



Sveučilište u Zagrebu

AGRONOMSKI FAKULTET

Roberta Vrkić

**PRINOS I SADRŽAJ SPECIJALIZIRANIH
METABOLITA MLADIH IZDANAKA
CIKLE, MUNGO GRAHA I ROTKVICE,
UZGOJENIH POD DOPUNSKIM
OSVJETLJENJEM SVJETLEĆIM
DIODAMA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

FACULTY OF AGRICULTURE

Roberta Vrkić

**YIELD AND SPECIAL METABOLITES
CONTENT OF VEGETABLE SPECIES OF
BEET, MUNG BEAN AND RADISH
MICROGREENS GROWN UNDER
SUPPLEMENTAL ILLUMINATION BY
LIGHT EMITTING DIODES**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

AGRONOMSKI FAKULTET

Roberta Vrkić

**PRINOS I SADRŽAJ SPECIJALIZIRANIH
METABOLITA MLADIH IZDANAKA
CIKLE, MUNGO GRAHA I ROTKVICE,
UZGOJENIH POD DOPUNSKIM
OSVJETLJENJEM SVJETLEĆIM
DIODAMA**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

prof. dr. sc. Božidar Benko
izv. prof. dr. sc. Jana Šic Žlabur

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

FACULTY OF AGRICULTURE

Roberta Vrkić

**YIELD AND SPECIAL METABOLITES
CONTENT OF VEGETABLE SPECIES OF
BEET, MUNG BEAN AND RADISH
MICROGREENS GROWN UNDER
SUPPLEMENTAL ILLUMINATION BY
LIGHT EMITTING DIODES**

DOCTORAL THESIS

Supervisors:

Full Professor Božidar Benko

Associate professor Jana Šic Žlabur

Zagreb, 2025.

Bibliografski podaci:

Znanstveno područje: Biotehničko područje

Znanstveno polje: Poljoprivreda (agronomija)

Znanstvena grana: Povrčarstvo

Institucija: Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zavod za povrčarstvo

Voditelji doktorskog rada: prof. dr. sc. Božidar Benko, izv. prof. dr. sc. Jana Šic Žlabur

Broj stranica: 86

Broj slika: 6

Broj grafikona: 10

Broj tablica: 19

Broj priloga: /

Broj literaturnih referenci: 181

Datum obrane doktorskog rada: __. __. 2025.

Sastav povjerenstva za obranu doktorskog rada:

1. izv. prof. dr. sc. Sanja Fabek Uher
2. prof. dr. sc. Sandra Voća
3. prof. dr. sc. Verica Dragović-Uzelac

Rad je pohranjen u:

Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu, Ulica Hrvatske bratske zajednice 4 p.p.
550, 10 000 Zagreb,

Knjižnici Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog Fakulteta, Svetošimunska cesta 25, 10
000 Zagreb.

Tema rada prihvaćena je na sjednici Fakultetskog vijeća Agronomskog Fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, održanoj 05. travnja 2022. godine, te odobrena na sjednici Senata Sveučilišta u Zagrebu, održanoj dana 18. svibnja 2022. godine.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

IZJAVA O IZVORNOSTI

Ja, **Roberta Vrkić**, izjavljujem da sam samostalno izradila doktorski rad pod naslovom:

**PRINOS I SADRŽAJ SPECIJALIZIRANIH METABOLITA MLADIH IZDANAKA
CIKLE, MUNGO GRAHA I ROTKVICE, UZGOJENIH POD DOPUNSKIM
OSVJETLJENJEM SVJETLEĆIM DIODAMA**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica ovog doktorskog rada;
- da je doktorski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristila drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni;
- da sam upoznata s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

Zagreb, __. __. 2025. godine

Potpis doktorandice

Ovu doktorsku disertaciju je ocijenilo povjerenstvo u sastavu:

1. izv. prof. dr. sc. Sanja Fabek Uher

Izvanredna profesorica Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog fakulteta

2. prof. dr. sc. Sandra Voća

Redovita profesorica Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog fakulteta

3. prof. dr. sc. Verica Dragović-Uzelac

Redovita profesorica Sveučilišta u Zagrebu Prehrambeno-biotehnološkog fakulteta

Doktorski rad je obranjen na Agronomskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu,
_____ pred povjerenstvom u sastavu:

1. izv. prof. dr. sc. Sanja Fabek Uher

Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet

2. prof. dr. sc. Sandra Voća

Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet

3. prof. dr. sc. Verica Dragović-Uzelac

Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno-biotehnološki fakultet

INFORMACIJE O MENTORIMA:

Prof. dr. sc. Božidar Benko, znanstveni savjetnik

Božidar Benko rođen je 25. kolovoza 1977. u Koprivnici. Srednju gospodarsku školu u Križevcima završio je 1995. godine. Iste godine upisuje studijski program Vrtlarstvo i oblikovanje pejzaža na Sveučilištu u Zagrebu Agronomskom fakultetu. Diplomirao je 2001. godine obranivši diplomski rad „Izbor kultivara krastavaca za konzerviranje u agroekološkim uvjetima Koprivnice“. Također, 2001. godine zapošljava se kao znanstveni novak na projektu „Reakcija kultivara plodovitog povrća na sastav hranjive otopine“ (MZOS 2007.-2013.) u Zavodu za povrćarstvo, Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog fakulteta. Istovremeno upisuje poslijediplomski znanstveni studij Bilinogojstvo – Povrćarstvo, koji završava 2005. godine obranom magistarskog rada naslova „Dinamika rasta i plodonošenja rajčice uzgajane na kamenoj vuni“ i stječe akademski stupanj magistra znanosti iz područja Biotehničkih znanosti, polja Agronomija/Bilinogojstvo – Povrćarstvo. Doktorirao je 3. srpnja 2009. godine obranom doktorske disertacije naslova „Gospodarska svojstva kultivara rajčice (*Lycopersicon esculentum* Mill.) pri različitim koncentracijama kalcijeva nitrata u hranjivoj otopini“. U suradničko zvanje asistenta izabran je 2003. godine, a višeg asistenta 2009. godine. U znanstveno-nastavno zvanje docenta izabran je 2012. godine, izvanrednog profesora 2018. godine i redovitog profesora 2023. Kao nositelj i suradnik sudjeluje u izvedbi nastave na prijediplomskom (Zaštićeni prostori, Osnove povrćarstva, Osnove proizvodnje povrća) i diplomskom studiju (Agrobiotopi zaštićenih prostora, Hidroponski uzgoj povrća i cvijeća, Vodni režim supstrata u zaštićenom prostoru, Uzgoj povrća u zaštićenim prostorima) te poslijediplomskom doktorskom studiju (Upravljanje čimbenicima proizvodnje povrća u zaštićenim prostorima) Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog fakulteta. Kao mentor uspješno je vodio veći broj završnih i diplomskih radova te objavio više znanstvenih radova u koautorstvu sa studentom i tri sa doktorandom. U znanstvenom radu usmjeren je na istraživanja suvremenih tehnologija uzgoja povrća te aromatičnog i ljekovitog bilja, pretežito u zaštićenim prostorima, a dijelom i na otvorenim površinama, sa svrhom proučavanja utjecaja mikroklima, odnosno okolišnih uvjeta, sortimenta i tehnika uzgoja na morfološka i agronomska svojstva te nutritivnu i funkcionalnu vrijednost važnijih vrsta povrća te aromatičnog i ljekovitog bilja. Samostalno ili u koautorstvu objavio je preko 80 znanstvenih radova, od kojih je 14 radova indeksiranih u a1 časopisima. Sudjelovao je na 20 ak međunarodnih znanstvenih skupova. Bio je član znanstvenog odbora 7 međunarodnih znanstvenih skupova te predsjedavajući i urednik zbornika radova međunarodnog znanstvenog skupa VI Balkan Symposium on Vegetables and Potatoes. Bio je član Uređivačkog odbora međunarodnog znanstvenog časopisa Journal of Central European Agriculture (JCEA), a trenutno je gostujući urednik specijalnog broja časopisa Horticulturae (IF 3,1). Recenzirao je preko 60 znanstvenih radova i dva znanstveno-istraživačka projekta. Suradnik je na nacionalnim i međunarodnim znanstvenim, razvojnim i stručnim projektima. Prof. dr. sc. Božidar Benko objavio je 5 stručnih te niz stručno-popularnih radova, Uz to, aktivno je sudjelovao na stručnim skupovima. Od 2018. član je Fakultetskog vijeća Agronomskog fakulteta. U dva mandata obnašao je dužnost predstojnika Zavoda za povrćarstvo, a godinu dana je bio koordinator Odsjeka za hortikulturu i krajobraznu arhitekturu. Član je međunarodne organizacije International Society for Horticultural Science (ISHS).

Izv. prof. dr. sc. Jana Šic Žlabur, viša znanstvena suradnica

Jana Šic Žlabur rođena je 6. listopada 1984. u Zagrebu. Srednju školu nastavnog programa Opća gimnazija završila je 2003. godine u Oroslavju te iste godine upisuje studijski program magistra edukacije biologije i kemije na Sveučilištu u Zagrebu Prirodoslovno-matematičkom fakultetu. Diplomirala je 2009. godine obranivši diplomski rad naslova „Značajke tala u vinogradima okolice Oroslavja u Hrvatskom zagorju“. Godine 2010. zapošljava se kao znanstveni novak u Zavodu za održive tehnologije i obnovljive izvore energije na projektu „Nutritivna vrijednost plodovitog i suptropskog povrća“ (MZOS, 2007.-2013.). Iste godine upisuje poslijediplomski doktorski studij Poljoprivredne znanosti. Disertaciju naslova „Utjecaj bioaktivnih komponenata stevije (*Stevia rebaudiana* Bertoni) na kvalitetu voćnog soka“ obranila je 2015. godine na Sveučilištu u Zagrebu Agronomskom fakultetu i time stekla akademski stupanj doktorice znanosti iz područja Biotehničkih znanosti, polja Poljoprivreda. U suradničko zvanje i na radno mjesto poslijedoktorandice izabrana je 2015. godine, u nastavno-znanstveno zvanje docentice 2016. godine, a u izvanrednu profesoricu 2021. godine. Aktivno sudjeluje u provedbi znanstveno-istraživačkih i stručnih projekata, projekata iz programa LIFE i COST, kao i razvojnih te edukativnih projekata iz Erasmus+ programa. Uža znanstvena djelatnost vezana je uz područje bioaktivnih spojeva, odnosno specijaliziranih metabolita, kao i nutritivne te funkcionalne vrijednosti biljnih vrsta i njihovih proizvoda. U istraživačkom radu aktivno doprinosi novim spoznajama iz područja utjecaja pojedinih stresnih čimbenika prilikom uzgoja bilja, posebice utjecaju vodnog, temperaturnog, mehaničkog stresa na sadržaj specijaliziranih metabolita. Nadalje, bavi se istraživanjima iz koncepta održivog razvoja, posebice u području mogućnosti uporabe i ponovne upotrebe organskog ostatka od voća i povrća i otpada od hrane u proizvode visoke dodane vrijednosti primjenom metoda zelene kemije. Kao nositelj ili suradnik sudjeluje u izvođenju nastave na studijima Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog fakulteta i to na prijediplomskom (Prerada voća i povrća, Neinvazivne metode u preradi poljoprivrednih proizvoda, Tehnološki postupci obrade hortikulturnih sirovina) i diplomskom studiju (Tehnologija obrade organskog ostatka od voća i povrća, Kvaliteta voća, povrća i prerađevina, Fiziološki procesi ubranog voća i povrća, Dorada hortikulturnih sirovina za dekorativnu primjenu, Dorada i prerada mediteranskih povrtnih i aromatično-ljekovitih vrsta, Funkcionalna vrijednost mediteranskih sirovina i proizvoda, Dorada i prerada voćnih vrsta Mediterana, Održivi pristupi upravljanja poljoprivredno-energetskim sustavima) te na poslijediplomskom doktorskom studiju (Metode vrednovanja nutritivnih karakteristika voća, povrća i prerađevina, Određivanje biološki aktivnih komponenti u poljoprivrednim proizvodima, Tehnološki čimbenici proizvodnje ljekovitog bilja). Bila je mentorica preko 20 diplomskih i završnih radova, stručnih projekata, kao i mentorica stručne prakse na obje razine studija. U cilju nastavnog usavršavanja u 2016. godini pohađala je ciklus radionica naslova „Podizanje kvalitete izvedbe visokoškolske nastave“. Kao autor ili koautor objavila je preko 90 znanstvenih radova, od kojih 37 indeksiranim u a1 časopisima te sudjelovala na 20 međunarodnih znanstvenih skupova. Bila je članica organizacijskog odbora međunarodnog znanstvenog skupa „The 4th International Congress on Green Extraction of Natural Products (GENP2022)“, održanog u Poreču 2022. godine te članica znanstvenog odbora međunarodnog znanstvenog skupa „V Balkan Symposium on Fruit Growing“ održanog u Zagrebu 2023. godine. Na međunarodnom simpoziju agronoma u Dubrovniku 2024. godine bila je voditeljica sekcije „Food, Feed and Quality“. Trenutno je članica Uređivačkog Odbora znanstvenog časopisa *Agriculturae Conspectus Scientificus*. Uz to, bila je gostujući urednik u specijalnom broju časopisa *Plants*, časopisa *Frontiers in Plant Science* i *Frontiers in Nutrition*. Objavila je nekoliko stručnih i popularnih radova, aktivno sudjeluje u aktivnostima vezanim uz promociju Fakulteta, čime kontinuirano pridonosi popularizaciji agronomske struke. Od 2021. članica je Odbora za izbore i napredovanja pri Agronomskom fakultetu kao i Povjerenstva za promociju Fakulteta.

ZAHVALA

SAŽETAK

Sve izraženiji učinci klimatskih promjena između ostalog značajno utječu i na poremećaje u opskrbi hranom, posebice u primarnoj poljoprivrednoj proizvodnji, a zbog čega su sve češći i izraženiji poremećaji koji dovode do smanjene opskrbe tržišta te u konačnici i nesigurnog ekonomskog položaja proizvođača. Upravo zbog navedenog, uzgoj hrane i općenito poljoprivredna proizvodnja u zaštićenim prostorima nude se kao potencijalno rješenje u prevladavanju spomenutih izazova. Sve popularniji segment zaštićenih prostora posebice u urbanim sredinama je vertikalna farma, a koja se ubraja u metode tzv. engl. *zero-acreage farminga (ZFarming)*, odnosno metode urbane poljoprivrede koje karakterizira nekorištenje poljoprivrednog zemljišta ili otvorenih prostora, a koja se učestalije počela koristiti kao izravna posljedica urbanizacije i sve izraženijih klimatskih promjena. Metode *ZFarming-a* očituju se u nekoliko ključnih prednosti u odnosu na konvencionalne poljoprivredne metode, posebice one koje podrazumijevaju uzgoj na polju, a što uključuje značajno smanjenje utjecaja stakleničkih plinova čime se ujedno smanjuje ugljični otisak, potiče se učinkovitije iskorištavanje proizvodnih površina, smanjuje se gubitak usjeva na polju te se lakše ostvaruje cirkularnost sustava u proizvodnji hrane. Osim što se kontinuirano traže nova rješenja uzgoja biljnih vrsta koje podrazumijevaju racionalno i optimizirano korištenje osnovnih prirodnih resursa, zraka, tla i vode, sve više se traže i novi izvori nutritivno vrijedne hrane, a čiji uzgoj ima što manji negativni utjecaj na okoliš uz istovremeno očuvanje zdravlja ljudi i planeta. U navedenu svrhu kao moguće rješenje nudi se uzgoj mladih izdanaka, odnosno biljaka u fazi kotiledona koje karakterizira bogat sadržaj fitokemikalija i bioaktivnih spojeva zbog čega pokazuju brojna biološka i funkcionalna svojstva. Uz sve navedene prednosti uzgoja biljaka *ZFarming* metodama jedan od temeljnih limitirajućih čimbenika takve vrste uzgoja je dostupnost svjetla, kao osnove adekvatnog biljnog rasta i razvoja. Svjetlost kontrolira razvojne procese u biljkama kao što je klijanje, rast i razvoj te cvatnja pri čemu spomenuti odgovori biljnog organizma ovise o intenzitetu svjetlosti i trajanju osvjetljenja. Dopunsko osvjetljenje svjetlećim diodama (LED) pruža se kao učinkovita tehnologija za uzgoj mladih izdanaka u vertikalnim farmama. Svjetleće diode emitiraju valne duljine fotosintetski aktivnog zračenja s velikim tokom fotona i minimalnom količinom oslobođene topline. Kvaliteta zračenja (valna duljina), kvantiteta (intenzitet zračenja) i fotoperiod (trajanje) najvažniji su čimbenici koji utječu na prinos, morfološka svojstva i nutritivni sastav prilikom uzgoja mladih izdanaka. Spomenute čimbenike dopunskog osvjetljenja prilikom uzgoja pojedinih biljnih vrsta potrebno je optimizirati u svrhu postizanja adekvatnih prinosa, ali i nutritivno visoko kvalitetnog biljnog materijala. Cilj ovog doktorskog rada je optimizirati kombinaciju valne duljine dopunskog osvjetljenja i fotoperioda kojom će se postići adekvatan prinos i uzgojiti biljni materijal visokog sadržaja specijaliziranih metabolita mladih izdanaka rotkvice (*Raphanus sativus* (L.) Domin), mungo graha (*Vigna mungo* (L.) Hepper) i cikle (*Beta vulgaris* L. subsp. *vulgaris* var. *conditiva* Alef.). Uzgoj je postavljen metodom vertikalne farme uz dopunsko osvjetljenje LED diodama, prilikom čega su korištene varirane valne duljine svjetlosti od 450 nm, 620 nm i kombinacija istih u omjeru 50:50 i fotoperiodi od 12 i 16 h. Rezultati istraživanja pokazuju značajan utjecaj svih promatranih faktora osvjetljenja na morfološka svojstva, prinos te sadržaj pojedinih specijaliziranih metabolita. Najveći prinos mladih izdanaka svih analiziranih vrsta ostvaren je prilikom uzgoja u fotoperiodu od 12 h bez obzira na kvalitetu zračenja. Od bioaktivnih spojeva, najveći sadržaj askorbinske kiseline ostvaren je prilikom uzgoja u fotoperiodu od 12 h pod kombiniranim osvjetljenjem (50:50), sadržaj ukupnih polifenola u fotoperiodu od 16 h bez obzira na kvalitetu osvjetljenja, sadržaj ukupnih polifenola u fotoperiodu od 12 sati pod crvenim i kombiniranim osvjetljenjem te sadržaj ukupnih karotenoida i antoksidacijski kapacitet pod kombiniranim osvjetljenjem u oba fotoperioda. Može se zaključiti da različite valne duljine dopunskog osvjetljenja i različiti fotoperiodi utječu na prinos i sastav specijaliziranih metabolita mladih izdanaka rotkvice, mungo graha i cikle pri čemu kombinacija fotoperioda od 12 sati i

kombiniranog osvjetljenja (50:50) ima pozitivan utjecaj na najveći dio analiziranih specijaliziranih metabolita. Rezultati ovog istraživanja omogućili su definiranje uvjeta, kvalitetu i fotoperiod dopunskog osvjetljenja svjetlećim diodama, u svrhu uzgoja mladih izdanaka povrtnih vrsta adekvatnog prinosa i visokog sadržaja specijaliziranih metabolita.

Ključne riječi: vertikalna farma, LED osvjetljenje, valne duljine, fotoperiod, mladi izdanci, specijalizirani metaboliti

EXTENDED SUMMARY

Yield and specialized metabolites content of beet, mung bean and radish microgreens grown under supplemental illumination by light emitting diodes

Introduction: Urban agricultural production in greenhouses and vertical farms is a consequence of climate change, which is leading to a reduction in the quality and quantity of harvests and ultimately to economic losses that more and more producers are unable to cope with. In countries that can produce independently and supply the population with food, large quantities of crops are imported. One of the types of crop cultivation is the vertical farm with controlled conditions where additional lighting is required as the only light source. Vertical farms use various supplementary light sources such as high-pressure sodium (HPS) lamps, metal halide (MH) lamps, fluorescent tubes and light emitting diodes (LEDs). Supplementary lighting using LEDs is a new technology for the cultivation of micro vegetables in greenhouses. LEDs emit photosynthetically active wavelengths with a high photon flux density and minimal heat emission. The additional illumination with LEDs has an effect on the nutrient composition, but also on the morphological characteristics of the microgreens of vegetable varieties. The combination of red and blue wavelengths stimulates growth (increases yield) and the synthesis of SM content. Young shoots (microgreens), cotyledons, are the first phenophase in plant development and are rich in phytonutrients and bioactive compounds, which is why they have numerous biological and functional properties. The results of this research would define the conditions, quality and photoperiod, as well as supplementary lighting with light-emitting diodes, to produce microgreens of vegetable species with an adequate yield and a high content of SM.

Material and methods: In the vertical farm of Vesela motika in Zagreb, studies were carried out on the yield and SM content of microgreens under additional LED lighting. In a vertical farm with controlled ecological conditions for growing plants under additional illumination with light-emitting diodes, two-factorial experiments were set up with three replicates comprising three different spectra (red – 620 nm, blue – 450 nm and a combination of red and blue wavelength spectrum in a 50:50 ratio) and two photoperiods (12 and 16 hours). Radish, mung bean and turnip seeds for microgreens (Lokvina, Croatia) were sown in plastic trays with an area of 0.0851 m² previously filled with the substrate TraySubstrate (Klasmann-Deilmann, Germany). Beet seeds in the amount of 235.02 g/m² were pretreated by soaking in water for 24 hours, mung bean seeds in the amount of 1410 g/m² were also pretreated by soaking in water for 12 hours, while 470.04 g of seeds for radish were used without pretreatment. The prepared plates were placed in a vertical cultivation (25 °C, 60 % RH) for germination and covered with empty plates to achieve dark conditions. After germination, the plates were placed in the vertical farm on a shelf with an area of 0.706 m² and illuminated with three different radiation spectra in two photoperiods. The LEDs were placed 31 cm away from the plates. The photoperiods to which the microgreens were exposed were 12 and 16 hours. The effect of the radiation spectrum of the additional illumination with LEDs in two different photoperiods on the yield and SM content of microgreens was monitored. During the study, the growth factors of the microgreens were continuously monitored: temperature (°C), humidity (%) and illumination intensity (photon flux density-PPFD) in vertical cultivation. Microgreens were harvested by cutting at the base of the hypocotyl during the phenophase of cotyledon growth. During harvest, representative samples (approx. 500 g per treatment and species) were taken for yield analysis and chemical analysis of SM: total dry matter content, colour parameters (L*, a*, b*, C* and h°), ascorbic acid content, phenolic compounds content (TPC, TFC, TNFC and TAC), photosynthetic pigments content (Chl_a, Chl_b, TCh, TCa) and antioxidant capacity.

Result and conclusions: According to the results, supplemental lighting with LED has a different impact on yield and SM accumulation in radish, mung bean and beet microgreens in different photoperiods (12 and 16 hours). The highest yield was obtained at different combinations of wavelengths and photoperiods (radish 12P, mung bean 12CP, beet - no difference). Dry matter also accumulated differently for each species (radish 16C, mung bean 12CP, beet 16P). The highest amount of AsA in radish and beet was accumulated in 12CP, in mung bean in 16C. TPC accumulated most at a photoperiod of 16 hours in all three species, but at different monochromatic wavelengths (radish 16P, mung bean 16C, beet 16C). The largest amount of chlorophyll accumulates under different combinations (radish 12C, mung bean 16P, beet 12CP). There is no significant difference in carotenoids in radish, while this is the case for mung bean (16P) and beet (12CP, 16CP). The antioxidant capacity of radish and mung bean is highest under combined wavelengths of both photoperiods, while it is highest in turnip at 12CP and 16P. These results indicate that different SMs accumulate in different microgreens species depending on the wavelength and photoperiod. Previous studies also show the variability of results depending on the selected wavelength and photoperiods. Further research is needed to better understand the wavelength and photoperiod needs of vegetable species to provide optimal yield and SM results as a nutritionally valuable and functional food for daily use. This research shows which combination of wavelength and photoperiod provides the highest yield and SM in radishes, mung beans and beet microgreens. The results contribute to vertical farming systems that use supplemental LED lighting to produce nutritionally superior foods with a rich composition of phytonutrients important for promoting health.

Key words: vertical farm, LED, wavelengths, photoperiod, microgreens, yield, specialized metabolites

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. <i>Hipoteze i ciljevi istraživanja</i>	3
2. PREGLED RELEVANTNE LITERATURE	4
2.1. <i>Povijesni segment upotrebe mladih izdanaka</i>	4
2.2. <i>Gastronomski aspekt korištenja mladih izdanaka</i>	5
2.3. <i>Morfološka svojstva mladih izdanaka</i>	6
2.4. <i>Nutritivna svojstva i zdravstveni aspekt mladih izdanaka</i>	11
2.4.1. <i>Specijalizirani metaboliti mladih izdanaka</i>	12
2.4.2. <i>Antioksidacijski potencijal i zdravstveni aspekt mladih izdanaka</i>	15
2.5. <i>Tehnologija uzgoja mladih izdanaka</i>	17
2.5.1. <i>Metode urbane poljoprivrede za uzgoj mladih izdanaka</i>	18
2.5.2. <i>Primjena dopunskog osvjetljenja u uzgoju mladih izdanaka</i>	21
3. MATERIJALI I METODE	25
3.1. <i>Postavljanje pokusa i uzgoj biljnog materijala</i>	25
3.2. <i>Određivanje abiotičkih čimbenika uzgoja u zaštićenom prostoru</i>	28
3.3. <i>Određivanje prinosa mladih izdanaka</i>	28
3.4. <i>Određivanje sadržaja ukupne suhe tvari mladih izdanaka</i>	28
3.5. <i>Određivanje kromatskih parametara mladih izdanaka</i>	29
3.6. <i>Određivanje sadržaja askorbinske kiseline</i>	29
3.7. <i>Sadržaj ukupnih polifenolnih spojeva mladih izdanaka</i>	30
3.7.1. <i>Određivanje ukupnih antocijana mladih izdanaka</i>	31
3.8. <i>Određivanje sadržaja fotosintetskih pigmenata mladih izdanaka</i>	31
3.9. <i>Određivanje antioksidacijskog kapaciteta mladih izdanaka</i>	32
3.10. <i>Statistička analiza</i>	33
4. ABIOTSKI ČIMBENICI ZAŠTIĆENOG PROSTORA	34
5. REZULTATI	36
5.1. <i>Ukupan prinos svježeg biljnog materijala</i>	36
5.2. <i>Ukupna suha tvar</i>	38
5.3. <i>Kromatski parametri analiziranih vrsta mladih izdanaka</i>	39
5.4. <i>Specijalizirani metaboliti mladih izdanaka</i>	44
5.5. <i>Fotosintetski pigmenti mladih izdanaka</i>	49
5.6. <i>Antioksidacijski kapacitet mladih izdanaka</i>	54
6. RASPRAVA	57
6.1. <i>Prinos mladih izdanaka</i>	57

6.2.	<i>Sadržaj suhe tvari mladih izdanaka.....</i>	58
6.3.	<i>Kromatski parametri mladih izdanaka.....</i>	60
6.4.	<i>Sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka.....</i>	62
6.5.	<i>Fotosintetski pigmenti mladih izdanaka.....</i>	66
6.6.	<i>Antioksidacijski kapacitet mladih izdanaka.....</i>	69
7.	ZAKLJUČCI.....	71
8.	POPIS LITERATURE.....	73
9.	ŽIVOTOPIS.....	85

3cc

Popis kratica

a*	Zeleno-crvena komponenta
AK	Askorbinska kiselina
b*	Plavo-žuta komponenta
C	Crvena svjetlost
C*	Kroma
CP	Crveno-plava svjetlost
GAE	Ekvivalent galne kiseline (engl. <i>Gallic acid equivalent</i>)
HPS	Visokotlačne natrijeve žarulje (engl. <i>High Pressure Sodium Bulbs</i>)
h°	Nijansa
Kl_a	Klorofil a
Kl_b	Klorofil b
LED	Svjetlosno emitirajuće diode (engl. <i>Light Emitting Diodes</i>)
L*	Svjetlina
MH	Metal halidne žarulje (engl. <i>Metal Halide Bulbs</i>)
P	Plava svjetlost
PAR	Fotosintetski aktivno zračenje (engl. <i>Photosynthetically Active Radiation</i>)
PPF	Fotosintetski tok fotona (engl. <i>Photosynthetic Photon Flux</i>)
PPFD	Gustoća fotosintetskog toka fotona po jedinici površine (engl. <i>Photosynthetic Photon Flux Density</i>)
SM	Specijalizirani metaboliti
ST	Suha tvar
sv.t.	Svježa tvar
TE	Ekvivalent Troloxa T (engl. <i>Trolox Equivalent</i>)
UF	Ukupni sadržaj polifenola
UFL	Ukupni sadržaj flavonoida
UNFL	Ukupni sadržaj neflavonoida
UA	Ukupni antocijani
UKa	Ukupni karotenoidi
UKI	Ukupni klorofili

Popis tablica:

Tablica 1. Vrste najčešće uzgajanih biljnih porodica mladih izdanaka prema Renna i sur. (2016), Kyriacou i sur. (2016) i Bhaswant i sur. (2023)

Tablica 2. Testirani tretmani u vertikalnom uzgoju mladih izdanaka

Tablica 3. Specifikacije LED dioda tvrtke SANSOL korištenih u pokusu

Tablica 4. Izračun gustoće fotosintetskog toka fotona po jedinici površine u vertikalnoj farmi

Tablica 5. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na ukupan prinos biomase mladih izdanaka

Tablica 6. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj ST mladih izdanaka

Tablica 7. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj kromatskih parametara mladih izdanaka rotkvice

Tablica 8. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj kromatskih parametara mladih izdanaka mungo graha

Tablica 9. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj kromatskih parametara mladih izdanaka cikla

Tablica 10. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka rotkvice

Tablica 11. Sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka rotkvice

Tablica 12. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka mungo graha

Tablica 13. Sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka mungo graha

Tablica 14. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka cikla

Tablica 15. Sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka cikla

Tablica 16. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj pigmentnih spojeva mladih izdanaka rotkvice

Tablica 17. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj pigmentnih spojeva mladih izdanaka mungo graha

Tablica 18. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj pigmentnih spojeva mladih izdanaka cikle

Tablica 19. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na antioksidacijski kapacitet mladih izdanaka

Popis slika:

Slika 1. Habitus mladog izdanka suncokreta

Slika 2. Mladi izdanci: a) suncokreta, b) cikle, c) mungo graha, d) rotkvice, e) pšenice, f) komorača

Slika 3. Primjer fenofaza razvoja rotkvice: a) klijanac, b) mladi izdanak, c) „*baby leaf*“

Slika 4. Zdravstveni aspekti mladih izdanaka

Slika 5. Primjer pakiranja mladih izdanaka

Slika 6. Uzgoj mladih izdanaka u vertikalnoj farmi

Popis grafikona:

Grafikon 1. Abitoski čimbenici (temperatura i RVZ) u vertikalnoj farmi tijekom uzgoja mladih izdanaka

Grafikon 2. Usporedbe prinosa biomase mladih izdanaka cikle, mungo graha i rotkvice uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Grafikon 3. Usporedbe sadržaja ST biomase mladih izdanaka cikle, mungo graha i rotkvice uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Grafikon 4. Usporedbe kromatskih parametara biomase mladih izdanaka rotkvice uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Grafikon 5. Usporedbe kromatskih parametara biomase mladih izdanaka mungo graha uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Grafikon 6. Usporedbe kromatskih parametara biomase mladih izdanaka cikla uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Grafikon 7. Usporedbe sadržaja fotosintetskih pigmenata biomase mladih izdanaka rotkvice uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Grafikon 8. Usporedbe sadržaja fotosintetskih pigmenata biomase mladih izdanaka mungo graha uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Grafikon 9. Usporedbe sadržaja fotosintetskih pigmenata biomase mladih izdanaka cikla uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Grafikon 10. Usporedbe antioksidacijskog kapaciteta biomase mladih izdanaka cikla, mungo graha i rotkvice uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

1. UVOD

Ključne čimbenike koje je potrebno optimizirati i prilagoditi svakoj biljnoj vrsti prilikom uzgoja u zaštićenim prostorima, a u svrhu adekvatnog rasta i razvoja te poticanja fizioloških procesa u biljnim stanicama su: temperatura, vlaga i svjetlost. Svjetlost je jedan od limitirajućih faktora za uzgoj, posebice u zaštićenim prostorima, a koji utječe na brojne procese biljnog organizma, od klijanja, rasta, morfoloških promjena, gibanja, cvatnje do sinteze i akumulacije fitokemikalija (Vaštakaite i sur., 2015; Lobiuc i sur., 2017). Učinci svjetlosti na rast i razvoj biljaka su složeni i selektivni, a prvenstveno ovise o svjetlosnom spektru koji biljka apsorbira i to primarno kvaliteti svjetlosnog zračenja (valnoj duljini), kvantiteti zračenja (intenzitetu zračenja) i fotoperiodu (trajanju). Spomenuti svjetlosni čimbenici izravno utječu na morfološka svojstva, dinamiku rasta i prinos, ali i na niz promjena metaboličkih funkcija vezanih uz kemijski, odnosno nutritivni sastav biljke. Biljke svojim fotoreceptorima, primarno, fitokromima i kriptokromima, asporbiraju fotosintetski aktivno zračenje (engl. *Photosynthetically Active Radiation*, PAR) koje uključuje valne duljine u rasponu od 400 – 800 nm (Pevalek-Kozlina, 2003). Biljke kao odgovor na podražaje pa tako i svjetlost, reagiraju poticanjem mehanizama koji utječu na aktiviranje primarnog, ali i sekundarnog metabolizma (Lobiuc i sur., 2017). Taj se učinak najviše postiže na mladim biljkama, odnosno u početnim fenofazama rasta (do prva dva lista), a koje se u spomenutim razvojnim fazama trebaju brzo prilagoditi promjenjivim čimbenicima okoliša kako bi osigurale svoje preživljavanje. Svjetlost može pozitivno utjecati na sintezu različitih specijaliziranih metabolita biljke, poput askorbinske kiseline, polifenolnih spojeva, fotosintetskih pigmenata te ostalih fitokemikalija, a prilikom čega su ključna svojstva koja ju opisuju (valna duljina, intenzitet i trajanje osvjetljenja) osnova utjecaja na pojedine mehanizme u biljkama, a time i na sintezu i akumulaciju fitonutrijenata (Mlinarić i sur., 2020). Upravo zbog toga, posebice u zaštićenim prostorima s limitiranom dostupnosti prirodnog svjetla, ključan je odabir i optimizacija svjetlosnog zračenja u ostvarivanju adekvatnih prinosa i visoke nutritivne kvalitete sirovine.

Za dopunsko osvjetljenje u zaštićenim prostorima još uvijek se uglavnom koriste visokotlačne natrijeve žarulje (engl. *High Pressure Sodium*, HPS), metalhalogene (engl. *Metal Halide*, MH) žarulje, ksenonske i fluorescentne žarulje (Mitchell i sur., 2012) koje zbog energetske neučinkovitosti i nedostatne kontrole emisije ultraljubičastog i infracrvenog zračenja nisu optimalne za primjenu u uzgoju u zaštićenim prostorima, posebice vertikalnim farmama (Kaiser i sur., 2019; Jones-

Baumgradt i sur., 2020). Zbog brojnih nedostataka koje pokazuju, postojeće žarulje za dopunsko osvjetljenje u zaštićenim prostorima sve više se počinje zamjenjivati svjetlećim diodama (engl. *Light Emitting Diodes*, LED) koje pokazuju niz prednosti, od visoke energetske učinkovitosti i trajnosti (Zhang i sur., 2019, Ma i sur., 2021) do niza ostalih tehničkih prednosti kao što su niže toplinsko zračenje, manji utrošak električne energije, otpornost na povišeni udio relativne vlage zraka u zaštićenom prostoru i druge (Margit i Viršile, 2013; Turner i sur., 2020). Valna duljina, intenzitet zračenja i fotoperiod svjetlećih dioda najvažniji su čimbenici koje je potrebno optimizirati prilikom uzgoja u zaštićenim prostorima (Negri i sur., 2021), a kako bi se ostvarile optimalne morfološke i kemijske specifičnosti proizvoda (biljnog materijala). Prema Harakort i sur. (2019) kombinacija plavog (400-500 nm) i crvenog (600-700 nm) LED dopunskog osvjetljenja potiče rast biljke, povećava prinos, ali i sintezu bioaktivnih spojeva, u odnosu na bijelo fluorescentno (> 400 nm) ili solarno svjetlo.

Razine fitokemikalija značajno se razlikuju ovisno o fenofazama rasta biljke, prilikom čega se njihov sadržaj smanjuje starenjem biljke, od stadija klice do potpuno razvijene biljke (Ebert i sur., 2015). Jedna od biljnih fenofaza su i mladi izdanci (engl. *microgreens*) koji predstavljaju nepotpuno razvijene biljke koje se konzumiraju u fazi kotiledona s ili bez prvih pravih listova (Di Gioia i Santamaria, 2015; Opačić i sur., 2020). Mladi izdanci koji se često koriste u konzumaciji razvijaju se iz sjemena povrća, ljekovitog i aromatičnog bilja i žitarica brojnih biljnih porodica (Kyriacou i sur., 2016), a ubiru se od 7. do 14. dana nakon klijanja, ovisno o biljnoj vrsti (Xiao i sur., 2015; Turner i sur., 2020). Mladi izdanci lisnatih povrtnih vrsta specifični su po visokom sadržaju brojnih fitokemikalija (Samuolienė i sur., 2012; Bulgari i sur., 2017; Kamal i sur., 2020), a zbog čega sve veću popularnost imaju kod potrošača. Istraživanja su pokazala kako su mladi izdanci izuzetno bogat izvor različitih skupina fitokemikalija, od β -karotena, α -tokoferola, filokinona, vitamina C, polifenolnih spojeva, minerala (Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Se, Mo) i ostalih biološki aktivnih spojeva visokog antioksidacijskog potencijala (Xiao i sur., 2016; Opačić i sur., 2018; Mohanty i sur., 2020; Zhang i sur., 2021; Bhaswant i sur., 2023; Fabek Uher i sur., 2023). Također, valja naglasiti kako u istoj fenofazi biljka nakuplja i niži sadržaj nitrata u usporedbi sa starijom biljkom što je također važno iz zdravstvenog aspekta, posebice za vrste zelenog lisnatog povrća sklonih akumulaciji nitrata (Oh i sur., 2010; Xiao i sur., 2012; Pinto i sur., 2015). Mladi izdanci su specifični i traženi za uzgoj upravo zbog jednostavnog i kratkog ciklusa uzgoja (Ebert i sur., 2012), adekvatne klijavosti i intenzivnog rasta (Kyriacou, 2016), a njihov uzgoj uspješan je na otvorenom i u zaštićenim prostorima prilikom čega ne traže značajne količine resursa (Brazaitytė i sur., 2015). Upravo zbog jednostavnog i učinkovitog uzgoja u zaštićenim prostorima, poput vertikalnih farmi, a koje prije svega ne

zahtijevaju velike površine za uzgoj, mladi izdanci mogu se pouzdano i uspješno proizvesti u urbanim sredinama gdje je dostupno zemljište glavni ograničavajući faktor (van Iersel i sur., 2017). Također, još jedna značajna prednost njihova uzgoja je da se s obzirom na kratki ciklus rasta mogu uzgajati i bez supstrata, gnojiva i sredstava za zaštitu bilja. Mladi izdanci se konzumiraju svježi, stoga nema gubitaka vrijednih fitokemikalija (Opačić i sur., 2018), a zbog čega predstavljaju nutritivno visoko kvalitetnu namirnicu.

1.1. Hipoteze i ciljevi istraživanja

Hipoteze istraživanja:

1. Kvaliteta svjetlosti (valna duljina) dopunskog osvjetljenja svjetlećim diodama utječe na prinos i sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka povrtnih vrsta.
2. Duljina trajanja fotoperioda utječe na prinos i nutritivni sastav mladih izdanaka povrtnih vrsta.

Ciljevi istraživanja:

1. Testirati utjecaj valne duljine i intenziteta zračenja dopunskog osvjetljenja svjetlećim diodama na prinos i akumulaciju specijaliziranih metabolita u mladim izdancima povrtnih vrsta.
2. Testirati utjecaj trajanja fotoperioda na prinos i nutritivni sastav mladih izdanaka povrtnih vrsta tijekom uzgoja uz primjenu dopunskog osvjetljenja svjetlećim diodama.

2. PREGLED RELEVANTNE LITERATURE

2.1. Povijesni segment upotrebe mladih izdanaka

Povijest upotrebe mladih izdanaka datira iz 1930.-ih godina kada se pšenica (*Triticum aestivum* L.) uzgajala, sušila i prodavala kao lijek u državama SAD-a. Šezdesetih godina prošlog stoljeća rotkvica (*Raphanus sativus* (L.) Domin), suncokret (*Helianthus annuus* L.) i heljda (*Fagopyrum esculentum*, Moench) vrste su koje su se počele intenzivnije uzgajati za konzumaciju u ranijim fenofazama (Thakur i sur., 2022). Mladi izdanci (engl. *microgreens*) prvi puta se pojavljuju početkom osamdesetih godina 20. stoljeća na jelovnicima restorana u San Franciscu s vrlo malim brojem vrsta u ponudi (Kyriacou i sur., 2016; Renna i sur., 2016; Opačić i sur., 2018; Cerjak i sur., 2019; Ebert, 2022; Chaudhari i sur., 2023). Nastavljaju se aktivno uzgajati u južnoj Kaliforniji, nakon čega zanimanje za njih raste krajem 90.-ih godina prošlog stoljeća, kada ih koriste samo visoko specijalizirani restorani. Upotreba naziva '*microgreens*' službeno počinje 1998. godine u SAD-u (Thakur i sur., 2022). S vremenom se povećala ponuda vrsta te se potražnja proširila prema istoku SAD-a. Novi rast popularnosti stječu 2006. godine kada se uvode u visoku francusku kuhinju (fr. *haute cuisine*) (Kaiser i Ernst, 2018; Cerjak i sur., 2019). U početku je upotreba započela u restoranima kao jestiva dekoracija, a zatim se proširila upotrebom za pripremu različitih jela poput salata, juha, sendviča i kao dodatka drugim jelima (Xiao i sur., 2012; Turner i sur., 2020; Ebert, 2022; Sharma i sur., 2022; Bhaswant i sur., 2023).

Mladi izdanci se danas, osim kao svježa namirnica, koriste i za pripremu *smoothie* sokova, ali i često kao pulveri, odnosno dodaci prehrani u obliku praha kao oblik funkcionalnog dodatka prehrani za potporu imunosnog sustava i u prevenciji brojnih stanja i oboljenja (Ebert i sur., 2015; Xiao i sur. 2015; Zhang i sur., 2021; Bhaswant i sur., 2023; Chaudhari i sur., 2023). Karakterizira ih niz boja, izgleda i tekstura, a posebice su zanimljivi za širu upotrebu zbog izražene nutritivne vrijednosti i intenzivnog okusa (Opačić i sur., 2018; Zhang i sur., 2020; Ying i sur, 2020; Negri i sur., 2021; Chaudhari i sur., 2023). Restorani su i danas najveći konzumenti mladih izdanaka, no sve više se potražnja, a time i prodaja širi na specijalizirane trgovine zdrave prehrane i tržnice. Korištenje mladih izdanaka u prehrani je sve popularnije, a često ih se karakterizira kao hrana budućnosti zbog male težine biomase, brzog i relativno nezahtjevnog uzgoja te najvažnije, visoke nutritivne vrijednosti (Mlinarić i sur., 2020; Ying i sur, 2020; Negri i sur., 2021; Ebert, 2022). Mladi izdanci doprinose povećanju raznolikosti i nutritivne vrijednosti obroka, a pogodna su hrana i za skupine

posebnih obrazaca prehrane poput vegana i vegetarijanaca te konzumenata sirove hrane (engl. *raw food diet*) (Cerjak i sur., 2019; Bhaswant i sur., 2023).

2.2. *Gastronomski aspekt korištenja mladih izdanaka*

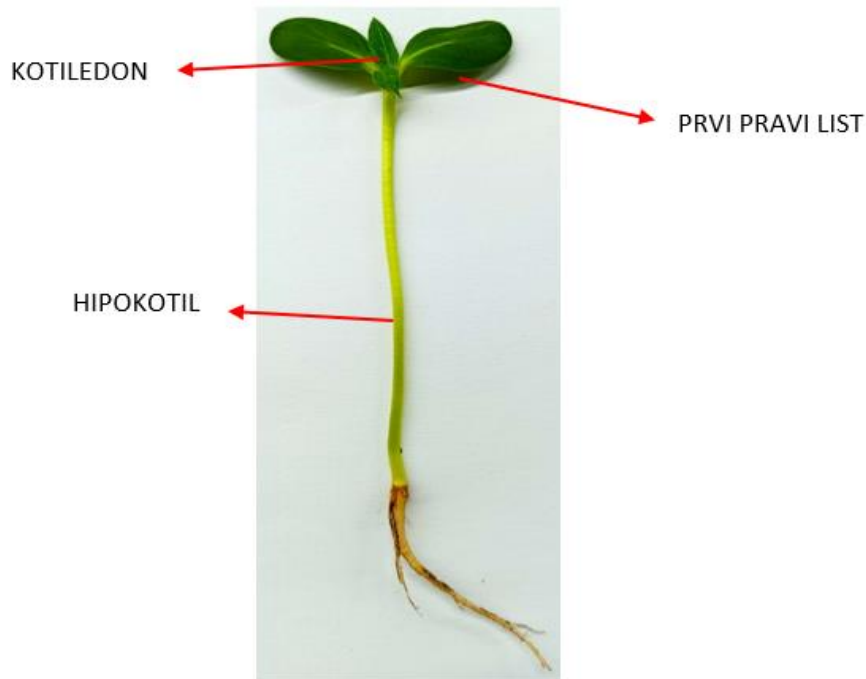
Iz gastronomskog aspekta mladi izdanci predstavljaju posebnu zanimljivost zbog mogućnosti korištenja kotiledona i prvih pravih listova raznih biljnih vrsta različitih boja, tekstura i okusa (Ebert, 2022; Bhaswant i sur., 2023; Chaudhari i sur., 2023). U prehrani se uz kotiledone i prve prave listove koristi i hipokotil (Ebert, 2022). Kao što je već spomenuto, u početku su se koristili kao ukrasni dodaci jelima, nakon čega se sve više upotrebljavaju u prehrani kao dio obroka, pa sve do dodataka prehrani u svrhu promocije zdravlja (Thakur i sur., 2022; Chaudhari i sur., 2023). Upotreba mladih izdanaka se sve više povećava u gastronomskim trendovima (Chaudhari i sur., 2023), a izbor vrsta se temelji na međudjelovanju proizvođača s kuharima i upoznavanju korisnika s novom vrstom prehrambenog proizvoda. Kotiledone i prve prave listove mladih izdanaka karakterizira niz boja (zelena, žuta, crvena, ljubičasta), okusa (blago, neutralno, slatko, kiselo, ljuto) i tekstura (nježna, hrskava, sočna) (Renna i sur., 2016; Bhaswant i sur., 2023). Od okusa se razlikuju neutralni (npr. špinat, *Spinacia oleracea*, L.), blago kiselkasti (npr. cikla, *Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* var. *conditiva* Alef.) i ljuti (npr. potočarka, *Nasturtium officinale*; rotkvica (*Raphanus sativus* (L.) Domin), rikola (*Eruca vesicaria* (L.) Cav.)), dok su mladi izdanci tikvenjača (Cucurbitaceae) često gorki. Biljne vrste koje u tehnološkoj zrelosti nisu jestive, poput žitarica (Poaceae), mahunarki (Fabaceae), suncokreta (*Helianthus annuus* L.), lana (*Linum usitatissimum* L.) mogu se konzumirati u fazi mladih izdanaka te predstavljaju novi okus potrošačima. Miris može biti intenzivan kao i kod većine aromatičnih vrsta, ali i jedva primjetan kao kod pojedinih povrtnih vrsta. Ovisno o tekstrui razlikuju se biljne vrste koje su sočne (povećanog sadržaja vode) poput komorača (*Foeniculum vulgare* Mill), cikle (*Beta vulgaris* L. subsp. *vulgaris* var. *conditiva* Alef.), suncokreta (*Helianthus annuus* L.), hrskave poput celera (*Apium graveolens*, L.) i jednake teksture kao u tehnološkoj zrelosti poput kupusnjača (Brassicaceae) (Di Gioia i sur., 2015). Ovisno o boji razlikuju se zeleni, žuti, crveni i grimizni mladi izdanci te kombinacija istih boja (Renna i sur., 2016).

2.3. Morfološka svojstva mladih izdanaka

Prva fenofaza razvoja biljaka koja se može koristiti u prehrani su klijanci, odnosno fenofaza nakon klijanja sjemena prije razvoja prvih pravih listova, a konzumiraju se cijeli kao takvi, uključujući i sjeme. U fenofazi klijanaca najčešće se konzumiraju mahunarke poput graška (*Pisum sativum*, L.), graha (*Phaseolus vulgaris*, L.) i biljne vrste iz porodice kupusnjača: rotkvica (*Raphanus sativus* (L.) Domin), brokula (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Plenck), pak choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis* (L.) Hanelt) te heljda (*Fagopyrum esculentum*) (Mlinarić i sur., 2020; Zhang i sur., 2020). Klijanci se uzgajaju bez prisustva svjetla, u uvjetima visoke vlažnosti zraka, bez dodataka hraniva i dodatnog navodnjavanja tijekom razvojnog ciklusa.

Konzumiraju se i kotiledoni koji još uvijek ne predstavljaju mladu biljku s razvijenim prvim prvim listovima. Njihov razvojni ciklus traje 3-5 dana nakon klijanja sjemena. Konzumiraju se sirovi, a obiluju vlaknima i fitokemikalijama. Tehnologija uzgoja klijanaca podrazumijeva namakanje sjemena u vodi bez dodataka nutrijenata na različitim temperaturama ovisno o biljnoj vrsti. Namakanjem se povećava vlažnost sjemena što će potaknuti njihovo klijanje. Upravo zbog mračnih i vlažnih uvjeta uzgoja potrebno je naglasiti kako se tijekom uzgoja klijanaca mogu razviti i različiti mikroorganizmi (uključujući patogene), a zbog čega posebnu pozornost treba obratiti održavanju sanitarnih i higijenskih uvjeta tijekom uzgoja (Thakur i sur., 2022).

Sljedeća biljna fenofaza su mladi izdanci (slika 1), odnosno nepotpuno razvijene mlade biljke koje se konzumiraju u fenofazi kotiledona s ili bez prvog para pravih listova (Opačić i sur., 2018; Zhang i sur., 2020; Ying i sur., 2020; Negri i sur., 2021; Ebert, 2022). U svojoj građi imaju središnju stabljiku (hipokotil) s dva razvijena lista (kotiledona) i većina ima jedan par prvih pravih listova (Ebert i sur., 2022).



Slika 1. Habitus mladog izdanka suncokreta

Hipokotil je izdužena stabljika dužine do 8 cm (Chaudhari i sur., 2023; Bhaswant i sur., 2023), koja ovisno o vrsti može biti tanja (npr. kod brokule) ili deblja (npr. kod suncokreta). Boja hipokotila također varira ovisno o vrsti, od svijetlozelenih, tamnozelenih, žutih, ružičastih pa sve do crvenih nijansi. Kotiledoni su listovi srcolikog ili izduženog oblika veličine do 3 cm, najčešće zelene boje (rotkvica, gorušica brokula) do crvenih nijansi (cikla), a čija boja ovisno o vrsti s razvojem biljke postaje sve intenzivnija. Primjerice, kotiledone mladih izdanaka cikle u početku karakterizira tamnocrvena boja koja s vremenom postaje intenzivnija (boja fuksije), a zatim ružičasta. Nadalje, mlade izdanke na primjer graška karakterizira cilindrična stabljika s listovima bez peteljke, smještenih jedan nasuprot drugoga te zelena boja cijelog habitusa (Renna i sur., 2016). Primjeri raznolikosti boja i oblika hipokotila i kotiledona mladih izdanaka prikazani su na slici 2.



Slika 2. Mladi izdanci: a) suncokreta, b) cikle, c) mungo graha, d) rotkvice, e) pšenice, f) komorača

Mladi izdanci razvijaju se iz sjemena različitih vrsta povrća, ljekovitog i aromatičnog bilja, žitarica i samoniklog bilja, a prilikom čega se za potrebe prehrane najčešće uzgajaju vrste biljnih porodica prikazanih u Tablici 1.

Tablica 1. Vrste najčešće uzgajanih biljnih porodica mladih izdanaka prema Kyriacou i sur. (2016), Renna i sur. (2016), i Bhaswant i sur. (2023).

Porodica	Vrsta
Amaranthaceae	amarant (<i>Amaranthus caudatus</i> L.)
	kvinoja (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.)
	heljda (<i>Fagopyrum esculentum</i> Moench)
Alliaceae	češnjak (<i>Allium sativum</i> L., 1758)
	luk (<i>Allium cepa</i> , L.)
	poriluk (<i>Allium ampeloprasum</i> ssp. <i>porum</i> L.)
Apiaceae	kopar (<i>Anethum graveolens</i> L.)
	krasuljica (<i>Anthriscus cerefolium</i> L. Hoffm.)
	peršin (<i>Petroselinum crispum</i>)

	<p>mrkva (<i>Daucus carota</i> L.) komorač (<i>Foeniculum vulgare</i> Mill.) celer (<i>Apium graveolens</i> L.) kumin (<i>Cuminum cyminum</i> L.) korijander (<i>Coriandrum sativum</i> L.)</p>
Asteraceae	<p>endivija (<i>Cicorium endivia</i> L.) cikorija (<i>Cichorium intybus</i> L.) radič (<i>Cichorium intybus</i> var. <i>foliosum</i> L.) suncokret (<i>Helianthus annuus</i> L.)</p>
Boraginaceae	<p>facelija (<i>Phacelia tanacetifolia</i> Juss.)</p>
Brassicaceae	<p>cvjetača (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>botrytis</i> L.) brokula (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i> Plenck) kupus (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> (L.) Duchesne) kineski kupus (<i>Brassica rapa</i> subsp. <i>chinensis</i> (L.) Hanelt) kelj (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>sabauda</i> L.) postrna repa (<i>Brassica rapa</i> var. <i>rapa</i> L.) potočarka (<i>Nasturtium officinale</i> W.T. Aiton) rotkvica (<i>Raphanus sativus</i> (L.) Domin) rikola (<i>Eruca vesicaria</i> (L.) Cav.) gorušica (<i>Sinapis alba</i> L.) tatsoi salata (<i>Brassica rapa</i> var. <i>rosularis</i>)</p>
Chenopodiaceae	<p>blitva (<i>Beta vulgaris</i> ssp. <i>vulgaris</i> L.) cikla (<i>Beta vulgaris</i> L. subsp. <i>vulgaris</i> var. <i>conditiva</i> Alef.) špinat (<i>Spinacia oleracea</i> L.)</p>
Convolvulaceae	<p>vodeni špinat (<i>Ipomoea aquatica</i> L.)</p>
Cucurbitaceae	<p>dinja (<i>Cucumis melo</i> L.) krastavac (<i>Cucumis sativus</i> L.) tikva (<i>Cucurbita pepo</i> L.)</p>
Fabaceae	<p>slanutak (<i>Cicer arietinum</i> L.) lucerna (<i>Medicago sativa</i> L.) grah (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) piskavica (<i>Trigonella foenum-graecum</i> L.) bob (<i>Vicia faba</i> L.) leća (<i>Lens culinaris</i> Medikus) grašak (<i>Pisum sativum</i> L.)</p>

	djetelina (<i>Trifolium pratense</i> Tourn. ex L.)
Lamiaceae	chia (<i>Salvia hispanica</i> L.) bosiljak (<i>Ocimum basilicum</i> L.)
Linaceae	lan (<i>Linum usitatissimum</i> L.)
Malvaceae	juteni sljez (<i>Corchorus olitorius</i> L.)
Onagraceae	dvogodišnja pupoljka (<i>Oenothera biennis</i> L.)
Poaceae	kukuruz (<i>Zea mays</i> L.) limunska trava (<i>Cymbopogon nardus</i> Spreng.) zob (<i>Avena sativa</i> L.) pšenica (<i>Triticum aestivum</i> L.) ječam (<i>Hordeum vulgare</i> L.) riža (<i>Oryza sativa</i> L., 1753)
Portulacaceae	povrtni tušanj (<i>Portulaca oleracea</i> L.)

Biljke fazu kotiledona dostižu u vrlo kratkom periodu nakon klijanja pa se berba mladih izdanaka najčešće, ovisno o biljnoj vrsti, provodi od 7. do 14. dana nakon klijanja (Xiao i sur., 2015; Turner i sur., 2020; Bhaswant i sur., 2023; Chaudhari i sur., 2023). Mladi izdanci mogu se uzgajati u zaštićenim prostorima (staklenici, plastenici, vertikalne farme, komore za rast biljaka) te na otvorenome u tlu ili supstratu uz prisutnost što veće količine svjetlosti (Choe i sur., 2018). Za razliku od klijanaca, konzumira se cijeli nadzemni dio bez korijena, a na tržištu su dostupni i kao žive sadnice (Renna i sur., 2016). Ovakvi uvjeti uzgoja mladih izdanaka produciraju biljni materijal koji je znatno manje podložan razvoju patogenih mikroorganizama (Thakur i sur., 2022).

Fenofaza biljnog razvoja koja slijedi nakon mladih izdanaka je tzv. „baby leaf“ faza. Za razliku od mladih izdanaka, „baby leaf“ fenofaza podrazumijeva prve prave listove i na tržištu su dostupni isključivo kao rezano povrće (Renna i sur., 2016). „Baby leaf“ povrće se uzgaja iz sjemena različitih biljnih porodica povrtnih vrsta. Prilikom uzgoja zahtijevaju svjetlost, medij za rast i dodatak nutrijenata. Razvojni ciklus traje dulje od razvojnog ciklusa mladih izdanaka, od 20 do 40 dana. Na slici 3 prikazane su opisane fenofaze razvoja, klijanci, mladi izdanci i „baby leaf“ na primjeru rotkvice (*Raphanus sativus* (L.) Domin).



Slika 3. Primjer fenofaza razvoja rotkvice: a) klijanac

(<https://www.hometownseeds.com/products/radish-daikon-organic-sprouting-seeds>;

pristup: 15.05.2004.), b) mladi izdanak, c) „baby leaf“

(<https://eu.clickandgrow.com/products/grow-leaf-radish-indoors>; pristup: 15.05.2004.)

2.4. Nutritivna svojstva i zdravstveni aspekt mladih izdanaka

Interes potrošača za mladim izdancima sve je veći i zbog specifičnog nutritivnog sastava, odnosno značajno visokog sadržaja brojnih fitokemikalija izraženog antioksidacijskog potencijala (Bulgari i sur., 2017; Opačić i sur., 2020; Negri i sur., 2021; Shibaeva i sur., 2022; Partap i sur., 2023). Mladi izdanci bogat su izvor polifenolnih spojeva posebice flavonoida poput antocijana i izoflavona, vitamina kao što su retinol (vitamin A), tokoferol (vitamin E), a posebice askorbinske kiseline (vitamina C) i filokinona (vitamina K1), zatim mineralnih tvari (Ca, K, N, P, S, Mg, Fe, Mn, Zn, Se, Mo), glukozinolata, proteina, klorofila i karotenoida (β - karotena, α -tokoferola) (Pinto i sur. 2015; Mlinarić i sur., 2020; Zhang i sur., 2020; Zhang i sur., 2021; Shibaeva i sur., 2022; Thakur i sur., 2022; Bhaswant i sur., 2023; Chaudhari i sur., 2023; Partap i sur., 2023). Tijekom klijanja mladih izdanaka odvija se niz fizioloških i biokemijskih procesa: 1) klijanje sjemena, izduživanje hipokotila i korijena, širenje kotiledona; 2) smanjuje se sadržaj antinutritivnih čimbenika kao što su inhibitori tripsina i amilaze, fitohemaglutini, saponini, oligosaharidi, izoflavonoidi, cinogenetski glikozidi, alkaloidi, toksične aminokiseline, antivitaminski faktori; 3) makromolekule (poput polisaharida i masti) se razgrađuju na manje molekule što povećava njihovu probavljivost i 4) sadržaj bioaktivnih spojeva (fitokemikalija) se povećava čime se povećava i antioksidacijski kapacitet takve sirovine (Zhang i sur., 2020).

Valja naglasiti kako je sadržaj bioaktivnih spojeva u mladim izdancima značajno viši nego u biljkama u tehnološkoj zrelosti (Kyriacou i sur., 2016; Zhang i sur., 2020; Thakur i sur., 2022; Bhaswant i sur., 2023; Chaudhari i sur., 2023). Tako na primjer Weber (2017) naglašava kako konzumacija 53 g mladih izdanaka brokule (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) u svježem stanju osigurava istu količinu minerala kao 91 g tehnološki zrelog cvata brokule. Partap i sur., (2023) utvrđuju šest puta veću količinu askorbinske kiseline u mladim izdancima crvenog kupusa (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra* L.) i amaranta (*Amaranthus caudatus* L.) u usporedbi s istim vrstama u tehnološkoj zrelosti. Isti autori navode kako mladi izdanci korijandera (*Coriandrum sativum* L.), rotkvice (*Raphanus sativus*, (L.) Domin) i kres salate (*Lepidium sativum* L.) imaju viši sadržaj tokoferola u odnosu na iste biljke u tehnološkoj zrelosti te viši sadržaj karotenoida u mladim izdancima crvenog kupusa kupus (*Brassica oleracea* var. *capitata* (L.) Duchesne), brokule (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck), cvjetače (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.), pšenice (*Triticum aestivum* L.) i ječma (*Hordeum vulgare* L.) nego u tehnološki zrelim biljkama. Još jedna nutritivna prednost konzumacije mladih izdanaka ogleda se u činjenici kako biljke u početnim fenofazama rasta i razvoja nakupljaju manje nitrata u usporedbi sa starijom biljkom, odnosno kasnijim fenofazama razvoja (Oh i sur., 2010; Xiao i sur., 2012; Pinto i sur., 2015; Thakur i sur., 2022). Naime, nitrati nisu primarno toksični za ljudski organizam, no ukoliko se unose u prekomjernim količinama njihovi metaboliti koji se oslobađaju tijekom digestije mogu uzrokovati poremećaje, a neposredno dovesti i do pojave nakupljanja potencijalno kancerogenih spojeva (Ebert i sur., 2015). U narednim poglavljima bit će detaljnije opisani specifični specijalizirani metaboliti mladih izdanaka.

2.4.1. Specijalizirani metaboliti mladih izdanaka

Specijalizirani metaboliti (SM), odnosno bioaktivni spojevi predstavljaju različite kategorije fitokemikalija, biljnih nutrijenata koji ispoljavaju brojna biološka i funkcionalna svojstva važna za zdravlje ljudskog organizma (Wu i sur., 2023). Ovi spojevi prije svega se očituju značajnim antioksidacijskih potencijalom, a zbog čega i pokazuju brojne benefite posebice u inhibiciji različitih vrsta oboljenja. Sinteza i akumulacija SM u biljnom organizmu tijekom rasta i razvoja biljaka pod snažnim je utjecajem biotskih (štetnih organizama), abiotičkih (temperature, količine i intenziteta oborina, spektra, intenzitete i trajanja svjetlosti) i antropogenih čimbenika (gnojidba, tehnologija uzgoja i dr.) (Biesiada i Tomczak, 2012; Francini i sur., 2020; Samynathan i sur., 2021). Polifenolni spojevi jedni su od najvažnijih predstavnika skupine specijaliziranih metabolita, sastavni su dio sekundarnog metabolizma biljaka, a između ostalog

biljkama daju specifičnu boju, okus i aromu. U mladim izdancima najčešći polifenolni spojevi su izoflavoni, antocijani, rutini i kvercetini (Zhang i sur., 2020; Bhaswant i sur., 2023). Prema Partap i sur. (2023) mladi izdanci biljnih porodica Amaranthaceae, Apiaceae, Asteraceae, Basellaceae, Boraginaceae, Brassicaceae, Convolvulaceae, Cucurbitaceae, Lamiaceae, Linaceae, Malvaceae, Onagraceae, Plantaginaceae, Polygonaceae i Portulacaceae sadrže značajno višu količinu polifenolnih spojeva nego biljke spomenutih porodica u tehnološkoj zrelosti (Thakur i sur., 2022; Bhaswant i sur., 2023). Također, važno je naglasiti, a sukladno visokom sadržaju polifenolnih spojeva, kako mladi izdanci pokazuju i značajan funkcionalni potencijal od antioksidativnog, protuupalnog, antibakterijskog, antikancerogenog do mnogih pozitivnih učinaka na oboljenja poput ateroskleroze, Alzheimerove bolesti i kardiovaskularnih bolesti (Thakur i sur., 2022; Bhaswant i sur., 2023).

Askorbinska kiselina (vitamin C) jedan je od najpoznatijih vitamina, dijetalni je nutrijent, kofaktor za mnoge enzime, a posebno je učinkovit kao antioksidans, stoga je jedan od najvažnijih vitamina u ljudskoj prehrani (Thakur i sur., 2022; Bhaswant i sur., 2023). Prema Thakur i sur. (2022) visokim sadržajem askorbinske kiseline ističu se mladi izdanci biljnih porodica Malvaceae, Brassicaceae i Cucurbitaceae. Mladi izdanci crvenog kupusa, brokule i amaranta sadrže čak šest puta više askorbinske kiseline od biljaka u tehnološkoj zrelosti (Choe i sur., 2018; Thakur i sur., 2022). Filokinon (vitamin K1) je također jedan od vitamina kojeg u značajnim količinama nalazimo u mladim izdancima. Filokinon ima važnu ulogu u zgrušavanju krvi i održavanju zdravlja koštanog tkiva kroz prevenciju vaskularne kalcifikacije te je utvrđeno kako djeluje imunosupresivno i antikancerogeno (Choe i sur., 2018; Halder i sur., 2019; Thakur i sur., 2022). Prema Thakur i sur. (2022) visoki sadržaj filokinona utvrđen je u mladim izdancima biljnih porodica Amaranthaceae, Brassicaceae i Lamiaceae. Choe i sur. (2018), Bhaswant i sur. (2023) i Partap i sur. (2023) utvrđuju visoke količine filokinona u špinatu (*Spinacia oleracea* L.), brokuli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck), kelju (*Brassica oleracea* var. *sabauda* L.) i mladim izdancima crvenog kupusa (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra* L.) i amaranta (*Amaranthus caudatus* L.). Također, istraživanja potvrđuju kako je sadržaj filokinona u mladim izdancima značajno viši od onog u tehnološki zrelim biljkama (Thakur i sur., 2022; Partap i sur., 2023). Tokoferol (vitamin E) je još jedan nutrijent iz skupine vitamina značajno sadržan u mladim izdancima (Bhaswant i sur., 2023). Topljiv je u mastima i ima antioksidativnu ulogu u obrani stanice (Thakur i sur., 2022; Bhaswant i sur., 2023). Smatra se citoprotektivnim čimbenikom koji ima ulogu u usporavanju starenja, artritisa, katarakta, dijabetesa tipa 2 i bolesti bubrega (Zhang i sur., 2020), a osim toga pozitivno utječe na prevenciju kardiovaskularnih bolesti i Alzheimerove bolesti (Thakur i sur., 2022). Tokoferol je

prisutan u različitim oblicima, a prilikom čega je kod biljnih organizama najzastupljeniji oblik α -tokoferol karakterističan za biljne porodice Brassicaceae i Apiaceae (Thakur i sur., 2022). Prema Thakur i i sur. (2022) mladi izdanci špinata (*Spinacia oleracea* L.) i gorušice (*Sinapis alba* L.) sadrže veće količine tokoferola nego u tehnološkoj zrelosti. Visok sadržaj tokoferola zabilježen je i u mladim izdancima rotkve (*Raphanus sativus* var. *caudatus* L.), rotkvice (*Raphanus sativus*, (L.) Domin), korijandera (*Coriandrum sativum* L.), kres salate (*Lepidium sativum* L.) i suncokreta (*Helianthus annuus* L.) (Choe i sur., 2018; Xiao i sur., 2019; Thakur i sur., 2022). Još jedna od važnih skupina spojeva koja zbog svoje specifične molekularne građe pokazuje brojna funkcionalna svojstva su i fotosintetski pigmenti. Nakon izlaganja svjetlu mladi izdanci prolaze proces fotomorfogeneze i neizbježno sintetiziraju fotosintetske pigmente, klorofile i karotenoide (Pevalek-Kozlina, 2003; Zhang i sur., 2020). Klorofili su najrašireniji pigmenti u biljkama s obzirom na temeljnu ulogu u primarnom biljnom metabolizmu, odnosno apsorpciju svjetlosti valnih duljina 430-642 nm (ljubičasti, plavi, zeleni, žuti, narančasti i crveni spektar svjetlosti) potrebnu za proces fotosinteze (Pevalek-Kozlina, 2003). Karotenoidi (α -katoren, β -karoten, violaksantin, neoksantin, lutein i dr.) također imaju važnu ulogu u fotosintezi. Karakteristične su žuto-narančaste boje, a apsorbiraju svjetlost valnih duljina 380-550 nm (ljubičasti, plavi i zeleni spektar svjetlosti) (Pevalek-Kozlina, 2003). Primarna uloga im je apsorpcija svjetlosne energije koju prenose na klorofile. Druga važna uloga je ona fotozaštitna, odnosno, karotenoidi 'gase' pobuđeno stanje klorofila koje je nastalo kao posljedica nakupljanja velike količine energije koja se nije fotokemijski pohranila već može uzrokovati oštećenje fotosintetske membrane (Pevalek-Kozlina, 2003, Zhang i sur., 2020). Fotosintetski pigmenti važni su i iz segmenta održavanja ljudskoga zdravlja zbog snažnog protuupalnog i antioksidativnog djelovanja (Zhang i sur., 2020), a time imaju i važnu ulogu u sprečavanju bolesti kao što su rak, dijabetes i ostale (Zhang i sur., 2020). Prema Choe i sur. (2018) te Bhaswant i sur. (2023) mladi izdanci biljnih vrsta koji se mogu istaknuti visokim sadržajem β -karotena su kiselica (*Rumex acetosa* L.), korijander (*Coriandrum sativum* L.), crveni kupus (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra* L.), komorač (*Foeniculum vulgare* Mill.), rotkvica (*Raphanus sativus*, (L.) Domin) i gorušica (*Sinapis alba* L.).

Mladi izdanci su bogat izvor raznih makro i mikroelemenata poput kalcija, kalija, dušika, fosfora, sumpora, magnezija, željeza, mangana, cinka, selena i molibdena (Choe i sur., 2018; Thakur i sur., 2022; Bhaswant i sur., 2023). Choe i sur. (2018) i Partap i sur., (2023) ističu mlade izdanke brokule kao bogat izvor fosfora, kalija, magnezija, mangana, cinka, željeza, kalcija, bakra, zatim mlade izdanke salate značajnog sadržaja kalcija, magnezija, željeza, mangana, cinka, selena, molibdena, te bosiljka, blitve i kelja kao dobrog izvora kalija i magnezija. Isto tako i mladi izdanci

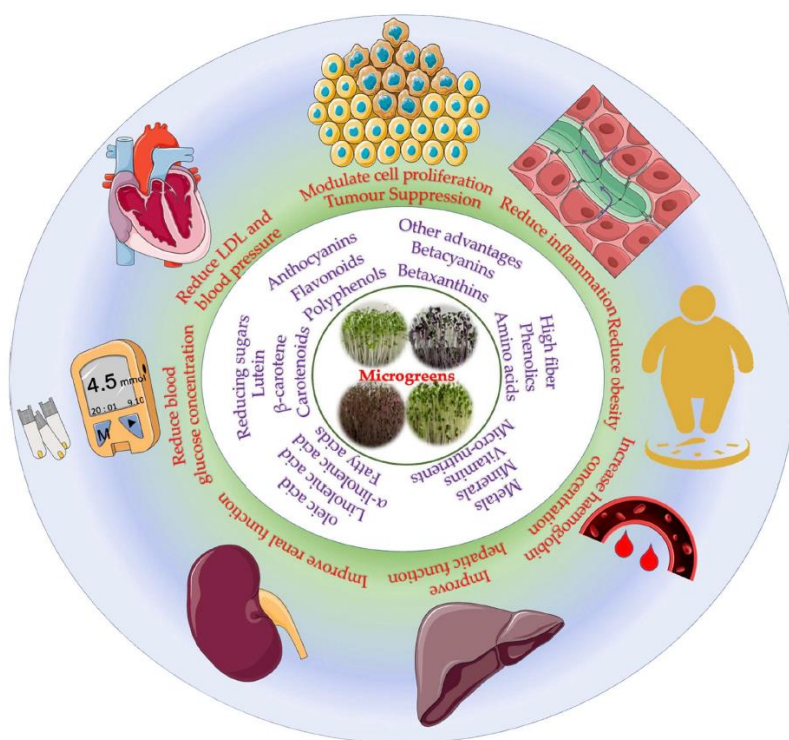
kupusnjača ističu se visokim sadržajem kalija, kalcija, željeza i cinka (Partap i sur., 2023). Prema Thakur i sur. (2022) mladi izdanci komorača (*Foeniculum vulgare* Mill.) sadrže visoke koncentracije kalcija, kalija i natrija, mladi izdanci špinata sadrže visoke količine magnezija, dok mladi izdanci rozele (*Hibiscus sabdariffa*, L.) sadrže visoku količinu fosfora, cinka i selena. Također, navedeni autori ističu i značajno viši sadržaj spomenutih makro i mikroelemenata u fenofazi mladih izdanaka u usporedbi s tehnološki zrelim biljkama. Tako Thakur i sur. (2022) ističu kako je količina makroelemenata (K, Mg, Ca, P) i minerala u tragovima (Mn, Zn, Na, Cu) u mladim izdancima čak 90 % veća u usporedbi s biljkama u tehnološkoj zrelosti. Uz to, važno je i naglasiti kako na akumulaciju makro i mikro elemenata utječu i brojni abiotski čimbenici, pa tako i intenzitet svjetlosti (Partap i sur., 2023).

2.4.2. Antioksidacijski potencijal i zdravstveni aspekt mladih izdanaka

Antioksidansi su spojevi koji štite organizam od oksidativnog oštećenja inhibirajući djelovanje slobodnih radikala u stanicama. S obzirom na navedeno, spojevi antioksidacijskog potencijala doprinose prevenciji brojnih oboljenja povezanih s oksidativnim stresom kao što su neurodegenerativne bolesti, dijabetes, rak i kardiovaskularne bolesti (Zhang i sur., 2020; Partap i sur., 2023). Prema do sada opisanom nutritivnom sastavu, odnosno potencijalu koji mladi izdanci imaju zbog visokog sadržaja fitonutrijenata, posebice bioaktivnih spojeva, može se zaključiti kako ova biljna fenofaza ima i značajan antioksidacijski potencijal, a što dokazuju i brojna istraživanja (Xiao i sur., 2019; Ghoora i sur., 2020; Dhaka i sur., 2023; Pavlović i sur., 2024). S obzirom na već spomenuti visoki antioksidacijski potencijal brojni su i potencijalni zdravstveni benefiti koje ovakva vrsta namirnice može imati. Na slici 4 prikazan je pregled fitokemikalija te potencijalnih zdravstvenih aspekata mladih izdanaka. Prema Bhaswant i sur. (2023) mladi izdanci imaju potencijal za smanjenje dijabetesa zbog visokih sadržaja polifenola, flavonoida i drugih spojeva snažnog antioksidativnog potencijala, a posebice navode konzumaciju ekstrakta mladih izdanaka piskavice, brokule i ječma djelotvornih u smanjenju oboljenja od dijabetesa. Mladi izdanci biljne porodice kupusnjača kao što su rotkvica (*Raphanus sativus* (L.) Domin), brokula (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck), kelj (*Brassica oleracea* var. *sabauda* L.) i gorušica (*Sinapis alba* L.) imaju značajno antitumorsko djelovanje, pomažu u smanjenju pretilosti i kroničnim srčanim bolestima (Choe i sur., 2018; Fuente i sur., 2020). Zbog visokog sadržaja fitokemikalija koje utječu i na smanjenje udjela masti, mladi izdanci se preporučuju kao potencijalna namirnica kod kardiovaskularnih oboljenja (Bhaswant i sur., 2023). Marotti i sur. (2021) navode da ekstrakt korijena

mladih izdanaka slatkog korijena (*Glycyrrhiza glabra* L.) pokazuje značajno protuupalno djelovanje zbog visokog sadržaja polifenolnih spojeva, dok Bhaswant i sur. (2023) napominju isti učinak za mlade izdanke brokule (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck), ječma (*Hordeum vulgare* L.) i crvenog kupusa (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra* L.). Mladi izdanci mogu se koristiti i kod liječenja stanja deficita pojedinih minerala, pa ističu Bhaswant i sur. (2023) ističu mlade izdanke piskavice (*Trigonella foenum-graecum* L.) kao dobar nadomjestak nedostatku željeza u organizmu.

Prema svemu navedenom, mladi izdanci su bogat izvor antioksidansa na čiji kapacitet utječe sadržaj i međusoban odnos bioaktivnih spojeva kao što su polifenoli, vitamini, klorofili, karotenoidi i brojni ostali iz skupine specijaliziranih metabolita (Zhang i sur., 2020; Thakur i sur., 2022; Chaudhari i sur., 2023). Prema Zhang i sur. (2020) antioksidacijski kapacitet mladih izdanaka u pozitivnoj je korelaciji sa sadržajem flavonoidnih spojeva. Veće razine polifenolnih spojeva i glukozinolata u mladim izdancima pozitivno utječu i na imunološki sustav (Chaudhari i sur., 2023; Partap i sur., 2023).



Slika 4. Zdravstveni aspekti mladih izdanaka

Izvor: Bhaswant i sur., 2023.

2.5. Tehnologija uzgoja mladih izdanaka

Mladi izdanci se uspješno mogu proizvoditi u zaštićenim prostorima (plastenici, staklenici, visoki tuneli, klima komore, vertikalne farme), na otvorenom ili u kućanstvima. Odabir načina uzgoja utječe i na odabir tehnologije uzgoja (Kyriacou i sur., 2016). Uzgoj u zaštićenom prostoru zahtijeva kontrolirane abiotске uvjete kako bi se osigurala kontinuirana proizvodnja i stalna, ujednačena kvaliteta biljnog materijala (Opačić i sur., 2018). Ključne čimbenike koje je potrebno optimizirati prilikom uzgoja u zaštićenim prostorima u svrhu adekvatnog rasta i razvoja te poticanja fizioloških procesa su: temperatura, vlaga i svjetlost. Prema Opačić i sur. (2018) u Nizozemskoj se mladi izdanci najčešće proizvode hidroponski, u hranivoj otopini bez supstrata tehnikom hranivog filma i tehnikom dotjecanja i otjecanja (plime i oseke). Za uzgoj mladih izdanaka najčešće se koriste posude od polietilena visoke gustoće, visine 4-6 cm, ispunjene supstratom organskog ili anorganskog podrijetla (Di Gioia i Santamaria 2015). Mogu se koristiti i polistirenski kontejneri namijenjeni proizvodnji presadnica (Bulgari i sur., 2017). Uzgojne posude mogu biti smještene na pomičnim i nepomičnim stolovima, a moguć je i etažni uzgoj na policama ili u žlijebovima pri čemu je nužno osigurati dopunsko osvjetljenje (Di Gioia i Santamaria, 2015). Supstrati koji se mogu koristiti pri uzgoju mladih izdanaka su treset, perlit, vermikulit, kora drveća (Mir i sur., 2017), pijesak, vlakna kokosa, pamuka i jute (Kyriacou i sur., 2016), a važno je da supstrat ne sadrži čestice teških metala i patogene mikroorganizme (*Salmonella spp.*, *Escherichia coli*), odnosno treba biti steriliziran, kako bi se izbjegli higijensko-sanitarni problemi u proizvodnji (Di Gioia i Santamaria, 2015). Sjeme koje se koristi za uzgoj ne smije biti tretirano fungicidima i insekticidima, treba biti kalibrirano, visoke čistoće i klijavosti iznad 95 % (Opačić i sur., 2018).

U komercijalnoj se proizvodnji, nakon sjetve, posude smještaju u komore za klijanje bez izlaganja svjetlosti (Opačić i sur., 2018). Prema Senevirathe i sur. (2015), Bulgari i sur. (2017) i Opačić i sur. (2018) optimalna temperatura za uzgoj mladih izdanaka je 21-25 °C, dok optimalna relativna vlaga zraka iznosi 50-60 % (Samuoliene i sur., 2012). Nakon naklijavanja biljkama je potrebno osigurati fotoperiod 12-16 sati svjetla uz održavanje optimalne vlage supstrata (Kou i sur., 2014). Kao problematiku tehnologije uzgoja valjalo bi navesti pojavu plijesni koja se može pojaviti zbog vlažnog supstrata ili neoptimalnih uvjeta tijekom uzgoja (viša temperatura ili vlaga zraka od preporučene). Kako bi se spriječila pojava plijesni, koristi se oprema (ventilatori, grijači ili klima uređaji) koja osigurava i održava optimalne uvjete uzgoja. Ukoliko pak dođe do pojave plijesni, biljke se mogu tretirati kombinacijom različitih bioloških dezinficijensa.

Tijekom razvojnog ciklusa navodnjavanje se provodi metodom dotjecanja i otjecanja svakih 2-3 dana te se na taj način također izbjegava pojava plijesni čija bi pojavnost bila veća u uvjetima svakodnevnog navodnjavanja. Berba mladih izdanaka najčešće se provodi od 7. do 21. dana nakon klijanja, ovisno o vrsti, klijavosti sjemena, abiotskim čimbenicima i sustavu proizvodnje (Ying i sur., 2020; Chaudhari i sur., 2023). Berba se odvija pri dnu hipokotila u fenofazi kotiledona, sterilnim škarama ili nožem (oprani i dezinficirani) nekoliko milimetara iznad supstrata (Di Gioia i Santamaria 2015), a nakon čega se mladi izdanci pakiraju u jednokratne plastične ili kartonske posudice, zasebno ili kao mješavina različitih vrsta (Opačić i sur., 2018) (slika 5). Iskorišteni supstrat se može skladištiti i kasnije iskoristiti kao kompost ukoliko ne dođe do pojave plijesni ili nekog drugog oblika kontaminacije.



Slika 5. Primjer pakiranja mladih izdanaka

2.5.1. Metode urbane poljoprivrede za uzgoj mladih izdanaka

Jedan od najvećih izazova s kojim se čovječanstvo trenutno susreće je opskrba dovoljnom količinom nutritivno vrijedne hrane (Hasan i sur., 2018; Aznar-Sánchez i sur., 2020; Maraveas i sur., 2023). Trenutačni trend rasta ljudske populacije koji prati sve veća potrošnja i veća količina otpada od hrane kao i ekstremni vremenski uvjeti izazvani klimatskim promjenama stvaraju pritisak na poljoprivredne sustave proizvodnje i prirodne resurse koji se koriste u njima (Aznar-Sánchez i sur., 2020; Badji

i sur., 2022; Blanco i sur., 2022; Maraveas i sur., 2023; Wang i sur., 2024). Poljoprivredni ekosustavi (obradive površine, zaštićeni prostori) glavni su opskrbljivači hranom (Aznar-Sánchez i sur., 2020), a istovremeno povećanje proizvodnje hrane podrazumijeva i potrebe za širenjem obradivih površina ili intenzivniju proizvodnju na već postojećim obradivim površinama (Alexander i sur., 2015; Aznar-Sánchez i sur., 2020). Glavni nedostatak širenja obradivih površina je ograničena dostupnost zemljišta kao posljedica urbanizacije i već iskorištenih zemljišta za potrebe poljoprivrede (Aznar-Sánchez i sur., 2020; Badji i sur., 2022; Maraveas i sur., 2023). Upravo zbog navedenog, zaštićeni prostori izgledno su rješenje suvremene poljoprivredne proizvodnje obzirom da istovremeno predstavljaju mjeru obrane od nepovoljnih klimatskih uvjeta, štetočina i bolesti (Blanco i sur., 2022; Maraveas i sur., 2023), te omogućuju uzgoj biljnih kultura tijekom cijele godine čime se može zadovoljiti izvansezonska potražnja (Rath i Ghosal, 2020; Blanco i sur., 2022). Uzgoj hrane u zaštićenim prostorima jedan je od načina poljoprivredne proizvodnje koji je pokazao povećanje kapaciteta i učinkovitost u intenziviranju proizvodnje hrane (Aznar-Sánchez i sur., 2020; Rath i Ghosal, 2020; Blanco i sur., 2022) pa kao takvi, zaštićeni prostori predstavljaju alternativu proizvodnji na otvorenom (Rath i Ghosal, 2020). Usavršavanjem tehnologije prevladani su izazovi i ograničenja poput smanjenja troškova i potrošnje energije s kojima su se proizvođači susretali prilikom uzgoja u zaštićenim prostorima (Aznar-Sánchez i sur., 2020; Rath i Ghosal, 2020; Badji i sur., 2022). Napredak u tehnologiji zaštićenih prostora prilagodbom čimbenika uzgoja (temperatura, vlaga, intenzitet svjetla, koncentracija CO₂) omogućava proizvodnju neovisno o klimatskim obilježjima nekog područja (Rath i Ghosal, 2020; Badji i sur., 2022; Blanco i sur., 2022; Maraveas i sur., 2023). Time se povećava učinkovitost proizvodnje, prinos i kvaliteta usjeva te se ujedno rješava problem globalne sigurnosti u opskrbi hranom (Badji i sur., 2022).

Zaštićeni prostori su složeni sustavi u kojima se klimatski uvjeti mijenjaju u skladu s vremenskim promjenama izvan njih (Badji i sur., 2022; Blanco i sur., 2022). Raspon optimalnih temperatura tijekom uzgoja mladih izdanaka u zaštićenim prostorima iznosi 17-27 °C, dok je tijekom noći preporučena prosječna temperatura 15-18,5 °C. Preporučena vlaga zraka je 50-80 %, a preporučeni broj sunčanih sati od studenog do siječnja je od 500 do 550 (Badji i sur., 2022). Ekološki čimbenici u zaštićenim prostorima trebaju biti kontinuirano praćeni i kontrolirani kako bi se osigurali optimalni uvjeti za rast i razvoj biljaka, za što se u visoko tehnološkim i opremljenim sustavima koriste brojni osjetnici (senzori) i mjerni uređaji putem kojih se prikupljaju informacije o temeljnim abiotičkim čimbenicima unutar zaštićenog prostora (Badji i sur., 2022). Osnovna svrha takvih sustava unutar zaštićenih prostora je koordinacija između

vanjskih i unutarnjih čimbenika kako bi se prilagodili uvjeti za rast i razvoj biljaka uz optimizaciju potrošnje resursa poput električne energije, vode, zraka (kontrola protoka CO₂) (Badji i sur., 2022; Blanco i sur., 2022). Danas su dostupni pametni digitalni sustavi kontrole klimatskih uvjeta u zaštićenim prostorima koji daju precizna rješenja o regulaciji čimbenika kako bi se izbjegli nepotrebni troškovi, a prilikom čega istovremeno zaštićeni prostori postaju sve više prilagodljiviji i održiviji (Badji i sur., 2022).

Urbana poljoprivreda je grana poljoprivredne proizvodnje koja se sve više razvija kao izravna posljedica klimatskih promjena, nestašice prirodnih i potrebe za očuvanjem postojećih resursa, poremećaja u dobavnim lancima opskrbe hrane, bojnih ekonomsko-političkih pitanja kao i sve većem ekološkom otisku postojećih poljoprivrednih praksi na okoliš. Stoga se kao potencijalna rješenja nameću tzv. engl. *Zero-Acreage Farming* metode (*Z-Farming*) koje se temelje na proizvodnji hrane bez uporabe postojećih poljoprivrednih površina, često u vertikalnim okruženjima, na otvorenim prostorima u blizini ili unutar gradova (López i sur., 2019). Površine u urbanim sredinama koje se koriste u spomenute svrhe su najčešće urbani vrtovi, parkovi, napuštene površine, krovni vrtovi, krovni staklenici, jestivi zeleni zidovi i dodatni inovativni oblici kao što su zatvorene vertikalne farme i vertikalni staklenici. *Z-Farming* stoga objedinjuje opći izraz koji uključuje sve vrste urbane poljoprivrede u i na zgradama kao i nove pristupe koji imaju za cilj smanjenje ekološkog otiska urbanih središta i stvaranje održivih gradova (Thomaier i sur., 2015). Ovakve metode mogu imati značajnu ulogu u ozelenjivanju gradova, povećanju vegetativnog pokrova kao najučinkovitijeg načina za smanjenje urbanog toplinskog otoka, povećanju površina za propusnost i zadržavanje oborina i poboljšanju kvalitete zraka, mogu poticati produktivnu uporabu urbanog organskog otpada i smanjenje energetske otiska, kao i smanjiti potrošnju hrane čija proizvodnja podrazumijeva kompleksne lance opskrbe hranom. Osim metoda usmjerenih na proizvodnju hrane, *Z-Farming* proizvodi i niz neprehrambenih i netržišnih proizvoda (Specht i sur., 2015). Tako na primjer u praksi *Z-Farming-a* koristi se visokotehnološka zelena arhitektura koja uključuje implementaciju sustava automatizacije koji uz pomoć tehnologije upravljanja, komunikacije i programiranja optimiziraju i standardiziraju procese postižući autonomno obavljanje zadataka. Time se mogu smanjiti proizvodni gubici, nedostaci kao i repetitivnost ljudskog rada (López i sur., 2019). S druge strane, *Z-Farming* metode se suočavaju s nekoliko izazova kao što su problemi visokih investicijskih troškova i tehničke nesigurnosti. Dosadašnja istraživanja uglavnom su usredotočena na krovne vrtove (tzv. zeleni krovovi) koji imaju najdužu tradiciju zbog društvenog utjecaja i tehničke implementacije kao i na zatvorene oblike kao što su hidroponski staklenički

sustavi na zgradama i vertikalne farme u zatvorenim prostorima unutar zgrada (tzv. *indoor farming*) (Specht i sur., 2015).

2.5.2. Primjena dopunskog osvjetljenja u uzgoju mladih izdanaka

Svjetlost je limitirajući čimbenik uzgoja u zaštićenim prostorima, a koji utječe na brojne procese biljaka, od klijanja, rasta, morfoloških promjena, gibanja, cvatnje do sinteze i akumulacije različitih fitokemikalija (Vaštakaite i sur., 2015; Lobiuc i sur., 2017). Učinci svjetlosti ovise o valnim duljinama svjetlosnog spektra koje biljka apsorbira. Fotosintetski aktivno zračenje (engl. *Photosynthetically Active Radiation*, PAR) uključuje valne duljine u rasponu od 400-800 nm. Dva glavna fotoreceptora koja u biljnim stanicama apsorbiraju PAR valne duljine svjetlosti su: fitokromi koji apsorbiraju crvene (600-700 nm) i tamno crvene valne duljine (700-800 nm) te kriptokromi koji apsorbiraju plave (400-500 nm) i ultraljubičaste UV-A valne duljine (280-400 nm) (Hasan i sur., 2017; Zhang i sur., 2020). Sve promjene u biljci koje se događaju pod utjecajem svjetlosti kontroliraju specifični fotoreceptori od kojih su najvažniji fitokromi, a zatim kriptokromi. Fitokromi su pigmenti koji apsorbiraju svjetlost plavog i crvenog dijela spektra, a prilikom čega se razlikuje fitokrom biološki neaktivnog oblika (Pc) koji apsorbira crvenu svjetlost te fitokrom biološki aktivnog oblika (Ptc) koji nakon osvjetljavanja crvenom svjetlošću prelazi u biološki aktivni oblik koji apsorbira tamnocrvenu svjetlost. Fitokromi utječu na promjene u biljci kao što su klijanje, otvaranje hipokotilne kuke, širenje lista, produživanje internodija te promjene na molekularnoj razini kao što je gibanje kloroplasta, sinteza antocijana i karotenoida te sinteza ključnog enzima (fenilalanin-amonij-lijaza) u biosintezi flavonoida (Pevalek-Kozlina, 2003). Kriptokromi su pigmenti zaslužni za apsorpciju plavog i UV-A dijela svjetlosnog spektra. Uz fitokrome i kriptokrome kao odgovor na svjetlost u biljci sudjeluju i fototropini, odnosno fotoreceptorski proteini (flavoproteini) koji imaju ulogu u fototropizmu, odnosno, kretanju biljaka prema ili od svjetlosti (Briggs i Olney, 2001). Kriptokromi i fototropini reguliraju procese deetiolacije, fototropizam, kretanje kloroplasta, endogene ritmove, rast korijena, otvaranje stoma, reguliranje redoksa i razinu cikličkih nukleotida (Lobiuc i sur., 2017; Ying i sur., 2020). Čimbenici svjetlosti koji utječu na morfološka svojstva biljaka te na niz promjena metaboličkih funkcija vezanih uz kemijski sastav su kvaliteta (valna duljina), kvantiteta (intenzitet zračenja) i fotoperiod (trajanje). PAR isto tako pozitivno utječe na sintezu različitih specijaliziranih metabolita biljke uključujući askorbinsku kiselinu, polifenolne spojeve, karotenoide, klorofile te ostale fitokemikalije koje pokazuju značajna antioksidativna svojstva (Lobiuc i sur., 2017; Zhang i sur., 2020; Ebert, 2022; Bashwant i sur., 2023).

Najčešći do sada korišteni izvori dopunskog osvjetljenja su visokotlačne natrijeve žarulje (engl. *High Pressure Sodium*, HPS), metal halogene žarulje (engl. *Metal Halide*, MH), ksenonske i fluorescentne žarulje (Mitchell i sur., 2012; Islam i sur., 2015). Odabir dopunskog osvjetljenja ovisi i o vrsti zaštićenog prostora pa se tako u staklenicima uglavnom koriste HPS žarulje, dok se npr. u komorama za rast biljaka koriste fluorescentne žarulje (Islam i sur., 2015; Kaiser i sur., 2019). No, neovisno o navedenom, spomenuti izvori dopunskog osvjetljenja uglavnom nisu optimalni zbog energetske neučinkovitosti i nedostatne kontrole emisije ultraljubičastog i infracrvenog zračenja (Kaiser i sur., 2019; Jones-Baumgradt i sur., 2020). Zbog brojnih nedostataka žarulja koje se još uvijek najčešće koriste, u posljednje vrijeme sve se više koriste svjetleće diode (engl. *Light Emitting Diodes*, LED). Svjetleće diode pokazuju niz prednosti, od visoke energetske učinkovitosti i trajnosti (Zhang i sur., 2019, Ma i sur., 2021) do niza ostalih tehničkih prednosti u odnosu na dosadašnje korištene izvore (Margit i Viršile, 2013; Turner i sur., 2020). U usporedbi s ostalim konvencionalnim izvorima osvjetljenja, svjetleće diode mogu selektivno i kvantitativno emitirati različite spektre osvjetljenja (Zhang i sur., 2020). Najvažnije čimbenike svjetlosti koje je potrebno optimizirati prilikom uzgoja mladih izdanaka su kvaliteta, intenzitet zračenja i fotoperiod (Negri i sur., 2021). Svjetleće diode emitiraju fotone koji aktiviraju fitokrome i kriptokrome, a koji posljedično utječu na promjene morfoloških i kemijskih svojstava. Prema Harakort i sur. (2019) kombinacija plavog (400-500 nm) i crvenog (600-700 nm) dopunskog osvjetljenja kao dikromatskog potiče rast biljke, povećava prinos, ali i sintezu bioaktivnih spojeva u usporedbi s bijelim fluorescentnim (> 400 nm) ili solarnim svjetlom (200-1000 nm). Isti autori daju primjer mladih izdanaka kopra (*Anethum graveolens* L.), crvenog i limunskog bosiljka (*Ocimum americanum* L.) te mladh izdanaka iz porodice krstašica, koji uzgojeni pod svjetlećim diodama pokazuju veću količinu polifenola nego pod fluorescentnim dopunskim osvjetljenjem. Također, veći antioksidacijski kapacitet je pokazao limunski bosiljak (*Ocimum americanum* L.) uzgojen pod dopunskim osvjetljenjem svjetlećim diodama nego pod fluorescentnim osvjetljenjem (Samuoliene i sur., 2012). Među različitim spektrima dopunskog osvjetljenja, crveni spektar se često smatra najučinkovitijim premda je sadržaj energije crvenih fotona relativno nizak (Kaiser i sur., 2019). Postoje i ograničenja koja se očituju prvenstveno u rastu i razvoju kao posljedica monokromatskog osvjetljenja. Monokromatsko osvjetljenje crvenim svjetlom, poznato još kao „sindrom crvenog svjetla“ (engl. „*red light syndrome*“), za koje je dokazano kako uzrokuje simptome kao što su uvijanje lišća, smanjenje fotosintetskog kapaciteta, debljine lista i lisne pigmentacije (Kaiser i sur., 2019). S biotehnološkog gledišta, primjena crvenog spektra svjetlosti dovodi do povećanje biomase, aktiviranja antioksidativnog sustava biljke i

povećane koncentracije polifenola. Primjena plavog dijela spektra svjetlosti dovodi do povećane sinteze klorofila, polifenolnih spojeva i askorbinske kiseline (Lobiuc i sur., 2017; Ying i sur., 2020). Zeleni dio spektra svjetlosti (500-600 nm) pozitivno utječe na povećanje lisne biomase, čime se ujedno povećava i prinos (Smith i sur., 2017; Dou i sur., 2019). Smith i sur. (2017) dokazuju pozitivan utjecaj zelenog osvjetljenja u kombinaciji s plavim na sadržaj ukupne suhe tvari u salati. Garegnani i sur. (2024) su utvrdili pozitivan utjecaj zelenog svjetla u kombinaciji s crvenim i plavim osvjetljenjem na duljinu hipokotila, površinu kotiledona, prinos, suhu tvar i sadržaj klorofila u mladim izdancima rotkvice. Prema Seyedi i sur. (2023), bijelo osvjetljenje pozitivno utječe na izduženje stabljike i povećanje lisne biomase timijana (*Thymus vulgaris* L.) što ujedno vodi povećanju prinosa. Isti autori utvrđuju pozitivan utjecaj bijelog osvjetljenja na sadržaj suhe tvari, ukupnoga sastava polifenola i antioksidacijskog kapaciteta timijana. Maru i sur. (2024) dokazuju pozitivan utjecaj bijelog monokromatskog osvjetljenja i bijelog osvjetljenja u kombinaciji s plavim i crvenim osvjetljenjem na duljinu hipokotila, povećanje površine kotiledona, prinos, sadržaj suhe tvari i flavonoida u mladim izdancima gorušice (*Sinapis alba* L.). U istraživanju Putri i sur. (2023) utvrđen je pozitivan utjecaj bijelog monokromatskog osvjetljenja na prinos mladih izdanaka rotkvice (*Raphanus sativus* (L.) Domin). Također, tamnocrveno osvjetljenje ima pozitivan utjecaj na rast biljaka, što dokazuju Jeong i sur. (2024) na primjeru kres salate (*Lepidium sativum* L.) i bosiljka (*Ocimum basilicum* L.) gdje je zabilježeno izduživanje stabljike, povećanje lisne biomase, a time i prinosa te povećanje sadržaja suhe tvari. Seyedi i sur. (2023) dokazuju pozitivan utjecaj dikromatskog crvenog i plavog osvjetljenja na ukupni sastav polifenola, flavonoida, antocijana i fotosintetskih pigmenata (klorofila i karotenoida) na primjeru timijana. Pozitivan utjecaj dikromatskog crvenog i plavog osvjetljenja na dužinu stabljike, povećanje lisne biomase, prinosa i sadržaja suhe tvari rajčice (*Solanum lycopersicum* L.) navode Kaiser i sur. (2019). Isti autori tvrde da dodatak plavog osvjetljenja crvenome smanjuje pojavu „sindroma crvenog svjetla“.

Prilikom promatranja utjecaja fotoperioda i intenziteta svjetlosti na uzgoj bilja, Maru i sur. (2024) pri fotoperiodu od 12 h i intenzitetu osvjetljenja $160 \pm 2,5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ utvrđuju pozitivan utjecaj na prinos, morfološka svojstva (duljina hipokotila i površina kotiledona), sadržaj suhe tvari i sadržaja flavonoida u mladim izdancima gorušice (*Sinapis alba* L.). Pozitivan utjecaj fotoperioda od 12 h i intenziteta osvjetljenja od $150 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ na duljinu hipokotila, površinu kotiledona, prinos, sadržaj suhe tvari i sadržaj klorofila u mladim izdancima rotkvice (*Raphanus sativus* (L.) Domin) dokazuju i Garegnani i sur. (2024). Wang i sur. (2024) utvrđuju pozitivan utjecaj intenziteta svjetla od $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ tijekom fotoperioda od 16 h na prinos i sadržaj fotosintetskih

pigmenata (klorofila i karotenoida) korijandera (*Coriandrum sativum* L.). Flores i sur. (2024) u mladim izdancima kupusa (*Brassica oleracea* var. *capitata* (L.) Duchesne), kelja (*Brassica oleracea* var. *sabauda* L.), mizune salate (*Brassica rapa* var. *japonica*) i gorušice (*Sinapis alba* L.) u fotoperiodu od 16 h i intenzitetima osvjetljenja od $120 \pm 5,1$ $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ i od $160 \pm 3,6$ $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ isto tako utvrđuju pozitivan utjecaj na ukupni sadržaj klorofila i karotenoida. U istom fotoperiodu, ali pri nešto većem intenzitetu osvjetljenja od $210 \pm 5,9$ $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ navode pozitivan utjecaj na ukupni sastav polifenola te antioksidacijski kapacitet. Suprotnom tome, Favezizadeh i sur. (2024) utvrđuju pozitivan utjecaj znatno duljeg fotoperioda od čak 24 h na prinos, sadržaj fotosintetskih pigmenata (klorofila i karotenoida) i polifenolnih spojeva u mladim izdancima bosiljka (*Ocimum basilicum* L.).

3. MATERIJALI I METODE

3.1. Postavljanje pokusa i uzgoj biljnog materijala

Istraživanje je provedeno u vertikalnoj farmi (slika 6) tvrtke Vesela motika d.o.o. na lokaciji Martićeva 67 Zagreb, Hrvatska, u periodu od listopada 2021. godine do siječnja 2022. godine. Dvofaktorijski pokus uzgoja mladih izdanaka postavljen je po slučajnom bloknom rasporedu u tri ponavljanja, u kontroliranim uvjetima temperature i relativne vlage zraka, a koji su praćeni tijekom cijelog vegetacijskog perioda i prikazani u poglavlju 4. Testirana su tri spektra dopunskog osvjetljenja svjetlećim diodama: crveni monokromatski ($\lambda = 620$ nm), plavi monokromatski ($\lambda = 450$ nm) te kombinacija crvenog i plavog spektra u odnosu 50:50 kao dikromatsko osvjetljenje u dva fotoperioda, 12 i 16 sati (Tablica 2).

Tablica 2. Testirani tretmani u vertikalnom uzgoju mladih izdanaka

Svjetlosni spektar	Valna duljina (nm)	Fotoperiod (h)	Oznaka tretmana
crveni	620	12	12C
		16	16C
plavi	450	12	12P
		16	16P
crveni : plavi	620:450 (50:50)	12	12CP
		16	16CP



Slika 6. Uzgoj mladih izdanaka u vertikalnoj farmi

Za potrebe istraživanja provedena je sjetva sjemena rotkvice (*Raphanus sativus* var. *sativus* (L.) Domin), mungo graha (*Vigna mungo* (L.) Hepper) i cikle (*Beta vulgaris* L. subsp. *vulgaris* var. *conditiva* Alef.) dobavljača Lokvina d.o.o. iz Varaždina. Sjetva je provedena u plastične plitice površine 0,0851 m², prethodno napunjene supstratom TraySubstrate (Klasmann-Deilmann, Njemačka). Sjeme cikle i mungo graha prethodno je tretirano namakanjem u vodi tijekom 24 sata, odnosno 12 sati za mungo grah. Gustoća sjetve, odnosno potrošnja sjemena, varirala je ovisno o vrsti i iznosila je 1410 g/m² za sjeme cikle, 235,02 g/m² za sjeme mungo graha i 470,04 g/m² za sjeme rotkvice (bez prethodnog namakanja). Tako pripremljene plitice u vertikalnoj farmi uz uvjete od 25 ± 5 °C i 60 ± 10 % relativne vlage zraka postavljene su na police površine 0,706 m². Svjetleće diode s crvenim (620 nm) i plavim (450 nm) osvjetljenjem nabavljene su od tvrtke SANSOL GmbH (Austrija) (Tablica 3), dimenzija 1,16 x 0,04 m i po dvije su postavljene s donjih strana polica na izvor napajanja od 150 W na udaljenost 31 cm od plitica. Navodnjavanje svih vrsta mladih izdanaka se provodilo metodom dotjecanja i otjecanja svaka 4 dana.

Tablica 3. Specifikacije LED dioda tvrtke SANSOL korištenih u pokusu

Vrsta diode	S7	S4	S7/S4
Valna duljina (nm)	450	620	450/620
Učinkovitost ($\mu\text{mol}/\text{J}$)	2,6	2,3	2,6/2,3
PPF ($\mu\text{mol}/\text{s}$)	345	390	367,5

PPF (engl. *Photosynthetic Photon Flux*) – fotosintetski tok fotona.

Nakon sjetve sjemena rotkvice, plitice su postavljene na uzgojne police na naklijavanje bez dopunskog osvjetljenja i pokrivena s praznim pliticama kako bi se osigurali tamni uvjeti naklijavanja. Četvrti dan nakon postavljanja plitica na naklijavanje, pokrovne plitice su maknute te je počeo tretman dopunskim osvjetljenjem. Plitice za uzgoj mladih izdanaka mungo graha i cikle su nakon sjetve posložene jedna na drugu kako bi se potiskivanjem postigla bolja klijavost sjemena te se svaki dan vršilo premještanje plitica, odnosno mijenjanje rasporeda plitica naslaganih jedne na drugu u svrhu ujednačavanja u potiskivanju. Plitica koja se nalazila na vrhu prekrivena je praznom plastičnom pliticom u svrhu postizanja tamnih uvjeta naklijavanja. Peti dan nakon postavljanja na naklijavanje, plitice cikle i mungo graha posložene su jedna pored druge na uzgojne police te se započelo tretmanom dopunskim osvjetljenjem. Postotak klijavosti sjemena kod sve tri vrste je bio 90 %. Razvojni ciklus mladih izdanaka rotkvice trajao je sedam dana, mladih izdanaka mungo graha deset dana, dok je razvojni ciklus mladih izdanaka cikle trajao 14 dana. Tijekom istraživanja u uvjetima vertikalne farme kontinuirano su se pratili abiotski čimbenici uzgoja mladih izdanaka: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), relativna vlaga zraka (%) i intenzitet osvjetljenja (fotosintetska gustoća toka fotona, engl. *Photosynthetic Photon Flux Density* – PPF).

Berba mladih izdanaka sve tri uzgojene vrste u vertikalnoj farmi provedena je ručno, rezanjem pri dnu hipokotila u fenofazi rasta kotiledona steriliziranim škarama. Uzorci su odmah nakon berbe pakirani u polietilenske vrećice i u rashladnoj torbi dopremljeni u Laboratorij za analizu kvalitete poljoprivrednih proizvoda biljnog porijekla, Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog fakulteta, za potrebe kemijskih analiza biljnog materijala.

3.2. *Određivanje abiotskih čimbenika uzgoja u zaštićenom prostoru*

Tijekom uzgoja mladih izdanaka u vertikalnoj farmi, svakodnevno su se pomoću digitalnog termohigrometra (30.5002 TFA Dostmann, Njemačka) pratili minimalna i maksimalna temperatura (°C) i relativna vlaga zraka (%).

Izračun gustoće toka fotona (PPFD) u vertikalnoj farmi proveden je prema jednadžbama (1)-(2) (Laokoon Lamp Company):

$$PPF (\mu\text{mol/s}) = \text{učinkovitost } (\mu\text{mol/J}) \times \text{snaga (W)} \quad (1)$$

$$PPFD (\mu\text{mol/s/m}^2) = \frac{PPF (\mu\text{mol/s})}{P (\text{m}^2)} \quad (2)$$

gdje je:

PPF ($\mu\text{mol/s}$) – gustoća fotonskog toka,

PPFD ($\mu\text{mol/s/m}^2$) – gustoća fotonskog toka po jedinici površine,

P (m^2) – uzgojna površina.

3.3. *Određivanje prinosa mladih izdanaka*

Ukupna masa svježe ubranog biljnog materijala odvagana je na tehničkoj vagi (BTA210D, PROBUS KIG d.o.o., Hrvatska). Temeljem odvaga i prinosa svježe mase mladih izdanaka ostvarenog po jednoj plitici izračunat je prinos svježe mase izdanaka testiranih povrtnih vrsta u g/m^2 za svaki od tretmana u istraživanju.

3.4. *Određivanje sadržaja ukupne suhe tvari mladih izdanaka*

Sadržaj ukupne suhe tvari analiziran je standardnom laboratorijskom metodom prema AOAC (1995) sušenjem na 105 °C do konstantne mase. U staklenu posudicu s poklopcem prethodno je dodano malo kvarcnog pijeska i stakleni štapić te je odvagana masa posudice. U tako pripremljenu posudicu dodano je otprilike 2-3 g usitnjenog, svježeg biljnog materijala te su posudice izvagane prije sušenja na analitičkoj vagi (QUINTIX224-1CEU, Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Goettingen, Njemačka). Sušenje na $105 \pm 0,5$ °C povedeno je u laboratorijskom sušioniku (Model 30, Memmert, Schwabach, Njemačka) do konstantne mase tijekom tri sata. Uzorci su nakon sušenja, ostavljeni da se ohlade do sobne temperature u eksikatoru te izvagani na analitičkoj vagi. Ukupna suha tvar izračunata je prema jednadžbi (3):

$$\text{Suha tvar (\%)} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (3)$$

gdje je:

m_0 (g) – masa posudice i pomoćnog materijala (kvarcni pijesak, stakleni štapić, poklopac),

m_1 (g) – masa posudice s ispitivanim uzorkom prije sušenja,

m_2 (g) – masa posudice s ostatkom nakon sušenja.

3.5. *Određivanje kromatskih parametara mladih izdanaka*

Kromatski parametri svježeg biljnog materijala (L^* , a^* , b^* , C^* , h°) mjereni su prema CIELAB metodi pomoću kolorimetra (ColorTec PCM+, PCE Instruments, Southampton, UK). L^* vrijednost označava svjetlinu uzorka, od 0 (označava crnu boju) do 100 (označava bijelu boju); a^* vrijednost označava intenzitet crvene ili zelene boje. Negativne vrijednosti ($-a^*$) predstavljaju prisutnost zelene boje, a pozitivne vrijednosti ($+a^*$) predstavljaju prisutnost crvene boje. Parametar b^* predstavlja plavo-žuti kontrast, s negativnim vrijednostima ($-b^*$) prema plavoj i pozitivnim ($+b^*$) prema žutoj boji. Od svake vrste odvojen je dio razvijenih listova koji su stavljeni na stakalce na podlozi od bijelog papira. Kolorimetar je približen do krajnje površine uzorka lista s koje su očitani kromatski parametri.

3.6. *Određivanje sadržaja askorbinske kiseline*

Sadržaj askorbinske kiseline (AK) analiziran je prema standardnoj AOAC metodi (2002) titracijom s 2,6-diklorindofenolom (DKF). Odvagano je $10 \text{ g} \pm 0,01$ (QUINTIX224-1CEU, Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Goettingen, Njemačka) biljnog materijala koji je uz pomoć oksalne kiseline (2 %, v/v) kvantitativno prebačen u odmjernu tikvicu volumena 100 mL. Sadržaj tikvice homogeniziran je i nadopunjen do oznake 2 % (v/v) oksalnom kiselinom. Tako pripremljeni uzorci ostavljeni su stajati otprilike 30 min uz povremeno mućkanje, a nakon čega je sadržaj tikvice profiltriran preko Whatmanovog filter papira. Otpipetirano je 10 mL filtrata u Erlenmeyerovu tikvicu te je provedena titracija sa svježe pripremljenim DKF-om do pojave ružičastog obojenja. Konačni sadržaj AK izračunat je prema jednadžbi (4) i izražen kao mg/100 g svježe tvari (sv.t.):

$$AK \text{ (mg/100 g)} = \frac{V \times F}{D} \times 100 \quad (4)$$

gdje je:

V (mL) – volumen DKF-a utrošenog za titraciju,

F*- faktor otopine DKF,

D (g) – masa biljnog materijala uzorka korištena za titraciju.

*Određivanje faktora otopine 2,6-diklorfenolindofenola:

Za određivanje faktora otopine 2,6-diklorfenolindofenola napravila se otopina askorbinske kiseline koja se titrirala otopinom 2,6-diklorfenolindofenola. Prema očitom volumenu potrebnog 2,6-diklorfenolindofenola izračuna se faktor te otopine. U odmjernu tikvicu od 50 mL na analitičkoj vagi (QUINTIX224-1CEU, Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Goettingen, Njemačka) odvagalo se $\pm 0,0100$ g askorbinske kiseline, a tikvica se nadopunila do oznake 2 %-tnom otopinom oksalne kiseline. U Erlenmeyerovu tikvicu od 50 ml otpipetiralo se 5 mL 2 %-tne otopine oksalne kiseline i 5 mL pripremljene otopine askorbinske kiseline te se titriralo otopinom 2,6-diklorfenolindofenola do pojave ružičaste boje koja mora biti postojana. Iz podatka utrošenog volumena otopine 2,6-diklorfenolindofenola potrebnog za titraciju određene mase askorbinske kiseline izračunao se faktor (F) otopine 2,6-diklorfenolindofenola.

3.7. *Sadržaj ukupnih polifenolnih spojeva mladih izdanaka*

Sadržaj ukupnih polifenola (UF), ukupnih flavonoida (UFL) i ukupnih neflavonoida (UNFL) određen je prema metodi opisanoj od Ough i Amerine (1988) koja se temelji na obojanoj reakciji koju polifenoli razvijaju s Folin-Ciocalteu (FC) reagensom. Za svaki uzorak biljnog materijala odvagano je 10 g $\pm 0,01$ i homogenizirano s 40 mL 80 % EtOH (v/v), zagrijano do točke vrenja nakon čega je uz povratno hladilo zagrijavano 10 min (refluks metoda). Nakon 10 min uzorci su profiltrirani kroz Whatman papir, a ostatku je dodan volumen od 50 mL 80% EtOH (v/v) te su ponovno refkulsirani 10 minuta. Uzorci su ponovno filtrirani u odmjernu tikvicu od 100 mL te je tikvica dopunjena do oznake s 80 % EtOH (v/v). Za reakciju s FC reagensom, u odmjernu tikvicu od 50 mL dodano je redom: 0,5 mL etanolnog ekstrakta, 30 mL destilirane vode, 2,5 mL svježe pripremljenog FC reagensa (1:2, v/v), 7,5 mL zasićenog otopine natrijevog karbonata (Na₂CO₃). Tikvica je dopunjena destiliranom vodom do oznake i

ostavljena da odstoji na sobnoj temperaturi 2 sata uz povremeno mućkanje, a nakon čega je nastalo oboljenje očitano spektrofotometrom (Shimadzu, 1900i, Kyoto, Japan) na valnoj duljini od 750 nm koristeći destiliranu vodu kao slijepu probu.

Za određivanje UNFL korišten je isti etanolni ekstrakt pripremljen za UF. U odmjernu tikvicu od 25 mL dodano je 10 mL etanolnog ekstrakta, 5 mL klorovodične kiseline (HCl) u EtOH (1:4, v/v) i 5 mL formaldehida. Pripremljeni uzorci propuhani su dušikom (N₂), ostavljeni na tamnom mjestu na sobnoj temperaturi 24 sata nakon čega su filtrirani. Provedena je ista FC reakcija kao i za UF.

Iz razlike sadržaja UF i UNFL izračunat je sadržaj UFL. Kao vanjski standardi korišteni su galna kiselina i katehol. UF, UNFL i UFL izraženi su kao miligrami ekvivalenta galne kiseline (GAE) i katehola (CTH) na 100 g svježe tvari (sv.t.).

3.7.1. Određivanje ukupnih antocijana mladih izdanaka

Sadržaj ukupnih antocijana (UA) određen je metodom izbjeljivanja bisulfitom prema Ough i Amerine (1988). Metoda se temelji na vezanju bisulfitnih iona na odvagano je izvagano 2 g uzorka svake pojedine vrste mladih izdanaka i dodano je 2 mL 0,1% HCl (96 % EtOH, v/v) i 40 mL 2 % HCl (v/v). Tako pripremljeni uzorci centrifugirani (Hettich Zentrifugen, D-78532, Tuttlingen, Njemačka) su 10 min pri 4500 okretaja u minuti, nakon čega je bistri dio odvojen i po 10 mL uzorka je otpipetirano u epruvete. U jednu epruvetu dodano je 4 mL destilirane vode (slijepa proba), a u drugu 4 mL svježe pripremljenog 15 % NaHSO₃ (v/v). Nakon inkubacije od 15 minuta na sobnoj temperaturi, razlike u apsorbanciji izmjerene su spektrofotometrijski pri 520 nm (Shimadzu, 1900i, Kyoto, Japan). Za slijepu probu korištena je 2 % HCl (v/v). Sadržaj antocijana izračunat je prema jednadžbi (5):

$$UA \text{ (mg/L)} = 615 \times (A_1 - A_2) \quad (5)$$

gdje je 615 faktor pretvorbe; A₁ je apsorbancija slijepa probe; A₂ je apsorbancija uzorka s dodatkom 15 % NaHSO₃.

3.8. Određivanje sadržaja fotosintetskih pigmenata mladih izdanaka

Prema metodi koju su opisali Holm (1954) i Wetstein (1957) analizirani su ukupni klorofili (UKI), klorofil a (KI_a), klorofil b (KI_b) i ukupni karotenoidi (UKa). Odvagan je svježi biljni materijal svakog uzorka u količini od 0,2 g ± 0,01 g. Ukupni

volumen od 15 mL acetona dodan je u tri navrata. Nakon svakog dodavanja uzorci su homogenizirani pomoću laboratorijskog homogenizatora (IKA, UltraTurax T-18, Staufen, Germany), a konačni sadržaj je filtriran. Vrijednosti apsorbance izmjerene su spektrofotometrijski (Shimadzu, 1900i, Kyoto, Japan) pri valnim duljinama od 662, 644 i 440 nm upotrebom acetona (p.a.) kao slijepe probe. Vrijednosti apsorbancije uključene su u Holm-Wettsteinove jednadžbe (6)-(9):

$$Kl_a = 9,784 \times A_{662} - 0,990 \times A_{644} \text{ (mg/L)} \quad (6)$$

$$Kl_b = 21,426 \times A_{644} - 4,65 \times A_{662} \text{ (mg/L)} \quad (7)$$

$$UKl = 5,134 \times A_{662} + 20,436 \times A_{644} \text{ (mg/L)} \quad (8)$$

$$UKa = 4,695 \times A_{440} - 0,268 \times TCh \text{ (mg/L)} \quad (9)$$

Brojevi u jednadžbama su molarni apsorpcijski koeficijenti o Holmu i Wettsteinu.

Formula (10) za izračunavanje koncentracije pigmenta na mg/g svježe tvari glasi:

$$c \text{ (mg/g)} = \frac{c_1 \times V}{m} \quad (10)$$

Gdje je:

c – masena koncentracija pigmenta izražena u mg/g svježe tvari

c₁ – masena koncentracija pigmenta izražena u mg/L

V – volumen filtrata (odmjerne tikvice) u mL

m – masa uzorka izražena u mg

Rezultati sadržaja fotosintetskih pigmenta izraženi su u mg/g svježe tvari (sv.t.).

3.9. *Određivanje antioksidacijskog kapaciteta mladih izdanaka*

ABTS metoda korištena je za određivanje antioksidacijskog kapaciteta. Metoda se provodi pomoću kationskog radikala 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolin-6-sulfonske kiseline). Kation radikala ABTS⁺ reducira se u ABTS u prisutnosti antioksidansa, a reakcija se očituje diskoloracijom plavo-zelene otopine. Za pripremu stabilne ABTS⁺ otopine, u tikvici je pomiješano 88 µl 140 mL otopine K₂S₂O₈ (kalijevog persulfata) s 5 mL ABTS otopine. Dobro pomiješana ABTS⁺ otopina obložena je aluminijskom folijom i ostavljena na sobnoj temperaturi u mraku 12-16 h. Za analizu je pripremljena 1 % otopina ABTS u 96 %-om etanolu u odmjerne tikvici od 100 mL i izmjerena je apsorbancija na 734 nm. Ekstrakt (najbolje je uzeti uzorak iz pripremljenih fenolnih

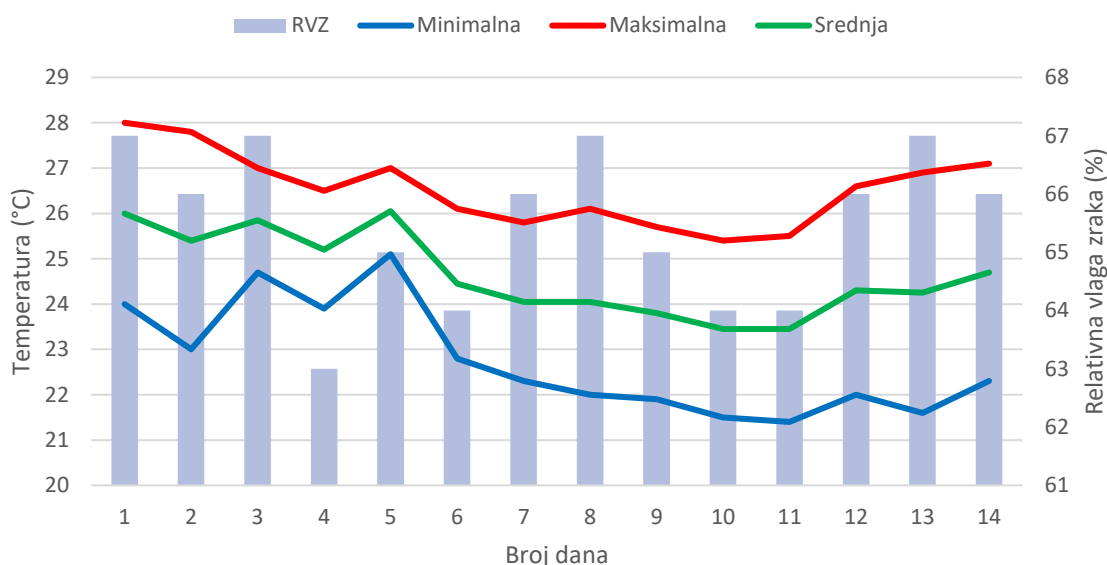
ekstrakata) u količini od 160 μ L pomiješan je s 2 mL 1 % ABTS+ otopine izravno u kivetu. Nakon 5 minuta apsorbancija je izmjerena spektrofotometrijski (Shimadzu, 1900i, Kyoto, Japan) pri valnoj duljini od 734 nm. Kao slijepa proba korišten je 96 %-tni etanol. Kao standard antioksidansa korišten je Trolox (6-hidroksi-2,5,7,8-tetrametilkroman-2-karboksilna kiselina, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA). Konačni rezultati izračunati su na temelju kalibracijske krivulje i izraženi kao μ mol TE/L.

3.10. Statistička analiza

Pokus je postavljen po metodi slučajnog bloknog rasporeda u tri ponavljanja. Statistička analiza dobivenih podataka provedena je prema PROC GLM proceduri u statističkom programu SAS Software v. 14.3. (SAS). Za analizu je korišten generalizirani linearni model, s uključenim ponavljanjem, dopunskim osvjetljenjem i fotoperiodom kao kategorijskim prediktorima, te kombinacijom spektra osvjetljenja i fotoperioda tijekom uzgoja u vertikalnoj farmi. Dobiveni podaci obrađeni su analizom varijance, dok su razlike između srednjih vrijednosti testirane Tukey testom, pri čemu je $p \leq 0,05$ smatrana statističkim pragom značajnosti.

4. ABIOTSKI ČIMBENICI ZAŠTIĆENOG PROSTORA

Vrijednosti temperature i relativne vlage zraka vertikalne farme praćene termohigrometrom tijekom razvojnog ciklusa mladih izdanaka u periodu od 14 dana prikazane su u Grafikonu 1. Prosječna minimalna temperatura zraka u zaštićenom prostoru varirala je od 21,4 °C do 25,1 °C, prosječna maksimalna temperatura od 25,4 °C do 28 °C, dok je prosječna vrijednost srednje temperature iznosila od 23,45 °C do 26,05 °C. Prosječna vrijednost RVZ varirala je od 63 do 67 %. Pri uzgoju mladih izdanaka u zaštićenom prostoru potrebno je osigurati temperaturu zraka u rasponu od 20-25 °C (Senevirathe i sur. 2015, Bulgari i sur. 2017 i Opačić i sur. 2018) i relativnu vlagu zraka u rasponu od 50-60 % (Samuoliene i sur., 2012). Iz prikupljenih podataka je vidljivo kako su minimalne temperature bile unutar preporučenih vrijednosti, dok su maksimalne i srednje prelazile preporučene vrijednosti. Vrijednosti RVZ također su prelazile preporučeni raspon.



Grafikon 1. Abiotiski čimbenici (temperatura i RVZ) u vertikalnoj farmi tijekom uzgoja mladih izdanaka

Izračun gustoće fotosintetskog toka fotona (PPFD) u vertikalnoj farmi prema specifikacijama svjetlećih dioda, uzgojnoj površini od 0,706 m², izvoru napajanja od 150 W i izračunu prema jednadžbama (1-2) prikazan je u Tablici 4. Intenzitet (kvantiteta) svjetlosnog zračenja iznosila je za plavo monokromatsko osvjetljenje 552,41 μmol/s/m², za crveno monokromatsko osvjetljenje 488,67 μmol/m²/s i za

dikromatsko crveno:plavo osvjetljenje 520,54 $\mu\text{mol/s/m}^2$. Preporučeni rasponi intenziteta dopunskog osvjetljenja svjetlećim diodama pri uzgoju mladih izdanaka variraju od 30 do 600 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (Brazaityte i sur., 2015; Gerovac i sur., 2016; Jones-Baumgardt i sur., 2019; Gao i sur., 2021; Cowden i sur., 2024), a prema izračunima iz ovog istraživanja vidljivo je kako je PPF bio u preporučenim rasponima. Intenzitet svjetlosti utječe na prinos, morfološka svojstva i nutritivni sastav biljaka (Toscano i sur., 2021; Liu i sur., 2022) gdje je u nekim istraživanjima veći intenzitet rezultirao višim rezultatima prinosa i sadržajem fitokemikalija (Gao i sur., 2021), dok je pak u nekim istraživanjima rezultirao nižim prinosom i oštećenjima na biljkama (Hernandez-Adsame i sur., 2023). Prema izračunima PPF iz ovog istraživanja može se zaključiti kako vrijednosti nisu značajno varirale ovisno o valnoj duljini, gotovo iste vrijednosti intenziteta utvrđene su za plavo monokromatsko i dikromatsko crveno:plavo osvjetljenje, dok nešto niže za crveno monokromatsko osvjetljenje, no ponovno s naglaskom kako su vrijednosti bile vrlo bliske, Navedeno ukazuje kako ovaj parametar svjetlosti nije značajno varirao tijekom provedbe istraživanja.

Tablica 4. Izračun gustoće fotosintetskog toka fotona po jedinici površine u vertikalnoj farmi

Tretman	12C	12P	12CP	16C	16P	16CP
Valna duljina (nm)	620	450	620+450	620	450	620+450
Učinkovitost ($\mu\text{mol/J}$)	2,3	2,6	2,3+2,6	2,3	2,6	2,3+2,6
PPF ($\mu\text{mol/s}$)	345	390	367,5	345	390	367,5
PPFD ($\mu\text{mol/s/m}^2$)	488,67	552,41	520,54	488,67	552,41	520,54

PPF (engl. *Photosynthetic Photon Flux*) – fotosintetski tok fotona; PPFD (engl. *Photosynthetic Photon Flux Density*) – gustoća fotosintetskog toka fotona po jedinici površine.

5. REZULTATI

Prilikom analize rezultata prinosa biomase mladih izdanaka, sadržaja suhe tvari, vrijednosti kromatskih parametara, sadržaja specijaliziranih metabolita i fotosintetskih pigmenata te antioksidacijskog kapaciteta, vrste istraživanih mladih izdanaka nisu međusobno uspoređivane već je kombinacija variranih valnih duljina i fotoperioda kao faktora dopunskog osvjetljenja promatrana za svaku biljnu vrstu zasebno.

5.1. Ukupan prinos biomase mladih izdanaka

Rezultati analize utjecaja faktora dopunskog osvjetljenja, tj. valne duljine (VD) i fotoperioda (F) na prinos svih uzgajanih vrsta mladih izdanaka prikazani su u Tablici 5. Ovisno o ishodu analize, usporedbe razina faktora, odnosno njihovih kombinacija, prikazane su na Grafikonu 2.

Kod uzgoja **mladih izdanaka rotkvice** nije utvrđena signifikantna razlika u prinosu ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD × F). Također, valna duljina (VD) nije značajno utjecala na prinos istih, dok je od variranih čimbenika jedino fotoperiod (F) pokazao značajan utjecaj. Prilikom uzgoja mladih izdanaka rotkvice u fotoperiodu od 12 h utvrđen je značajno veći prinos, čak 76 % veći, u usporedbi s uzgojem u fotoperiodu od 16 h (Grafikon 2).

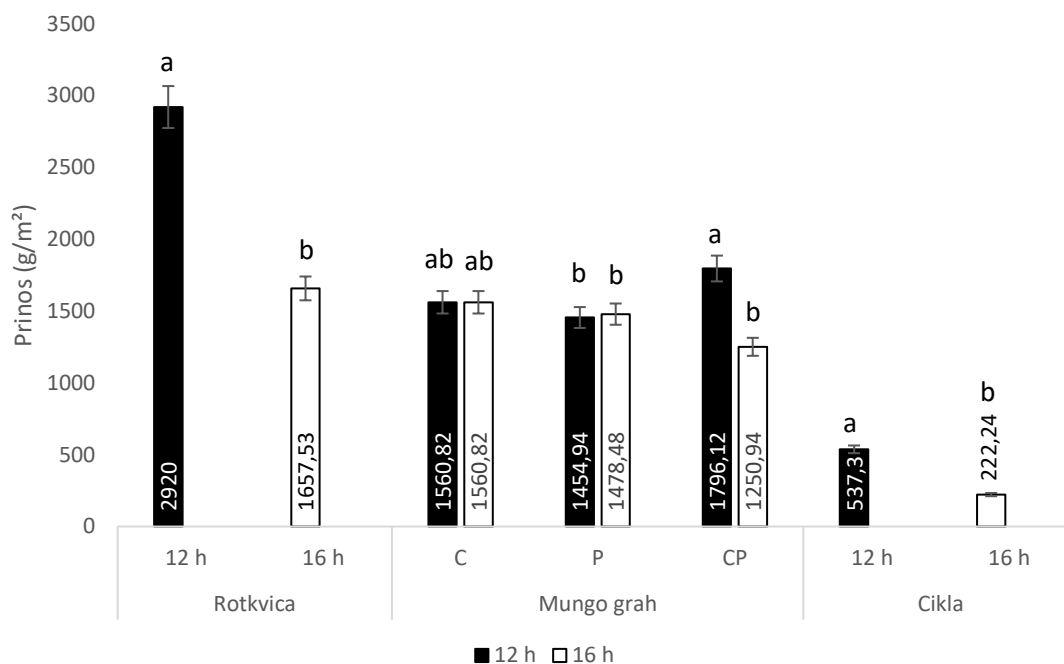
Kod **mladih izdanaka mungo graha**, utvrđena je signifikantna razlika u prinosu ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD × F). Najviši prinos ostvaren je kod dikromatskog crveno:plavog osvjetljenja u fotoperiodu od 12 sati (12CP), dok je najniži prinos zabilježen kod uzgoja pod plavim monokromatskim osvjetljenjem u oba fotoperioda (12P i 16P) te dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 sati (16CP), s prosječnom vrijednosti od 1394,79 g/m² bez statističkih razlika između navedenih varijanti. Kod uzgoja pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem nije bilo značajnih razlika ovisno o variranim fotoperiodima (12C i 16C) te je prosječni utvrđeni prinos za navedene uzorke iznosio 1560,82 g/m².

Prilikom uzgoja **mladih izdanaka cikle**, nije utvrđena signifikantna razlika u prinosu ovisno interakciji valne duljine i fotoperioda (VD × F) te valnoj duljini (VD), dok je statistički opravdan utjecaj utvrđen samo za fotoperiod (F, $p \leq 0,0001$). Općenito, veći prinos zabilježen je kod uzgoja u fotoperiodu od 12 h u usporedbi s prinosom zabilježenim pri uzgoju u fotoperiodu od 16 h.

Tablica 5. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na ukupan prinos biomase mladih izdanaka

	Rotkvica	Mungo grah	Cikla
VD	$p \leq 0,3158$	$p \leq 0,6404$	$p \leq 0,0665$
F	$p \leq 0,0005$	$p \leq 0,0533$	$p \leq 0,0001$
VD × F	$p \leq 0,9570$	$p \leq 0,0239$	$p \leq 0,9044$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD × F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.



Grafikon 2. Usporedbe prinosa biomase mladih izdanaka cikla, mungo graha i rotkvice uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Srednje vrijednosti označene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra.

5.2. Ukupna suha tvar biomase mladih izdanaka

Rezultati analize utjecaja faktora dopunskog osvjetljenja, tj. valne duljine (VD) i fotoperioda (F) na sadržaj ST svih uzgajanih vrsta mladih izdanaka prikazani su u Tablici 6. Ovisno o ishodu analize, usporedbe razina faktora, odnosno njihovih kombinacija, prikazane su na Grafikonu 3.

Pri uzgoju **mladih izdanaka rotkvice**, zabilježene su signifikantne razlike u sadržaju ST ovisno o interakciji valne duljine i fotoperioda (VD × F) (Tablica 6, $p \leq 0,0001$). Najviši sadržaj ST utvrđen je kod mladih izdanaka uzgajanih pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 sati (16C). Suprotno tome, najniži sadržaj ST utvrđen je pri dikromatskom crveno:plavom osvjetljenju u fotoperiodu od 16 sati (16CP). Nije uočena značajna razlika u sadržaju ST kod tretmana 16P (plavo monokromatsko osvjetljenje, 16 h) i 12CP (dikromatsko crveno:plavo osvjetljenje, 12 h), gdje prosječan sadržaj ST iznosi 8,07 %. Tretmani s crvenim i plavim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 sati (12C i 12P) pokazuju prosječan sadržaj ST od 7,13 % bez statistički značajnih razlika između tretmana.

U uzgoju **mladih izdanaka mungo graha**, razlike u sadržaju ST statistički su opravdane u kombinaciji variranih čimbenika, valne duljine i fotoperioda (VD × F) (Tablica 6, $p \leq 0,0001$). Najviši sadržaj ST tako je utvrđen pri dikromatskom crveno:plavom osvjetljenju fotoperioda od 12 sati (12CP). S druge strane, najniži sadržaj ST, zabilježen je pri crvenom monokromatskom osvjetljenju fotoperioda od 12 sati (12C) te pri plavom monokromatskom osvjetljenju u fotoperiodu od 16 sati (16P), bez značajnih razlika između navedenih tretmana, prosječne vrijednosti od 9,6 %. Mladi izdanci uzgajani pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16CP) sadrže 12,98 % ST, dok mladi izdanci uzgajani pod plavim monokromatskim osvjetljenjem s fotoperiodom 12 sati (12P) i crvenim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 sati (16C) imaju prosječan sadržaj od 11,91 % ST, bez statistički značajnih razlika.

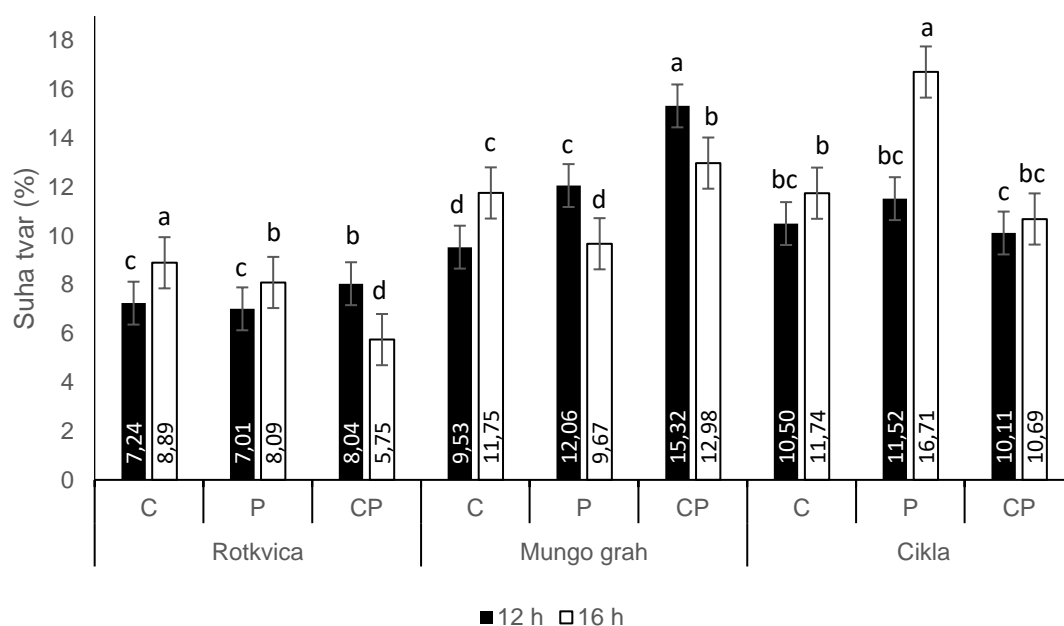
Kod uzgoja **mladih izdanaka cikle**, također su uočene značajne razlike u sadržaju ST ovisno o kombinaciji faktora (VD × F) (Tablica 6, $p \leq 0,0001$). Najviši sadržaj ST utvrđen je pod plavim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 sati (16P), dok je najniži sadržaj ST zabilježen pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 sati (12CP). Izdanci uzgajani pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 sati (16C) imali su sadržaj ST od 11,7 %, dok su izdanci uzgajani pod crvenim i plavim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu 12 sati (12C, 12P) te dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem u

fotoperiodu od 16 sati (16CP) imali prosječni sadržaj ST od 10,91 % bez značajnih razlika između navedenih tretmana.

Tablica 6. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj ST mladih izdanaka

	Rotkvica	Mungo grah	Cikla
VD	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$
F	$p \leq 0,3221$	$p \leq 0,0014$	$p \leq 0,0001$
VD × F	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0014$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD × F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.



Grafikon 3. Usporedbe sadržaja ST biomase mladih izdanaka cikle, mungo graha i rotkvice uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Srednje vrijednosti ozančene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra.

5.3. Kromatski parametri analiziranih vrsta mladih izdanaka

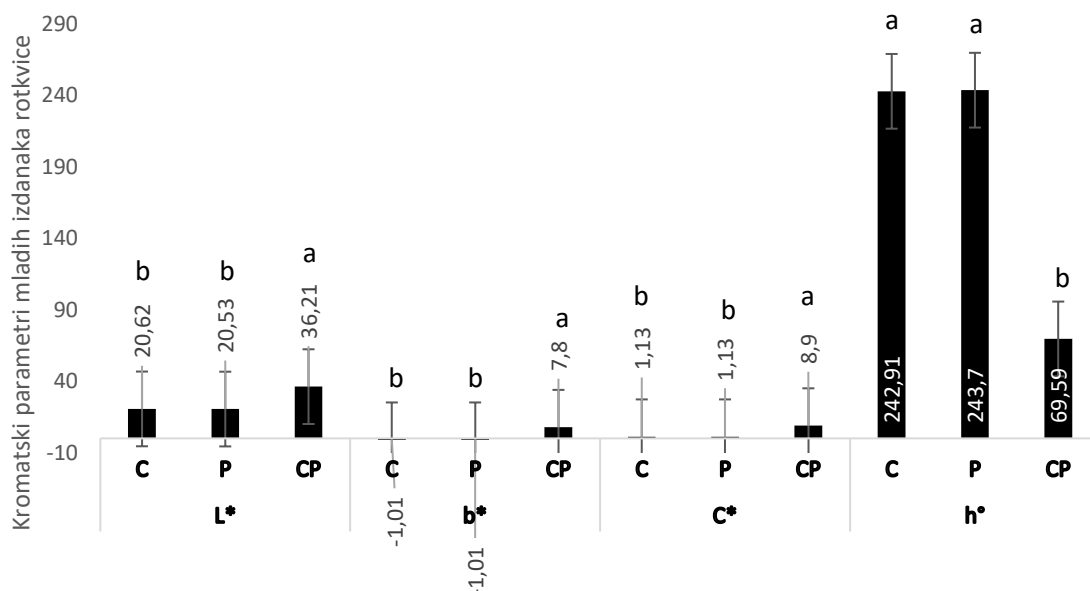
U uzgoju **mladih izdanaka rotkvice** značajne razlike u vrijednostima kromatskih parametara nisu utvrđene kombinacijom valne duljine i fotoperioda (VD × F), već je signifikantan utjecaj utvrđen samo za valnu duljinu (VD) ($p \leq 0,0001$) i to za sve promatrane kromatske parametre uz izuzetak a* vrijednosti, a za koju nije utvrđen značajan utjecaj niti interakcije faktora niti zasebno promatranih varijanti valnih duljina niti fotoperioda (Tablica 7). Tako je najviša L* vrijednost zabilježena uzgojem pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem (CP). Nasuprot tome, najniža L* vrijednost

utvrđena je uzgojem pod crvenim (C) i plavim (P) monokromatskim osvjetljenjem bez značajnih razlika između tretmana, s prosječnom vrijednošću od 20,58. Vrijednost a^* nije se statistički razlikovala ovisno o svim varijantama valne duljine i fotoperioda, a vrijednosti su varirale od -0,52 do 1,85. Opravdano najviša b^* vrijednost utvrđena je uzgojem pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem, dok su najniže b^* vrijednosti, prosječno -1,01, zabilježene kod crvenog (C) i plavog (P) monokromatskog osvjetljenja bez značajnih razlika između navedenih svjetlosnih spektara. Najviše C^* vrijednosti također su zabilježene uzgojem pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem, dok su najniže vrijednosti utvrđene pod crvenim (C) i plavim (P) monokromatskim svjetlom, prosječne vrijednosti od 1,13. Najviša vrijednost h° utvrđena je pod crvenim (C) i plavim (P) monokromatskim osvjetljenjem s prosječnom vrijednošću od 243,31 bez značajnih razlika između navedenih varijanti valnih duljina. Najniža h° vrijednost zabilježena je pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem.

Tablica 7. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj kromatskih parametara mladih izdanaka rotkvice

	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
VD	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,2168$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$
F	$p \leq 0,4739$	$p \leq 0,8987$	$p \leq 0,8836$	$p \leq 0,9656$	$p \leq 0,7719$
VD \times F	$p \leq 0,5912$	$p \leq 0,9811$	$p \leq 0,9770$	$p \leq 0,9980$	$p \leq 0,9433$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD \times F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.



Grafikon 4. Usporedbe kromatskih parametara biomase mladih izdanaka rotkvice uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

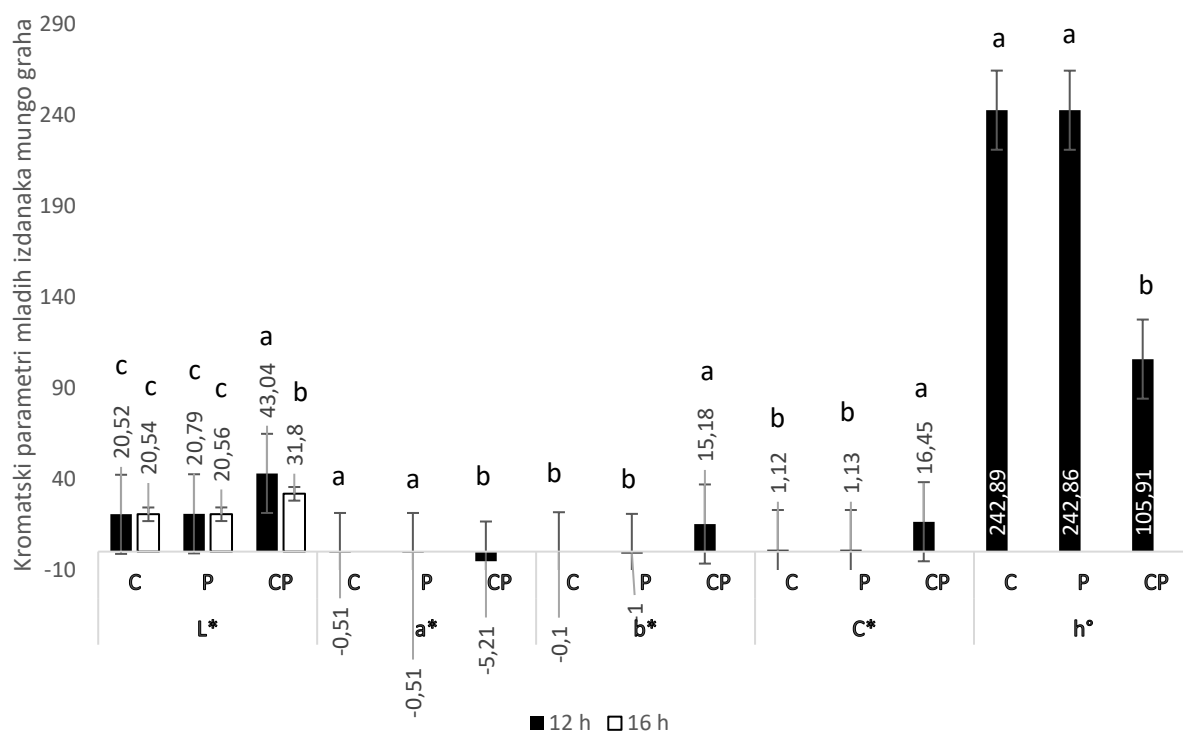
Srednje vrijednosti označene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra.

Prilikom uzgoja **mladih izdanaka mungo graha** signifikantan utjecaj kombinacije valne duljine i fotoperioda (VD x F) ($p \leq 0,0060$) zabilježen je samo za vrijednost L^* , dok je za vrijednosti a^* , b^* , C^* i h° utvrđen opravdan utjecaj samo valne duljine (VD) od ostalih variranih čimbenika (Tablica 8). Najviša L^* vrijednost utvrđena je prilikom uzgoja dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 h (12CP), dok je najniža L^* vrijednost zabilježena pri uzgoju pod crvenim i plavim monokromatskim osvjetljenjem u oba fotoperioda (12C, 12P, 16C, 16P), pri čemu nisu utvrđene signifikantne razlike između navedenih tretmana, s prosječnom utvrđenom vrijednosti od 20,6. Kao što je navedeno, od kombiniranih faktora na vrijednost a^* opravdano je utjecala samo VD, a prilikom čega je najniža a^* vrijednost zabilježena pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem, dok su kod crvenog i plavog monokromatskog osvjetljenja utvrđene značajno više vrijednosti bez statističke razlike između navedenih svjetlosnih tretmana, prosječne vrijednosti od -0,51. Najviša b^* vrijednost utvrđena je pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem, prosječne vrijednosti od 15,18. Najniža b^* vrijednost zabilježena je pod crvenim (C) i plavim (P) monokromatskim osvjetljenjem, s prosječnom vrijednosti od -0,6, također bez značajnih razlika između navedenih svjetlosnih tretmana. Najviša C^* vrijednost zabilježena je kod tretmana dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem, prilikom čega je prosječna vrijednost iznosila 16,45. Najniža C^* vrijednost (1,13) zabilježena je kod uzgoja pod crvenim (C) i plavim (P) monokromatskim osvjetljenjem, također bez značajnih razlika između navedenih tretmana. Najviša vrijednost h° zabilježena je kod tretmana s crvenim (C) i plavim (P) monokromatskim osvjetljenjem, pri čemu nisu uočene značajne razlike između navedenih tretmana, s prosječnom vrijednosti od 242,88. Najniža vrijednost h° zabilježena je pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem. Prema rezultatima o utjecaju pojedinačnih faktora (Grafikon 5), za kromatske parametre kod kojih kombinacija VD x F nije imala značajan utjecaj, od zasebnih čimbenika vidljiv je značajan utjecaj valne duljine, a prilikom čega su najviše b^* i C^* vrijednosti zabilježene kod dikromatsko crveno:plavog osvjetljenja, a najviše a^* i h° vrijednosti kod crvenog (C) i plavog (P) monokromatskog osvjetljenja, dok za fotoperiod (F) nije utvrđen signifikantan utjecaj.

Tablica 8. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj kromatskih parametara mladih izdanaka mungo graha

	L*	a*	b*	C*	h°
VD	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0404$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$
F	$p \leq 0,0124$	$p \leq 0,6976$	$p \leq 0,7915$	$p \leq 0,9714$	$p \leq 0,7963$
VD × F	$p \leq 0,0060$	$p \leq 0,8555$	$p \leq 0,9332$	$p \leq 0,9990$	$p \leq 0,9254$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD × F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.



Grafikon 5. Usporedbe kromatskih parametara biomase mladih izdanaka mungo graha uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Srednje vrijednosti označene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra.

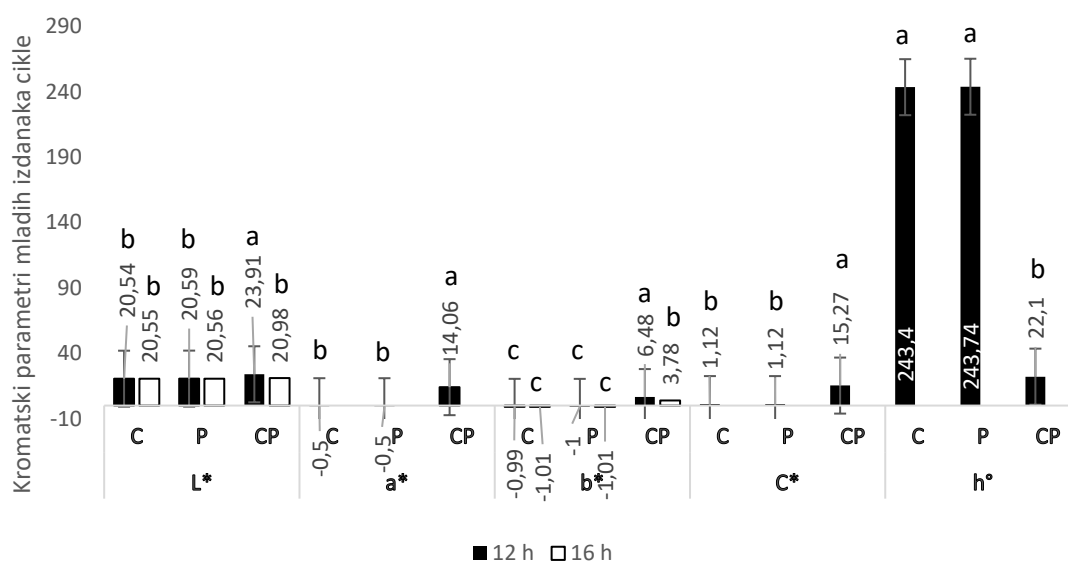
Prilikom uzgoja **mladih izdanaka cikla** značajne razlike u vrijednosti L* i b* utvrđene su kombinacijom valne duljine i fotoperioda (VD × F) ($p \leq 0,0034$; $p \leq 0,0295$), dok su značajne razlike a*, C* i h° vrijednosti utvrđene samo o valnoj duljini (VD) ($p \leq 0,0001$) (Tablica 9). Najviša L* vrijednost zabilježena je uzgojem pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 12 sati (12CP), dok su najniže L* vrijednosti zabilježene u uzgoju pod crvenim i plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 i 16 sati (12C, 12P, 16C, 16P) te dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 16 sati (16CP), bez značajnih vrijednosti između navedenih tretmana, a prosječna vrijednost iznosila je 20,64. Najviša a* vrijednost utvrđena je u uzgoju pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem, dok je najniža a* vrijednost

utvrđena uzgojem pod crvenim (C) i plavim (P) monokromatskim osvjetljenjem bez značajne razlika između tretmana, s prosječnom vrijednosti od -0,5. Za b* vrijednost, ponovno je kombinacija VD×F imala značajan utjecaj te je najviša b* vrijednost zabilježena kod uzgoja pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12CP), a najniža u uzgoju pod crvenim i plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda 12 i 16 sati (12C, 12P, 16C, 16P), bez značajnih razlika između navedenih tretmana prosječne vrijednosti od -1,01. Najviša C* vrijednost zabilježena je pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem, a najniža C* vrijednost pod crvenim (C) i plavim (P) monokromatskim osvjetljenjem, bez značajnih razlika između navedenih tretmana, s prosječnom vrijednošću od 1,12. Najviša vrijednost h° utvrđena je kod uzgoja pod crvenim (C) i plavim (P) monokromatskim osvjetljenjem, bez značajnih razlika između navedenih valnih duljina s prosječnom vrijednošću od 243,57, dok je najniža h° vrijednost utvrđena kod uzgoja pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem.

Tablica 9. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj kromatskih parametara mladih izdanaka cikla

	L*	a*	b*	C*	h°
VD	$p \leq 0,0005$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$
F	$p \leq 0,0086$	$p \leq 0,4799$	$p \leq 0,0458$	$p \leq 0,6754$	$p \leq 0,1610$
VD × F	$p \leq 0,0034$	$p \leq 0,6096$	$p \leq 0,0295$	$p \leq 0,8346$	$p \leq 0,0968$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD × F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.



Grafikon 6. Usporedbe kromatskih parametara biomase mladih izdanaka cikla uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)
Srednje vrijednosti označene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra.

5.4. *Specijalizirani metaboliti mladih izdanaka*

Prilikom uzgoja **mladih izdanaka rotkvice** značajne razlike u sadržaju AK utvrđene su ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD × F) ($p \leq 0,0001$) (Tablica 10). Tako je najviši sadržaj AK zabilježen pri uzgoju pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12CP) i crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16C), pri čemu nije uočena značajna razlika između tih tretmana, s prosječnim sadržajem AK od 75,39 mg/100 g sv.t. Najniži sadržaj AK utvrđen je uzgojem pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 12 sati (12C). Nisu utvrđene značajne razlike u sadržaju AK u uzorcima uzgajanim pod plavim monokromatskim osvjetljenjem ovisno o variranim fotoperiodima (12P i 16P) s prosječno utvrđenim sadržajem AK od 50,21 mg/100 g sv.t. Značajne razlike u sadržaju UF, UNFL i UFL (Tablica 10) također su utvrđene ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD × F) ($p \leq 0,0005$; $p \leq 0,0001$; $p \leq 0,0001$). Najviši sadržaj UF zabilježen je uzgojem pod plavim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 sati (16P), dok je najniži sadržaj UF zabilježen pod crveno:plavim dikromatskim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 16 sati (16CP). Signifikantne razlike u sadržaju UF nisu utvrđene između tretmana crvenim monokromatskim, plavim monokromatskim te dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 h (12C, 12P i 12CP) i crvenim monokromatskim u fotoperiodu od 16 h (16C) pri čemu je prosječni sadržaj navedenih tretmana iznosio 199,41 mg GAE/100 g sv.t. Najviši sadržaj UNFL zabilježen je u uzgoju pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16C), dok je najniži sadržaj UNFL zabilježen pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16CP). Mladi izdanci uzgajani pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 sati (12C) i plavim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 sati (16P) nisu se značajno razlikovali u sadržaju UNFL (sadrže u prosjeku 150,81 mg GAE/100 g sv.t.). Niži sadržaji UNFL od gore navedenih još su utvrđeni kod uzoraka uzgajanih pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 12 sati (12CP) te kod uzoraka uzgajanih pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12P). Najviši sadržaj UFL utvrđen je u uzgoju pod plavim monokromatskim

osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 sati (16P), dok je najniži sadržaj UFL utvrđen u uzgoju pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 i 16 sati (12C, 16C) te dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16CP) bez značajnih razlika između navedenih tretmana, s prosječnim sadržajem od 39,67 mg GAE/100 g sv.t. Također, sadržaj UFL u mladim izdancima uzgajanim pod plavim monokromatskim i dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 sati (12P, 12CP) nisu se statistički razlikovali i sadrže u prosjeku 69,82 mg GAE/100 g sv.t. UFL.

Tablica 10. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka rotkvice

	AK	UF	UNFL	UFL
VD	$p \leq 0,0472$	$p \leq 0,0007$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$
F	$p \leq 0,8580$	$p \leq 0,6230$	$p \leq 0,0242$	$p \leq 0,0109$
VD × F	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0005$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD × F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.

Tablica 11. Sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka rotkvice

Tretman	AK (mg/100 g sv.t.)	UF (mg GAE/100 g sv.t.)	UNFL (mg GAE/100 g sv.t.)	UFL (mg GAE/100 g sv.t.)
12 h				
C	25,57 ± 4,35 ^d	187,79 ± 0,71 ^b	151,02 ± 0,69 ^b	36,77 ± 0,3 ^c
P	54,16 ± 5,28 ^b	202,9 ± 0,35 ^b	132,15 ± 0,34 ^d	70,75 ± 0,66 ^b
CP	77,48 ± 3,36 ^a	204,71 ± 1,83 ^b	135,83 ± 0,62 ^c	68,88 ± 1,76 ^b
16 h				
C	73,29 ± 8,77 ^a	202,23 ± 7,5 ^b	161,54 ± 3,04 ^a	40,69 ± 7,42 ^c
P	46,26 ± 1,43 ^b	248,97 ± 33,89 ^a	150,59 ± 2,73 ^b	78,37 ± 3,47 ^a
CP	36,37 ± 5,6 ^c	154,7 ± 0,23 ^c	113,27 ± 1,51 ^e	41,54 ± 1,65 ^c

Rezultati su izraženi kao srednja vrijednost ± standardna devijacija. Srednje vrijednosti označene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra. AK – askorbinska kiselina, UF – ukupni fenolni sastav, UNFL – ukupni sastav neflavonoida, UFL – ukupni sastav flavonoida.

Kod uzgoja **mladih izdanaka mungo graha** značajne razlike u sadržaju AK utvrđene su ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD × F) ($p \leq 0,0088$) (Tablica 12). Najviši sadržaj AK zabilježen je pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 16 sati (16C), dok je najniži sadržaj zabilježen u uzorcima uzgajanim pod plavim monokromatskim osvjetljenjem tijekom fotoperioda 16 sati (16P). U uzgoju pod plavim monokromatskim (12P) i dikromatskim crvenim:plavim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 12 sati (12CP) nije utvrđena značajna razlika u sadržaju AK, a prosječni sadržaj iznosio je 50,55 mg/100 g sv.t. Također, nije uočena

značajna razlika u sadržaju AK između tretmana crvenim monokromatskim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 12 sati (12C) i dikromatskog crveno:plavog fotoperioda od 16 sati (16CP), a prilikom čega prosječan sadržaj iznosi 43,39 mg/100 g sv.t. Značajne razlike u sadržaju UF, UNFL i UFL utvrđene su također ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD × F) ($p \leq 0,0001$). Najviši sadržaj UF utvrđen je pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16C), zatim su niže vrijednosti utvrđene prilikom uzgoja mladih izdanaka pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16CP) i kod uzgoja pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12P) s opravdanim razlikama između navedenih tretmana. Nadalje, ponovno niži sadržaj UF od gore navedenih utvrđen je u uzgoju pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12CP) i pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16P) bez značajnih razlika između ovih tretmana (prosječne vrijednosti između tretmana od 187,52 mgGAE/100 g sv.t.), dok je najniži sadržaj zabilježen u uzorcima pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12C). Najviši sadržaj UNFL utvrđen je pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 16 sati (16C), dok je najniži sadržaj utvrđen u izdancima uzgajanim pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12C). Mladi izdanci uzgajani pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16CP) sadrže 120,1 mg GAE/100 g sv.t. UNFL, dok izdanci uzgajani pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12CP) sadrže 109,16 mg GAE/100 g sv.t. UNFL. U uzgoju pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 i 16 sati (12P, 16P) nisu utvrđene značajne razlike u sadržaju UNFL (prosječan sadržaj iznosi 101,23 mg GAE/100 g sv.t.). Najviši sadržaj UFL utvrđen je u uzgoju pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16C), dok je najniži utvrđen pod istim osvjetljenjem, ali u fotoperiodu od 12 sati (12C). Izdanci uzgajani pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 i 16 sati (12P, 16P), kao i oni pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16CP) nisu se međusobno značajno razlikovali u sadržaju UFL, utvrđene prosječne vrijednosti od 87,71 mg GAE/100 g sv.t.

Tablica 12. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka mungo graha

	AK	UF	UNFL	UFL
VD	$p \leq 0,0159$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0029$
F	$p \leq 0,2732$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$
VD × F	$p \leq 0,0088$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD × F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.

Tablica 13. Sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka mungo graha

Tretman	AK (mg/100 g sv.t.)	UF (mg GAE/100 g sv.t.)	UNFL (mg GAE/100 g sv.t.)	UFL (mg GAE/100 g sv.t.)
12 h				
C	46,49 ± 6,97 ^{cb}	139,33 ± 0,65 ^e	75,13 ± 1,22 ^e	64,2 ± 1,15 ^d
P	50,56 ± 5,09 ^b	191 ± 0,64 ^c	103,23 ± 0,95 ^d	87,78 ± 1,38 ^b
CP	50,53 ± 8,91 ^b	187,71 ± 1,24 ^d	109,16 ± 2,29 ^c	78,56 ± 3,52 ^c
16 h				
C	61,74 ± 8,39 ^a	223,96 ± 0,98 ^a	126,48 ± 0,9 ^a	97,49 ± 1,02 ^a
P	38,67 ± 3,77 ^c	187,32 ± 0,93 ^d	99,22 ± 5,44 ^d	88,1 ± 4,55 ^b
CP	40,29 ± 3,36 ^{cb}	207,56 ± 1,31 ^b	120,1 ± 1,42 ^b	87,25 ± 2,53 ^b

Rezultati su izraženi kao srednja vrijednost ± standardna devijacija. Srednje vrijednosti označene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra. AK – askorbinska kiselina, UF – ukupni fenolni sastav, UNFL – ukupni sastav neflavonoida, UFL – ukupni sastav flavonoida.

Prilikom uzgoja **mladih izdanaka cikla** značajne razlike u sadržaju AK utvrđene su ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD × F) (Tablica 14). Najviši sadržaj AK utvrđen je u uzgoju pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 12 h (12CP). Signifikantne razlike u sadržaju AK nisu utvrđene između tretmana crvenim (12C) i plavim monokromatskim u fotoperiodu od 12 h (12P), crvenim monokromatskim (16C), plavim monokromatskim (16P) te dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 h (16CP), a čiji prosječni sadržaj iznosi 51,76 mg/100 g sv.t. Značajne razlike u sadržaju UF, UNFL, UFL također su utvrđene ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD × F) ($p \leq 0,0001$). Najviši sadržaj UF zabilježen je u izdancima uzgajanim pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda 16 h (16C). Nešto niže vrijednosti UF utvrđene su pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda 16 h (16P), dok su još niže vrijednosti zabilježene pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda 12 h (12P) te pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda 12 h (12C). Sadržaj UF dodatno je bio niži pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 16 h (16CP), a konačno najniže vrijednosti UF utvrđene su pod istim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 h (12CP). Utvrđene razlike među vrijednostima bile su opravdane. Najviši sadržaj UNFL utvrđen je u mladim izdancima uzgojanim pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16P). Opravdano niži sadržaj utvrđen je pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16C), a opravdano još niži pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16CP). Daljnje signifikantno sniženje sadržaja UNFL zabilježeno je pod plavim monokromatskim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 12 sati (12P), zatim još niže pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 12 sati (12C), dok je najniži sadržaj utvrđen uzgojem pod dikromatskim

crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 12 sati (12CP). Najviši sadržaj UFL zabilježen je u mladim izdancima uzgojenim pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda 16 h (16C), zatim opravdano niže vrijednosti pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda 16 h (16P), dok su statistički još niže vrijednosti UFL zabilježene pod plavim monokromatskim (12P) i dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 12 h (12CP) bez značajne razlike između tretmana 12P i 12CP. Uzorci uzgajani pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda 12 h (12C) imali su opravdano još niže vrijednosti UFL, dok je najniži sadržaj UFL zabilježen u uzgoju pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 16 h (16CP). Na sadržaj UA nije značajno utjecala kombinacija valne duljine i fotoperioda ($VD \times F$) ($p \leq 0,0624$), ali isto tako niti jedan od zasebnih faktora (VD, F), iako su statističkom analizom rezultata zabilježene manje razlike u sadržaju UA ovisno o valnoj duljini (rezultati nisu prikazani u tablici). Naime, analitičkom analizom sadržaj UA u vrijednosti od 2,67 mg/L zabilježen je jedino mladim izdancima cikla uzgojenim pod plavim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 h (12P).

Tablica 14. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka cikla

	AK	UF	UNFL	UFL	UA
VD	$p \leq 0,0024$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0624$
F	$p \leq 0,2998$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0321$	$p \leq 0,0840$
VD \times F	$p \leq 0,0088$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0624$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD \times F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.

Tablica 15. Sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka cikla

Tretman	AK (mg/100 g sv.t.)	UF (mg GAE/100 g sv.t.)	UNFL (mg GAE/100 g sv.t.)	UFL (mg GAE/100 g sv.t.)
12 h				
C	48,26 ± 1,42 ^b	218,2 ± 0,64 ^d	117,77 ± 0,32 ^e	100,43 ± 0,96 ^d
P	44,16 ± 7,65 ^b	231 ± 5,4 ^c	121,94 ± 0,99 ^d	109,07 ± 5,84 ^c
CP	90,16 ± 24,08 ^a	201,91 ± 0,19 ^f	96,38 ± 0,48 ^f	105,53 ± 0,66 ^c
16 h				
C	59,52 ± 4,48 ^b	323,50 ± 2,25 ^a	183,17 ± 0,19 ^b	140,33 ± 2,14 ^a
P	49 ± 11,22 ^b	311 ± 2,57 ^b	192,52 ± 0,57 ^a	118,5 ± 2 ^b
CP	57,88 ± 15,31 ^b	207,76 ± 0,79 ^e	143,22 ± 0,62 ^c	64,54 ± 0,43 ^e

Rezultati su izraženi kao srednja vrijednost ± standardna devijacija. Srednje vrijednosti označene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra. AK – askorbinska kiselina, UF – ukupni fenolni sastav, UNFL – ukupni sastav neflavonoida, UFL – ukupni sastav flavonoida.

5.5. Fotosintetski pigmenti mladih izdanaka

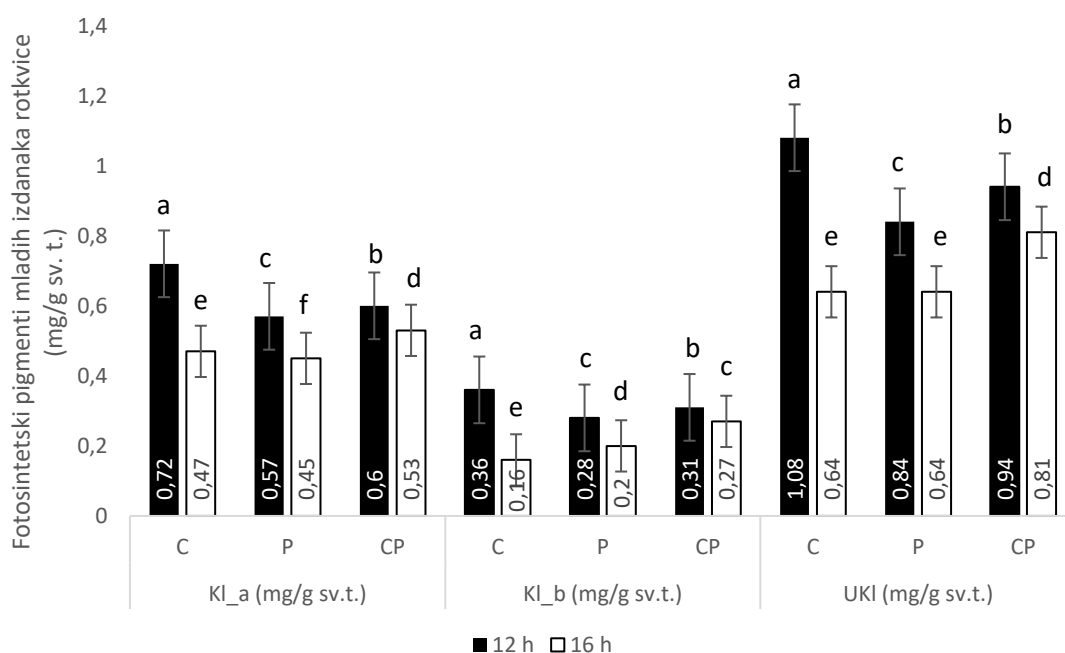
Prilikom uzgoja **mladih izdanaka rotkvice** značajne razlike u sadržaju fotosintetskih pigmenata (Kl_a, Kl_b i UKI) utvrđene su ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD × F) ($p \leq 0,0001$), dok suprotno nije uočen signifikantan utjecaj kombinacije valne duljine i fotoperioda (VD × F) kao ni zasebno VD i F na sadržaj UKa (Tablica 16). Najviši sadržaj Kl_a utvrđen je u uzgoju pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12C), dok je najniži sadržaj utvrđen pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda 16 h (16P). Mladi izdanci uzgajani pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 h (12CP) imali su viši sadržaj Kl_a u usporedbi s izdancima uzgajanim pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda 12 h (12P). Također, sadržaj Kl_a bio je opravdano viši kod izdanaka uzgajanih pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16CP) u odnosu na izdanke uzgajane pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem u istom fotoperiodu (16C). U uzorcima uzgajanim pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12C) utvrđen je najviši sadržaj Kl_b. Izdanci uzgajani pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 12 sati (12CP) imali su opravdano niže vrijednosti u usporedbi s 12C, no statistički više vrijednosti od onih utvrđenih u mladim izdancima uzgojenim pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12P) i dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 16 sati (16CP), te pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16P). Pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16C) utvrđen je najniži sadržaj Kl_b mladih izdanaka rotkvice. Najviši sadržaj UKI zabilježen je u izdancima uzgojenim pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati

(12C). Uzorci uzgajani pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12CP) sadrže nešto niže vrijednosti, dok izdanci uzgajani pod plavim monokromatskim osvjetljenjem (12P) još niže. U uzrocima uzgajanim pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16CP) utvrđene su značajno niže vrijednosti u usporedbi s gore navedenim. Najniži sadržaj UKI utvrđen je u izdancima uzgojanim pod crvenim i plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16C, 16P) bez opravdane razlike između navedenih tretmana s prosječnim sadržajem od 0,64 mg/g sv.t.

Tablica 16. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj pigmentnih spojeva mladih izdanaka rotkvice

	KI_a	KI_b	UKI	UKa
VD	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,1681$
F	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,1453$
VD × F	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,6757$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD × F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.



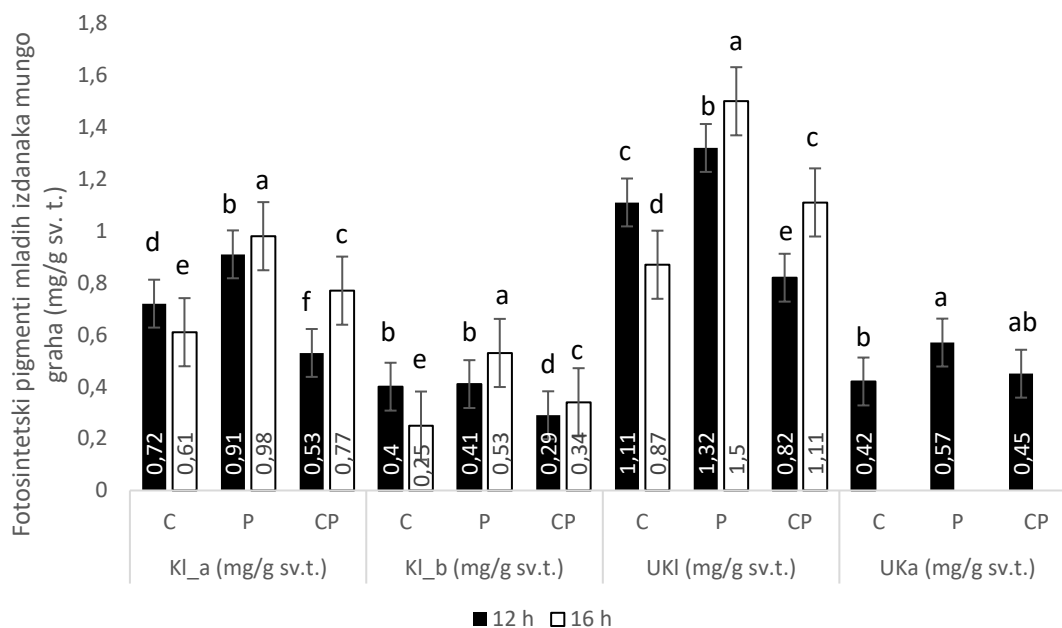
Grafikon 7. Usporedbe sadržaja fotosintetskih pigmenta biomase mladih izdanaka rotkvice uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h) Srednje vrijednosti označene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra.

Prilikom uzgoja **mladih izdanaka mungo graha** značajne razlike sadržaja KI_a, KI_b i UKI (Tablica 17) utvrđene su ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD×F) ($p \leq 0,0001$). Nasuprot tome, u sadržaju UKa nisu zabilježene značajne razlike ovisno o kombinaciji ovih čimbenika, ali niti s fotoperiodom (F), već isključivo s valnom duljinom (VD) ($p \leq 0,0439$). Na temelju dobivenih rezultata, utvrđeno je da uzorci uzgojeni pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 h (16P) imaju najviši sadržaj KI_a. Sadržaj KI_a bio je opravdano niži pod plavim monokromatskim osvjetljenjem s fotoperiodom od 12 h (12P), dok je dodatno smanjenje zabilježeno pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem s fotoperiodom od 16 h (16CP). Izdanci uzgajani pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 h (12C) imali su još niže vrijednosti, dok su niže razine KI_a utvrđene pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 h (16C). Najniži sadržaj KI_a zabilježen je pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12CP). Najviši sadržaj KI_b utvrđen je pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 h (16P). Sadržaj KI_b u mladim izdancima uzgajanim pod crvenim i plavim monokromatskim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 12 h (12C, 12P) nije se značajno razlikovao ovisno o navedenim tretmanima, prosječnog sadržaja od 0,41 mg/g sv.t. U mladim izdancima uzgajanim pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 16 h (16CP) sadržaj KI_b bio je niži u odnosu na prethodno navedene tretmane, kao i pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 16 h (16CP), dok je najniži sadržaj KI_b zabilježen pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem (C) tijekom fotoperioda 12 h (12CP). Najviši sadržaj UKI je utvrđen u izdancima uzgajanim pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 h (16P). U izdancima uzgajanim pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12P) sadržaj UKI bio je opravdano niži od gore navedenog tretmana, a dodatno je još niži sadržaj utvrđen pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12C) i dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 16 h (16CP) bez značajnih razlika između tretmana 12 C i 16CP. Najniži sadržaj UKI kod mladih izdanaka mungo graha utvrđen je u izdancima uzgojenim pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 12 h (12CP). Značajno najviši sadržaj UKa zabilježen je pod plavim monokromatskim osvjetljenjem (P), niži kod dikromatskog crveno:plavog osvjetljenja (CP), dok je opravdano najniži sadržaj UKa utvrđen uzgojem pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem (C).

Tablica 17. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj pigmentnih spojeva mladih izdanaka mungo graha

	KI_a	KI_b	UKI	UKa
VD	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0439$
F	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,1676$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0743$
VD × F	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,5718$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD × F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.



Grafikon 8. Usporedbe sadržaja fotosintetskih pigmenta biomase mladih izdanaka mungo graha uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h)

Srednje vrijednosti označene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra.

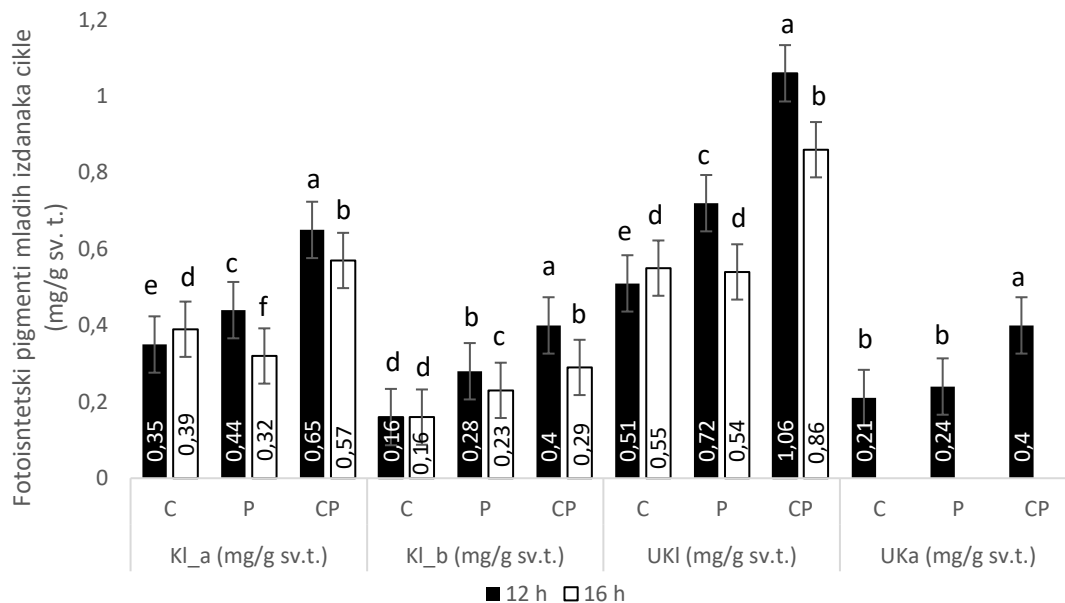
Prilikom uzgoja **mladih izdanaka cikle** (Tablica 18) značajne razlike u sadržaju KI_a, KI_b i UKI utvrđene su ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD × F) ($p \leq 0,0001$), dok je značajna razlika u sadržaju UKa utvrđena samo ovisno o valnoj duljini ($p \leq 0,0001$). Najviši sadržaj KI_a utvrđen je u uzorcima uzgojenim pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12CP). Usporedno s time, sadržaj KI_a bio je opravdano niži u uzorcima uzgajanim pod istim osvjetljenjem, ali s duljim fotoperiodom, od 16 h (16CP). Daljnje smanjenje sadržaja KI_a zabilježeno je pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12P), nadalje statistički niže vrijednosti u uzorcima uzgajanim pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 h (16C) te još niže pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12C). Najniži sadržaj KI_a zabilježen je pod plavim monokromatskim osvjetljenjem tijekom fotoperioda od 16 h (16P). Za KI_b, najviši

sadržaj utvrđen je pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda 12 h (12CP). Zatim opravdano niži sadržaj prosječne vrijednosti od 0,29 mg/g sv.t zabilježen je pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12P) i dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16CP) bez značajnih razlika između navedenih tretmana. Niži sadržaj utvrđen je pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16P), a dok je najniži sadržaj Kl_b utvrđen pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 i 16 sati (12C, 16C), gdje prosječan sadržaj iznosi 0,16 mg/g sv.t. bez značajne razlike između spomenutih tretmana. Najviši sadržaj UKI zabilježen je pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12CP), zatim statistički niži pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12C). Nadalje, daljnje smanjenje sadržaja UKI zabilježeno je pod: dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16CP), još niže vrijednosti pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 sati (12P) te pod crvenim i plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 sati (16C, 16P). Najniže vrijednosti UKI zabilježene su pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12C). Najviši sadržaj UKa utvrđen je uzgojem pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem (CP), dok značajno niže vrijednosti uzgojem pod crvenim (C) i plavim monokromatskim (P) osvjetljenjem bez signifikante razlike između navedenih tretmana valne duljine prosječne vrijednosti UKa od 0,23 mg/g.

Tablica 18. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na sadržaj pigmentnih spojeva mladih izdanaka cikle

	Kl_a	Kl_b	UKI	UKa
VD	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$
F	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,4212$
VD × F	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,3814$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD × F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.



Grafikon 9. Usporedbe sadržaja fotosintetskih pigmenata biomase mladih izdanaka cikla uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h) Srednje vrijednosti označene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra.

5.6. Antioksidacijski kapacitet mladih izdanaka

Rezultati analize utjecaja faktora dopunskog osvjetljenja, tj. valne duljine (VD) i fotoperioda (F) na antioksidacijski kapacitet uzgajanih vrsta mladih izdanaka prikazani su u Tablici 19. Ovisno o ishodu analize, usporedbe razina faktora, odnosno njihovih kombinacija, prikazane su na Grafikonu 10.

Značajne razlike antioksidacijskog kapaciteta **mladih izdanaka rotkvice** utvrđene su ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD × F) ($p \leq 0,0029$). Najviši antioksidacijski kapacitet zabilježen je uzgojem pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12CP). Opravdano niže vrijednosti dalje su zabilježene uzgojem pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12C) i pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 16 h (16CP) bez značajne razlike između navedenih tretmana. Nadalje, u mladim izdancima uzgojenim pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 h (16C) utvrđene su još niže vrijednosti, a daljnje smanjenje antioksidacijskog kapaciteta zabilježeno je pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 h (16P). Najniži antioksidacijski kapacitet uzoraka mladih izdanaka rotkvice utvrđen je pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12P).

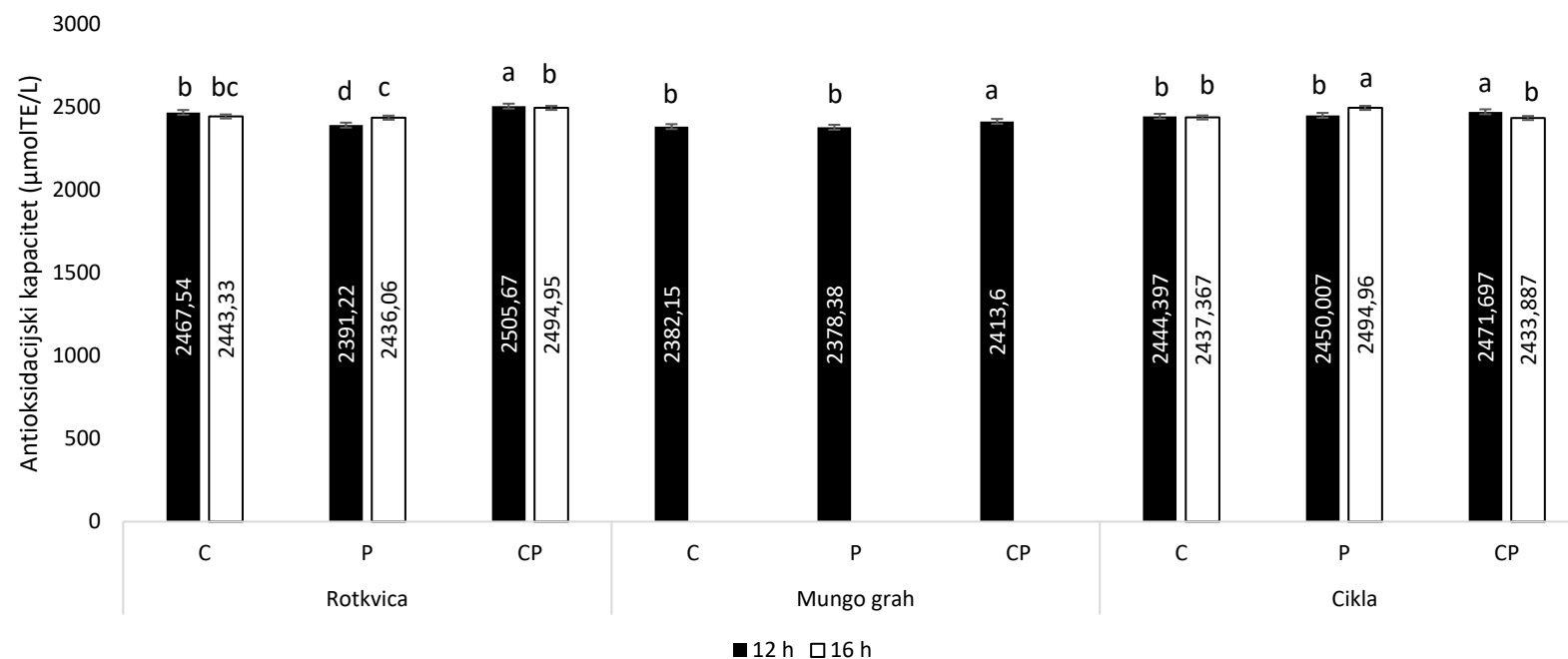
Kod **mladih izdanaka mungo graha**, značajne razlike u antioksidacijskom kapacitetu zabilježene su samo ovisno o valnoj duljini (VD) ($p \leq 0,0240$). Signifikantna razlika nije uočena utjecajem kombinacije valne duljine i fotoperioda (VD x F) i fotoperioda (F) kao zasebno promatranog faktora. Promatrajući utjecaj pojedinačnog faktora valne duljine (Grafikon 10), najviši antioksidacijski kapacitet utvrđen je pri dikromatskom crveno:plavom osvjetljenju (CP), dok opravdano najniži pri crvenom (C) i plavom monokromatskom (P) osvjetljenju prosječne vrijednosti od 2380,27 $\mu\text{molTE/L}$ bez statističke razlike između navedenih spektara valnih duljina.

U **mladim izdancima cikla**, značajne razlike u antioksidacijskom kapacitetu utvrđene su ovisno o kombinaciji valne duljine i fotoperioda (VD x F) ($p \leq 0,0005$). Pritom je najviši antioksidacijski kapacitet zabilježen pod plavim monokromatskim osvjetljenjem fotoperioda od 16 h (16P) i pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem fotoperioda od 12 h (12CP) bez opravdanih razlika između navedenih tretmana, prosječne utvrđene vrijednosti od 2483,33 $\mu\text{molTE/L}$. Najniže vrijednosti antioksidacijskog kapaciteta zabilježene su kod crvenog monokromatskog osvjetljenja fotoperioda od 12 h (12C) i 16 h (16C), plavog monokromatskim osvjetljenja u fotoperiodu od 12 h (12P), te dikromatskog crveno:plavog osvjetljenja fotoperioda od 16 h (16CP), s prosječnom vrijednošću od 2441,42 $\mu\text{molTE/L}$, bez statističke razlike između navedenih tretmana.

Tablica 19. Signifikantnost utjecaja pojedinačnih faktora i njihove interakcije na antioksidacijski kapacitet mladih izdanaka

	Rotkvica	Mungo grah	Cikla
VD	$p \leq 0,0001$	$p \leq 0,0240$	$p \leq 0,0042$
F	$p \leq 0,6244$	$p \leq 0,3199$	$p \leq 0,9951$
VD x F	$p \leq 0,0029$	$p \leq 0,6991$	$p \leq 0,0005$

VD – valna duljina; F – fotoperiod; VD x F – interakcija faktora valna duljina i fotoperiod.



Grafikon 10. Usporedbe antioksidacijskog kapaciteta biomase mladih izdanaka cikle, mungo graha i rotkvice uzgojenih pod tri različita spektra dopunskog osvjetljenja (crveno, plavo, kombinacija crvene i plave svjetlosti) unutar dva fotoperioda (12 h i 16 h) Srednje vrijednosti označene različitim slovima se značajno razlikuju uz $p \leq 0,05$. C – crveni spektar, P – plavi spektar, CP – kombinacija crvenog i plavog spektra

6. RASPRAVA

6.1. *Prinos biomase mladih izdanaka*

Prinos kao ključni čimbenik poljoprivredne proizvodnje, jedan je od glavnih pokazatelja produktivnosti i učinkovitosti pojedinih metoda uzgoja. Za ostvarivanje adekvatnih prinosa, presudan je balans ključnih faktora uzgoja, između kojih primarnu ulogu ima svjetlost. Kvalitetna opskrba svjetlom, biljkama omogućava optimalan rad fotosintetskog aparata, što se očituje na intenzitet fotosinteze, a time i posljedično na adekvatan rast i razvoj biljaka, povećanje biomase, a time i na konačni prinos. Svjetlost različitih valnih duljina, odnosno spektralnih komponenti, ima specifične uloge u regulaciji fotosintetske aktivnosti s naglaskom na crvenu ($\lambda=620$ nm) i plavu svjetlost ($\lambda=450$ nm) koje potiču elongaciju biljnih stanica, a time i izduživanje stabljike, širenje listova, rast pupova i peteljki, razvoj korijena i cvjetova, što naposljetku doprinosi i ukupnom prinosu biomase (Viršile, 2013; Kump, 2020). Nadalje, crvena svjetlost aktivacijom biljnih pigmenata fitokroma, koji iz neaktivnog oblika (Pr) prelaze u biološki aktivan oblik (Prf), potiču i sintezu fotosintetskih pigmenata (posebice klorofila) slijedom čega se povećava intenzitet fotosinteze, a time i proizvodnja asimilata (glukoze) potrebnih za rast i razvoj, što također doprinosi porastu biljne biomase, odnosno ukupnom prinosu (Pevalek-Kozlina, 2003). Odabir valnih duljina dopunskog osvjetljenja i njihovih omjera (monokromatsko, dikromatsko osvjetljenje) pri uzgoju u zaštićenom prostoru u svrhu ostvarivanja adekvatnog prinosa ovisit će i o izboru biljne vrste ovisno o preferencijama iste s obzirom na duljinu dana, odnosno fotoperiod. Dulji fotoperiod (uglavnom iznad 12 h) u pravilu povećava fotosintetsku aktivnost time posredno utječući na intenzivniju elongaciju biljnih stanica i sintezu asimilata što se u konačnici odražava na povećani prinos biljne biomase (Pennisi i sur., 2020). Biljke koje preferiraju kraći fotoperiod (biljke kratkog dana) u slučaju izlaganja duljem fotoperiodu reagiraju suprotno, odnosno dolazi do inhibicije sinteze metabolita i elongacije stanica vegetativnih organa, a što posljedično utječe i na smanjenje prinosa (Zhang i sur., 2021; Wu i sur., 2024). Prema rezultatima ovog istraživanja, kombinacija valne duljine i fotoperioda imala je značajan utjecaj na prinos samo kod uzgoja mladih izdanaka mungo graha, prilikom čega je najviši ostvaren pri dikromatskom crveno:plavom osvjetljenju fotoperioda od 12 h (12CP), dok kod ostalih vrsta taj učinak nije bio značajan. Brojni autori naglašavaju pozitivan utjecaj upravo dikromatskog crveno:plavog osvjetljenja na prinos s naglaskom na značajan utjecaj i biljne vrste,

odnosno genetskih karakteristika (Guo i sur., 2023; Putri i sur., 2023; Kazemi i sur., 2024; Seyed i sur., 2024; Su i sur., 2024; Zhao i sur., 2024).

Kod uzgoja rotkvice i cikle, prinos je prvenstveno bio pod utjecajem fotoperioda (F), koji se pokazao kao odlučujući čimbenik utjecaja na prinos biomase mladih izdanaka spomenutih vrsta. Kao što je već navedeno u gornjem dijelu teksta, fotoperiod je jedan od ključnih čimbenika utjecaja na prinos pri uzgoju dopunskim osvjetljenjem, a čemu u prilog idu i rezultati ovog istraživanja. Naime, prilikom uzgoja mladih izdanaka rotkvice i cikle, fotoperiod je jedini imao opravdan utjecaj na prinos, a prilikom čega je značajno veći prinos i kod rotkvice i cikle ostvaren u kraćem fotoperiodu (12 h) u usporedbi s duljim od 16 h, a što se ne poklapa s preferencijama ovih vrsta za duljinom dana. Rotkvice i cikla su povrtne vrste dugog dana, odnosno za optimalan rast i razvoj, a time i ostvarivanje većih prinosa zahtijevaju dulje periode izlaganju svjetlosti, što nije u suglasju s rezultatima ovog istraživanja. Razlog ovakvog odstupanja može se objasniti dugotrajnim fotoperiodom koji u kombinaciji sa specifičnim svjetlosnim spektrom, odnosno valnom duljinom, može kod biljaka izazvati stanje stresa, osobito ako intenzitet svjetla nije optimalan za biljnu vrstu. Duži fotoperiod bez cikličkih odmora može se odraziti na usporavanje fotosinteze s obzirom da biljke trebaju i tamu za ključne metaboličke procese, a osobito metabolizam ugljikohidrata, (Roeber i sur., 2022), a što se može odraziti i na dinamiku rasta i razvoja bilje, a time i posljedično na ukupni prinos biljne biomase.

6.2. Sadržaj suhe tvari mladih izdanaka

Suha tvar dio je biljnog materijala koji ostaje nakon uklanjanja vode, a sadrži komponente kemijskog sastava poput ugljikohidrata, proteina, masti, vitamina, minerala i ostalih fitonutrijenata, te je važan parametar koji daje uvid u nutritivnu vrijednost i kvalitetu biljnog materijala. Općenito, visok sadržaj suhe tvari ukazuje i na veću koncentraciju hranjivih tvari u biljnom materijalu. Sadržaj suhe tvari u biljci uvjetovan je i procesom fotosinteze (Shiple i Vu, 2022), s obzirom da glukoza, kao glavni produkt primarnog biljnog metabolizma, istovremeno čini značajan dio suhe tvari. Kvaliteta (valna duljina) i kvantiteta (intenzitet) svjetlosti koju biljka prima utječu na stopu fotosinteze, prilikom čega veći intenzitet svjetlosti pozitivno utječe na stopu fotosinteze što posljedično dovodi do povećane proizvodnje ugljikohidrata, a samim time i povećanja sadržaja suhe tvari biljnog materijala (Yavari i sur., 2021). Osim navedenog, duljina izloženosti svjetlu, fotoperiod, posljedično može imati utjecaj na sadržaj suhe tvari (Wen i sur., 2024). Naime, uslijed perioda izlaganja svjetlosti u

biljnom tkivu će se stimulirati fotoreceptori, a time i mehanizmi koji će poticati fotosintezu, što će posljedično također rezultirati povećanjem sadržaja suhe tvari biljnog materijala. No, važan čimbenik predstavljaju i različiti zahtjevi pojedinih biljnih vrsta za fotoperiodom. Kao što je već navedeno, ako su biljne vrste kraćeg dana izložene duljem fotoperiodu može doći do inhibicije primarnog metabolizma kao izravnog odgovora na potencijalni stres izazvan duljom izloženosti svjetlu (Roeber i sur., 2022). Crvena ($\lambda=620$ nm) i plava ($\lambda=450$ nm) svjetlost, posebice u kombinaciji (dikromatska), najučinkovitije su u povećanju stope fotosinteze, a samim time u povećanju količine produkata primarnog metabolizma, što ima izravan utjecaj na povećanje sadržaja suhe tvari (Lobiuc i sur., 2017; Toscano i sur., 2021). Navedeno je dokazano i rezultatima ovog istraživanja, s obzirom da je najveći sadržaj ST pri uzgoju mladih izdanaka rotkvice ostvaren pod crvenim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 h, zatim prilikom uzgoja mladih izdanaka mungo graha pod dikromatskim crven:plavim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 h te kod uzgoja mladih izdanaka cikle pod plavim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 h. Naime i crveni i plavi dio spektra kao monokromatski tretmani pokazuju pozitivan utjecaj na ST, dok istovremeno brojni autori (Bartucca i sur., 2020; Izzo i sur., 2020; Araujo i sur., 2021; Bin i sur., 2024; Soufi i sur., 2024; Wang i sur., 2024) naglašavaju čak i veću učinkovitost dikromatskog osvjetljenja na proces fotosinteze, a time i na povećanje sadržaja ST u usporedbi s monokromatskim. Nadalje, osim kvalitete i fotoperiod kao ključni čimbenik regulacije procesa fotosinteze, pokazuje značajan utjecaj i na ukupni sadržaj suhe tvari biljnog materijala. Tijekom duljeg fotoperioda biljni pigmenti fitokromi, kriptokromi i fototropini dulje su stimulirani učinkom svjetlosti što posljedično povećava stopu fotosinteze, a time neposredno utječe i na povećanje sadržaja ST. No ipak, biljke ne mogu apsorbirati svjetlost pri stalnoj izloženosti istoj, odnosno predugi fotoperiodi u tom slučaju ispoljavaju suprotan učinak uzrokujući fotoinhibiciju uslijed koje dolazi do oštećenja fotosintetskog aparata, a time i do usporavanja ili pak do potpunog prekida fotosinteze. Prilikom odabira fotoperioda važno je uzeti u obzir preferencije biljne vrste prema dužini dana, odnosno fotoperiodizmu, a prilikom čega su biljke kraćeg dana osjetljivije na duže izlaganje svjetlosti (Jackson, 2008; Bradshaw i Holzapfel, 2017). Rezultati ovog istraživanja pokazuju kako su valna duljina i fotoperiod ključni čimbenici za postizanje optimalnog sadržaja suhe tvari (ST) kod različitih biljnih vrsta. Kod uzgoja mladih izdanaka rotkvice, upotreba crvene i plave monokromatske svjetlosti u fotoperiodu od 16 h rezultirala je većim sadržajem ST u usporedbi s fotoperiodom od 12 sati pri istim tretmanima valnih duljina. Međutim, kod navedene vrste iznimka je zabilježena pri primjeni dikromatskog crveno:plavog osvjetljenja gdje je veći sadržaj ST postignut u fotoperiodu od 12 sati. Kod mungo graha, veći sadržaj ST u fotoperiodu od

16 h utvrđen je samo primjenom crvene monokromatske svjetlosti, dok je kod svih ostalih varijanti valnih duljina dopunskog osvjetljenja veći ST zabilježen u fotoperiodu od 12 h. Suprotno tome, kod mladih izdanaka cikla primjena fotoperioda od 16 h u svim ispitivanim varijantama valnih duljina rezultirala je većim sadržajem ST u odnosu na fotoperiod od 12 h. Ovi rezultati uglavnom su u skladu s preferencijama istraživanih biljnih vrsta prema duljini dana. Rotkivica i cikla, kao biljke dugog dana, pokazale su tendenciju većeg sadržaja ST pri duljim fotoperiodima (16 sati) kod crvenog i plavog monokromatskog osvjetljenja. To potvrđuju i rezultati drugih autora, koji su zabilježili veći sadržaj ST mladih izdanaka cikla u fotoperiodima od 14 i 16 sati (Hernandez-Adsame i sur., 2023; Flores i sur., 2024; Jasenovska i sur., 2024). S druge strane, mungo grah, kao biljka kratkog dana, preferira fotoperiod od 12 sati, što je u skladu s većim sadržajem ST zabilježenim pri plavom monokromatskom i dikromatskom crveno:plavom osvjetljenju. Stoga ponovno valja naglasiti da dobiveni rezultati ističu važnost prilagodbe fotoperioda i valnih duljina svjetlosti specifičnim potrebama svake biljne vrste. Fotoperiod značajno ovisi o primijenjenoj valnoj duljini, što pokazuje da je za optimizaciju uzgojnih sustava primjenom dopunskog osvjetljenja, a s ciljem povećanja sadržaja ST, nužno istražiti širi spektar valnih duljina. Na taj način moguće je prilagoditi uvjete uzgoja genetskim predispozicijama pojedinih biljnih vrsta te povećati sadržaj makro i mikronutrijenata, a time i općenito pozitivno utjecati na njihov nutritivni potencijal.

6.3. *Kromatski parametri mladih izdanaka*

Kromatski parametri koriste se za opisivanje fizikalnog svojstva boje, a važni su i za praćenje fizioloških promjena biljnog materijala kao odgovor biljaka na svjetlosne uvjete (Simko, 2020; Snamartin i sur., 2020). Parametar L^* označava svjetlinu boje te odražava količinu svjetlosti koju površina biljke reflektira. Parametar a^* prikazuje zeleno-crvenu komponentu boje, gdje negativne vrijednosti ($-a^*$) upućuju na zelenu, a pozitivne ($+a^*$) na crvenu boju. Ovaj parametar može pratiti promjene u sadržaju klorofila i antocijana, pigmenta odgovornih za zeleno, odnosno crveno obojenje (Conesa i sur., 2019). Parametar b^* mjeri plavo-žutu komponentu, pri čemu negativne vrijednosti ($-b^*$) označavaju plavu, a pozitivne ($+b^*$) žutu boju. On može biti povezan s promjenama u koncentraciji karotenoida koji biljnom tkivu daju žutu do narančastu boju (Melendez-Martinez i sur., 2007; Conesa i sur., 2019). Kroma (C^*) predstavlja intenzitet boje, odnosno što je veća vrijednost C^* to je boja intenzivnija, zasićenija, a što općenito može biti znak više koncentracije pojedinih specifičnih pigmenta ovisno o biljnoj vrsti (Ntsoane i sur., 2023). h° vrijednost izražava se u stupnjevima, prilikom čega je $0^\circ =$

crvena, 90° = žuta, 180° = zelena i 270° = plava nijansa. Promjene u nijansi (h°) mogu tako na primjer odražavati prijelaz biljke između različitih stadija rasta (fenofaza) ili stresnih uvjeta uzrokovanih svjetlošću (Cowden i sur., 2023). Sinteza pigmenata u biljnoj stanici usko je povezana s izlaganjem svjetlosti, posebno crvenoj i plavoj kao dio PAR-a, a prilikom čega plava svjetlost putem kriptokroma i fototropina te crvena svjetlost putem fitokroma potiču sintezu fotosintetskih pigmenata (klorofili, karotenoidi) i antocijana, a što se u konačnici odražava i na kromatske parametre, odnosno boju biljnog tkiva. Temeljem navedenog i valna duljina i fotoperiod ključni su čimbenici dopunskog osvjetljenja koji će u konačnici imati i značajan utjecaj na vizualni dojam boje mladih izdanaka (Baidya i sur., 2021; De Bonis i sur., 2024).

Iz rezultata ovog istraživanja, kod uzgoja mladih izdanaka rotkvice značajne razlike ovisno o kombinaciji testiranih faktora ($VD \times F$) nisu zabilježene niti za jedan kromatski parametar, dok je opravdan utjecaj samo valne duljine (VD) za sve analizirane kromatske parametre uz izuzetak a^* vrijednosti, a za koju nije utvrđen signifikantan utjecaj niti jednog od variranih čimbenika istraživanja. Prema navedenom, pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem ostvarene su najviše vrijednosti parametara: L^* (uzorak svjetliji u odnosu na ostale tretmane), b^* (uzorak ima više žutih nijansi u odnosu na druge tretmane) i C^* (intenzivnija, zasićenija boja u odnosu na druge tretmane), dok suprotno pod monokromatskim crvenim i plavim utvrđene su najviše h° vrijednosti (prosječni kut je iznosio otprilike 242° , što sugerira na prijelaz iz zelene u plavu nijansu). Kod uzgoja mladih izdanaka mungo graha uočeni su slični trendovi utjecaja valne duljine i fotoperioda na kromatska svojstva kao i kod rotkvice, a prilikom čega je opravdan utjecaj kombinacije variranih faktora ($VD \times F$) zabilježen samo za parametar L^* , dok je kod drugih kromatskih svojstava značajan utjecaj zabilježen za valnu duljinu ili fotoperiod. Tako su pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 h utvrđene najviše vrijednosti parametara L^* (uzorak svjetliji u odnosu na ostale tretmane). Na ostale kromatske parametre kombinacija $VD \times F$ nije imala značajan utjecaj, dok je signifikatnan učinak na parametre: a^* , b^* , C^* i h° kod mladih izdanaka mungo graha imala jedino valna duljina (VD). Niže a^* vrijednosti (uzorci imaju više zelene nijanse) te više h° vrijednosti (kut bliže plavoj nijansi) zabilježene su pri uzgoju pod crvenim i plavim monokromatskim osvjetljenjem, dok su pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem zabilježene više vrijednosti parametra b^* (uzorak ima više žutih nijansi) i C^* (intenzivnija je boja uzoraka u odnosu na druge tretmane). Iz opisanih rezultata, jasno je uočljiv utjecaj posebice valne duljine svjetlosnog spektra na razvoj nijanse neke boje, što je pak objašnjivo putem utjecaja valne duljine na sintezu biljnih pigmenata (detaljno objašnjeno u poglavlju 5.6). Naime,

plavo svjetlo ima tendenciju smanjenja L^* vrijednosti (tkiva su tamnije boje) jer pojačava sintezu antocijana i drugih pigmenata koji apsorbiraju svjetlost, dok suprotno pod crvenim svjetlom, L^* vrijednosti su najčešće više, zbog utjecaja ovog dijela spektra na klorofil (Samuoliene i sur., 2021; Paradiso i Proiretti, 2022). Upravo temeljem toga, kombinacijom, odnosno dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem postiže se uravnotežen učinak i plavog i crvenog dijela spektra, čime se mogu objasniti i dobiveni rezultati viših kromatskih parametara L^* , a^* , b^* i C kod svih vrsta mladih izdanaka uzgojenih pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem. Odstupanja od gore navedenog trenda, uočena su jedino za parametar h° koji je kod svih vrsta mladih izdanaka bio viši pod crvenim i plavim monokromatskim osvjetljenjem. Kut nijanse (h°) zapravo predstavlja dominantnu boju u polarnim koordinatama, a odražava ravnotežu između pigmenata kao što su klorofili, karotenoidi i antocijani (Dini i sur., 2019), čiji pak sadržaj značajno varira pod različitim spektrima svjetlosti. Tako su u ovom istraživanju više vrijednosti kuta nijanse utvrđene kod svih mladih izdanaka u tretmanu pod crvenim i plavim osvjetljenjem što sugerira na akumulaciju klorofila (crveni spektar) i potencijalno antocijana (plavi spektar).

6.4. Sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka

Askorbinska kiselina je ključni metabolit brojnih fizioloških procesa biljaka, uključujući fotosintezu, sintezu hormona, te jedan od ključnih u obrani biljnih stanica od oksidativnog oštećenja (snažan je antioksidans) (Paciolla i sur., 2019). Askorbinska kiselina se sintetizira putem primarnog metabolizma iz glukoze koja kao glavni produkt fotosinteze predstavlja prekursor za sintezu askorbinske kiseline (Alrajhi i sur., 2023). Svjetlost svojom kvalitetom (valnom duljinom), kvantitetom (intenzitetom) i trajanjem (fotoperiodom) utječe kako na proces fotosinteze, tako i na proizvodnju glukoze, a samim time i na sadržaj askorbinske kiseline. Odabir valnih duljina i fotoperioda stoga značajno utječe i na količinu askorbinske kiseline u biljnim tkivima. Naime, PAR područje, a koje uključuje valne duljine i crvenog i plavog dijela spektra, prema brojnim autorima (Lobiuc i sur., 2017; Mastropasqua i sur., 2020; Ying i sur., 2020; Carillo i sur., 2022) ima značajnu ulogu i u sintezu ovog biljnog metabolita. Sinteza askorbinske kiseline u biljnim stanicama potaknuta je crvenim i plavim dijelom svjetlosnog spektra, odnosno uslijed izlaganja navedenim valnim duljinama dolazi do aktivacije prvotno neaktivnog oblika fitokroma (Pr) u biološki aktivan oblik (Prf) te aktivacije kriptokroma i fototropina koji pak značajno potiču sintezu ovog metabolita (Zha i sur., 2020; Zhang i sur., 2021; Wang i sur., 2023; Bucky i sur., 2024; Luo i sur., 2024; Mlinarić i sur., 2023;

Qiao i sur., 2024;), a što je dokazano i rezultatima ovog istraživanja. Kod uzgoja mladih izdanaka rotkvice, statistički opravdano najviše vrijednosti AK ostvarene su prilikom tretmana crvenim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 h i dikromatskim crveno:plavim, osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 h bez statističke razlike između spomenutih tretmana, dok je pak crvena svjetlost u fotoperiodu od 16 h bila najučinkovitija na sintezu AK u mladim izdancima mungo graha te dikromatska svjetlost u fotoperiodu od 12 h na sintezu AK u mladim izdancima cikle. Pojedini autori (Mastropasqua i sur., 2020; Carillo i sur., 2022; Liang i sur., 2022; Ding i sur., 2023; Fayeziadeh i sur., 2024; Sun i sur., 2024) naglašavaju kako je plavi dio svjetlosnog spektra, odnosno valne duljine od 400-500 nm, učinkovitiji u stimulaciji primarnog metabolizma, pa tako i ostvarivanju većih vrijednosti AK kod primjene takvih svjetlosnih tretmana, dok suprotno, pojedini autori (Kyriacou i sur., 2016; Mastropasqua i sur., 2020; Ma i sur., 2021; Meirmakulova i sur., 2023; Ntsoane i sur., 2024) prikazuju rezultate kojima dokazuju i pozitivan utjecaj crvenog dijela svjetlosnog spektra (600-700 nm) na sadržaj AK. Naime, spomenute devijacije mogu se objasniti i preferencijama svake pojedine biljne vrste, ali i drugim čimbenicima, od kojih posebno valja izdvojiti intenzitet i fotoperiod. Kao što je već naglašeno, fotoperiod kao jedan od ključnih čimbenika optimizacije svjetlosnog tretmana pokazuje utjecaj i na sintezu AK (Liu i sur., 2022; Hernández-Adasme i sur., 2023; Fayeziadeh i sur., 2024; Paglialunga i sur., 2024), a prilikom čega je vrlo važno optimizirati valnu duljinu i duljinu izlaganja prilikom odabira tretmana dopunskim osvjetljenjem. Rezultati ovog istraživanja jasno pokazuju kako optimizacija sinteze AK zahtijeva pažljivu prilagodbu svjetlosnih tretmana specifičnim potrebama svake biljne vrste. Kombinacija valne duljine i fotoperioda ima sinergijski učinak na sintezu AK, što je posebno vidljivo u preferencijama pojedinih biljnih vrsta prema crvenom, plavom monokromatskom ili kombiniranom dikromatskom dijelu spektra. Primjerice, rotkvica je ostvarila najveće vrijednosti AK pod crvenim monokromatskim svjetlom u fotoperiodu od 16 h, dok je kod cikle dikromatska kombinacija crveno plavog osvjetljenja u kraćem fotoperiodu od 12 h bila najučinkovitija. Kod mungo graha, crveni dio spektra u duljem fotoperiodu od 16 h imao je dominantan učinak, što dodatno potvrđuje važnost prilagodbe tretmana prema genetskim predispozicijama svake vrste. Osim valnih duljina, fotoperiod ima ključnu ulogu u moduliranju fotosinteze i sinteze sekundarnih metabolita, uključujući AK. Ovo potvrđuju i radovi drugih autora (Mastropasqua i sur., 2020; Liu i sur., 2022; Fayeziadeh i sur., 2024), koji ističu kako su optimalni tretmani svjetlosti često specifični za pojedinu vrstu i ovise o međudjelovanju trajanja izlaganja i spektralnog sastava svjetla.

Polifenolni spojevi pripadaju u skupinu sekundarnih biljnih metabolita, a ključni su u obrani i zaštiti biljaka od biotskih (napad herbivora, patogena) i abiotskih (visoke temperature, pomanjkanje vode, svjetlost i dr.) čimbenika. Spojeve ove skupine karakterizira snažno antioksidativno djelovanje temeljem kojeg su upravo oni ključni u obrani biljne stanice od slobodnih radikala koji nastaju kao posljedica vanjskih stresora (Lattanzio i sur., 2006). Sinteza polifenola u biljnoj stanici odvija se šikiminskim putem, gdje se glukoza, kao glavni produkt fotosinteze, razgrađuje do šikiminske kiseline koja predstavlja glavni prekursor za sintezu aromatskih aminokiselina, a koje predstavljaju prekursore za sintezu polifenolnih spojeva (Santos-Sánchez i sur., 2019). U regulaciji ove sinteze važnu ulogu ima svjetlost, a posebice crveni i plavi spektar kao dio PAR-a, gdje prema nekim autorima (Brazaityte i sur., 2021; Toscano i sur., 2021; Park i sur., 2024) plava svjetlost ima značajniji pozitivan utjecaj na sintezu polifenolnih spojeva. Rezultati ovog istraživanja dokazuju najveći sadržaj UF i UFL pod plavim osvjetljenjem prilikom uzgoja mladih izdanaka rotkvice u fotoperiodu od 16 h, a što dokazuju i rezultati drugih istraživanja (Toscano i sur., 2021; Palmitessa i sur., 2022; Lee i sur., 2023; Wu i sur., 2023; Pavlović i sur., 2024). Suprotno, najviši sadržaj UNFL zabilježen je u mladim izdancima rotkvice i mungo graha uzgojenim pod crvenim osvjetljenjem, također u fotoperiodu 16 h, a u istom tretmanu zabilježen je najviši sadržaj ukupnih UF i UFL kod mungo graha i cikle te UNFL kod cikle, a što ponovno dokazuje međusobno snažnu vezu između optimizacije valne duljine i fotoperioda. Nadalje, kod uzgoja rotkvice evidentan je trend akumulacije ukupnih polifenola uslijed duljem izlaganju svjetlosti (16 h), no to je ponovno u značajnoj ovisnosti o valnoj duljini pa se temeljem rezultata ovog istraživanja ne može u potpunosti potvrditi preferirani fotoperiod ovisno o dobivenim rezultatima UF. Prema preferencijama ove vrste, biljka je dugoga dana, za normalan rast i razvoj kao i druge fiziološke procese, s naglaskom na fotosintezu, odgovara joj dulji fotoperiod, do 16 h. Tako se na primjer kod rotkvice viši sadržaj UF u tretmanu fotoperioda od 12 h plavim osvjetljenjem može objasniti fenomenom utjecaja stresora, a prilikom čega uslijed kraćeg izlaganja svjetlosti biljaka dugog dana (fotoperiod od 12 h), kratki fotoperiodi mogu djelovati kao stresori. Smanjenje izloženosti svjetlu ograničava fotosintetsku aktivnost i dostupnost energije, izazivajući tako odgovor biljaka na stres. Polifenoli, kao dio obrambenog sustava biljke, počinju se sintetizirati u većim količinama kako bi ublažili oksidacijska oštećenja uzrokovana neuravnoteženom distribucijom energije i nakupljanjem reaktivnih kisikovih radikala (ROS) (Samuoliene i sur., 2021). Odstupanja pak nisu su zabilježena za UNFL, gdje su više vrijednosti utvrđene prilikom fotoperioda od 16 h, što odgovara preferencijama ove biljke za duljinom dana. Isto tako, kod cikle su najveće vrijednosti UF zabilježene u svim tretmanima valnih duljina pri fotoperiodu od 16 h. Cikla također pripada biljkama

dugog dana, što znači da dulji fotoperiod osigurava optimalne uvjete za rast i razvoj, uključujući sintezu sekundarnih metabolita poput polifenola. Ovi rezultati ukazuju na konzistentnu povezanost između duljine fotoperioda i povećane biosinteze UF kod cikla, bez značajnih odstupanja ovisno o specifičnoj valnoj duljini. Prilikom uzgoja mladih izdanaka mungo graha u fotoperiodu od 16 h pod crvenim monokromatskim i dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem zabilježene su najviše vrijednosti svih istraživanih polifenolnih spojeva uz iznimku većeg sadržaja UF kod plavog monokromatskom osvjetljenja u fotoperiodu od 12 h. Zanimljivo je da kod ove vrste, koja pripada biljkama kratkog dana, dulji fotoperiod izaziva povećanu sintezu polifenola. Ovo odstupanje može se objasniti djelovanjem duljeg fotoperioda kao potencijalnog stresora, koji aktivira sekundarni metabolizam biljke i potiče sintezu polifenola kao primarnih obrambenih komponenti biljnog metabolizma (Zhang i sur., 2021).

U skupinu polifenolnih spojeva pripadaju i antocijani, čiji je sadržaj prema rezultatima ovog istraživanja zabilježen samo u mladim izdancima cikla tretiranim plavim osvjetljenjem u fotoperiodu od 12 h. Prije svega, cikla kao dominantne pigmente koji joj daju specifično obojenje sadrži betalaine, odnosno betacijanine, a koji prema kemijskom sastavu pripadaju u alkaloidne i zapravo zamjenjuju antocijane u ovoj specifičnoj biljnoj porodici. No, usprkos navedenom, u ovom istraživanju sadržaj antocijana utvrđen je u vrlo niskim vrijednostima samo kod mladih izdanaka cikla što se može objasniti kroz nekoliko aspekata. Naime, cikla kao biljna vrsta zadržava gene biosinteze predaka za antocijane, koji su uglavnom neaktivni ili minimalno izraženi u normalnim uvjetima osvjetljenja (Sunčeva svjetlost), no izlaganjem biljaka plavom svjetlu može doći do privremene reaktivacije ovih puteva biosinteze, posebice kada je biljka u ovako ranom stadiju razvoja (mladi izdanak), a kada je metabolička plastičnost veća (Khusnutdinov i sur., 2021; Yan i sur., 2021). Nadalje, plava svjetlost često pokreće metaboličke puteve povezane sa stresom u biljkama, a iako su betalaini primarni pigmenti u cikli, antocijanini se mogu proizvesti kao sekundarni odgovor na stres pod visokoenergetskim plavim svjetlom (Manivannan i sur., 2021; Pech i sur., 2024). Isto tako umjereni fotoperiod od 12 sati posljedično može osigurati ravnotežu koja bi mogla omogućiti određenim metaboličkim putovima (uključujući one koji proizvode antocijane) aktivaciju bez preopterećenja puta sinteze betalaina (Zhou i sur., 2024). I na kraju, specifičnu fenofazu koja je istraživana u ovom radu, odnosno fazu vrlo mlade biljke, faza kotiledona, karakterizira vrlo intenzivna i dinamična proizvodnja sekundarnih metabolita posebice osjetljivih na signale iz okoliša prilikom čega se sinteza antocijana mogla pojaviti prolazno kao dio razvojnog ili adaptivnog mehanizma na tretman plavim svjetlom (Carvalho i Folta, 2016).

6.5. *Fotosintetski pigmenti mladih izdanaka*

Klorofili i karotenoidi ključni su pigmenti za proces fotosinteze omogućujući biljkama apsorpciju svjetlosne energije iz PAR područja i njenu pretvorbu u kemijsku energiju, odnosno proizvodnju asimilata nužnih za normalan rast i razvoj biljaka. Uz navedeno, spomenuti pigmenti imaju i funkcionalnu vrijednost kao važne fitokemikalije, posebice iz perspektive antioksidativnog djelovanja (Perez Galarez i sur., 2020). Karotenoidi, osim uloge apsorpcije svjetlosti iz plavog i zelenog dijela spektra, imaju i fotozaštitnu ulogu koja se ponajviše očituje uslijed intenzivne izloženosti svjetlosti štiteći tako biljne stanice od prekomjerne apsorpcije svjetlosne energije (Swapnil i sur., 2021). Nadalje, karotenoidi u biljnim stanicama neutraliziraju štetne reaktivne kisikove radikale (ROS) (npr. singletni kisik) nastale uslijed svjetlosnog stresa, štiteći tako stanične komponente od oksidativnog oštećenja te općenito, štiteći stanice od fotooksidativnog stresa (Zandi i Schnug, 2022). I plavi i crveni dio PAR-a aktivacijom specifičnih fotoreceptora u biljnim stanicama potiču sintezu fotosintetskih pigmenta (Alrifai i sur., 2019; Hernandez-Adasme i sur., 2023), a što se može potvrditi i rezultatima ovog istraživanja. Naime, prilikom uzgoja mladih izdanaka rotkvice najviše vrijednosti UKI (uključujući KI_a i KL_b) zabilježene su pod utjecajem crvene monokromatske svjetlosti u fotoperiodu od 12 h, zatim pri uzgoju mungo graha najviše vrijednosti ostvarene su pod plavim monokromatskim osvjetljenjem u fotoperiodu od 16 h, a kod cikla pri crveno:plavom dikromatskom osvjetljenju u fotoperiodu od 12 h. Temeljem dobivenih rezultata, može se zaključiti kako kombinacija valne duljine i fotoperioda značajno utječe na sadržaj ukupnih klorofila, a što je isto tako uvjetovano genetskim karakteristikama vrste, odnosno njihovim preferencijama za duljinom dana. Naime, prema rezultatima ovog istraživanja vrste dugog dana (rotkvice i cikla) ostvarile su najviše vrijednosti UKI pri uzgoju u fotoperiodu od 12 h, a što se ne poklapa ukoliko u obzir uzmemo njihovu preferenciju za duljim izlaganjem svjetlosti. Razlog navedenom može biti i taj da su mlade biljke rotkvice i cikla u potrebi za „hvatanjem“ svjetlosti u suboptimalnom fotoperiodima počele sintetizirati veće količine klorofila, a kako bi maksimalno iskoristile smanjenu dostupnost svjetla (Roeber i sur., 2022; Sharma, 2023). S druge pak strane, u mladim izdancima mungo graha (biljka kratkog dana) zabilježene su više vrijednosti UKI u fotoperiodu od 16 h što se također ne poklapa s preferencijama ove vrste za duljinom dana. Razlog ovom odstupanju pak može biti odgovor biljke na stres, prilikom čega biljke počinju pojačano sintetizirati klorofil kako bi se omogućilo održavanje fotosinteze pod produljenom izloženošću svjetlosti, odnosno stresnim uvjetima (Pradiso i Proietti, 2022). Isto tako, u svrhu boljeg razumijevanja

prilagodbi biljnog fotosintetskog aparata različitim fotoperiodima dopunskog osvjetljenja, u obzir treba uzeti i omjere pigmentnih spojeva i to konkretno klorofila a i b (Kl_{a/b}) i ukupnih klorofila i ukupnih karotenoida (UKI/UKa). Pritom Kl_a kao onaj koji je prvenstveno uključen u reakcijske centre fotosustava I i II i ključan za fotokemiju, te Kl_b koji je uglavnom prisutan u kompleksima koji prikupljaju svjetlost i proširuju spektar apsorpcije svjetlosti (posebno pri slabom osvjetljenju), ključni su za tumačenje utjecaja fotoperioda. Naime niži omjer Kl_{a/b} ukazuje na povećanje sadržaja Kl_b, što pak signalizira na povećanje potrebe za prikupljanjem svjetlosti, a što može biti posljedica neoptimalnih svjetlosnih uvjeta (npr. dulji fotoperiodi za biljke kratkog dana ili kraći fotoperiodi za biljke dugog dana). Suprotno, viši omjer Kl_{a/b} označava usmjerenost na povećanje aktivnosti reakcijskog centra, što je tipično za biljke koje se uzgajaju u optimalnim svjetlosnim uvjetima ovisno o preferencijama fotoperioda (Khan i sur., 2023; Kitajima i Hogan, 2023). Slijedom rezultata sadržaja Kl_a i Kl_b ovog istraživanja, a čiji omjeri (Kl_{a/b}) ovisno o valnim duljinama i fotoperiodu nisu prikazani u rezultatima, mladi izdanci rotkvice i cikle (biljke dugog dana) imaju niži Kl_{a/b} omjer u uvjetima kraćeg fotoperioda (12 h) čime se može potvrditi potreba spomenutih uzoraka za dodatnom kompenzacijom svjetlosti, a time i povećane sinteze klorofila. Naravno, ponovno valja naglasiti kako značajnu ulogu u ovim odgovorima biljaka ima i valna duljina svjetlosnog spektra, odnosno kvaliteta svjetlosti, a prilikom čega i plava svjetlost značajno utječe na biosintezu klorofila (Roeber i Proietti, 2022), a što je u suglasju i s rezultatima ovog istraživanja. Naime, plava svjetlost kao monokromatska ili pak dikromatska (u kombinaciji sa crvenom) pozitivno je utjecala na sadržaj ukupnih klorofila, a prilikom čega su najviše vrijednosti UKI utvrđene upravo u spomenutim tretmanima kod mladih izdanaka mungo graha i cikle. Učinkovitost plavog i crvenog dijela spektra kao monokromatskih, ali i dikromatskih tretmana, na sadržaj klorofila dokazuju i brojna druga istraživanja (Lobiuc i sur. 2017; Samouliene i sur., 2017; Mastropasqua i sur., 2020; Toscano i sur., 2021; Oh i sur., 2022; Cheng i sur., 2023; Wang i sur., 2023).

Prema rezultatima ovog istraživanja sadržaj ukupnih karotenoida (UKa) značajno se razlikovao samo ovisno o variranim valnim duljinama dopunskog osvjetljenja prilikom uzgoja mladih izdanaka mungo graha i cikle, dok kod uzgoja rotkvice nisu zabilježene signifikantne razlike ovisno o variranim faktorima istraživanja. Tako su pri uzgoju mladih izdanaka mungo graha najviše vrijednosti UKa zabilježene u tretmanu plavom monokromatskom svjetlosti, dok kod cikle pri tretmanu dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem, a što ukazuje na značajan utjecaj upravo svjetlosnog spektra na sadržaj UKa u mladim izdancima. Usprkos tome što je fotoperiod ključan za cirkadijalne ritmove biljnog organizma pa kod biljaka dugog dana (rotkvice i cikla)

preferirano dulji fotoperiod osigurava optimalnu fotosintetsku aktivnost, a čime se smanjuje potreba za dodatnom fotoprotekcijom putem sinteze karotenoida (Wang i sur., 2024), dok kod biljaka kratkog dana (mungo grah) duži fotoperiodi (npr. 16 h) može signalizirati mehanizme biljaka kao odgovore na stres što će se odraziti i na značajne promjene u razinama karotenoida čiji će se sadržaj povećati uslijed potrebe za fotoprotekcijom (Wang i sur., 2024), u ovom istraživanju on nije imao značajan utjecaj na sadržaj ukupnih karotenoida. Naime, prema ostvarenim rezultatima utjecaj valne duljine kao drugog ključnog čimbenika u regulaciji svjetlosnog tretmana pri uzgoju u zaštićenim prostorima nadmašio je utjecaj ostalih varijanti što pak ukazuje na značajan utjecaj ovog čimbenika. Različiti svjetlosni spektri (npr. crveni, plavi ili kombinirani) izravno utječu na fotoreceptore i energetske zahtjeve fotosustava, što se može odraziti i na biosintezu karotenoida, a prilikom čega plavo svjetlo snažno potiče proizvodnju karotenoida jer ga apsorbiraju kriptokromi i fototropini koji pak pokreću fotozaštitne reakcije i reguliraju učinkovitost fotosinteze. S druge strane i crveno svjetlo može potaknuti sintezu karotenoida, no značajno slabijim intenzitetom u usporedbi s plavim svjetlom (Xu i Harvey, 2019) pa uslijed navedenog, dikromatsko crveno:plavo osvjetljenje može ispoljiti složene interakcije, potencijalno povećavajući apsorpciju svjetlosti i time stimulirajući fotosintezu, ali i fotozaštitu. Svime navedenim, mogu se objasniti i rezultati ovog istraživanja, a temeljem kojih su značajno više vrijednosti UKa kod mungo graha i cikla zabilježene pri plavom monokromatskom i dikromatskom crveno:plavom osvjetljenju. Nadalje, važan je i omjer ukupnih klorofila i karotenoida (UKl/UKa) kako bi se bolje razumio utjecaj specifičnih faktora dopunskog osvjetljenja, a pri čemu je omjer UKl/UKa najčešće niži kada je biljka u uvjetima svjetlosnog stresa ili suboptimalnih svjetlosnih uvjetima, što pak upućuje na viši sadržaj karotenoida u svrhu zaštite fotosustava. Suprotno, viši omjer ukazuje na povoljne svjetlosne uvjete, odnosno uvjete u kojima biljka nema potrebu sinteze spojeva, prvenstveno karotenoida u svrhu fotozaštite. Općenito je navedeni omjer u snažnoj ovisnosti i o spektru valne duljine i o fotoperiodu iako ovim istraživanjem fotoperiod nije imao značajan utjecaj niti kod uzgoja rotkvice, mungo graha niti cikla. No ipak, važno je naglasiti ako biljne vrste kratkog dana pod dugim fotoperiodima imaju niži omjer UKl/UKa to sugerira da su iste pod utjecajem stresa uslijed produljenog izlaganja svjetlu (Roeber i sur., 2022) i obrnuto za biljke dugog dana kada je omjer UKl/UKa viši u kraćem fotoperiodu od njihovim preferencija. Naime, biljke dugog dana evolucijski su prilagođene dužem trajanju svjetla, što optimizira njihove fotosintetske i metaboličke procese pa u kraćim fotoperiodima imaju smanjenu fotosintetsku učinkovitost zbog nedovoljnog svjetla za optimalno korištenje klorofila, a zbog čega navedena neravnoteža može izazvati reakciju na stres (Roeber i sur., 2022). S obzirom da je ovim istraživanjem, zabilježen

signifikantan utjecaj upravo valne duljine na fotosintetske pigmente kod mungo graha i cikle, omjer UKI/UKa bit će objašnjen i kroz kontekst utjecaja VD na spomenuti omjer (rezultati nisu prikazani). Naime, prema literaturnom navodu (Cafferi i sur., 2022) omjer UKI/UKa je općenito veći pod crvenim monokromatskim svjetlom zbog pojačane sinteze klorofilnih pigmenata u takvim uvjetima, te niži pod plavim monokromatskim svjetlom zbog pojačane sinteze karotenoida u svrhu zaštite od potencijalnog svjetlosnog stresa. Prema rezultatima ovog istraživanja spomenuti trend nije dokazan, s obzirom da je i kod mladih izdanaka mungo graha i cikle omjer UKI/UKa bio viši pri plavom monokromatskom osvjetljenju. Razlog ovakvog odstupanja može biti upravo u fotoprotektivnoj ulozi karotenoida koji su se pod intenzivnim plavim osvjetljenjem počeli pojačano sintetizirati uslijed sprječavanja eventualnog fotooksidativnog oštećenja.

6.6. *Antioksidacijski kapacitet mladih izdanaka*

Antioksidacijski kapacitet mladih izdanaka, kao ključni pokazatelj njihove nutritivne i funkcionalne vrijednosti, ovisi prvenstveno o sadržaju specifičnih bioaktivnih spojeva, odnosno specijaliziranih metabolita, a koji ispoljavaju antioksidacijsko djelovanje. Spojevi s antioksidacijskim djelovanjem se mogu sintetizirati kao odgovori na vanjske stresore, kao što je na primjer to utjecaj svjetlosti. Plava svjetlost putem kriptokroma i fototropina potiče sintezu polifenolnih spojeva, askorbinske kiseline i fotosintetskih pigmenata, odnosno spojeva za koje je dokazano snažno antioksidacijsko djelovanje. Također, crvena svjetlost putem fitokroma pospješuje sintezu navedenih bioaktivnih spojeva, s nešto nižim intenzitetom od plave svjetlosti, održavajući tako ravnotežu između apsorpcije svjetlosti i zaštite od oksidativnog stresa izazvanim prekomjernom apsorpcijom iste. Iz tog razloga, dikromatski tretman crveno:plavog osvjetljenja osigurava optimalan balans između fotosintetske aktivnosti i antioksidativne obrane, čime se omogućuje adekvatan rast i prinos biljne biomase, veća otpornost biljaka, a time i viši sadržaj fitonutrijenata. Prema rezultatima ovog istraživanja prilikom uzgoja mladih izdanaka rotkvice, najviše vrijednosti antioksidacijskog kapaciteta ostvarene su u uvjetima dikromatskog crveno:plavog osvjetljenja u fotoperiodu od 12 h, zatim kod mungo graha pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenja, dok je kod cikle, najviši antioksidacijski kapacitet utvrđen je pri uzgoju plavim monokromatskim svjetlom u fotoperiodu od 16 h te pri dikromatskom crveno:plavom osvjetljenju u fotoperiodu od 12 h. Druga istraživanja dokazuju pozitivan učinak dikromatskog crveno:plavog osvjetljenja (Mastropasqua i sur., 2020; Bantis i sur., 2021; Bungala i sur., 2024; Pavlović i sur., 2024; Xu i sur., 2024), ali i pozitivan

učinak plavog monokromatskog osvjetljenja na antioksidacijski kapacitet mladih izdanaka (Zhang i sur., 2020; Brazaityte i sur., 2021; Pescarini i sur., 2023; Sun i sur., 2024). Navedeno sugerira kompleksnost interakcija valnih duljina svjetlosnog spektra i fotoperioda na sadržaj pojedinačnih bioaktivnih spojeva, a time i na sveukupni antioksidacijski kapacitet nekog biljnog materijala. Valne duljine PAR-a, posebice plavog dijela spektra, a kao što je to već objašnjeno u poglavlju 5.5., učinkovite su u stimuliranju sekundarnog metabolizma i sintezi spojeva poput polifenolnih, ali i askorbinske kiseline i fotosintetskih pigmenata, odnosno općenito antioksidansa (Trivellini i sur., 2023). No, isto tako valja naglasiti kako druga istraživanja (Li i sur., 2024) dokazuju kako i dikromatsko crveno:plavo osvjetljenje ima značajan učinak na antioksidacijski kapacitet osiguravajući tako ravnotežu između učinaka plavog svjetla, koje pojačava sintezu polifenola i antioksidativnih enzima te crvenog svjetla koje potiče proizvodnju biomase i utječe na puteve sinteze povezane s karotenoidima i drugim antioksidansima (Trivellini i sur., 2023). Ovakvi mehanizmi dikromatskog osvjetljenja djeluju sinergijski u usporedbi s monokromatskim što značajnije doprinosi snažnom antioksidativnom sustavu biljne stanice. Fotoperiod je također u kombinaciji s valnom duljinom kod mladih izdanaka rotkvice i cikle imao utjecaj na antioksidacijski kapacitet što ukazuje na važnost optimizacije i ovog čimbenika u svrhu proizvodnje biomase visokog sadržaja specijaliziranih metabolita, odnosno bioaktivnih spojeva koji doprinose ukupnom antioksidacijskom kapacitetu biljnog materijala. Općenito, visoke vrijednosti antioksidacijskog kapaciteta mladih izdanaka iz ovog istraživanja ukazuju na njihov značajan funkcionalni potencijal što je ujedno potvrđeno i brojnim drugim istraživanjima (Xiao i sur., 2019; Ghoora i sur., 2020; Fabek Uher i sur., 2023; Pavlović i sur., 2024).

7. ZAKLJUČCI

Temeljem rezultata istraživanja utjecaja različitih valnih duljina i fotoperioda dopunskog osvjetljenja svjetlećim diodama na prinos i sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka cikla, mungo graha i rotkvice uzgojenih u vertikalnoj farmi može se zaključiti slijedeće:

1. Potvrđena je hipoteza kako kvaliteta svjetlosti (valna duljina) dopunskog osvjetljenja svjetlećim diodama utječe na prinos i sadržaj specijaliziranih metabolita mladih izdanaka povrtnih vrsta.

Uzgoj mladih izdanaka u vertikalnoj farmi rezultirao je pozitivnim utjecajem plavog monokromatskog osvjetljenja na prinos mladih izdanaka rotkvice i pozitivnim utjecajem dikromatskog crveno:plavog osvjetljenja na prinos mladih izdanaka mungo graha. No, kod uzgoja mladih izdanaka cikla pokazalo se kako testirane valne duljine dopunskog osvjetljenja nemaju utjecaj na ukupan prinos.

Pozitivan utjecaj dikromatskog crveno:plavog osvjetljenja u mladim izdancima mungo graha utvrđen je i za sadržaja ST, dok je u mladim izdancima rotkvice crveno monokromatsko pozitivno utjecalo na sadržaj ST, a plavo monokromatsko pri uzgoju mladih izdanaka cikla. Analizom sadržaja SM, prilikom uzgoja mladih izdanaka rotkvice dokazan je pozitivan utjecaj dikromatskog crveno:plavog osvjetljenja i crvenog monokromatskog osvjetljenja na sadržaj AK te plavog monokromatskog osvjetljenja na sadržaj UF. Pri uzgoju mladih izdanaka mungo graha crveno monokromatsko osvjetljenje ima pozitivan utjecaj na sadržaj AK i UF, dok pri uzgoju mladih izdanaka cikla dikromatsko crveno:plavo osvjetljenje ima pozitivan utjecaj na sadržaj AK, a crveno monokromatsko osvjetljenje na sadržaj UF. Uz sve navedeno, u mladim izdancima cikla jedino je opravdan utjecaj valne duljine i to plavog monokromatskog osvjetljenja na sadržaj UA. Analizom fotosintetskih pigmenata, crveno monokromatsko osvjetljenje pokazalo je značajan utjecaj na sadržaj UKI, dok za sadržaj UKa nije utvrđen značajan utjecaj valnih duljina dopunskog osvjetljenja. Pri uzgoju mladih izdanaka mungo graha plavo monokromatsko osvjetljenje ima značajan utjecaj na sadržaj UKI i UKa, dok u mladim izdancima cikla dikromatsko crveno:plavo osvjetljenje pokazuje značajan utjecaj na sadržaj UKI i UKa. Značajno najviši antioksidacijski kapacitet mladih izdanaka rotkvice i mungo graha utvrđen je u uzorcima uzgojenim pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem, dok je najviši antioksidacijski kapacitet mladih izdanaka cikla utvrđen također pod dikromatskim crveno:plavim osvjetljenjem, ali i pod plavim monokromatskim osvjetljenjem.

2. Potvrđena je hipoteza kako duljina trajanja fotoperioda utječe na prinos i nutritivni sastav mladih izdanaka povrtnih vrsta.

Uzgoj sve tri vrste mladih izdanaka u fotoperiodu od 12 h pozitivno je utjecao na prinos.

Na sadržaj ST fotoperiod od 16 h imao je pozitivan utjecaj pri uzgoju mladih izdanaka rotkvice i cikle, dok je fotoperiod od 12 h imao pozitivan utjecaj pri uzgoju mladih izdanaka mungo graha. Analizom utjecaja fotoperioda na SM pri uzgoju mladih izdanaka rotkvice oba fotoperioda od 12 h i 16 h imala su pozitivan utjecaj na sadržaj AK, dok je za fotoperiod od 16 h utvrđen pozitivan utjecaj na sadržaj UF. Pri uzgoju mladih izdanaka mungo graha fotoperiod od 16 h imao je pozitivan utjecaj na sadržaj AK i UF, dok je pri uzgoju mladih izdanaka cikle fotoperiod od 12 h imao pozitivan utjecaj na sadržaj AK i UA, a fotoperiod od 16 h na sadržaj UF. Nadalje, fotoperiod je značajno utjecao i na sadržaj fotosintetskih pigmenta, a prilikom čega je fotoperiod od 12 h kod uzgoja mladih izdanaka rotkvice imao pozitivan utjecaj na UKI i UKa. Zatim, pri uzgoju mladih izdanaka mungo graha, za fotoperiod od 16 h utvrđen je pozitivan utjecaj na sadržaj UKI i UKa, dok je pri uzgoju mladih izdanaka cikle za fotoperiod od 12 h zabilježen pozitivan utjecaj na sadržaj UKI, a oba fotoperioda imala su pozitivan utjecaj na UKa. Najviši antioksidacijski kapacitet sve tri vrste mladih izdanaka utvrđen je u oba fotoperioda od 12 h i 16 h iz čega se može zaključiti kako fotoperiod kao zasebno promatrani faktor nema utjecaj na antioksidacijski kapacitet sve tri vrste istraživanih mladih izdanaka.

Ovim istraživanjem utvrđene su kombinacije valnih duljina i fotoperioda dopunskog osvjetljenja svjetlećim diodama koje daju najviši prinos biljne biomase i najviši sadržaj SM u mladim izdancima cikle, mungo graha i rotkvice. Osim toga, ovi podaci daju dodatna saznanja o mogućnostima uzgoja povrtnih vrsta u fenofazi mladih izdanaka u sustavu uzgoja vertikalnih farmi, a što može značajno doprinijeti i proizvođačima mladih izdanaka u urbanim sredinama sustavom vertikalnog uzgoja. Također, rezultati istraživanja dokazuju kako uzgoj ovom specifičnom tehnologijom uzgoja istovremeno može rezultirati postizanjem adekvatnih prinosa biljne biomase, ali i proizvodnjom nutritivno visokokvalitetnog biljnog materijala, bogatog specijaliziranim metabolitima, visoke antioksidacijske aktivnosti, a time i brojnih potencijalnih funkcionalnih vrijednosti.

Ovi rezultati mogu poslužiti kao temelj daljnjim istraživanjima uvjeta uzgoja u vertikalnim farmama kao dijelu urbane poljoprivredne proizvodnje, koje za dopunsko osvjetljenje koriste svjetleće diode u svrhu dobivanja visoko nutritivne hrane, koja osim ljudskome zdravlju, doprinosi cirkularnosti i održivosti sustava proizvodnje hrane u urbanim sredinama.

8. POPIS LITERATURE

1. Alexander P., Rounsevell M.D.A., Dislich C., Dodson J.R., Engström K., Moran D. (2015). Drivers for global agricultural land use change: The nexus of diet, population, yield and bioenergy. *Global Environmental Change* 35: 138-147.
2. Alrajhi A.A., Alsahli A.S., Alhelal I.M., Rihan H.Z., Fuller M.P., Alsadon A.A., Ibrahim A.A. (2023). The Effect of LED light spectra on the growth, yield and nutritional value of red and green lettuce (*Lactuca sativa*). *Plants* 12(3): 463.
3. Alrifai O., Hao X., Marcone M.F., Tsao R. (2019). A current review of the modulatory effects of LED lights on photosynthesis of secondary metabolites and future perspectives of microgreen vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 67(22): 6075-6090.
4. AOAC (2002). *Official Methods of Analysis*, 16th Edition. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC, USA.
5. AOAC (1995). *Official Methods of Analysis*, 16th Edition. Association of official Analytical Chemists, Washington DC, USA.
6. Araújo D.X., Rocha T.T., de Carvalho A.A., Bertolucci S.K.V., Medeiros A.P.R., Ribeiro F.N.S., Barbosa S.M., Pinto J.E.B.P. (2021). Photon flux density and wavelength influence on growth, photosynthetic pigments, and volatile organic compound accumulation in *Aeollanthus suaveolens* (Catinga-de-mulata) under in vitro conditions. *Industrial Crops and Products* 168: 113597.
7. Aznar-Sánchez J.A., Velasco-Muñoz J.F., López-Felices B., Román-Sánchez I.M. (2020). An Analysis of Global Research Trends on Greenhouse Technology: Towards a Sustainable Agriculture. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(2): 664.
8. Badji A., Benseddik A., Bensaha H., Boukhelifa A., Hasrane, I. (2022). Design, technology, and management of greenhouse: A review. *Journal of Cleaner Production* 373(12): 133753.
9. Bantis, F. (2021). Light Spectrum Differentially Affects the Yield and Phytochemical Content of Microgreen Vegetables in a Plant Factory. *Plants* 10(10): 2182.
10. Baidya A., Akter T., Islam M.R., Shah A.K.M.A., Hossain M. A., Salam M.A., Paul S.I. (2021). Effect of different wavelengths of LED light on growth, chlorophyll, β -carotene content and proximate composition of *Chlorella ellipsoidea*. *Heliyon* 7(12): e08525.
11. Bartucca M.L., Guiducci M., Falcinelli B., Del Buono D., Benincasa P. (2020). Blue: Red LED Light Proportion Affects Vegetative Parameters, Pigment Content, and Oxidative Status of Einkorn (*Triticum monococcum* L. ssp. *monococcum*) Wheatgrass. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 68(33): 8757-8763.
12. Biesiada A., Tomczak A. (2012). Biotic and Abiotic Factors Affecting the Content of the Chosen Antioxidant Compounds in Vegetables. *Vegetable Crops Research Bulletin* 76(-1): 55-78.
13. Blanco I., Luvisi A., De Bellis L., Schettini E., Vox G., Scarascia Mugnozza G. (2022). Research Trends on Greenhouse Engineering Using a Science Mapping Approach. *Horticulturae* 8(9): 833.

14. Bhaswant M., Shanmugam D.K., Miyazawa T., Abe C., Miyazawa T. (2023). Microgreens-A Comprehensive Review of Bioactive Molecules and Health Benefits. *Molecules* 28(2): 867.
15. Bradshaw W.E., Holzapfel C.M. (2017). Chapter Two - Natural Variation and Genetics of Photoperiodism in *Wyeomyia smithii*. *Advances in Genetics* 99: 39-71.
16. Brazaityte A., Miliauskiene J., Vaštakaite-Kairiene V., Sutuliene R., Laužike K., Duchovskis P., Malek S. (2021). Effect of different ratios of blue and red LED light on Brassicaceae microgreens under a controlled environment. *Plants* 10(4): 801.
17. Brazaitytė A., Sakalauskienė S., Samuolienė G., Jankauskienė J., Viršilė A., Novičkovas N., Sirtautas R., Miliauskienė J., Vaštakaitė V., Dabašinskas L., Duchovskis P. (2015). The effects of LED illumination spectra and intensity on carotenoid content in Brassicaceae microgreens. *Food Chemistry* 173: 600-606.
18. Brazaitytė A., Viršilė A., Jankauskienė J., Sakalauskienė S., Samuolienė G., Sirtautas R., Novičkovas A., Dabašinskas L., Miliauskienė J., Vaštakaitė V., Bagdonavičienė A., Duchovskis P. (2015). Effect of supplemental UV-A irradiation in solid-state lighting on the growth and phytochemical content of microgreens. *International Agrophysics* 29(1): 13-22.
19. Briggs W.R., Olney M.A. (2001). Photoreceptors in Plant Photomorphogenesis to Date. Five Phytochromes, Two Cryptochromes, One Phototropin, and One Superchrome. *Plant Physiology* 125(1): 85–88.
20. Bucky A., Pičmanova M., Porley V., Pont S., Austin C., Khan T., McDougall G., Johnstone A., Stewart D. (2024). Light manipulation as a route to enhancement of antioxidant properties in red amaranth and lettuce. *Frontiers in Nutrition* 11: 1386988.
21. Bulgari R., Baldi A., Ferrante A., Lenzi A. (2017). Yield and quality of basil, Swiss chard, and rocket microgreens grown in a hydroponic system. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 45 (2): 119-129.
22. Bungala L.T.D.C., Park S.U., Nguyen B.V., Lim J., Kim K., Kim J.K., Park C.H., Le A.T., Chung Y., Yeo H.J. (2024). Effect of LED Lights on Secondary Metabolites and Antioxidant Activities in Red Pakchoi Baby Leaves. *ACS Omega* 9(22): 23420-23430.
23. Caferra R., Guardini Z., Bassi R., Dall'Osto L. (2022). Assessing photoprotective functions of carotenoids in photosynthetic systems of plants and green algae. *Methods in enzymology* 674: 53–84.
24. Carillo P., El-Nakhel C., De Micco V., Giordano M., Pannico A., De Pascale S., Graziani G., Ritieni A., Soteriou G.A., Kyriacou M.C., Roupheal Y. (2022). Morphometric and Specialized Metabolites Modulation of Parsley Microgreens through Selective LED Wavebands. *Agronomy* 12(7): 1502.
25. Carvalho S.D., Folta K.M. (2016). Green light control of anthocyanin production in microgreens. *Acta Horticulturae* 1134: 13-18.
26. Cerjak M., Rustan M., Juračak J. (2020). Struktura i izgledi za razvoj hrvatskog tržišta mikro zelenja. *Agroekonomia Croatica* 9(1): 142-152.
27. Chaudhari V.M., Barot D.C., Nadoda N. (2023). Vegetable micro-greens: A nutritional powerhouse. *The Science Worlds a Monthly Magazine* 3(8): 1932-1936.
28. Cheng Y., Xiang N., Chen H., Zhao Y., Wang L., Cheng X., Guo X. (2023). The modulation of light quality on carotenoid and tocopherol biosynthesis in mung bean (*Vigna radiata*) sprouts. *Food Chemistry* 6: 100170.

29. Choe U., Yu L.L., Wang T.T.Y. (2018). The Science behind Microgreens as an Exciting New Food for the 21st Century. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 66(44): 11519-11530.
30. Conesa A., Manera F.C., Brotons J.M., Fernandez-Zapata J.C., Simón I., Simón-Grao S., Alfosea-Simón S., Martínez Nicolás J.J., Valverde J.M., García-Sánchez F. (2019). Changes in the content of chlorophylls and carotenoids in the rind of Fino 49 lemons during maturation and their relationship with parameters from the CIELAB color space. *Scientia Horticulturae* 243: 252-260.
31. Cowden R.J., Markussen B., Ghaley B.B., Henriksen C.B. (2024). The Effects of Light Spectrum and Intensity, Seeding Density, and Fertilization on Biomass, Morphology, and Resource Use Efficiency in Three Species of Brassicaceae Microgreens. *Plants* 13(1): 124.
32. De Bonis M., Locatelli S., Sambo P., Zanin G., Pecchia J. A., Nicoletto C. (2024). Effect of Different LED Light Wavelengths on Production and Quality of *Pleurotus ostreatus* Grown on Different Commercial Substrates. *Horticulturae* 10(4): 349.
33. Demir K., Sarıkamış G., Seyrek G.C. (2023). Effect of LED lights on the growth, nutritional quality and glucosinolate content of broccoli, cabbage and radish microgreens. *Food Chemistry* 401(22): 134088.
34. Dhaka A.S., Dikshit H.K., Mishra G.P., Tontang M.T., Meena N.L., Kumar R.R., Ramesh S.V., Narwal S., Aski M., Thimmegowda V., Gupta S., Nair R.M., Praveen S. (2023). Evaluation of Growth Conditions, Antioxidant Potential, and Sensory Attributes of Six Diverse Microgreens Species. *Agriculture* 13(3): 676.
35. Di Gioia F., Santamaria P. (2015). Microgreens: novel fresh and functional food to explore all the value of biodiversity. *South African Journal of Botany* 106: 250.
36. Ding S., Su P., Wang D., Chen X, Tang C., Hou J., Wu L. (2023). Blue and red-light proportion affects growth, nutritional composition, antioxidant properties and volatile compounds of *Toona sinensis* sprouts. *Food Science and Technology* 173: 114400.
37. Dini M., Do M., Raseira M., Scariotto S., Carra B., De Abreu E. S., Mello-Farias P., Rufino, Cantillano F. (2019). Color shade heritability of peach flesh. *Journal of Agricultural Science* 11(8): 236-247.
38. Dou H., Niu G., Gu M. (2019). Photosynthesis, Morphology, Yield, and Phytochemical Accumulation in Basil Plants Influenced by Substituting Green Light for Partial Red and/or Blue Light. *HortScience* 54(10): 1769-1776.
39. Ebert A.W. (2022). Sprouts and Microgreens-Novel Food Sources for Healthy Diets. *Plants* 11(4): 571.
40. Ebert A., Wu D., Ray-Yu Y. (2015). Amaranth sprouts and microgreens – a homestead vegetable production option to enhance food and nutrition security in the rural-urban continuum. *Proceedings of the Regional Symposium on Sustaining Small-Scale Vegetable Production and Marketing Systems for Food and Nutrition Security*, 25.-27.02.2014., Bangkok, Thailand, 233-244.
41. Ebert A. (2012). Sprouts, microgreens, and edible flowers: The potential for high value specialty produce in Asia. *Proceeding of Regional Symposium on High Value Vegetables in Southeast Asia: Production, Supply and Demand*, 25.-26.01.2012., Chiang Mai, Thailand, 216-227.
42. Fabek Uher S., Radman S., Opačić N., Dujmović M., Benko B, Lagundžija D., Mijić V., Prša L., Babac S., Šic Žlabur J. (2023). Alfalfa, Cabbage, Beet and Fennel Microgreens in Floating Hydroponics-Perspective Nutritious Food? *Plants* 12(11): 2098.

43. Fayeziadeh M.R., Ansari N.A., Sourestani M.M., Fujita M., Hasanuzzaman M. (2024). Management of Secondary Metabolite Synthesis and Biomass in Basil (*Ocimum basilicum* L.) Microgreens Using Different Continuous-Spectrum LED Lights. *Plants* 13(10): 1394.
44. Fayeziadeh M.R., Ansari N.A., Sourestani M.M., Hasanuzzaman M. (2024). Variations in Photoperiods and Their Impact on Yield, Photosynthesis and Secondary Metabolite Production in Basil Microgreens. *BMC Plant Biology* 24(1): 712.
45. Flores M., Hernandez-Adsame C., Guevara M.J., Escalona V.H. (2024). Effect of different light intensities on agronomic characteristics and antioxidant compounds of Brassicaceae microgreens in vertical farm system. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 8: 1349423.
46. Francini A., Pintado M., Manganaris G. A., Ferrante A. (2020). Editorial: Bioactive Compounds Biosynthesis and Metabolism in Fruit and Vegetables. *Frontiers of Plant Science* 11: 129.
47. Fuente B, López-García G, Máñez V, Alegría A, Barberá R, Cilla A. (2020). Antiproliferative Effect of Bioaccessible Fractions of Four Brassicaceae Microgreens on Human Colon Cancer Cells Linked to Their Phytochemical Composition. *Antioxidants* 9(5): 368.
48. Gao M., He R., Shi R., Zhang Y., Song S., Su W., Liu, H. (2021). Differential Effects of Low Light Intensity on Broccoli Microgreens Growth and Phytochemicals. *Agronomy* 11:(3) 537.
49. Garegnani M., Sandri C., Pacelli C., Ferranti F., Bennici E., Desidero A., Nardi L., Villani M.E. (2024). Non-destructive real-time analysis of plant metabolite accumulation in radish microgreens under different LED light recipes. *Frontiers of Plant Science* 14: 1289208.
50. Gerovac, J.R., Craver, J.K., Boldt, J.K., Lopez, R.G. (2016). Light Intensity and Quality from Sole-source Light-emitting Diodes Impact Growth, Morphology, and Nutrient Content of Brassica Microgreens. *HortScience* 51(5): 497-503.
51. Ghoora M.D., Haldipur A.C., Srividya N. (2020). Comparative evaluation of phytochemical content, antioxidant capacities and overall antioxidant potential of select culinary microgreens. *Journal of Agriculture and Food Research* 2: 100046.
52. Guo X., Xue X., Chen L., Li J., Wang Z., Zhang Y. (2023). Effects of LEDs Light Spectra on the Growth, Yield, and Quality of Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultured in Plant Factory. *Journal of Plant Growth Regulation* 42(4): 1-15.
53. Halder M., Petsophonsakul P., Akbulut A.C., Pavlic A., Bohan F., Anderson E., Schurgers, L. (2019). Vitamin K: Double bonds beyond coagulation insights into differences between vitamin K1 and K2 in health and disease. *International Journal of Molecular Sciences* 20(4): 896.
54. Harakort B., Srijunteuk S., Rithichai P., Tabunhan S. (2019). Effects of Light-Emitting Diode Light Irradiance Levels on Yield, Antioxidants and Antioxidant Capacities of Indigenous Vegetable Microgreens. *Science and Technology Asia* 24(3): 59-66.
55. Hasan M.K., Desiere S., D'Haese M., Kumar L. (2018). Impact of climate-smart agriculture adoption on the food security of coastal farmers in Bangladesh. *Food Security* 10: 1073-1088.

56. Hasan M., Bashir T., Ghosh R., Lee S.K., Bae H. (2017). An Overview of LEDs' Effects on the Production of Bioactive Compounds and Crop Quality. *Molecules* 22(9): 1420.
57. Hernández-Adasme C., Palma-Dias R., Escalona V.H. (2023). The Effect of Light Intensity and Photoperiod on the Yield and Antioxidant Activity of Beet Microgreens Produced in an Indoor System. *Horticulturae* 9(4): 493.
58. Holm G. (1954). Chlorophyll mutations in barley. *Acta Agriculturae Scandinavica* 49: 457-470.
59. Izzo L.G., Mele B.H., Vitale L., Vitale E., Arena C. (2020). The role of monochromatic red and blue light in tomato early photomorphogenesis and photosynthetic traits. *Environmental and Experimental Botany* 179: 104195.
60. Jackson S.D. (2008). Plant responses to photoperiod. *New Phytologist* 181(3): 517-531.
61. Jasenovska L., Brestic M., Barboricova M., Ferencova J., Filaček A., Zivcak, M. (2024). Analysis of the effects of various light spectra on microgreen species. *Folia Horticulturae* 36 (2): 197-209.
62. Jeong J.S., Niu G., Zhen S. (2024). Far-red light and temperature interactively regulate plant growth and morphology of lettuce and basil. *Environmental and Experimental Botany* 218(2): 105589.
63. Jha S.K., Kumar K., Kumar R., Padney J., Sagar P., Rathore M., Singh A.K. (2023). Screening for days to Flowering and Photo Insensitivity in *Vigna mungo*. *Ecology, Environment and Conservation* 29: S7-11.
64. Jones-Baumgardt C., Llewellyn D., Zheng Y. (2020). Different Microgreen Genotypes Have Unique Growth and Yield Responses to Intensity of Supplemental PAR from Light-emitting Diodes during Winter Greenhouse Production in Southern Ontario, Canada. *HortScience* 55(2): 156-163.
65. Jones-Baumgardt C., Llewellyn D., Ying Q., Zheng, Y. (2019). Intensity of Sole-source Light-emitting Diodes Affects Growth, Yield, and Quality of Brassicaceae Microgreens. *HortScience* 54(7): 1168-1174.
66. Kaiser E., Ouzounis T., Giday H., Schipper R., Heuvelink E., Marcelis L.F.M. (2019). Adding blue to red supplemental light increases biomass and yield of greenhouse-grown tomatoes but only to an optimum. *Frontiers of Plant Science* 9: 2002.
67. Kaiser C., Ernst M. (2018). Microgreens. CCD-CP-104. Lexington, KY: Center for Crop Diversification. University of Kentucky College of Agriculture, Food and Environment.
68. Kamal Y.K., Khodaeiaminjan M., El-Tantway A.A., Moneim D.A., Salam A.A., Ash-shormillesy S.M.A.I., Attia A., Ali M.A.S., Herranz R., El-Esawi M.A., Nassrallah A.A., Ramadan M.F. (2020). Evaluation of growth and nutritional value of Brassica microgreens grown under red, blue and green LEDs combinations. *Physiologia Plantarum* 169(4): 625-638.
69. Kazemi D., Dehestani-Ardakani M., Hatami M., Ghorbanpour M. (2024). Research on the Differences in Phenotypic and Photosynthetic Biophysical Parameters of Begonias (*Begonia rex*) Cultivars Under Various Light Spectral Compositions. *Journal of Plant Growth Regulation* 43(1): 1-16.
70. Khan I., Zada A., Jia T., Hu X. (2023). Effect of the Enhanced Production of Chlorophyll b on the Light Acclimation of Tomato. *International Journal of Molecular Science* 24(4): 3377.

71. Khusnutdinov E., Sukhareva A., Panfilova M., Mikhaylova E. (2021). Anthocyanin Biosynthesis Genes as Model Genes for Genome Editing in Plants. *International Journal of Molecular Science* 22(16): 8752.
72. Kitajima K., Hogan K.P. (2003). Increases of chlorophyll a/b ratios during acclimation of tropical woody seedlings to nitrogen limitation and high light. *Plant, Cell and Environment* 26(6): 857-865.
73. Kou L., Yang T., Luo Y., Liu X., Luhong H. Codling E. (2014). Pre-harvest calcium application increases biomass and delays senescence of broccoli microgreens. *Postharvest Biology and Technology* 87: 70-78.
74. Kump B. (2020). The role of far-red light (FR) in photomorphogenesis and its use in greenhouse plant production. *Acta Agriculturae Slovenica* 116 (1): 93-105.
75. Kyriacou M.S., Roupael Y., Di Gioia F., Kyratzis A., Serio F., Renna M., De Pascale S., Santamaria P. (2016). Micro-scale vegetable production and the rise of microgreens. *Trends in Science and Technology* 57: 103-115.
76. Lattanzio V., Lattanzio V.M.T., Cardinali A. (2006). Role of phenolics in the resistance mechanisms of plants against fungal pathogens and insects. *Phytochemistry* 37: 23 67.
77. Lee S., Park, C.H., Kim J.K., Ahn K., Kwon H., Kim J.K., Park S.U., Yeo H.J. (2023). LED Lights Influenced Phytochemical Contents and Biological Activities in Kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) Microgreens. *Antioxidants* 12: 1686.
78. Li J., Liu Y., Wang J., Liu M., Li Y., Zheng J. (2024). Effects of Different LED Spectra on the Antioxidant Capacity and Nitrogen Metabolism of Chinese Cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*). *Plants* 13(21): 2958.
79. Liang W., Xue A., Hao Y., Luo L. (2022). Effects of Led Light Quality on the Growth and Phenolic Compounds of Broccoli Microgreens. *SSRN Electronic Journal*
80. Liu K., Gao M., Jiang H., Ou S., Li X., He R., Li Y., Liu H. (2022). Light Intensity and Photoperiod Affect Growth and Nutritional Quality of Brassica Microgreens. *Molecules* 27(3): 883.
81. Loakloon Lamp Company – How to measure PPF and PPFD? (preuzeto s: <https://laokoonlamp.com/ppf-vs-ppfd/>; 15.10.2024.)
82. Lobiuc A., Vasilache V., Pontilie O., Stoleru T., Burducea M., Oroian M., Zamfirache M.-M. (2017). Blue and Red LED Illumination Improves Growth and Bioactive Compounds Contents in Acyanic and Cyanic *Ocimum basilicum* L. Microgreens. *Molecules* 22(12): 2111.
83. López A., Aguilar M., Vélez J.S., Pineda E.F., Ordoñez G.A. (2019). Design of a vegetable production model: Z-farming. In *Journal of Physics: Conference Series* 1418: 012013.
84. Lopez-Chill'on M.T., Carazo-Díaz C., Prieto-Merino D., Zafrilla, P., Moreno D.A., Villaño D. (2019). Effects of long-term consumption of broccoli sprouts on inflammatory markers in overweight subjects. *Clinical Nutrition* 38(2): 745–752.
85. Luo L., Zhang G., Liang W., Wu D., Sun Q., Hao Y. (2024). Effect of LED Light Quality on Broccoli Microgreens Plant Growth and Nutrient Accumulation. *Journal of Plant Growth Regulation* 43(10): 3481-3489.
86. Ma Y., Xu A., Cheng Z.M. (2021). Effects of light emitting diode lights on plant growth, development and traits a meta-analysis. *Horticultural Plant Journal* 7(6): 552–564.
87. Manivannan A., Soundararajan P., Park Y.G., Jeong B.R. (2021). Physiological and Proteomic Insights Into Red and Blue Light-Mediated Enhancement of in

- vitro Growth in *Scrophularia kakudensis*-a Potential Medicinal Plant. *Frontiers of Plant Science* 11: 607007.
88. Maraveas C., Karavas C.-S., Loukatos D., Bartzanas T., Arvanitis K.G., Symeonaki E. (2023). Agricultural Greenhouses: Resource Management Technologies and Perspectives for Zero Greenhouse Gas Emissions. *Agriculture* 13(7): 1464.
 89. Margit O., Viršile A. (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science* 22: 223-234.
 90. Marotti I., Truzzi F., Tibaldi C., Negri L., Dinelli, G. (2021). Evaluation of licorice (*Glycyrrhiza glabra* L.) as a novel microgreen from the anti-inflammatory potential of polyphenols. *AIMS Agriculture and Food* 6(1): 1-13.
 91. Maru R.N., Wesonga J., Okazawa H., Kavoo A., Neondo J. O., Mazibuko D.M., Maskey S., Orsini F. (2024). Evaluation of Growth, Yield and Bioactive Compounds of Ethiopian Kale (*Brassica carinata* A. Braun) Microgreens under Different LED Light Spectra and Substrates. *Horticulturae* 10(5): 436.
 92. Mastropasqua L., Dipierro N., Paciolla C. (2020). Effects of Darkness and Light Spectra on Nutrients and Pigments in Radish, Soybean, Mung Bean and Pumpkin Sprouts. *Antioxidants* 9(6): 558.
 93. Meiramkulova K., Devrishov D., Adylbek Z., Kydyrbekova A., Zhangazin S., Ualiyeva R., Temirbekova A., Adilbektegi G., Mkilima T. (2023). The Impact of Various LED Light Spectra on Tomato Preservation. *Sustainability* 15(2): 1111.
 94. Meléndez-Martínez A.J., Britton G., Vicario I.M., Heredia F.J. (2007). Relationship between the colour and the chemical structure of carotenoid pigments. *Food Chemistry* 101(3): 1145-1150.
 95. Mir S.A., Shah M.A., Mir M.M. (2017). Microgreens: Production, shelf life, and bioactive components. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 57(12): 2730-2736.
 96. Mitchell C.A., Both A-J, Bourget C.M., Burr J.F., Kubota C., Lopez R.G., Morrow R.C., Runkle E.S. (2012). LEDs: The future of greenhouse lighting! *Chronica Horticulturae* 52(1): 6-12.
 97. Mlinarić S., Piškor A., Melnjak A., Mikuška A., Šrajer Gajdošik M., Begović L. (2023). Antioxidant Capacity and Shelf Life of Radish Microgreens Affected by Growth Light and Cultivars. *Horticulturae* 9(1): 76.
 98. Mlinarić S., Gvozdić V., Vuković A., Vlašiček I., Ceasr V., Begović L. (2020). The Effect of Light on Antioxidant Properties and Metabolic Profile of Chia Microgreens. *Applied Science* 10(17): 5731.
 99. Mohanty A., Mahahlik G., Parida S. (2020). Nutritional Analysis of Few Edible Microgreens in Variable Growth Medium using XRF Technique. *Asian Journal of Biological and Life Science* 9(3): 360-364.
 100. Negri M., Bulgari R., Santoro P., Ferrante A. (2021). Evaluation of different growing substrates for microgreens production. *Acta Horticulturae* 1305: 109-114.
 101. Ntsoane M.L.L., Manhivi V.E., Shoko T., Seke F., Sultanbawa Y., Sivakumar D. (2024), Brassica microgreens cabbage (*Brassica oleracea*), radish (*Raphanus sativus*) and rocket (*Eruca vesicaria* (L.) Cav: application of red-light emitting diodes lighting during postharvest storage and in vitro digestion on bioactive compounds and antioxidant activity. *International Journal of Food Science and Technology* 59 (3): 1432-1442.

102. Ntsoane M.L.L., Manhivi V.E., Shoko T., Seke F., Maboko M.M., Sivakumar D. (2023). The Phytonutrient Content and Yield of Brassica Microgreens Grown in Soilless Media with Different Seed Densities. *Horticulturae* 9(11): 1218.
103. Oh C., Park J.-E., Son Y.-J., Nho C.W., Park N.I., Yoo G. (2022). Light Spectrum Effects on the Ions, and Primary and Secondary Metabolites of Red Beets (*Beta vulgaris* L.). *Agronomy* 12(7): 1699.
104. Oh M.M., Carey E.E., Rajashekar C.B. (2010). Regulated water deficits improve phytochemical concentration in lettuce. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 135 (3): 223-229.
105. Opačić N., Brlek T., Slunjski S., Kljak K., Radman S., Fabek Uher S. (2020). Količina makroelemenata u mladim izdancima cikle i brokule. *Proceedings of 55th Croatian and 15th International symposium on agriculture, 16.-21.02.2020, Vodice, Hrvatska*, 198-202.
106. Opačić N., Šagud A., Skomrak A., Đurak J., Kos F., Butković M., Fabek Uher, S. (2018). Microgreens kao funkcionalna hrana. *Glasnik Zaštite Bilja* 41(3): 18-25.
107. Ough C.S., Amerine M.A. (1988). *Methods Analysis of Musts and Wines*. 2nd edition, John Wiley and Sons, New York, NY, USA.
108. Paciolla C., Fortunato S., Dipierro N., Paradiso A., De Leonardis S., Mastropasqua L., de Pinto M.C. (2019). Vitamin C in plants: From functions to biofortification. *Antioxidants* 8(11): 519.
109. Paglialunga G., Moscatello S., Battistelli A., Mattioni M., Del Bianco M., Proietti S. (2024). Continuous Blue Light Treatment Enhances the Nutritional Value of Hydroponically Grown *Eruca vesicaria* L. by Improving Ascorbic Acid Biosynthesis. *Foods* 13(3): 2141.
110. Palmitessa O.D., Gadaleta A., Leoni B., Renna M., Signore A., Paradiso V.M., Santamaria P. (2022). Effects of Greenhouse vs. Growth Chamber and Different Blue-Light Percentages on the Growth Performance and Quality of Broccoli Microgreens. *Agronomy* 12: 1161.
111. Paradiso R., Proietti S. (2022). Light-Quality Manipulation to Control Plant Growth and Photomorphogenesis in Greenhouse Horticulture: The State of the Art and the Opportunities of Modern LED Systems. *Journal of Plant Growth Regulation* 41(15): 742–780.
112. Park Y.R., Kwon, S.-J., Kim, J.H., Duan S., Eom S.H. (2024). Light-Induced Antioxidant Phenolic Changes among the Sprouts of Lentil Cultivar. *Antioxidants* 13: 399.
113. Partap M., Sharma D., HN D., Thakur M., Verma V., Ujala, Bhargava B. (2023). Microgreen: A tiny plant with superfood potential. *Journal of Functional Foods* 107: 105697.
114. Pavlović S., Girek Z., Damnjanović J., Roljević Nikolić S., Mickovski Stefanović V., Đorđević Melnik O., Milojević J. (2024). The Influence of Different LED Light Treatments on the Growth and Salt Stress Tolerance of Cauliflower Microgreens In Vitro. *Horticulturae* 10(7): 672.
115. Pech R., Volná A., Špunda V., Nezval J. (2024). Blue light as an important factor increasing plant tolerance to acute photooxidative stress. *Environmental and Experimental Botany* 226: 5923.
116. Pennisi G., Orsini F., Landolfo M., Pistillo A., Crepaldi A., Nicola S., Fernández J. A., Marcelis L.F.M. (2020). Optimal photoperiod for indoor cultivation of leafy vegetables and herbs. *European Journal of Horticultural Science* 85(5): 329-338.

117. Pérez-Gálvez A., Viera I., Roca M. (2020). Carotenoids and chlorophylls as antioxidants. *Antioxidants* 9(6): 505.
118. Pescarini H.B., Silva V.G.d., Mello S.d.C., Purquerio L.F.V., Sala F.C., Zorzeto Cesar T.Q. (2023). Updates on Microgreens Grown under Artificial Lighting: Scientific Advances in the Last Two Decades. *Horticulturae* 9(8): 864.
119. Pevalek-Kozlina, Branka Fiziologija bilja / Pevalek-Kozlina, Branka (ur.). Zagreb: Profil International, 2003.
120. Pinto E., Almeida A.A., Aguiar A.A., Ferreira I.M.P.L.V.O. (2015). Comparison between the mineral profile and nitrate content of microgreens and mature lettuces. *Journal of Food Composition and Analysis* 37: 38-43.
121. Putri E.A.D., Iswari F., Muhammad F.A., Fauziah R., Budiarto R. (2023). Growth and yield pattern of microgreens under different types of artificial lighting. *Jurnal Kultivasi* 2(1): 48-54.
122. Qiao J., Li Z., Lv Z., Liu S., Chen S., Feng Y. (2024). Effects of Different Combinations of Red and Blue Light on the Edible Organ Morphology and Quality of Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) Microgreens. *Agronomy* 14(4): 751.
123. Rath J. R., MK Ghosal. (2020). Studies on environmental control of greenhouse for crop production. *International Journal of Chemical Studies* 8(5): 674-676.
124. Renna M., Di Gioia F., Leoni B., Mininni C., Santamaria P. (2016). Culinary Assessment of Self-Produced Microgreens as Basic Ingredients in Sweet and Savory Dishes. *Journal of Culinary Science and Technology* 15(2): 1-17.
125. Roeber V.M., Schmölling T., Cortleven A. (2022). The photoperiod: handling and causing stress in plants. *Frontiers of Plant Science* 12: 781988.
126. Samuolienė G., Viršilė A., Miliauskienė J., Haimi P.J., Laužikė K., Brazaitytė A., Duchovskis P. (2021). The Physiological Response of Lettuce to Red and Blue Light Dynamics Over Different Photoperiods. *Frontiers of Plant Science* 11: 610174.
127. Samuolienė G., Brazaitytė A., Sirtautas R., Sakalauskienė S., Jankauskienė J., Duchovskis P., Novičkovas A. (2012). The impact of supplementary short-term red LED lighting on the antioxidant properties of microgreens. VII International Symposium on Light in Horticultural Systems. *Acta Horticulturae* 956: 649-656.
128. Samynathan R., Shanmugam K., Nagarajan C., Murugasamy H., Victor Ilango R. J., Shanmugam A., Venkidasamy B., Thiruvengadam M. (2021). The effect of abiotic and biotic stresses on the production of bioactive compounds in tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Plant Gene* 27: 100316.
129. Sanmartín P., Gambino M., Fuentes E., Serrano M. (2020). A Simple, Reliable, and Inexpensive Solution for Contact Color Measurement in Small Plant Samples. *Sensors* 20(8): 2348.
130. Santos-Sánchez N.F., Salas-Coronado R., Hernández-Carlos B., Villanueva-Cañongo C. (2019). Shikimic acid pathway in biosynthesis of phenolic compounds. *Plant Physiological Aspects of Phenolic Compounds*. IntechOpen.
131. SAS Institute (2017). SAS/STAT 14.3 (Cary, NC. SAD: SAS Institute Inc)
132. Senevirathne G.I., Gama-Arachchige N.S., Karunaratne A. (2015). Preliminary investigations on microgreens: an emerging health food. Proceedings of the Peradeniya University International Research Sessions. Peradeniya, Sri Lanka, 19.
133. Seyedi F.S., Nafchi M. G., Reezi S. (2023). Effects of light spectra on morphological characteristics, primary and specialized metabolites of *Thymus vulgaris* L. *Helyion* 10(1): E23032.

134. Sharma, M.K. (2023). How Plants Adapt to the Photoperiod. *Annual Research and Review in Biology* 38(4):17-45.
135. Sharma S, Shree B, Sharma D, Kumar S, Kumar V, Sharma R, Saini R. (2022). Vegetable microgreens: The gleam of next generation super foods, their genetic enhancement, health benefits and processing approaches. *Food Research International* 155: 111038.
136. Shibaeva T.G., Sherudilo E.G., Rubaeva A.A., Titov A.F. (2022). Continuous LED Lighting Enhances Yield and Nutritional Value of Four Genotypes of Brassicaceae Microgreens. *Plants* 11(2): 176.
137. Simko I. (2020). Predictive Modeling of a Leaf Conceptual Midpoint Quasi-Color (CMQ) Using an Artificial Neural Network. *Sensors* (20):14 3938.
138. Smith H.L., McAusland L., Murchie E.H. (2017). Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. *Journal of Experimental Botany* 68(9): 2099-2110.
139. Soufi H., Kalaji H., Hamidpour M., Malekzadeh K. (2024). 'The roles of light in a plant factory: photosynthesis efficiency and gas exchange parameters of lettuce as a function of light spectra', *Greenhouse Plant Production Journal* 1(1): 1-26.
140. Specht K., Siebert R., Thomaier S., Freisinger U.B., Sawicka M., Dierich A., Henckel D., Busse M. (2015). Zero-Acreage Farming in the City of Berlin: An Aggregated Stakeholder Perspective on Potential Benefits and Challenges. *Sustainability* 7(4): 4511-4523.
141. Su P., Ding S., Wang, Kam W., Yuan M., Chen X., Tang C., Hou J., Wu L. (2024). Plant morphology, secondary metabolites and chlorophyll fluorescence of *Artemisia argyi* under different LED environments. *Photosynthesis Research* 159(2-3): 1-12.
142. Sun B., Lv L., Li L., Li H., Tang T.-T., Wang Y., Niu H. (2024). Effects of Red and Blue LED Light Ratio on Growth and Photosynthesis of Tomato. *Chinese Journal of Agrometeorology* 45(5): 517-524.
143. Sun K., Peng Y., Wang M., Li W., Li Y., Chen J. (2024). Effect of Red and Blue Light on the Growth and Antioxidant Activity of Alfalfa Sprouts. *Horticulturae* 10(1): 76.
144. Sun J., Tan X., Liu B., Battino M., Meng X., Zhang F. (2024). Blue light inhibits gray mold infection by inducing disease resistance in cherry tomato. *Postharvest Biology and Technology* 215: 113006.
145. Swapnil P., Meena M., Singh S.K., Dhuldhaj U.P., Harish, Marwal A. (2021). Vital roles of carotenoids in plants and humans to deteriorate stress with its structure, biosynthesis, metabolic engineering and functional aspects. *Current Plant Biology* 26: 100203.
146. Thakur N., Verma A.K., Kaur J., Thakur C., Thakur A. (2022). A review on microgreens as an emerging food for health benefits. *Annals of Phytomedicine* 11(1): 68-77.
147. Thomaier S., Specht K., Henckel D., Dierich A., Siebert R., Freisinger U.F., Sawicka M. (2015). Farming in and on urban buildings: Present practice and specific novelties of Zero-Acreage Farming (ZFarming). *Renewable Agriculture and Food Systems* 30(1): 43-54.
148. Toscano S., Cavallaro V., Ferrante A., Romano D., Patané C. (2021). Effects of Different Light Spectra on Final Biomass Production and Nutritional Quality of Two Microgreens. *Plants* 10(8): 1584.

149. Trivellini A., Toscano S., Romano D., Ferrante A. (2023). The Role of Blue and Red Light in the Orchestration of Secondary Metabolites, Nutrient Transport and Plant Quality. *Plants* 12(10): 2026.
150. Turner E.R., Luo Y., Buchanan R. L. (2020). Microgreen nutrition, food safety, and shelf life: A review. *Journal of Food Science* 85(4): 870-882.
151. Van Iersel M. W., Gianino D. (2017). An Adaptive Control Approach for Light-emitting Diode Lights Can Reduce the Energy Costs of Supplemental Lighting in Greenhouses. *HortScience* 52(1): 72–77.
152. Vaštakaitė V., Viršilė A., Brazaitytė A., Samuolienė G., Jankauskienė J., Sirtautas R., Novičkovas A., Dabašinskas L., Sakalauskienė S., Miliauskienė J., Duchovskis P. (2015). The Effect of Blue Light Dosage on Growth and Antioxidant Properties of Microgreens. Scientific works of The Institute of Horticulture, Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry Aleksandra Stulginskis University. *Sodininkyste ir Daržininkyste* 34: 1-2.
153. Viršilė A. (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and development. *Agricultural and Food Science* 22(2): 223-234.
154. Von Wettstein D. (1957). Chlorophyll letale and der sub-mikroskopische Formweschwelliger Plastiden. *Experimental Cell Research* 12: 427-506.
155. Wang F., Gao Q., Ji G., Wang J., Ding Y., Wang S. (2024). Effects of Light Intensity and Photoperiod on Morphological Development and Photosynthetic Characteristics of Coriander. *Horticulturae* 10(3): 215.
156. Wang F., Han T., Jeffrey Chen Z. (2024). Circadian and photoperiodic regulation of the vegetative to reproductive transition in plants. *Communications Biology* 7(1): 579.
157. Wang L., Sun C., Luan H., Semiroumi D.T. (2023). Investigating the effectiveness of LED lighting in the production of rich sprouts for food purposes. *Heliyon* 9(4): e14964.
158. Wang T., Sun Q., Zheng Y., Xu Y., Liu B., Li Q. (2024). Effects of Red and Blue Light on the Growth, Photosynthesis, and Subsequent Growth under Fluctuating Light of Cucumber Seedlings. *Plants* 13(12): 1668.
159. Wang Y., Zhang J. (2024), Research on cultural diversity and sustainable land-use management assessment model. *Frontiers in Environmental Science* 12:1359521.
160. Wen L., Meng M., Liu K., Zhang Q., Zhang T., Chen Y, Liang H. (2024). Effect of Photoperiod on Dry Matter Accumulation and Partitioning in Potato. *Agriculture* 14(7): 1156.
161. Wu S., Li R., Bu C., Zhu C., Miao C., Zhang Y., Cui J., Jiang Y., Ding X. (2024) Photoperiodic Effect on Growth, Photosynthesis, Mineral Elements, and Metabolome of Tomato Seedlings in a Plant Factory. *Plants* 13(22): 3119.
162. Wu W., Luo X., Wang Y., Xie X., Lan Y., Li L., Zhu T., Ren M. (2023). Combined metabolomics and transcriptomics analysis reveals the mechanism underlying blue light-mediated promotion of flavones and flavonols accumulation in *Ligusticum chuanxiong* Hort. Microgreens. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 242: 112692.
163. Wu M., Northen T. R., Ding Y. (2023). Stressing the importance of plant specialized metabolites: omics-based approaches for discovering specialized metabolism in plant stress responses. *Frontiers of Plant Science* 14: 1272363.

164. Xiao Z., Rausch S.R., Luo Y., Sun J., Yu L., Wang Q., Stommel J.R. (2019). Microgreens of Brassicaceae: Genetic diversity of phytochemical concentrations and antioxidant capacity. *Food Science and Technology* 101: 731-737.
165. Xiao Z., Codling E.E., Luo Y., Nou X., Lester E.G., Wang Q. (2016). Microgreens of Brassicaceae: Mineral composition and content of 30 varieties. *Journal of Food Composition and Analysis* 49(6): 87-93.
166. Xiao Z., Lester G.E., Park E., Saftner R.A., Luo Y., Wang Q. (2015). Evaluation and correlation of sensory attributes and chemical compositions of emerging fresh produce: Microgreens. *Postharvest Biology and Technology* 110: 140-148.
167. Xiao Z., Lester G.E., Luo Y., Wang Q. (2012). Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: Edible microgreens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60(31): 7644-7651.
168. Xu E., Liu Y., Guo L., Fan Y., Xu L., Li X., Ma J., Wang H., He S., Li T., Xiao J., Qin Y., Luo A. (2024). Transcriptional analysis reveals new insights into the different light intensities of red and blue light on the growth and synthesis of medicinal ingredients in *Dendrobium denneanum*. *Industrial Crops and Products* 210: 118065.
169. Xu Y., Harvey P.J. (2019). Red Light Control of β -Carotene Isomerisation to 9-cis β -Carotene and Carotenoid Accumulation in *Dunaliella salina*. *Antioxidants* 8(5): 148.
170. Yan H., Pei X., Zhang H., Li X., Zhang X., Zhao M., Chiang V.L., Sederoff R.R., Zhao X. (2021). MYB-Mediated Regulation of Anthocyanin Biosynthesis. *International Journal of Molecular Sciences* 22(6): 3103.
171. Yavari N., Tripathi R., Wu B.-S., MacPherson S., Singh J., Lefsrud M. (2021). The effect of light quality on plant physiology, photosynthetic, and stress response in *Arabidopsis thaliana* leaves. *PLoS ONE* 16(3): e0247380.
172. Ying Q., Kong Y., Zheng Y. (2020). Applying Blue Light Alone, or in Combination with Far-red Light, during Nighttime Increases Elongation without Compromising Yield and Quality of Indoor- grown Microgreens. *HortScience* 55(6): 876-881.
173. Zandi P., Schnug E. (2022). Reactive Oxygen Species, Antioxidant Responses, and Implications from a Microbial Modulation Perspective. *Biology* 11(2): 155.
174. Zha L., Liu W., Yang Q., Zhang Y., Zhou C., Shao M. (2020). Regulation of Ascorbate Accumulation and Metabolism in Lettuce by the Red:Blue Ratio of Continuous Light Using LEDs. *Frontiers of Plant Science* 11:704.
175. Zhang Y., Zha L., Liu W., Zhou C., Shao M., Yang Q. (2021). LED Light Quality of Continuous Light before Harvest Affects Growth and AsA Metabolism of Hydroponic Lettuce Grown under Increasing Doses of Nitrogen. *Plants* 10(1): 176.
176. Zhang S., Zhang L., Zou H., Qiu L., Zheng Y., Yang D., Wang Y. (2021). Effects of Light on Secondary Metabolite Biosynthesis in Medicinal Plants. *Frontiers of Plant Science* 12: 781236.
177. Zhang Y., Xiao Z., Ager E., Kong L., Tan L. (2021). Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture. *Journal of Future Foods* 1(1): 58-66.
178. Zhang X., Bian Z., Yuan X., Chen X., Lu C. (2020). A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. *Trends in Food Science and Technology* 99: 203-216.
179. Zhang M., Whitman M.K., Runkle E.S. (2019). Manipulating growth, color and taste attributes of fresh cut lettuce by greenhouse supplemental lighting. *Scientia Horticulturae* 252: 274-282.

180. Zhao T., Nie J., Yan X., Xue W. (2024). Identifying the critical LED light condition for optimum yield and flavonoid of pea sprouts. *Scientia Horticulturae* 327: 112801.
181. Zhou Y., Wu W., Sun Y., Shen Y., Mao L., Dai Y., Yang B., Liu Z. (2024). Integrated transcriptome and metabolome analysis reveals anthocyanin biosynthesis mechanisms in pepper (*Capsicum annuum* L.) leaves under continuous blue light irradiation. *BMC Plant Biology* 24(1): 210.

9. ŽIVOTOPIS

Roberta Vrkić, mag. ing. agr., rođena je 24. veljače 1997. godine u Zagrebu. Preddiplomski studij Zaštita bilja na Agronomskog fakultetu Sveučilišta u Zagrebu završava 2018. godine te iste upisuje diplomski studij Fitomedicina, uz koji paralelno završava Pedagoško-psihološku izobrazbu nastavnika na Učiteljskom fakultetu 2020. godine. Iste godine zapošljava se kao student u tvrtci Vesela motika u Zagrebu u sklopu koje upisuje poslijediplomski doktorski studij Poljoprivredne znanosti na Agronomskom fakultetu u Zagrebu. Uz posao Agronoma u Veseloj motici radi i kao nastavnik prirode i biologije u osnovnoj školi.

Do sada je autor ili koautor sljedećih znanstvenih i stručnih radova:

1. Vrkić R., Šic Žlabur J., Dujmović M., Benko B. (2024). Can LED Lighting Be a Sustainable Solution for Producing Nutritionally Valuable Microgreens? *Horticulturae* 10(3): 249.
2. Vrkić R., Benko B., Fabek Uher S., Šic Žlabur J. (2024). Yield and morphology of mustard and garden cress microgreens grown under LEDs supplemental lighting. *Acta Horticulturae* 1391: 329-334.
3. Vrkić R., Hadelan L., Zrakić Sušac M. (2024). Proizvodnja i financijske značajke mladih izdanaka – prikaz iz prakse. *Glasnik Zaštite Bilja* 47(3): 14-22.
4. Vrkić R., Debeleć K., Benko B., Šic Žlabur J. (2022). The potential of LED illumination on the yield, morphological properties and color of broccoli microgreens. *Proceedings of the XIII International Scientific Agriculture Symposium "AGROSYM 2022"*. Jahorina 06.-09.10.2022., str. 224-229

Izlaganja na znanstvenim skupovima:

1. Vrkić R., Šic-Žlabur J., Dujmović M., Benko B. (2022). Specialized metabolites content of broccoli microgreens grown under the different LED wavelengths. *Book of Abstracts of the 10th International Congress of Food Technologists, Biotechnologists and Nutritionists*. Komes, Draženka (ur.). Zagreb: Hrvatsko društvo prehrambenih tehnologa, biotehnologa i nutricionista, str. 154.
2. Vrkić R., Šic Žlabur J., Benko B. (2022). Specialized metabolites accumulation in mung bean microgreens under the influence of LEDs supplemental illumination. *CASEE conference 2022, Sustainable agriculture in the context of climate change and digitalization, Book of abstracts*. Kadlecová, Petra ; Lošťák, Michal (ur.). Prag: Czech University of Life Sciences Prague (CZU), str. 8.
3. Brezinščak L., Kisić I., Vrkić R., Bogunović I. (2020). Utjecaj tri tipa različite obrade tla na zbijenost tla. *55th Croatian & 15th International Symposium on Agriculture*. Mioč, Boro; Širić, Ivan (ur.). Zagreb: Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2020. str. 19-20.