

36. OTDK Biológia Szekció

Auxin által vezérelt fiziológiai válaszok jellemzése UV kezelt növényekben

Készítette: **Hatt Róbert**

Harmadéves biológia BSc hallgató

Témavezető: **Dr. Rácz Arnold**

PTE TTK Biológiai Intézet
Növénybiológiai Tanszék



Pécs, 2023.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	1.
2. Célkitűzések	2.
3. Anyag és módszer	3.
3.1 Növénynevelés és az UV kezelés részletei.....	3.
3.2 Pigmenttartalom meghatározása.....	4.
3.3 Auxin tartalom becslése kolometriás módszerrel.....	5.
3.4 Fotoszintézis vizsgálat.....	5.
4. Eredmények és megvitatásuk	5.
4.1 Pilot kísérlet a kiegészítő UV sugárzás dózisének meghatározásához.....	5.
4.2 Az UV kezelésünk hatására gátlódott a szármegnyúlás és indukálódott a gyökérnövekedés	7.
4.3 Az UV-sugárzás hatására lecsökken a levélméret.....	9.
4.4 Elterő pigmenttartalom-változásokat tapasztaltunk a két faj között.....	10.
4.5 Változó UV-B dózis indukálta fotoszintetikus paraméterek	13.
4.6 Spektrofotometriás auxin becslés	16.
5. Összefoglalás.....	17.
Köszönetnyilvánítás	19.
Irodalomjegyzék.....	20.

Rövidítések jegyzéke

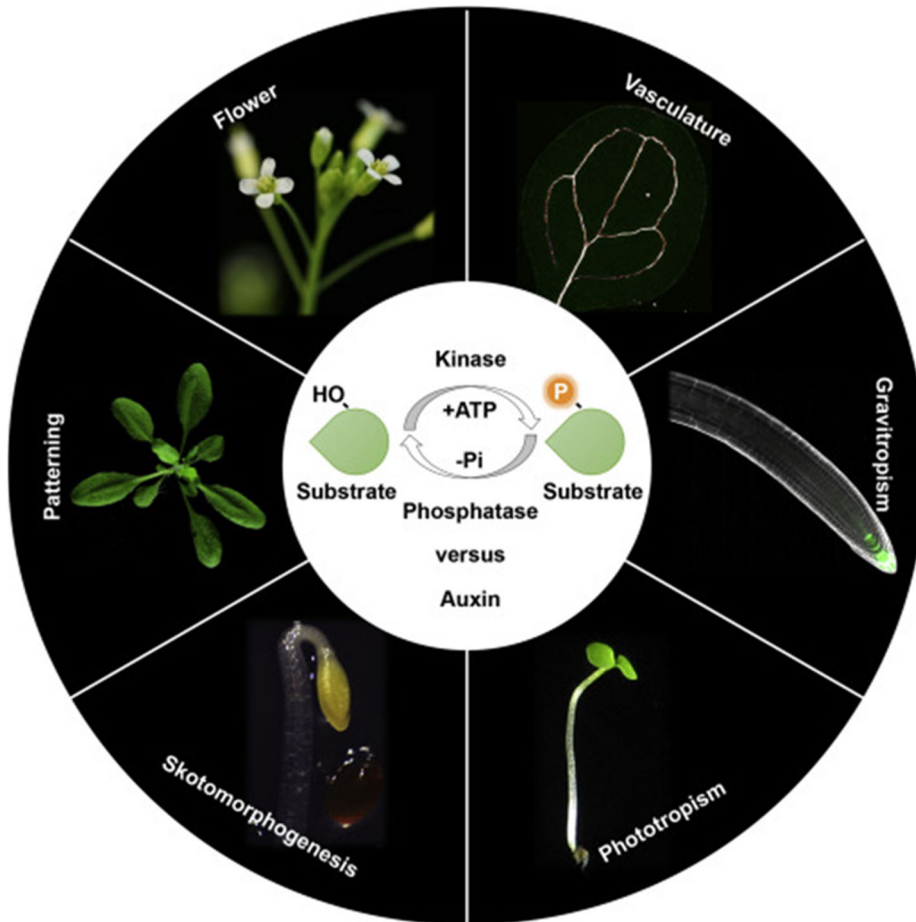
A	asszimilációs ráta
E	transzspiráció
F	megvilágított levél minimális fluoreszcencia hatékonysága
GSW	sztóma konduktancia
IAA	indolecetsav
IRGA	infravörös gázanalizátor
PAR	fotoszintetikusan aktív sugárzás
PSII	kettes fotokémiai rendszer
ROS	reaktív oxigén származék
RUBISCO	ribulóz-1,5-biszfoszfát karboxiláz/oxigenáz
UV	ultraviolett

1. Bevezetés és irodalmi áttekintés

A növények a Naptól származó elektromágneses sugárzást használják fel életük során számos esszenciális életfolyamataikhoz, többek között a fotoszintézishez. Fotokémiai reakciók során a napfény energiáját használják fel a légköri szén-dioxid redukciójához, mely nélkülözhetetlen a szerves anyag előállításához. A fény mennyisége és minősége így nem csak a növények növekedésére, de fenotípusukra és szöveti felépítésükre is.

A fény hullámhosszúság alapján különböző részekre osztható: UV-C-re (280nm alatt), UV-B-re (280-315nm), UV-A-ra (315-400nm), látható fényre (fotoszintetikusan aktív sugárzás, PAR 400-740nm), és infravörös részre (740nm fölött). Az UV-C sugárzást teljes mértékben abszorbeálja az ózonréteg, az UV-B sugárzást nagymértékben, az UV-A-t pedig csak kismértékben. Az UV-B sugárzás köztudottan törpenövést vált ki a növényeknél, ami feltételezhetően auxin gátláson keresztül történik (Yang és mtsai. 2020). Az UV-B sugárzás károsít számos fehérjekomplexet, amelyek a fotoszintézis fény reakcióiban vesznek részt, emellett a citokróm b-6f komplexet, a kettes fotokémiai rendszert (PSII), az egyes fotokémiai rendszert, és több fontos enzimet (pl. RUBISCO, szedoheptulóz-1,7-biszfoszfátáz) is (JORDAN és mtsai. 2016). A szabadban fejlődött növényekre nincs direkt stresszor hatása a napfényben jelen lévő természetes UV-B sugárzásnak általában (HIDEG és mtsai. 2013). Ellenőrzött körülmények között viszont (pl. növénynevelő kamrák) a természeteshez hasonló dózisú és hullámhosszú UV kezelés is vezethet reaktív oxigén származékok (ROS-ok) által irányított stressz kialakulásához (MAJER és mtsai. 2014). Ha az UV sugárzás mellett más stressz is éri a növényt, akkor ezek a hatások a fotoszintetikus aktivitás csökkenéséhez vezethetnek. A károsodást kiváltó UV-B dózis mértéke függ a besugárzott növény korától, fiziológiai állapotától, fajától és a környezeti tényezőktől is (MAJER és HIDEG 2012a).

Az auxin egy, a fény hatására elbomló növényi hormon, mely több fejlődési folyamatot vezérel, a többi növényi hormonnal együtt. Többek között részt vesz a virágzás, a vaszkularizáció, a különböző tropizmusok és a fenotípus kialakításában is.



1. ábra Az auxin által vezérelt életfolyamatok bemutatása a növényekben (Shutang Tan és mtsai. 2021)

Szakirodalomban még jelenleg is kutatott téma az UV sugárzás hatása az auxin működésére, így keveset tudunk róla. A két növekedési lépés hormonális szabályozottságát látható fény és kiegészítő UV-B sugárzás mellett vizsgáltuk.

2. Célkitűzések

Elsőként megvizsgáltuk a két kezeletlen növényfaj közötti különbségeket, utána mindkét faj esetében megnéztük, hogy az UV kezelés hogyan befolyásolta az auxin vezérelte folyamatokat, végül megfigyeltük az UV-B sugárzás potenciális auxin-gátló szerepét, tehát a kezelés és az auxin interakcióját.

A következő kérdésekre kerestünk válaszokat:

Tapasztalható UV-kezelésre adott alkalmazkodási válasz és ez a válasz különbözik a két fajban:

- a levélfelület vizsgálatánál?
- a pigment-tartalom becslésnél?
- a fotoszintézis vizsgálatánál?

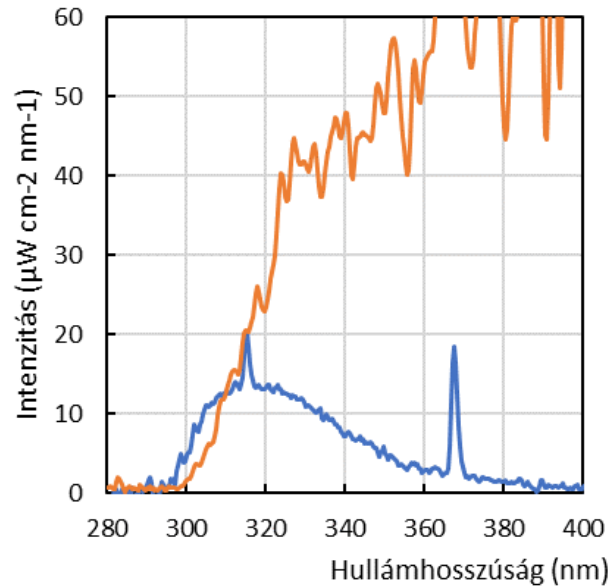
3. Anyag és módszer

Általános válaszhoz kerestünk ideális modellnövényeket, az első választásunk a repce (*Brassica napus L.*) lett, mivel rövid csírázási idővel rendelkezik és könnyen kiértékelhető a szárhossz változása. A másik vizsgálandó növényfajunknak a veteménybabot (*Phaseolus vulgaris L.*) választottuk, mert vízszintesen álló, nagyméretű levelei ideálisak az UV kezelés szempontjából.

Laborunkban hamarosan elérhető lesz az auxin mennyiségének mérése, de jelenleg még nem az, ezért mi az auxin által vezérelt fiziológiai válaszokat vizsgáltuk. Elsőként megvizsgáltuk a két kezeletlen növényfaj közötti különbségeket, utána mindkét faj esetében megnéztük, hogy az UV kezelés hogyan befolyásolta az auxin vezérelte folyamatokat, végül megfigyeltük az UV-B sugárzás potenciális auxin-gátló szerepét, tehát a kezelés és az auxin interakcióját.

3.1 Növénynevelés és az UV kezelés részletei

Azonos növénynevelési körülmények voltak mindkét fajunknál, mindkettő egyedei növénynevelő kamrában nőttek (Fitotron, SGC 120 Plant Growth Chamber, Weiss Technik UK, Loughborough, UK) általános virágföldben és hosszúnappalos körülmények között, ez 16 órás megvilágítási időt jelent naponta ($200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ fotoszintetikusán aktív sugárzás, PAR). Növényeink 1 hetes korukban kapták meg az UV kezelést, ami 9 napon keresztül zajlott napi 4 órás kezelésekkkel, a fényperiódus közepén. $\sim 7.7 \text{ kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ biológiailag effektív UV-B dózis (Panel UVB-313EL tubes, Q-Lab Ltd., Bolton, UK) érte a növényeket. A 280 nm alatti hullámhosszúságú sugárzás kizárására cellulóz-diacetát szűrőt alkalmaztunk (Courtaulds Chemicals, Derby, UK). Összesen 17 növényrel dolgoztunk, ebből a kezelt csoportban 9 db növény volt. Kezelésünk a környezeti UV-val azonos mértékű UV dózissal felelt meg. Az UV kezelésünk tartalmazott UV-B-t és UV-A-t.



2. ábra UV spektrum, ahol a narancssárga a Nap spektruma, a kék a benti fénycsőé

3.2 Pigmenttartalom meghatározása

A levelek non-invazív klorofill és flavonoid tartalom mérését DUALEX® SCIENTIFIC készülékkel végeztük. A klorofill index meghatározásához a levelek transzmisszióját (T) két hullámhosszon, 650 nm-es vörös és 940 nm-es infravörös fénnel határoztuk meg:

$$\text{klorofill index} = \frac{(T \text{ infravörös} - T \text{ vörös})}{T \text{ vörös}}$$

Az epidermális flavonoidok elnyelik az UV sugárzást, így a flavonoid index meghatározásához a klorofill fluoreszcencia gerjeszthetőségét használjuk. A fluoreszcencia intenzitását (F) az UV tartományban és vörös (650 nm) fénnel gerjesztve is megmértük, és a flavonoid- és antocián indexet a következő képlet alapján határoztuk meg:

$$\text{flavonoid index} = \log \frac{\text{vörös fény gerjesztette infravörös } F}{\text{UV fény gerjesztette infravörös } F}$$

$$\text{antocián index} = \log \frac{\text{vörös fény gerjesztette infravörös } F}{\text{zöld fény gerjesztette infravörös } F}$$

A Dualex készüléket relatív pigment tartalom mérésre, különböző levelek gyors összehasonlítására tervezték, így a levelek összehasonlítása a fenti indexek és nem abszolút érték (koncentráció) alapján történik.

3.3 Auxin tartalom becslése kolometriás módszerrel

Folyékony nitrogénben elporított növényi mintából 100 mg-ot feloldottunk 500 µl 96%-os etanolban (VWR Chemicals). Majd 15 perces inkubálás következett szobahőn, aminek során sötét helyen tartottuk a mintáinkat. A mintákat az inkubációt követően lefugáltuk max rpm-en, 23°C-on 15 percig. A felülúszóval dolgoztunk tovább. 500 µl sejtmentes mintához adtunk 500 µl Salkowski reagenst (15 ml H₂SO₄; 25 ml desztvíz; 0,75 ml FeCl₃·6H₂O (0,5M)). 30 perces szobahőn történő inkubálás után megmértük a mintáink abszorbanciáját 520 nm-en spektrofotométerrel (Shimadzu UV-1800). Az előzőleg felvett kalibrációs görbe egyenesének egyenletéből kiszámoltuk a mintáink auxin tartalmát (Anguiano-Cabello és mtsai 2017).

3.4 Fotoszintézis vizsgálat

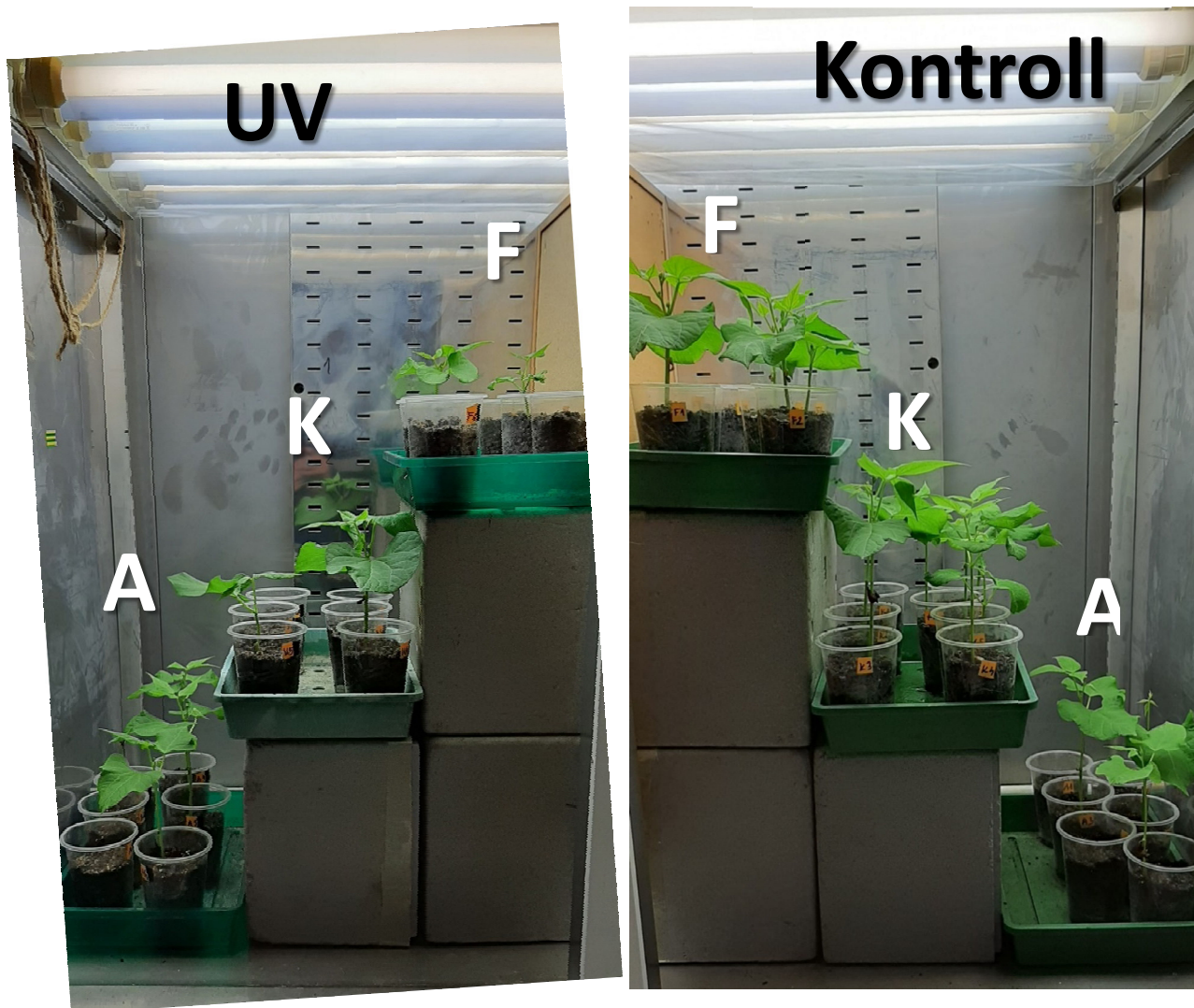
A vizsgált növényeink fotoszintézisének mérését infravörös gázanalizátorral (IRGA) végeztük. Méréseinket nap közben (11:00-15:00, UTC +2óra) végeztük az IRGA-val (IRGA, LI-6800, LI-COR Biosciences GmbH, Bad Homburg, Németország) a teljesen kifejlett leveleken. A növények leveleinek (n = 3-4 növény mindegyik állapotra/típusra, 1 levél minden növényről) mérését telítő fény alatt végeztük (PAR = 30,80,150 µmol m⁻² s⁻¹) hordozható infravörös gázanalizátort használva, amely rendelkezett vörös-kék fényforrással. A levélkamrában a páratartalom 60%-os volt. A kontroll kamrában a szén-dioxid koncentrációja 400 µmol m⁻¹ volt. A hőmérsékletet nem az LI-6800 szabályozta. A sztóma konduktanciát (gsw), fotoszintetikus szén-dioxid asszimilációt (A) és a transzspirációt (E) három teljesen kifejlődött levélen vizsgáltuk növényenként.

4. Eredmények és megvitatásuk

4.1 Pilot kísérlet a kiegészítő UV sugárzás dózisának meghatározásához

Ahhoz, hogy növényeinket ne tegyük ki károsító UV-hatásoknak meghatároztuk a kísérleteinkhez használt ideális UV dózist, mely kiváltotta az alkalmazkodási válaszokat, de

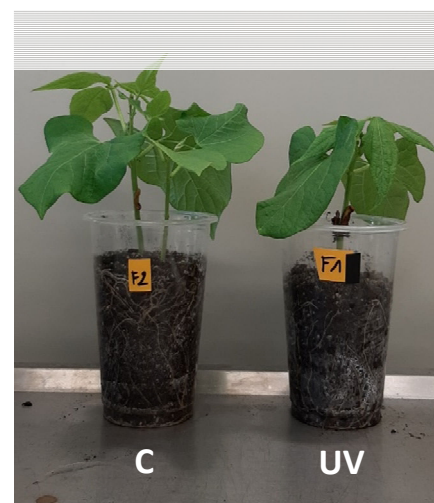
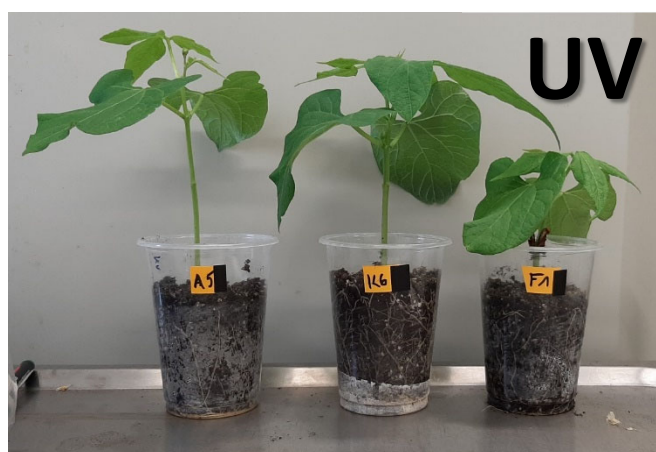
még nem károsította az egyes egyedeket. A pilot kísérletben csak a veteménybabot használtuk fel a biológiailag effektív dózis meghatározásához. A kiegészítő UV kezelés minden esetben a fényperiódus közepén érte a növényeket.



A: Alsó szint K: Középső szint F: Felső szint

3. ábra Veteménybabok növénynevelő kamrában a különböző szinteken (UV: UV kezelt egyedek, Kontroll: nem kapott UV kezelést, csak PAR-t)

A fotókon is látszik a méretbeli eltérés, de a mérési eredményeket számszerűsítve is kiértékeljük. Konklúzióként eldöntöttük, hogy a középső szintet használjuk a további kísérleteink során, mely $\sim 7 \text{ kJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ biológiailag effektív dózissal felelt meg (Rácz és mtsai 2020).



4. ábra A kezelt és kezeletlen és a különböző szinteken lévő egyedek egymás mellett elhelyezve összehasonlításképp (C/UV: Kontroll/UV sugárzással kezelt növények, A/K/F: Alsó/Középső/Felső szinten fejlődött növény)

A kontroll növényeknél az alsó szinten kevés volt a PAR, ezért az auxin beindította a szár megnyúlását. A középső szinten ideális volt a növényeket érő PAR mennyisége. A felső szinten a túl sok fény miatt csökkent a növények mérete, mivel túl közel voltak a fénycsővekhez, ahol nem volt egyenletes a fényeloszlás. Az UV-kezeltéknél hasonló méretváltozásokat tapasztaltunk, ami már mutatja, hogy egyik szinten sem volt károsító dózisu az UV-sugárzás. Az azonos szinten lévő kezelt és kezeletlen egyedeket egymás mellé helyezve jól látszik az UV auxin-gátló hatása (Hayes és mtsai 2014).

4.2 Az UV kezelésünk hatására gátlódott a szármegnyúlás és indukálódott a gyökérnövekedés



REPCE



BAB

5. ábra A szárhossz megfigyelése az egyes növénycsoportokban (a kék jelzéssel ellátott növények az UV kezelték)

A pilot kísérlet utáni kísérletünknel már repcénél is megfigyeltük az ideális UV-dózis hatására kialakuló alkalmazkodási válaszokat. A két faj között különbséget tapasztaltunk a szárhossz megnyúlásának mértékében. A repcénél a harmadára csökkent a kezelés hatására, míg a veteménybabnál nem volt különbség.



Kontroll



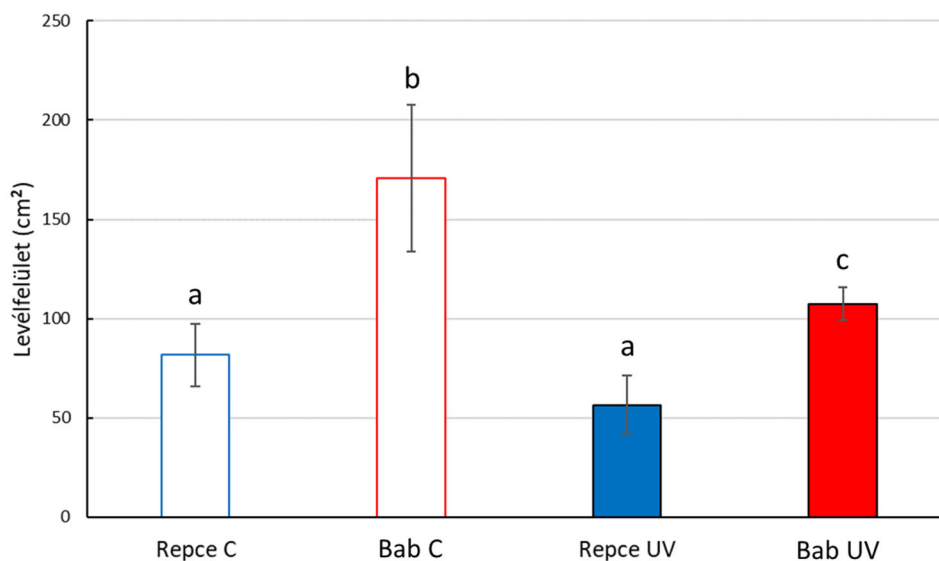
UV

6. ábra A levélfelületek fotódokumentációja (UV: UV kezelt növények, Kontroll: UV-val nem kezelt növények)

A repce esetében eltávolítottuk a földet és a fotókon ismét látható az UV szárhossz csökkentő hatása, továbbá a gyökérrendszer esetében is megfigyeltünk változásokat. Az UV besugárzás hatására hosszabb gyökérrendszerrel rendelkeztek a növényeink, melyet további növényekkel fogunk megismételni és kiértékelni, ezen eredmények jelen dolgozatban nem kerülnek bemutatásra. A veteménybab fotóknál a kezelt levelek kisebb méretűek, melyet számszerűen ki is értékeltünk.

4.3 Az UV-sugárzás hatására lecsökken a levélméret

A veteménybab- és repcelevelek méretének változását ImageJ képfeldolgozó program használatával is megvizsgáltuk a kiegészítő ultraibolya-sugárzás hatására. Kísérleti eredményeink a már korábban leírt ideális UV-dózis használatával végeztük el. A növényeink egy része csak PAR-t kaptak (ezek a kontrollok), míg a másik felük PAR-t és kiegészítő UV (PAR+UV-B) sugárzást is kaptak.



7. ábra A kontroll és a kezelt növények levélfelület értékei

(C/UV: kontroll/UV kezelt levél, a kisbetűk az oszlopok felett a $p < 0,05$ szignifikáns különbséget jelentik a kezelt és kezeletlen levelek között)

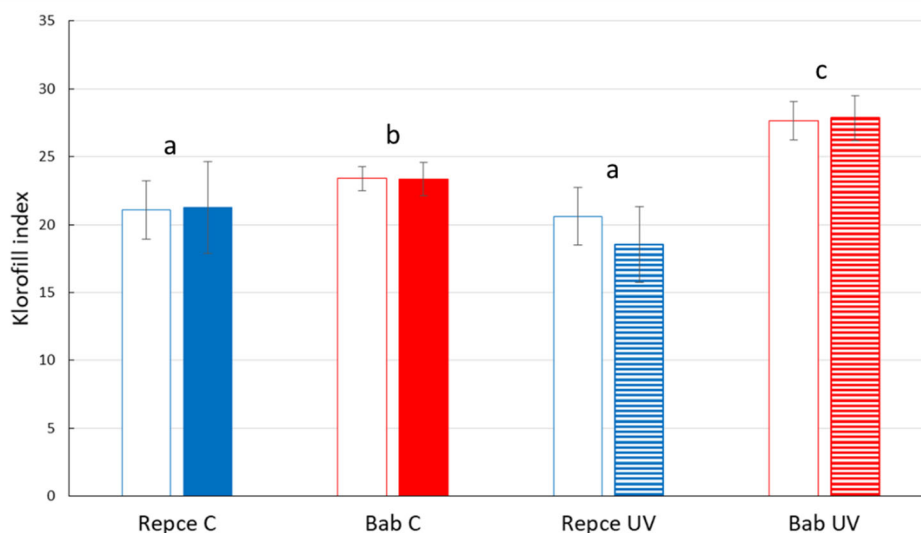
A két faj kezelt és kontroll leveleit egymáshoz viszonyítva szignifikáns csökkenést tapasztaltunk a veteménybab levélfelületénél, míg a repcénél csak marginálisan csökkent a levélméret UV-sugárzás hatására. A fajtakülönbség magyarázata a levelek pozíciójával magyarázható, mivel a féncsővekkel párhuzamosan álló veteménybab levelei jobban ki voltak téve az UV sugárzásnak, mint a repcenövények változatos térállású levelei (Gegas és mtsai 2014).

4.4 Eltérő pigmenttartalom-változásokat tapasztaltunk a két faj között

A fenotípusos változások kiértékelése után, az UV-sugárzás hatását megvizsgáltuk elsősorban az epidermiszben található pigmentekre nézve is, mivel a levélpigmentek megváltoztatása egy jól nyomon követhető UV-indukálta alkalmazkodási válasz.

- **Klorofill-szint**

Az első, a levelek adaxiális és abaxiális oldalán is megmért pigment a klorofill volt. A levél két oldala közötti különbséget egyik csoportunk esetében sem tapasztaltunk. Az UV kezelésünk hatása és a két faj közötti eltérések mindkét oldalon kimutatható volt, melynek magyarázata a növénynevelő kamránk falainak fényvisszaverő hatása (Chu és mtsai 2022).

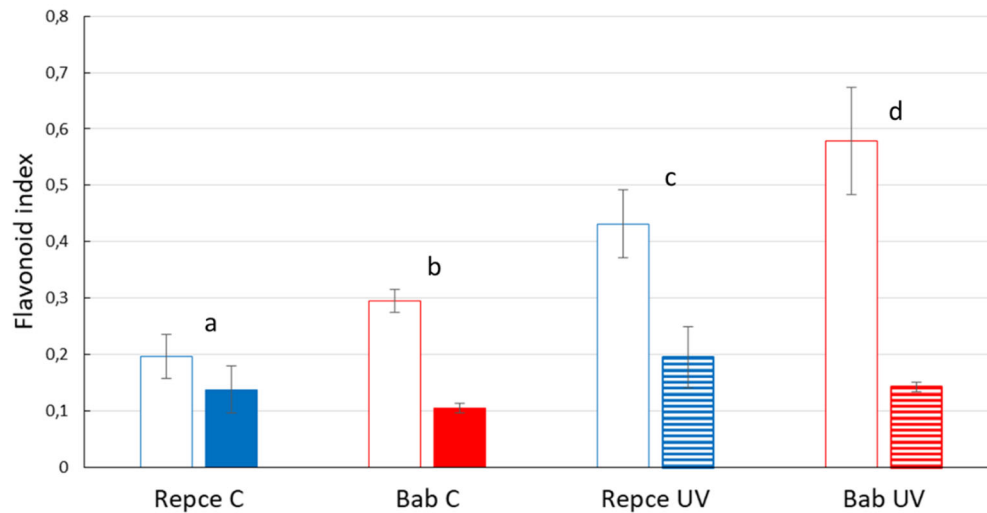


8. ábra A levelek abaxiális és adaxiális oldalain mért klorofill index értékek (C/UV: kontroll/UV kezelt levél, a színezett oszlopok: abaxiális oldal értékei, a kisbetűk az oszlopok felett: $p < 0,05$ szignifikáns különbséget jelentik a kezelt és kezeletlen levelek között)

A klorofill után két olyan pigmentet is megvizsgáltunk, amiknek mennyiségét indukálhatja az UV sugárzás.

- **Flavonoid-szint**

A második, mind az adaxiális, mind az abaxiális oldalon is megmért pigment az UV-B-ben abszorbeáló flavonoidok voltak. Ez az index egy jól monitorozható, UV-B indukálta növekedést mutat a levelekben (Song és mtsai 2022). A levél két oldala között ezen paraméternél minden egyes csoportnál tapasztaltunk szignifikáns különbséget. A flavonoid akkumuláció minden esetben az adaxiális oldalon volt intenzívebb a kiegészítő UV-B kezelésünk hatására, mindkét faj esetében. Az alkalmazkodási válasz fontos részét képező flavonoid index emelkedés a bab esetében jelentősebb mértékű volt, a repcével összehasonlítva.

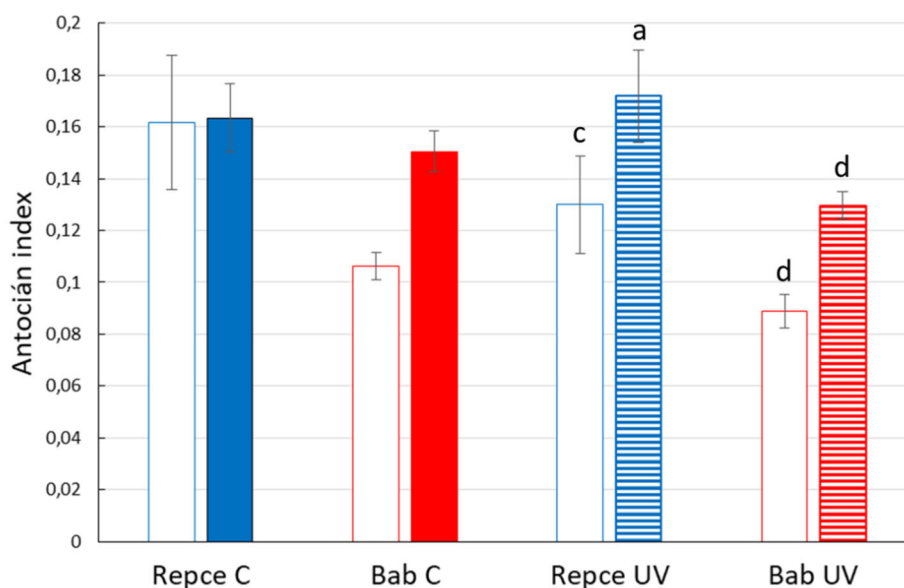


9. ábra A levelek abaxiális és adaxiális oldalain mért flavonoid index értékek

(C/UV: kontroll/UV kezelt levél, a színezett oszlopok: abaxiális oldal értékei, a kisbetűk az oszlopok felett: $p < 0,05$ szignifikáns különbséget jelentik a kezelt és kezeletlen levelek között)

- **Antocián-szint**

A harmadik mindkét levéloldalon megvizsgált pigment az antocián volt. A stresszindikátorként is ismert pigmentek szintje nem emelkedett meg UV kezelés hatására, egyik fajnál sem. Ezzel ellentétben, mindkét növényfajnál lecsökkent az index értéke, mivel nem volt szükségük a distressz indukálta antociánok bioszintézisének beindítására (Tapia és mtsai 2022). A pigment indexek méréséhez használt eszköz csak egy becslést tud adni számunkra az epidermális pigmentekről, így a sikeres alkalmazkodási válasz kialakulását konkrét élettani folyamatok mérésével is alátámasztottuk, a pilot kísérlet során használt veteménybabok használatával.

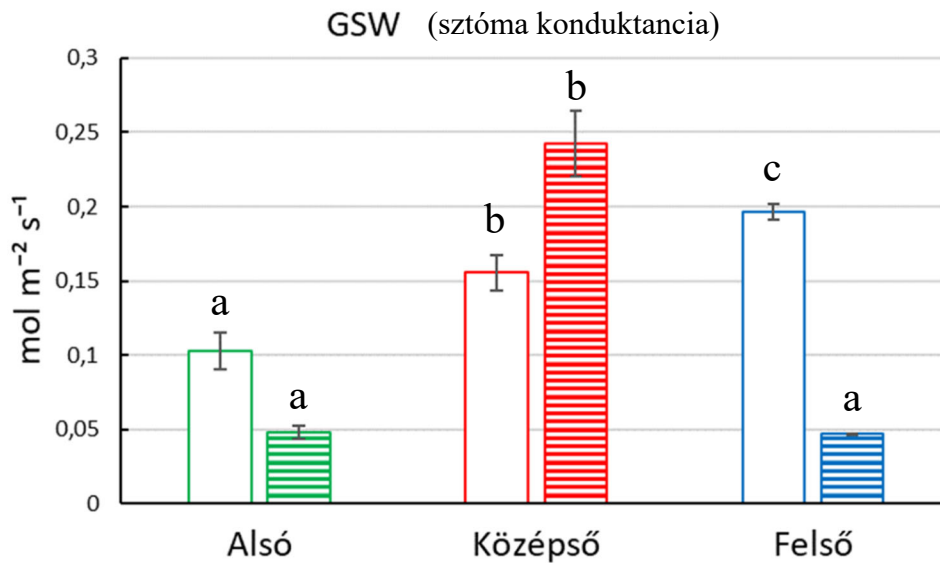


10. ábra A levelek abaxiális és adaxiális oldalain mért antocián index értékek (C/UV: kontroll/UV kezelt levél, a kisbetűk az oszlopok felett a $p < 0,05$ szignifikáns különbséget jelentik a kezelt és kezeletlen levelek között)

4.5 Változó UV-B dózis indukálta fotoszintetikus paraméterek

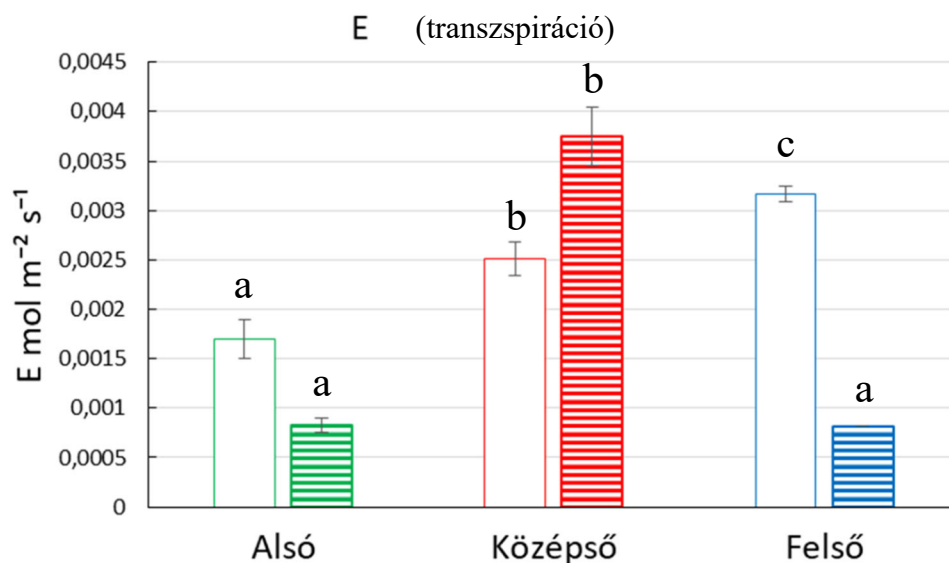
A kísérleti növényeink fotoszintetikus aktivitásának jellemzését infravörös gázanalizátorral (IRGA) végeztük el. A méréseket a pilot kísérletben hajtottuk végre, mivel kíváncsiak voltunk az egyes szinteken az eltérő UV-B dózisoknak kitett növények alkalmazkodási képességeire.

Először a bablevelek sztóma konduktanciáját figyeltük meg, mint a sztómák nyitottságának, illetve zártságának legfontosabb szabályozó paraméterét. A kontroll növények esetében az emelkedő fényviszonyokkal emelkedő konduktancia értékeket kaptunk. A szignifikáns emelkedés azzal magyarázható, hogy az növekvő fényviszonyok hatására nyitottabb sztómákra van szüksége a növényeknek, hogy több CO_2 -ot gyűjthessenek be. Az UV-B kezelt növények esetében egyedül a középső szinten volt megfigyelhető szignifikáns gsw növekedés, ami nem csak a középső szint UV dózisének kiválasztását igazolta (Nogues és mtsai 1999). A középső szint UV-B kezelt növénycsoportunk esetében tapasztaltuk a legmagasabb gsw értékeket, mely szintén igazolta a sikeres alkalmazkodási választ.



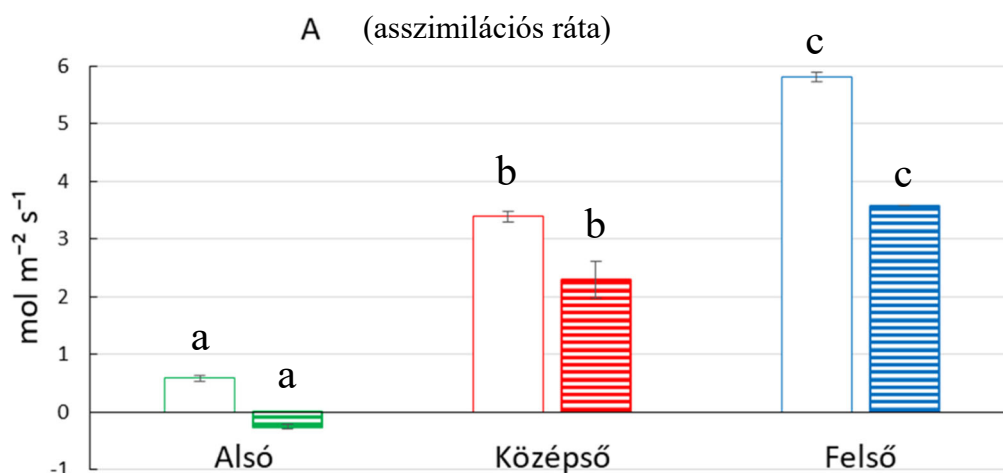
11. ábra A sztóma konduktancia értékei a növényeink leveleiben a különböző szinteken (Alsó/Középső/Felső: ezeken a szinteken fejlődtek az adott növények, csíkos oszlopok: UV-kezelt növények értékei)

Következő mérési paraméterünk, a sztóma konduktanciával egyenes arányosságban álló, transzspirációt figyeltük meg. A kontroll növények esetében az emelkedő fényviszonyokkal emelkedő transzspirációs értékeket kaptunk, ugyanúgy, ahogy az gsw-nél is. Az UV-B kezelt növények esetében szintén a középső szinten volt megfigyelhető szignifikáns növekedés. Az E és a gsw érték részben átfedő mérési paraméterekből számolandóak, ezért tapasztaltunk azonos változásokat a transzspirációs értékek esetében (Schumaker és mtsai 1997).



12. ábra A transzspiráció értékei a növényeink leveleiben a különböző szinteken (Alsó/Középső/Felső: ezeken a szinteken fejlődtek az adott növények, csíkos oszlopok: UV-kezelt növények értékei)

A megnövekedett CO₂-felvételt lehetővé tevő paraméterek után megvizsgáltuk a növényeink nettó asszimilációs rátáját is. A kontroll növények esetében továbbra is fennáll a fényre szignifikánsan emelkedő értékek tendenciája. Ezzel szemben az UV-B kezeltéknél a felső szintnél tapasztaltuk a legnagyobb CO₂ felhasználási értékeket, annak ellenére, hogy ennél a csoportnál a sztómák zártabbak voltak, mint a középső szinten nevelt növényeknél. A különbség azzal magyarázható, hogy a felső szinten kisebbek voltak a besugárzott levelek, így felületarányosan azonos asszimilációs értékeket kapunk, mint a sokkal nagyobb középső leveleknél (Ruhland és mtsai 2005). A cikkel ellentétben itt az UV-B sugárzás hatására nőtt az asszimilációs ráta szintről szintre.

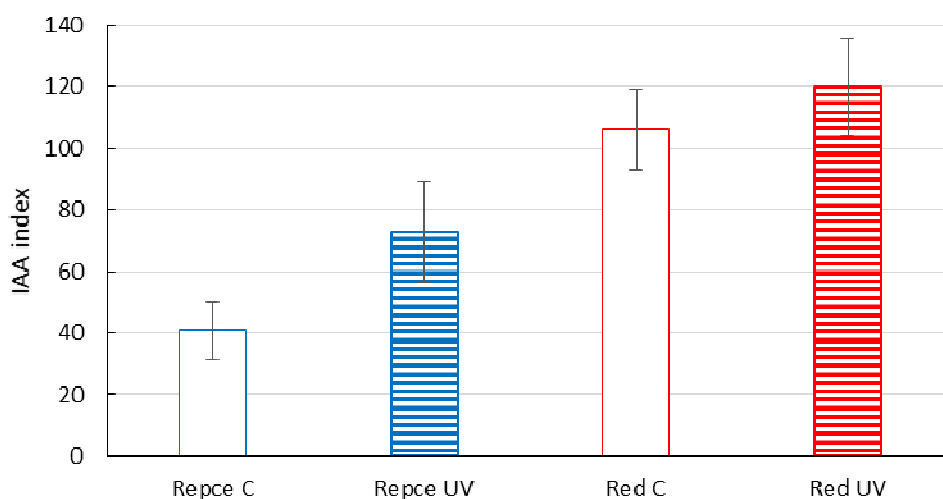


13. ábra Az asszimilációs ráta értékei a növényeink leveleiben a különböző szinteken (Alsó/Középső/Felső: ezeken a szinteken fejlődtek az adott növények, csíkos oszlopok: UV-kezelt növények értékei)

4.6 Spektrofotometriás auxin becslés

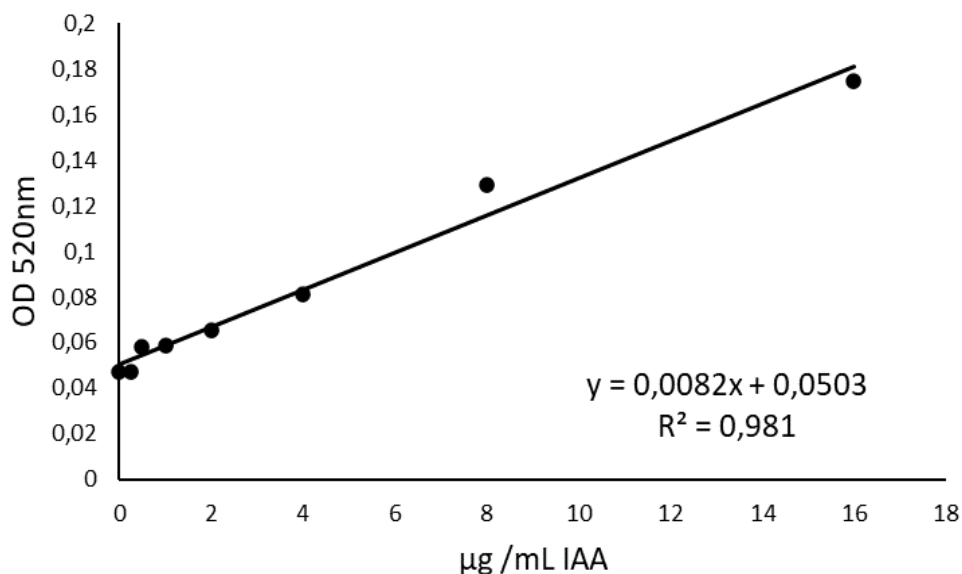
A tanszékünk jelenleg is dolgozik a mérőmódszer tökéletesítésén, ezért még nincs bevált módszerünk, de elvégeztünk egy szakirodalomban leírt mérést, melyben bakteriális auxin-mennyiséget határoztak meg és kipróbáltuk, hogy használható növényi mintákkal is.

Becsült IAA index



14. ábra A becsült indolecetsav index ábrázolása növénycsoportonként (C/UV: kontroll/UV kezelt növények, IAA index: indolecetsav index)

A mérést tesztvegyület mérésével kezdtük, amire magas R^2 értékű egyenest tudtunk illeszteni.



15. ábra Az indolecetsav mérésünk kailbrációs egyenese, az elnyelési maximum a koncentráció függvényében (egyenest egyenletével és a determinációs együtthatóval)

A növényi mintás mérésekhez viszont a módszer még nem elég érzékeny, de a közeljövőben egy módosított mintafeltáró módszerrel megismételjük ezt a mérést. Továbbá a módszer nem specifikus, mivel a mérési hullámhosszon a mintában jelenlévő összes indolgyűrűs vegyületet detektáltuk, nem csak az auxint.

5. Összefoglalás

Növényekben számos életfolyamatra hatással vannak a különböző stresszorok. Az egyik ilyen az UV-B sugárzás is lehet, mely nagy hatással van többek között a levélfelületre, a szárhosszra, pigmenttartalomra és a fotoszintézis folyamataira is. Az UV-B feltételezhetően a fenotípusos jellemzők változásait főleg auxin gátláson keresztül éri el.

Munkánk során növénynevelő kamrában nevelt veteménybab (*Phaseolus vulgaris* L.) és repce (*Brassica napus* L.) fenotípusos változásait figyeltük, teljesen kifejtett levelei fotoszintézisének aktivitását és pigmenttartalmának változását UV-B sugárzás hatására.

Fajkülönbséget a levélfelület mérésnél és a noninvazív levélpigment becselő mérésünk során észleltünk, a veteménybab nagyobb levélfelülettel rendelkezett és nagyobb

menyiségben tartalmazott klorofillt és flavonoidokat (az abaxiális oldalon kevesebb flavonoidot figyeltünk meg), míg a repcében több antocián volt.

Kezelés okozta különbséget figyeltünk meg egyrészt a levélfelület mérésénél, ahol csökkent az érték mindkét fajnál UV-B kezelés hatására. Másrészt a levélpigment becselő mérés során, ahol veteménybabnál a klorofill-tartalom szignifikánsan megemelkedett. Mindkét növényfajban közel duplájára emelkedett a flavonoid index, az antocián-tartalom viszont mindkét fajban lecsökkent a kezelés hatására az adaxiális oldalakon. Míg az abaxiális oldalon repcében lecsökkent és a veteménybabban megemelkedett a klorofill-szint, mindkét fajban megemelkedett a flavonoid index, de a veteménybab antocián tartalma lecsökkent a kezelés hatására.

A növekvő fénymennyiségre növekvő nettó fotoszintézis értékeket kaptunk, ez már a kezelés hatására növekvő klorofill-tartalommal is magyarázható. A flavonoid tartalmak változása is bizonyította a sikeres alkalmazkodást az UV-B kezeléshez mindkét fajnál, valamint az antocián tartalmak igazolták, hogy a növényeket nem érte distressz.

Az auxin mennyiségének UV kezelésre történő változásainak pontosabb ismerete elősegítheti a mezőgazdasági alkalmazott kutatásokat.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Dr. Rác Arnold témavezetőmnek a sok segítségért és szakmai tanácsaiért, valamint a laboratóriumi munkám során nyújtott útmutatásáért, amelyet a TDK dolgozatom végzése során tett. Továbbá hálás köszönettel tartozom a Növénybiológiai Tanszék munkatársainak is.

Irodalomjegyzék

Anguiano-Cabello, J. , Flores-Olivas, A. , Ochoa-Fuentes, Y. , Arredondo-Valdés, R. and Olalde-Portugal, V. (2017) Fast Detection of Auxins by Microplate Technique. *American Journal of Plant Sciences*, **8**, 171-177. doi: [10.4236/ajps.2017.82013](https://doi.org/10.4236/ajps.2017.82013).

Chu, R., Zhang, Q. H., & Wei, Y. Z. (2022). Effect of enhanced UV-B radiation on growth and photosynthetic physiology of *Iris tectorum maxim.* *Photosynthesis research*, 153(3), 177–189. <https://doi.org/10.1007/s11120-022-00933-8>

Gegas, V. C., Wargent, J. J., Pesquet, E., Granqvist, E., Paul, N. D., & Doonan, J. H. (2014). Endopolyploidy as a potential alternative adaptive strategy for Arabidopsis leaf size variation in response to UV-B. *Journal of experimental botany*, 65(10), 2757–2766. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert473>

Hayes, S., Velanis, C. N., Jenkins, G. I., & Franklin, K. A. (2014). UV-B detected by the UVR8 photoreceptor antagonizes auxin signaling and plant shade avoidance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(32), 11894–11899. <https://doi.org/10.1073/pnas.1403052111>

HIDEG, É., JANSEN, M. A. K. & STRID, Å. 2013: UV-B exposure, ROS, and stress: inseparable companions or loosely linked associates? *Trends in Plants Science* 18(2): 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.11.004>.

JORDAN, B. R., STRID, Å. & WARGENT, J. J. 2016: What role does UVB play in determining photosynthesis? In: Pessarakli, M. editor. Handbook of photosynthesis, Third edition. CRC Press. pp. 275-286.

MAJER, P. & HIDEG, É. 2012a: Existing antioxidant levels are more important in acclimation to supplemental UV-B irradiation than inducible ones: Studies with high light pretreated tobacco leaves. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 24: 598-606.

MAJER, P., CZÉGÉNY, GY., SÁNDOR, GY., DIX, P. J. & HIDEG, É. 2014: Antioxidant defence in UV-irradiated tobacco leaves is centred on hydrogen-peroxide neutralization. *Plant Physiology and Biochemistry* 82: 239-243.

Nogues, S., Allen, D. J., Morison, J. I., & Baker, N. R. (1999). Characterization of stomatal closure caused by ultraviolet-B radiation. *Plant physiology*, 121(2), 489–496. <https://doi.org/10.1104/pp.121.2.489>

Rácz, A., Czégény, G., Csepregi, K., & Hideg, É. (2020). Ultraviolet-B acclimation is supported by functionally heterogeneous phenolic peroxidases. *Scientific reports*, 10(1), 16303. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73548-5>

Ruhland, C. T., Xiong, F. S., Clark, W. D., & Day, T. A. (2005). The influence of ultraviolet-B radiation on growth, hydroxycinnamic acids and flavonoids of *Deschampsia antarctica* during Springtime ozone depletion in Antarctica. *Photochemistry and photobiology*, 81(5), 1086–1093. <https://doi.org/10.1562/2004-09-18-RA-321>

Schumaker, M. A., Bassman, J. H., Robberecht, R., & Rademaker, G. K. (1997). Growth, leaf anatomy, and physiology of *Populus* clones in response to solar ultraviolet-B radiation. *Tree physiology*, 17(10), 617–626. <https://doi.org/10.1093/treephys/17.10.617>

Shutang Tan, Christian Luschnig, Jiří Friml. 2021. Pho-view of Auxin: Reversible Protein Phosphorylation in Auxin Biosynthesis, Transport and Signaling, *Molecular Plant*, Volume 14 (1) 151-165, ISSN 1674-2052,

Song, Y., Ma, B., Guo, Q., Zhou, L., Lv, C., Liu, X., Wang, J., Zhou, X., & Zhang, C. (2022). UV-B induces the expression of flavonoid biosynthetic pathways in blueberry (*Vaccinium corymbosum*) calli. *Frontiers in plant science*, 13, 1079087. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1079087>

Tapia, G., Castro, M., Gaete-Eastman, C., & Figueroa, C. R. (2022). Regulation of Anthocyanin Biosynthesis by Drought and UV-B Radiation in Wild Tomato (*Solanum peruvianum*) Fruit. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 11(9), 1639. <https://doi.org/10.3390/antiox11091639>

Yang, Y., Zhang, L., Chen, P., Liang, T., Li, X., & Liu, H. (2020). UV-B photoreceptor UVR8 interacts with MYB73/MYB77 to regulate auxin responses and lateral root development. *The EMBO journal*, 39(2), e101928. <https://doi.org/10.15252/emj.2019101928>