

DIPLOMADOLGOZAT

Frauholz Bettina Blanka

2025



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Georgikon Campus

Növényvédelmi Intézet

Növényorvosi mesterképzési szak

**Olaszperje (*Lolium multiflorum* Lam.) populációk herbicid-
érzékenységének vizsgálata in vivo és in vitro módszerekkel**

Belső konzulens: Pacseszákne Dr. Kazinczi
Gabriella
tanszékvezető, egyetemi tanár

**Belső konzulens
intézete/tanszéke:** Növényvédelmi Intézet
Növényvédelmi Tanszék

Belső konzulens: Dr. Jócsák Ildikó
egyetemi adjunktus

**Belső konzulens
intézete/tanszéke:** Növénytermesztési-
tudományok Intézet
Agronómia Tanszék

Külső konzulens: Labant-Hoffmann Éva
fejlesztőmérnök

Készítette: **Frauholz Bettina Blanka**

Készthely

2025

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzések.....	3
2. Szakirodalmi áttekintés	4
2.1. A herbicidrezisztenciáról általánosságban.....	4
2.1.1. A herbicidrezisztencia terjedésének aktualitása	4
2.1.2. A herbicidrezisztencia fogalma, kereszt- és többszörös rezisztencia	4
2.1.3. A herbicidrezisztencia történeti áttekintése, kialakulását befolyásoló tényezők.	5
2.1.4. Herbicidrezisztencia mechanizmusok a gyomnövényekben	7
2.2. Az olaszperje bemutatása, herbicidrezisztenciára való hajlama.....	8
2.2.1. Az olaszperje taxonómiája és jelentősége	8
2.2.2. Az olaszperje ökológiai igényei és morfológiája	9
2.2.3. Az olaszperje, mint értékes takarmánynövény	9
2.2.4. Herbicidrezisztencia formái az olaszperjében	10
2.2.5. Target-site (TSR) és Non-target site (NTSR) rezisztencia a Lolium fajokban	12
2.3. Elismert módszerek a herbicidrezisztencia vizsgálatához.....	12
2.3.1. Tenyészedényes vizsgálat.....	12
2.3.2. Dózis-hatás kísérletek.....	13
2.4. Nem-invazív vizsgálatok, biofoton emisszió alapuló képalkotás.....	13
2.4.1. A késleltetett fluoreszcencia (delayed fluorescence-DF)	14
2.4.2. Az ultragyenge biolumineszcencia (ultraweak-bioluminescence-UWLE)	15
2.5. Herbicidrezisztencia okozta stressz nyomkövetésére alkalmas analitikai eljárások	15
2.5.1. A lipidperoxidáció vizsgálata (MDA)	15
2.5.2. Vasredukáló képességen alapuló teljes antioxidáns kapacitás (FRAP).....	16
3. Anyagok és módszerek.....	17
3.1. Minta gyűjtése	17
3.2. Tenyészedényes kísérlet	17
3.2.1. Növénynevelés	17
3.2.2. Dózis-hatás vizsgálat	18
3.2.3. Minta elkülönítése a különböző vizsgálatokhoz.....	18
3.3. Friss hajtástömeg mérés	19
3.4. Szárazanyag-tartalom meghatározás	19

3.5. Vasredukáló képességen alapuló teljes antioxidáns kapacitás (FRAP) vizsgálat	19
3.6. Lipidoxidáció mérés	20
3.7. Biofoton-emisszió (késleltetett fluoreszcencia) vizsgálata.....	20
3.8. GR ₅₀ érték és Rezisztencia Index (RI) számítása	21
3.9. Statisztikai elemzés.....	21
4. Eredmények és értékelésük	23
4.1. Friss hajtástömeg mérés eredményei.....	23
4.2. Szárazanyag-tartalom meghatározás eredményei.....	26
4.3. Biofoton emisszió vizsgálatának eredményei.....	28
4.4. Vasredukáló képességen alapuló teljes antioxidáns kapacitás mérés.....	34
4.5. Lipidoxidáció mérés eredményei.....	37
5. Következtetések és javaslatok	42
6. Összefoglalás	43
7. Köszönetnyilvánítás	44
8. Irodalomjegyzék	45
8.1. Internetes források	49
9. Táblázatok és ábrák jegyzéke	51

1. Bevezetés és célkitűzések

A herbicidek használata a mezőgazdaságban már hosszú évtizedek óta egy modern és egyszerű módszer a gyomnövények okozta károk csökkentésére. Alkalmazása gazdaságos és számos előnnyel rendelkezik más gyomszabályozási technológiával szemben. Ezen okból és a hiányos vagy bizonytalan korabeli ismeretekből fakadóan a kémiai gyomszabályozás túlzott és okszerűtlen használatával elősegítettük (de nem mi okoztuk) a rezisztencia kialakulását a különböző gyomfajokban. Már kiterjedt ismeretekkel rendelkezünk bizonyos herbicidrezisztencia mechanizmusokról, például a hatáshely rezisztenciáról (target-site resistance – TSR), amikor a hatóanyag hatásának helyén történik változás. Azonban meg kell említeni az egyelőre még kevésbé kutatott nem hatáshely rezisztenciát (non target-site resistance – NTSR), mikor a gyomirtószerrel szembeni érzékenység csökkenésének kialakulása fokozatosan következik be. Ezen mechanizmusok ismerete elengedhetetlen a herbicidrezisztens gyomnövények működésének megértéséhez (2.1.4. alfejezet). Az egyszikűek elleni védekezésben kulcsszerepet játszó ACCáz-gátlókkal szemben számos gyomfajban alakult már ki a herbicidrezisztencia valamely formája. Ez alól az olaszperje (*Lolium multiflorum* Lam.) sem kivétel, amely egy hasznos gyepi és hazánkban zöldítésre is javasolt növény. Szerte a világon nagy gazdasági károkat okozó gyomként is megjelenik. A legfrissebb hatodik országos gyomfelvételezés előzetes adatai alapján az olaszperje a 15. az őszi búza legfontosabb nyáreleji gyomfajai fontossági sorrendjében (Labant-Hoffmann és Papp, 2024). A fokozatos terjedéséhez a zöldítés is hozzájárul, ezzel is növelve a herbicidrezisztens biotípus kiszelektálódásának esélyét. Bár hazánkban még nem érkezett bejelentés herbicidrezisztens olaszperjéről, magas rezisztenciára való hajlama és károsítási potenciálja indokoltá, aktuálissá teszi herbicidellenállóságának vizsgálatát.

Célkitűzésünk, hogy dózis-hatás kísérlet keretein belül megvizsgáljuk a herbicid rezisztens gyanús és bizonyítottan érzékeny olaszperje biotípusok stresszválaszait non-invazív, valamint invazív analitikai eljárásokkal, hogy a rezisztencia jelenléte megerősítést nyerjen. Célunk, hogy eredményeket kapjunk arról, hogy a quizalofop-P-etil hatóanyag (posztemergens szelektív egyszikűirtó) különböző dózisaival történő kezelések egy 5-6 hetes periódusban hogyan befolyásolják a két biotípus fenotípusos tulajdonságait, lipoxidációját, védekezőképességüket jellemző antioxidáns kapacitásukat. Emellett válaszokat keresünk a fotoszintetikus rendszerben bekövetkező változásokról, melyek nyomon követéséhez nem-invazív biofoton emisszió alapuló képalkotást alkalmazunk.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. A herbicidrezisztenciáról általánosságban

2.1.1. A herbicidrezisztencia terjedésének aktualitása

Mióta az ember mezőgazdasági tevékenységet folytat, mindig is kulcskérdés volt a gyomokkal vívott harc. Ennek oka, hogy a növénytermesztésben jelentős termés kiesést okozhatnak, ha nem tartjuk őket a gazdasági küszöbérték alatt. Annak érdekében, hogy a globálisan növekvő népesség élelmiszerellátása viszont biztosítva legyen, nagy nyomás helyeződik a mezőgazdasági termelés maximalizálására, mely ágazat erősen függ a növényvédő szerektől. A világ népessége várhatóan 2030-ra körülbelül 8,5 milliárdra, 2050-re pedig 9,7 milliárdra nő. Az ipari mezőgazdaság hosszú évtizedekig egyoldalúan támaszkodott gyomirtó szerekre az élelmiszer- és takarmánytermelésben (Ofosu et al., 2023). Ennek oka, hogy a mezőgazdaság korai szakaszában az 1940-es évek előtt, mielőtt a szintetikus gyomirtó szerek megjelentek volna, ez a folyamat kifejezetten munkaigényes volt. A herbicidek pedig a leghatékonyabb gyomirtási eszközök, a megcélzott gyomok 90–99%-át elpusztítják. Más gyomszabályozási technológia csak akkor képes hasonló hatékonyságot elérni, ha több módszert kombinálnak, melyek mindegyike általában sokkal munkaigényesebb, mint maga a herbicid alkalmazás. Ebből fakadóan e szerek kifejlesztése után világszerte gyorsan nőtt a kémiaiilag kezelt szántóterületek nagysága és a szabályozni kívánt gyomfajok köre (Délye et al., 2013). A herbicidek fokozott használata, valamint az azonos hatásmechanizmusú hatóanyagok ismételt alkalmazása növelte a többféle herbiciddel szembeni rezisztencia létrejöttét (Damalas és Koutroubas, 2024).

2.1.2. A herbicidrezisztencia fogalma, kereszt- és többszörös rezisztencia

A gyomnövényekben a herbicidrezisztencia kialakulása egy evolúciós folyamat, amely spontán következik be. Jelensége viszont erősen függ a gyomfajok biológiájától, a herbicidek biokémiai tulajdonságaitól, azok kijuttatásának számától és arányától, a kezelési tényezőktől, illetve a genetikától, mint például a rezisztens allélek gyakoriságától (Powles és Yu, 2010; Délye et al., 2013). Ezeket a tényezőket bővebben taglalom a 2.1.3. alfejezetben.

A herbicidrezisztencia egy örökölhető képesség, amely lehetővé teszi a növény számára, hogy túléljen egy akkora herbiciddózist, amely az adott növényfaj érzékeny egyedeire letálisan hatna. Kódolva van a növény genomjában, tehát az adott egyed létrehozhat olyan utódokat, amelyek hordozzák ezt a genetikai információt, vagy már maguk is rezisztensek.

Ezek a biotípusok túlélnek a gyomirtó szeres kezelést, sikeresen befejezik életciklusukat virágzással és magprodukciónal. Ennek ellenére sok esetben ugyanúgy megmutatkozhatnak rajtuk a herbicidkártételi tünetek, növénypusztulás nélkül. Ettől eltérve a herbicidtolerancia az egész fajra jellemző tulajdonság. Ilyenkor az adott faj egyedei valamilyen morfológiai, élettani sajátosságnak köszönhetően el tudják viselni a gyomirtó szert. Keresztrezisztenciáról beszélünk, mikor egy gyompopuláció örökletesen rezisztens kettő vagy több különböző hatóanyaggal szemben, melyek azonos hatáshellyel rendelkeznek (például különböző ACCáz-gátló hatással rendelkező hatóanyagok), vagy ugyanazon enzim (például pl. glutation-S-transzferázok) bontja le őket. Többszörös rezisztencia esetén a gyompopulációk ellenállnak két vagy több erőteljesen eltérő hatásmechanizmussal rendelkező herbicidnek (Hunyadi et al., 2011).

2.1.3. A herbicidrezisztencia történeti áttekintése, kialakulását befolyásoló tényezők

Herbicidrezisztens gyomok hosszú évtizedek óta folyamatosan jelennek meg világszerte, jelenlétükkel veszélyeztetve a növénytermesztést. A herbicidrezisztenciát először J.L. Harper ökológus jósolta meg 1956-ban (Harper, 1956). Majd utána rövidesen azonosították is a jelenséget Hawaii cukornádültetvényein. Ezt követően 1968-ban triazin herbicidekkel szembeni rezisztenciát figyeltek meg a közönséges aggófüben (*Senecio vulgaris*), illetve az aprószulákban (*Convolvulus arvensis*) (Hunyadi et al., 2011; Baucom, 2019).

Napjainkban a gyomnövények 21 herbicid-hatáshelyre alakították ki rezisztenciát az ismert 31 közül, és összesen 168 különböző herbiciddel szemben váltak ellenállóvá. Jelenleg 75 országban 102 termesztett növénykultúrában fordul elő herbicidrezisztencia, globálisan pedig 535 egyedi esetet és 273 gyomfaj érintettségét tartják nyilván (Heap, 2025). Ennek ellenére a gazdák válasza ezzel a ténnyel kapcsolatban inkább reaktív, mint proaktív. Számos termelő nem alkalmaz megfelelő rezisztenciakezelést, mivel gyakran vonakodnak megelőző intézkedéseket bevezetni a rezisztencia evolúciója ellen saját földjeiken (Norsworthy et al., 2012). Viszont a rezisztens gyomok elleni küzdelemben, gyanú esetén elengedhetetlen volna, hogy felváltva alkalmazzunk különböző hatásmechanizmusú készítményeket. Agrotechnikai szempontból az egyik legfontosabb elem a megfelelő vetésciklus alkalmazása, amely az egy és kétszikű, őszi és tavaszi vetésű kultúrák optimális rotációját jelenti. Emellett fontos a jó versenyképességű fajta megválasztása, esetleg a vetésidő és vetőmagmennyiség változtatása. Fontos odafigyelni a herbicidrezisztens növények szaporítóképleteinek tovább terjedésének megakadályozására. A szennyezett vetőmag és különböző művelőeszközök, leginkább a betakarítás gépei, elősegíthetik az

ellenálló gyomok terjedését. Súlyos esetben számításba kell venni a forgatásos talajművelés gyomszabályozási hatékonyságát is (Labant-Hoffmann, 2024).

A herbicidrezisztencia kialakulásában résztvevő tényezőket ábrázolom az 1. táblázatban Powles és Yu (2010) munkássága alapján.

1. táblázat: *A gyomnövények herbicidrezisztenciájának kialakulását befolyásoló tényezők (Powles és Yu, 2010 nyomán módosítva)*

Genetikai tényezők	Gyomfajok biológiája	Herbicid tulajdonságai	Üzemeltetési tényezők
Rezisztenciagének előfordulási gyakorisága	Idegtermékenyülés vagy öntermékenyülés	Kémiai szerkezet	Herbicid dózis
Rezisztenciagének száma	Magprodukciónak kapacitása	Hatásmód	Permetező szakember szakértelme (géphasználat, időzítés, környezeti feltételek stb.)
Rezisztenciagének dominanciája	Gyommagbank élettartama	Tartamhatás	Agroökológiai tényezők (nem-kémiai gyomszabályozási módszerek, vetésforgó, agrotechnika stb.)
Rezisztenciagénekhez kapcsolódó szelekciós hátrány (fitneszköltség)	Mag és pollen terjedési sebessége		

A táblázatban jól látható, hogy a herbicidrezisztencia egy összetett probléma, mivel jelenségének oka komplex, számos genetikai, biológiai és technológiai tényező befolyásolja. Ezek az elemek, valamint a gyomirtó szer tulajdonságain túl az emberi döntéshozatal is nagymértékben hozzájárulhat a kialakulásához (Powles és Yu, 2010). Az ilyen populációkat már a szintetikus herbicidek megjelenése és alkalmazása óta megfigyelték, kifejezetten az 1980-as évektől kezdődően szignifikánsan megnőtt a herbicidrezisztencia eseteinek száma (Damalas és Koutroubas, 2024). Fontos megjegyezni, hogy jelen van a meglévő gyompopulációkban a rezisztencia azon hatóanyagokkal szemben, melyek még csak ezután fognak kereskedelmi forgalomba kerülni. Amint ezek a szerek felhasználásra kerülnek, az adott gének megkülönböztetett előnyt jelentenek a rezisztenciával rendelkező gyomok esetében, mivel ennek köszönhetően felszaporodásra lesznek képesek, herbicidérzékeny társaikkal szemben (Hunyadi et al., 2011).

A kutatók körülbelül 60 éve tanulmányozzák a herbicidrezisztenciát fenotípusos, élettani és genetikai szempontok szerint azzal a kettős céllal, hogy feltárják a rezisztencia problémájának mértékét, valamint olyan stratégiák kidolgozásának okán, melyek segíthetnek késleltetni annak kialakulását és terjedését. Figyelemre méltó eredmények

születtek a növényi adaptáció vizsgálatától kezdődően a rezisztenciáért felelős gének és mutációk azonosításán át a rezisztenciához kapcsolódó fitnessköltségek elterjedésének megértéséig. Ezen kutatások hozzájárultak ahhoz a kritikus felismeréshez, hogy a változó szelekciós rendszerek miként befolyásolhatják a rezisztencia evolúcióját (Baucom, 2019).

A herbicidrezisztenciát ma már széles körben a gyompopulációk adaptív evolúciójának eredményeként ismerik el, amelyet a herbicidek által kifejtett intenzív szelekciós nyomás vált ki. Azokban a gyompopulációkban, amelyeket ismételt azonos hatású gyomirtó szerekkel kezelnek a legkevésbé érzékeny egyedek szelektív előnyben részesülnek, míg végül az adott populációkban azok fognak sikerrel felszaporodni. Problémaforrás a perzisztens, hosszú hatástartammal rendelkező, valamint a szisztémikus felszívódó szerek alkalmazása. Ilyen típusú herbicidek használata esetén nagyobb eséllyel alakul ki rezisztencia, mint a nem perzisztens kontakt hatású készítményeknél. Továbbá rizikófaktor még, ha a herbicid csak egy pontban fejt ki a hatását (Délye et al., 2013; Labant-Hoffmann, 2024).

2.1.4. Herbicidrezisztencia mechanizmusok a gyomnövényekben

A hatékony herbicidek kémiai tulajdonságai lehetővé teszik, hogy a növénybe be tudjanak jutni, ott szállításra kerüljenek és letális dózisban elérjék a hatáshelyet. Az alkalmazott készítmények túlnyomó többsége olyan specifikus enzimeket (hatáshelyeket) gátol, amelyek feltétlenül szükségesek a növény anyagcserefolyamataihoz. Az evolúció folyamán kialakult herbicidrezisztencia vizsgálatakor elkülönítünk hatáshelyhez kötött (target-site resistance, TSR) vagy hatáshelytől független rezisztenciát (non-target site resistance, NTSR). Előbbi mechanizmus (TSR) monogenetikusan öröklődik. Kialakulása spontán mutáció révén következik be a hatóanyag hatásának helyén. Fennállásának esetén a célenzim aminosav szekvenciája, háromdimenziós szerkezete, elektrokémiai tulajdonságai módosulhatnak. Ezeken kívül bekövetkezhetnek szabályozó mutációk, melyek a célfehérje túltermelődését okozzák, ennek következtében ellensúlyozzák a herbicid hatását (Powles és Yu, 2010; Délye et al., 2013; Gaines et al., 2020). Az utóbbi stratégiát (NTSR) poligén öröklődésűnek tekintjük, ugyanis kialakulásában részt vehetnek például a citokróm P450 monooxygenázok (P450), glutation-S-transzferázok (GST), glikozil-transzferázok (GT), észterázok, hidrolázok, valamint az ABC transzporterek (Délye et al., 2013; Scarabel et al., 2020; Suzukawa et al., 2021). Magában foglalja az összes olyan mechanizmust, amelyek csökkentik a hatáshely-fehérjével való kölcsönhatáshoz rendelkezésre álló aktív gyomirtó szer koncentrációját, valamint olyan folyamatokat, amelyek lehetővé teszik a növény

számára, hogy elviselje a hatáshely gátlását (Gaines et al., 2020). Fennállásakor a herbicid bejutása csökkenhet a kutikula tulajdonságainak és/vagy a növény morfológiai sajátosságainak változása révén, vagy a gyomirtó szer transzlokációjának megváltozása okán. Bekövetkezhet a herbicid fokozott metabolizmusa, vagy a gyomirtó hatása során keletkező citotoxikus molekulák fokozott semlegesítése (Délye et al., 2013).

A metabolikus rezisztenciáról napjainkban is kevés ismerettel rendelkezünk. Kutatások folynak ezen folyamatok részletesebb megismerése céljából, mivel az ilyen típusú rezisztenciamechanizmusokkal rendelkező gyompopulációk általában több, különböző kémiai csoportba tartozó és eltérő hatásmechanizmusú herbiciddel szemben is rezisztenciát mutatnak. Így ezek a gyomok ellenállók lehetnek olyan hatóanyagokkal szemben, amelyekkel még soha nem voltak kezelve. A metabolikus rezisztencia különösen komoly problémát jelent, hiszen kialakulásához könnyedén hozzá tudunk járulni, ha alacsony vagy nem optimális a kijuttatott gyomirtó szer dózisa. A legújabb kutatások kimutatták, hogy az NTSR fenotípus magyarázható a fő hatású génekkel, például a P450 CYP81A10v7 fokozott expressziójával, amely hét herbicid vegyszerrel szembeni rezisztenciát eredményezett. (Busi és Powles, 2016; Han et al., 2021; Brunharo és Streisfeld, 2022).

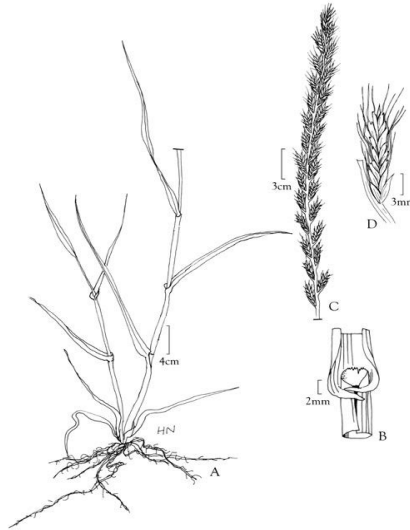
2.2. Az olaszperje bemutatása, herbicidrezisztenciára való hajlama

2.2.1. Az olaszperje taxonómiája és jelentősége

Az olaszperje (*Lolium multiflorum* Lam.) Dél-Európában honos egy vagy két éves növény, amely a pázsitfűfélék (Poaceae) családjába tartozik. Közeli rokona az évelő angolperjének (*Lolium perenne*). Eredetileg a Földközi-tenger medencéjéből (Dél-Európa, Észak-Afrika, és Kis-Ázsia) származik, ahonnan széles körben elterjedt Észak- és Dél-Amerikában, Új-Zélandon, valamint Ausztráliában is. Magyar neve onnan ered, hogy először Olaszországban foglalkoztak a termesztésével. Gyorsan fejlődő és értékes takarmánynövény, viszont a gabonaföldeken, szerte a világon jelentős gyomfajként is megjelenik. Sikeressége az erős kompetíciós képességének, genetikai diverzitásának és magprodukciójának köszönhető (Hannaway et al., 1999; Nunes et al., 2012; Pagnoncelli et al., 2024). E tulajdonságok problémát okoznak, különösen az őszi gabonafélék termesztésében. Az őszi búzában akár 90 %-os termésnövekedést is okozhat (Pagnoncelli et al., 2024). Ha magtermesztésre szánt kultúrában fordul elő, a kereskedelmi vetőmagtétel szennyeződését okozhatja, ami a gyommagvak nagy távolságú terjedéséhez vezethet (Brunharo és Tranel, 2023). A búzavesztés Kínában évente közel milliárd kilogramm körül alakul (Zhu et al., 2020).

2.2.2. Az olaszperje ökológiai igényei és morfológiája

Az olaszperje leginkább a hűvös, nedves éghajlatot kedveli, optimális fejlődési hőmérséklete 20-25 °C között alakul. Ebből következik, hogy növekedéséhez kedvez a kora tavaszi és őszi időszak. Bár az angolperjéhez képest jobban tűri a magas hőmérsékletet, a nyári hőstressz hatására a termésmennyiség lecsökken abban az esetben is, ha megfelelő mennyiségű víz áll rendelkezésre. Kizárólag magról szaporodik (Klein, 2011). A következő 1. ábra bemutatja az olaszperje morfológiáját: B) hüvely, nyelvecske és levél; C) kalász; D) kalászká



1. ábra: Az olaszperje morfológiája
(Forrás: Ibrahim és Peterson, 2014)

Rövid gyöktörzsű, bokrosodó fűféle, amely 30,5-91 cm magasra nő. A hajtások általában felállóak vagy kiterjedtek, az alapjuknál lilás színűek lehetnek. A szárak nóduszokból és internódiumokból állnak. Minden nódusz egy levelet hoz, melyek erősen ereztettek, sötétzöldek. Fontos határozóbélyeg, hogy a levél fonákja fényes. A levéllemezek laposak, csupaszok, végük hegyes, 3-6 mm szélesek, a levélalpnál rövid átlátszó nyelvecske és keskeny elálló fülecskék láthatók. A kalász váltakozó állású kalászkákkal rendelkezik. A virágzat lapított megjelenésű, mivel a kalászkák a kalászorsón, az orsóhoz a keskeny oldalukkal fordulva helyezkednek el. A toklász szálkás (Hannaway et al., 1999; Klein, 2011).

2.2.3. Az olaszperje, mint értékes takarmánynövény

Az olaszperje alapvetően egy értékes fűféle, amely fontos szerepet játszik a haszonállatok takarmányozásában. A világ mérsékelt éghajlati övezeteiben takarmánynövényként termesztik, gyakori eleme a szenázs-előállításnak, de gabona szilázs keverékekben és szenaként is hasznosítják. Nagyon kedvező tulajdonságokkal bír hozam és energiatartalom

szempontjából. Intenzív gazdálkodási rendszerekben nagyon termelékeny, a legelő állatok pedig előnyben részesítik ízletessége miatt. Legelőkre való beillesztése már a vetés évében megtérülhet, ugyanis hüvelyesekkel és más egyszikű fajokkal együtt, jobb takarmányminőséget, valamint magas és egyenletes termelést eredményez (Čop et al., 2019; Kemešytė et al., 2023). Az olaszperje pozitív hatása az ökoszisztémában is megnyilvánul. Hozzájárul a talajegészséghez, mivel csökkenti a nitrogén és a foszfor kimosódását, megkötöti a szenet, növeli a talajaggregátumok stabilitását, valamint fokozza a talaj mikroflórájának és faunájának sokféleségét, sűrűségét (Kemešytė et al., 2023).

2.2.4. Herbicidrezisztencia formái az olaszperjében

Az 1980-as években jelentek meg az acetyl-coenzim-A karboxiláz (ACCáz-gátló) herbicidek, amelyek egy hatáshelyen fejtik ki hatásukat (Kaundun, 2014). Ezek a gyomirtó szerek három kémiai eltérő osztályba sorolhatók: ariloxi-fenoxi-propionátok (FOP), ciklohexándionok (DIM) és fenilpirazolinok (DEN) (Wu et al., 2022). Elsősorban kétszikű kultúrákban használták pászitfűfélék elleni védekezésre, viszont néhány vegyületet (DEN csoport) lehetett alkalmazni kalászosokban és rizsben. Mivel elődeihez képest effektív megoldást nyújtott a fűfélék ellen posztemergens herbicidként, viszonylag hamar elfogadták és széleskörben alkalmazni kezdték (Kaundun, 2014). A kiterjedt és ismételt használatuk azonban rezisztenciát váltott ki a legfontosabb Poaceae gyomfajokban, összesen 20 nemzetségben. Az ACCáz-gátlókat acetolaktát-szintáz-ALS-gátlókkal váltották fel, viszont végeredményben ezzel a csoporttal szemben is kialakultak az ellenálló biotípusok. Az első ACCáz-gátlóval szembeni rezisztencia jelentés olaszperjében 1987-ből származik az Egyesült Államokból, ALS-gátlóval szembeni pedig 1995-ből szintén innen (Kaundun, 2014; Mahmood et al., 2016). Egyre több bizonyíték utal arra, hogy az olaszperje hajlamosabb a gyomirtószer-rezisztencia kialakítására, és az ACCáz-gátlók gyakori alkalmazása felgyorsítja a populációkban a rezisztencia evolúcióját (Kaundun, 2014). Korábbi kutatások alátámasztották, hogy a fűfélékben, ezzel együtt pedig az olaszperjében is a rezisztenciáért felelős fő mechanizmusok azok a génmutációk, amelyek aminosav változások révén csökkentik vagy gátolják a herbicid kötődését a célfehérjéhez (TSR), valamint a fokozott metabolizmus, amely felgyorsítja a herbicid lebontását (NTSR) (Scarabel et al., 2020).

Az iménti állítások bemutatására foglaltam össze a következő táblázatban (2. táblázat) csak az európai rezisztenciaeseteket az olaszperje kapcsán az International Herbicide-Resistant Weed database adatai alapján. Ebben a táblázatban összegyűjtöttem országot, évet, kultúrát,

hatóanyag és hatásmód szerint a jelentett eseteket. A rezisztencia leírása a HRAC (Herbicid Rezisztencia Bizottság) csoportosítási rendszere szerint történt, feltüntetve a régi és új jelölést a hatás és kémiai szerkezet leírására. Félkövérrrel jelöltem azokat a hatóanyagokat, amelyekre újonnan alakított ki rezisztenciát ez a növény Európában.

2. táblázat: *Európai herbicidrezisztens Lolium multiflorum* jelentések összefoglalása
(Forrás: Heap, 2025 nyomán módosítva)

Ország	Év	Kultúra	Hatóanyag(ok)	Rezisztencia leírása
Egyesült Királyság	1990	repce, gabonafélék, búza	cikloxidim; diklofop-metil; fluazifop-P-butil; pinoxaden; tralkoxidim	Acetil-KoA karboxiláz (ACC-áz) gátlás (HRAC csoport 1; Régen A)
Egyesült Királyság	1990	búza	izoproturon	PSII inhibitorok – Szerin 264 (HRAC csoport 5; Régen C1/C2)
Olaszország	1995	lucerna és durumbúza	klodinafop-propargil; cikloxidim; diklofop-metil; pinoxaden; quizalofop-P-etil; szetoxidim; tralkoxidim	Acetil-KoA karboxiláz (ACC-áz) gátlás (HRAC csoport 1; Régen A)
Olaszország	2002	durumbúza	klodinafop-propargil; cikloxidim; diklofop-metil; jodoszulfuron-metil-Na; mezoszulfuron-metil; pinoxaden; szetoxidim; tralkoxidim	Többszörös rezisztencia: 2 hatásmód Acetil-KoA karboxiláz (ACC-áz) gátlás (HRAC csoport 1; Régen A) Acetolaktát-szintáz (ALS) gátlás (HRAC csoport 2; Régen B)
Spanyolország	2006	gyümölcsösök	glifozát	Enol-piruvil-sikimisav-5 foszfát (EPSP) szintetáz gátlás (HRAC csoport 9; Régen G)
Dánia	2010	őszibúza	klodinafop-propargil; floraszulam; jodoszulfuron-metil-Na; mezoszulfuron-metil; piroszulam	Többszörös rezisztencia: 2 hatásmód Acetil-CoA karboxiláz (ACC-ás) gátlás (HRAC csoport 1; Régen A) Acetolaktát-szintáz (ALS) gátlás (HRAC csoport 2; Régen B)
Franciaország	2018	búza	flufenacet	Nagyon hosszú láncú zsírsav szintézis gátlók (HRAC csoport 15; Régen K3/N)
Svájc	2018	borsó	klórtoluron; jodoszulfuron-metil-Na; mezoszulfuron-metil	Többszörös rezisztencia: 2 hatásmód Acetolaktát-szintáz (ALS) gátlás (HRAC csoport 2; Régen B) PSII inhibitorok – Szerin 264 (HRAC csoport 5; Régen C1/C2)
Írország	2021	búza	cikloxidim; jodoszulfuron-metil-Na; mezoszulfuron-metil; pinoxaden; propaquizafop	Többszörös rezisztencia: 2 hatásmód Acetil-CoA karboxiláz gátlás (HRAC csoport 1; Régen A) Acetolaktát-szintáz (ALS) gátlás (HRAC csoport 2; Régen B)

Jól látható, hogy 31 év alatt igaz túlnyomórészt kalászosokban, de más kultúrákban is előfordult ellenálló biotípus. Az ACCáz-gátlók számos hatóanyagára alakult ki rezisztencia ez idő alatt, ezeket követték az ALS-gátlók. Meg kell említeni még a PS II fotoszintézis-gátlókat, az EPSPS- (glifozát) inhibitorokat, valamint a VLCFA-gátlókat is. A HRAC Europe (2021) megerősítette, hogy a különböző *Lolium* fajok (*L. perenne*, *L. multiflorum*, *L. rigidum*) különösen hajlamosak herbicidekkel szembeni kereszt- és többszörös rezisztenciát kialakítani, előbbi igen elterjedt az ACCáz-inhibitorok esetében. Az ACCáz- és ALS-gátlók közötti többszörös rezisztencia jelentősen növekszik, erre példa az Olaszországban

megjelenő ACCáz-, ALS- és EPSPS-gátlók közötti többszörös rezisztencia. A táblázatban meg is jelenítek egy ilyen jelentést (2002, Olaszország). Ettől az esettől kezdődően a 2021-es Írországi eseményig más országokban, kultúrákban is folyamatosan előfordultak hasonlóak.

2.2.5. Target-site (TSR) és Non-target site (NTSR) rezisztencia a *Lolium* fajokban

A *Lolium* fajokban (*L. perenne*, *L. multiflorum*, *L. rigidum*) az ACCáz-gátlók esetében a leggyakoribb TSR-mutációk az Ile1781, Ile2041 és Asp2078, míg az ALS esetében a Pro197 és Trp574 (HRAC Europe, 2021). Xu és munkatársai (2023) arról számoltak be, hogy Kínában az olaszperje rezisztenciát alakított ki az ACCáz- és ALS-gátló herbicidekkel szemben az ACCáz D2078G aminosav-helyettesülésének, valamint az ALS P197Q és P197T aminosav-változásainak következtében. Glifozát esetében szólnak feljegyzések az EPSPS génben történt mutációról (Pro106) amely szintén hozzájárulhat a kialakulásához (HRAC Europe, 2021).

A korábban említett fajokban az NTSR mechanizmusokat tekintve kihívást jelent a metabolikus rezisztencia folyamatos térhódítása, melyről részletesebb említést tettem a 2.1.4-es alfejezetben. Az olaszperje közeli rokonában a merev perjében (*Lolium rigidum*), mely hazánkban még nincsen jelen, felfedeztek négy túlzottan expresszáló gént. Ezek közé tartozott két P450, egy nitronát-monooxygenáz (NMO) és egy GT (Scarabel et al., 2020). Ezen géneket találták meg Dániában is, ott már az olaszperje rezisztens egyedeiben (Mahmood et al., 2016). Bizonyítékok szolgálnak arra, hogy a TSR gyakrabban fordul elő Dél-Európában, míg az NTSR a kontinens északi részére jellemző (HRAC Europe, 2021).

2.3. Elismert módszerek a herbicidrezisztencia vizsgálatához

Ebben az alfejezetben az Európai Herbicid Rezisztencia Bizottság (2017) (European Herbicide Resistance Action Committee) által kiadott herbicidrezisztencia-vizsgálatok elvégzéséhez szükséges irányelvek alapján emlékeztet meg pár eljárást.

2.3.1. Tenyészedényes vizsgálat

A tenyészedényes vizsgálati módszer a legszélesebb körben alkalmazott és elismert, jelen dolgozatban is végrehajtott mód a herbicidrezisztencia vizsgálatához. Alkalmazásukkor tenyészedényekben vizsgálják a herbicidrezisztens gyanús növényeket. Olyan helyről származó magokat vetnek el, ahol feltételezhető a rezisztencia jelenléte. Ezt követően a vizsgált gyomirtó szerrel permetezik le azokat dózis-hatás vizsgálat keretein belül különböző dózisokban, vagy egy dózisban. Majd összehasonlítják más herbicidek hatásával és ismert

rezisztenciastátuszú biotípusokkal, beleértve az érzékeny biotípusokat is. Ezeket a vizsgálatokat általában üvegházban, szabályozott környezeti kamrában végzik, viszont van lehetőség nagyobb cserepekben kültéren is végrehajtani, ha biztosíthatók az egységes körülmények. Értékelésként vizuálisan mérik fel az elhalt, illetve életben maradt egyedeket, valamint elvégzik a lombzat friss- és szárazanyag tömegének mérését. Annak érdekében, hogy a vizsgálat megbízható eredménnyel szolgáljon, megfelelő kontroll alanyokat szükséges biztosítani. Követelmény, hogy ezek a növények ne mutassanak szokatlan érzékenységet, vagy éppen ellenállást az adott hatóanyaggal szemben. Javasolt több érzékeny standard alkalmazása, főként részleges rezisztencia esetén, mert ez pontosabb képet ad a háttérben megjelenő válaszok változatosságáról (HRAC Europe, 2017)

2.3.2. Dózis-hatás kísérletek

A kezdeti vizsgálatokban többféle dózis alkalmazása ajánlott, hogy meghatározható legyen a teljes dózis-hatás görbe, melynek segítségével pontosabban számszerűsíthető a rezisztencia mértéke. Ehhez érdemes erősen és részlegesen rezisztens standardokat is bevonni, hogy összehasonlítható legyen a gyomirtó szer relatív hatékonysága az egymást követő vizsgálatok között. A kísérletek célja általában annak meghatározása, hogy mekkora dózis szükséges a friss/száraz növényi tömeg vagy a vizuálisan értékelt károsodás/elhalás 50%-os csökkentéséhez a kezeletlen kontrollhoz viszonyítva. Ebből Rezisztencia Index (RI) számítható, amely magában foglalja a 50%-os kontrollt biztosító becsült dózist (ED_{50}), a növekedéscsökkenéshez szükséges dózist (GR_{50}), valamint a letális dózist (LD_{50}). Megbízható ED_{50} becsléshez széles dózistartomány, körülbelül 6 dózispont és 4-5 ismétlés szükséges, beleértve a szántóföldi ajánlott dózis alatti és feletti értékeket is, mivel üvegházi körülmények között a szerek általában erősebben hatnak (HRAC Europe, 2017)

2.4. Nem-invazív vizsgálatok, biofoton emisszió alapuló képalkotás

Az utóbbi évtizedekben a növénytudományokban a növényállapot diagnosztika jelentős fejlődésen ment keresztül. Számos olyan eszköz használata terjedt el mind a gyakorlatban, mind a kutatásokban, amelyek segítségével *in vivo*, vagyis élő állapotban és roncsoltásmentesen kaphatunk információt azok fiziológiás állapotáról. Ezen vizsgálatok az adott egyed(ek) fejlődése alatt többször is megismételhetők. A nem-invazív vizsgálatok legtöbbször a detektálási metodikájában szorosan kötődik a fotoszintetikus rendszer állapotához, illetve folyamataihoz. A műszeres klorofill tartalom meghatározás (SPAD index mérés) gyors becslést szolgáltat a klorofilltartalomról, illetve közvetve a növény nitrogén ellátottságáról. Lehetővé teszi, hogy a reflektancián alapuló vegetációs indexek már

szofisztikáltabb információkat szolgáltatnak nemcsak a statikus jellemzőnek tekinthető pigmenttartalomról, hanem a fotoszintézis mellett a vízforgalomról, elemellátottságról, illetve specifikus stresszorok hatásainak kimutatásán keresztül a növény rezisztencia tulajdonságairól is (Lukács et al., 2022).

A nem invazív metodikák között egy újszerű képalkotó eljárás a biofoton emisszió mérése, melynek során a növényállapot és a növényi stressz számos aspektusa is detektálhatóvá válik.

A biofoton emisszió vizsgálatával monitorozhatjuk a késleltetett fluoreszcencia (delayed fluorescence-DF) és ultragyenge biolumineszcencia (ultra-weak bioluminescence-UWLE) jelenségét. A növényi szervezetben a sejtek és a szövetek véletlenszerűen bocsátanak ki fotonokat egy körülbelül 350-1300 nm-ig terjedő skálán az elektromágneses spektrum ultra-viola (UV), valamint látható/közeli infravörös tartományában. A jelenség folyamán nukleinsav vagy lipid molekulák, fehérjék az oxidációjuk alatt gerjesztett állapotba kerülnek, majd egy elektronátmenettel járó átmeneti fázis után visszatérnek kiindulási állapotukhoz. A korábban említett folyamatok megfigyelése ultraérzékeny érzékelőkkel lehetséges például fotomultiplier-csővek (PMT-k), illetve töltéscsatolt eszközök (charge coupled device, CCD-k) használatával. Segítségükkel analitikai képalkotás során egy mérés alkalmával is monitorozni tudjuk több anyagcserefolyamat ultraalacsony fotonkibocsátását (Pospíšil, 2012; Cifra és Pospíšil, 2014).

Korábbi kutatások rámutattak arra, hogy a biofoton-emisszió szoros kapcsolatban áll a növényekben stressz hatására kialakuló oxidációs folyamatokkal. A kibocsátott fotonok így információt szolgáltathatnak a vizsgált sejtek és/vagy fotoszintetizáló szövetek oxidatív állapotáról és stresszterheléséről. Mindezek alapján a biofoton-emisszió mérése kiemelt jelentőséggel bír a roncsolásmentes stresszdetektálási módszerekben (Hossain et al., 2012; Jócsák et al., 2020).

2.4.1. A késleltetett fluoreszcencia (delayed fluorescence-DF)

A növényi biofoton emisszió mérésének első állomása a késleltetett fluoreszcencia jelenségének lezajlása. Ha megvilágítást követően sötét helyre zárunk zöld növényeket, algákat vagy fotoszintetizáló baktériumokat, azok fotonokat fognak kibocsátani. Ebben a folyamatban a megszűnő vízbontás következtében a PSII elektronhiányos állapota a fotoszintetikus elektrontranszportláncban már elindult, de abból a PSII-be visszaáramló elektronokkal pótlódik, amelyek gerjeszteni képesek a PSII klorofill-a

molekuláit. Ezen gerjesztett állapot azonban már fotonkibocsátás formájában cseng le. Ezt a jelenséget nevezzük késleltetett fluoreszcenciának (Strehler és Arnold, 1951; Falkowski és Raven, 1997). Számos kutatás igazolta, hogy e jelenség alkalmas eszközt kínál a növények egyensúlyi állapotának *in vivo* vizsgálatára, valamint a stresszhatások detektálására is (Jócsák et al., 2020; Lukács et al., 2022).

2.4.2. Az ultragyenge biolumineszcencia (ultraweak-bioluminescence-UWLE)

A fotonkibocsátásnak többféle módozata ismert, ilyen például az ultragyenge fotonkibocsátás (ultra weak photon emission–UPE). Az UPE esetén a mitokondriumokban a sejtlégzés melléktermékeként reaktív oxigénmolekulák (ROS) képződnek. Ezek a szabadgyökök más tényezők mellett szintén hozzájárulnak a membránfehérjék és lipidek nem specifikus oxidációjához, amely folyamatok az UWLE megemelkedését eredményezik, ami egy –az előbbihez képest- több nagyságrenddel alacsonyabb intenzitású, de mérhető fotonkibocsátás (Janusz és Fritz-Albert, 1987; Jócsák et al., 2020).

2.5. Herbicidrezisztencia okozta stressz nyomonkövetésére alkalmas analitikai eljárások

A roncsolásmentes vizsgálatok eredményei jobban és pontosabban értelmezhetők akkor, ha azok analitikai vizsgálatokkal is kiegészülnek. A lipidoxidációs szint megváltozása általános stresszreakció az élő szervezetekben függetlenül a stresszor minőségétől, ezért az oxidatív folyamatok és az ellensúlyozásukra kialakult antioxidáns rendszer egyes elemeinek vizsgálata fontos információkat tárhat fel a stresszor által kiváltott anyagcsere módosulásokról.

2.5.1. A lipidperoxidáció vizsgálata (MDA)

A lipidoxidáció vizsgálata alkalmas eszközt szolgál arra, hogy nyomon követhetővé váljon a herbicides kezelés okozta stresszreakció az érzékeny, illetve a rezisztens gyomokban (Harre et al., 2018; Piasecki et al., 2019). Ha a növényt valamilyen fajta stresszhatás éri, jelen esetben gyomirtószeres kezelés, az a reaktív oxigén (ROS) molekulák kialakulásához vezet. Ezek az anyagok erősen toxikusak, semlegesítésükért az egészséges sejtekben az enzimátikus, valamint a nem-enzimátikus antioxidánsrendszer együttesen közreműködik (Kobayashi et al., 2014). Akkor alakul ki lipidperoxidáció, mikor a ROS molekulák szintje meghaladja azt a mennyiséget, amelyet a növényi szervezetben az antioxidánsrendszerek működésük révén semlegesíteni tudnának. Ez a folyamat a sejtes homeosztázis felborulásához, a membrán integritásának elvesztéséhez és végül pedig sejtelhaláshoz vezet (Harre et al., 2018; Piasecki et al., 2019).

2.5.2. Vasredukáló képességen alapuló teljes antioxidáns kapacitás (FRAP)

A vas (III)-ion redukáló képességen alapuló antioxidáns kapacitás (ferric reducing ability of plasma, FRAP) vizsgálat egy stresszanalitikai mérési módszer, amely információt nyújt a növények nem-enzimatikus antioxidánsainak mennyiségéről és jelenlétéről (Jócsák et al., 2020). A reakció során használt reagens, a vas-2,4,6-tripiridil-S-triazin (TPTZ) komplexben lévő Fe^{3+} ionokat az antioxidáns hatású vegyületek, úgymint flavonoidok, polifenolok, vagy egyes vitaminok (pl. aszkorbinsav) redukálják Fe^{2+} ionokká, és a reakció kék színt és abszorbancia változást eredményez 593 nm-en spektrofotométerrel mérve (Benzie – Strain, 1996).

3. Anyagok és módszerek

3.1. Minta gyűjtése

A mintaszedést megelőző év őszén (2023. október 23.) Növénypathyka Kft. egyik őszi káposztarepce kísérletében Targa Super 2,5 liter/hektáros (125 g aktív hatóanyag /ha quizalofop-P-etil) dózisa hatástalannak bizonyult az olaszperje ellen. A kísérleti kezelést túlélő növényekből 2024.06.24-én gyűjtöttünk magmintát. A mintagyűjtés helyét a 2. ábra mutatja. A magokat a vetésig papírtasakokban tároltuk száraz körülmények között.



2. ábra: A mintagyűjtés helyének GPS koordinátái és a gyűjtés helye

Minden rezisztencia vizsgálatnak elengedhetetlen eleme egy megfelelő standard érzékeny populáció bevonása. Erre a célra a kereskedelmi forgalomban kapható *L. multiflorum* diploid csávázatlan Estanzuela fajtát használtuk.

3.2. Tenyészedényes kísérlet

3.2.1. Növénynevelés

A kísérlet beállítása előtt megvizsgáltuk mindkét populáció csírázókéességét, és a csírázási % alapján határoztuk meg a vetett magok mennyiségét. A tenyészedényes kísérlethez 8,5 cm átmérőjű (6x6x6 cm) cserepeket használtunk, amiket virágfölddel (Florimo Premium - szervesanyag tartalom: legalább 40%, pH: 6,53+/-0,5, legalább: K₂O: 0,1%; N: 0,3%; P₂O₅: 0,1%) töltöttük meg. Mindegyik biotípusból 20-20 magot vetettünk el 2024.10.03-án. A magokat 0,5 cm vastagságban takartuk el a virágfölddel. A csírázás után 2024.10.12-én a cserépben lévő növények számát egységesen hat darabra redukáltuk. A kísérletbe bevont tenyészedények száma 40 darab volt.

Emellett vetettünk magokat balkonládákba (56x13x14 cm) is, hogy az *in-vitro* kísérletekhez a különböző mintavételi időpontokban legyen elegendő növényi anyagunk. A balkonládákat szintén Florimo Premium virágfölddel töltöttük meg, és a vetését a tenyészedenyekkel azonos időpontban végeztük.

3.2.2. Dózis-hatás vizsgálat

A kísérletet a quizalofop-P-etil hatóanyagot tartalmazó, a kereskedelmi forgalomban Targa Super néven kapható, az Acetil-KoA karboxiláz (ACC-áz) gátlók közé, az HRAC szerint 1 (A) herbicid csoportba sorolt, az ariloxi-fenoxi-propionát kémiai családba tartozó herbiciddel végeztük.

A készítményt az engedélyezett minimális dózissal (1×), valamint az alsó dózis kétszeresével (2×), négyszeresével (4×) és nyolcszorosával (8×) juttattuk ki (3. táblázat).

3. táblázat: Az egyes kezelésekkel kijuttatott aktív hatóanyag-tartalom g/ha-ban kifejezve

		Kijuttatott aktív hatóanyag g/ha			
Dózis		1×	2×	4×	8×
Targa Super	quizalofop-P-etil	35	70	140	280

A kísérlet beállítását 2024 október 30-án végeztük el, biciklis sűrítettlevegő-palackos kisparcella permetezőgéppel, 250 liter/hektáros lémenyiséggel és IDKC 120 03 szórófej alkalmazásával. A kezeléskor az olaszperje átlagosan 1-2 leveles volt (BBCH 11-12). A cserepeket a szabadban, véletlen blokk elrendezésben helyeztük el, és a kísérlet felszámolásáig igény szerint öntöztük.

3.2.3. Minta elkülönítése a különböző vizsgálatokhoz

A következő 4. táblázat a mintagyűjtési adatokat tartalmazza az *in-vitro* tesztekhez.

4. táblázat: Mintagyűjtési adatok az *in-vitro* vizsgálatokhoz

Mintagyűjtési időpont	Időpont kódja*	Kezelés óta eltelt napok száma	Olaszperje fenológiája (BBCH)**	Olaszperje átlagos fejlettsége	Mintagyűjtés helye	Vizsgálat típusa
2024.11.08.-09.	A1	9-10	BBCH 12-13; 2-3 leveles állapot	2 leveles	balkonláda	Szárazanyag-tartalom, FRAP, MDA
2024.11.21.-23.	A3	22-24		3 leveles		Szárazanyag-tartalom, FRAP, MDA
2024.12.05.-06.	A5	36-37				Szárazanyag-tartalom, FRAP, MDA
2024.12.12.	A6	43-44	BBCH 12-14; 2-4 leveles állapot	3 leveles	kis cserepek	Friss hajtástömeg, FRAP, MDA

* Az időpont kódjában a számok a kezelés óta eltelt hetek számát jelölik

** BBCH-skála: A legelterjedtebb skála a növények fenológiai fejlődési szakaszainak azonosítására

Minden vizsgálatípushoz 0,1 gramm tömegű növényi részt mértünk ki és fagyasztottunk le későbbi felhasználás céljából. A biofoton-emisszió mérése szándékosan nem került feltüntetésre, mivel azon vizsgálat élő növényeken történt.

3.3. Friss hajtástömeg mérés

A kísérlet felszámolásakor 2024.12.12-én, hat héttel a kezelést követően, az olaszperje 2-4 leveles fenológiai stádiumában végeztük a friss hajtástömeg mérését. Ehhez a folyamathoz, HA-30 mérleget alkalmaztunk, mely 30 g méréshatárral és 0,001-es pontossággal rendelkezett.

3.4. Szárazanyag-tartalom meghatározás

Szárazanyag-tartalom meghatározásának céljából a mintagyűjtési napok alkalmával (A1, A3, A5 — mintagyűjtési információk a 3.2.3. alfejezetben) az összes kezelésből, illetve a kezeletlen kontrollokból 0,1 gramm növényi zöldtömeget mértünk ki és fagyasztottunk le. Majd a mérés napját megelőzően ezeket a mintákat 24 órán át 60 °C-on szárítottuk egy Memmert UN30 (Memmert GmbH + Co. KG, Aeussere Rittersbacher Strasse 38 D-91126 Schwabach) típusú szárítószekrényben. Ezt követően a száraz-tömegeket négy tizedesjegy pontossággal analitikai mérlegen mértük le.

3.5. Vasredukáló képességen alapuló teljes antioxidáns kapacitás (FRAP) vizsgálat

FRAP mérés céljából a mintagyűjtési napok alkalmával (A1, A3, A5, A6 — mintagyűjtési információk a 3.2.3. alfejezetben) a kezelt érzékeny és rezisztens gyanús olaszperjék összes alkalmazott dózisából, valamint a kezeletlen kontrollokból 0,1 gramm tömegű mintákat különítettünk el és fagyasztottunk le. Ezeket a mintákat használtuk fel Benzie és Strain (1999) vasredukáló képességen alapuló teljes antioxidáns kapacitás vizsgálatára.

A törzsoldatokat képezte:

- Acetát-puffer: 300 mM, pH 3,6;
- TPTZ (2,4,6-tripiridil-s-triazin) 10 mM 40 mM HCl-ban; 100 ml DW 330 µl HCL-ban
- $\text{FeCl}_3 \times 6 \text{H}_2\text{O}$: 20 mM

A fagyasztott, felaprózott növénydarabokat előzetesen mélyhűtőben tárolt porcelán dörzsmozsárban dörzsöltünk el az 1,5 ml 7,6 pH értékű foszfát puffer, valamint a kvarchomok hozzáadása után. Az elkészült mintákat 2 ml-es Eppendorf csövekbe töltöttük és hűtőszekrényben tároltuk, míg az összes el nem készült. Ezt követően egalizáltuk, majd 10 percen át centrifugáltuk őket 4 °C-on, 13000 fordulat/perc érték mellett egy asztali

centrifugában (Hettich, MIKRO 220R; Andreas Hettich GmbH&Co. KG Föhren str. 12, D-78532 Tuttlingen, Németország). E művelet közben újabb 2 ml-es Eppendorfbokba töltöttünk 1950 μL munkaoldatot, majd a centrifuga program lejárta után a felülúszóból 50 μL -t adtunk hozzá a reagenshez. A nagy mintaszámra való tekintettel az előkészítés és mérés nem ugyanazon napon történt, így az elkészült mintákat a mérési időpontig fagyasztóba helyeztük. A vizsgálat napján a minták kiolvasztása után azok equalizálásra, majd centrifugálásra kerültek 1 percig 13000-res fordulaton. Ezt követően hűtőszekrénybe helyeztük őket (4 °C). Három ismétlést hoztunk létre mindegyik mintából. A mérés előtt 37 °C-on 15 percig inkubáltuk azokat. Ezt követően végrehajtottuk az abszorbancia vizsgálatot 593 nm-en 3 párhuzamos mérés mellett egy spektrofotométer segítségével (SmartSpec™ Plus Bio Rad Spektrofotometer). Az így kapott értékeket pedig három minta átlagaként μg aszkorbinsav (AS) ekvivalens/g friss tömegben adtuk meg.

3.6. Lipidoxidáció mérés

Lipidoxidáció mérésnek céljából is gyűjtöttünk 0,1 gramm növényi mintát az A1, A3, A5 és A6 mintaszedési időpontokon az érzékeny és rezisztensnek vélt minden (1 \times , 2 \times , 4 \times , 8 \times) dózissal kezelt növényből, valamint a kezeletlen kontrollokból, amelyeket utána lefagyasztottunk. Ehhez a vizsgálathoz Heath és Packer (1968) malondialdehid (MDA) meghatározáson alapuló módszerét alkalmaztuk néhány változtatás közbeiktatásával. A mintákat szintén fagyasztóban tárolt porcelán dörzsmozsarakban dörzsöltük el 1,5 ml 0,1 %-os triklórecetsav (TCA) oldat és kvarchomok hozzáadása után. Ezt követően 2 ml-es Eppendorf csövekbe töltöttük azokat és fagyasztóba helyeztük. A magas mintaszámra való tekintettel és annak érdekében, hogy a reakció ne játszódjon le, a mintákat a mérés napjáig fagyasztóban tartottuk. A vizsgálat alkalmakor a minták előkészítése után equalizálást követően 10 percig 4 °C-on 13 000 fordulat/perc mellett centrifugáltunk (Hettich, MIKRO 220R; Andreas Hettich GmbH&Co. KG Föhren str. 12, D-78532 Tuttlingen, Németország). A kivonatokból 0,4 mL-t mértünk ki, majd 1,6 mL reagenshez adtuk hozzá. A reagens 20%-os triklórecetsav (TCA) oldat volt, amely 0,5%-os tiobarbitursavat (TBA) tartalmazott. Az elegyet 96 °C-on 30 percig inkubáltuk, ezt követően a mintákat lehűtöttük, mielőtt spektrofotométerrel meghatároztuk az abszorbanciát. Az eredményeket nM/g friss tömegre vonatkoztatva, három párhuzamos minta átlagaként adtuk meg.

3.7. Biofoton-emisszió (késleltetett fluoreszcencia) vizsgálata

A késleltetett fluoreszcencia (DF) mérését egy NightSHADE LB 985 In Vivo Plant Imaging System készülékkel (Berthold Technologies, Németország) végeztük. A leveleket 5

másodpercig különböző hullámhosszú LED-fényekkel (távoli vörös—730 nm; vörös—660 nm; zöld—565 nm és kék 470 nm) világítottuk meg, majd a fényt kikapcsolva 10 percen keresztül rögzítettük a késleltetett fluoreszcencia értékeit. Az expozíciós idő 60 másodperc volt, 4×4 pixel binninggel. A mérések során nem végeztünk biolumineszcencia-analízist, csak a fotoszintetikus aktivitással összefüggő késleltetett fluoreszcenciát rögzítettük. A fotonszámolást 60 másodpercenként gyűjtöttük és elemeztük az IndiGO™ 2.0.5.0. szoftver segítségével. Az így másodpercenként kapott fotonkibocsátás (count/second - cps) értékeit használtuk fel a további elemzéshez.

A quizalofop-P-etil érzékeny és rezisztens-gyanús biotípusában kezelésenként (0×, 1×, 2×, 4×, 8×) 3-3 növény biofoton emisszióját mértünk meg és azok átlagából dolgoztunk a 4.3-as alfejezetben.

3.8. GR₅₀ érték és Rezisztencia Index (RI) számítása

A GR₅₀ (Growth Reduction = 50 %-os növekedés csökkenés) érték meghatározásához, a mért hajtástömeg adatokból % -ban először kifejeztük a kontrollhoz viszonyított gátlás mértékét. A kapott adatokat probit analízissel dolgoztuk fel, hogy megbecsüljük azt a dózist, amely a növények 50%-os zöldtömeg csökkenését okozza. A probit analízishez az ARM szoftvert (GDM Solutions INC) használtuk.

A GR₅₀ értékekből kiszámoltuk a rezisztencia indexét (RI) értékét, úgy, hogy a tesztelt biotípus GD₅₀ értékét, elosztottuk a standard érzékeny referencia populáció GD₅₀ értékével. Az $1 >$ -es rezisztencia index bizonyos fokú rezisztenciát jelent.

3.9. Statisztikai elemzés

Minden statisztikai elemzést és ábrázolást R környezetben (R v. 4.3.2), (R Core Team, 2025) végeztünk.

Friss hajtástömeg, DF, FRAP, MDA vizsgálat statisztikai elemzése

A dózis-hatás vizsgálatához egyutas varianciaanalízist (ANOVA) alkalmaztunk, ahol a dózis (0×, 1×, 2×, 4×, 8×) volt a független tényező. Az ANOVA feltételeinek teljesülését Shapiro–Wilk-próbával, míg a varianciahomogenitást Levene-teszttel ellenőriztük. Az esetleges heterogén varianciák hatását Welch-féle ANOVA-val is érzékenységi elemzésként teszteltük. Az ANOVA főhatás szignifikánsnak bizonyult ($p < 0,05$), a herbicidek közötti különbségeket páronkénti összehasonlításokkal vizsgáltuk az emmeans csomag segítségével, Tukey-féle teszttel.

Szárazanyag-tartalom mérés statisztikai elemzése:

A szárazanyag-tartalom esetében az adatok nem feleltek meg a normalitás és homogenitás feltételeinek, ezért a továbbiakban nemparametrikus Kruskal–Wallis-próbát alkalmaztunk, illetve a próba szignifikáns eredménye esetén az egyes időpontok közötti páronkénti különbségek azonosításához Dunn-féle post hoc tesztet végeztünk. A szignifikancia-szinteket a következő jelölésekkel tüntettük fel: $p < 0,05$ (*), $p < 0,01$ (**), $p < 0,001$ (***), $p < 0,0001$ (****), illetve a páronkénti összehasonlításoknál *időpontonként a Wilcoxon–Mann–Whitney-teszttel értékeltük.*

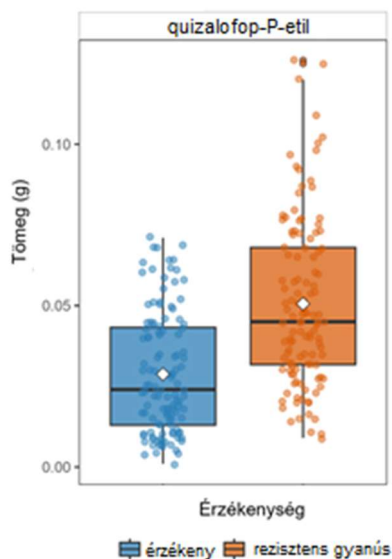
4. Eredmények és értékelésük

Ebben a fejezetben először a fenotípusos vizsgálatok értékelését végzem el, mint friss hajtástömeg- és szárazanyag-tartalom méréseket. Ezt követően a biofoton-emisszió eredményeivel foglalkozom, végül pedig az analitikai vizsgálatok következnek. Nevezetesen a vasredukáló képességen alapuló teljes antioxidáns kapacitás (FRAP)-, valamint a lipidoxidáció (MDA) vizsgálatainak feldolgozásával zárul a fejezet.

4.1. Friss hajtástömeg mérés eredményei

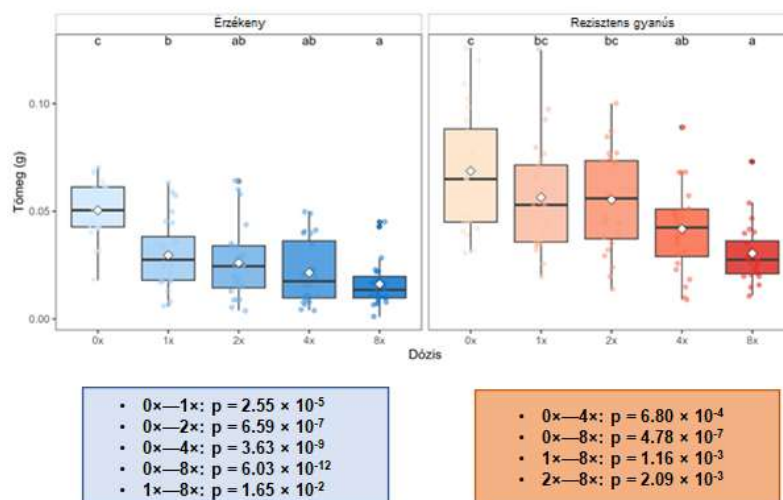
A kísérlet felszámolásakor, 2024.12.12-én 43-44 nappal a kezelést követően, amikor az olaszperje 2-4 leveles állapotban volt (BBCH 12-14), megmértük a növények zöldtömegét. A kiértékelésnél mind a két biotípusból (érzékeny és rezisztens gyanús) dózisonként (0×, 1×, 2×, 4×, 8×) négy ismétlésben cserepenként 6 növény (4×6 db növény/dózis) tömegét mértük meg. Tehát biotípusonként 120-120 darab olaszperjét.

A 3. ábra a quizalofop-P-etil hatóanyag hatására bekövetkező tömegváltozásokat mutatja be a két biotípus között a dózisokra való tekintet nélkül. Az egyfaktoros összehasonlítások eredményei alapján a növénytömegben jelentős különbség jelent meg a vásárolt és rezisztensnek vélt növények között ($p = 1,32 \times 10^{-12}$). A szilvásszentmártoni olaszperjék tömegének előnye felveti azt a kérdést, hogy ténylegesen rezisztenciával állunk-e szemben, vagy valamilyen más tényező okozza a két biotípus szignifikáns eltérését.



3. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt növények tömege (g) az érzékeny és rezisztens gyanús biotípusok esetén, 6 héttel a kezelést követően, a dózis-hatástól függetlenül. Mind a két érzékenységi csoportban 120-120 db növény tömege került ábrázolásra.

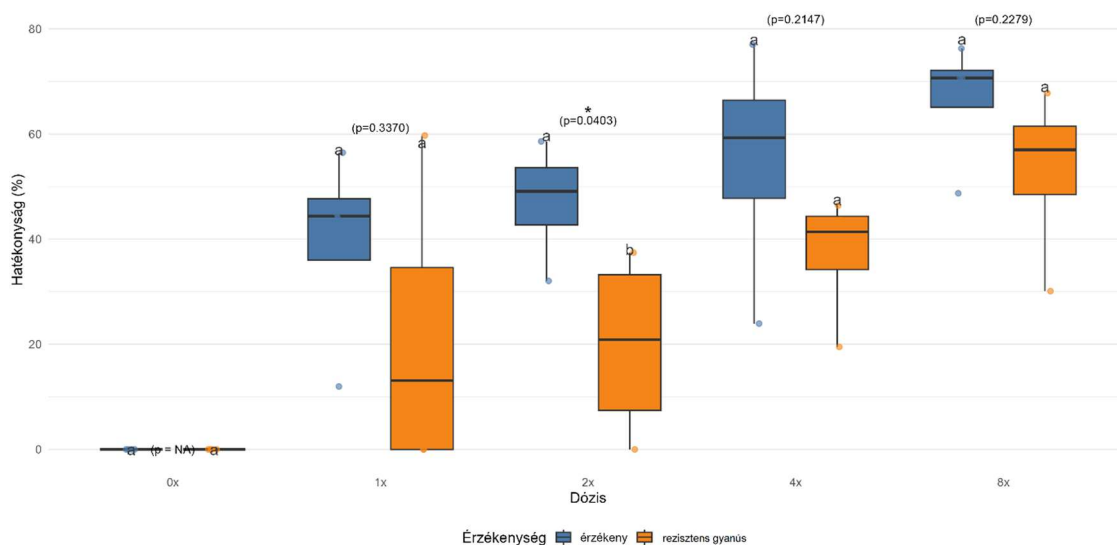
Annak érdekében, hogy közelebb kerüljünk az utóbbi kérdés megválaszolásához, részletesen megvizsgáltuk azt is, hogy a különböző dózisok között milyen eltérések állnak fent a két biotípusban. Ezeket mutatja be a 4. ábra. Az érzékeny populációban erős dózis-hatás látszik ($p = 3,45 \times 10^{-12}$). A kezeletlen kontrollhoz ($0\times$) képest minden dózis szignifikánsan alacsonyabb tömeget adott. Emellett jelentős eltérés mutatkozott meg az $1\times-8\times$ összevetés alkalmával is. Ez azt jelzi, hogy a tömegcsökkenés leginkább a kezeletlen kontroll és az összes magasabb dózis összehasonlításában erős, viszont a kezelt szintek egymástól csak korlátozottan különböznek. A rezisztens gyanús biotípusban is erős dózis-hatás jelent meg ($p = 4,56 \times 10^{-7}$), viszont a csökkenés mérsékeltebb a kis-közepes dózisoknál. A legmagasabb ($8\times$) szint viszont már több összevetésben is szignifikánsan alacsonyabb tömeget eredményezett. A $0\times-4\times$ kontraszt is szignifikáns, míg a $0\times-1\times$ és $0\times-2\times$ párok nem. Az eredmények alapján egyértelmű a biomassza-csökkenés a dózis növelésével, különösen az extrém ($8\times$) szinten. Az érzékeny populációnál a kezeletlen kontroll és már az egyszeres dózis között szignifikáns a különbség, míg a rezisztensnek vélt csoportnál csak a négyszeres és nyolcszoros dózis alkalmazása esetén mutat 5% -os szignifikancia szinten eltérést.



4. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt érzékeny és rezisztens gyanús biotípusok tömegváltozásai a különböző dózisok hatására, 6 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik, a p értékek a diagramok alatti boxokban feltüntetésre kerültek.

A következő hatékonysági % számolását az indokolta, hogy a kontroll növények a rezisztens gyanús populációban nagyobb zöldtömeget adtak, mint az érzékeny csoport esetében. A hatékonysági % számolásával a két biotípus közti fenotípusos különbséget ki tudtuk zárni, így a dózis-párok összehasonlíthatóvá váltak. Ezt szemlélteti az 5. ábra. A hatóanyag

hatékonyabbnak mutatkozott az érzékeny növények esetében az összes dózisban. A rezisztensnek vélt populációban mindegyik alkalmazott dózis esetén alacsonyabbak a hatékonysági értékek szintjei. A szilvásszentmártoni növények egyszeres dózisánál az interkvartilis tartomány elég széles, a kétszeres kezelésnél már szűkül és a magas dózisoknál (4×, 8×) már viszonylag egységesebb képet mutat. Az eredmények alapján a két populáció között csak a kétszeres dózis esetén mutatkozott 5% -os szignifikancia szinten eltérés. Az egyszeres dózisnál az eltérés az adatok nagy szórása miatt nem szignifikáns.



5. ábra: Zöldtömegből számolt hatékonysági % az érzékeny és rezisztencia gyanús populációknál a quizalofop-P-etil különböző dózisaik esetén. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik.

A hatékonysági % -ból dózis-válasz görbe alapján becsültük meg azt az adatot, amely a növények 50% -os növekedéscsökkenését idézte elő. A megismert GR_{50} érték alapján ki tudtuk számolni a rezisztencia indexet (RI), ami segít abban, hogy közelebb kerüljünk a megoldáshoz e jelenség fennállásának kérdése kapcsán (5. táblázat).

5. táblázat: A zöldtömeg eredményekből számolt GR_{50} értékek a két biotípus és a quizalofop-P-etil hatóanyag esetében, valamint az ebből számolt Rezisztencia Index értékei

	GR_{50}^*	Rezisztencia Index (RI)**
Populáció	quizalofop-P-etil (g a.i./ha)	quizalofop-P-etil (g a.i./ha)
S (érzékeny)	84,7	1,0
R (rezisztens)	276,4	3,3

* GR_{50} : Az a herbicid dózis (gramm/ aktív hatóanyag), ami a friss tömeget 50%-kal csökkenti

** RI: A tesztelt biotípus GR_{50} értékének és az érzékeny referencia populáció GR_{50} értékének hányadosa

Minél magasabb a rezisztencia index (a GR_{50} érték aránya az érzékeny populációhoz viszonyítva), annál nagyobb az ellenállás szintje. A 1-2-es értékek alacsonynak számítanak,

ilyen RI előfordul nem rezisztens populációkban. Az általunk vizsgált hatóanyag esetében a rezisztencia index értéke 3,3, amely az előző vizsgálatokhoz hasonlóan megerősíti a gyanúkat a rezisztencia fennállására, viszont további vizsgálatok szükségesek, hogy feltételezésünk igazolást nyerjen.

A herbicid-hatás konkrét hatásmechanizmustól függetlenül az egyik leggyakrabban használt indikátora a növény zöldtömegben bekövetkező változások nyomonkövetésére. Bai és munkatársai (2025) a Poaceae családba tartozó *Beckmannia syzigachne* érzékeny és rezisztens biotípusának vizsgálatánál azt állapította meg, hogy 11,25 g ai. ha⁻¹ dózisú mezoszulfuron-metil kezelés mellett az érzékeny populáció biomasszája csökkent a kezeletlen kontrollhoz képest, míg a rezisztens csoporté változatlan maradt. Ez az eredmény félig összhangban van azzal, amit mi is kimutattunk, tehát, hogy erős dózis-hatás volt megfigyelhető a friss tömeg változásaiban az olaszperje érzékeny biotípusaiban, viszont a rezisztens-gyanús biotípusaiban csak mérsékelt.

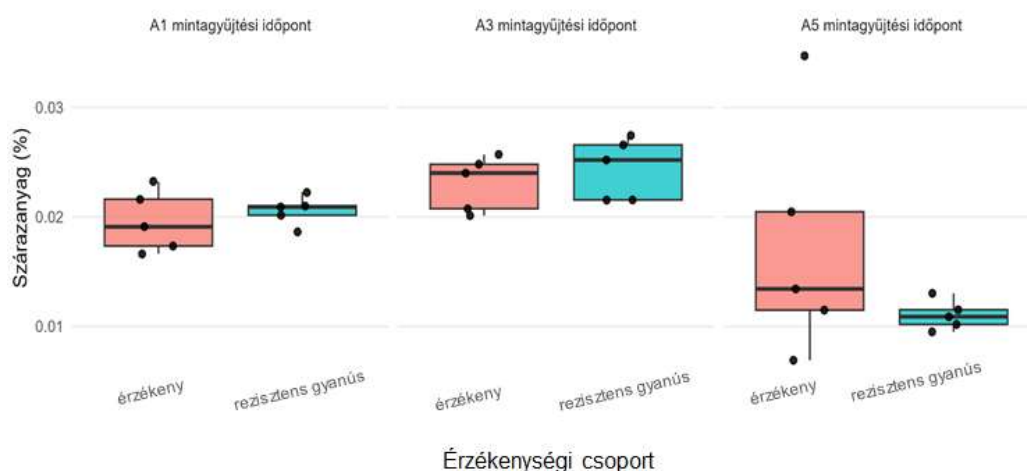
4.2. Szárazanyag-tartalom meghatározás eredményei

A szárazanyag-tartalomban bekövetkező változások szintén utalhatnak a herbicid okozta stressz mértékére. Feltételezéseink szerint a quizalofop-P-etil hatóanyagra a rezisztens növények fiziológiai válasza az, hogy hosszabb távon jobban kompenzálják a stresszt, így a vízvesztés mértéke is kisebb, míg az érzékeny növények esetében nagyobb mértékű csökkenésre lehet számítani.

A szárazanyag-tartalmat (%) három különböző mintavételi időpontban kezelésként (0×, 1×, 2×, 4×, 8×) egy-egy 0,1 g zöld növényi mintából határoztuk meg szárítás után. A minták elkülönítése a következő időpontokban történt: kezelés után egy héttel (A1), három héttel (A3), végül pedig öt héttel (A5). A mintagyűjtési információkat, az olaszperjék fenológiai stádiumát a 3.2.3. alfejezet tartalmazza.

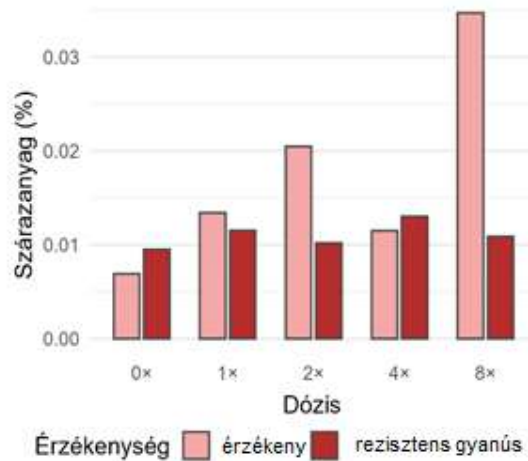
Mint a korábban is említésre került (3.2.9. alfejezet) az eredmények leírásához nemparametrikus Kruskal–Wallis-próbát alkalmaztunk. A 6. ábra a quizalofop-P-etil hatóanyag hatására bekövetkező szárazanyag-tartalom változásokat mutatja be a két biotípus között, a három különböző mintavételi időpontban, a dózisokra való tekintet nélkül. A hatóanyag hatása a kezelést követő hetek számával egyre differenciáltabban jelent meg az érzékeny és rezisztens populációk között. A kezdeti szakaszban (kezelés után 1 és 3 héttel) az érzékenységi csoportok között nem volt lényeges különbség. Az első alkalommal az

érzékeny csoport szárazanyag-tartalma kismértékben magasabb volt, mint a rezisztensé, de a mediánértékek között nem jelentkezett nagy eltérés, és a szórások is átfedésben voltak. A kezelés utáni 3. heti mintaszedés alkalmával mindkét csoportban enyhe emelkedés volt megfigyelhető, azonban az érzékeny és rezisztens csoport mediánjai közel azonosak. Az utolsó időpontban, kezelés után 5 héttel a szárazanyag-tartalom csökkenése a rezisztens növényekben markánsan megmutatkozott. Ez az eltérés valószínűleg a quizalofop-P-etil késleltetett fitotoxikus hatásának és az érzékeny populációk regenerációs korlátainak következménye. A nagyobb szórás az érzékenyeknél arra utal, hogy a kezelés hatása egyénenként eltérő mértékben nyilvánult meg.



6. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt növények szárazanyag-tartalma (%) az érzékeny és rezisztens populációkban, a három mintagyűjtési időpontban (A1, A3, A5), a dózisokra való tekintet nélkül.

A két populáció között, bár egyik időpontban sincs szignifikáns eltérés, de a különbség az A5-ös mintavételi időpont esetében számszerűen nagyobb, így a továbbiakban az A5-ös időpontban szedett mintákat elemezzük ki a dózis-hatás alapján (7. ábra). Az A5 minta feldolgozása során kirajzolódott, hogy az 1×, 2× és 8× dózis esetében is az érzékeny populáció szárazanyag-tartalma előzte meg a rezisztens-gyanús csoportt. A különbség a nyolcszoros dózis esetében a legkifejezettebb.



7. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyag hatása a szárazanyag-tartalomra (%) az érzékeny és rezisztens biotípusokban a különböző dózis szinteken az A5 mintagyűjtési időpontban. Kruskal-Wallis + Dunn post hoc (Holm)

A tömegmérésekből származtatott szárazanyag % az előzőknél olyan szempontból enged mélyebb bepillantást a tanulmányozott herbicid hatásába, hogy a szárazanyag felhalmozódás, és a vízvesztés mértéke mint növény állapot-indikátor paraméter jelentősen változik, ahogy a hatóanyag hatás egyre kifejezettebbé válik, jelen esetben az alkalmazott dózioknak megfelelően, ami eredményeink szerint már az 1×-es dózis esetében is magasabb érték volt, de a legnagyobb- 8x-os dózis esetében több, mint 300 % -os növekedést eredményezett (7 ábra).

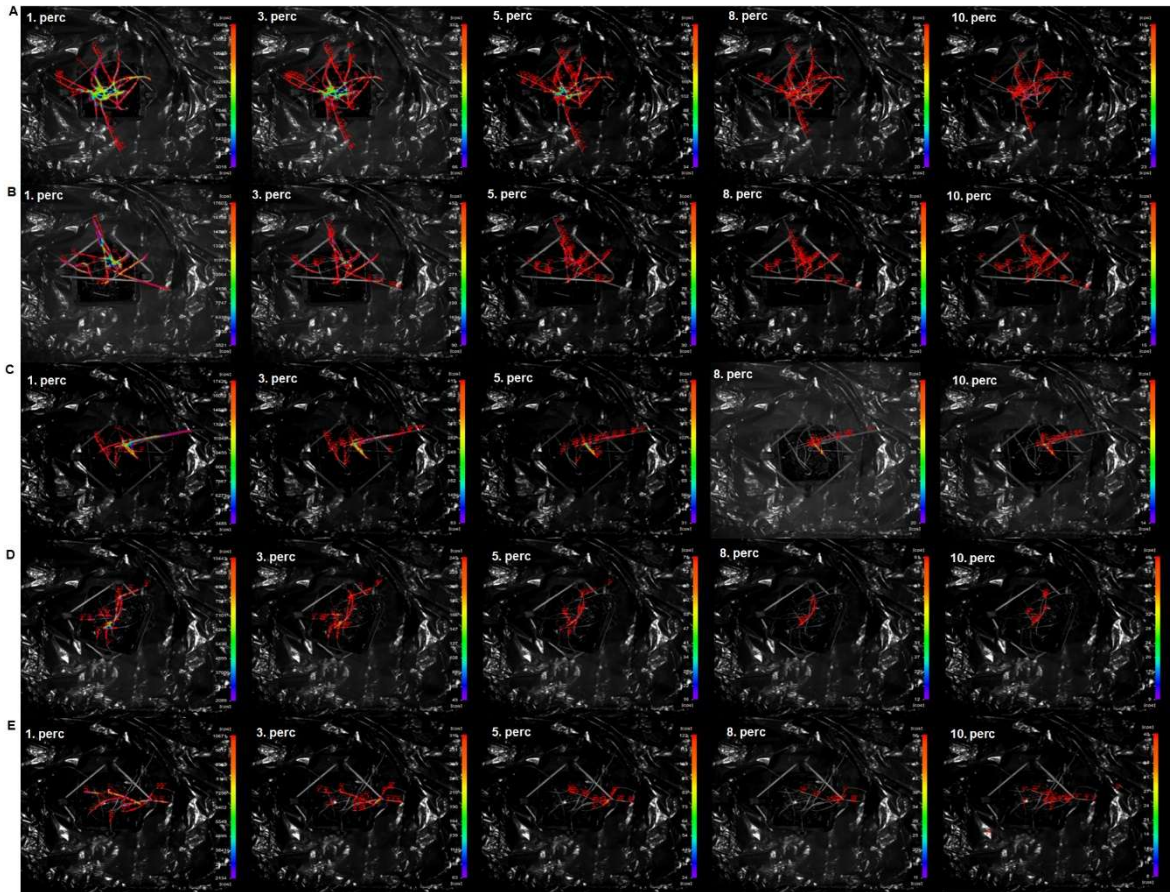
A kapott eredmény megerősítette a gyanúnkat, miszerint a rezisztens populációban nagyobb mértékű vízvesztésnek kellene bekövetkeznie. Ismétlés hiányában, a szárazanyag-tartalomban bekövetkező változások, bár megerősítik a rezisztencia létének gyanúját, de további vizsgálatok elvégzésére ösztökéltek.

4.3. Biofoton emisszió vizsgálatának eredményei

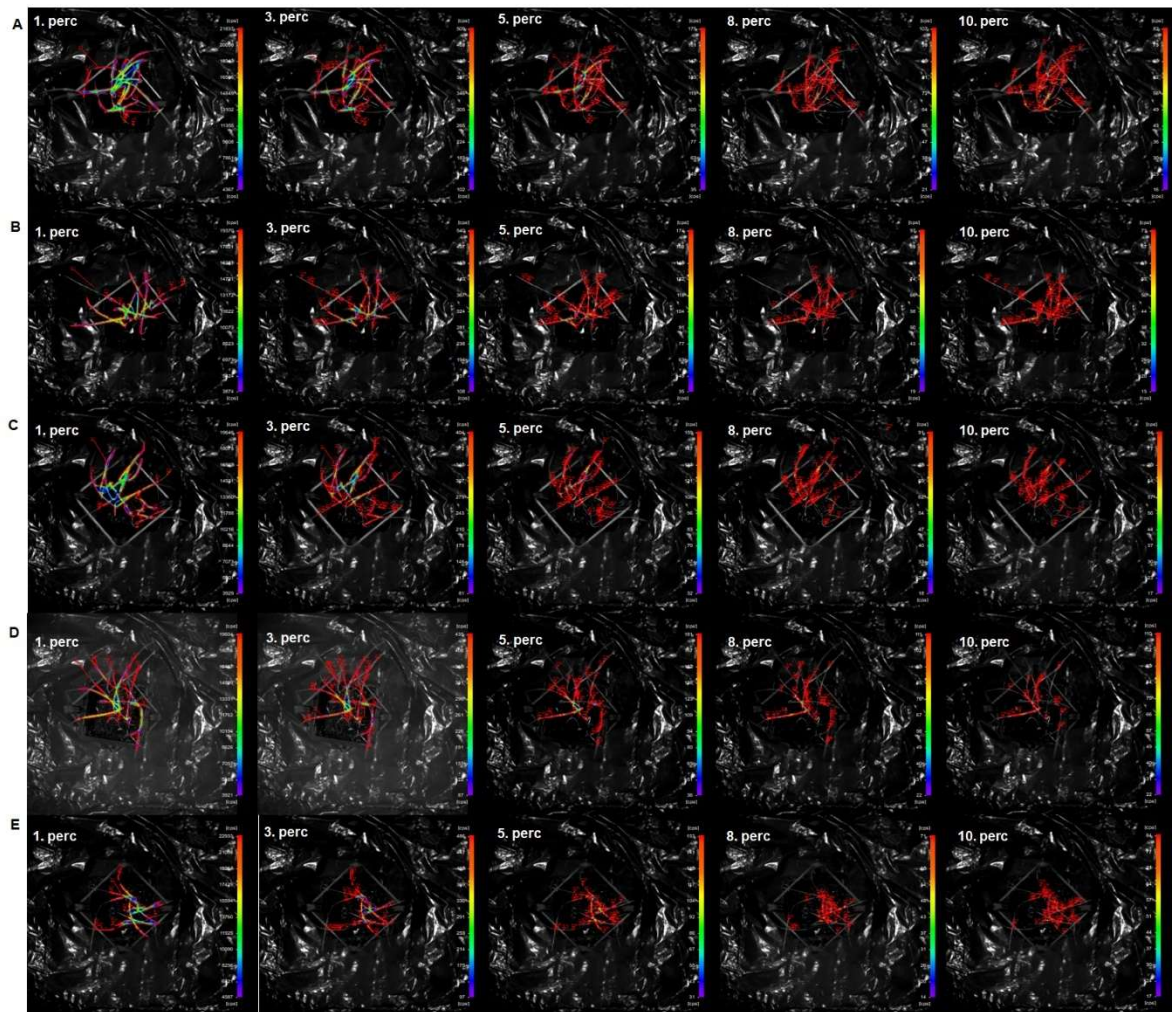
Korábbi kutatások igazolták, hogy a késleltetett fluoreszcencia szintjének vizsgálata alkalmas a növényi stresszreakciók detektálásához (Lukács et al., 2022).

A következőkben a 2024. december 5-ei biofoton emisszió, jelen esetben késleltetett fluoreszcencia (DF) vizsgálatának eredményeit elemzem. A kezelés óta ekkor 36-37 nap telt el, az olaszperjék 2-3 leveles fenológiai stádiumban voltak (BBCH 12-13). A diagramokon megjelenő késleltetett fluoreszcenciát jelölő cps értékek 3 ismétlés area sum átlagaként kerültek meghatározásra.

A következő 8. és 9. ábra a késleltetett fluoreszcencia kibocsátását ábrázolják az érzékeny (8. ábra) valamint a rezisztens gyanús (9. ábra) növények esetében a mérés közben. Az ábrákonon a betűjelek: A-kezeletlen kontroll, B-egyszeres, C-kétszeres, D-négyszeres, E-nyolcszoros dózist jelölik a mérés 1., 3., 5., 8., és 10. percében. A színintenzitás a készülék által mért biofoton-kibocsátás jelerősségét mutatja, amelyet az IndiGo™ 2.0.5.0 szoftver pszeudokolor skála segítségével jelenít meg.

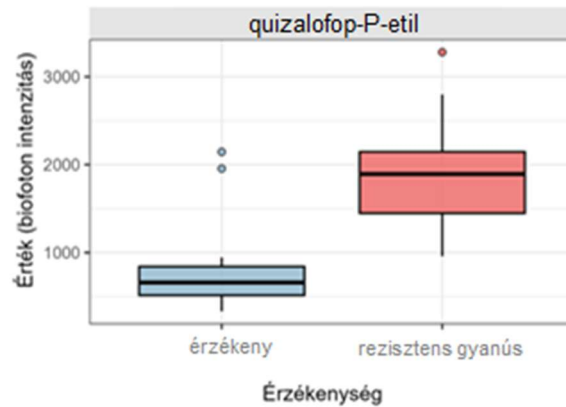


8. ábra: A késleltetett fluoreszcencia változása a mérés 1., 3., 5., 8. és 10. percében az érzékeny biotípusban. A-kezeletlen kontroll, B-1×, C-2×, D-4×, E-8× dózis A színintenzitás a berendezés által mért és az IndiGo™ 2.0.5.0 szoftverrel színintenzitás-skálára lefordított biofotonjel-erősséget jelzi.



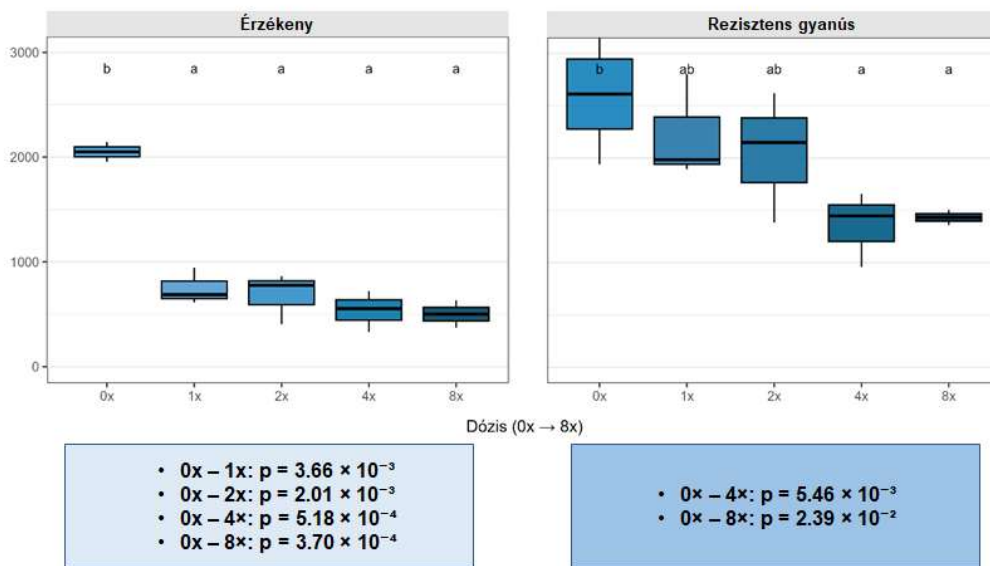
9. ábra: A késleltetett fluoreszcencia változása a mérés 1., 3., 5., 8. és 10. percében a rezisztens-gyanús biotípusban. A-kezeletlen kontroll, B-1×, C-2×, D-4×, E-8× dózis A színintenzitás a berendezés által mért és az IndiGoTM 2.0.5.0 szoftverrel színintenzitás-skálára lefordított biofotonjel-erősséget jelzi.

A következő 10. ábra a késleltetett fluoreszcencia (DF) értékeinek különbségét mutatja be a két biotípusban a dózisokra való tekintet nélkül. A két érzékenységi csoport között rendkívül szignifikáns eltérés volt megfigyelhető a rezisztens gyanús növények javára ($p = 7,55 \times 10^{-5}$). Ez ismét felveti azt a kérdést, hogy a magasabb DF értékek összefüggésbe hozhatók-e a rezisztencia jelenlétével.



10. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt növények késleltetett fluoreszcencia (cps) értékei az érzékeny és rezisztens gyanús biotípusok esetén, 5 héttel a kezelést követően, a dózisokra való tekintet nélkül.

Ahhoz hasonlóan, ahogy a friss hajtástömeg mérés eredményeinek értékelésénél is tettem, kiemlem az érzékeny és rezisztensnek vélt biotípusban okozott dózis-hatásokat, melyeket a 11. ábra szemléltet.

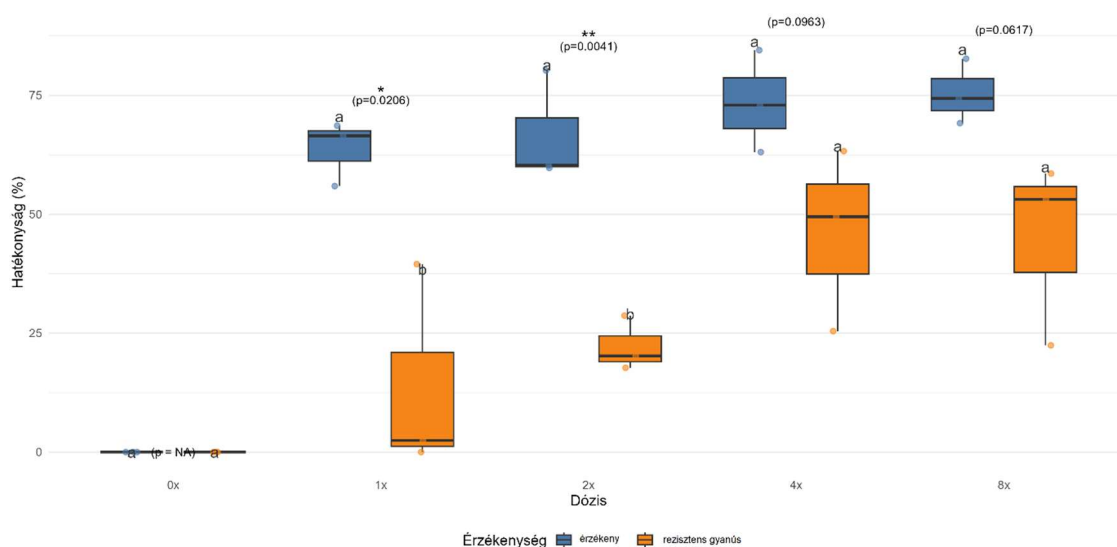


11. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt érzékeny és rezisztens gyanús biotípusok késleltetett fluoreszcencia (cps) értékei a különböző dózisok hatására, 5 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik, a p értékek a diagramok alatti boxokban feltüntetésre kerültek.

A késleltetett fluoreszcencia értéke mind az érzékeny, mind a rezisztens gyanús biotípus esetében dóziszfüggően csökkent, ugyanakkor az érzékeny és szilvásszentmártoni populációk eltérő mértékben reagáltak. Az érzékeny biotípusban a biofoton-intenzitás folyamatos csökkenést mutat, míg a rezisztens gyanús populáció esetében a visszaesés mértéke mérsékeltebb. A zöldtömeg eredményeihez hasonlóan az érzékeny növényekben a

kezeletlen kontroll szignifikánsan eltért az összes dózistól. A köztes párok, tehát a kezelt szintek egymás között statisztikailag nem tértek el, hasonlóan alacsony DF értékeket mutattak. A rezisztens gyanús populáció esetében szintén a zöldtömeg eredményeihez hasonlóan, az alacsony dózisoknál (1×, 2×) nem, csak a magasabb dózisoknál (4×, 8×) volt kimutatható statisztikai különbség a kezeletlen kontrollhoz képest.

A két biotípus kezeletlen kontrolljában a fenotípusos különbség miatt a DF érték nagy eltéréseket mutatott, ezért ahhoz, hogy a dózis-párokat össze tudjuk hasonlítani, a mért adatokból hatékonysági %-ot számoltunk (12. ábra).



12. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyag különböző dózisaival kezelt olaszperje késleltetett fluoreszcencia (cps) értékeiből számolt hatékonysági % értékei az érzékeny és rezisztens gyanús populációkban 5 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik.

A vizsgált hatóanyag az érzékeny növények ellen jobb hatékonyságot nyújtott, mint a szilvásszentmártoni populáció esetében. A fotoszintetikus rendszer károsodása magyarázza az érzékeny biotípus magasabb hatékonysági % értékeit, vagyis a rezisztensnek vélt növények csoportjában feltételezhetően nem következett be akkora amortizáció. Az érzékeny biotípusnál a hatékonysági % értékek szűk skálán mozogtak a rezisztensnek vélt csoporthoz képest. Az egyszeres dózisban szignifikáns a kétszeres kezelésnél erősen szignifikáns eltérés mutatkozott meg a két biotípus között. A magasabb dózisok összevetésében (4×, 8×) nem volt statisztikailag értékelhető különbség. Ez továbbra is felveti a kérdést annak kapcsán, a rezisztencia fennáll-e a szilvásszentmártoni növények esetében.

A gyakorlat a késleltetett fluoreszcencia értékéből nem szokott DF₅₀ értéket számolni, de a zöldtömegnél ismertetett GR₅₀ értékhez hasonlóan, a hatékonysági % -ból dózis-válasz görbe alapján becsültük meg azt az adatot, amely a növények 50% -os DF érték csökkenését idézte elő. A megismert DF₅₀ érték alapján ki tudtuk számolni a rezisztencia indexet (RI), ami segít abban, hogy közelebb kerüljünk a megoldáshoz e jelenség fennállásának kérdése kapcsán (6. táblázat). A DF értékekből számolt RI index, bár új megközelítése a rezisztencia index számításnak, viszont a magasabb értéke miatt, az érzékeny és rezisztens biotípus közt meglévő nagyobb stressztűrő képességre enged következtetni.

6. táblázat: A biofoton intenzitásból számolt DF₅₀ értékek a két biotípus és a quizalofop-P-etil hatóanyag esetében, és az ebből számolt Rezisztencia Index értékei.

	DF ₅₀ [*]	Rezisztencia Index (RI) ^{**}
Populáció	quizalofop-P-etil (g a.i./ha)	quizalofop-P-etil (g a.i./ha)
S (érzékeny)	4,9	1,0
R (rezisztens)	277,2	56,1

* DF₅₀: Az a herbicid dózis, ami a biofoton emissziót 50%-kal csökkenti

**RI: A tesztelt biotípus DF₅₀ értékének és az érzékeny referencia populáció DF₅₀ értékének hányadosa

A késleltetett fluoreszcencia korábbi irodalmi adatok alapján gyors és pontos képet képes szolgáltatni egy növény fotoszintetikus apparátusának állapotáról (Jócsák et al., 2024). A kutatások kimutatták, hogy a DF mértéke alkalmas a növények homeosztatis állapotának *in vivo* meghatározására, ugyanakkor alkalmas stresszértékelési célokra (Goltsev et al., 2009, Jócsák et al., 2024, Csima et al., 2025). Bodemer és munkatársai (2000) megállapította, hogy a DF értéke és lecsengése eltér a diuron hatóanyaggal kezelt *Chlorella* spp. tenyészetben a kezeletlen tenyészethez képest. A diuron hatásmechanizmusa eltér az ACCáz-gátló herbicid hatásmechanizmustól, mivel egy olyan fotoszintézis gátló herbicid, ami blokkolja a kettes fotoszisztéma (PSII) QB plasztokinon kötőhelyét, megakadályozva az elektronáramlást a PSII-ből a plasztokinonba (Lavergne, 1982). Ezzel szemben a quizalofop-P-etil hatását a zsírsavsintézis, ezáltal a membránlipidek szintézisének gátlásán keresztül fejt ki (Rustom et al., 2019), ami a fotoszintetikus rendszer szempontjából direkt és jelentős mértékű tilakoid membrán szerkezet vesztést okoz, mind a sztróma, mind pedig a gránum tilakoidok tekintetében, ami nagymértékben visszaveti a fotoszintetikus elektrontranszport lánc funkcionálni képes struktúrájának létrejöttét. Mindez elektrontranszport lánc zavarokat eredményez, így a késleltetett fluoreszcencia jelensége is csak kisebb mértékben tud létrejönni a növény sötétbe helyezését követően, így az *in-vivo* növényi fluoreszcencia mérése érzékeny indikátora lehet a herbicidhatás kimutatásának és

nyomonkövetésének egyaránt. Kargar és munkatársai (2019) az indukált fluoreszcenciát találták hatékonynak és jól alkalmazhatónak a tenyészedényes vizsgálatok lerövidítésére és az ACCáz-gátlók monitorozására (Hunsche et al., 2011; Kargar et al., 2019; Hassannejad et al., 2020). Kísérletek eredményei alapján azonban nemcsak az indukált (Kargar et al., 2019), de a késleltetett fluoreszcencia is alkalmas az ACCáz-gátló, quizalofop-P-etil hatóanyag, dózisfüggő hatásának kimutatására, hiszen míg az érzékeny biotípusban már az első dózis jelentős visszaesést idézett elő a DF értékekben, addig a rezisztens-gyanús aktívabb, az alkalmazott dózis emelkedésével arányosan csökkenő DF értékeket mutatott (11. ábra).

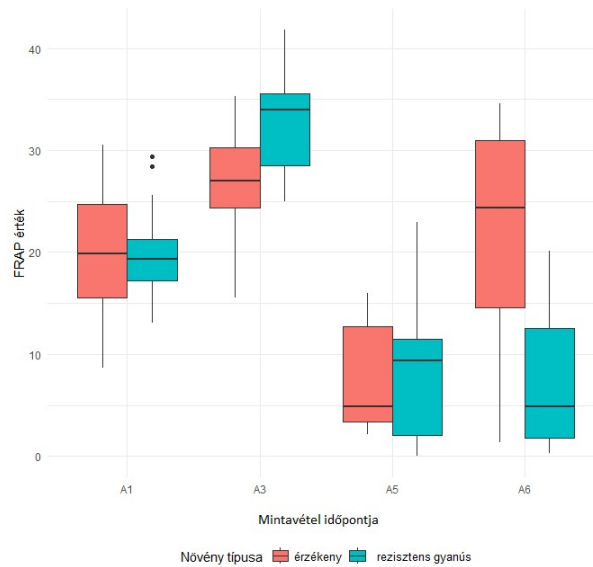
4.4. Vasredukáló képességen alapuló teljes antioxidáns kapacitás mérés

Az oxidatív stressz által okozott hatások semlegesítéséért az antioxidánsrendszer felel. A vasredukáló képességen alapuló teljes antioxidáns kapacitás (ferric reducing ability of plasma – FRAP) lehetőséget biztosít arra, hogy megfigyelhessük a növények nem-enzimatis antioxidasainak meglétét.

A magasabb abszorbancia érték, az erősebb oxidatív stressz hatására utal, tehát a rezisztensnek vélt populáció esetén alacsonyabb, míg az érzékeny csoport esetében magasabb FRAP értéket várunk.

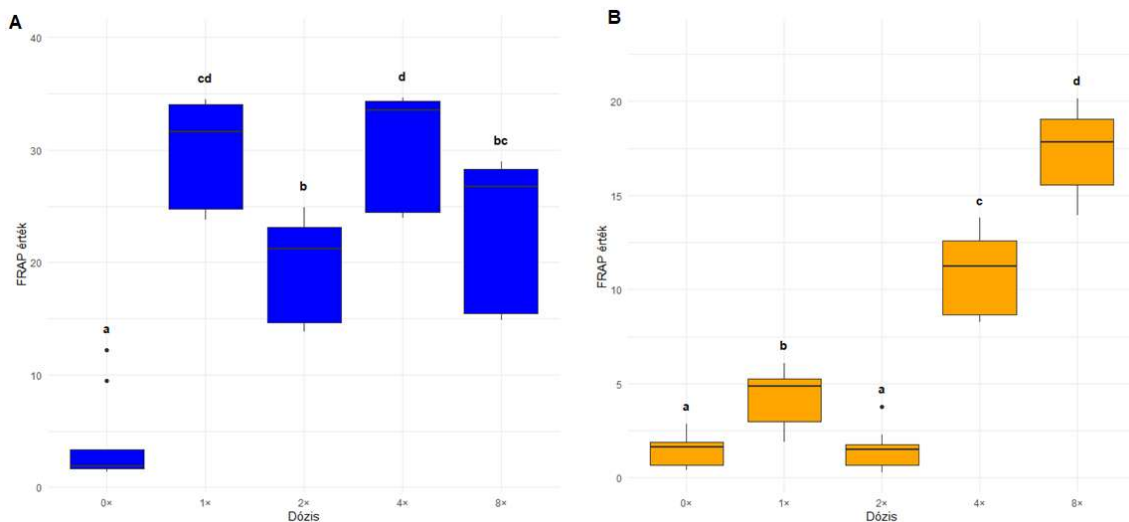
A vizsgálat céljára mintát gyűjtöttünk a kezelést követő első (A1), harmadik (A3), ötödik (A5), valamint a hatodik (A6) héten (mintagyűjtési körülményekről és az olaszperje fenológiai állapotáról részletesen tesztek említést a 3.2.3. alfejezetben). A továbbiakban időpontként a két biotípusból (érzékeny és rezisztens gyanús) az összes dóziszból (0×, 1×, 2×, 4×, 8×) egy-egy 0,1 g tömegű minta került feldolgozásra.

A négy mintagyűjtési alkalomkor a két biotípus között fennálló különbségeket mutatja be a 13. ábra, dózis-hatástól függetlenül. Így megfigyelhetővé válik a két csoport viszonyának változása az idő előrehaladtával.



13. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt növények FRAP értékei ($\mu\text{g AS ekvivalens/g friss tömeg}$) az érzékeny és rezisztens populációkban, a négy mintagyűjtési időpontban (A1, A3, A5, A6), a dózisokra való tekintet nélkül.

Az érzékenységi csoportok között egyik mintavételi napon sem jelent meg szignifikáns különbség, ám számszerűen a kezelést követő 6. heti alkalommal volt a legnagyobb eltérés, így a továbbiakban azon időpont eredményeivel foglalkozunk. Megvizsgáltuk az A6-os időpontban gyűjtött olaszperje biotípusokban külön-külön a dózis-hatásokat (14. ábra).

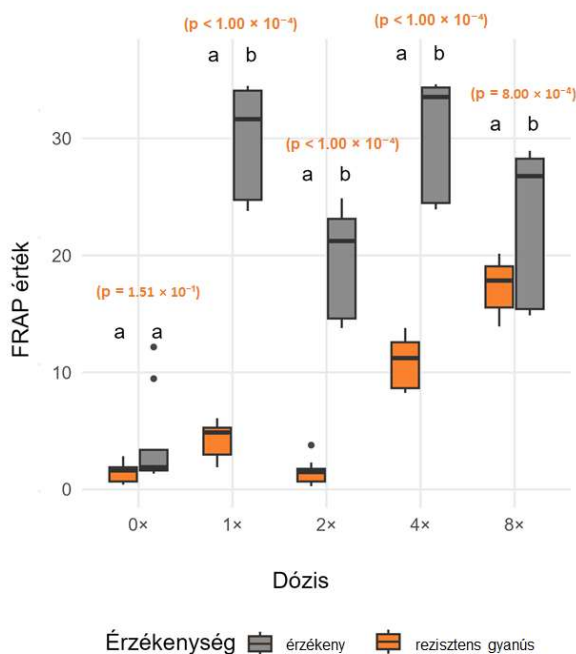


14. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt érzékeny (A) és rezisztens gyanús (B) biotípusok FRAP értékeinek ($\mu\text{g AS ekvivalens/g friss tömeg}$) változásai a különböző dózisok hatására, 6 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik.

Az érzékeny csoportban a kezeletlen kontrolltól minden dózis szignifikánsan eltért. A kezelt szinteknél különbség az 1x–2x, 2x–4x, 4x–8x párok összevetésénél látható. A rezisztensnek

vélt csoport esetében a kezeletlen kontrolltól a kétszeres dózis kivételével minden más kezelési szint szignifikánsan különbözött. A további dózisek egymástól jelentősen eltértek.

A dózispárok összevetését szemlélteti a 15. ábra. A kezeletlen kontrollokat kivéve az összes dózisban szignifikáns különbséget mutatott a statisztikai elemzés az érzékeny és rezisztens gyanús növények között. Az érzékeny biotípus jóval magasabb $\mu\text{g AS ekvivalens/g}$ friss tömeggel rendelkezett, mint az a csoport, amelynél feltételezhető volt a rezisztencia gyanúja. A hatóanyag hatására az érzékeny biotípusban a FRAP-érték emelkedése az oxidatív stresszre adott fokozott antioxidáns válasz jele. A rezisztensnek vélt biotípusban a kisebb FRAP-érték a mérsékelt oxidatív terhelés következménye, míg a kezeletlen kontrollok alacsony antioxidáns kapacitása a nyugalmi redoxállapotot mutatják.



15. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyag különböző dózisaival kezelt olaszperje FRAP értékei ($\mu\text{g AS ekvivalens/g}$ friss tömeg) az érzékeny és rezisztens gyanús populációkban 6 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik. A p értékek az ábrán feltüntetésre kerültek.

Az vasredukáló képességen alapuló antioxidáns kapacitás évtizedek óta jól használható módszer a növényi homeosztázis és stressz állapot jellemzésére (Szöllősi és Varga, 2002; Parit et al., 2018; Heckmann et al., 2024; Jócsák et al., 2024) és a herbicidkutatás terén is - bár ritkábban, mint a klasszikus növényélettanban - számos példa van a herbicidhatás, úgymint diazinon (Mehrian et al., 2023), és imazetapir (Kumar et al., 2024), és pendimetalin (Namrata et al., 2020) kimutatására levélben, vagy termés minőségben (Namrata et al., 2020).

Annak ellenére, hogy a két biotípus kezdeti antioxidáns kapacitása közel azonos, nagyon eltér a dózisémelkedésre adott reakciójuk: az érzékeny biotípusnál az 1×-es dózis esetében történik egy hirtelen-közel tízszeres emelkedés, majd ezt követően is minden dózis esetén közel egyformán, platószerűen magasak az antioxidáns kapacitás értékek, ami összecseng Kumar és munkatársai (2024) eredményeivel, akik szintén ezen paraméter gyors növekedését tapasztalták imazetapir kezelés hatására: a FRAP érték egy öt napos kezelési intervallum végére az 1×-es dózis esetében 1,7-szeres, míg 2×-es dózisonál, 2,8-szoros növekedést eredményezett. Ezt az összehasonlítást a különböző hatóanyag hatásmechanizmusok ellenére azért lehet megtenni, mivel az antioxidáns rendszer fokozott működése általános növényi védekezési mechanizmus az oxidatív stresszel szemben, ami pedig a herbicidek fitotoxikus hatásának következménye (Traxler et al., 2023). Fayed és munkatársai (2014) azonban az ACC-áz gátló fluazifop-P-butil citotoxikus és fiziológiai hatásait vizsgálták földimogyoró leveleken a kloroplasztiszra, a fotoszintetikus pigmentekre, az oxidatív stresszre és az antioxidáns enzimek aktivitására. Azt tapasztalták, hogy ez a gyomirtó szer a tilakoidok degradációját és a fotoszintetikus pigmenttartalom csökkenését okozta. Eredményeiket a megnövekedett ROS termelésének, ezáltal a kiváltott oxidatív stressznek tulajdonították, illetve ők a kataláz (CAT) és az aszkorbát-peroxidáz (APX) peroxidáz enzimek aktivitás növekedését is tapasztalták, ami az antioxidáns rendszer felülszabályozására utal, csakúgy, mint a jelen kísérletben tapasztalt FRAP értékek növekedései.

Emellett a rezisztens gyanús biotípusban dóziszfüggően emelkedve, de még a 8×-os dózis esetén is csupán közel fele akkora értékkel jelent meg az antioxidáns kapacitás az érzékenyhez képest (15. ábra). Ez arra utal, hogy az érzékeny biotípusban -véltőleg egyéb, pl. NTSR mechanizmusok hiányában- a növényeknek az antioxidáns védekezés maradt, mint kompenzációs lehetőség a quizalofop-P-etil kezelést követően. Összességében az eredményeinkben tapasztalt magasabb nem-enzimatikus antioxidáns szint hozzájárulhat a quizalofop-P-etil által előidézett lipidkárosodás részleges ellensúlyozásához a komplex növényi védekező rendszer egyik elemeként (Traxler et al., 2023).

4.5. Lipidoxidáció mérés eredményei

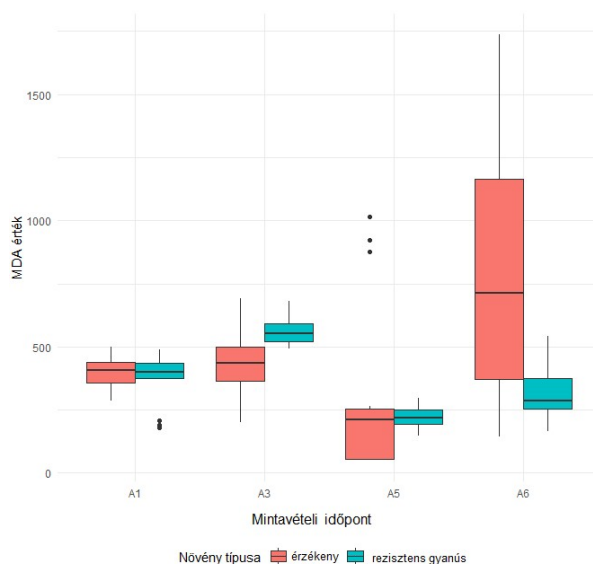
Míg az előbbi mérés a növény összes nem-enzimatikus antioxidánsának redukáló kapacitását méri, addig a lipidoxidáció vizsgálata a membránlipidek oxidatív károsodásának mértékét határozza meg.

Feltételezzük, hogy a rezisztens gyanús növények esetében az MDA értéke alacsonyabb lesz a kisebb mértékű oxidatív károsodás következtében, mint az érzékeny biotípus esetén.

A FRAP vizsgálatához hasonlóan a lipidoxidáció mérésénél is 1-1 0,1 gramm tömegű mintát dolgozunk fel biotípusonként (érzékeny és rezisztens gyanús) az összes dózisban (0×, 1×, 2×, 4×, 8×). A minta gyűjtése itt is az A1, A3, A5 és A6 időponton történt (mintaszedési részletek és az olaszperje fenológiájának adatai megtalálhatók a 3.2.3. alfejezetben).

A statisztikai elemzés kimutatta, hogy a növények típusa önmagában is szignifikáns hatással van az MDA szintre ($p < 2 \times 10^{-16}$). Ez azt jelenti, hogy a két biotípus alapvetően máshogy viselkedik. Az alkalmazott kezelés is szignifikánsan hat az MDA értékekre ($p < 2 \times 10^{-16}$). Tehát a kezelés (dózistól függetlenül) hatással van a növényekre. A dózis hatása pedig szignifikánsan eltér az érzékeny és a rezisztens csoport esetében ($p = 9,26 \times 10^{-14}$).

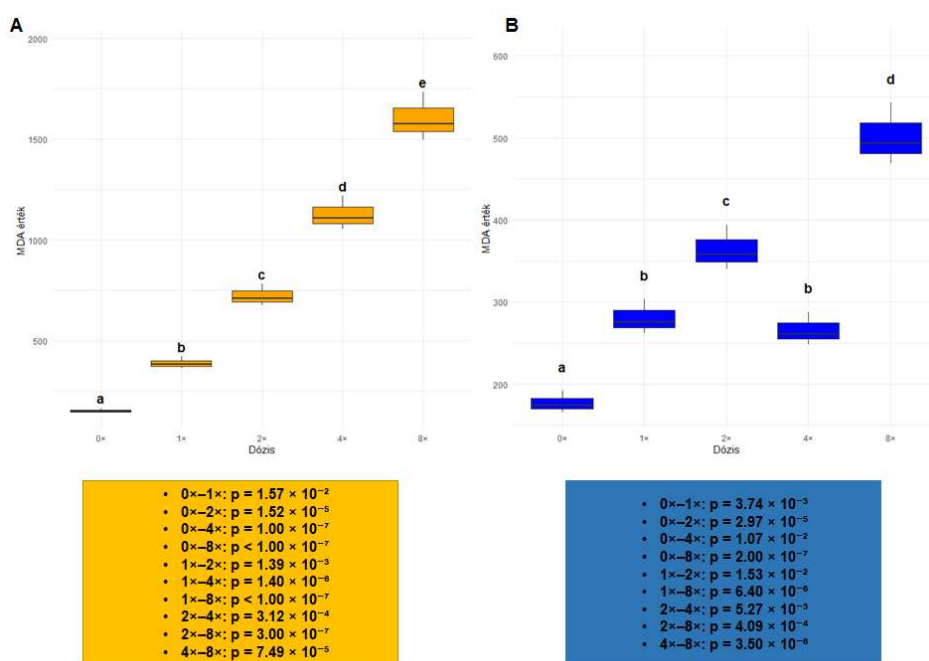
A következő 16. ábra két biotípus közötti eltéréseket mutatja be a négy mintagyűjtési alkalom távlatában. Az előzőkhez hasonlóan itt sem volt szignifikáns eltérés a két biotípus között a különböző időpontokon, az utolsó napon pedig hatalmas volt a szórás. Így a FRAP-hoz hasonlóan az A6-os mintavételi alkalom eredményeivel foglalkozunk.



16. ábra *A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt növények MDA értékei (nM/g friss tömeg) az érzékeny és rezisztens populációkban, a négy mintagyűjtési időpontban (A1, A3, A5, A6), a dózisokra való tekintet nélkül*

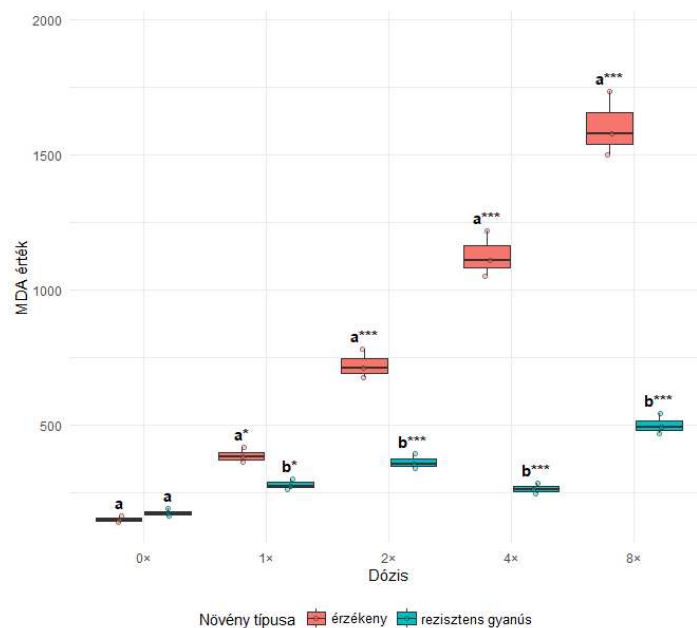
A következő 17. ábra azt szemlélteti, hogy az érzékeny és rezisztens gyanús biotípusokban a különböző dózisok hogyan hatottak egymáshoz képest. Az érzékeny csoportban (17./A ábra) az látszik, hogy a kezeletlen kontrolltól minden dózis szignifikánsan különbözött, valamint a többi kezelt szint is jelentősen eltért egymástól. A dózisok emelésével a

lipidoxidáció értékei is monoton növekedtek. Ez arra enged következtetni, hogy a növekvő herbicidterhelés eredményeként fokozódik az oxidatív stressz által okozott károsodás az emelkedő dózisok hatására. A rezisztens gyanús növények esetében (17./B ábra) az előző csoporthoz hasonlóan a kezeletlen kontrolltól minden alkalmazott dózis szignifikánsan eltért. Emellett a kezelt szintek között is statisztikailag értékelhető különbség volt kimutatható, az 1× és 4× dózispár kivételével, ahol nem jelentkezett szignifikáns különbség.



17. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt érzékeny (A) és rezisztens gyanús (B) biotípusok lipidoxidáció értékeinek (nM/g friss tömeg) változásai a különböző dózisok hatására, 6 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik, a p értékek a diagramok alatti boxokban feltüntetésre kerültek.

Az alábbi diagram (18. ábra) az érzékeny és rezisztens gyanús növények dózis-válaszait mutatja be. A lipidoxidáció szintje növekedett a dózisok növelésével az érzékeny biotípusban, ami megerősíti, hogy fokozottabb a sejthártyákban található zsírsavak oxidatív károsodása, mint a rezisztens gyanús csoport esetében. Az érzékeny növények lipidoxidációs értéke egy jóval magasabb szinten maximalizálódó skálán helyezkedett el, a rezisztensnek vélt csoporttal szemben. A rezisztens gyanús növényeknél a dózisok emelkedésével nem volt ennyire szembetűnő a lipidoxidációs szintek változása. A statisztikai elemzés megerősítette, hogy a biotípusok egymáshoz képest a kontrollt leszámítva minden egyes vizsgált dózisonál szignifikánsan eltértek.



18. ábra: Lipidoxidáció értékeinek (nM/g friss tömeg) összehasonlítása a quizalofop-P-etil hatóanyag ugyanazon dózisával kezelt érzékeny és rezisztens gyanús biotípusok között. Azonos dózison belül 'a' és 'b' szignifikáns különbséget jelez. Csillagok: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$)

A vizsgálataink során a lipidoxidációs vizsgálat bizonyult a leginkább érzékeny indikátornak az érzékeny és rezisztens gyanús biotípusok herbicidreakcióinak tanulmányozása során. Ez az eredmény várható volt abból kiindulva, hogy az ACCáz-gátló quizalofop-P-etil hatóanyag a zsírsavszintézist károsítja, tehát az újonnan kialakuló sejtek és bennük a sejtorganellek alapvető integritása sérül. A kloroplasztison belül, ha a zsírsav-szintézis leáll vagy nagymértékben csökken, ez befolyásolhatja a kloroplasztisz membránok működését és a fotoszintetikus apparátus stabilitását. Mindez közvetetten fokozhatja a fényreakciók túlterheltségét, elektron-feltorlódást és az oxigén fejlesztő komplex működésének eredményeként, reaktív oxigénformák (reactive oxygen species-ROS) kialakulásához vezet (Caverzan et al., 2019). Valamint aerob körülmények között a zsírsavak maguk is reagálnak a gerjesztett elektronállapotban lévő molekuláris, azaz szinglet oxigénnel (1O_2), ami lipid-peroxil csoportot (LOO•) eredményez. A lipid-peroxil csoport peroxidációs lánreakcióval terjedhet tovább a szomszédos telítetlen zsírsav-oldalláncokból hidrogén elvonásával (Foyer és Noctor, 2005).

Kísérletünk során tehát az érzékeny és a rezisztens-gyanús csoportok lipidoxidációs változásainak mértéke jelentős különbségeket mutatott. A biotípusok szerinti lipidoxidációs szintkülönbségeket bemutató eredményeink összhangban állnak Eceiza és munkatársai (2023) eredményeivel, akik érzékeny és rezisztens *Amaranthus palmeri* növények MDA

szintje nikoszulfuron kezelést követően az érzékeny biotípusban folyamatos növekedést mutatott, míg a rezisztensben a kezdeti növekedést követően nem változott. Ugyanez figyelhető meg kísérletünkben, hiszen a rezisztens populáció itt az egyszeres dózist követő összes többi dózis esetében nem mutatott további szignifikáns növekedést (18. ábra).

5. Következtetések és javaslatok

A herbicidrezisztencia vizsgálatának innovatív, növényélettani, analitikai megközelítése nagymértékben hozzájárult az általános, konvencionális módszerek eredményeinek pontosításához, és mélyebb szintű megértéséhez. Új perspektívát nyújtott a gyakorlatban látható jelenségek (a gyom túléli vagy nem éli túl a herbicides kezelést) megismeréséhez. A dolgozatban vizsgált quizalofop-P-etil különböző dózisaival kezelt (0-, 35-, 70-, 140-, 280- kijuttatott aktív hatóanyag g/ha) vásárolt standard és a Szilvásszentmártonról őszi káposztarepce kísérletből származó rezisztens gyanús biotípusok fenotípusos és stresszválaszai várakozásunknak megfelelően határozott különbségeket mutattak. A friss hajtástömeg vizsgálatánál magas rezisztencia index értéket kaptunk. A szárazanyag-tartalom meghatározásánál pedig magasabb vízvesztéséget tapasztaltunk a rezisztensnek vélt növények esetében. A késleltetett fluoreszcencia vizsgálatában a dózispárokat tekintve csak az alacsony (1×, 2×) kezelésnél volt szignifikáns különbség a biotípusok között. Ez arra utal, hogy míg az érzékeny növények esetében már az alacsony-, addig a rezisztensnek vélt csoportnál a magasabb dózisok okoznak kárt a fotoszintetikus rendszerben. A vasredukálóképességet jellemző teljes antioxidáns kapacitás (FRAP), vagy az oxidatív stressz által bekövetkező membránkárosodás mértékét kifejező lipidperoxidáció (MDA) mérésekkel rajzolódott ki a leglátványosabban, hogy szignifikáns eltérés van mindkét biotípus között az összes alkalmazott dózis esetében (a kezeletlen kontrollok kivételével).

Egyes vizsgálatokban a magas (4×, 8×) dózisoknál azonban a rezisztens gyanús biotípusban is megjelent a stressz és a károsodás fokozódása. Ez elgondolkodtatott minket azzal kapcsolatban, hogy jelen esetben fennáll-e metabolikus, hatáshelytől független (NTSR) rezisztencia. Jelen eredményeink tekintetében, emellett annak fényében, hogy azok az olaszperjék, melyek magjai gyűjtésre kerültek, előzetesen túléltek egy 2,5 liter/hektáros (125 g aktív hatóanyag/hektár quizalofop-P-etil) kezelést egy négy ismétléses szabadföldi kísérletben, kijelenthetővé vált a rezisztencia fennállása. Ám ezen populációban jelenlévő rezisztenciamechanizmus meghatározása további vizsgálatokat tesz szükségessé.

6. Összefoglalás

Az olaszperje herbicidrezisztencia kialakítására való hajlama, valamint a károsítási potenciálja őszi vetésű kultúrákban nagyon magas. Világszinten már számtalan Acetil-KoA karboxiláz (ACCáz) gátló herbicidcsoportba (HRAC — 1. csoport) tartozó hatóanyaggal szemben vált ellenállóvá, viszont Magyarországon eddig még nem számoltak be rezisztens biotípus megjelenéséről. Jelen dolgozat az ariloxi-fenoxi-propionát (FOP) kémiai családba tartozó quizalofop-P-etil hatóanyag különböző dózisaival (0-, 35-, 70-, 140-, 280- kijuttatott aktív hatóanyag g/ha) kezelt érzékeny, valamint Szilvásszentmártonról, őszi káposztarepcéből származó rezisztens gyanús biotípusokra való hatását vizsgálta.

Kiindulópontunk az a szemlélet volt, miszerint a herbicides kezelés egy abiotikus stresszfórássá a gyomnövények számára. Így célunk a hagyományos herbicidrezisztencia vizsgálatok mellett növényélettani, analitikai megközelítésből is szemrevételezni a két populáció különbségeit, bizonyítékot találni a rezisztencia fennállására.

Kutatásunkban tenyészedenyes-, dózis-hatás kísérlet keretein belül vizsgáltuk az érzékeny, valamint rezisztensnek vélt populáció stresszválaszainak eltérését, a friss hajtástömeg-, szárazanyag-tartalom-, mérésével. Emellett *in-vivo* állapotban, nem invazív módon, biofoton-emisszió alapuló képalkotás segítségével monitoroztuk a fotoszintetikus rendszerben bekövetkező változásokat (késleltetett fluoreszcencia). A növényélettani *in-vitro* vizsgálatokat a vasredukáló képességen alapuló teljes antioxidáns kapacitás (FRAP)-, valamint a lipidperoxidáció (MDA)- vizsgálata jelentette. Minden mérésünket statisztikai elemzésnek vetettük alá, a zöldtömeg és a késleltetett fluoreszcencia vizsgálatánál pedig hatékonysági %-ot, GR₅₀ értéket és rezisztencia indexet (RI) számoltunk.

Eredményeink jelentős eltéréseket mutattak a bizonyítottan érzékeny (vásárolt) valamint a rezisztens gyanús populáció fenotípusos és stresszválaszai között. A friss hajtástömeg mérésnél magas RI értéket állapítottunk meg. A szárazanyag-tartalomban várakozásunknak megfelelően magasabb vízvesztés lépett fel a rezisztensnek vélt biotípusban. A késleltetett fluoreszcencia esetében a dózispárokot tekintve csak az alacsony, 1×, 2× kezelésnél volt szignifikáns különbség a biotípusok között. A FRAP és MDA vizsgálatoknál egyértelműen megmutatkozott, hogy szignifikáns eltérés van mindkét populáció között az összes alkalmazott dózis esetében (kezeletlen kontrollok kivételével).

Összességében tehát a hagyományos módszerek mellett, a növényélettani, stresszanalitikai eljárások használatával árnyaltabb, biztosabb eredményeket kaptunk a rezisztencia fennállásának megerősítésére.

7. Köszönetnyilvánítás

Nagyon szépen köszönöm témavezetőim Pacseszákné Dr. Kazinczi Gabriella, Dr. Jócsák Ildikó, valamint Labant-Hoffmann Éva lelkiismeretes munkáját. Hálás vagyok türelmükért, segítőkészségükért, azért, hogy bármikor bármilyen kérdéssel kapcsolatban a lehető leghamarabb nyújtottak segítséget.

8. Irodalomjegyzék

- Bai, K., Ouyang, Y., Qi, J., Zhan, Y., & Wang, J. (2025). Niches and Genotypes Determine the Diversity and Composition of Microbiomes After Herbicide Treatment in *Beckmannia syzigachne*. *Plants*, 14(6), 876.
- Baucom, R.S. (2019): Evolutionary and ecological insights from herbicide-resistant weeds: what have we learned about plant adaptation, and what is left to uncover?. *New Phytol*, 223, 68-82. <https://doi.org/10.1111/nph.15723>
- Benzie, F.F. and Strain, J.J. (1999): Ferric Reducing/ Antioxidant Power Assay: Direct Measure of Total antioxidant Activity of Biological Fluids and Modified Version for Simultaneous Measurement of Total Antioxidant Power and Ascorbic Acid Concentration. *Methods in enzymology*. vol. 299: 15-23.
- Bodemer, U., Gerhardt, V., YAKOBI, Y., Zohary, T., Friedrich, G., & Pohlmann, M. (2000). Phytoplankton abundance and composition in freshwater systems determined by DF excitation spectroscopy and conventional methods. *ERGEBNISSE DER LIMNOLOGIE*, 55, 87-100.
- Brunharo, C. A. C. G. – Streisfeld, M. A. (2022): Multiple evolutionary origins of glyphosate resistance in *Lolium multiflorum*. *Evolutionary applications*, 15(2), 316–329. <https://doi.org/10.1111/eva.13344>
- Brunharo, C. A. C. G. – Tranel, P. J. (2023): Repeated evolution of herbicide resistance in *Lolium multiflorum* revealed by haplotype-resolved analysis of acetyl-CoA carboxylase. *Evolutionary applications*, 16(12), 1969–1981. <https://doi.org/10.1111/eva.13615>
- Busi, R. – Powles, S. B. (2016): Cross-resistance to prosulfocarb + S-metolachlor and pyroxasulfone selected by either herbicide in *Lolium rigidum*. *Pest Management Science*, 72, 1664–1672. <https://doi.org/10.1002/ps.4253>
- Caverzan, A., Piasecki, C., Chavarria, G., Stewart Jr, C. N., & Vargas, L. (2019). Defenses against ROS in crops and weeds: the effects of interference and herbicides. *International journal of molecular sciences*, 20(5), 1086.
- Cifra, M., – Pospíšil, P. (2014): Ultra-weak photon emission from biological samples: definition, mechanisms, properties, detection and applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 139, 2-10.
- Čop, J. Eler, K. – Kopač, P. – Verbič, J. (2019): Morphological development, herbage yield and quality of Italian ryegrass during primary growth and regrowth: Regression models and yield optimization. *Italian Journal of Agronomy*, 14(4), 1497. <https://doi.org/10.4081/ija.2019.1497>
- Csimá, F., Hoffmann, R., Kazinczi, G., & Jócsák, I. (2025). Dose-Dependent Effects of Boron on Photosynthetic and Oxidative Processes in Young Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) *Plants*. *Stresses*, 5(4), 61.
- Damalas, C. A. – Koutroubas, S. D. (2024): Herbicide resistance evolution, fitness cost, and the fear of the superweeds. *Plant Science*, 339, 111934. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111934>
- Délye, C. – Jasieniuk, M. – Le Corre, V. (2013): Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. *Trends Genet.* 29, 649–658. DOI: 10.1016/j.tig.2013.06.001
- Eceiza, M. V., Barco-Antoñanzas, M., Gil-Monreal, M., Huybrechts, M., Zabalza, A., Cuypers, A., & Royuela, M. (2023). Role of oxidative stress in

the physiology of sensitive and resistant *Amaranthus palmeri* populations treated with herbicides inhibiting acetolactate synthase. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1040456.

- Falkowski, P.G. és Raven, J.A. (1997): Aquatic photosynthesis. Blackwell, Oxford
- Fayez, K. A., Radwan, D. E. M., Mohamed, A. K., & Abdelrahman, A. M. (2014). Fusilade herbicide causes alterations in chloroplast ultrastructure, pigment content and physiological activities of peanut leaves. *Photosynthetica*, 52(4), 548-554.
- Foyer, C. H., & Noctor, G. (2005). Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. *The plant cell*, 17(7), 1866-1875.
- Gaines, T. A. – Duke, S. O. – Morran, S. – Rigon, C. A. – Tranel, P. J. – Küpper, A. – Dayan, F. E. (2020): Mechanisms of evolved herbicide resistance. *Journal of Biological Chemistry*, 295(30), 10307-10330. <https://doi.org/10.1074/jbc.REV120.013572>
- Goltsev, V., Zaharieva, I., Chernev, P., & Strasser, R. (2009). Delayed chlorophyll fluorescence as a monitor for physiological state of photosynthetic apparatus. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 23(sup1), 452-457.
- Han, H. – Yu, Q. – Beffa, R. – González, S. – Maiwald, F. – Wang, J. – Powles, S. B. (2021): Cytochrome P450 CYP81A10v7 in *Lolium rigidum* confers metabolic resistance to herbicides across at least five modes of action. *The Plant Journal*, 105, 79–92. <https://doi.org/10.1111/tpj.15040>
- Hannaway, D. – Fransen, S. – Cropper, J. – Teel, M. – Chaney, M. – Griggs, T. – Halse, R. – Hart, J. – Cheeke, P. – Hansen, D. – Lane, W. – State University. Extension Service, O., State University. Cooperative Extension, W., of Idaho. Cooperative Extension Service, U., – Northwest Cooperative Extension, P. (1999): Annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.). : [Corvallis, Or.] : Oregon State University Extension Service ; [Pullman, Wash.] : Washington State University Cooperative Extension ; [Moscow, Idaho] : University of Idaho Cooperative Extension Service. https://ir.library.oregonstate.edu/concern/administrative_report_or_publications/cf95jb75s
- Harper JL. (1956): The evolution of weeds in relation to resistance to herbicides. In: Proc. 3rd Br. Weed Control Conf., 179–188.
- Harre, N.T., Nie, H., Jiang, Y. and Young, B.G. (2018): Differential antioxidant enzyme activity in rapid-response glyphosate-resistant *Ambrosia trifida*. *Pest. Manag. Sci*, 74: 2125-2132. <https://doi.org/10.1002/ps.4909>
- Hassannejad, S., Lotfi, R., Ghafarbi, S. P., Oukarroum, A., Abbasi, A., Kalaji, H. M., & Rastogi, A. (2020). Early identification of herbicide modes of action by the use of chlorophyll fluorescence measurements. *Plants*, 9(4), 529.
- Heath, R.L. – Packer, L. (1968): Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Arch Biochem Biophys*, 125, 189–198 [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
- Heckmann, M., Stadlbauer, V., Drotarova, I., Gramatte, T., Feichtinger, M., Arnaut, V., ... & Weghuber, J. (2024). Identification of oxidative-stress-reducing plant extracts from a novel extract library—Comparative analysis

- of cell-free and cell-based in vitro assays to quantitate antioxidant activity. *Antioxidants*, 13(3), 297.
- Hossain Z., Makino T., Komatsu S. (2012): Proteomic study of β -aminobutyric acid-mediated cadmium stress alleviation in soybean. *Journal of Proteomics* 75: 4151–4164.
 - Hunsche, M., Bürling, K., & Noga, G. (2011). Spectral and time-resolved fluorescence signature of four weed species as affected by selected herbicides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 101(1), 39-47.
 - Hunyadi K. – Béres I. – Kazinczi G. (2011): *Gyomnövények, gyombiológia, gyomirtás*. Mezőgazda Kiadó, Budapest
 - Ibrahim, Kamal – Peterson, Paul. (2014): *Grasses of Washington, D.C.*. Smithsonian Contributions to Botany. 1-128. DOI: 10.5479/si.19382812.99.
 - Janusz, S. – Fritz-Albert, P. (1987): Temperature hysteresis of low level luminescence from plants and its thermodynamical analysis. *J. Plant Physiol.* 130: 111–123.
 - Jócsák I. – Malgwi I. – Rabnecz Gy. – Szegő A. – Varga-Visi É. – Végvári Gy. – Pónya Zs. (2020): Effect of cadmium stress on certain physiological parameters, antioxidative enzyme activities and biophoton emission of leaves in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings. *PloS one*, 15(11), e0240470. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240470>
 - Jócsák, I., Csima, F., & Somfalvi-Tóth, K. (2024). Alterations of photosynthetic and oxidative processes influenced by the presence of different zinc and cadmium concentrations in maize seedlings: transition from essential to toxic functions. *Plants*, 13(8), 1150.
 - Kargar, M., Ghorbani, R., Rashed Mohassel, M. H., & Rastgoo, M. (2019). Chlorophyll fluorescence-A tool for quick identification of accase and als inhibitor herbicides performance. *Planta Daninha*, 37, e019166813.
 - Kaundun S. S. (2014): Resistance to acetyl-CoA carboxylase-inhibiting herbicides. *Pest management science*, 70(9), 1405–1417. <https://doi.org/10.1002/ps.3790>
 - Kemešytė, V. – Statkevičiūtė, G. – Norkevičienė, E. – Jaškūnė, K. (2023). Italian Ryegrass as a Forage Crop for the Baltics: Opportunities and Challenges in Light of Climate Change. *Plants*, 12(22), 3841. <https://doi.org/10.3390/plants12223841>
 - Klein, H. (2011): *Lolium multiflorum* Lam. [Italian ryegrass] (Biological Inventory Document). Alaska Natural Heritage Program, University of Alaska Anchorage. https://accs.uaa.alaska.edu/wp-content/uploads/Lolium_multiflorum_BIO_LOMU.pdf
 - Kobayashi K, Okabe H, Kawano S, Hidaka Y, Hara K. Biophoton emission induced by heatshock. *PLoS One*. 2014 Aug 25;9(8):e105700. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105700> PMID: 25153902; PMCID: PMC4143285.
 - Kumar, R., Kumari, V. V., Gujjar, R. S., Kumari, M., Goswami, S. K., Datta, J., ... & Hossain, A. (2024). Evaluating the imazethapyr herbicide mediated regulation of phenol and glutathione metabolism and antioxidant activity in lentil seedlings. *PeerJ*, 12, e16370.
 - Labant-Hoffmann, É., — Papp, Z. (2024): Kalászos gabonák gyomirtása. In A. Kádár (Szerk.), *Vegyszeres gyomirtás és természabályozás* (pp. 139–145).

- Lavergne, J. (1982). Mode of action of 3-(3, 4-dichlorophenyl)-1, 1-dimethylurea. Evidence that the inhibitor competes with plastoquinone for binding to a common site on the acceptor side of photosystem II. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 682(3), 345-353.
- Lukács, H. – Jócsák, I. – Somfalvi-Tóth, K. – Keszthelyi, S. (2022): Physiological Responses Manifested by Some Conventional Stress Parameters and Biophoton Emission in Winter Wheat as a Consequence of Cereal Leaf Beetle Infestation. *Frontiers in plant science*, 13, 839855. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.839855>
- Mahmood, K. – Mathiassen, S. K. – Kristensen, M. – Kudsk, P. (2016): Multiple Herbicide Resistance in *Lolium multiflorum* and Identification of Conserved Regulatory Elements of Herbicide Resistance Genes. *Frontiers in plant science*, 7, 1160. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01160>
- Mehrian, S. K., Karimi, N., & Rahmani, F. (2023). 24-Epibrassinolide alleviates diazinon oxidative damage by escalating activities of antioxidant defense systems in maize plants. *Scientific Reports*, 13(1), 19631.
- Namrata, K., Datta, J., Kumar, R., Chakravarty, A., & Pal, S. (2020). Herbicide induced changes in Nutrient and antinutrient content during mung bean (*Vigna radiate* L) seed development. *International Journal of Chemical Studies*, 8(2), 223-228.
- Norsworthy, J. K. – Ward, S. M. – Shaw, D. R. – Llewellyn, R. S. – Nichols, R. L. – Webster, T. M. – Bradley, K. W. – Frisvold, G. – Powles S. B. – Burgos, N. R. – Witt, W. W. – Barrett, M. (2012): Reducing the risks of herbicide resistance: best management practices and recommendations. *Weed science*, 60(SP1), 31-62. DOI: 10.1614/WS-D-11-00155.1
- Nunes, R. D. C. – Bustamante, F. D. O. – Techio, V. H. – Mittelmann, A. (2012): Morphology and pollen viability of *Lolium multiflorum* Lam. *Ciência e Agrotecnologia*, 36, 180-188. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542012000200006>
- Ofosu, R. – Agyemang, E. D. – Márton, A. – Pásztor, G. – Taller, J. – Kazinczi, G. (2023): Herbicide resistance: managing weeds in a changing world. *Agronomy*, 13(6), 1595. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061595>
- Pagnoncelli Jr, F. D. B. – Losada, F. B. – Alvear, M. J. G. – Gonzalez-Andujar, J. L. – Trezzi, M. M. – Bittencourt, H. V. H. – Salomão, H. M. (2024): Response characterization and target site mechanism study in glyphosate-resistant populations of *Lolium multiflorum* L. from Brazil. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 198, 105737. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105737>
- Parit, S. B., Dawkar, V. V., Tanpure, R. S., Pai, S. R., & Chougale, A. D. (2018). Nutritional quality and antioxidant activity of wheatgrass (*Triticum aestivum*) un-wrap by proteome profiling and DPPH and FRAP assays. *Journal of food science*, 83(8), 2127-2139.
- Piasecki, C. – Carvalho, I. R. – Cechin, J. – Goulart, F. A. – Maia, L. C. D. – Agostinetto, D. – Caverzan, A. – Stewart Jr., C. N. – Vargas, L. (2019): Oxidative stress and differential antioxidant enzyme activity in glyphosate-resistant and-sensitive hairy fleabane in response to glyphosate treatment. *Bragantia*, 78, 379-396. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20180289>

- Pospišil P. (2012): Molecular mechanisms of production and scavenging of reactiveoxygen species by photosystem II. *Biochim Biophys Acta– Bioenergetics*, 1817 (1): 218–231
- Powles, S. B. – Yu, Q. (2010). Evolution in action: plants resistant to herbicides. *Annu. Rev. Plant Biol.* 61, 317–347. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042809-112119
- Rustom, S. Y., Webster, E. P., Blouin, D. C., & McKnight, B. M. (2019). Interactions of quizalofop-p-ethyl mixed with contact herbicides in ACCase-resistant rice production. *Weed technology*, 33(2), 233-238.
- Scarabel, L. – Panozzo, S. – Loddo, D. – Mathiassen, S. K. – Kristensen, M. – Kudsk, P. – Gitsopoulos, T. – Travlos, I. – Tani, E. – Chachalis, D – Sattin, M. (2020): Diversified resistance mechanisms in multi-resistant *Lolium* spp. in three European countries. *Frontiers in Plant Science*, 11, 608845. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.608845>
- Strehler, B.L. – Arnold, W. (1951): LIGHT PRODUCTION BY GREEN PLANTS. *The Journal of General Physiology*, 34: 809 - 820. DOI: 10.1085/jgp.34.6.809
- Suzukawa, A. K. – Bobadilla, L. K. – Mallory-Smith, C. – Brunharo, C. A. (2021): Non-target-site resistance in *Lolium* spp. globally: a review. *Frontiers in Plant Science*, 11, 609209. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.609209>
- Szöllősi, R., & Varga, I. S. I. (2002). Total antioxidant power in some species of Labiatae: Adaptation of FRAP method. *Acta Biologica Szegediensis*, 46(3-4), 125-127.
- Traxler, C., Gaines, T. A., Küpper, A., Luemmen, P., & Dayan, F. E. (2023). The nexus between reactive oxygen species and the mechanism of action of herbicides. *Journal of Biological Chemistry*, 299(11), 105267.
- Wu, C. – Song, M. – Zhang, T. – Zhou, C. – Liu, W. – Jin, T. – Zhao, N. (2022): Target-site mutation and cytochrome P450s confer resistance to multiple herbicides in Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) from China. *Crop Protection*, 161, 106068. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106068>
- Xu, H.L. – Leng, Q.L. – Min, H. – Hao, R. – Sun, L.L. – Xue, F. – Su, W.C. – Wu, R.H., (2023): Resistance to ACCase and ALS inhibitors and its target site mutation in Italian ryegrass *Lolium multiflorum* from Henan Province. *Journal of Plant Protection* 50, 224–230 (in Chinese). DOI: 10.13802/j.cnki.zwbhxb.2023.2021083
- Zhu, J.W. – Wang, J. – DiTommaso, A. – Zhang, C.X. – Zheng, G.P. – Liang, W., Islam, F. – Yang, C. – Chen, X.X. – Zhou, W.J., (2020): Weed research status, challenges, and opportunities in China. *Crop Protect.* 134, 104449. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.02.001>

8.1. Internetes források

- European Herbicide Resistance Action Committee. (2017): *European Guidelines to Conduct Herbicide Resistance Tests*. Letöltés dátuma: 2025.08.02. Forrás: http://hracglobal.com/europe/files/docs/Europe_Guidelines_Herbicide_Resistance-tests_13Oct17.pdf
- European Herbicide Resistance Action Committee. (2021): *Weed Fact Sheet – Lolium species*. Letöltés dátuma: 2025.08.08. Forrás:

<https://hracglobal.com/europe/files/docs/EHRAC-Weed-Fact-Sheet-LOLSS.pdf>

- Heap, I. The International Herbicide-Resistant Weed Database. Online. Saturday, August 16, 2025. Available www.weedscience.org
- Labant-Hoffmann, É. (2024, március 7). Kitekintés a világra, rezisztens pázsitfűfélék a kalászosokban. Syngenta. Letöltés dátuma: 2025. 09. 01. Forrás: <https://www.syngenta.hu/kitekintes-vilagra-rezisztens-pazsitfufelek-kalaszosokban>
- R Core Team. (2025). R: A language and environment for statistical computing. *R foundation for statistical computing, Vienna, Austria*. <https://www.R-project.org>

9. Táblázatok és ábrák jegyzéke

1. táblázat: A gyomnövények herbicidrezisztenciájának kialakulását befolyásoló tényezők (Powles és Yu, 2010 nyomán módosítva).....	6
2. táblázat: Európai herbicidrezisztens <i>Lolium multiflorum</i> jelentések összefoglalása (Forrás: Heap, 2025 nyomán módosítva).....	11
3. táblázat: Az egyes kezelésekkel kijuttatott aktív hatóanyag-tartalom g/ha-ban kifejezve	18
4. táblázat: Mintagyűjtési adatok az in-vitro vizsgálatokhoz	18
5. táblázat: A zöldtömeg eredményekből számolt GR ₅₀ értékek a két biotípus és a quizalofop-P-etil hatóanyag esetében, valamint az ebből számolt Rezisztencia Index értékei.....	25
6. táblázat: A biofoton intenzitásból számolt DF ₅₀ értékek a két biotípus és a quizalofop-P-etil hatóanyag esetében, és az ebből számolt Rezisztencia Index értékei.	33
1. ábra: Az olaszperje morfológiája (Forrás: Ibrahim és Peterson, 2014).....	9
2. ábra: A mintagyűjtés helyének GPS koordinátái és a gyűjtés helye	17
3. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt növények tömege (g) az érzékeny és rezisztens gyanús biotípusok esetén, 6 héttel a kezelést követően, a dózis-hatástól függetlenül. Mind a két érzékenységi csoportban 120-120 db növény tömege került ábrázolásra.	23
4. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt érzékeny és rezisztens gyanús biotípusok tömegváltozásai a különböző dózisos hatására, 6 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik, a p értékek a diagramok alatti boxokban feltüntetésre kerültek.	24
5. ábra: Zöldtömegeből számolt hatékonysági % az érzékeny és rezisztencia gyanús populációknál a quizalofop-P-etil különböző dózisa esetén. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik.....	25
6. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt növények szárazanyag-tartalma (%) az érzékeny és rezisztens populációkban, a három mintagyűjtési időpontban (A1, A3, A5), a dózisosokra való tekintet nélkül.	27
7. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyag hatása a szárazanyag-tartalomra (%) az érzékeny és rezisztens biotípusokban a különböző dózis szinteken az A5 mintagyűjtési időpontban. Kruskal-Wallis + Dunn post hoc (Holm)	28
8. ábra: A késleltetett fluoreszcencia változása a mérés 1., 3., 5., 8. és 10. percében az érzékeny biotípusban. A-kezeletlen kontroll, B-1×, C-2×, D-4×, E-8× dózis A színintenzitás a berendezés által mért és az IndiGoTM 2.0.5.0 szoftverrel színintenzitás-skálára lefordított biofotonjel-erősséget jelzi. .	29
9. ábra: A késleltetett fluoreszcencia változása a mérés 1., 3., 5., 8. és 10. percében a rezisztens-gyanús biotípusban. A-kezeletlen kontroll, B-1×, C-2×, D-4×, E-8× dózis A színintenzitás a berendezés által mért és az IndiGoTM 2.0.5.0 szoftverrel színintenzitás-skálára lefordított biofotonjel-erősséget jelzi. .	30
10. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt növények késleltetett fluoreszcencia (cps) értékei az érzékeny és rezisztens gyanús biotípusok esetén, 5 héttel a kezelést követően, a dózisosokra való tekintet nélkül.	31
11. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt érzékeny és rezisztens gyanús biotípusok késleltetett fluoreszcencia (cps) értékei a különböző dózisos hatására, 5 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik, a p értékek a diagramok alatti boxokban feltüntetésre kerültek.	31

12. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyag különböző dózisaival kezelt olaszperje késleltetett fluoreszcencia (cps) értékeiből számolt hatékonysági % értékei az érzékeny és rezisztens gyanús populációkban 5 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik.....	32
13. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt növények FRAP értékei ($\mu\text{g AS ekvivalens/g}$ friss tömeg) az érzékeny és rezisztens populációkban, a négy mintagyűjtési időpontban (A1, A3, A5, A6), a dózisokra való tekintet nélkül.	35
14. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt érzékeny (A) és rezisztens gyanús (B) biotípusok FRAP értékeinek ($\mu\text{g AS ekvivalens/g}$ friss tömeg) változásai a különböző dózisok hatására, 6 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik.	35
15. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyag különböző dózisaival kezelt olaszperje FRAP értékei ($\mu\text{g AS ekvivalens/g}$ friss tömeg) az érzékeny és rezisztens gyanús populációkban 6 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik. A p értékek az ábrán feltüntetésre kerültek.....	36
16. ábra A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt növények MDA értékei (nM/g friss tömeg) az érzékeny és rezisztens populációkban, a négy mintagyűjtési időpontban (A1, A3, A5, A6), a dózisokra való tekintet nélkül.....	38
17. ábra: A quizalofop-P-etil hatóanyaggal kezelt érzékeny (A) és rezisztens gyanús (B) biotípusok lipioxidáció értékeinek (nM/g friss tömeg) változásai a különböző dózisok hatására, 6 héttel a kezelést követően. A statisztikai különbségek ($p < 0,05$) alapján kerültek meghatározásra, a különböző betűjelek az egymástól szignifikánsan eltérő csoportokat jelölik, a p értékek a diagramok alatti boxokban feltüntetésre kerültek.....	39
18. ábra: Lipioxidáció értékeinek (nM/g friss tömeg) összehasonlítása a quizalofop-P-etil hatóanyag ugyanazon dózisaival kezelt érzékeny és rezisztens gyanús biotípusok között. Azonos dózison belül 'a' és 'b' szignifikáns különbséget jelez. Csillagok: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$).....	40

NYILATKOZAT

a diplomadolgozat nyilvános hozzáféréseről és eredetiségéről

A hallgató neve: Frauholcz Bettina Blanka
A Hallgató Neptun kódja: Y36KON
A dolgozat címe: Olaszperje (*Lolium multiflorum* Lam.) populációk herbicid-
érzékenységének vizsgálata in vivo és in vitro módszerekkel
A megjelenés éve: 2025
A konzulens intézetének neve: Növényvédelmi Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Növényvédelmi Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott diplomadolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem. Továbbá kijelentem, hogy a dolgozat elkészítése során alkalmazott mesterséges intelligencia-eszközök (pl. szöveggenerálás, nyelvi javítás, fordítás, adatelemzés) használata nem helyettesítette a saját kutatási és alkotói munkámat, azok alkalmazását a források között vagy a módszertani részben feltüntettem, és a szakmai-etikai elvárásoknak megfelelően jártam el.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitóri rendszerébe. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitóri rendszerében.

Kelt: Keszthely, ^{2025.} év október hó 29. nap

Frauholcz Bettina Blanka
Hallgató aláírása

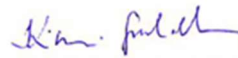
NYILATKOZAT

Frauholcz Bettina Blanka (név) (hallgató Neptun azonosítója: Y36KON) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A diplomadolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom / nem javaslom¹.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem²

Kelt: Keszthely, 2025. év 10. hó 29. nap



belső konzulens

¹ A megfelelő aláhúzendő.

² A megfelelő aláhúzendő.

Hallgatók, doktoranduszok nyilatkozata mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásáról

1. Általános adatok

Hallgató neve:	Frauholcz Bettina Blanka
Neptun-kódja:	Y36KON
Képzési szint (a megfelelőt jelölje X-szel):	<input type="checkbox"/> BSc/BA <input checked="" type="checkbox"/> MSc/MA <input type="checkbox"/> Doktori (PhD) <input type="checkbox"/> Egyéb:
Tantárgy neve/kódja*:	Diplomamunka készítés 4. / NVVED110N
A munka címe:	Olaszperje (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.) populációk herbicid-érzékenységének vizsgálata in vivo és in vitro módszerekkel

* doktori értekezés esetén nem kitöltendő

2. Nyilatkozat az MI használatáról

Alulírott, etikai felelősségem teljes tudatában az alábbi nyilatkozatot teszem:

(Kérjük, válasszon egyet az alábbi lehetőségek közül!)

A) Nem alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Amennyiben ezt jelölte, a további táblázatok kitöltése nem szükséges.)

B) Alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Kérjük, töltsse ki a vonatkozó táblázatokat!)

3. A mesterséges intelligencia használatának részletezése

I. TÁBLÁZAT: Asszisztensi vagy kisebb mértékű felhasználás (pl. fordítás, nyelvi korrekció, ötletelés stb.)

(Ezen felhasználások esetében a konkrét promptok és válaszok csatolása nem szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve és verziója	Érintett rész (ha nem a szöveg egészére vonatkozik)
fordítás	Chatgpt; GPT-5	

II. TÁBLÁZAT: Jelentős tartalmi hozzájárulás (pl. egy teljes ábra vagy egy hosszabb szövegrész generálása)

(Ezekben az esetekben a felhasznált kulcsfontosságú promptok és az MI által adott nyers válaszok dokumentálása és a munka **mellékletében való csatolása szükséges.**)

A felhasználás célja	Alkalmazott eszköz verziója, elérhetősége	MI-neve,	Az érintett fejezet / ábra / táblázat pontos sorszáma	A prompt-naplót tartalmazó melléklet bejegyzésének sorszáma

3/A. Oktató által előírt kiegészítő szabályok (ha vannak)

Amennyiben az adott tantárgy oktatója vagy témavezetője az MI-eszközök használatára vonatkozóan külön szabályokat vagy elvárásokat határozott meg, kérjük, az alábbi mezőben foglalja össze ezeket:

Pl. az MI használatának tilalma bizonyos feladattípusokra; csak konkrét eszköz használata engedélyezett; eltérő hivatkozási elvárások; dokumentációs forma stb.

Oktató vagy témavezető által előírt szabályok:

.....

.....

.....

.....

4. Minden hallgatóra vonatkozó nyilatkozat:

Kijelentem, hogy az MI által esetlegesen generált tartalmakat minden esetben kritikailag felülvizsgáltam, szerkesztettem és a munkába illesztettem. A leadott munka minden eleméért, annak eredetiségéért és tudományos helytállóságáért teljes körű felelősséget vállalok. Tudomásul veszem, hogy a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem a benyújtott munkát mesterséges intelligencia detektorral ellenőrizheti, és eljárást kezdeményezhet, amennyiben a nyilatkozatom valótlan vagy hiányos.

Kelt: Keszthely, 2025. 10. hó 29. nap

Frankecz Bettina Blanka

Hallgató aláírása

Kim. J. J. J.

Konzulens/Témavezető aláírása