növénytömeg, a friss gyökértömeg, a gyökérhossz és a gyökérnyaki átmérő tartozott.

A növények általános megjelenését a teljes termesztési időszak során ötfokozatú vizuális bonitálással is követtük. Mivel azonban az értékelés sorrendi (ordinális) jellegű volt, és a pontozási rendszer felbontása korlátozott maradt, az így kapott adatokat nem tekintettük kellően érzékenynek a részletes statisztikai elemzéshez. A bonitálási eredményeket ezért a jelen fejezetben csak kiegészítő, leíró jellegű megfigyelésként vettük figyelembe. A fejezet további részében ennek megfelelően a hangsúlyt a legerősebb bizonyító erejű végpontokra helyezzük, és a kiegészítő adatok értelmezését ehhez igazítjuk.

3.1.3 A környezeti paraméterek monitorozása

A környezeti háttér figyelembevétele a többéves kertészeti kísérletek értelmezésének fontos része, mivel a hőmérséklet, a fény- és vízellátottság, valamint az ezekkel összefüggő termesztési feltételek jelentősen befolyásolhatják a növényi növekedést és az élettani válaszokat (Taiz et al., 2023; Poorter et al., 2012). Fóliasátorban a mikroklíma a külső időjárási viszonyoktól függően számottevően változhat, ezért a környezeti háttér dokumentálása a lehetőségekhez mérten jelen vizsgálatban is indokolt volt (Neufeld & Chapin, 1999)

A környezeti viszonyok jellemzéséhez helyszíni megfigyeléseket és külső meteorológiai adatforrásokat egyaránt felhasználtunk. A

hőmérsékleti viszonyokat a termesztési időszak során üzemszerűen nyomon követtük, és a szezonális értelmezéshez regionális meteorológiai adatsorokat is figyelembe vettünk. A csapadékviszonyokat közeli meteorológiai állomások adatai alapján jellemeztük.

A relatív páratartalmat a termesztés során üzemszerűen ellenőriztük a szélsőséges körülmények elkerülése érdekében, ugyanakkor erről nem állt rendelkezésre teljes, folyamatosan rögzített, írásos adatsor. Ennek megfelelően a páratartalmi viszonyokat a dolgozatban nem önálló, nagy felbontású mérési adatsorként, hanem a termesztési háttér részeként értelmeztük.

A környezeti adatok elsődleges célja az volt, hogy a különböző termesztési évek háttérét dokumentálják, és segítsék az évjáratí eltérések értelmezését. Ezeket az információkat nem a kezeléshatások közvetlen ok-sági bizonyítására, hanem a biológiai eredmények kontextusba helyezésére használtuk, ami többéves vizsgálatok esetében különösen fontos (Poorter et al., 2012; Piepho et al., 2003).

3.1.4 Végponti mérések

A végponti, azaz destruktív mintavételt fajta $\times$ kezelés $\times$ év kombinációként előre meghatározott, $n = 6$ növényből álló részhalmazon végeztük. E korlátozásra a gyökérzet lemosásának, a növényi szervek elkülönítésének és a tömegmérések előkészítésének munkaigényes jellege miatt volt szükség, mivel csak így lehetett megbízhatóan elkerülni a mechanikai sérülést és a növényi részek összekeveredését, amelyek torzíthatták volna a biomassa- és morfológiai végpontokat.

A destruktív mintavételre minden kísérleti ciklus végén, a növények teljesen kifejlődött, kereskedelmi szempontból értékesíthető

állapotában került sor. Ez a megközelítés biztosította, hogy a termesztési ciklus végén mért paraméterek ne csupán az élettani fejlettséget, hanem a gyakorlati dísznövénytermesztés szempontjából releváns teljesítményt is tükrözzék (Poorter et al., 2012; Bulgari et al., 2015).

A következő destruktív mintavétellel nyert paramétereket rögzítettük:

- végső növénymagasság,
- gyökérhossz,
- gyökérnyaki átmérő,
- friss növénytömeg,
- friss gyökértömeg,
- száraz növénytömeg.

A végső növénymagasságot a gyökérnyaktól az apikális merisztémáig mértük. A gyökérzetet a gyökérhossz meghatározása előtt gondosan lemostuk, hogy eltávolítsuk az ültetőközeg maradványokat. A gyökérnyaki átmérőt digitális tolómérővel határoztuk meg (Mitutoyo ABSOLUTE digitális tolómérő, Mitutoyo Corporation, Japán) a szár szilárdságának és szerkezeti fejlettségének jellemzésére.

A friss növénytömeget és a friss gyökértömeget közvetlenül a növények szétválasztása után, 0,01 g-os precíziós mérlegen (KL-i2000 típusú elektronikus precíziós mérleg, $500 \times 0,01$ g kapacitás, ZOLA, Kína) mértük. A növényi mintákat ezt követően 105 °C-on állandó tömegig szárítottuk (Memmert UF110, Németország) majd megmértük a száraz növénytömeget a fent említett precíziós mérleg segítségével. A száraz tömeg mérése széles körben alkalmazott módszer a biomassza-eloszlás és a kezelések kumulatív hatásainak értékelésére növekedési vizsgálatokban (Neufeld & Chapin, 1999; Poorter et al., 2012).

A záró időpontban rögzített adatokat a hosszú távú növekedési és élettani mérések eredményeivel együtt értékeltük, hogy átfogó képet kapjunk a kezelések hatásairól. A 7. ábra mutatja be a tömegméréseket lemosás után, majd a szárítást követően



7. ábra: Tömegmérések a lemosás után, majd a szárítást követően (forrás: saját felvétel).

3.2 Levélpigment-tartalom meghatározása

A klorofilltartalmat a fotoszintetikus teljesítmény és a növényi vitalitás egyik fontos élettani indikátoraként határoztuk meg. A klorofillméréseket széles körben alkalmazzák növényélettani és kertészeti

vizsgálatokban a kezelések levélműködésre és az általános növényállapotra gyakorolt hatásának értékelésére (Lichtenthaler & Buschmann, 2001; Poorter et al., 2012).

A levélmintákat a kísérleti időszak során előre meghatározott időpontokban, teljesen kifejlődött, egészséges levelekből gyűjtöttük a növényen belüli variabilitás mérséklése érdekében. A klorofilltartalmat laboratóriumi körülmények között, bevált extrakciós protokoll alapján határoztuk meg.

A friss levélszövetet szerves oldószerben homogenizáltuk, majd a pigmenteket 80% (v/v) aceton felhasználásával vontuk ki gyenge megvilágítás mellett, a lebomlás elkerülése érdekében. Az extraktumokat centrifugálással tisztítottuk, majd az abszorbanciát spektrofotométerrel mértük. A klorofill-*a*, a klorofill-*b* és az összes karotinoid mennyiségét a 662, 644 és 440,5 nm-en mért abszorbanciaértékekből számítottuk, 720 nm-en a zavarosságra korrigálva. A pigmenttartalom számításához alkalmazott egyenletek összefoglalását a 8. ábra szemlélteti, amelyek alapján a klorofill-*a*, a klorofill-*b* és az összes karotinoid mennyiségét a megfelelő hullámhosszakon mért abszorbanciaértékekből határoztuk meg. (Wellburn, 1994).

Chlorophyll <i>a</i> (mg L ⁻¹)
$\text{Chl } a = 9.78 \cdot (A_{662} - A_{720}) - 0.99 \cdot (A_{644} - A_{720})$
Chlorophyll <i>b</i> (mg L ⁻¹)
$\text{Chl } b = 21.4 \cdot (A_{644} - A_{720}) - 4.65 \cdot (A_{662} - A_{720})$
Total carotenoids (mg L ⁻¹)
$\text{Car} = 4.695 \cdot (A_{440.5} - A_{720}) - 0.268$
$[5.13 \cdot (A_{662} - A_{720}) + 20.41 \cdot (A_{644} - A_{720})]$
Conversion to mg g ⁻¹ fresh weight
$\text{Pigment (mg g}^{-1}\text{)} = \frac{C \cdot V}{1000 \cdot \text{FW}}$
where:
C = pigment concentration (mg L ⁻¹)
V = extract volume (mL)
FW = fresh weight of sample (g)
Conversion to mg g ⁻¹ fresh weight
Pigment concentrations were converted to fresh weight basis using:
$\text{Pigment} = \frac{\text{mg g}^{-1} 14}{1000 \cdot 0.1}$

8. ábra: A pigmentek mennyiségi meghatározásához alkalmazott egyenletek (Forrás: Lichtenthaler, H. K., 1987)

Ez a módszer megbízható mennyiségi információt szolgáltat a pigmentkoncentrációról, és a dísnövények élettani vizsgálataiban standard eljárásnak tekinthető (Lichtenthaler & Buschmann, 2001; Bañón et al., 2006). A klorofillméréseket három egymást követő kísérleti szezonban (2023, 2024 és 2025) végeztük. A mintavételi és analitikai eljárások minden évben azonosak voltak annak érdekében, hogy az adatok összehasonlíthatósága biztosított legyen.

3.3 Metabolit-alapú mintavétel és kiegészítő analízis

3.3.1 Növényyszövet-mintavétel metabolit vizsgálatokhoz

A mikroalga-alapú kezelésekhez kapcsolódó kiegészítő metabolit-szintű megfigyelések megalapozására növényyszövet-mintákat gyűjtötünk. A mintavétel a fiatal, teljesen kifejlődött levelekre összpontosult, mivel ezek metabolikusan aktív szövetek, és érzékenyen reagálhatnak a környezeti és kezelési hatásokra. A levélmintákat előre meghatározott időpontban gyűjtöttük, majd azonnal folyékony nitrogénben fagyasztottuk és $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on tároltuk a további feldolgozásig. A gyors fagyasztás célja a minták metabolikus állapotának minél pontosabb megőrzése és a mintavételt követő változások minimalizálása volt, összhangban a növényi metabolit vizsgálatok általános módszertani ajánlásaival. (Rio et al., 2010). A mintavétel és a minták előkészítésének főbb lépéseit a 9. ábra szemlélteti.



9. ábra: Mintagyűjtés klorofillmeghatározáshoz és metabolit-alapú vizsgálatokhoz

A metabolit célú mintavételt kizárólag a 2025. évi kísérleti szezonban végeztük. A mintákat a növények végponti, teljesen kifejlődött állapotában gyűjtöttük, hogy az esetleges metabolit-szintű eltérések a végső élet-tani és morfológiai eredményekkel összefüggésben legyenek értelmezhe-tők.

3.3.2 Metabolit minták előkészítése és minőségellenőrzése

A metabolit vizsgálatokhoz felhasznált növényi minták előkészíté-sét olyan, növényi szövetekre optimalizált extrakciós és tisztítási eljárások szerint végeztük, amelyek alkalmasak a poliszacharidok és fenolos vegyü-letek zavaró hatásának mérséklésére, mivel ezek befolyásolhatják a to-vábbi analitikai lépések megbízhatóságát. A minta-előkészítést kereske-delmi forgalomban elérhető, növényi minták feldolgozására alkalmas rea-gens- vagy oszlopalapú rendszerekkel végeztük a gyártói előírások és a bevált módszertani ajánlások szerint (Chang et al., 1993; Rio et al., 2010).

A minták minőségét és felhasználhatóságát spektrofotometriás el-lenőrzéssel, valamint kiegészítő minőségvizsgálati lépésekkel értékeltük. A további vizsgálatokhoz csak azokat a mintákat vettük figyelembe, ame-lyek megfeleltek az előre meghatározott minőségi szempontoknak. Ez a lépés alapvető fontosságú a metabolit vizsgálatok megbízhatóságának és reprodukálhatóságának biztosításához (Bustin et al., 2009).

3.3.3 A metabolit minták fogalmi integrációja az élettani mérésekkel

A 2025. évi záró mérési mintavétel során gyűjtött metabolit mintá-kat nem önálló értelmezési szintként, hanem az ugyanabban a kísérleti idő-szakban mért fenotípusos és élettani paraméterek kiegészítő háttéréként kezeltük. A metabolit mintavétel célja az volt, hogy a mikroalga-alapú

kezelésekhez kapcsolódó növényi válaszokat tágabb biológiai összefüggésben lehessen értelmezni, különös tekintettel a fenotípusos eltérések lehetséges élettani és metabolikus hátterére.

Ez a megközelítés összhangban áll a növényi biostimuláns kutatások jelenlegi ajánlásaival, amelyek szerint a metabolit-szintű megfigyeléseket nem önálló végpontként, hanem élettani és fejlődési összefüggésekben célszerű értelmezni (Bulgari et al., 2015; Chiaiese et al., 2018).

Ennek megfelelően az egyes analitikai adatsorokat nem elkülönült mintakészletként, hanem ugyanazon végponti növényi állapot különböző metabolit-szintű leírásaként értelmeztük. A hormon- és fenolvegyület-panel adatait nem önálló, megerősítő végpontként, hanem a fenotípusos és élettani eredmények mechanisztikus értelmezését támogató, feltáró jellegű kiegészítő információként kezeltük.

A kiegészítő hormon-, illetve fenolvegyület-panel vizsgálatok feltáró, hipotézisgeneráló jelleggel történtek. A vizsgálat korlátozott terjedelme és mintaszáma miatt az ebből származó információkat nem önálló következtető eredményként, hanem kiegészítő, leíró jellegű megfigyelésként értelmeztük.

3.4 A hosszú távú adatsorok statisztikai elemzése

A statisztikai elemzések célja annak értékelése volt, hogy a mikroalga-alapú kezelések miként befolyásolják a növények növekedését és egyes élettani paramétereit a vizsgált években. A kísérletben ismételt, nem destruktív mérések, valamint egyszeri, záró időpontban mért eredményei egyaránt szerepeltek, ezért az adatszerkezethez igazodó elemzési eljárásokat alkalmaztunk.

Az adatok rendszerezését és előfeldolgozását Microsoft Excel LTSC Professional Plus 2021 - 2602 (build 16.0.19725.20126) (Microsoft Corporation, USA) környezetben végeztük, míg a komplexebb statisztikai elemzésekhez Minitab® 2023 21.4.2 (64-bit) szoftvert (Minitab LLC, USA) használtunk. A következtető statisztikai vizsgálatokat megelőzően feltáró adatellenőrzést hajtottunk végre az adatszerkezet, az esetleges kiugró értékek és a varianciahomogenitás áttekintése érdekében.

3.4.1 Az adatszerkezet és az előfeldolgozás

A mért változók közé tartoztak az ismételten rögzített, nem destruktív növekedési paraméterek (növénymagasság, levélszám, bimbószám), az élettani jellemzők (levélpigment-tartalom), valamint az egyszeri, destruktív mintavétellel nyert változók (végső növénymagasság, gyökérhossz, gyökérnyaki átmérő, friss növénytömeg, friss gyökértömeg, száraz növénytömeg).

A környezeti adatokat nem kísérleti tényezőként, hanem értelmezési háttérként kezeltük. A 2025. évi záró időpontban végzett mintavételből származó kiegészítő metabolit információkat külön, feltáró jellegű adatcsoportként kezeltük, és a korlátozott mintaszám miatt nem vontuk be a következtető statisztikai elemzésekbe.

3.4.2 Statisztikai elemzés

Az időben ismételten rögzített növekedési és élettani változókat lineáris vegyes hatású modellekkel elemeztük, míg a destruktív mintavételből származó végponti változókat faktoriális általános lineáris modellel értékeltük. Az ismételt mérések elemzésében a kezelés, a fajta, az év és az idő fix hatásként, az egyedi növények pedig véletlen hatásként szerepeltek

annak érdekében, hogy kezeljük az ismételt mérésekből adódó egyeden belüli korrelációt (Piepho et al., 2003; Zuur et al., 2009). A modellekben vizsgáltuk a kezelés $\times$ idő interakciót, valamint azokat a további kölcsönhatásokat, amelyek a növényi válaszok időbeli alakulásának értelmezéséhez szükségesek voltak.

A változók elemzésében a kezelés, a fajta és az év fix tényezőként szerepelt. Az egyes főhatások és interakciók értékelésével vizsgáltuk, hogy a kezelések miként befolyásolták a biomassza- és morfológiai végpontokat az egyes fajtákban és években. A kezelési átlagok összehasonlítását mindkét esetben Tukey-féle HSD-próbával végeztük $P \leq 0,05$ szignifikanciaszinten. Az elemzéseket egyedi növény szinten hajtottuk végre. A teljes statisztikai elemzés részletes kimenete a 14. számú mellékletben található. Az ismételt mérések elemzéséhez használt előkészített statisztikai adatállomány a 12. számú mellékletben, míg a vegyes modellek részletes kimenete a 13. számú mellékletben található

3.4.3 A környezeti háttér adatok interpretációs szerepe

A környezeti háttér adatokat nem önálló kísérleti tényezőként, hanem a biológiai eredmények értelmezésének támaszaként használtuk fel. A növekedési, klorofill- és destruktív mintavétellel nyert változók időbeli alakulását a dokumentált hőmérsékleti és meteorológiai viszonyokkal együtt értelmeztük annak érdekében, hogy az évjárat különbségek hatása jobban áttekinthető legyen (Poorter et al., 2012; Taiz et al., 2023).

3.4.4 Metabolitprofilok feltáró jellegű értékelése

A poliaminprofilokból származó adatokat feltáró jelleggel értékeltük. A poliaminok meghatározását Németh et al. (2002) és Pál et al. (2022)

módszerei alapján végeztük. A vizsgálatok során 200 mg növényi mintát használtunk. A poliaminok (1,3-diaminopropán, putreszcin, spermidin és spermin) elválasztása fordított fázisú oszlopon (Kinetex C18, 5 μ m, 100 $\times$ 2,1 mm; Phenomenex Inc.) történt nagyhatékonyságú folyadékkromatográfiás (HPLC) rendszerrel. Az analízishez W2690 elválasztó modullal és W2475 fluoreszcens detektorral (Waters, Milford, MA, USA) felszerelt berendezést alkalmaztunk, 340 nm gerjesztési és 515 nm emissziós hullámhossz mellett.

A cél nem megerősítő szintű statisztikai következtetések levonása volt, hanem a kezelésekhez kapcsolódó lehetséges mintázatok és biológiailag értelmezhető tendenciák azonosítása. A poliaminprofilokra vonatkozó eredményeket a megfelelő időpontokban mért élettani és fejlődési paraméterekkel összefüggésben értelmeztük, összhangban a biostimuláns kutatások jelenlegi ajánlásaival (Bulgari et al., 2015; Chiaiese et al., 2018).

A poliaminprofilok mellett a 2025. évi mintákra vonatkozó célzott hormon- és fenolvegyület-panelt is feltáró jelleggel értékeltük. Mivel az adatsor ugyanazon 18 végponti mintából származott, mint a poliaminprofilok, az eredményeket azokkal összefüggésben értelmeztük. A korlátozott mintaszerkezet és a mennyiségi meghatározási határhoz közeli értékek miatt az ebből származó információkat nem megerősítő következtető statisztikai bizonyítékként, hanem leíró, mintázatfeltáró kiegészítő eredményként használtuk fel.

3.5 Kiegészítő fogyasztói attitűd-felmérés a csökkentett vegyszerhasználatú dísnövények megítéléséről

A felmérés nem a biológiai kísérletek közvetlen igazolására szolgált, hanem annak kiegészítő vizsgálatára, hogy a csökkentett

vegyszerhasználatú termesztési megközelítésekhez kapcsolódó fogyasztói attitűdök milyen gyakorlati értelmezési keretet adhatnak az eredményekhez. A dísznövénytermesztésben alkalmazott csökkentett vegyszerfelhasználású stratégiák gazdasági és társadalmi relevanciájának értékelése céljából 2024-ben kérdőíves piackutatást végeztünk. A felmérés célja az volt, hogy feltárja a fogyasztók hozzáállását a csökkentett vegyszerhasználattal vagy vegyszermentesen előállított dísznövényekhez, valamint megbeszülje az ilyen termékekért vállalható felárat. A piaci szemléletű adatok növénytudományi kutatásokba történő bevonását egyre fontosabbnak tekintik annak érdekében, hogy az agronómiai és élettani innovációkat valós termelési és fogyasztási összefüggésben lehessen értelmezni (Grebitus et al., 2016; Vlaeminck et al., 2014). Jelen vizsgálatban a piackutatást kiegészítő módszertani elemként alkalmaztuk, hogy kapcsolatot teremtsünk a biológiai eredmények és azok lehetséges gyakorlati hasznosíthatósága között.

A kérdőívet kifejezetten ehhez a vizsgálathoz állítottuk össze. A célcsoportot hobbi kertészek, dísznövényvásárlók és környezettudatos növényfogyasztók alkották. A kérdések a vásárlási szokásokra, a dísznövénytermesztésben alkalmazott növényvédő szerek megítélésére, a csökkentett vegyszerhasználat jelentőségére, valamint a környezetbarát technológiával előállított növényekért vállalható felárra irányultak. A felmérést online terjesztettük kertészettel és növényekkel kapcsolatos digitális platformokon és közösségi médiafelületeken keresztül, Google Forms kérdőívszerkesztő alkalmazás segítségével. A kérdőív teljes tartalma a mellékletek között található. A részvétel önkéntes és anonim volt. Összesen 260 érvényes válasz érkezett, amelyeket bevontunk az elemzésbe. Bár a minta nem tekinthető a teljes népességre statisztikailag reprezentatívnak,

nagysága feltáró piackutatási és attitűdvizsgálati célokra megfelelőnek bizonyult (Hair et al., 2019). A fizetési hajlandóságot diszkrét, százalékos felárkategóriák segítségével mértük, amely a fogyasztói kutatásokban gyakran alkalmazott megközelítés a terméktulajdonságok relatív értékelésének becslésére (Breidert et al., 2006; Grebitus et al., 2016).

A felmérésből származó adatokat Microsoft Excel környezetben gyűjtöttük össze és dolgoztuk fel. Az eredmények értékeléséhez leíró statisztikai elemzést alkalmaztunk, amely alkalmas volt a válaszok megoszlásának, gyakoriságának és a fogyasztói csoportok relatív arányainak összegzésére. A felmérés eredményeit a vizsgálat biológiai megállapításaival összefüggésben értelmeztük, különös tekintettel arra, hogy a mikroalga-alapú biostimulánsok alkalmazása milyen mértékben illeszkedhet a csökkentett vegyszerfelhasználású dísnövénytermesztési stratégiákhoz. Az adatokat nem prediktív gazdasági modellezésre használtuk, hanem kiegészítő bizonyítékként arra, hogy alátámasszuk a környezetbarát dísnövénytermesztési megoldások gyakorlati relevanciáját és lehetséges piaci elfogadottságát. Ez a feltáró megközelítés széles körben elfogadott az olyan interdiszciplináris kutatásokban, amelyek a növénytudományt a fogyasztói viselkedéssel és a fenntarthatósági szempontokkal kapcsolják össze (Grebitus et al., 2016; Vlaeminck et al., 2014).

4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

Először a hosszanti morfológiai pályákat, majd a végponti biomassza-mutatókat, végül az élettani és kiegészítő fogyasztói eredményeket tárgyaljuk.

4.1 A kísérleti időrend és az adatsorok áttekintése

Ebben a fejezetben a mikroalga-alapú biostimuláns kezelések dísz-növényként termesztett *Pelargonium* növények növekedésére és egyes élettani jellemzőire gyakorolt hatásait foglaljuk össze. A kísérleti elrendezés három egymást követő termesztési évre terjedt ki (2023–2025), és ismételt, nem destruktív méréseket, valamint végponti morfológiai és élettani vizsgálatokat egyaránt magában foglalt. Az ilyen hosszabb időtartamú megközelítéseket széles körben alkalmazzák a kertészeti kutatásokban, mivel lehetővé teszik a kezelések hatásának időbeli követését és az évjáráti háttér figyelembevételét is (Poorter et al., 2012; Piepho et al., 2003).

A nem destruktív növekedési paramétereket – a növénymagasságot, a levélszámot és a bimbószámot – mindhárom évben ismételten rögzítettük a termesztési időszak során. A klorofilltartalmat szintén mindhárom szezonban meghatároztuk, így ez a paraméter a fotoszintetikus állapot élettani jellemzésére szolgált eltérő évjáráti háttér mellett is (Lichtenthaler & Buschmann, 2001).

A 2025. évi záró időpontban rögzített mintavétel során a fenotípusos és élettani eredmények kiegészítő értelmezéséhez feltáró jellegű metabolit-szintű mintavétel is történt. Az ebből származó információkat a dolgozatban a poliaminprofilok, valamint egy kiegészítő hormon- és fenolvegyület-panel szintjén, leíró és mechanisztikus értelmezési keretben

használtuk fel (Bulgari et al., 2015; Chiaiese et al., 2018). Ennek megfelelően a jelen fejezetben bemutatott eredmények bizonyító ereje eltérő: a legerősebb következtetések a három évben ismételten mért morfológiai és biomasszaalapú végpontokhoz kapcsolódnak, míg a levélpigment-, poliamin-, valamint hormonális és fenolos jellegű feltáró metabolit adatok elsősorban értelmező, illetve hipotézisgeneráló szerepet töltenek be.

A termesztési ciklus végén mért morfológiai és biomasszaalapú paramétereket minden évben a termesztési időszak lezárásakor határoztuk meg. A környezeti háttér dokumentálása több léptékben történt, és az így nyert adatokat nem a kezelések közvetlen magyarázatára, hanem az évjáráti különbségek értelmezésére használtuk fel (Taiz et al., 2023; Poorter et al., 2012).

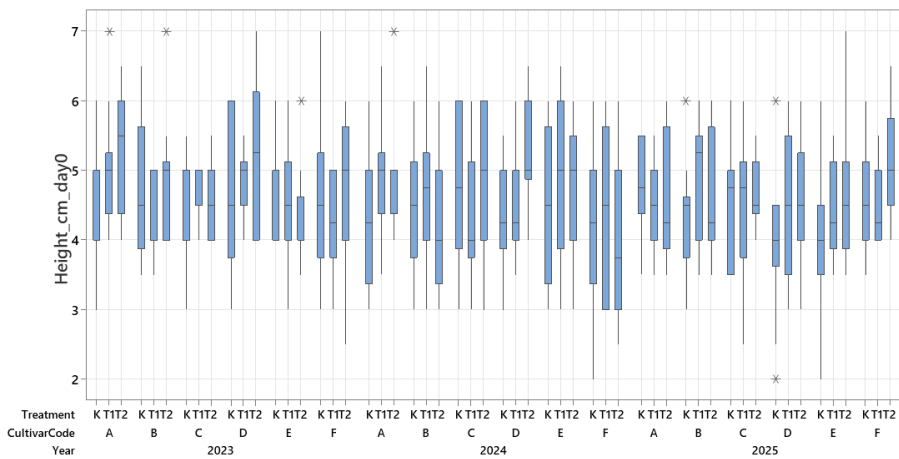
4.2 Hosszú távú növekedési és fejlődési paraméterek

A növénymagasságot, a bimbószámot és a levélszámot négy mérési időpontban követtük nyomon. A fejezetben bemutatott hosszú távú, ismételt mérések három egymást követő termesztési évből származnak, és összesen 540 kísérleti egyeden (3év;6 fajta; 3 teszt (T1, T2, K); 10 ismétlés) végzett megfigyelésen, valamint 6480 rögzített mérési adaton (540;4 időpont; 3 paraméter) alapulnak. Az ismételt méréses vegyes modellek alapján a három vizsgált paraméter közül a legkifejezettebb kezelési hatás a levélszám esetében jelentkezett, ahol a kezelés főhatása szignifikáns volt ($F = 4,16$; $p = 0,016$), és a kezelés $\times$ idő interakció is szignifikánsnak bizonyult ($F = 4,73$; $p < 0,001$). A növénymagasság esetében a kezelés főhatása szintén szignifikáns volt ($F = 3,29$; $p = 0,037$), azonban a kezelés $\times$ idő interakció nem bizonyult szignifikánsnak ($F = 0,31$; $p = 0,933$). A bimbószámnál sem a kezelés főhatása ($F = 2,71$; $p = 0,067$), sem a kezelés $\times$

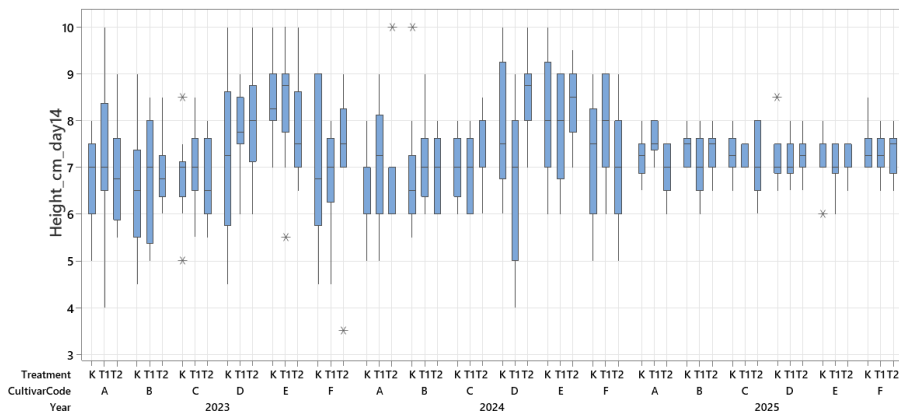
idő interakció ($F = 1,52$; $p = 0,168$) nem érte el a szignifikancia szintjét. A hosszútávú adatelemzéshez felhasznált statisztikai adatállomány a 12. számú mellékletben, míg az ismételt mérésekre illesztett vegyes modellek részletes kiértékelése a 13. számú mellékletben található.

4.2.1 A növénymagasság alakulása

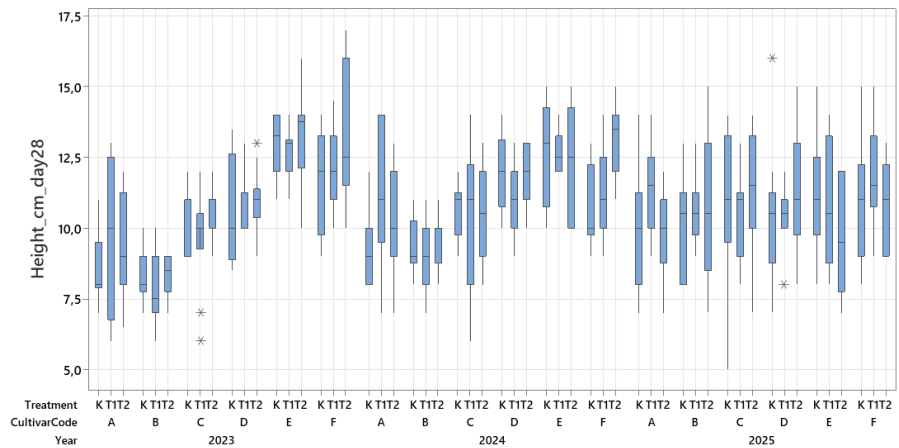
A növénymagasság minden kezelésben fokozatosan növekedett a termesztési időszak során. A 0. napon a kontroll, a T1 és a T2 kezelések átlagos növénymagassága rendre 4,48, 4,63 és 4,74 cm volt. A 14. napon ezek az értékek 7,21, 7,25 és 7,36 cm-re, a 28. napon 10,34, 10,38 és 10,57 cm-re, a 42. napon pedig 15,04, 14,91 és 15,33 cm-re változtak. A legmagasabb átlagos növénymagasságot minden mérési időpontban a T2 kezelés adta; a 42. napon mért 15,33 cm-es érték 1,9%-kal haladta meg a kontroll 15,04 cm-es átlagát. A vegyes modell alapján a kezelés főhatása szignifikáns volt ($F = 3,29$; $p = 0,037$), ugyanakkor a kezelés $\times$ idő interakció nem bizonyult szignifikánsnak ($F = 0,31$; $p = 0,933$), ami arra utal, hogy a kezelések közötti különbségek időbeli lefutása a növénymagasság esetében nem tért el érdemben egymástól. A növénymagasság időbeli alakulását a 10–13. ábrák szemléltetik.



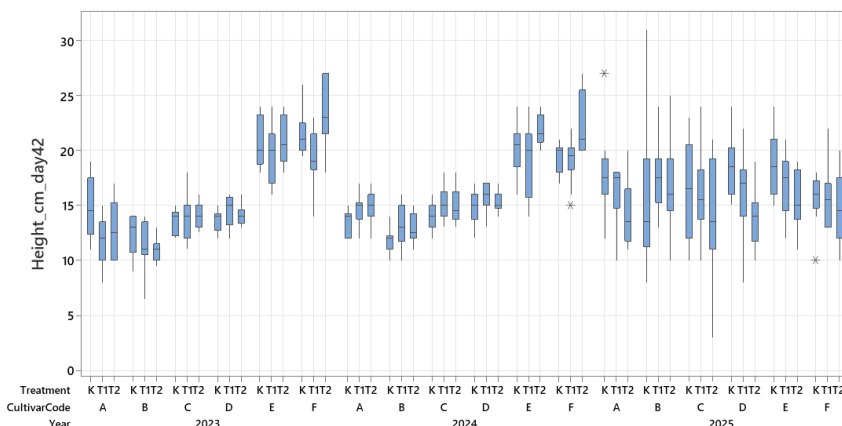
10. ábra: A növénymagasság boxplotja centiméterben a 0. napon.



11. ábra: A növénymagasság boxplotja centiméterben a 14. napon.



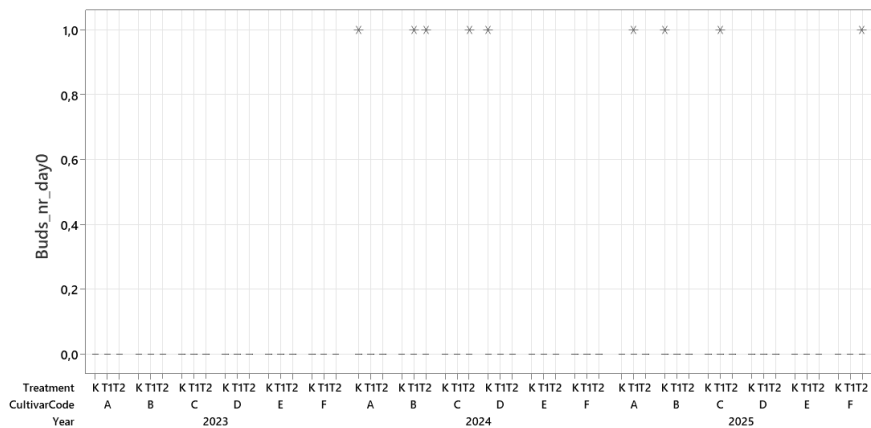
12. ábra: A növénymagasság boxplotja centiméterben a 28. napon



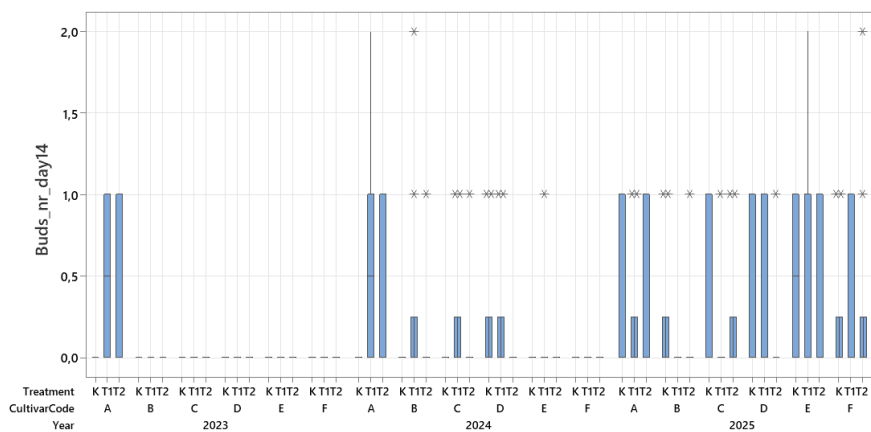
13. ábra: A növénymagasság boxplotja centiméterben a 42. napon (Az időbeli átlagértékek a 9. számú melléklet (3 éves növény mérési eredmények) adatállományából kerültek kiszámításra.)

4.2.2 A bimbóképződés dinamikája

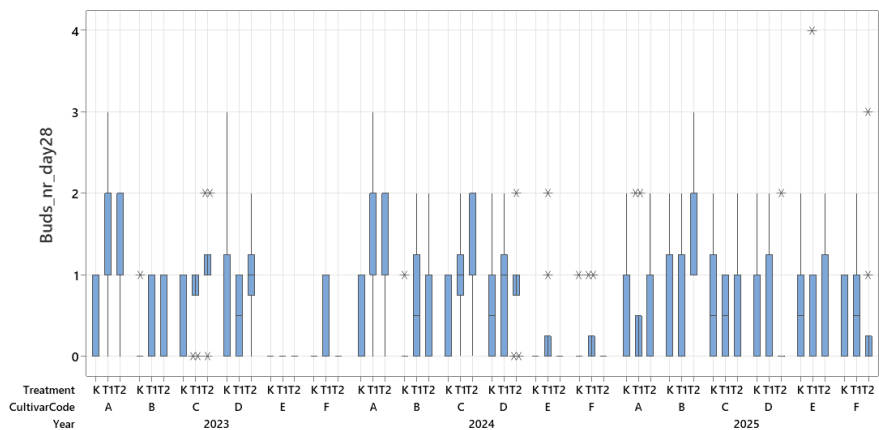
A bimbószám a termesztési időszak elején minden kezelésben alacsony szinten indult. A 0. napon a bimbószám átlaga valamennyi kezelésben 0,02 volt. A 14. napon a kontrollban 0,60, T1-ben 0,72, T2-ben 0,57 bimbót mértünk átlagosan. A 28. napon a kontroll átlagos bimbószáma 0,79 volt, míg T1-ben 1,07, T2-ben 0,97; ez a kontrollhoz viszonyítva 34,3%, illetve 22,8%-os növekedésnek felelt meg. A 42. napon a legmagasabb átlagos bimbószámot a T2 kezelésben kaptuk (2,85), ezt követte a T1 kezelés (2,83), míg a kontrollban 2,69 volt az átlag, ami 6,1%, illetve 5,2%-os numerikus többletet jelentett a kontrollhoz képest. Ugyanakkor a vegyes modell alapján sem a kezelés főhatása ($F = 2,71$; $p = 0,067$), sem a kezelés $\times$ idő interakció ($F = 1,52$; $p = 0,168$) nem bizonyult szignifikánsnak, ezért a bimbóképződés esetében a kezelések hatása kedvező irányú, de statisztikailag nem teljesen megerősített tendenciaként értelmezhető. A bimbóképződés dinamikáját a 14–17. ábrák mutatják be.



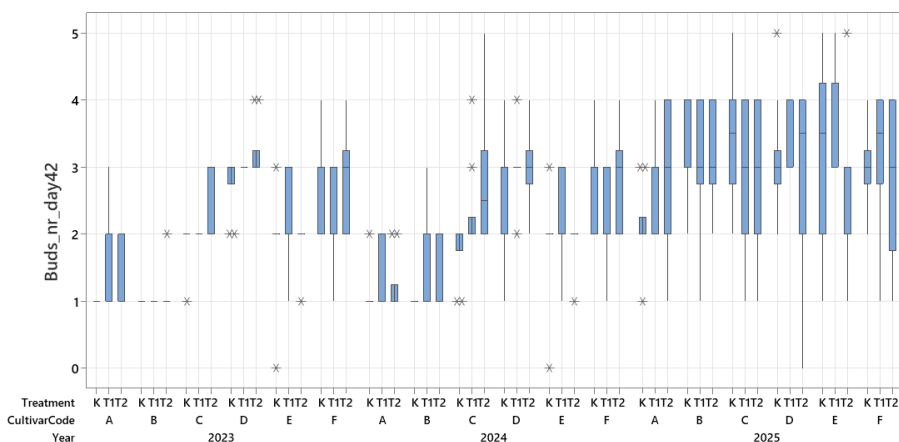
14. ábra: A bimbószám boxplotja a 0. napon



15. ábra: A bimbószám boxplotja a 14. napon



16. ábra: A bimbószám boxplotja a 28. napon



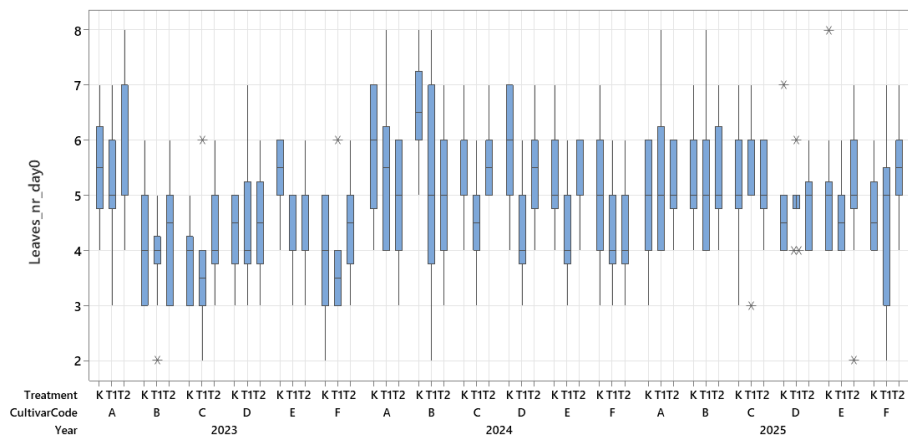
17. ábra: A bimbószám boxplotja a 42. napon

(Az időbeli átlagértékek a 9. számú melléklet (3 éves növény mérési eredmények) adatállományából kerültek kiszámításra)

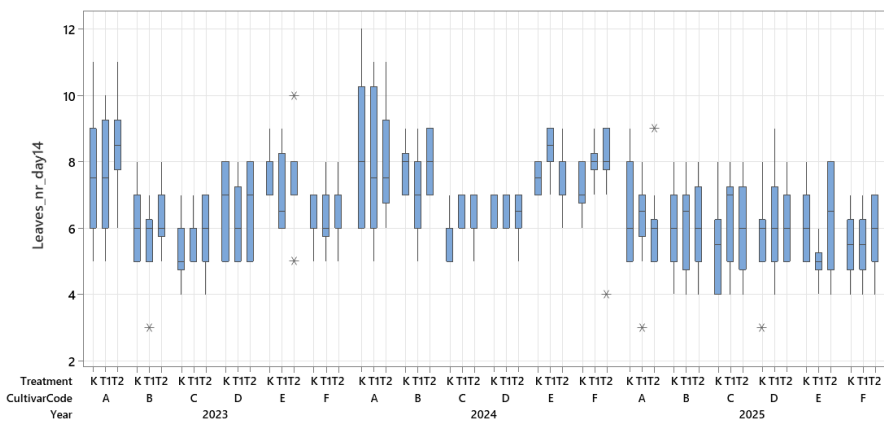
4.2.3 A levélszám alakulása

A levélszám esetében a kezelések közötti különbségek a termesztési időszak előrehaladtával egyértelműbben rajzolódtak ki. A 0. napon a kontroll, a T1 és a T2 kezelések átlagos levélszáma rendre 5,04, 4,62 és 4,97 volt. A 14. napon a kontroll és a T1 azonos átlagot mutatott (7,40), míg T2-ben 7,57 levelet mértünk. A 28. napon a kontroll átlaga 10,26, T1-ben 10,45, T2-ben pedig 10,59 volt, ami 1,8%, illetve 3,2%-os növekedést jelentett a kontrollhoz viszonyítva. A 42. napon a legmagasabb átlagos levélszámot a T2 kezelésben kaptuk (14,70), amelyet szorosan követett a T1 kezelés (14,69), míg a kontrollban 14,09 volt az átlag; ez 4,3%, illetve 4,2%-os emelkedésnek felelt meg. A vegyes modell alapján a kezelés főhatása szignifikáns volt ($F = 4,16$; $p = 0,016$), és a kezelés $\times$ idő interakció is szignifikánsnak bizonyult ($F = 4,73$; $p < 0,001$), ami arra utal, hogy a kezelések hatása a levélszám esetében időfüggően alakult, és a

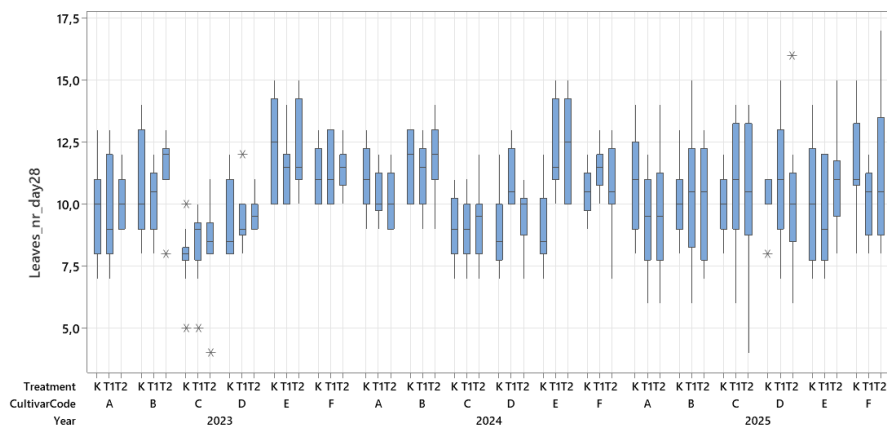
különbségek elsősorban a termesztési időszak második felében váltak hangsúlyossá. A levélszám időbeli változását a 18–21. ábrák szemléltetik.



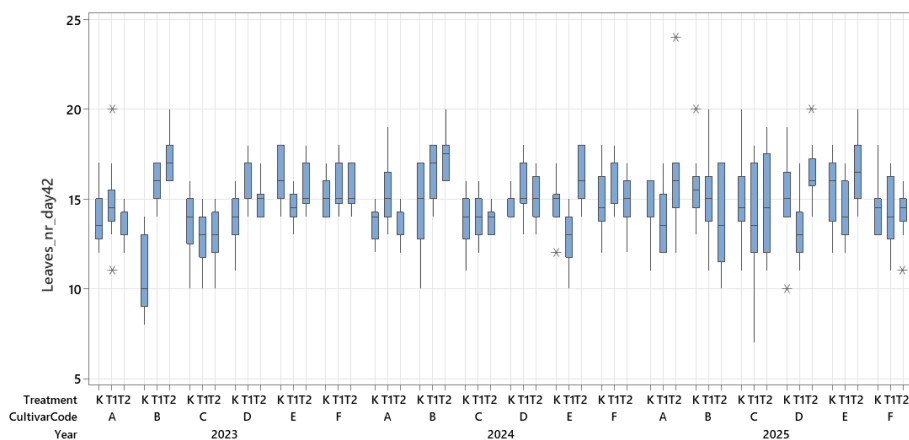
18. ábra: A levélszám boxplotja a 0. napon



19. ábra: A levélszám boxplotja a 14. napon



20. ábra: A levélszám boxplotja a 28. napon



21. ábra: A levélszám boxplotja a 42. napon

(Az időbeli átlagértékek a 9. számú melléklet (3 éves növény mérési eredmények) adatállományából kerültek kiszámításra)

4.2.4 A hosszú távú mérések összefoglaló statisztikai áttekintése

A 4.2.1–4.2.3 alfejezetekben bemutatott, három egymást követő termesztési évből származó hosszú távú, ismételt mérések legfontosabb statisztikai mutatóit az 5. táblázat foglalja össze.

Paraméter	Kezelés (F)	Kezelés (p)	Kezelés × idő (F)	Kezelés × idő (p)	42. napi K átlag	42. napi T1 átlag	42. napi T2 átlag	T1-K (%)	T2-K (%)
Növénymagasság	3,29	0,037	0,31	0,933	15,04	14,91	15,33	-0,9	1,9
Bimbószám	2,71	0,067	1,52	0,168	2,69	2,83	2,85	5,2	6,1
Levélszám	4,16	0,016	4,73	<0,001	14,09	14,69	14,7	4,2	4,3

5. táblázat: A hosszú távú, ismételt mérések összefoglaló statisztikai eredményei.

Megjegyzés: F = F-próba statisztikai értéke; p = szignifikanciaszint; kezelés × idő = a kezelés és a mérési időpont interakciója; 42. napi átlag = a 42. napon mért átlagos érték; T1–K (%) és T2–K (%) = a kezelések kontrollhoz viszonyított százalékos eltérése. További részletek a 13. számú mellékletben elérhetők.

4.3 Végponti biomassa- és morfológiai tulajdonságok

A kísérlet záró szakaszában rögzített változók biomassa- és morfológiai jellemzőket annak számszerűsítésére értékeltük, hogy a mikroalga-alapú kezelések milyen kumulatív hatást gyakoroltak a növényfejlődésre a teljesen kifejllett, értékesítésre kész állapotban. Ezek a paraméterek a hosszú távú vegetatív növekedés, az asszimilátum-eloszlás és a gyökérhajtás rendszer eredőjét tükrözik, ezért a kertészeti és biostimuláns kutatásokban a kezelési hatékonyság megbízható mutatóinak tekinthetők (Calvo et al., 2014; Bulgari et al., 2015). A jelen doktori (PhD) értekezés fő

következtetései elsősorban ezekre a végponti, több évben ismételten rögzített változókra épülnek. A kísérletet három egymást követő évben azonos alapelrendezésben ismételtük meg. A destruktív végponti méréseket minden évben fajta $\times$ kezelés kombinációként 6 növényen végeztük el. Ez a mintaszám a gyökéranalízishez kapcsolódó módszertani korlátok mellett is lehetővé tette a destruktív mintavétellel nyert válaszok összehasonlító értékelését (Böhm, 1979; Gregory, 2006).

Az általános lineáris modell alapján a kezelés valamennyi elsődleges végponti változóra szignifikáns hatást gyakorolt (6. táblázat). A kezelés szignifikánsan befolyásolta a száraz növénytömeget, a gyökértömeget, a gyökérnyaki átmérőt és a végső növénymagasságot is (minden esetben $p < 0,001$). A kezelés $\times$ év interakció egyik vizsgált paraméter esetében sem bizonyult szignifikánsnak ($p > 0,05$), vagyis a jelen adatok alapján nem volt statisztikai bizonyíték arra, hogy a kezelések hatása a három termesztési év között eltérő mintázatot mutatott volna.

Paraméter	Kezelés F	Kezelés p	Kezelés $\times$ év p	Kezelés $\times$ fajta p	R ²
Száraz tömeg	28.31	<0.001	0.915	<0.001	0.6278
Gyökértömeg	14.15	<0.001	0.197	<0.001	0.7834
Gyökérnyaki átmérő	19.00	<0.001	0.568	0.006	0.8925
Növénymagasság	8.90	<0.001	1.000	<0.001	0.7481

6. táblázat: Az általános lineáris modell összefoglaló eredményei a biomassza- és strukturális paraméterekre vonatkozóan.

A kezelés $\times$ fajta interakciók szignifikanciája arra utal, hogy a válaszreakciók mértéke fajtafüggő volt. A nem szignifikáns kezelés $\times$ év

interakció ugyanakkor arra utalt, hogy a kezeléshatások mintázata az egyes évek között lényegében nem változott, vagyis nem jelentkezett kimutatható, évspecifikus kezelési eltérés.

4.3.1 Friss növényi tömeg

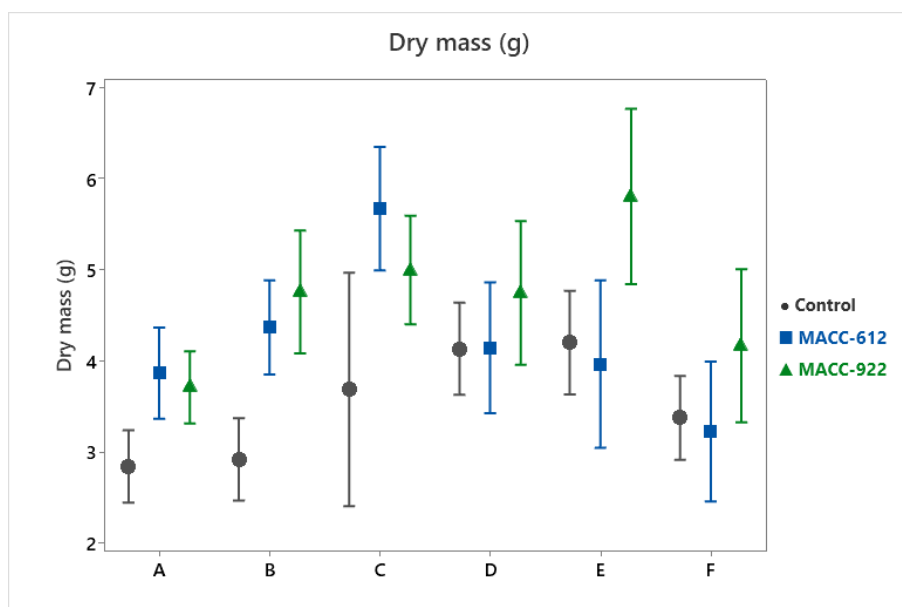
A friss növénytömeg egyaránt tükrözi a növény strukturális biomasszáját és a mintavételkori szöveti víztartalmát. Az átlagos friss tömeg a kontrollban 25,72 g volt, míg a kezelt állományokban ennél rendre magasabb értékeket mértünk: T1 kezelésben 31,01 g-ot, ami 20,6%-os, T2 kezelésben pedig 33,12 g-ot, ami 28,8%-os növekedésnek felelt meg a kontrollhoz viszonyítva. A friss tömeg értelmezése azonban óvatosságot igényel, mivel azt rövid távú vízháztartási különbségek is befolyásolhatják. Ezért ezt a változót elsősorban leíró jelleggel értékeltük, és a kezelések hatását a száraz tömeggel együtt tekintettük megbízhatóbban értelmezhetőnek (du Jardin, 2015; Rouphael & Colla, 2020). A friss növénytömeg átlagértékei a 7. számú mellékletben szereplő végponti nyers adatokból számított leíró statisztikák.

4.3.2 Száraz növényi tömeg

A száraz növénytömeg stabilabb mutatója a strukturális biomasszájának, mivel kevésbé érzékeny a vízháztartás rövid távú ingadozásaira. Az összesített adatok alapján az átlagos száraz tömeg a kontrollban 3,53 g volt, míg a kezelt állományokban ennél magasabb értékeket mértünk: T1 kezelésben 4,21 g-ot, ami 19,2%-os, T2 kezelésben pedig 4,70 g-ot, ami 33,1%-os növekedésnek felelt meg a kontrollhoz viszonyítva. Az eredmények arra utalnak, hogy a kezelések hatása nem csupán átmeneti vízállapot-változásként, hanem tényleges biomassza-felhalmozódás formájában

is megjelent. A T2 kezelés erőteljesebb növekedési választ mutatott, ami összhangban áll a hosszanti adatsorokban megfigyelt tendenciákkal is. A kezelések hatását a száraz növénytömegre a 22. ábra szemlélteti.

A száraz növénytömeg átlagértékei és a kontrollhoz viszonyított eltérések a 6. számú mellékletben bemutatott leíró statisztikákból származnak, míg a modellfeltételek ellenőrzését az 1. számú melléklet tartalmazza

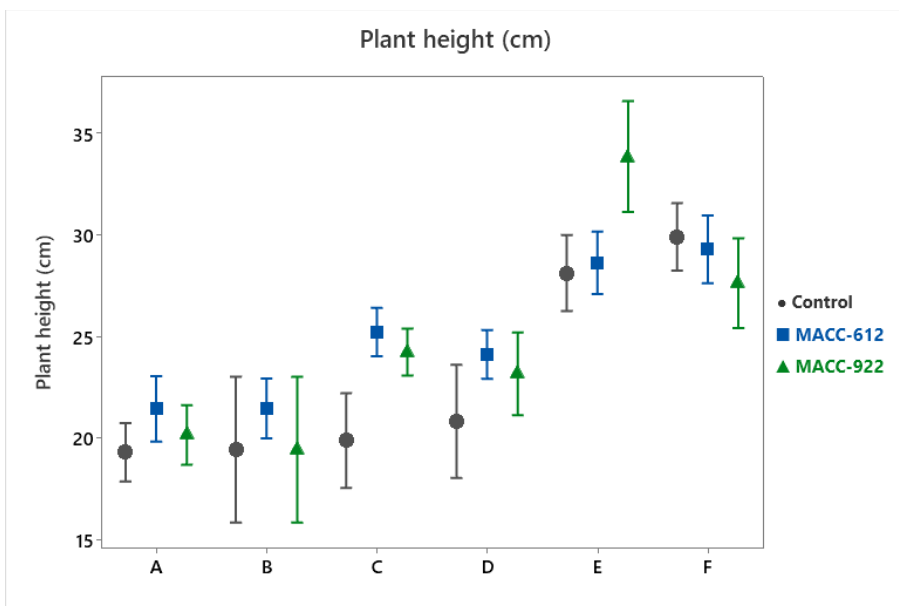


22. ábra: 6 *Pelargonium* fajta száraz tömege (g) kontroll-, valamint mikroalga-kezelésekben (MACC-612 és MACC-922). A pontok az átlagértékeket, a hibasávok pedig a 95%-os konfidenciaintervallumokat jelölik. Az A–F fajtakódok jelentését a 3. táblázat tartalmazza.

Bár a kezelés $\times$ fajta interakció szignifikáns volt ($p < 0,001$), ami a kezelés válasz genotípusfüggő mértékét jelzi, a hatás iránya valamennyi vizsgált fajta esetében pozitív maradt. Ez arra utal, hogy a kezelések a strukturális biomasza felhalmozódását általánosan elősegítették, miközben ennek intenzitása fajtánként eltérően érvényesült.

4.3.3 Végző növénymagasság

A kezelés a végző növénymagasságot is szignifikánsan befolyásolta, bár ennek mértéke mérsékeltebb volt, mint a biomasszával összefüggő paraméterek esetében. A kontrollnövények átlagos magassága $22,92 \pm 0,72$ cm volt, míg a MACC-612 biomassza kezelésben $25,02 \pm 0,49$ cm, a MACC-922 biomassza kezelésben pedig $24,74 \pm 0,78$ cm átlagmagasságot mértünk, ami a kontrollhoz viszonyítva rendre 9,2%, illetve 7,9%-os növekedésnek felelt meg. A végző növénymagasság alakulását a 23. ábra mutatja be. A végző növénymagasság átlagértékei és a kontrollhoz viszonyított eltérések a 6. számú mellékletben bemutatott leíró statisztikákból (Plant Height (cm) blokk) származnak.



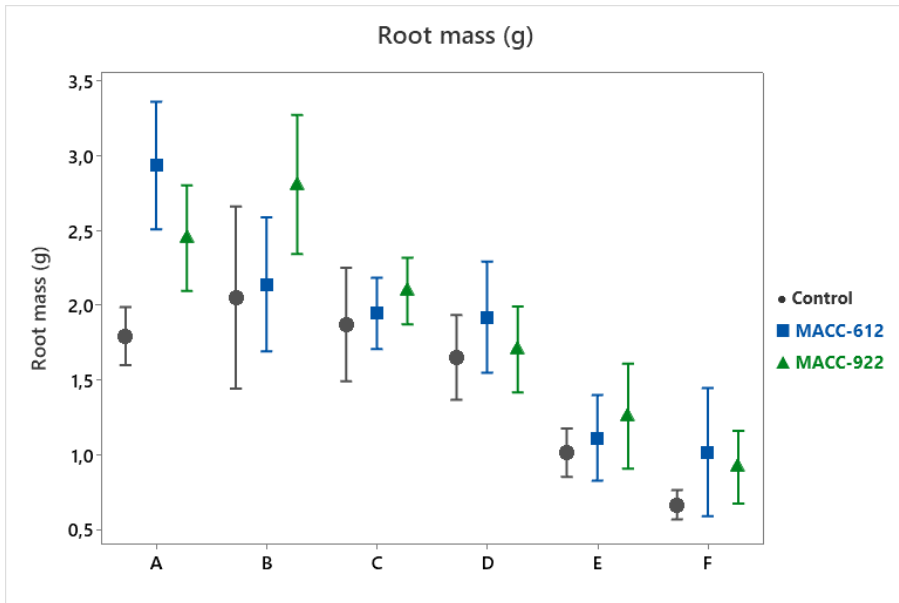
23. ábra: 6 *Pelargonium* fajta növénymagassága (cm) kontroll-, valamint mikroalga-kezelésekben (MACC-612 és MACC-922), három egymást követő termesztési évben (2023–2025). A pontok az átlagértékeket, a

hibasávok pedig a 95%-os konfidenciaintervallumokat jelölik. Az A–F fajtakódok jelentését a 3. táblázat tartalmazza.

A növénymagasság erősen fajtafüggő tulajdonság, ezért értelmezésekor indokolt a kezelés $\times$ fajta kölcsönhatás figyelembevétele. A biomasszához kapcsolódó paraméterekhez képest a magasságbeli változások mérsékeltebbek voltak, ami arra utal, hogy a kezelések hatása elsősorban nem a hajtásmegnyúlás fokozásában, hanem inkább a biomassza-felhalmozódás és a strukturális fejlődés elősegítésében érvényesült. Kertészeti szempontból ez kedvezőnek tekinthető, mivel a túlzott megnyúlás általában rontja a dísnövények piaci értékét. A végső növénymagasság leíró statisztikái a 6. számú mellékletben, a modell-diagnosztikai vizsgálatok pedig a 4. számú mellékletben találhatók.

4.3.4 Gyökértömeg

A gyökértömeg a mikroalga-kezelésekre szignifikáns pozitív választ mutatott. A kontrollban mért $1,51 \pm 0,09$ g-os átlagértékhez képest a gyökértömeg a MACC-612 kezelésben $1,84 \pm 0,11$ g-ra, a MACC-922 kezelésben pedig $1,87 \pm 0,11$ g-ra nőtt, ami rendre 22,3%, illetve 24,1%-os növekedésnek felelt meg. A gyökértömeg kezelésre adott válaszát a 24. ábra szemlélteti.



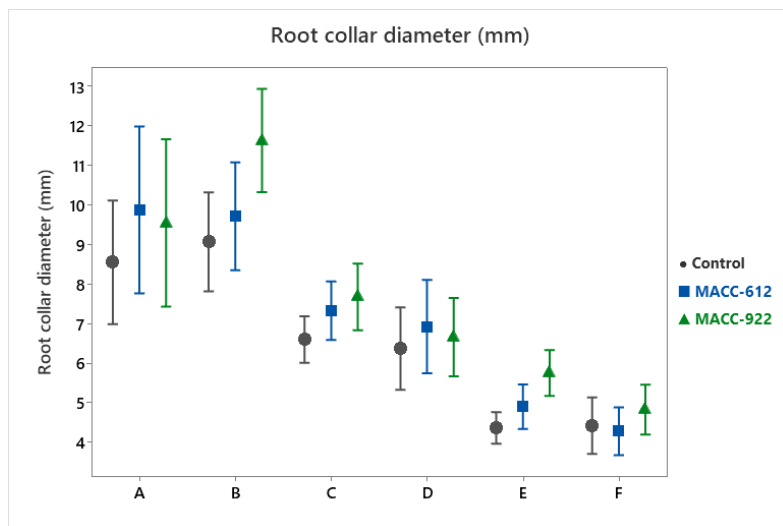
24. ábra: 6 *Pelargonium* fajta gyökértömege (g) a kontroll-, illetve a mikroalga-kezelésekben (MACC-612 és MACC-922), három egymást követő tenyészidőszakban (2023–2025). A pontok az átlagértékeket, a hibasávok pedig a 95%-os konfidencia intervallumokat jelzik. Az A–F fajtakódok magyarázatát a 3. táblázat tartalmazza.

A kezelés $\times$ fajta interakció szignifikáns volt, ami arra utal, hogy a gyökértömeg-válasz intenzitása fajtánként eltért. Ennek ellenére a gyökértömeg a legtöbb kombinációban a kontrollhoz képest kedvező irányban tolódott el. A gyökértömeg átlagértékei a 6. számú mellékletben, míg a modellfeltételek ellenőrzésének eredményei a 2. számú mellékletben találhatók.

4.3.5 Gyökérnyaki átmérő

A kezelés a gyökérnyaki átmérőt is szignifikánsan befolyásolta. A kontrollban mért $6,56 \pm 0,30$ mm-es átlagértékhez képest a gyökérnyaki

átmérő a MACC-612 biomassza kezelésben $7,17 \pm 0,36$ mm-re, a MACC-922 biomassza kezelésben pedig $7,68 \pm 0,37$ mm-re nőtt, ami rendre 9,3%, illetve 17,0%-os növekedésnek felelt meg. A gyökérnyaki átmérő alakulását a 25. ábra mutatja be.



25. ábra: 6 *Pelargonium* fajta gyökérnyaki átmérője (mm) kontroll-, valamint mikroalga-kezelésekben (MACC-612 és MACC-922), három egymást követő termesztési évben (2023–2025). A pontok az átlagértékeket, a hibaszávok pedig a 95%-os konfidenciaintervallumokat jelölik. Az A–F fajtakódok jelentését a 3. táblázat tartalmazza.

A többtényezős GLM ennél a változónál magas magyarázóerőt mutatott ($R^2 = 0,8925$), ami arra utal, hogy a modell a gyökérnyaki átmérő alakulását nagy pontossággal írta le. A szignifikáns kezelés $\times$ fajta interakció ($p = 0,006$) szerint a kezeléshatás mértéke fajtánként eltérően érvényesült. Ugyanakkor a gyökérnyaki átmérő valamennyi kezelésben meghaladta a kontroll értékét, ami arra utal, hogy a mikroalga-kezelések összességében kedvezően befolyásolták a növények strukturális fejlettségét.

A gyökérnyaki átmérő leíró statisztikái a 6. számú mellékletben, a modell-diagnosztikai eredmények pedig a 3. számú mellékletben kerültek bemutatásra.

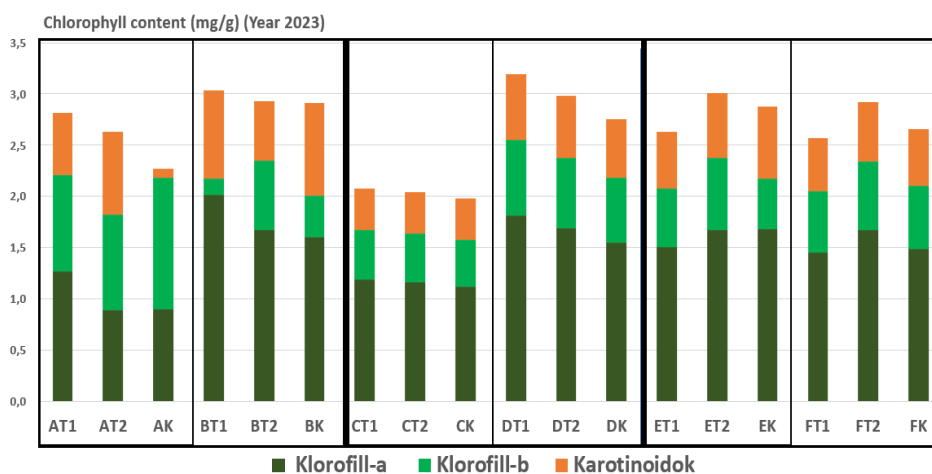
4.3.6 Gyökérhossz

Az összesített adatok alapján a gyökérhossz a kontrollban mért 20,53 cm-es átlagértékhez képest a T1 kezelésben 21,95 cm-re, a T2 kezelésben pedig 22,58 cm-re nőtt, ami rendre 6,9%, illetve 10,0%-os emelkedésnek felelt meg. A gyökérhossz értelmezését ugyanakkor konténeres termesztésben korlátozza, hogy alakulását a rendelkezésre álló cseréptérfogat jelentősen befolyásolja, emellett ez a paraméter érzékeny lehet a mintavétel és a gyökérmosás során fellépő mérési torzításokra is (Neufeld & Chapin, 1999). Ennek megfelelően a gyökérhosszt a jelen vizsgálatban kiegészítő, leíró jellegű változóként mutatjuk be, és nem tekintettük elsődleges, formálisan értékelt végpontnak. A gyökérzet kezelésre adott válaszá-
nak jellemzésére ezért a gyökértömeget használtuk fő, megbízhatóbb változóként. A gyökérhossz átlagértékei a 7. számú mellékletben szereplő végponti nyers adatokból számított leíró statisztikák.

4.4 Levélpigment-tartalom

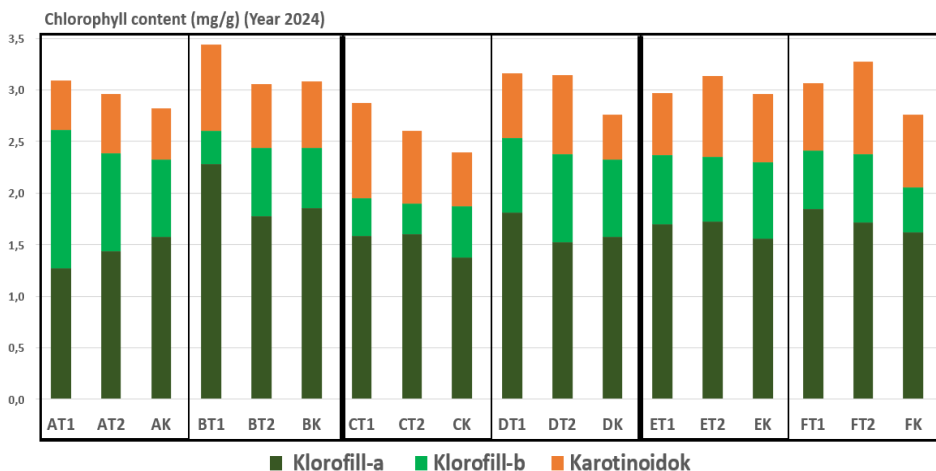
A levélpigment-összetétel vizsgálata alapján a klorofill-*a* adta az összes pigment legnagyobb hányadát valamennyi fajta × kezelés kombinációban, míg a klorofill-*b* és a karotinoidok kisebb, de egyértelműen ki-mutatható részt képviseltek. Az abszolút pigmenttartalmak a fajták között már kiinduló szinten is számottevő eltérést mutattak, ami a pigmentállapot erős fajtafüggésére utal.

A 2023-as adatokban több fajtacsoportban jól látható kezelési el-
különülés jelent meg. Egyes esetekben a mikroalga-kezelésekhez nagyobb
összes pigmenttartalom társult a kontrollhoz képest, különösen a B és D
csoportban, ugyanakkor a változás iránya nem volt minden fajtánál azo-
nos. A levélpigment-tartalom alakulását évjáratonként a 26–28. ábrák
szemléltetik.



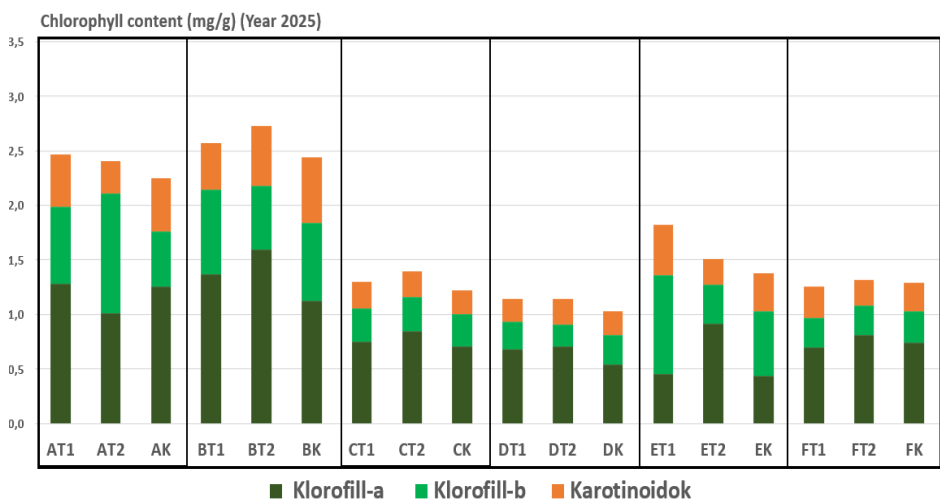
26. ábra: Levél-klorofill- és karotinoid tartalom (2023)

2024-ben a pigmentösszegek több fajtacsoportban homogénebb
képet mutattak, de a kezelésekhez kapcsolódó eltolódások továbbra is
megfigyelhetők maradtak. Több esetben a *Chlorella vulgaris* biomassa
kezeléshez vizuálisan magasabb összes pigmenttartalom kapcsolódott,
míg más fajtánál a kezelések közötti különbség mérsékelt maradt.



27. ábra: Levél-klorofill- és karotinoid tartalom (2024)

A 2025-ös adatok alapján a teljes pigmenttartalom több fajtacsoportban alacsonyabb volt, mint az előző két évben, ami kifejezett évjáratásra utal. A kezelések közötti különbségek ebben az évben is jelen voltak, de ezek iránya és mértéke továbbra sem volt egységes valamennyi fajtában. Egyes esetekben a T1 vagy T2 kezelés magasabb pigmentösszeggel járt, máskor csak csekély elkülönülés volt látható.



28. ábra: Levél-klorofill- és karotinoid tartalom (2025)

Összességében a hároméves pigmentadatsor alapján a levélpigment-tartalmat elsősorban a fajta és az évjárat befolyásolta, míg a kezelések hatása heterogén mintázatot mutatott. A mikroalga-kezelésekhez több esetben kedvező irányú eltolódás társult, de ez nem jelent meg minden fajtában és minden évben azonos módon. A legerősebb kezelési elkülönülés vizuálisan a 2023-as évben volt megfigyelhető, míg 2024-ben és 2025-ben kevésbé voltak egyértelműek a különbségek.

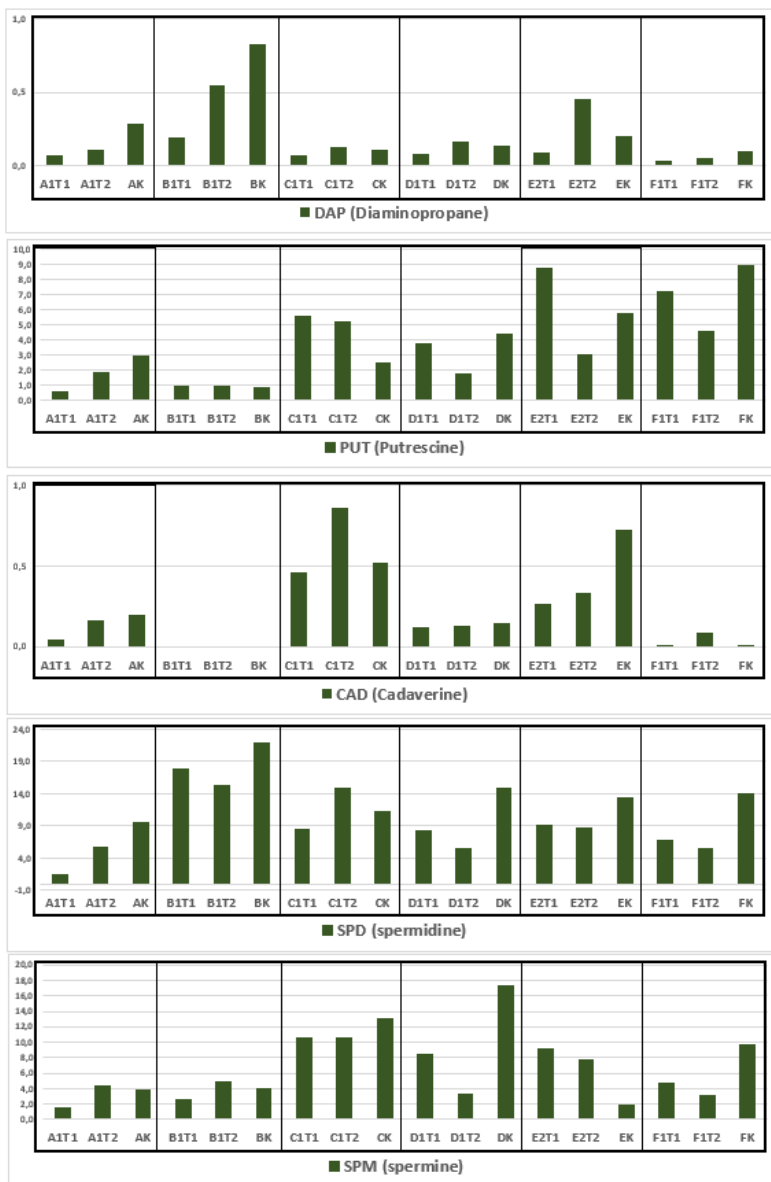
4.5 Feltáró jellegű végponti metabolitprofil-vizsgálatok

A 2025. évi termesztési ciklus végén gyűjtött, 18 kódolt végponti mintából származó metabolitadatok alapján a poliaminprofilok kezelésekhöz kapcsolódó eltéréseket mutattak, ugyanakkor az adatsor feltáró jellegű volt. A vizsgálat ebben az alfejezetben a DAP, PUT, CAD, SPD és SPM vegyületekre terjedt ki, és a kapott mintázatok elsősorban leíró összehasonlításra adtak lehetőséget. A fajta $\times$ kezelés kombinációkban megfigyelt eltérések arra utaltak, hogy a mikroalga-kezelésekhez több esetben elkülönülő metabolikus profil társult, de ezek értelmezése ebben a szakaszban még óvatos megközelítést igényel.

4.5.1 Genotípus szerint feloldott poliamin mintázatok

A genotípusonként bemutatott profilok alapján a kezelésekhöz kapcsolódó különbségek több vegyület esetében is visszatérő irányultságot mutattak. A DAP és az SPD több genotípusban alacsonyabb értékeket mutatott a mikroalga-kezelések mellett, mint a kontrollban. Ezzel szemben a PUT és az SPM nagyobb mértékű genotípusfüggő változékonyságot mutatott, vagyis ezeknél a kezelési hatás kevésbé egységes mintázatban jelent meg. Az eredmények alapján a kezelésekhöz kapcsolódó eltolódások nem

egyetlen kiugró értékhez kötődtek, hanem több genotípusban is megfigyelhetők voltak. A genotípus szerint feloldott végponti poliaminprofilokat a 29. ábra szemlélteti.



29. ábra: A destruktív mintavételhez kötött (végponti) változók GC–MS poliamin szintek (DAP, PUT, CAD, SPD, SPM) a 42. napon, azaz a destruktív mintavétellel azonos időpontban, fajtakódonként (A–F), T1, T2 és

kontroll (K) kezelések alatt, genotípus szerint feloldott oszlopdiagramon ábrázolva

4.5.2 Kezelésszintű összefoglaló mintázatok

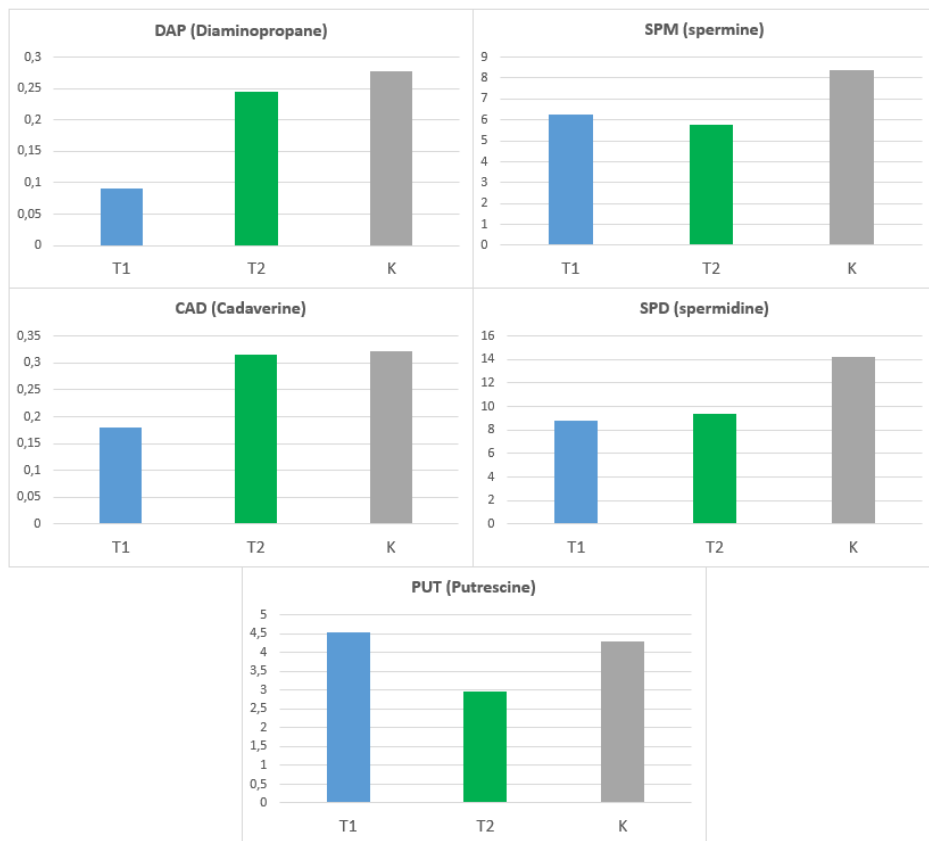
A kezelésszintű összesítés alapján a poliaminprofilokban több vegyület esetében is rendezett különbségek rajzolódtak ki. A poliaminprofilok értelmezéséhez kapcsolódó laboratóriumi mintavétel előkészítését a 30. ábra szemlélteti.



30. ábra: A poliaminprofil-vizsgálatokhoz előkészített, laboratóriumi mintavételre sorba rendezett kísérleti növények (forrás: saját felvétel)

A DAP esetében a kontroll mutatta a legmagasabb értékeket, ezt követte a T2, majd a T1 kezelés. A PUT esetében ezzel szemben a T1 kezeléshez kapcsolódott a legmagasabb érték. A többi vizsgált vegyületnél a különbségek kevésbé voltak egységesek, de az összkép így is arra utalt, hogy a kezelésekhez eltérő metabolikus mintázatok társultak. A

kezelésszintű összesítésben kirajzolódó poliaminprofilokat és azok iránybeli eltéréseit a 31. ábra mutatja be.



31. ábra: A genotípus szerint feloldott poliaminprofilok (DAP, PUT, CAD, SPD, SPM) kezelésszintű összesítése T1, T2 és kontroll (K) kezelések alatt, kiemelve a következetes iránybeli különbségeket és a kezelésekhez kapcsolódó metabolikus mintázatokat a 2025. évi feltárási GC–MS adatsorban.

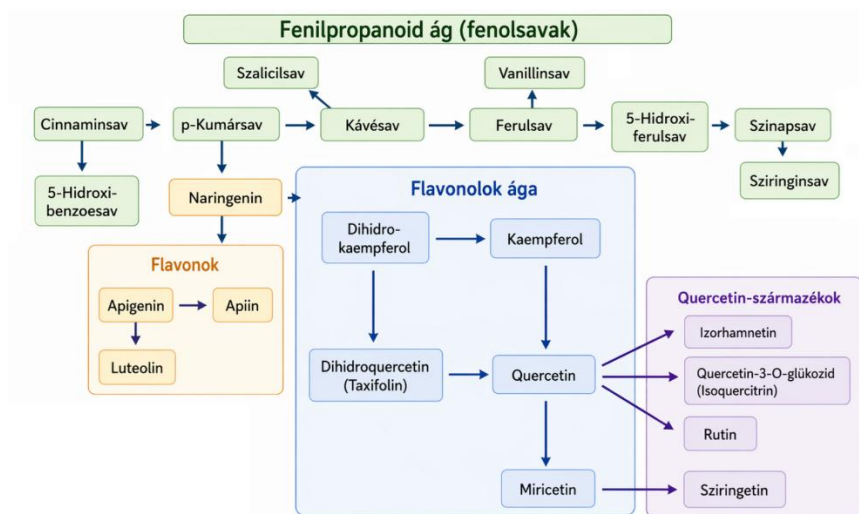
4.5.3 A poliamin mintázatok összegző értékelése

Összességében a 2025. évi végi poliaminprofilok arra utaltak, hogy a mikroalga-kezelések a vizsgált metabolitok szintjén is strukturáltak, bár nem minden komponens esetében azonos irányú eltolódásokkal jártak

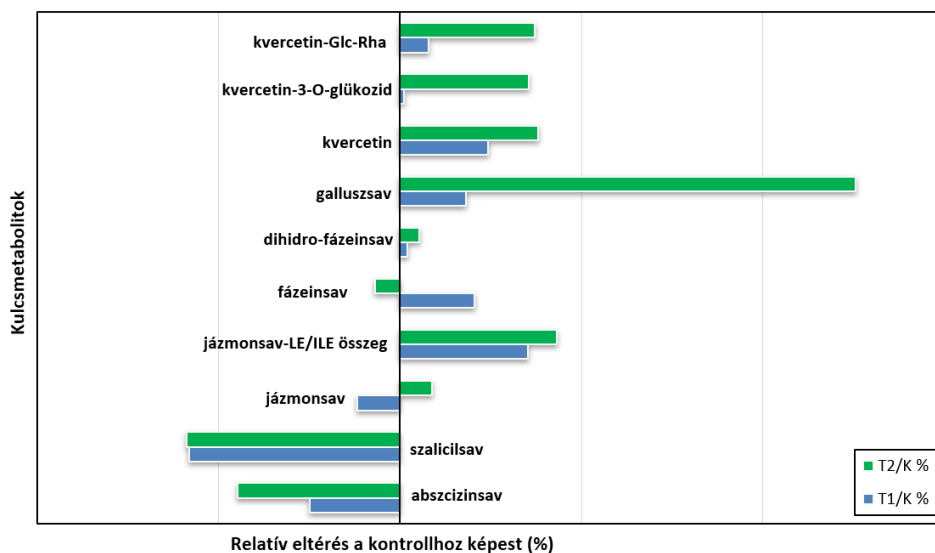
együtt. A legkövetkezetesebb mintázat a DAP és részben az SPD esetében volt megfigyelhető, míg a PUT és az SPM nagyobb fajtafüggő változékonyságot mutatott. Mivel ez az adatsor feltáró jellegű volt, az eredmények elsősorban mintázatileírásra és további vizsgálatok megalapozására alkalmasak.

4.5.4 Hormon- és fenolvegyület-profilok ugyanazon végponti mintakészletben

A 2025. évi végponti mintákhoz kapcsolódó célzott hormon- és fenolvegyület-panel ugyanazon 18 mintából származott, mint a poliaminprofil-vizsgálat, ezért az eredményeket azzal összefüggésben, feltáró jelleggel értelmeztük. A vizsgált kulcsmetabolitok biokémiai kapcsolatrendszerét a 32. ábra, a kontrollhoz viszonyított relatív eltéréseket a 33. ábra, míg a legfontosabb százalékos változásokat a 7. táblázat foglalja össze.



32. ábra: A 2025. évi végponti mintákban vizsgált főbb fenilpropa-
noid-, flavonoid- és kapcsolódó fenolos vegyületek sematikus biokémiai
kapcsolatrendszere. Az ábra szemléltető céllal készült, és a mért kompo-
nensek ismert anyagcsere-kapcsolatait foglalja össze.



33. ábra: A kulcsmetabolitok kontrollhoz viszonyított relatív eltérése [%]
a T1 és T2 kezelésekben a 2025. évi végponti minták alapján

Kulcsmetabolit	T1/K [%]	T2/K [%]
Abszcizinsav	-24,98%	-44,71%
Szalicilsav	-58,20%	-58,90%
Jázmonsav	-11,83%	8,89%
Jázmonsav-LE/ILE összeg	35,15%	43,18%
Fázeinsav	20,42%	-6,99%
Dihidro-fázeinsav	2,08%	5,31%
Galluszsav	18,22%	125,66%
Kvercetin	24,36%	38,00%
Kvercetin-3-O-glükozid	1,00%	35,54%
Kvercetin-Glc-Rha (glükóz–ramnóz konjugátum)	7,79%	37,13%

7. táblázat: A kiválasztott kulcsmetabolitok kontrollhoz viszonyított relatív eltérése (%) a T1 és T2 kezelésekben.

Az útvonalábra, az összesítő oszlopdiagram és a numerikus táblázat együttesen arra utalnak, hogy a mikroalga-biomassza kezelésekhöz nem egyetlen izolált metabolitváltozás, hanem több, egymással biokémiaiilag összefüggő komponens eltolódása társult. A hormonális komponensek közül az abszcizinsav és a szalicilsav mindkét kezelésben csökkenő irányú eltérést mutatott, míg a jázmonsav és a jázmonsav-LE/ILE összeg vegyesebb, de biológiailag értelmezhető mintázatot jelzett. A fenolos és flavonoid jellegű komponensek között különösen a galluszsav, a kvercetin, a kvercetin-3-O-glükozid és a kvercetin-Glc-Rha típusú komponensek mutattak pozitív eltolódást, több esetben a T2 kezelésben nagyobb mértékben. Ez összhangban van azzal, hogy a kezelt mintákban a másodlagos anyagcsere több, egymással összefüggő ága is módosulhatott. A bemutatott eltérések ugyanakkor nem megerősítő erejű, következtető statisztikai

bizonyítékként, hanem ugyanazon végponti mintakészlet több metabolit-rétegű, feltáró jellegű leírásaként értelmezendők. A pontos adatokat a 15. melléklet tartalmazza.

4.5.5 A metabolitprofilok összegző értékelése

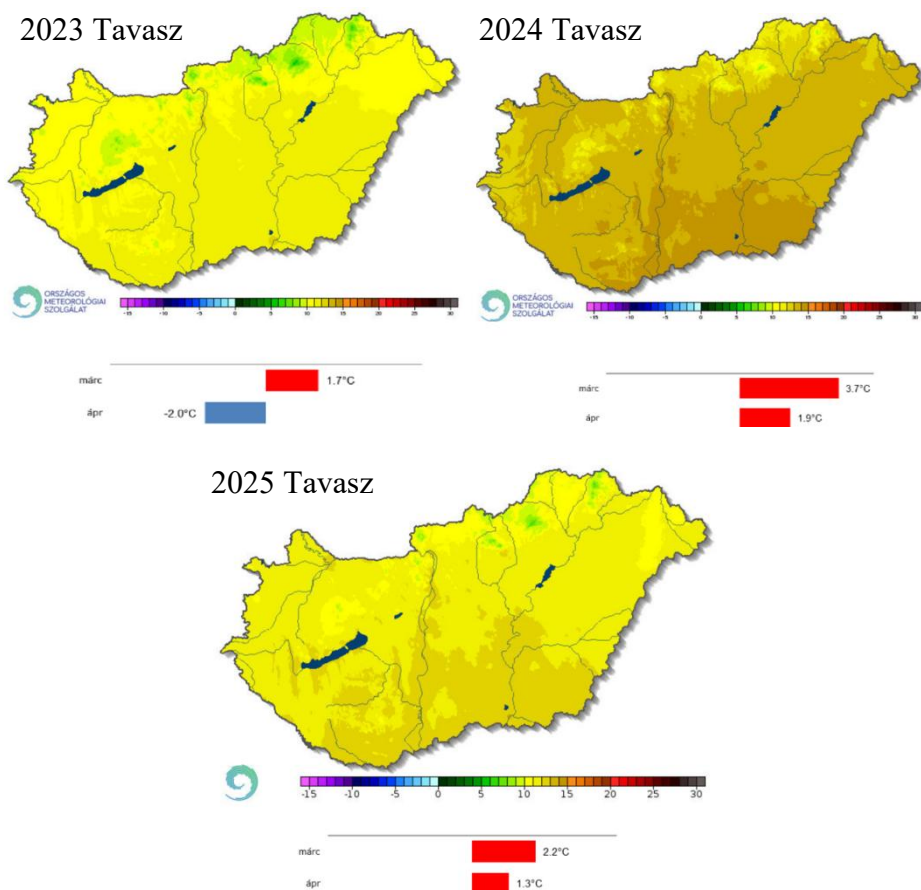
Összességében a 2025. évi végponti mintákból származó feltáró metabolitprofilok arra utaltak, hogy a mikroalga-kezelésekhez nemcsak poliamin-, hanem hormonális és fenolos/flavonoid jellegű eltérések is kapcsolódhattak. A poliaminprofilokban a legkövetkezetesebb mintázat a DAP és részben az SPD esetében volt megfigyelhető, míg a kiegészítő hormon- és fenolvegyület-panel alapján a kezelésekhez kapcsolódó válaszok több, egymással összefüggő másodlagos anyagcsere-útvonal szintjén is értelmezhetők voltak. Mivel valamennyi itt bemutatott adatsor ugyanazon 18 végponti mintából származott, ezek együttesen a mikroalga-biomassza kezelésekhez kapcsolódó növényi állapot komplexebb, de továbbra is feltáró jellegű metabolit-szintű jellemzését tették lehetővé. Az eredmények ezért elsősorban mintázatlanleírásra, mechanisztikus értelmezésre és további célzott vizsgálatok megalapozására alkalmasak.

4.6 Környezeti háttér integrált értelmezése

A hároméves biológiai adatsor értelmezésének alátámasztására a környezeti háttérrel több léptékben is dokumentáltuk. Ennek célja nem a kezeléshatások közvetlen meteorológiai magyarázata volt, hanem annak bemutatása, hogy a kísérleti időszakok eltérő évjáráti körülmények között zajlottak.

4.6.1 Első szint: Országos referencia: klímaanómália-térképek az 1991–2020-as időszakhoz viszonyítva

Országos léptékben a tavaszi hőmérsékleti anomáliatérképeket használtuk referenciaként annak bemutatására, hogy az egyes kísérleti szezonok miként viszonyultak az 1991–2020-as klimatológiai normálhoz. Az országos adatok alapján 2024-et jellemezte a legerőteljesebb pozitív hőmérsékleti anomália, míg 2023 és 2025 mérsékeltebb eltérést mutatott. Ezek az adatok külső viszonyítási keretet biztosítottak a szezonok évjáratí összehasonlításához. Az egyes kísérleti évek országos léptékű hőmérsékleti eltéréseit a 34. ábra szemlélteti.

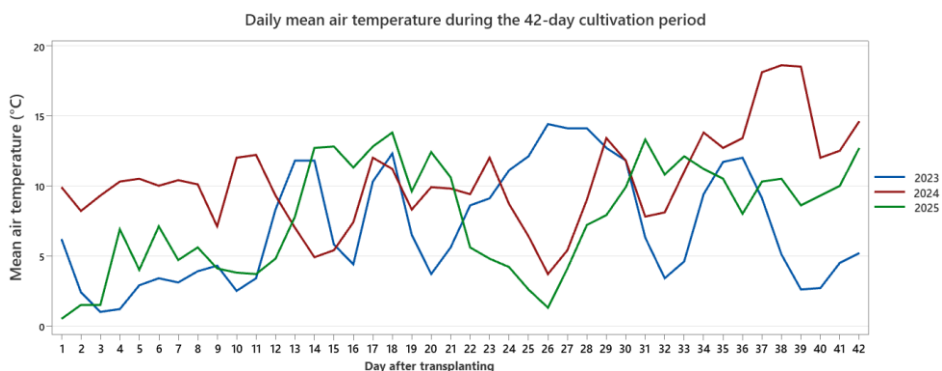


34. ábra: A tavaszi (március–április) középhőmérsékleti anomáliák összehasonlítása Magyarországon 2023 és 2025 között, az 1991–2020-as klimatológiai referencia-időszakhoz viszonyítva (Forrás: HungaroMet, 2025).

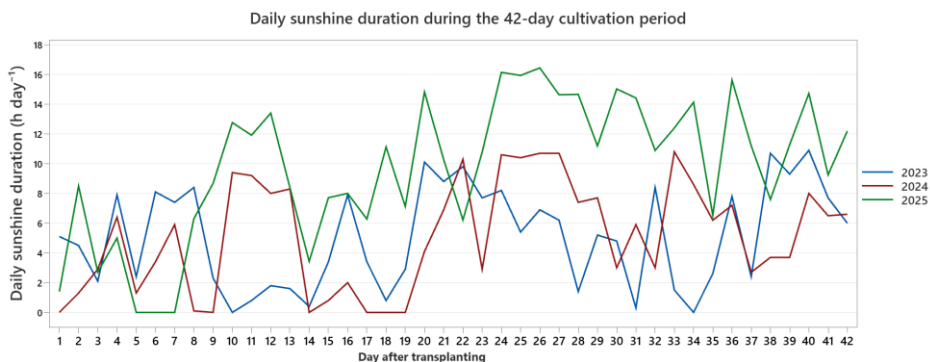
Az országos térképek ugyanakkor csak általános értelmezési háttérrel nyújtottak, és nem alkalmasak a vizsgálati helyszín mikroklimatikus viszonyainak közvetlen leírására, ezért a kezeléshatások közvetlen magyarázatára nem használtuk őket.

4.6.2 Második szint: Regionális makroklíma-adatok

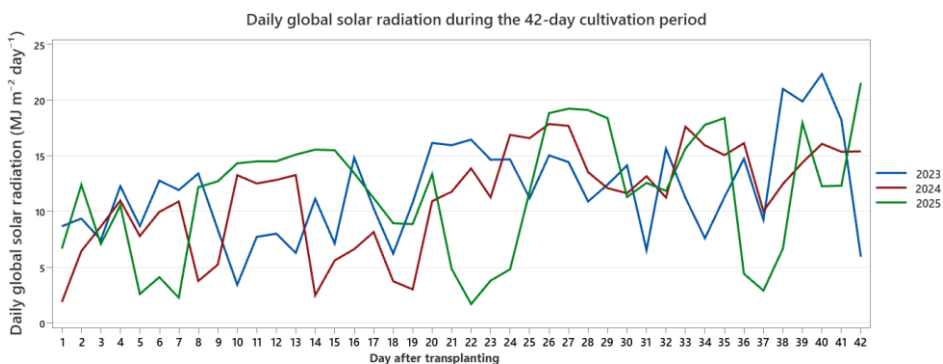
A szezonális háttér részletesebb jellemzéséhez a Széchenyi István Egyetem által üzemeltetett UniSense agrometeorológiai monitoringrendszer napi meteorológiai adatait használtuk fel. Az elemzés során a levegő napi középhőmérsékletét, a napi napsütéses időtartamot és a napi globál-sugárzást vettük figyelembe, minden esetben a tényleges, 42 napos termesztési periódusokra szűkítve (Széchenyi István University, 2023–2025). A három termesztési év során mért regionális makroklimatikus paraméterek időbeli alakulását a 35–37. ábrák mutatják be.



35. ábra: Napi középhőmérséklet a 42 napos termesztési időszak alatt (2023–2025).



36. ábra: Napi napsütéses időtartam a 42 napos termesztési időszak alatt (2023–2025).



37. ábra: Napi globálisugárzás a 42 napos termesztési időszak alatt (2023–2025).

A regionális makroklíma-viszonyok részletesebb értékelése érdekében a vizsgált időszakok meteorológiai adatainak leíró statisztikai összegzését is elvégeztem. A három termesztési év közötti különbségek kvantitatív összehasonlítását a 8. táblázat teszi lehetővé. Az összesített mutatók jól szemléltetik a hőmérsékleti és fényviszonyok évjáratonkénti eltéréseit, amelyek a növények fejlődésére is hatással lehettek. Ezek az adatok alapot szolgáltatnak a későbbi eredmények értelmezéséhez és az évjárat-hatás elkülönítéséhez.

Változó	Év	N	Átlag	Átlag Stan- dard hi- bája	Szórás	Min	Max
T [°C] Átlag	2023	42	7.12857	0.629421	4.07911	1	14.1
	2024	42	10.3833	0.521745	3.38129	3.7	18.6
	2025	42	7.78333	0.594847	3.85505	0	13.8
Napi napsüté- ses időtartam (óra)	2023	42	5.07857	0.532169	3.44885	0	10.9
	2024	42	5.15714	0.566825	3.67345	0	10.8
	2025	42	9.73855	0.728675	4.72235	0	16.44
Napi globálisu- gárzás (MJ/m ²)	2023	42	11.856	0.66732	4.32473	3.429	22.317
	2024	42	11.2768	0.694955	4.50382	1.876	17.837
	2025	42	11.5118	0.840321	5.4459	1.688	21.534

8. táblázat: Környezeti paraméterek leíró statisztikája

A regionális adatok alapján a három termesztési ciklus szezonális lefutása összességében hasonló volt, ugyanakkor a hőmérsékleti és fényellátottsági háttér intenzitásában különbségek mutatkoztak. A 2023-as időszak viszonylag hűvösebbnek és változékonyabbnak bizonyult, 2024 melegebb körülmények között zajlott, míg 2025-ben a fényellátottság volt kedvezőbb. Ezeket az eltéréseket az évjáratí háttér részeként vettük figyelembe. A környezeti paraméterek leíró statisztikái az 5. számú mellékletben szereplő napi meteorológiai adatokból kerültek kiszámításra.

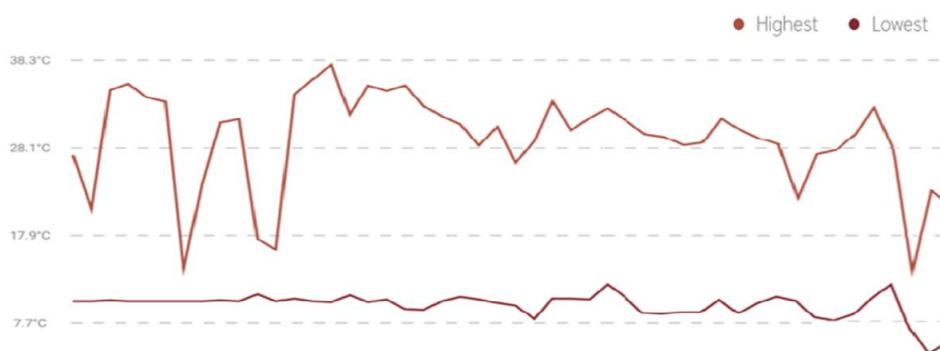
4.6.3 Harmadik szint: Helyszíni környezeti háttér a fóliasátorban

A helyszíni dokumentáció elsődlegesen a fóliasátor hőmérsékleti viszonyainak nyomon követésére és a termesztés üzemserű ellenőrzésére irányult. A hőmérsékleti szélsőértékek rögzítése közvetlenebb képet adott a növényeket érő helyszíni környezeti terhelésről. A relatív páratartalmat a termesztés során üzemserűen ellenőriztük, erről azonban nem állt

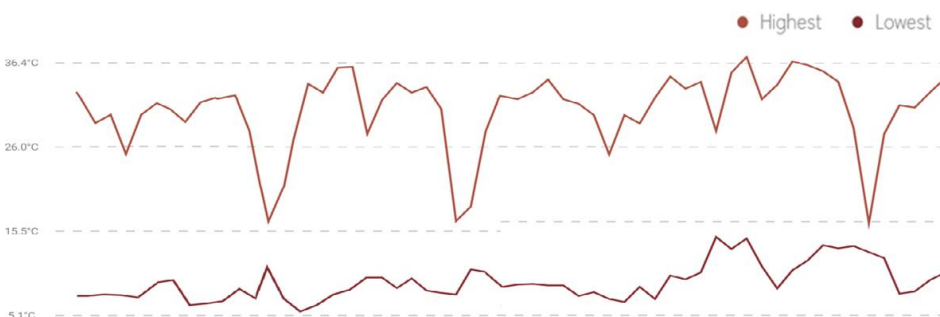
rendelkezésre teljes, folyamatos írásos adatsor. Ennek megfelelően a helyszíni környezeti háttér értelmezése elsősorban a hőmérsékleti adatokra és az általános termesztési tapasztalatokra támaszkodott. A fóliasátor helyszíni hőmérsékleti viszonyainak évjáratonkénti alakulását a 38–40. ábrák mutatják be.



38. ábra: A fóliasátor helyszíni hőmérsékleti alakulása 2023-ban



39. ábra: A fóliasátor helyszíni hőmérsékleti alakulása 2024-ben



40. ábra: A fóliasátor helyszíni hőmérsékleti alakulása 2025-ben

A helyszíni ábrák ezért elsősorban a fóliasátor hőmérsékleti környezetének szemléltetését szolgálták, míg a páratartalomra vonatkozó helyszíni megfigyelések csak kiegészítő, üzemszerű háttérinformációként kerültek figyelembevételre.

4.6.4 A környezeti adatok szerepe az eredmények értelmezésében

A környezeti adatsorokat arra használtuk, hogy értelmezési keretet adjunk a biomasszában, a morfológiai paraméterekben és az élettani jellemzőkben megfigyelt évjáráti különbségeknek. Az országos, regionális és helyszíni környezeti adatok együttesen azt a célt szolgálták, hogy értelmezési háttérrel adjanak a három termesztési év között megfigyelt különbségekhez. Ezeket az adatsorokat nem a kezeléshatások közvetlen magyarázatára használtuk, hanem annak bemutatására, hogy a kísérletek eltérő évjáráti körülmények között zajlottak. A biológiai eredmények értelmezése ezért elsődlegesen az adott éven belüli kontroll–kezelés összehasonlítására, valamint a válaszmintázatok évek közötti következetességére épült.

4.7 Kiegészítő fogyasztói attitűd-felmérés eredményei és azok gyakorlati értelmezése

4.7.1 A felmérés szerepe a kutatásban

A mikroalga-alapú biostimuláns stratégiák agronómiai hatékonysága önmagában még nem jelzi azok piaci relevanciáját, mivel a gyakorlati alkalmazhatóság megítéléséhez az is fontos, hogy a fogyasztók miként viszonyulnak a csökkentett növényvédőszer-használathoz, és hajlandók-e felárat fizetni az ilyen módon előállított dísnövényekért.

Ennek vizsgálatára 2024-ben rövid, deklarált preferencián alapuló kérdőíves felmérést végeztünk (6 kérdés; $n = 260$ érvényes válasz). A felmérés célja a csökkentett növényvédőszer-használat fogyasztói megítélésének, valamint az ezért elfogadhatónak tartott felár mértékének számszerű jellemzése volt (Mitchell & Carson, 1989).

4.7.2 A kérdőív felépítése és az alkalmazott elemzési módszer

A kérdőív a válaszadók korcsoportjára, vásárlási gyakoriságára, a beszerzés jellemző csatornáira, a csökkentett növényvédőszer-használat jelentőségének megítélésére, valamint a környezetkímélőben előállított dísznövényekért elfogadhatónak tartott felár mértékére irányult. A válaszok értékelése leíró statisztikai módszerekkel történt.

A felárfizetési hajlandóságra vonatkozó eredmények értelmezése ugyanakkor körültekintést igényel, mivel ezek deklarált preferenciákon alapuló, hipotetikus válaszok, nem pedig tényleges vásárlási döntések. Az ilyen típusú felmérések ismert korlátja a hipotetikus torzítás, vagyis az, hogy a megjelölt és a valós fizetési hajlandóság eltérhet egymástól (List & Gallet, 2001).

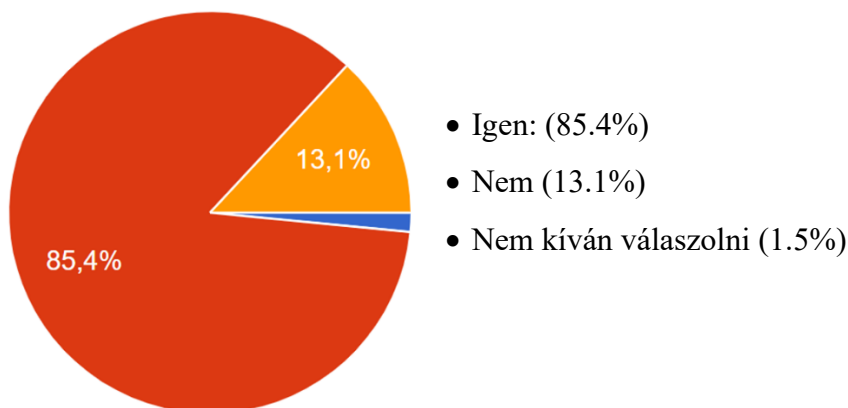
4.7.3 A válaszadók jellemzői és vásárlási szokásai

A válaszadók körében elsősorban a középkorú felnőtt korosztály képviseltette magát. A legnagyobb csoportot az 1981 és 1990 között születettek alkották (27,7%), ezt követték az 1961 és 1970 között (20,8%), majd az 1971 és 1980 között születettek (16,9%). A vásárlási gyakoriság alapján a minta többsége évente vásárol balkon- vagy dísznövényeket; ez 204 főt, vagyis a válaszadók 78,5%-át jelentette.

A leggyakoribb beszerzési csatorna a közvetlen termelői értékesítés volt (62,3%), ezt követte a piac (20,8%), míg a szupermarketek és kerteszi áruházak kisebb arányt képviseltek. Ez arra utal, hogy a csökkentett vegyszerhasználathoz kapcsolódó információk közvetítésére elsősorban a közvetlen értékesítési csatornák lehetnek alkalmasak.

4.7.4 A csökkentett növényvédőszer-használat fontossága

A csökkentett növényvédőszer-használatot a válaszadók nagy többsége fontosnak ítélte. A kérdésre 85,4% igennel, 13,1% nemmel válaszolt, míg 1,5% nem adott választ. A válaszok megoszlását a csökkentett növényvédőszer-használat megítéléséről a 41. ábra szemlélteti.

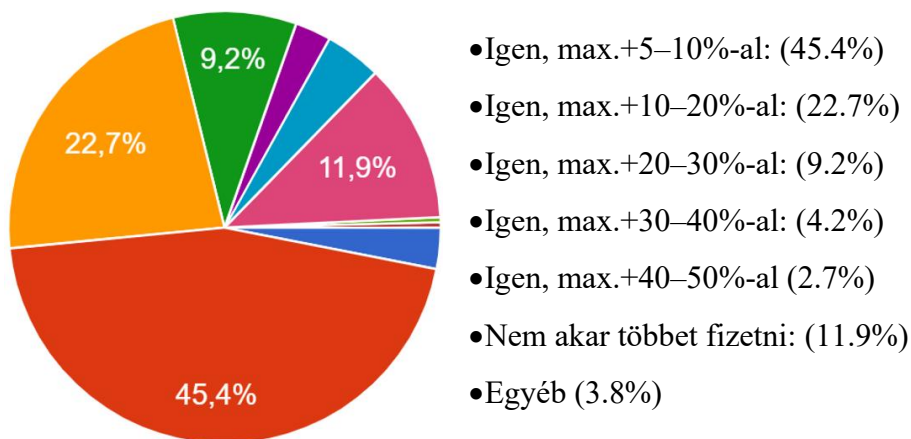


41. ábra: A válaszok megoszlása a következő kérdésre: „Fontosnak tartja-e, hogy az Ön által vásárolt dísznövényeket a lehető legkevesebb vegyszer felhasználásával állítsák elő?”

Az eredmények azt mutatják, hogy a csökkentett vegyszerhasználat nem csupán szűk fogyasztói csoport számára releváns szempont, hanem a válaszadók többsége számára érdemi értéket képvisel.

4.7.5 Felárvállalási hajlandóság a csökkentett vagy vegyszermentes termesztésű dísnövényekért

A felárvállalásra vonatkozó kérdésnél a válaszadók előre megadott százalékos sávok közül választhattak. A leggyakoribb válasz az 5–10%-os felár volt (45,4%), ezt követte a 10–20%-os sáv (22,7%). A válaszadók 11,9%-a nem vállalna többletköltséget, míg a magasabb felárkategóriák kisebb arányban jelentek meg. A 20–30%-os felárat 9,2%, a 30–40%-os sávot 4,2%, a 40–50%-os többletet pedig 2,7% jelölte meg, míg az „egyéb” kategóriát 3,8% választotta. A felárvállalási hajlandóság megoszlását a 42. ábra mutatja be.



42. ábra: A kapcsolódó kérdőívre adott válaszok összesítése a következő kérdésre: „Hajlandó lenne-e magasabb árat fizetni olyan dísnövényekért, amelyeket csökkentett vegyszerhasználattal vagy teljesen növényvédőszer nélkül termesztettek?”

Az összes pozitív felárkategóriát összegezve a válaszadók 84,2%-a jelezte, hogy valamilyen mértékű többletfizetést elfogadhatónak tartana. A kereslet túlnyomó része ugyanakkor legfeljebb 20%-os felárnál

koncentrálódott, ami inkább mérsékelt prémiumszintre, mintsem magas árpozicionálásra utal.

Leíró közelítésként, a válaszsávok középértékeivel számolva, a többletfizetést elfogadó válaszadók körében az átlagos jelzett felár megközelítőleg 12,4%, a medián pedig 7,5% volt. Ezeket az értékeket kizárólag tájékoztató, leíró jelleggel közöljük, és nem tekintjük tényleges piaci árprémium becslésének. A kérdőív teljes formája a 10. számú mellékletben, míg az eredmények részletes összesítése a 11. számú mellékletben található.

4.7.6 Gyakorlati gazdasági értelmezés

A felmérés alapján a csökkentett növényvédőszer-használat kedvező fogyasztói megítéléssel társult. A válaszadók többsége ezt értékes tulajdonságnak tekintette, és valamilyen mértékű, jellemzően mérsékelt felár vállalására is nyitottnak mutatkozott. A gyakorlati piaci értelmezés szempontjából az 5–10%-os, illetve a 10–20%-os ársáv tűnik a legrealisabb tömegpiaci tartománynak.

Ugyanakkor a felmérés nem igazolja ténylegesen realizálódó piaci árprémium fennállását. Nem állapítható meg belőle, hogy a fogyasztók valószínű vásárlási helyzetben is ugyanezeket a döntéseket hoznák-e, és az sem, hogy a felárvállalás mögött mely tényezők játszanak elsődleges szerepet. Mivel a minta nem tekinthető reprezentatív országos lakossági mintának, az eredmények elsősorban irányjelző jellegűek, és nem általánosítható piacbecsleseként értelmezendők.

4.7.7 Módszertani korlátok

A válaszadói kör önként jelentkező, növények iránt érdeklődő személyekből állt, ezért valószínűsíthető, hogy a minta a környezettudatosabb és minőségérzékenyebb fogyasztókat felülreprezentálja. Ez egyaránt felfelé torzíthatta a csökkentett vegyszerhasználat jelentőségének megítélését és a felárvállalási hajlandóságot. Emellett a felárra vonatkozó válaszlehetőségek tág, diszkrét kategóriák voltak, amelyek gyors piaci jelzésre alkalmasak, de kisebb pontosságot nyújtanak, mint egy részletesebb választási kísérlet vagy tényleges vásárlási megfigyelés (Lancsar & Louviere, 2008; List & Gallet, 2001).

4.7.8 A fejezet következtetése

A 2024. évi kérdőíves felmérés erős fogyasztói nyitottságot jelzett a csökkentett vegyszerhasználattal termesztett dísnövények iránt. A válaszadók 85,4%-a fontosnak tartotta ezt a szempontot, és 84,2% valamilyen mértékű felár vállalására is nyitottnak mutatkozott. A legjellemzőbb elfogadható többlet az 5–10%-os, illetve a 10–20%-os sávba esett, ami arra utal, hogy piaci szempontból a mérsékelt prémium lehet a legreálisabb.

Mivel azonban ezek az adatok deklarált preferenciákon alapulnak, elsősorban piaci jelzésként és a gyakorlati relevancia kiegészítő alátámasztásaként értelmezhetők (Mitchell & Carson, 1989; List & Gallet, 2001). A fejezet eredményei ezért nem a biológiai hatások közvetlen igazolását szolgálják, hanem azok lehetséges termesztéstechnológiai és piaci relevanciájának kiegészítő értelmezését.

5. AZ EREDMÉNYEK MEGVITATÁSA

5.1 Mikroalga-biostimulánsok alkalmazásának kontextusa és indokltsága a dísznövénytermesztésben

A dísznövénytermesztésben a növényminőség, az állomány homogenitása és az értékesíthetőség kiemelt jelentőségű szempontok. Ebben a termesztési rendszerben a mikroalga-alapú biostimulánsok ígéretes megközelítésnek tekinthetők, mivel a növényi teljesítményt többféle mechanizmuson keresztül kedvezően befolyásolhatják anélkül, hogy hagyományos műtrágyaként vagy növényvédő szerként működnének (du Jardin, 2015; Calvo et al., 2014; Bulgari et al., 2015). Jelen munka központi kérdése annak vizsgálata volt, hogy a mikroalga-kezelések gyakorlati fóliasátras körülmények között, több egymást követő év során is kimutatható és értelmezhető hatást gyakorolnak-e a *Pelargonium* növekedési és minőségi jellemzőire. A 43. ábra az azonos időpontban, a kertészeti állományban megfigyelhető, eltérő fejlettségű *Pelargonium* egyedeket szemlélteti.



43. ábra: Azonos időpontban fényképezett, eltérő fejlettségű Pelargonium egyedek a kertészeti állományban (forrás: saját felvétel)

5.2 Kísérleti logika és értelmezési keret

A vizsgálat két, egymást kiegészítő adattípusra épült. Az egyik az ismételt, nem destruktív mérésekből származó idősor volt, amely a növénymagasság, a levélszám és a bimbószám alakulását követte nyomon a termesztési időszak során. A másik egy végponti, destruktív vizsgálati panel volt, amely a 42. napon lehetőséget adott a biomassa- és szerkezeti jellemzők összehasonlító értékelésére. Ez a kettős megközelítés különösen alkalmas a biostimuláns-hatások vizsgálatára, mivel azok nem feltétlenül azonnali, hanem gyakran fokozatosan kibontakozó válaszok formájában jelentkeznek (Bulgari et al., 2015; Rouphael & Colla, 2020).

Az eredmények értelmezése során ezért nem egyetlen kiugró időpont vagy paraméter túlhangsúlyozására törekedtünk, hanem arra, hogy a

megfigyelt válaszokat azok iránya, mértéke és az egyes évek között mutatkozó következetessége alapján értékeljük.

5.3 Hosszú távú növekedési pályák

Az ismételt mérésekből származó adatsorok alapján a kezelésekhez kapcsolódó különbségek a korai időpontokban még többnyire mérsékeltten jelentkeztek, és elsősorban a termesztési időszak második felében váltak egyértelműbbé. Ennek biológiai szempontból is jelentősége van, mivel a biostimuláns-hatások gyakran nem közvetlenül az átültetést követően, hanem a növekedési folyamat előrehaladtával válnak érzékelhetőbbé. Ez különösen a levélszám és a bimbóképződés alakulásában volt megfigyelhető, ahol a kezelt csoportokhoz köthető kedvező eltolódások főként a középső és késői mérési időpontokban mutatkoztak meg. Mindez arra utal, hogy a biostimuláns-hatások megbízható értékeléséhez a hosszabb időtávú nyomon követés lényegesen informatívabb megközelítést jelent, mint egyetlen időpont vizsgálata a kísérlet végén. A bimbóképződés alakulása *Pelargonium* esetében különösen fontos, mivel a generatív fejlettség előrehaladása közvetlen összefüggésben áll a piacképes megjelenéssel. A jelen eredmények alapján a kezelésekhez társuló kedvező különbségek ezen a téren is elsősorban a termesztési időszak későbbi szakaszában váltak jól érzékelhetővé.

5.4 Végponti biomassa és morfológia

A destruktív mérések szolgáltatták a vizsgálat legszilárdabb kvantitatív alapját. Az eredmények alapján a kezelések szignifikáns hatást gyakoroltak a száraz növénytömegre, a gyökértömegre, a gyökérnyaki átmérőre, valamint a végső növénymagasságra is. A legkifejezettebb és

legkövetkezetesebb válaszok a biomaszafelhalmozódással és a gyökérhez kapcsolódó paraméterekkel összefüggésben jelentkeztek, míg a végső növénymagasság esetében mérsékeltbb eltérések voltak megfigyelhetők.

A gyökérnyaki átmérő növekedése nem csupán leíró morfológiai jelenséggént értelmezhető, hanem a növény szerkezeti stabilitása és kertészeti kezelhetősége szempontjából is funkcionális jelentőséggel bír (Turley & Etchells, 2022). Mindez arra utal, hogy a kezelések hatása elsősorban nem a hajtások megnyúlásának fokozásában, hanem inkább a biomaszafelhalmozódás elősegítésében és a szerkezeti robusztusság javításában nyilvánult meg. Dísnövénytermesztési szempontból ez kedvező válaszmintázatnak tekinthető, mivel a nagyobb növénytömeg és a fejlettebb szerkezeti felépítés piacképesebb állomány kialakulását támogathatja anélkül, hogy az nemkívánatos megnyúlással társulna. A kezelések fajtaszintű eltéréseit részletesen a 8. számú melléklet tartalmazza.

5.5 A levélpigment-eredmények értelmezése

A klorofilltartalmat a fotoszintetikus állapot kiegészítő élettani mutatójaként értelmeztük. A klorofillváltozások önmagukban nem tekinthetők a kezelések „döntő” bizonyítékának, ugyanakkor a biomaszaeredményekkel együtt értelmezve hozzájárulhatnak a kezelések élettani hátterének jobb megértéséhez. A klorofilltartalom alakulását rövid távú környezeti tényezők is erősen befolyásolhatják, ezért ennek értelmezésekor az évi járási háttér figyelembevétele különösen fontos (Lichtenthaler, 1987; Taiz et al., 2023).

5.6 A feltáró metabolit-eredmények értelmezése

A metabolit-szintű megfigyeléseket a jelen munkában elsősorban a poliaminprofilok szintjén értelmeztük. A poliaminprofilok a kezelt és a kontroll növények között biokémiai különbségeket jeleztek, de ezek nem tekinthetők önmagukban bizonyítéknak. Inkább arra utalnak, hogy a kezelésekhöz élettani állapotváltozások is kapcsolódhattak, amelyek a növekedésszabályozással és a stresszhez kötődő anyagcsere-folyamatokkal lehetnek összefüggésben (Alcázar et al., 2010; Kusano et al., 2008; Tiburcio et al., 2014).

Fontos ugyanakkor, hogy ezek az adatok kizárólag a 2025. évi szezon végén készültek, ezért értelmezésük korlátozott. A metabolit eredmények így a fenotípusos és élettani megfigyelések kiegészítéseként szolgálnak, és elsősorban az eredmények értelmezését támogatják.

5.7 A környezeti háttér integrált értelmezése

A több szinten dokumentált környezeti háttér azt mutatta, hogy a három termesztési év meteorológiai szempontból nem volt azonos. Ennek ellenére a kezelések relatív sorrendje és a válaszok fő iránya több végpontnál hasonló maradt. Ez erősíti azt az értelmezést, hogy a megfigyelt mintázatok nem vezethetők vissza kizárólag évjáráti különbségekre.

Ugyanakkor a környezeti adatokat nem tekintettük a kezeléshatások közvetlen bizonyítékának. Ezek elsősorban ahhoz járultak hozzá, hogy az évek közötti eltérések hátterét jobban megértsük, és a biológiai eredményeket megfelelő kontextusban értelmezzük. A környezeti háttér értelmezéséhez a 44. ábra a bősárkányi virágkertészet fóliasátras termesztőterét szemlélteti.



44. ábra: A bősárkányi virágkertészet fóliasátras termesztőtere (forrás: saját felvétel)

5.8 Statisztikai elemzés és modell-diagnosztika

A záró időpontban rögzített biomassa- és strukturális változók elemzését faktoriális általános lineáris modellel végeztük. A modellben a kezelés, a fajta és az év fix tényezőként szerepelt, valamint figyelembe vettük ezek kétutas interakcióit is. A nem destruktív, ismételt mérések értékelése külön, időfüggő megközelítésben történt.

A modell-diagnosztikai vizsgálatok alapján a GLM alkalmazása a vizsgált destruktív mintavétellel nyert változók esetében megfelelőnek bizonyult. A kezelés $\times$ év interakció nem szignifikáns volta azt jelzi, hogy a jelen vizsgálatban nem volt statisztikai bizonyíték évspecifikus kezelési

eltérésre, míg a szignifikáns kezelés $\times$ fajta interakciók a válasz fajtafüggő jellegét mutatják.

A varianciák homogenitását Levene-próbával ellenőriztük. Az eredményeket a 9. táblázat foglalja össze.

Változó	Ryan–Joiner próba	Levene-próba	Értékelés
Száraz tömeg	$p < 0.01$	0.494	Elfogadható
Gyökértömeg	0.023	0.344	Elfogadható
Növénymagasság	> 0.10	0.031	Enyhe heteroszkedaszticitás
Gyökérnyaki átmérő	> 0.10	0.414	Elfogadható

9. táblázat: A GLM-reziduumok normalitásvizsgálata (Ryan–Joiner) és varianciahomogenitási próbája (Levene-próba)

A növénytörzs magasság és a gyökérnyaki átmérő esetében a normalitástól való eltérés nem volt számottevő, amit a próbaeredmények és a valószínűségi ábrák egyaránt alátámasztottak. A gyökértömeg és különösen a száraz tömeg esetében ugyan kimutatható volt némi eltérés a szigorú normalitástól, ezek azonban elsősorban kisebb eltérésekben jelentkeztek, és nem utaltak súlyos szerkezeti torzulásra vagy kiugró értékek okozta problémára.

A varianciák homogenitása a száraz tömeg, a gyökértömeg és a gyökérnyaki átmérő esetében megfelelőnek bizonyult. A növénytörzs magasság esetében a Levene-próba enyhe eltérést jelzett, azonban a csoportok közötti szóráskülönbség mértéke nem volt jelentős. Ezért a modell

eredményeit ennél a válaszváltozónál is megtartottuk, ugyanakkor az értelmezés során nagyobb hangsúlyt kapott a hatások irányának következtessége és a kezelések közötti mintázat, mint az egyes határérték közeli szignifikanciák.

Összességében megállapítható, hogy a faktoriális GLM alkalmazásának feltételei a jelen adatszerkezet mellett megfelelő mértékben teljesültek. Ezt a kiegyensúlyozott kísérleti elrendezés, az azonos ismétlésszám, a többnyire elfogadható varianciaviszonyok, valamint a normalitástól való csupán mérsékelt eltérések együttesen támasztják alá. Ennek alapján a modell alkalmasnak bizonyult a kezelés, a fajta és az évjárat hatásának, valamint ezek kölcsönhatásainak értékelésére a biomasszával és a strukturális tulajdonságokkal kapcsolatos válaszváltozók esetében.

A modell-diagnosztikai eredmények részletes közlését az átláthatóság indokolja. Az eredmények értelmezése során ezért nem kizárólag a szignifikanciaszintekre, hanem az átlagok, a 95%-os konfidencia intervallumok, valamint a kezelési hatások irányának és következtettségének együttes mérlegelésére támaszkodtunk.

A teljes ANOVA-kimeneteket, beleértve a főhatásokat és interakciókat, a mellékletek tartalmazzák. A kezelés $\times$ év interakció nem szignifikáns volta a jelen vizsgálatban azt jelzi, hogy nem volt statisztikai bizonyíték arra, hogy a kezelések hatása az egyes évjáratok között eltérő mintázatot mutatott volna. A szignifikáns kezelés $\times$ fajta interakciók ugyanakkor arra utalnak, hogy a válaszreakciók mértéke fajtafüggő volt.

5.9 A vizsgálat fókusza és korlátai

A vizsgálat legfontosabb erőssége a többéves, gyakorlati termesztési körülmények között végzett összehasonlítás. Ugyanakkor több

korlátot is figyelembe kell venni. A destruktív végponti mintavétel fajta $\times$ kezelés $\times$ év kombinációnként $n = 6$ növényre korlátozódott. Ez módszertanilag indokolt volt, de csökkenti a statisztikai erőt, ezért az eredmények értelmezésében különösen fontos a hatásmagyságok és a mintázatok következetessége.

További korlát, hogy a vizsgálatban egyetlen dózisszintet és egyszeri, átültetési korigén kijuttatást alkalmaztunk, ezért az eredmények nem adnak alapot dózis–hatás összefüggések vagy ismételt kezelések értékelésére. A metabolit adatok szintén korlátozottak, mivel csak egy évből és egy időpontból származnak.

A környezeti háttér dokumentálása erősíti az eredmények értelmezését, de nem helyettesíti a közvetlen ok-okozati bizonyítást. A jelen értekezés legerősebb állításai ezért a több évben ismételten vizsgált morfológiai és biomasszaalapú végpontokhoz kapcsolhatók, míg az élettani, biokémiai és metabolit eredmények ezek értelmezését támogató, eltérő bizonyító erejű kiegészítő adatokként kezelhetők.

5.10 Gyakorlati jelentőség

A mikroalga-alapú biostimulánsok gyakorlati jelentősége nemcsak a közvetlen növényélettani hatásokban rejlik, hanem abban is, hogy a technológiai fejlődés egyre inkább lehetővé teszi a mezőgazdasági célú, standardizálható biomassza-előállítás. Az utóbbi években külön figyelem irányult a mikroalga-alapú bioműtrágyák és biostimulánsok fejlesztési lehetőségeire, valamint kertészeti alkalmazhatóságukra (Miranda et al., 2024; Jurado-Flores et al., 2025; Prisa & Spagnuolo, 2023). A mikroalga-termesztés technológiai fejlődése a nagyobb léptékű, célzott mezőgazdasági felhasználás műszaki megalapozását is támogatja (Penloglou et al., 2024).

A jelen vizsgálat gyakorlati értékét az adja, hogy a kedvező irányú növekedési válaszok nem egyetlen szezonban, hanem három egymást követő termesztési ciklusban jelentkeztek, ami a fóliasátras dísnövénytermesztés szempontjából különösen fontos. A biostimulánsok jelentősége az intenzív üvegházi termesztésben abból a szempontból is figyelemre méltó, hogy nemcsak a növekedési teljesítményt, hanem a minőségi tulajdonságokat is kedvezően befolyásolhatják, amit más kertészeti rendszerekben, például talaj nélküli paradicsomtermesztésben is leírtak (Dasgan et al., 2024). A mikroalgakon és cianobaktériumokon alapuló készítmények ezen a területen különösen ígéretesek, mivel számos bioaktív vegyületet tartalmaznak, miközben környezeti perzisztenciájuk alacsony és toxikológiai profiljuk kedvező (Sharma et al., 2012; El Arroussi et al., 2018). Számos kutatás kimutatta, hogy ezek a kezelések különböző kultúrnövényekben és dísnövényekben is javíthatják a növekedési teljesítményt, a fiziológiai hatékonyságot és a stressztűrést, ezért inkább az integrált termesztési rendszerek kiegészítő elemeiként, nem pedig a hagyományos növényvédő szerek közvetlen helyettesítőiként értelmezhetők (Renuka et al., 2018). A jelen vizsgálatban három egymást követő termesztési ciklus során a mikroalga-alapú kezelések több növényi paraméterben is következetesen pozitív irányú változásokkal jártak. Az összesített adatok alapján a kezelések növekedést eredményeztek a száraz tömegben, a friss tömegben, a gyökértömegben és a gyökérnyaki átmérőben, miközben a növénymagasság változása mérsékeltebb maradt. Ez arra utal, hogy a kezelések elsősorban a biomassza-felhalmozódást és a strukturális robusztusságot befolyásolták, nem pedig a hajtások túlzott megnyúlását.

A környezeti háttér több szinten történő dokumentálása támogatta az évjárat eltérések értelmezését, de a kezelések összehasonlítása

elsődlegesen az éven belüli kontroll–kezelés kontrasztokra épült. Az eredmények alapján a MACC törzsekből származó mikroalga-kezelések gyakorlati relevanciával bírhatnak biostimulánsként a *Pelargonium* dísznövénytermesztésben, miközben további kutatások szükségesek a dózisoptimalizálás, az alkalmazási technológia és a hatásmechanizmus pontosabb feltárásához (du Jardin, 2015; Bulgari et al., 2015; Poorter et al., 2012). A jelen vizsgálatban az RNS-hez kapcsolódó metabolit tartalom (poliamin) megfigyelések feltáró jelleggel készültek, ezért nem szolgálnak végleges következtetések alapjául a transzkripció szintű szabályozás tekintetében. Elsődleges szerepük az volt, hogy kiegészítsék a fiziológiai és biokémiai eredményeket, valamint segítsenek kijelölni a jövőbeli, hipotézis vezérelt metabolit szintű vizsgálatok irányát. Az integrált üvegházi termesztési rendszerekben a biostimulánsok nem önálló megoldásként, hanem az in-puthatékonyságot, a fenntarthatósági célokat és a termesztéstechnológiai optimalizálást támogató kiegészítő eszközként értelmezhetők; ezt támasztják alá a közelmúlt üvegházi és összefoglaló vizsgálatai is (Paradiso et al., 2024; Sun et al., 2026). Az eredmények gyakorlati jelentőségét a 45. ábra szemlélteti, amely a *Pelargonium* díszítőértékét és kertészeti felhasználhatóságát mutatja be.



45. ábra: Díszítőérték szempontjából kedvező megjelenésű, fejlett *Pelargonium* állomány kertészeti felhasználásban (forrás: saját felvétel)

5.11 További kutatási irányok

A további vizsgálatokban indokolt lenne különböző dózisszintek, egyszeri és ismételt kijuttatások, valamint eltérő alkalmazási módok összehasonlítása. Érdemes lenne a mikroalga-alapú kezeléseket csökkentett műtrágyaszint mellett, illetve további dísznövényfajokon is vizsgálni. Szükség lenne továbbá a biomassa-allokáció arányainak részletesebb elemzésére, a kijuttatott biomassa pontosabb kémiai jellemzésére, valamint a mikroalga- és esetleges baktériumhatások elkülönítésére is. A metabolit háttér tisztázásához célzott, hipotézisvezérelt génexpressziós vizsgálatokra van szükség (González-Pérez et al., 2022; Brito-Lopez et al., 2025; Vangenechten et al., 2025).

6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A jelen doktori (PhD) disszertáció célja annak vizsgálata volt, hogy a mikroalga- és cianobaktérium-alapú biomaszák kezelése milyen hatást gyakorolnak a *Pelargonium* növekedésére és fejlődésére gyakorlati fóliasátras termesztési körülmények között. A vizsgálat három egymást követő termesztési évre terjedt ki, és ismételt, nem destruktív méréseket, végponti morfológiai és biomaszaalapú vizsgálatokat, valamint kiegészítő élettani és feltáró jellegű másodlagos metabolit (poliamin) tartalom megfigyeléseket egyaránt magában foglalt. A legfontosabb következtetések a több évben, következetesen rögzített morfológiai és biomaszaalapú végpontok alapján vonhatók le.

A legerősebb és legmegbízhatóbban értelmezhető kezelési hatások a száraz növénytömeg, a gyökértömeg és a gyökérnyaki átmérő esetében jelentkeztek. Az átlagos száraz növénytömeg a kontroll 3,53 g-os értékéről 4,21 g-ra nőtt a T1-kezelésben (+19,2%), míg a T2-kezelésben 4,70 g-ot ért el (+33,1%). A gyökértömeg a kontrollban mért $1,51 \pm 0,09$ g-ról $1,84 \pm 0,11$ g-ra emelkedett T1 esetén (+22,3%), illetve $1,87 \pm 0,11$ g-ra T2 esetén (+24,1%). A gyökérnyaki átmérő szintén következetesen meghaladta a kontroll értékét; az összesített növekedés mértéke 9,3% volt T1, illetve 17,0% T2 kezelésben. A végső növénymagasság szintén szignifikáns eltérést mutatott, de kisebb mértékben: a kontroll $22,92 \pm 0,72$ cm-es átlagához képest $25,02 \pm 0,49$ cm-et mértünk T1-ben (+9,2%), illetve $24,74 \pm 0,78$ cm-t T2-ben (+7,9%). A kezeléshatás mind a négy elsődleges végponti változó esetében szignifikáns volt (száraz tömeg: $F = 28,31$; gyökértömeg: $F = 14,15$; gyökérnyaki átmérő: $F = 19,00$; növénymagasság: $F = 8,90$; minden esetben $p < 0,001$). Ez arra utal, hogy a kezelések

elsődlegesen nem a hajtások megnyúlását, hanem a biomassza-felhalmozódást, a gyökérfejlődést és a növények szerkezeti megerősödését támogatták.

Az ismételt, nem destruktív mérésekből álló, három egymást követő termesztési évre kiterjedő adatsor alapján a kezeléshatás legeggyértelműbben a levélszám alakulásában jelentkezett. A 540 növényen végzett összesen 6480 mérésből származó vegyes modell szerint a kezelés főhatása szignifikáns volt ($F = 4,16$; $p = 0,016$), és a kezelés $\times$ idő interakció is szignifikánsnak bizonyult ($F = 4,73$; $p < 0,001$). A 42. napon a levélszám átlaga a kontroll 14,09-es értékéhez képest T1-ben 14,69-re, T2-ben 14,70-re emelkedett, ami 4,2, illetve 4,3%-os növekedésnek felelt meg. A növénymagasság esetében a kezelés főhatása még kimutatható volt ($F = 3,29$; $p = 0,037$), ugyanakkor a kezelés $\times$ idő interakció nem volt szignifikáns ($F = 0,31$; $p = 0,933$), míg a bimbószámnál sem a kezelés főhatása ($F = 2,71$; $p = 0,067$), sem a kezelés $\times$ idő interakció ($F = 1,52$; $p = 0,168$) nem érte el a szignifikancia szintjét. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a biostimuláns hatások megbízható megítéléséhez a hosszabb távú, ismételt nyomon követés informatívabb, mint az egyetlen záró időpontban végzett értékelés.

A három termesztési ciklus között az évjáratí háttér – különösen a hőmérsékleti és fényviszonyok tekintetében – eltéréseket mutatott, ugyanakkor a kezelések fő iránya és relatív sorrendje összességében fennmaradt. Ez arra utal, hogy a megfigyelt válaszmintázatok nem magyarázhatók kizárólag az évek közötti környezeti különbségekkel, és a kezelések hatása eltérő évjáratí háttér mellett is értelmezhető maradt.

A levélpigment-tartalommal kapcsolatos eredményeket nem önálló, döntő bizonyítékként, hanem a morfológiai és biomasszaalapú

megfigyelések élettani kiegészítéseként értelmeztük. A pigmentösszetételben valamennyi vizsgált évben és kezelési kombinációban a klorofill-a dominált, és több fajta esetében a mikroalga-kezelésekhez a kontrollnál magasabb összes pigmenttartalom társult. A legkifejezettebb eltérések 2023-ban és 2024-ben voltak megfigyelhetők: például 2023-ban a D fajtánál a teljes pigmenttartalom a kontrollban mért mintegy 2,73 mg/g értékről T1-kezelésben kb. 3,17 mg/g-ra, T2-kezelésben kb. 3,03 mg/g-ra emelkedett, míg 2024-ben a C fajtánál a kontroll kb. 2,37 mg/g-os értékéhez képest T1-ben kb. 2,85 mg/g, T2-ben kb. 2,62 mg/g, az F fajtánál pedig a kontroll kb. 2,73 mg/g-os szintjéhez viszonyítva T1-ben kb. 3,04 mg/g, T2-ben kb. 3,25 mg/g összes pigmenttartalom volt megfigyelhető. Ugyanakkor ezek az eltérések nem mutattak egységes mintázatot minden évben és minden fajtában, és 2025-ben a pigmenttartalom általánosan alacsonyabb szinten alakult. Mindez arra utal, hogy a kezelésekhez bizonyos esetekben kedvező irányú élettani eltolódások társulhattak, ezek mértéke azonban kifejezetten év- és fajtafüggő volt, ezért a levélpigment-eredmények elsősorban értelmező, és nem önmagukban bizonyító jelentőséggel bírnak.

A feltáró jellegű poliaminprofil-vizsgálatok a fenotípusos eredményekhez kapcsolódóan további értelmezési lehetőséget kínáltak. Ezek az adatok önmagukban nem alkalmasak teljes körű ok-okozati következtetések levonására, ugyanakkor arra utalnak, hogy a kezelésekre a fenotípusos válaszokon túl biokémiai és metabolit-szintű eltérések is társulhatnak. Ennek megfelelően a metabolit-szintű megfigyeléseket a jelen munkában nem bizonyító, hanem feltáró és hipotézisgeneráló jellegű eredményekként értelmeztük.

Összességében a vizsgálat eredményei azt mutatják, hogy a mikroalga- és cianobaktérium-alapú biomassa kezelések a *Pelargonium*

termesztésében gyakorlati jelentőséggel bírhatnak, különösen a biomasz-sza-felhalmozódás, a gyökérfejlődés, a szerkezeti stabilitás és a piackész növényállapot alakulása szempontjából. A jelen eredmények egy alkalmazott és fenntarthatósági szempontból is releváns kutatási irány létjogosultságát támasztják alá, ugyanakkor a háttérben álló élettani és metabolikus mechanizmusok pontosabb feltárásához további, célzott vizsgálatok szükségesek.

7. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Igazoltam, hogy a vizsgált mikroalga- és cianobaktérium-alapú biomasszakezelések *Pelargonium* növényeken, gyakorlati fóliasátras termesztési körülmények között, három egymást követő termesztési évben is ismételhető, a kontrolltól eltérő növekedési válaszokat eredményeztek.
2. Megállapítottam, hogy a kezelések hatása elsősorban a biomassza-felhalmozódáshoz és a gyökérhez kapcsolódó szerkezeti jellemzőkben érvényesült, míg a végső növénymagasságra gyakorolt hatás mérsékeltebb maradt.
3. Kimutattam, hogy a kezelésekhez kapcsolódó különbségek az ismételt, nem destruktív növekedési mérésekben jellemzően nem a korai szakaszban, hanem a termesztési időszak második felében váltak kifejezettebbé.
4. Megállapítottam, hogy a növényi válaszreakció mértéke jelentős fajtafüggést mutatott, ugyanakkor a kezelések fő iránya és relatív sorrendje a vizsgált termesztési években összességében fennmaradt.
5. Kimutattam, hogy a fenotípusos eredményekhez kapcsolódó, feltáró jellegű poliaminprofil-vizsgálatok biológiaiilag értelmezhető eltéréseket jeleztek a kezelt és a kontroll növények között, amelyek a későbbi hatásmechanizmusra irányuló vizsgálatok számára kiindulópontként szolgálhatnak.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A jelen doktori értekezés célja annak vizsgálata volt, hogy a mikroalga- és cianobaktérium-alapú biostimuláns biomasszakészítmények milyen hatást gyakorolnak a *Pelargonium* növekedésére és fejlődésére gyakorlati fóliasátras termesztési körülmények között. A kutatás középpontjában két eltérő eredetű biomasszakezelés állt: a *Nostoc piscinale* cianobaktériumból származó T1 kezelés és a *Chlorella vulgaris* mikroalgából származó T2 kezelés. A vizsgálatokat három egymást követő termesztési évben, 2023 és 2025 között végeztem, 6 különböző *Pelargonium* fajta bevonásával, kezeletlen kontrollhoz viszonyítva.

A dolgozat elméleti részében áttekintettem a mikroalga- és cianobaktérium-alapú biostimulánsok lehetséges hatásmechanizmusait, különös tekintettel arra, hogy ezek a készítmények a dísznövények esetében nemcsak a biomassza-felhalmozódást, hanem a szerkezeti fejlettséget, a növekedési egyensúlyt és az általános piaci megjelenést is befolyásolhatják. Az irodalmi háttér alapján a mikroalga-alapú biostimulánsok jelentősége elsősorban abban áll, hogy a növényi teljesítményt összetett élettani, biokémiai és szabályozási folyamatokon keresztül képesek kedvezően módosítani.

A kísérleti munka során a növényeket gyakorlati termesztési körülmények között, egységes technológiai háttér mellett neveltem. Az értékelés kiterjedt az ismételt, nem destruktív növekedési mérésekre, a végponti biomassza- és morfológiai paraméterekre, a levélpigment-tartalom meghatározására, valamint feltáró jelleggel a poliaminprofilok vizsgálatára is. Emellett kérdőíves piackutatás segítségével azt is vizsgáltam, hogy a csökkentett vegyszerhasználattal előállított dísznövények milyen fogyasztói

megítélés alá eshetnek, és mekkora felárvállalási hajlandóság társulhat hozzájuk.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a mikroalga- és cianobaktérium-alapú biomasszakezelések a vizsgált *Pelargonium* állományban következetesen kedvező irányú változásokat idéztek elő. A legerősebb és legmegbízhatóbban értelmezhető hatások a száraz növénytömeg, a gyökértömeg és a gyökérnyaki átmérő esetében jelentkeztek. Az összevont kezelési átlagok alapján a száraz növénytömeg a kontrollhoz viszonyítva 19,2%-kal nőtt a T1, illetve 33,1%-kal a T2 kezelés hatására. A gyökértömeg növekedése 22,3%, illetve 24,1% volt, míg a gyökérnyaki átmérő 9,3%-os, illetve 17,0%-os emelkedést mutatott. A végső növénymagasság szintén növekedett, de a biomasszához és a szerkezeti fejlettséghez kapcsolódó paraméterekhez viszonyítva kisebb mértékben. Ez arra utal, hogy a kezelések elsődlegesen nem a hajtások megnyúlását, hanem a biomassza-felhalmozódást, a gyökérfejlődést és a növények szerkezeti megerősödését támogatták.

Az ismételt, nem destruktív mérések alapján a kezelésekhöz kapcsolódó különbségek nem a termesztés korai szakaszában, hanem jellemzően a termesztési időszak második felében váltak hangsúlyosabbá. Ez különösen a levélszám és a bimbóképződés alakulásában volt megfigyelhető, és arra utal, hogy a biostimuláns hatások fokozatosan bontakoztak ki, a növények fejlődésének előrehaladtával pedig egyre jobban mérhetővé váltak. A válaszreakciók mértéke a különböző fajták között eltért, amit a szignifikáns kezelés $\times$ fajta kölcsönhatások is alátámasztottak, ugyanakkor a kezelések fő iránya a vizsgált években összességében következetesen fennmaradt.

A környezeti háttér elemzése azt mutatta, hogy a három termesztési év meteorológiai és mikroklimatikus szempontból nem volt teljesen azonos. A hőmérsékleti és fényviszonyok közötti eltérések évről-évi különbségeket eredményeztek, ugyanakkor a kezelések relatív hatása a főbb végpontok esetében több éven át fennmaradt. Ez megerősíti azt az értelmezést, hogy a mikroalga-alapú kezelések kedvező hatása nem pusztán egyszeri vagy évspecifikus jelenség volt, hanem a vizsgált termesztési rendszerben ismétlődő mintázatként jelent meg.

A levélpigment-tartalommal és a feltáró jellegű poliaminprofilvizsgálatokkal kapcsolatos eredmények kiegészítő információt nyújtottak a fenotípusos változások értelmezéséhez. Ezeket az adatokat a jelen értekezésben nem önálló, döntő bizonyítékként, hanem a morfológiai és biomasszaalapú eredmények élettani és biokémiai kiegészítéseként értelmeztem. A poliaminprofilokban megfigyelt eltérések arra utalnak, hogy a kezelt és a kontroll növények között a fenotípusos válaszokon túl biokémiai szinten is értelmezhető állapotkülönbségek alakulhattak ki. Ugyanakkor ezek az eredmények feltáró, hipotézisgeneráló jellegűek, ezért önmagukban nem alkalmasak teljes körű ok-okozati következtetések levonására.

A kérdőíves piackutatás eredményei azt mutatták, hogy a csökkentett vegyszerhasználattal előállított dísznövények iránt jelentős fogyasztói nyitottság mutatkozik. A válaszadók többsége fontosnak tartotta a csökkentett növényvédőszer-használatot, és nagy részük mérsékelt felár vállalására is hajlandónak mutatkozott. Ezek az eredmények nem tekinthetők közvetlen piacbecslésnek, ugyanakkor jól jelzik, hogy a környezetkímélőbb dísznövénytermesztési technológiák gyakorlati hasznosítása gazdasági szempontból is releváns lehet.

Össességében megállapítható, hogy a mikroalga- és cianobaktérium-alapú biomasszakészítmények a *Pelargonium* termesztésében ígéretes biostimuláns megoldást képviselnek. A kezelések kedvező hatást gyakoroltak a biomassza-felhalmozódásra, a gyökérfejlődésre, a szerkezeti stabilitásra és a piackész növényállapot kialakulására, miközben a vizsgált években következetesen pozitív irányú válaszokat eredményeztek. A kutatás hozzájárul a fenntartható dísnövénytermesztés fejlesztéséhez, és tudományos alapot szolgáltat ahhoz, hogy a mikroalga-alapú biostimulánsokat a jövőben célozottabban és megalapozottabban lehessen alkalmazni a kertészeti gyakorlatban.

9. IRODALOMJEGYZÉK

- Aiton, W. (1789). *Hortus Kewensis* (Vol. 2). George Nicol.
- Alcázar, R., Altabella, T., Marco, F., Bortolotti, C., Reymond, M., Koncz, C., Carrasco, P., & Tiburcio, A. F. (2010). Polyamines: Molecules with regulatory functions in plant abiotic stress tolerance. *Planta*, 231, 1237–1249. <https://doi.org/10.1007/s00425-010-1130-0>
- Aloo, B. N., Dessureault-Rompré, J., Tripathi, V., Nyongesa, B. O., & Were, B. A. (2023). Signaling and crosstalk of rhizobacterial and plant hormones that mediate abiotic stress tolerance in plants. *Frontiers in Microbiology*, 14, Article 1171104. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1171104>
- Alvarez, A. L., Saez, J. M., Costa, J. S., Colin, V. L., Fuentes, M. S., Cuozzo, S. A., Polti, M. A., & Amoroso, M. J. (2021). Actinobacteria: Current research and perspectives for bioremediation of pesticides and heavy metals. *Chemosphere*, 166, 41-62. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.070>
- Andronov, E. E., Petrova, S. N., Pinaev, A. G., Pershina, E. V., Rakhimgalieva, S. Z., Akhmedenov, K. M., Gorobets, A. V., Sergaliev, N. H., & de Bruijn, F. J. (2012). Analysis of the structure of microbial community in soils with different degrees of salinity. *Microbiology*, 81(2), 221–230. <https://doi.org/10.1134/S1064229312020044>
- Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarin, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. *Microorganisms*, 11(4), Article 1088. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>

- Arenas Colarte, C., Balic, I., Díaz, Ó., Cortes, I., Moreno, A. A., Amenabar, M. J., Retamal, M. C., & Fuentes, N. C. (2025). Microalgae-based biostimulants: Effects on growth and stress resistance in agricultural crops. *Plants*, *14*, 3488. <https://doi.org/10.3390/plants14223488>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, *9*, Article 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Bayona-Morcillo, P. J., Gómez-Serrano, C., González-López, C. V., Massa, D., & Jiménez-Becker, S. (2022). Effect of the application of hydrolysate of *Chlorella vulgaris* extracted by different techniques on the growth of *Pelargonium × hortorum*. *Plants*, *11*(17), 2308. <https://doi.org/10.3390/plants11172308>
- Bañon, S., Ochoa, J., Franco, J. A., Alarcón, J. J., & Sánchez-Blanco, M. J. (2006). Hardening of oleander seedlings by deficit irrigation and low air humidity. *Environmental and Experimental Botany*, *56*(1), 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.12.004>
- Barone, V., Puglisi, I., Fragalà, F., Lo Piero, A. R., Giuffrida, F., & Baglieri, A. (2019). Novel bioprocess for the cultivation of microalgae in hydroponic growing system of tomato plants. *Journal of Applied Phycology*, *31*(1), 465–470. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1518-y>
- Beijerinck, M. W. (1890). *Chlorella vulgaris* als Symbiont von *Hydra*. *Botanische Zeitung*, *48*, 725–728.

- Berendsen, R. L., Pieterse, C. M. J., & Bakker, P. A. H. M. (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 17(8), 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>
- Berthon, J.-Y., Michel, T., Wauquier, A., Joly, P., Gerbore, J., & Filaire, E. (2021). Seaweed and microalgae as major actors of blue biotechnology to achieve plant stimulation and pest and pathogen biocontrol: A review of the latest advances and future prospects. *The Journal of Agricultural Science*, 159(7–8), 523–534. <https://doi.org/10.1017/S0021859621000885>
- Bhowmick, S., Mazumdar, A., Moulick, A., & Adam, V. (2020). Algal metabolites: An inevitable substitute for antibiotics. *Biotechnology Advances*, 43, Article 107571. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107571>
- Bornet, É., & Flahault, C. (1886). Révision des Nostocacées hétérocystées. *Annales des Sciences Naturelles, Botanique*, 7(3), 323–381.
- Böhm, W. (1979). *Methods of studying root systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8>
- Breidert, C., Hahsler, M., & Reutterer, T. (2006). A review of methods for measuring willingness-to-pay. *Innovative Marketing*, 2(4), 8–32. <https://businessperspectives.org/journals/innovative-marketing/issue-53/a-review-of-methods-for-measuring-willingness-to-pay>
- Brito-Lopez, C., van der Wielen, N., Barbosa, M., & Karlova, R. (2025). Plant growth-promoting microbes and microalgae-based biostimulants: Sustainable strategy for agriculture and abiotic stress resilience. *Philosophical Transactions of the Royal Society*

- B: Biological Sciences*, 380(1927), Article 20240251.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2024.0251>
- Bulgari, R., Cocetta, G., Trivellini, A., Vernieri, P., & Ferrante, A. (2015). Biostimulants and crop responses: a review. *Biological Agriculture & Horticulture*, 31(1), 1–17.
<https://doi.org/10.1080/01448765.2014.964649>
- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops. *Agronomy*, 9(6), 306.
<https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
- Bustin, S. A., Benes, V., Garson, J. A., Hellemans, J., Huggett, J., Kubista, M., Mueller, R., Nolan, T., Pfaffl, M. W., Shipley, G. L., Vandesompele, J., & Wittwer, C. T. (2009). The MIQE guidelines: Minimum information for publication of quantitative real-time PCR experiments. *Clinical Chemistry*, 55(4), 611–622.
<https://doi.org/10.1373/clinchem.2008.112797>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383, 3–41.
<https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Chabili, A., Minaoui, F., Hakkoum, Z., Douma, M., Meddich, A., & Loudiki, M. (2024). A comprehensive review of microalgae- and cyanobacteria-based biostimulants for agricultural use. *Plants*, 13(2), 159. <https://doi.org/10.3390/plants13020159>
- Chang, S., Puryear, J., & Cairney, J. (1993). A simple and efficient method for isolating RNA from pine trees. *Plant Molecular Biology Reporter*, 11(2), 113–116. <https://doi.org/10.1007/BF02670468>
- Chiaiese, P., Corrado, G., Colla, G., Kyriacou, M. C., & Rouphael, Y. (2018). Renewable sources of plant biostimulation: Microalgae as

- a sustainable means to improve crop performance. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1782. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01782>
- Cheng, Y. T., Zhang, L., & He, S. Y. (2019). Plant–microbe interactions facing environmental challenge. *Cell Host & Microbe*, 26(2), 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2019.07.009>
- Colla, G., Roupahel, Y., Lucini, L., Canaguier, R., Stefanoni, W., Fiorillo, A., & Cardarelli, M. (2016). Protein hydrolysate-based biostimulants: Origin, biological activity and application methods. *Acta Horticulturae*, 1148, 27–34. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1148.3>
- Colla, G., Hoagland, L., Ruzzi, M., Cardarelli, M., Bonini, P., Canaguier, R., & Roupahel, Y. (2017). Biostimulant action of protein hydrolysates: Unraveling their effects on plant physiology and gene expression. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2202. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02202>
- Dasgan, H. Y., Aksu, K. S., Zikaria, K., & Gruda, N. S. (2024). Biostimulants enhance the nutritional quality of soilless greenhouse tomatoes. *Plants*, 13, 2587. <https://doi.org/10.3390/plants13182587>
- Dhar, N., Gopalan, N. S. R., Nikhil, P. T., & Mohapatra, S. (2022). Role of phytohormones in plant-microbial interaction. In T. Aftab (Ed.), *Auxins, cytokinins and gibberellins signaling in plants* (pp. 313–335). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05427-3_14
- Dineshkumar, R., Rasheeq, A. A., Arumugam, A., Nathiga Nambi, K. S., & Sampathkumar, P. (2019). Marine microalgal extracts on cultivable crops as a considerable bio-fertilizer: A review. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 18(4), 849–854.

https://www.researchgate.net/publication/336439457_Marine_microalgal_extracts_on_cultivable_crops_as_a_considerable_bio-fertilizer_A_Review

- Drobek, M., Frąć, M., & Cybulska, J. (2019). Plant biostimulants: Importance for the quality and yield of horticultural crops and improvement of plant tolerance to abiotic stress—A review. *Agronomy*, 9, 335. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060335>
- Dumanović, J., Nepovimova, E., Natić, M., Kuća, K., & Jaćević, V. (2021). The significance of reactive oxygen species and antioxidant defense system in plants: A concise overview. *Frontiers in Plant Science*, 11, 552969. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.552969>
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- European Commission. (2019). *The European Green Deal* (COM(2019) 640 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>
- European Commission. (2020). *A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally friendly food system* (COM(2020) 381 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0381>
- European Parliament & Council of the European Union. (2009). *Directive 2009/128/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides*. *Official Journal of the European*

- Union*, *L* 309, 71–86. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/128/oj/eng>
- Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Alqarawi, A. A., Abd Allah, E. F., & Hashem, A. (2017). Phytohormones and beneficial microbes: Essential components for plants to balance stress and fitness. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2104. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02104>
- El Arroussi, H., Benhima, R., Elbaouchi, A., Sijilmassi, B., Mernissi, N. E., Aafsar, A., & Meftah Kadmiri, I. (2018). Dunaliella salina exopolysaccharides: A promising biostimulant for salt stress tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Applied Phycology*, 30(5), 2929–2941. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1382-1>
- El-Naggar, A. H., Osman, M. E. H., El-Sheekh, M. M., & Gheda, S. F. (2005). Influence of the aqueous extracts of *Ulva lactuca* and *Chlorella kessleri* on growth and yield of *Vicia faba*. *Algological Studies*, 116, 213–229. <https://doi.org/10.1127/1864-1318/2005/0116-0213>
- Fadiji, A. E., Babalola, O. O., Santoyo, G., & Perazzolli, M. (2022). The potential role of microbial biostimulants in the amelioration of climate change-associated abiotic stresses on crops. *Frontiers in Microbiology*, 12, 829099. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.829099>
- Francesca, S., Cirillo, V., Raimondi, G., Maggio, A., Barone, A., & Rigano, M. M. (2021). A novel protein hydrolysate-based biostimulant improves tomato performance under drought stress. *Plants*, 10(4), 783. <https://doi.org/10.3390/plants10040783>

- Gimenez-Ibanez, S., Boter, M., & Solano, R. (2015). Novel players fine-tune plant trade-offs. *Essays in Biochemistry*, 58, 83–100. <https://doi.org/10.1042/bse0580083>
- Gitau, M. M., Farkas, A., Balla, B., Ördög, V., Futó, Z., & Maróti, G. (2021). Strain-specific biostimulant effects of *Chlorella* and *Chlamydomonas* green microalgae on *Medicago truncatula*. *Plants*, 10(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/plants10061060>
- Glick, B. R. (2014). Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research*, 169(1), 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.009>
- Glick, B. R., & Gamalero, E. (2021). Recent developments in the study of plant microbiomes. *Microorganisms*, 9(7), 1533. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071533>
- Gregory, P. J. (2006). *Plant roots: Growth, activity and interactions with soils*. Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470995563>
- Grebitus, C. (2016). Relationship between consumer behavior and success of urban agriculture. *Urban Agriculture & Regional Food Systems*, 1(1), 1–8. <https://doi.org/10.2134/uarfs2016.01.0001>
- Großkinsky, D. K., Tafner, R., Moreno, M. V., Stenglein, S. A., Garcia de Salamone, I. E., Nelson, L. M., Novák, O., Strnad, M., & van der Graaff, E. (2016). Cytokinin production by *Pseudomonas fluorescens* G20-18 determines biocontrol activity against *Pseudomonas syringae* in *Arabidopsis*. *Scientific Reports*, 6, 23310. <https://doi.org/10.1038/srep23310>
- Grover, M., Ali, S. Z., Sandhya, V., Rasul, A., & Venkateswarlu, B. (2011). Role of microorganisms in adaptation of agricultural crops

- to abiotic stresses. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27, 1231–1240. <https://doi.org/10.1007/s11274-010-0572-7>
- Goñi, O., Quille, P., & O’Connell, S. (2018). Ascophyllum nodosum extract biostimulants and their role in enhancing tolerance to drought stress in tomato plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 126, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.02.024>
- González-Pérez, B. K., Rivas-Castillo, A. M., Valdez-Calderón, A., & Gayosso-Morales, M. A. (2022). Microalgae as biostimulants: A new approach in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38, 4. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03192-2>
- Goswami, D., Thakker, J. N., & Dhandhukia, P. C. (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 1127500. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1127500>
- Guzmán-Murillo, M. A., Ascencio, F., & Larrinaga-Mayoral, J. A. (2013). Germination and ROS detoxification in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) under NaCl stress and treatment with microalgae extracts. *Protoplasma*, 250(1), 33–42. <https://doi.org/10.1007/s00709-011-0369-z>
- Ha, S., Vankova, R., Yamaguchi-Shinozaki, K., Shinozaki, K., & Tran, L. S. P. (2012). Cytokinins: Metabolism and function in plant adaptation to environmental stresses. *Trends in Plant Science*, 17(3), 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.12.005>
- Hacquard, S., Spaepen, S., Garrido-Oter, R., & Schulze-Lefert, P. (2017). Interplay between innate immunity and the plant microbiota.

- Annual Review of Phytopathology*, 55, 565–589.
<https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035623>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate data analysis* (8th ed.). Cengage.
<https://www.cengage.uk/c/multivariate-data-analysis-8e-hair-babin-anderson-black/9781473756540/>
- Hasanuzzaman, M., Hossain, M. A., da Silva, J. A. T., & Fujita, M. (2012). Plant response and tolerance to abiotic oxidative stress: Antioxidant defense is a key factor. In B. Venkateswarlu, A. Shanker, C. Shanker, & M. Maheswari (Eds.), *Crop stress and its management: Perspectives and strategies* (pp. 261–315). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-2220-0_8
- Hashtroudi, M. S., Ghassempour, A., Riahi, H., Shariatmadari, Z., & Khanjir, M. (2013). Endogenous auxins in plant growth-promoting cyanobacteria—*Anabaena vaginicola* and *Nostoc calcicola*. *Journal of Applied Phycology*, 25, 379–386.
<https://doi.org/10.1007/s10811-012-9872-7>
- Hempel, N., Petrick, I., & Behrendt, F. (2012). Biomass productivity and productivity of fatty acids and amino acids of microalgae strains as key characteristics of suitability for biodiesel production. *Journal of Applied Phycology*, 24, 1407–1418.
<https://doi.org/10.1007/s10811-012-9795-3>
- Hibbing, M. E., Fuqua, C., Parsek, M. R., & Peterson, S. B. (2010). Bacterial competition: Surviving and thriving in the microbial jungle. *Nature Reviews Microbiology*, 8(1), 15–25.
<https://doi.org/10.1038/nrmicro2259>

- Horváth, N., Molnár, Z., & Ördög, V. (2016). Az *Anabaena* cianobaktérium nemzetség biotechnológiai felhasználása és taxonómiai áttekintése. *Botanikai Közlemények*, 103(1), 135–152. <https://doi.org/10.17716/BotKozlem.2016.103.1.135>
- Jamil, F.; Mukhtar, H.; Fouillaud, M.; Dufossé, L. Rhizosphere Signaling: Insights into Plant–Rhizomicrobiome Interactions for Sustainable Agronomy. *Microorganisms* 2022, 10, 899. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050899>
- Jones, J. D. G., Vance, R. E., & Dangl, J. L. (2016). Intracellular innate immune surveillance devices in plants and animals. *Science*, 354(6316), aaf6395. <https://doi.org/10.1126/science.aaf6395>
- Jurado-Flores, A., Heredia-Martínez, L. G., Torres-Cortes, G., & Díaz-Santos, E. (2025). Harnessing microalgae and cyanobacteria for sustainable agriculture: Mechanistic insights and applications as biostimulants, biofertilizers and biocontrol agents. *Agriculture*, 15, 1842. <https://doi.org/10.3390/agriculture15171842>
- Kabato, W. S., Getnet, G. T., Sinore, T., Németh, A., & Molnár, Z. (2025). Towards climate-smart agriculture. *Agronomy*, 15(3), 565. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030565>
- Kapoor, R. V., Wood, E. E., & Llewellyn, C. A. (2021). Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices. *Biotechnology Advances*, 49, 107754. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107754>
- Katona, S., Horváth, N., Molnár, Z., & Ördög, V. (2018). Extracellular polysaccharides in twenty *Chlamydomonas* strains. *Acta Agronomica Óváriensis*, 59, 62–81.

https://real.mtak.hu/192867/1/EPA03114_acta_agronomica_ovariensis_2018_01_062-081.pdf

- Keren-Paz, A., & Kolodkin-Gal, I. (2020). A brick in the wall: Discovering a novel mineral component of the biofilm extracellular matrix. *New Biotechnology*, 56, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.11.002>
- Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., Critchley, A. T., Craigie, J. S., Norrie, J., & Prithiviraj, B. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 28(4), 386–399. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>
- Khan, N., Bano, A., & Zandi, P. (2018). Effects of exogenously applied plant growth regulators in combination with PGPR on the physiology and root growth of chickpea (*Cicer arietinum*) and their role in drought tolerance. *Journal of Plant Interactions*, 13(1), 239–247. <https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1471527>
- Kollmen, J., & Strieth, D. (2022). The beneficial effects of cyanobacterial co-culture on plant growth. *Life*, 12(2), 223. <https://doi.org/10.3390/life12020223>
- Kusano, T., Berberich, T., Tateda, C., & Takahashi, Y. (2008). Polyamines: Essential factors for growth and survival. *Planta*, 228(3), 367–381. <https://doi.org/10.1007/s00425-008-0772-7>
- Kutasi, J. (2023, May 5). *Microalgae biotechnology* [Presentation]. Mosonmagyaróvár, Hungary.
- L'Héritier de Brutelle, C. L. (1787–1788). *Geraniologia: seu Erodii, Pelargonii, Geranii, Monsoniae et Grieli historia iconibus illustrata*. Paris: Typis Petri-Francisci Didot.

- Lancsar, E., & Louviere, J. (2008). Conducting discrete choice experiments to inform healthcare decision making: A user's guide. *Pharmacoeconomics*, 26(8), 661–677. <https://doi.org/10.2165/00019053-200826080-00004>
- Lee, S.-M., & Ryu, C.-M. (2021). Algae as new members of the beneficial plant microbiome. *Frontiers in Plant Science*, 12, 599742. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.599742>
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV–VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 1, F4.3.1–F4.3.8. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
- List, J. A., & Gallet, C. A. (2001). What experimental protocols influence disparities between actual and hypothetical stated values? *Environmental and Resource Economics*, 20, 241–254. <https://doi.org/10.1023/A:1012791822804>
- Mahmud, K., Makaju, S., Ibrahim, R., & Missaoui, A. (2020). Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. *Plants*, 9(1), 97. <https://doi.org/10.3390/plants9010097>
- Matsui, A., Nakaminami, K., & Seki, M. (2019). Biological function of changes in RNA metabolism in plant adaptation to abiotic stress. *Plant and Cell Physiology*, 60(9), 1897–1905. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcz068>
- Meena, R. S., Kumar, S., Datta, R., Lal, R., Vijayakumar, V., Brtnický, M., Sharma, M. P., Yadav, G. S., Jhariya, M. K., Jangir, C. K.,

- Pathan, S. I., Dokulilova, T., & Pecina, V. (2020). Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: A review. *Land*, 9(2), 34. <https://doi.org/10.3390/land9020034>
- Mendes, R., Garbeva, P., & Raaijmakers, J. M. (2013). The rhizosphere microbiome: Significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*, 37(5), 634–663. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12028>
- Michalak, I., & Chojnacka, K. (2015). Algal extracts: Technology and advances. *Engineering in Life Sciences*, 15(2), 160–176. <https://doi.org/10.1002/elsc.201400139>
- Miranda, A. M., Hernandez-Tenorio, F., Villalta, F., Vargas, G. J., & Sáez, A. A. (2024). Advances in the development of biofertilizers and biostimulants from microalgae. *Biology*, 13(3), 199. <https://doi.org/10.3390/biology13030199>
- Mitchell, R. C., & Carson, R. T. (1989). *Using surveys to value public goods: The contingent valuation method*. Resources for the Future.
- Molnár, Z., & Ördög, V. (2005a). Microalgal and cyanobacterial extracts. *Acta Biologica Szegediensis*, 49(1–2), 39–40.
- Molnár, Z., & Ördög, V. (2005b). The effect of cyanobacterial compounds on the organogenesis of pea cultured in vitro. *Acta Biologica Szegediensis*, 49(1–2), 37–38. <https://abs.bibl.u-szeged.hu/index.php/abs/article/view/2411>
- Molnár, Z., Mutum, L., Kabato, W. S., Németh, A., & Janda, T. (2023). Mikroalga biomassa kezelése. In 39. Óvári Tudományos Nap Konferencia (p. 82).
- Moschou, P. N., Wu, J., Cona, A., Tavladoraki, P., Angelini, R., & Roubelakis-Angelakis, K. A. (2012). The polyamines and their

- catabolic products are significant players in the turnover of nitrogenous compounds in plants. *Journal of Experimental Botany*, 63(14), 5003–5016. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers202>
- Moschou, P. N., & Roubelakis-Angelakis, K. A. (2014). Polyamines and programmed cell death. *Journal of Experimental Botany*, 65(5), 1285–1296. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert373>
- Neufeld, H. S., & Chapin, F. S. (1999). Plant physiological ecology [Review of the book *Plant physiological ecology*, by H. Lambers & T. L. Pons]. *Ecology*, 80(5), 1785–1787. <https://www.jstor.org/stable/176572>
- Németh, A., Horváth, N., Katona, S., Kerekes, G., & Molnár, Z. (2024a). Biostimulant microalgae in ornamentals. *BIO Web of Conferences*, 125, 03003. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412503003>
- Németh, A., Horváth, N., Katona, S., & Molnár, Z. (2024b). Review of biostimulant microalgae. *Acta Agronomica Óváriensis*, 65(1), 36–55. <https://doi.org/10.17108/ActAgrOvar.2024.65.1.36>
- Németh, A., Kabato, W., Horváth, N., Fehér, N., & Molnár, Z. (2026). Microalgae-based biostimulants improve biomass production and root-linked performance stability in *Pelargonium*: A three-year greenhouse study. *Plants*, 15(5), 803. <https://doi.org/10.3390/plants15050803>
- Németh, M., Janda, T., Horváth, E., Páldi, E., & Szalai, G. (2002). Exogenous salicylic acid increases polyamine content but may decrease drought tolerance in maize. *Plant Science*, 162(4), 569–574. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00593-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00593-3)

- Noordergraaf, C. V. (1994). Production and marketing of *Pelargonium* and other bedding plants. *Acta Horticulturae*, 353, 13–20.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1994.353.1>
- Notterpek, T. J., & Ördög, V. (2021). The effect of *Arthrospira platensis* cyanobacteria on nursery berry plants. *Acta Agronomica Óváriensis*, 62(1), 4–20.
- HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt. (2025). Seasonal mean temperature anomalies relative to the 1991–2020 climatological normal. Hungarian Meteorological Service.
<https://www.met.hu>
- Ördög, V., & Pulz, O. (1996). Diurnal changes of cytokinin-like activity in a strain of *Arthronema africanum* (Cyanobacteria), determined by bioassay. *Algological Studies*, 82, 57–67.
https://doi.org/10.1127/algol_stud/82/1996/57
- Ördög, V., Stirk, W. A., Bálint, P., Lovász, C., Pulz, O., & van Staden, J. (2013). Lipid productivity and fatty acid composition in *Chlorella* and *Scenedesmus* strains grown in nitrogen-stressed conditions. *Journal of Applied Phycology*, 25, 233–243.
<https://doi.org/10.1007/s10811-012-9857-6>
- Ördög, V. (2015). *Mikroalgák biotechnológiai alkalmazása* [Doctoral dissertation]. Hungarian Academy of Sciences.
- Ördög, V., Stirk, W., Takács, G., Pöthe, P., Illés, Á., Bojtor, C., Széles, A., Tóth, B., Van Staden, J., & Nagy, J. (2021). Plant biostimulating effects of the cyanobacterium *Nostoc piscinale* on maize (*Zea mays* L.) in field experiments. *South African Journal of Botany*, 140, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.03.026>

- Paradiso, R., Di Mola, I., Ottaiano, L., Cozzolino, E., Pelosi, M. E., Rippa, M., Mormile, P., & Mori, M. (2024). Integrating smart greenhouse cover, reduced nitrogen dose and biostimulant application as a strategy for sustainable cultivation of cherry tomato. *Plants*, 13(3), 440. <https://doi.org/10.3390/plants13030440>
- Parađiković, N., Teklić, T., Zeljković, S., Lisjak, M., & Špoljarević, M. (2019). Biostimulants research in some horticultural plant species—A review. *Food and Energy Security*, 8, e162. <https://doi.org/10.1002/fes3.162>
- Pál, M., Hamow, K. Á., Rahman, A., Majláth, I., Tajti, J., Gondor, O. K., Ahres, M., Gholizadeh, F., Szalai, G., & Janda, T. (2022). Light spectral composition modifies polyamine metabolism in young wheat plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(15), 8394. <https://doi.org/10.3390/ijms23158394>
- Penloglou, G., Pavlou, A., & Kiparissides, C. (2024). Recent advancements in photo-bioreactors for microalgae cultivation: A brief overview. *Processes*, 12, 1104. <https://doi.org/10.3390/pr12061104>
- Pershina, E., Valkonen, J., Kurki, P., Ivanova, E., Chirak, E., Korvigo, I., Provorov, N., & Andronov, E. (2015). Comparative analysis of prokaryotic communities associated with organic and conventional farming systems. *PLOS ONE*, 10(12), e0145072. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145072>
- Pérez-Montaño, F., Alias-Villegas, C., Bellogín, R. A., del Cerro, P., Espuny, M. R., Jiménez-Guerrero, I., López-Baena, F. J., Ollero, F. J., & Cubo, T. (2014). Plant growth promotion in cereal and leguminous agriculturally important plants: From microorganism

- capacities to crop production. *Microbiological Research*, 169(5–6), 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.011>
- Piepho, H. P., Büchse, A., & Emrich, K. (2003). A hitchhiker's guide to mixed models for randomized experiments. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 189, 310–322. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2003.00049.x>
- Pieterse, C. M. J., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C. M., & Bakker, P. A. H. M. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 347–375. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102340>
- Plaza, B. M., Gómez-Serrano, C., Acién-Fernández, F. G., & Jiménez-Becker, S. (2018). Effect of microalgae hydrolysate foliar application (*Arthrospira platensis* and *Scenedesmus* sp.) on *Petunia × hybrida* growth. *Journal of Applied Phycology*, 30(4), 2359–2365. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1427-0>
- Poveda, J. (2021). Cyanobacteria in plant health: Biological strategy against abiotic and biotic stresses. *Crop Protection*, 141, 105450. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105450>
- Poorter, H., Bühler, J., van Dusschoten, D., Climent, J., & Postma, J. A. (2012). Pot size matters: A meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. *Functional Plant Biology*, 39(11), 839–850. <https://doi.org/10.1071/FP12049>
- Prisa, D., & Spagnuolo, D. (2023). Plant production with microalgal biostimulants. *Horticulturae*, 9(7), 829. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070829>

- Qu, Y., Cao, H., Huang, P., Wang, J., Liu, X., Lu, J., & Lin, F.-C. (2022). A kelch domain cell end protein, PoTea1, mediates cell polarization during appressorium morphogenesis in *Pyricularia oryzae*. *Microbiological Research*, 259, 126999. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.126999>
- Raja, V., Majeed, U., Kang, H., Andrabi, K. I., & John, R. (2017). Abiotic stress: Interplay between reactive oxygen species, hormones and MAPKs. *Environmental and Experimental Botany*, 137, 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.02.010>
- Renuka, N., Guldhe, A., Prasanna, R., Singh, P., & Bux, F. (2018). Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: Current trends, prospects and challenges. *Biotechnology Advances*, 36(4), 1255–1273. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.04.004>
- Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321(1–2), 305–339. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2>
- Rio, D. C., Ares, M., Hannon, G. J., & Nilsen, T. W. (2010). Purification of RNA using TRIzol (TRI reagent). *Cold Spring Harbor Protocols*, 2010(6), prot5439. <https://doi.org/10.1101/pdb.prot5439>
- Ronga, D., Biazzi, E., Parati, K., Carminati, D., Carminati, E., & Tava, A. (2019). Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop production. *Agronomy*, 9, 192. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040192>

- Rosenberg, E., & Zilber-Rosenberg, I. (2018). The hologenome concept of evolution after 10 years. *Microbiome*, 6, 78. <https://doi.org/10.1186/s40168-018-0457-9>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Editorial: Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Sharma, H. S. S., Fleming, C., Selby, C., Rao, J. R., & Martin, T. (2012). Plant biostimulants: A review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management. *Journal of Applied Phycology*, 26, 465–490. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0101-9>
- Shrestha, A., Grimm, M., Ojira, I., Krumwiede, J., & Schikora, A. (2020). Impact of quorum sensing molecules on plant growth and immune system. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1545. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01545>
- Sneha, G. R., Yadav, R. K., Chatrath, A., Gerard, M., Tripathi, K., Govindsamy, V., & Abraham, G. (2021). Perspectives on the potential application of cyanobacteria in the alleviation of drought and salinity stress in crop plants. *Journal of Applied Phycology*, 33, 3761–3778. <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02570-5>
- Souza, R. D., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology*, 38(4), 401–419. <https://doi.org/10.1590/S1415-475738420150053>
- Sun, Z., Liu, X., Ugya, A. Y., Liu, H., Sun, L., & Luo, G. (2026). Microalgae and cyanobacteria as a tool for agricultural sustainability: A review of biofertilizer and biostimulant potential.

- Frontiers in Plant Science*, 16, 1733394.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1733394>
- Stirk, W. A., Ördög, V., Van Staden, J., & Jäger, K. (2002). Cytokinin- and auxin-like activity in Cyanophyta and microalgae. *Journal of Applied Phycology*, 14(3), 215–221.
<https://doi.org/10.1023/A:1019928425569>
- Stirk, W. A., Bálint, P., Tarkowská, D., Novák, O., Strnad, M., Ördög, V., & van Staden, J. (2013). Hormone profiles in microalgae: Gibberellins and brassinosteroids. *Plant Physiology and Biochemistry*, 70, 348–353.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.037>
- Széchenyi István University. (2023–2025). *Macroclimatic and environmental monitoring data* [Unpublished dataset].
- Szöllősi, R. (2014). Superoxide dismutase (SOD) and abiotic stress tolerance in plants: An overview. In P. Ahmad (Ed.), *Oxidative damage to plants* (pp. 89–129). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799963-0.00003-4>
- Takács, G., Stirk, W. A., Gergely, I., Molnár, Z., van Staden, J., & Ördög, V. (2019). Biostimulating effects of the cyanobacterium *Nostoc piscinale* on winter wheat in field experiments. *South African Journal of Botany*, 126, 99–106.
<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.06.033>
- Taiz, L., Møller, I. M., Murphy, A., & Zeiger, E. (2023). *Plant physiology and development* (7th international ed.). Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/hesc/9780197614204.001.0001>

- Tarakhovskaya, E. R., Maslov, Y. I., & Shishova, M. F. (2007). Phytohormones in algae. *Russian Journal of Plant Physiology*, 54(2), 163–170. <https://doi.org/10.1134/S1021443707020021>
- Tariq, A., & Ahmed, A. (2023). Bacterial symbiotic signaling in modulating plant–rhizobacterial interactions. In IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109915>
- Tedersoo, L., Bahram, M., & Zobel, M. (2020). How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. *Science*, 367(6480), eaba1223. <https://doi.org/10.1126/science.aba1223>
- Tiburcio, A. F., Altabella, T., Bitrián, M., & Alcázar, R. (2014). The roles of polyamines during the lifespan of plants: From development to stress. *Planta*, 240, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2055-9>
- Turley, E. K., & Etchells, J. P. (2022). Laying it on thick: A study in secondary growth. *Journal of Experimental Botany*, 73, 665–679. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab455>
- Vangenechten, B. V., De Coninck, B., & Ceusters, J. (2025). How to improve the potential of microalgal biostimulants for abiotic stress mitigation in plants? *Frontiers in Plant Science*, 16, 1568423. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1568423>
- van der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D., & van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 11(3), 296–310. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x>
- Verbon, E. H., & Liberman, L. M. (2016). Beneficial microbes affect endogenous mechanisms controlling root development. *Trends in*

- Plant Science*, 21(3), 218–229.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.01.013>
- Vlaeminck, P., Jiang, T., & Vranken, L. (2014). Food labeling and eco-friendly consumption: Experimental evidence from a Belgian supermarket. *Ecological Economics*, 108, 180–190.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.10.019>
- Wankhade, A., Wilkinson, E., & David, W. (2025). Plant–microbe interactions in the rhizosphere and the role of chemical signaling. *Applied Sciences*, 15(13), 7127.
<https://doi.org/10.3390/app15137127>
- Wellburn, A. R. (1994). The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents. *Journal of Plant Physiology*, 144(3), 307–313.
[https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
- Yang, W., Wang, F., Liu, L.-N., & Sui, N. (2020). Responses of membranes and the photosynthetic apparatus to salt stress in cyanobacteria. *Frontiers in Plant Science*, 11, 713.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00713>
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
- Zipfel, C., & Oldroyd, G. E. D. (2017). Plant signalling in symbiosis and immunity. *Nature*, 543(7645), 328–336.
<https://doi.org/10.1038/nature22009>
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6>

PUBLIKÁCIÓK

- Németh, A., Horváth, N., Katona, S., & Molnár, Z. (2024). Review of biostimulant microalgae. *Acta Agronomica Óváriensis*, 65(1), 36–55. <https://doi.org/10.17108/ActAgrOvar.2024.65.1.36>
- Németh, A., Horváth, N., Katona, S., Kerekes, G., & Molnár, Z. (2024). The use of biostimulant microalgae to influence the growth and development of ornamental plants. *BIO Web of Conferences*, 125, Article 03003. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412503003>
- Németh, A., Kabato, W., Horváth, N., Fehér, N., & Molnár, Z. (2026). Microalgae-based biostimulants improve biomass production and root-linked performance stability in Pelargonium: A three-year greenhouse study. *Plants*, 15, Article 803. <https://doi.org/10.3390/plants15050803>
- Kabato, W., Getnet, G. T., Sinore, T., Németh, A., & Molnár, Z. (2025). Towards climate-smart agriculture: Strategies for sustainable agricultural production, food security, and greenhouse gas reduction. *Agronomy*, 15(3), Article 565. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030565>
- Molnár, Z., Mutum, L., Kabato, W. S., Németh, A., & Janda, T. (2023, November 16). Mikroalga biomassza kezelések hatása őszi búza kisparcellás kísérletben [Conference abstract]. In Z. Molnár & K. Németh Wurm (Eds.), 39. Óvári Tudományos Nap Konferencia (p. 82). Széchenyi István University, Albert Kázmér Faculty of Agricultural and Food Sciences; VEAB Agrártudományi Szakbizottság.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném kifejezni őszinte hálámat témavezetőimnek, Dr. Molnár Zoltánnak és Dr. Horváth Nándornak, akik elkötelezett és támogató hozzáállásukkal végig kísérték doktori munkámat.

Köszönettel tartozom Lobik Ildikónak és Fehér Norbertnek a kutatás során nyújtott értékes technikai segítségükért és támogatásukért.

Hálás vagyok mindazoknak is, akik a munka során bármilyen formában segítettek vagy biztattak, különösen Valacsainé Király Teréznek és Pintér Szabolcsnak.

Végül, de nem utolsósorban, szeretném megköszönni feleségemnek, Juditnak, valamint két csodálatos lányomnak, Rékának és Lucának, a türelmet és megértést.

Hálával tartozom szüleimnek is, akik hozzájárultak a kutatás megvalósításához, és akik bennem is felébresztették a növények iránti szeretetet.

Végül köszönöm barátaimnak a kitartó támogatást és bátorítást.

MELLÉKLETEK

- 1. Számú melléklet:** Száraz növényi tömeg (g) — GLM + valószínűségi diagram + varianciahomogenitás vizsgálata
- 2. Számú melléklet:** Gyökértömeg (g) — GLM + valószínűségi diagram + varianciahomogenitás vizsgálata
- 3. Számú melléklet:** Gyökérnyaki átmérő (mm) — GLM + valószínűségi diagram + varianciahomogenitás vizsgálata
- 4. Számú melléklet:** Növénymagasság (cm) — GLM + valószínűségi diagram + varianciahomogenitás vizsgálata
- 5. Számú melléklet:** Környezeti paraméterek
- 6. Számú melléklet:** Leíró statisztikák gyűjteménye
- 7. Számú melléklet:** Az végponti mérések alapadatai
- 8. Számú melléklet:** Fajtaszintű hatásanalízis
- 9. Számú melléklet:** 3 éves növény mérési eredmények (2023-2025)
- 10. Számú melléklet:** Online kérdőív
- 11. Számú melléklet:** Online kérdőív eredménye
- 12. Számú melléklet:** Statisztikai adatok hosszútávú adatelemzéshez
- 13. Számú melléklet:** Hosszútávú mérési eredmények statisztikai kiértékelése
- 14. Számú melléklet:** Minitab - teljes statisztikai analízis
- 15. Számú melléklet:** Minitab - teljes statisztikai analízis

Minden melléklet elérhető és letölthető az alábbi QR Kódon:



<https://drive.google.com/drive/folders/1L1nPf1Fm0J54xfQ8dEvw5bJ97Irwre1>