

# Bioaktivni spojevi i biološki učinci ekstrakata mikropovrća roda *Brassica*

---

**Božić, Nika**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:237419>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-01**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Biološki odsjek

Nika Božić

**Bioaktivni spojevi i biološki učinci ekstrakata  
mikropovrća roda *Brassica***

Završni rad

Zagreb, 2024.

University of Zagreb  
Faculty of Science  
Department of Biology

Nika Božić

**Bioactive compounds and biological effects of  
*Brassica* microgreens extracts**

Bachelor thesis

Zagreb, 2024.

Ovaj završni rad je izrađen u sklopu studijskog programa Molekularna Biologija na Botaničkom zavodu Biološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Ivane Šola.

# TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

---

Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Biološki odsjek

Završni rad

## Bioaktivni spojevi i biološki učinci ekstrakata mikropovrća roda *Brassica*

Nika Božić

Rooseveltov trg 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Zbog klimatskih promjena i ubrzanog rasta svjetske populacije, potrebno je pronaći nove izvore hrane koji zadovoljavaju nutritivne zahtjeve te se mogu uzgajati na brz i jednostavan način, uz što manje učinke na okoliš. Mikropovrće, mlade jestive biljke koje sadrže stabljiku, kotiledone i nekoliko pravih listova, pokazalo se kao obećavajuća nova „funkcionalna hrana“ koja odgovara tim uvjetima. Rod *Brassica* ističe se kao jedan od najčešće uzgajanih za ljudsku prehranu i stoga najdostupnijih za proizvodnju mikropovrća. Povrće ovog roda poznato je po visokim koncentracijama za organizam čovjeka korisnih nutrijenata i fitokemikalija, a mikropovrće se pokazalo kao još bogatiji izvor nekih od njih, poput različitih vitamina, minerala, pigmenata, polifenola i glukozinolata. Mnogi od tih bioaktivnih spojeva imaju izrazito pozitivne učinke na ljudsko zdravlje, zahvaljujući svojim antioksidacijskim, antiupalnim, antidijabetičkim i antikancerogenim svojstvima, stoga se konzumacija mikropovrća bogatog istima predlaže kao učinkovit način prevencije i liječenja niza kroničnih bolesti. Ovaj rad predstavlja pregled informacija o fitokemijskom i nutritivnom sastavu mikropovrća roda *Brassica*, posebice bioaktivnim spojevima i njihovim učincima u ljudskom organizmu, kako bi se pokazao potencijal mikropovrća kao nove „superhrane“.

Ključne riječi: antioksidansi, funkcionalna hrana, glukozinolati, kronične bolesti, polifenoli  
(30 stranica, 3 slike, 2 tablice, 70 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski)

Rad je pohranjen u Središnjoj biološkoj knjižnici

Mentor: izv. prof. dr. sc. Ivana Šola

## BASIC DOCUMENTATION CARD

---

University of Zagreb  
Faculty of Science  
Department of Biology

Bachelor thesis

# Bioactive compounds and biological effects of *Brassica* microgreens extracts

Nika Božić

Rooseveltova trg 6, 10000 Zagreb, Croatia

Due to climate change and rapid growth in global population, it is necessary to find new food sources that satisfy nutritional needs and can be cultivated in a fast and simple way, with minimal environmental effects. Microgreens, young plants containing the stem, cotyledons and the emerging first true leaves, have proven to be a promising new „functional food“ that meets those conditions. The *Brassica* genus stands out as one of the most commonly grown for human consumption and thus one of the most readily available for the production of microgreens. Vegetables of this genus are known for their high concentrations of nutrients and phytochemicals useful for the human organism, and microgreens turn out to be an even richer source of some of them, such as different vitamins, pigments, polyphenols and glucosinolates. Many of these bioactive compounds have extremely positive effects on human health, thanks to their antioxidant, anti-inflammatory, antidiabetic and anticancer properties, which is why consumption of microgreens rich in them is proposed as an effective mean of preventing and treating various chronic diseases. This paper presents an overview of information about the phytochemical and nutritional composition of *Brassica* microgreens, especially bioactive compounds and their effects in the human organism, in order to show the potential of microgreens as the new „superfood“.

Keywords: antioxidants, chronic diseases, functional food, glucosinolates, polyphenols  
(30 pages, 3 figures, 2 tables, 70 references, original in: Croatian)  
Thesis is deposited in Central Biological Library.

Mentor: Dr. Ivana Šola, Assoc. Prof.

## POPIS KRATICA

<b>AhR</b>	aril hidrokarbonski receptor (engl. <i>arylhydrocarbon receptor</i> )
<b>COX-2</b>	ciklooksigenaza-2
<b>DIM</b>	3,3'-diindolilmetan
<b>I3C</b>	indol-3-karbinol
<b>Keap1</b>	protein 1 povezan s EHC-om sličan Kelchu (engl. <i>kelch-like EHC-associated protein 1</i> )
<b>LDL</b>	lipoprotein niske gustoće (engl. <i>low-density lipoprotein</i> )
<b>NF-<math>\kappa</math>B</b>	jezgrin faktor pojačivač kappa lakog lanca aktiviranih B-stanica (engl. <i>nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells</i> )
<b>Nrf2</b>	faktor 2 povezan s jezgrinim faktorom eritroid 2 (engl. <i>nuclear factor erythroid 2-related factor 2</i> )
<b>PPAR</b>	receptor aktiviran proliferatorom peroksisoma (engl. <i>peroxisome proliferator-activated receptor</i> )
<b>ROS</b>	reaktivni kisikovi oblici (engl. <i>reactive oxygen species</i> )
<b>TNF-<math>\alpha</math></b>	faktor nekroze tumora alfa (engl. <i>tumor necrosis factor alpha</i> )

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. ROD <i>Brassica</i> .....	3
3. FITOKEMIJSKI SASTAV MIKROPOVRĆA RODA <i>Brassica</i> .....	4
3.1. OPĆI NUTRITIVNI SASTAV .....	4
3.2. VITAMINI .....	5
3.2.1. Askorbinska kiselina .....	6
3.2.2. Filokinon.....	7
3.2.3. Tokoferoli .....	8
3.3. PIGMENTI .....	9
3.3.1. Klorofil .....	9
3.3.2. Karotenoidi .....	10
3.4. MINERALI .....	11
3.5. FENOLNI SPOJEVI.....	13
3.6. GLUKOZINOLATI.....	14
4. BIOLOŠKI UČINCI .....	16
4.1. REAKTIVNI KISIKOVI OBLICI .....	16
4.2. UPALA I REGULACIJA IMUNOSNOG SUSTAVA .....	17
4.3. PRETILOST, KARDIOVASKULARNE BOLESTI I DIJABETES.....	18
4.4. RAK.....	20
5. ZAKLJUČAK.....	21
6. LITERATURA .....	22
ŽIVOTOPIS.....	30

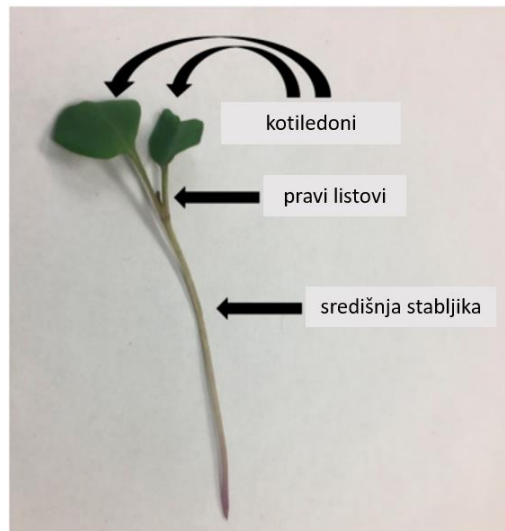


# 1. UVOD

Nedostatak hrane zbog ubrzanog rasta svjetske populacije, smanjivanja obradivih površina te klimatskih promjena stvara potrebu za pronalaskom zdravog, nutritivno bogatog izvora hrane koji je moguće uzgajati na brz, jednostavan i održiv način, u malim prostorima i tijekom cijele godine (Dereje i sur. 2023; Turner i sur. 2020), uz što manje negativne učinke na okoliš (Le i sur. 2020). Mikropovrće se na tržištu pojavilo osamdesetih godina prošlog stoljeća (Zhang i sur. 2021), no u posljednjem je desetljeću počelo postizati sve veću popularnost, kako u kulinarstvu zbog intenzivnih osjetljivih karakteristika, poput okusa, teksture i boje (Bhaswant i sur. 2023), tako i među znanstvenicima i nutricionistima nakon što su mnoga istraživanja potvrdila da mikropovrće sadrži obilje bioaktivnih fitokemikalija korisnih za ljudsko zdravlje (Zhang i sur. 2021). Iz ovih se razloga mikropovrće smatra obećavajućom novom generacijom takozvane „superhrane“ ili „funkcionalne hrane“ (Bhaswant i sur. 2023).

Mikropovrće se definira kao mlade jestive biljke s potpuno razvijenim kotiledonima te izbijajućim prvim parom pravih listova (Slika 1) (Renna i Paradiso 2020; Cano-Lamadrid i sur. 2023), odnosno kao stadij rasta između klijanaca i takozvanog „baby povrća“ (Choe i sur. 2018). Mikropovrće se za konzumaciju bere 7-21 dan nakon sadnje, ovisno o vrsti (Le i sur. 2020), kada veličina klijanaca iznosi 2-8 cm (Bhaswant i sur. 2023). Privlačnost uzgoja mikropovrća leži u tome što se, osim za masovnu proizvodnju, lako može uzgajati i na manjoj skali, za individualnu upotrebu, u sustavima s ili bez tla te na različitim dostupnim tipovima medija (Alloggia i sur. 2023). Uzgoj ne zahtijeva mnogo prostora, što je pogodno za urbanu poljoprivredu (Renna i Paradiso 2020), a krajnji se proizvod dobiva u kratkom roku i na ekološki prihvatljiv način, bez gnojiva i pesticida te uz mali utrošak vode (Choe i sur. 2018). Također, mogućnost uzgoja u zatvorenim prostorima čini ga neovisnim o okolišnim čimbenicima, poput sezonskih, geografskih i klimatskih varijacija (Le i sur. 2020). Time je omogućeno i potpuno kontroliranje uvjeta kultivacije, poput temperature, svjetlosti, količine vode i supstrata, kao i njihova optimizacija za dobivanje biljaka sa što boljim sadržajem nutrijenata i fitokemikalija (Sharma i sur. 2022; Teng i sur. 2021). Međutim, glavni je nedostatak mikropovrća kratak vijek trajanja u svježem obliku (Zhang i sur. 2021), odnosno ubrzano propadanje nakon berbe zbog velikog omjera površine i volumena, transpiracije i rasta stope respiracije (Turner i sur. 2020). No, ukoliko ih se osuši, npr. procesom liofilizacije,

vijek trajanja je značajno produžen i sličan onome osušenih zrelih stadija biljaka (Raimondi i sur. 2017).



**Slika 1.** Mikropovrće brokule s naznačenim osnovnim dijelovima. Preuzeto i prilagođeno iz Choe i sur. 2018.

Svoje koje se najčešće koriste za uzgoj mikropovrća pripadaju porodicama Cucurbitaceae, Asteraceae, Chenopodiaceae, Lamiaceae (Le i sur. 2020) te porodicama Brassicaceae, Apiaceae i Amaranthaceae kao najistraživanijima (Dereje i sur. 2023). Među navedenima posebno se ističe porodica Brassicaceae, odnosno krstašice, koja je među uzgajivačima popularna zbog kratkog produkcijskog vremena i brzog klijanja (Sharma i sur. 2022), a među potrošačima i istraživačima zbog mnogih dokazanih pozitivnih učinaka na zdravlje, zahvaljujući visokim koncentracijama korisnih nutrijenata i biološki aktivnih spojeva, poput vitamina, minerala, pigmenata, polifenola, glukozinolata i drugih (Le i sur. 2020), koje su često mnogo više nego u zrelim biljkama iste svojte (Šola i sur. 2020; Zhang i sur. 2021).

Ovaj rad u prvom redu predstavlja pregled dosadašnjih spoznaja o kemijskom sastavu mikropovrća roda *Brassica*, s naglaskom na biološki aktivne spojeve i njihove uloge u održavanju normalne funkcionalnosti ljudskog organizma, kao i pozitivne učinke u sprječavanju i tretiranju kroničnih bolesti, poput pretilosti, kardiovaskularnih bolesti, dijabetesa i raka.

## 2. ROD *Brassica*

Biljna porodica Brassicaceae ili Cruciferae, odnosno na hrvatskom jeziku krstašice, uključuje preko 3000 vrsta podijeljenih u više od 300 rodova (Jambor i sur. 2022). Neki od poznatijih rodova su *Arabidopsis* (uročnjak), *Camelina* (podlanak), *Sinapis* (neke vrste gorušica), *Raphanus* (rotkvice, daikon), *Eruca* (rikula, povrtna riga) te rod *Brassica* kao tipski rod i jedan od najraširenijih (Ebert 2022; Favela-González i sur. 2020).

Glavna vrsta roda *Brassica* je *B. oleracea* L. čiji veliki broj varijeteta predstavlja najčešće komercijalno uzgajano povrće za ljudsku prehranu (Favela-González i sur. 2020). Primjeri povrća *Brassica* su brokula (*B. oleracea* var. *italica*), kupus (*B. oleracea* L. var. *capitata*), cvjetača (*B. oleracea* L. var. *botrytis*), kelj (*B. oleracea* L. var. *acephala*), korabica (*B. oleracea* L. var. *gongylodes*), prokulice (*B. oleracea* L. var. *gemmifera*), gorušica (*B. juncea* (L.) Czern.), repa (*B. rapa* L. var. *rapa*) te azijski pak choi (*B. rapa* L. var. *chinensis*), mizuna (*B. rapa* L. var. *nipposinica*), komatsuna (*B. rapa* L. var. *perviridis*), tatsoi (*B. rapa* L. var. *rosularis*) i kineski kelj (*B. oleracea* L. var. *alboglabra*) (Ebert 2022; Turner i sur. 2020; Xiao i sur. 2016).

Za povrće roda *Brassica* poznato je da u zreloom stanju sadrži velike količine nutrijenata i fitokemikalija koji im daju boju, aromu i okus (Ebert 2022), ali su i izuzetno korisni za ljudsko zdravlje i prevenciju kroničnih bolesti (de la Fuente i sur. 2019). Mnoga su istraživanja već pokazala da je mikropovrće još bogatiji izvor različitih fitonutrijenata i bioaktivnih spojeva od odraslog povrća (Alloggia i sur. 2023), stoga se mikropovrće roda *Brassica* (Slika 2) smatra posebno obećavajućim novim oblikom funkcionalne hrane (Pant i sur. 2023).



**Slika 2.** Primjeri mikropovrća roda *Brassica*: pak choi (A), kelj (B) i brokula (C). Preuzeto i prilagođeno iz Bhaswant i sur. 2023.

### 3. FITOKEMIJSKI SASTAV MIKROPOVRĆA RODA *Brassica*

#### 3.1. OPĆI NUTRITIVNI SASTAV

Mikropovrće, unatoč svojoj veličini, predstavlja bogat izvor različitih nutrijenata, uključujući i mnoge esencijalne za ljudsko zdravlje. U Tablici 1 prikazane su okvirne vrijednosti udjela glavnih skupina nutrijenata te kalorijska vrijednost mikropovrća roda *Brassica*, kao i pripadajuće vrijednosti za zrelo povrće, objedinjene iz dostupnih podataka iz literature. Opći nutritivni sastavi zrelog i mikropovrća usporedivi su, ali mikropovrće može biti bogatije određenim fitokemikalijama i biološki aktivnim spojevima, kako će biti objašnjeno u daljnjim poglavljima. Nutritivna vrijednost mikropovrća može se relativno jednostavno prilagoditi i dodatno povećati promjenom uzgojnih uvjeta (Bhaswant i sur. 2023). Također je značajno navesti da je, prema Weber (2017), za uzgoj mikropovrća brokule potrebno 158-236 puta manje vode i 93-95% manje vremena nego za uzgoj nutritivno ekvivalentne količine zrelog povrća brokule.

**Tablica 1.** Usporedba općeg nutritivnog sastava mikropovrća i zrelog povrća roda *Brassica*. Podaci preuzeti iz Dereje i sur. 2023; Favela-González i sur. 2020; Manchali i sur. 2012; Marchioni i sur. 2021.

nutrijenti (g/100 g svježe mase)	mikropovrće	zrelo povrće
proteini	1,88 – 3,00	0,68 – 3,28
vlakna	0,36 – 2,08	1,00 – 4,10
pepeo	0,51 – 1,20	-
masti	0,36 – 0,49	0,00 – 0,74
ugljikohidrati	2,70 – 3,13	2,18 – 10,0
voda	86,75 – 94,67	89,63 – 95,32
kalorije (kcal/100 g)	20,22 – 24,68	13 – 34

Listove mikropovrća karakterizira niska kalorijska vrijednost te niski glikemijski indeks, zbog čega mogu biti pogodna namirnica za dijabetičare (Wojdyło i sur. 2020). S druge strane, sadrže relativno visoke koncentracije proteina, ugljikohidrata, vlakana i pepela (anorganskog ostatka nakon spaljivanja ili potpune oksidacije organske tvari (Marshall 2010)), a to se posebice odnosi na mikropovrće brokule i gorušice (Dereje i sur. 2023). Udio vode u mikropovrću općenito je vrlo

visok i uglavnom prelazi 85% svježe mase, neovisno uzgaja li se u sustavu s ili bez tla (Marchioni i sur. 2021).

Mikropovrće porodice Brassicaceae ima veći udio proteina nego Asteraceae (Paradiso i sur. 2018), ali manji nego Fabaceae (Kowitcharoen i sur. 2021). Wojdyło i sur. (2020) identificirali su 24 slobodne aminokiseline u mikropovrću kelja te 23 u mikropovrću brokule, od kojih je *L*-glutamat bio najzastupljeniji (98,8 i 330,6 mg/100 g svježe mase). Zhang i sur. (2020) su u mikropovrću kineskog kelja detektirali 25 aminokiselina, među kojima 7 esencijalnih za ljude.

Koncentracija lipida u mikropovrću izrazito je niska, ali je zabilježena prisutnost esencijalnih masnih kiselina od vitalne važnosti za ljudsko zdravlje, koje se moraju uzimati prehranom (Dereje i sur. 2023). Primjerice, u mikropovrću vrste *B. carinata* A. Braun upravo su se esencijalne masne kiseline  $\alpha$ -linolenska i linolenska kiselina pokazale kao najzastupljenije masne kiseline, uz etil-linoleat i palmitinsku kiselinu (Nakakaawa i sur. 2023). Osim toga, u mikropovrću uljane repice (*B. napus* L.) zabilježene su najveće količine fosfatidilkolina i fosfatidiletanolamina, glavnih glicerofosfolipida (Castellaneta i sur. 2022).

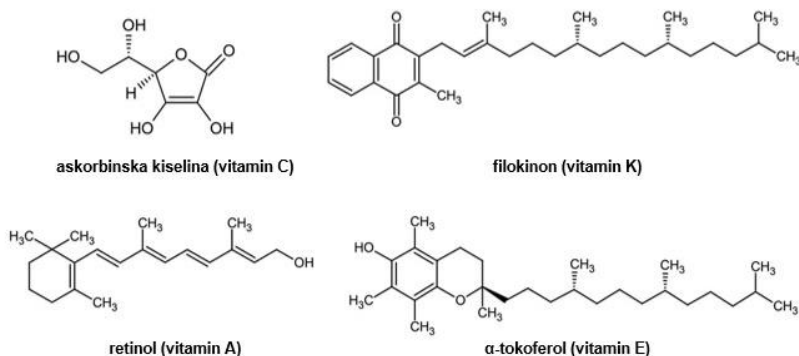
Ugljikohidrati zabilježeni u mikropovrću uglavnom su topivi šećeri, poput glukoze, fruktoze i saharoze, te topiva i netopiva dijetalna vlakna, dok je udio škroba uglavnom vrlo nizak (Teng i sur. 2021). Topivi šećeri važni su kao izvor energije te imaju značajan utjecaj na okus povrća i mikropovrća (Favela-González i sur. 2020), a dijetalna vlakna sudjeluju u gubitku tjelesne mase, kontroli kolesterola u krvi, liječenju i prevenciji zatvora, poboljšavaju toleranciju na glukozu te imaju sposobnost vezanja nekih toksičnih spojeva (Ghoora i sur. 2020; Ebert 2022). Međutim, budući da su dijetalna vlakna uglavnom komponente biljnih staničnih stijenki, njihov sadržaj raste sa starošću biljke, stoga mikropovrće nije izrazito bogato njima (Ebert 2022).

### **3.2. VITAMINI**

Vitamini su nezamjenjivi organski mikronutrijenti nužni za normalno funkcioniranje ljudskog metabolizma, uključujući rast i razvoj, reprodukciju i održavanje homeostaze u organizmu (Dereje i sur. 2023). Djeluju kao kofaktori mnogih enzima te su važni za održavanje integriteta staničnih membrana, funkciju živaca i mišića te razvoj kostiju (Chungchunlam i Moughan 2023). Nedostatak vitamina može uzrokovati različite bolesti, koje u nekim slučajevima mogu biti letalne

(Asensi-Fabado i Munné-Bosch 2010). Istraživanja *in vitro* pokazala su da mnogi vitamini djeluju kao direktni antioksidansi i donori elektrona, stoga se smatra da njihova konzumacija smanjuje rizik od kroničnih bolesti (Di Bella i sur. 2020), a za neke je vitamine utvrđen i antikancerogeni potencijal (Teng i sur. 2021).

Mnogi vitamini su esencijalni, odnosno moraju se unositi prehranom, te upravo biljke predstavljaju ključan izvor vitamina C, K<sub>1</sub>, provitamina A te nekih vitamina E (Martin i Li 2017) (Slika 3). Mikropovrće prepoznato je kao posebno bogat izvor vitamina, često nadmašujući koncentracije prisutne u zreloom povrću. Proces klijanja potiče sintezu vitamina, a fotosintetska aktivnost koja započinje u stadiju mikropovrća dodatno pojačava akumulaciju vitamina C, filokinona i tokoferola u odnosu na stadij klijanca. Dodatna prednost mikropovrća je što se uglavnom konzumira sirovo, stoga nema opasnosti od gubitka termolabilnih nutrijenata, poput vitamina C, procesiranjem hrane (Ebert 2022).



**Slika 3.** Strukture nekih od esencijalnih vitamina za čovjeka. Preuzeto i prilagođeno iz Li i sur. (2020).

### 3.2.1. Askorbinska kiselina

Askorbinska kiselina, odnosno vitamin C, termolabilan je vitamin topiv u vodi koji se sintetizira isključivo u biljkama (Dereje i sur. 2023). Jedan je od esencijalnih nutrijenata za ljudsko zdravlje, čiji teški nedostatak može uzrokovati skorbut (Bhaswant i sur. 2023). Nužan je za niz bioloških funkcija, poput sinteze kolagena, zacjeljivanja rana te regulacije imunskog sustava, a ističe se i kao moćan antioksidans (Zhang i sur. 2021), stoga sudjeluje u prevenciji mnogih kroničnih bolesti ograničavanjem nepoželjnih reakcija oksidacije i oštećenja (Wojdylo i sur. 2020). Preporučena dnevna doza vitamina C za sprječavanje skorbuta iznosi 45 mg, a za prevenciju raka, srčanih bolesti i sive mreže 90-100 mg (Martin i Li 2017).

Istraživanja su pokazala da je razina askorbata često viša u stadiju mikropovrća nego u ostalim stadijima razvoja biljke. Udio askorbinske kiseline u mikropovrću porodice Brassicaceae varira između 27,8 i 147 mg po 100 g svježe mase, dok su vrijednosti za zrelo povrće u rasponu 5,7-24,8 mg/100 g svježe mase (Dereje i sur. 2023). Što se tiče samog roda *Brassica*, Di Bella i sur. (2020) utvrdili su da je udio vitamina C značajno veći (7,5 mg/g suhe mase) u mikropovrću siciljske brokule (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Plenck) nego u stadiju „baby povrća“ (6,1 mg/g suhe mase), dok su Xiao i sur. (2012) u mikropovrću crvenog kupusa zabilježili 6 puta veću koncentraciju vitamina C (147,0 mg/100 g svježe mase) od prethodno objavljenih vrijednosti za zreli stadij (24,4 mg/100 g svježe mase). Xiao i sur. (2019) su u mikropovrću cvjetače izmjerili ukupni udio askorbata od 120,8 mg/100 g svježe mase, odnosno vrijednost oko 2,5 puta veću od dostupnih podataka za cvjetaču u punoj veličini (13,8-51,1 mg/100 g svježe mase). Šola i sur. (2020) analizirali su pekinški kupus (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*) i također zabilježili značajno višu koncentraciju L-askorbinske kiseline u stadiju klijanaca, nego u kasnijim stadijima razvoja. S druge strane, de la Fuente i sur. (2019) zabilježili su manje vitamina C u mikropovrću kelja nego u zrelim listovima.

Općenito se među mikropovrćem roda *Brassica* cvjetača ističe kao najbogatiji izvor vitamina C, a slijede ju brokula, kineski kelj, crveni i savojski kupus, čije se vrijednosti ukupnog sadržaja askorbata u pravilu kreću između 80 i 120 mg po 100 g svježe mase (Xiao i sur. 2019; Kowitcharoen i sur. 2021).

### 3.2.2. Filokinon

Filokinon, poznat i pod nazivom vitamin K<sub>1</sub>, vitamin je topiv u lipidima (Li i sur. 2021). Ključna je komponenta fotosintetskog lanca elektrona u fotosustavu I (Asensi-Fabado i Munné Bosch 2010), dok u ljudskom tijelu igra važnu ulogu kao kofaktor enzima koji sudjeluju u zgrušavanju krvi te metabolizmu kostiju i krvnih žila (Basset i sur. 2017; Xiao i sur. 2019). Osim toga, pokazuje i izvrsna antioksidacijska svojstva *in vitro* (Asensi-Fabado i Munné Bosch 2010). Primarni je izvor vitamina K<sub>1</sub> u ljudskoj prehrani zeleno povrće (Bhaswant i sur. 2023), a po visokim koncentracijama ističe se lisnato povrće, poput špinata i kelja, te brokula (Choe i sur. 2018).

Mnogi autori ističu povišene razine filokinona u mikropovrću u odnosu na odgovarajuće zrele biljke, posebice u korjenastim vrstama (Alloggia i sur. 2023). Analiza Xiao i sur. (2012) pokazala je da 18 od 25 komercijalno uzgajanih vrsta mikropovrća sadrži jednaku ili veću koncentraciju vitamina K<sub>1</sub> od zrele brokule, a 4 vrste veću koncentraciju od zrelih listova špinata, koji se generalno smatra jednim od najbogatijih izvora vitamina K<sub>1</sub>. Udio filokinona u mikropovrću porodice Brassicaceae kreće se od 0,13 do 0,37 mg/100 g svježe mase (Dereje i sur. 2023). U mikropovrću crvenog kupusa zabilježeno je 2,77 µg filokinona po g svježe mase, gotovo 70 puta više od koncentracije zabilježene u zreloom crvenom kupusu (0,04 µg po g svježe mase) (Xiao i sur. 2012). Nadalje, u mikropovrću rapini (*Brassica rapa* L. var. *ruvo*) koncentracija filokinona (3,7 µg/g svježe mase) je 1,7 puta veća, a u mikropovrću brokule (3,3 µg/g svježe mase) 1,8-3,2 puta veća od koncentracije u odgovarajućoj zreloj biljci, stoga se mikropovrće ovih dviju vrsta ističe kao odličan izvor vitamina K<sub>1</sub> (Xiao i sur. 2019).

### 3.2.3. Tokoferoli

Tokoferoli i tokotrienoli prirodni su organski spojevi koji zajedno čine tokokromanole, odnosno skupinu vitamina E (Favela-González i sur. 2020). Tokoferoli su, za razliku od tokotrienola, prisutni u svim fotosintetskim organizmima (Asensi-Fabado i Munné-Bosch 2010). Važan su dio sustava antioksidansa topivih u lipidima te sudjeluju u zaštiti staničnih i unutarstaničnih membrana od lipidne peroksidacije (Ghoora i sur. 2020). U prirodi postoje četiri izomera tokoferola,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  i  $\delta$ , od kojih je  $\alpha$ -tokoferol najaktivniji oblik, a  $\gamma$ -tokoferol uglavnom najzastupljeniji u biljnim tkivima (Rizvi i sur. 2023). Osim za ograničavanje stvaranja slobodnih radikala,  $\alpha$ -tokoferol važan je nutrijent za mnoge druge tjelesne funkcije, poput stvaranja i provođenja živčanih impulsa, pokretanja mišića te jačanja imunskog sustava (Bhaswant i sur. 2023). Preporučena dnevna doza vitamina E, odnosno  $\alpha$ -tokoferola, iznosi 15 mg dnevno (Rizvi i sur. 2023), a smatra se i da redovita konzumacija može pomoći u prevenciji bolesti povezanih sa starenjem, poput kardiovaskularnih ili Alzheimerove bolesti (Jambor i sur. 2022).

Iako su glavni izvori tokoferola u ljudskoj prehrani uglavnom orašasti plodovi i zreli špinat, mnoga su istraživanja pokazala značajne koncentracije različitih oblika tokoferola u mikropovrću (Rizvi i sur. 2023), posebice mikropovrću porodica Apiaceae i Brassicaceae (Jambor i sur. 2022). Udio  $\alpha$ -tokoferola u mikropovrću Brassicaceae kreće se u rasponu 1,6-87,4 mg/100 g svježe mase, a  $\gamma$ -



tokoferola u rasponu 0,1-39,4 mg/100 g svježje mase (Dereje i sur. 2023). Kao najbogatije ističu se vrste roda *Raphanus*, posebice daikon rotkva (87,4 mg  $\alpha$ -tokoferola i 39,4 mg  $\gamma$ -tokoferola po 100 g svježje mase) (Xiao i sur. 2012; 2019). Pri analizi 30 varijeteta mikropovrća porodice Brassicaceae, za vrste roda *Brassica* izmjerene su vrijednosti sadržaja  $\alpha$ -tokoferola u rasponu od 1,6 (savojski kupus) do 3,9 mg/100 g svježje mase (kineski kupus) te  $\gamma$ -tokoferola u rasponu od 0,1 (crveni kelj i mizuna) do 0,9 mg/100 g svježje mase (ljubičasta korabica) (Xiao i sur. 2019). Xiao i sur. (2012) u mikropovrću crvenog kupusa izmjerili su više od 400 puta veći udio vitamina E (24,1 mg/100 g svježje mase) nego u odrasloj biljci (0,06 mg/100 g svježje mase), a sličan je trend pokazan i za drugo mikropovrće (Paradiso i sur. 2018).

### 3.3. PIGMENTI

Biljni pigmenti prirodne su organske molekule koje organima biljaka daju različita obojenja. Glavne skupine pigmenata u biljkama su klorofili, karotenoidi, flavonoidi i betalaini (Młodzińska 2009), a njihov sadržaj prvenstveno ovisi o vrsti i svjetlosnim uvjetima (Teng i sur. 2021). Klorofili i karotenoidi najzastupljeniji su pigmenti na Zemlji (Dereje i sur. 2023) te imaju primarnu ulogu u fotosintetskim reakcijama, a flavonoidi u privlačenju oprašivača i rasprostranjivača sjemenki (Młodzińska 2009). Iako nisu esencijalni nutrijenti za ljude, mnogi pigmenti pokazuju značajne biološke aktivnosti kojima promiču ljudsko zdravlje. Većina može djelovati kao antioksidansi te time sudjelovati u prevenciji kroničnih bolesti i popravku oštećenih tkiva (Lila 2009).

#### 3.3.1. Klorofil

Klorofil je glavni zeleni pigment koji se u biljkama nalazi u dva oblika, klorofil *a* i klorofil *b*, obično u omjeru 3:1 (Palta 1990). To je primarni metabolit porfirinske strukture (Le i sur. 2020) koji, osim ključne uloge u fotosintezi, služi i kao prekursor tokoferola, a pokazuje i antioksidacijski potencijal (Teng i sur. 2021). U ljudskom tijelu pokazuje ulogu u zacjeljivanju rana, kontroli kristala kalcijevog oksalata, regulaciji metabolizma ksenobiotika i indukciji apoptoze (Le i sur. 2020).

Mikropovrće sadrži veće količine klorofila od klijanaca jer fotosintetska aktivnost pojačava njegovu akumulaciju (Ebert 2022). U različitim vrstama mikropovrća krstašica zabilježeno je 39,79-185,25 mg klorofila po 100 g svježje mase (Dereje i sur. 2023), pri čemu se kao posebno

dobri izvori klorofila ističu pak choi (185,25 mg/100 g svježe mase), tatsoi (184,18 mg/100 g svježe mase) i komatsuna (145,39 mg/100 g svježe mase) (Kyriacou i sur. 2019). U istraživanju Kowitcharoen i sur. (2021), među 7 analiziranih vrsta mikropovrća porodice Brassicaceae, po sadržaju klorofila istaknuli su se brokula i kineski kelj (54,26 i 58,44 mg/100 g svježe mase). Određeno mikropovrće krstašica bolji je izvor klorofila u odnosu na zrelo povrće (Paradiso i sur. 2018; Dereje i sur. 2023). Primjerice, mikropovrće brokule ima 16 puta veći udio ukupnog klorofila od zrele brokule (Tan i sur. 2020).

### 3.3.2. Karotenoidi

Karotenoidi su skupina lipofilnih pigmenata koji biljkama daju žutu, narančastu i crvenu boju (Zhang i sur. 2021). To su izoprenoidne molekule (Le i sur. 2020) od 40 ugljikovih atoma povezanih konjugiranim dvostrukim vezama, koje im omogućuju aktivnost uklanjanja slobodnih radikala, odnosno antioksidacijsko djelovanje (Favela-González i sur. 2020). Obuhvaćaju karotene (npr.  $\beta$ -karoten i likopen) i ksantofile (npr. lutein, zeaksantin i violaksantin) (Zhang i sur. 2021). Neki od njih, poput  $\alpha$ -,  $\beta$ - i  $\gamma$ -karotena te  $\beta$ -kriptoksantina, prekursori su vitamina A (Favela-González i sur. 2020). Vitamin A esencijalan je za rast, organogenezu, vid i prevenciju očnih bolesti, a pomaže i u smanjenju rizika od raka i drugim funkcijama imunskog sustava (Le i sur. 2020; Dereje i sur. 2023).

Beta-karoten je crveno-narančasti pigment, najčešći karotenoid u voću i povrću te glavni prekursor vitamina A (provitamin A) (Rizvi i sur. 2023). Prisutan je u svim fotosintetskim organizmima (Asensi-Fabado i Munné-Bosch 2010). Razina  $\beta$ -karotena u zreloom povrću roda *Brassica* kreće se od 0,01 do 0,12 mg/100 g svježe mase, a posebno dobrim izvorima karotenoida smatraju se brokula i kelj (Rizvi i sur. 2023). Mikropovrće roda *Brassica* sadrži 4,7-11,5 mg  $\beta$ -karotena po 100 g svježe mase (Dereje i sur. 2023). Dobar je izvor  $\beta$ -karotena mikropovrće vrsta rapini i tatsoi (10,6 i 9,5 mg/100 g svježe mase) (Xiao i sur. 2019), a posebno se ističe i mikropovrće crvenog kupusa, koje pokazuje 260 puta veću koncentraciju  $\beta$ -karotena (11,5 mg/100 g svježe mase) od zrelog crvenog kupusa (Xiao i sur. 2012). Za mikropovrće brokule (7,3 mg/100 g svježe mase) i cvjetače (8,4 mg/100 g svježe mase) također su izmjerene veće, a za mikropovrće kelja (6,4-8,4 mg/100 g svježe mase) manje vrijednosti koncentracije  $\beta$ -karotena u odnosu na odgovarajuće odrasle biljke (Xiao i sur. 2019).

Lutein i zeaksantin glavni su ksantofili u biljkama, posebno pozicionirani na biomembranama kao amfipatske molekule (Demmig-Adams i sur. 2020). Violaksantin preko ksantofilskog ciklusa može prelaziti u zeaksantin te se na taj način raspršivanjem energije biljka štiti od fotooksidacijog oštećenja (Teng i sur. 2021). Od 7 karotenoida koji se mogu naći u ljudskom tijelu, lutein i zeaksantin glavni su u krvi i jedini prisutni u mrežnici i leći oka, gdje djeluju kao antioksidansi, štite oko od UV svjetlosti (Choe i sur. 2018) i sudjeluju u prevenciji degeneracije žute pjege (makule) starenjem (Rizvi i sur. 2023). Udio luteina/zeaksantina u mikropovrću roda *Brassica* u rasponu je 0,8-8,6 mg/100 g svježe mase (Xiao i sur. 2012; 2019). Slično kao i za  $\beta$ -karoten, najbogatiji izvori ksantofila među mikropovrćem krstašica jesu rapini (6,1 mg/100 g svježe mase), tatsoi i komatsuna (oboje 5,3 mg/100 g svježe mase) (Xiao i sur. 2019). Mikropovrće crvenog kupusa ističe se 28,6 puta većom koncentracijom luteina/zeaksantina (8,6 mg/100 mg svježe mase) od zrelog kupusa, ujedno više i od zrelog špinata (7,2 mg/100 g svježe mase), koji se generalno smatra bogatim izvorom ovih ksantofila (Xiao i sur. 2012). Također, mikropovrće brokule (3,8 mg/100 g svježe mase) i cvjetače (4,8 mg/100 g svježe mase) pokazuje više, a kelj (3,3-5,2 mg/100 g svježe mase) niže razine luteina/zeaksantina od odgovarajućih zrelih biljaka (Xiao i sur. 2019).

### **3.4. MINERALI**

Minerali su anorganske tvari od izuzetne važnosti za normalno funkcioniranje svih organizama (Dereje i sur. 2023; Pant i sur. 2023). Mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine, makroelemente (Ca, Mg, P, K i Na) i mikroelemente (Fe, Zn, Cu i Mn) (Xiao i sur. 2016). Mnogi su esencijalni nutrijenti za ljude jer sudjeluju u održavanju homeostaze, proizvodnji energije, mnogim biosintetskim putevima (Le i sur. 2020) i stabilizaciji bioloških makromolekula (Dereje i sur. 2023). Važni su za očuvanje zdravlja kostiju, srca i mišića, prijenos živčanih impulsa i mnoge druge fiziološke funkcije (Rizvi i sur. 2023), stoga njihov nedostatak može izazvati niz zdravstvenih poremećaja (Renna i sur. 2020). Također, neki elementi u tragovima, poput bakra, cinka i selena, dio su antioksidacijskog sustava kao kofaktori ili komponente antioksidacijskih enzima (Zhang i sur. 2021).

Povrće i voće izvor je svih potrebnih minerala te se smatra da pridonosi 35% ukupnog dnevnog unosa kalija, 11% natrija, 7% kalcija, 24% magnezija i 11% fosfora (Levander 1990). Dostupne literaturne vrijednosti udjela pojedinih mikro- i makroelemenata u zrelom povrću te mikropovrću roda *Brassica* objedinjene su u Tablici 2.

**Tablica 2.** Usporedba udjela različitih minerala u mikropovrću i zrelom povrću roda *Brassica*. Sve su vrijednosti izražene u mg/100 g svježe mase i preuzete iz Dereje i sur. 2023.

	Ca	Mg	K	P	Na	Zn	Fe
mikropovrće	48 – 98	29 – 66	192 – 365	57 – 85	25 – 74	0,26 – 1,21	0,47 – 2,46
zrelo povrće	22 – 254	11 – 28	191 – 384	27 – 67	12 – 92	0,03 – 0,42	0,3 – 1,64

Makroelementi čine oko 99,7% mineralnog sadržaja mikropovrća te istraživanja konzistentno ističu K kao najzastupljeniji (Xiao i sur. 2016; Kyriacou i sur. 2019; Ghoora i sur. 2020), a slijede ga P ili Ca, ovisno o varijetetu mikropovrća (Xiao i sur. 2016; Kyriacou i sur. 2019). Među mikroelementima gotovo 50% zauzima Fe, a iza njega je Zn (Xiao i sur. 2016). Mikropovrće najbogatije Ca i Na je savojski kupus, a najviše Mg zabilježeno je u cvjetači. Mikropovrće gorušice najbogatije je Na, Zn i Fe, a mikropovrće rapini P, dok se obje vrste ističu po visokom udjelu K. S druge strane, najniže razine Ca i Mg zabilježene su u mikropovrću mizune, K i P u zelenom kupusu, Na u kineskom kupusu, Zn u rutabagi (*B. napus* L. var. *napobrassica*) te Fe u crvenom kelju (Xiao i sur. 2016).

Mikropovrće nekih vrsta roda *Brassica* pokazuje značajno više razine određenih minerala od odgovarajućih zrelih biljaka, dok kod ostalih ne postoje prevelike razlike (Dereje i sur. 2023). Primjerice, analiza Johnson i sur. (2021) pokazala je da crveni kupus sadrži više P (2,1 puta), Fe (2,4 puta), Cu (9,1 puta) i Zn (3,8 puta) u stadiju mikropovrća nego u zrelom stadiju, dok su koncentracije ostalih minerala podjednake u oba stadija. Mikropovrće brokule sadrži 13,7 puta više Cu od zrele brokule. Mikropovrće crvene repe također nadmašuje odraslu biljku u razinama Cu (2,5 puta) i Se (10,2 puta). Mikropovrće cvjetače sadrži gotovo 4,5 puta više Ca i Mg, a savojski kupus dvostruko više Ca, Mg i Na od odgovarajućeg zrelog povrća (Dereje i sur. 2023).

Treba spomenuti da su u mikropovrću brokule i crvenog kupusa detektirane veće koncentracije nekih teških metala, poput arsena, barija, olova i stroncija, nego u odgovarajućem zreloom povrću, ali te koncentracije i dalje nisu dovoljne da bi ugrozile ljudsko zdravlje (Johnson i sur. 2021).

### 3.5. FENOLNI SPOJEVI

Fenolni spojevi najzastupljeniji su specijalizirani metaboliti u biljkama (Zhang i sur. 2021). Daju im boju i okus te ih štite od različitih oblika biotičkog i abiotičkog stresa (Ebert 2022). Građeni su od jednog ili više aromatskih prstena s hidroksilnim supstituentima (Le i sur. 2020), a ovisno o strukturi i broju ugljikovih atoma mogu se podijeliti na flavonoide (npr. flavonole, flavone i antocijanidine) i neflavonoide (npr. fenolne kiseline, hidroksicimetne kiseline i stilbene) (Favela-González i sur. 2020). Mnoga ih istraživanja ističu kao važne bioaktivne fitokemikalije koje promiču ljudsko zdravlje i sprječavaju razvoj kroničnih bolesti, zahvaljujući svojim antioksidacijskim, antikancerogenim i antiupalnim svojstvima (Le i sur. 2020).

Mikropovrće roda *Brassica* izrazito je bogato fenolnim spojevima, a zabilježene vrijednosti kreću se u rasponu 49,3-306,7 mg/100 g svježe mase (Dereje i sur. 2023; Xiao i sur. 2019), značajno više nego, primjerice, u mikropovrću porodice Asteraceae (Paradiso i sur. 2018). Ukupni sadržaj fenola u zreloom krstašicama iznosi tek 12,6-193 mg/100 g svježe mase (Dereje i sur. 2023). Osim što je sadržajno bogatije, mikropovrće sadrži i kompleksnije profile polifenola od zreloom povrća (Sun i sur. 2013). Najviši ukupni sadržaj fenola među mikropovrćem roda *Brassica* zabilježen je u crvenom kupusu (306,7 mg/100 g svježe mase), ljubičastoj korabici (300,5 mg/100 g svježe mase) i brokuli (282,2 mg/100 g svježe mase) (Xiao i sur. 2019). Sun i sur. (2013) analizirali su mikropovrće 5 vrsta krstašica te identificirali 164 polifenola, od kojih 105 flavonol glikozida, 30 antocijana i 29 derivata hidroksicimetne kiseline.

Flavonoidi su sastavljeni od dva aromatska prstena povezana heterocikličkim prstenom s 3 ugljikova atoma (Dereje i sur. 2023). U analizi Tomas i sur. (2021), u mikropovrću 4 vrste porodice Brassicaceae, od kojih 3 iz roda *Brassica*, detektirano je 470 fitokemikalija, među kojima je 180 pripadalo flavonoidima, uglavnom flavonolima (71-83%), antocijanima i flavonima.

Značajni flavonoli zabilježeni u mikropovrću *Brassica* derivati su kvercetina, kempferola i izoramnetina, primjerice izoramnetin-3-gentiobiozid i kvercetin-3-*O*-(feruloil)-soforozid-7-*O*-glukozid u gorušici te kempferol-3-*O*-(kumaroil)-soforozid-7-*O*-glukozid, kempferol-3-*O*-(sinapoil)-soforozid-7-*O*-glukozid i kempferol-3-*O*-(kafeoil)-soforozid-7-*O*-glukozid u korabici (Kyriacou i sur. 2019). Također, u istraživanju Johnson i sur. (2021), mikropovrće crvenog kupusa istaknulo se među ostalim istraženim vrstama po visokom udjelu kempferola i kvercetina.

Antocijani su biljni pigmenti topivi u vodi (Teng i sur. 2021) koji voću i povrću daju crveno, plavo i ljubičasto obojenje (Martin i Li 2017). Među 30 antocijana koje su detektirali Sun i sur. (2013), svi su bili derivati cijanidina. Najzastupljeniji antocijan u mikropovrću mibuna, pak choi, mizuna i komatsuna je cijanidin-3-(feruloil)(sinapoil)-diheksozid-5-heksozid (Kyriacou i sur. 2021), a u crvenom kupusu cijanidin-3-(sinapoil)(sinapoil)-soforozid-5-glukozid, cijanidin-3-diferuloilsoforozid-5-glukozid i cijanidin-3-(feruloil)soforozid-5-glukozid (Huang i sur. 2016). Liu i sur. (2022) detektirali su 26 antocijana u mikropovrću gorušice, od kojih je 18 bilo aciliranih cijanidin-3-*O*-soforozid-5-*O*-diglukozida, a 8 aciliranih cijanidin-3-*O*-soforozid-5-*O*-glukozida.

Od neflavonoidnih spojeva u mikropovrću najveći udio čine hidroksicimetna kiselina i njeni derivati. Ova skupina fenolnih spojeva puno je manje zastupljena u mikropovrću od flavonoida te, primjerice, čini samo 4,4% ukupnih fenola u mikropovrću pak choi, odnosno 0,4% u mikropovrću mibuna (Kyriacou i sur. 2019). Primarnim hidroksicimetnim kiselinama u mikropovrću roda *Brassica* smatraju se cimetna, klorogenska, ferulična, kavena i sinapinska kiselina (Tomas i sur. 2021).

### **3.6. GLUKOZINOLATI**

Glukozinolati (*S*-β-tioglukozid *N*-hidroksisulfati) važni su specijalizirani metaboliti karakteristični gotovo isključivo za krstašice. Naime, od preko 120 poznatih glukozinolatnih spojeva, više od 90 izolirano je iz biljaka porodice Brassicaceae (Teng i sur. 2021). Biljkama uglavnom služe za obranu od biljojeda jer im daju karakteristični gorki i opori okus (Marchioni i sur. 2021; Tomas i sur. 2021). Ovisno o aminokiselinskim prekursorima iz kojih nastaju, mogu se podijeliti na alifatske (iz metionina, leucina, izoleucina, alanina ili valina), aromatske (iz fenilalanina ili tirozina) i indolne (iz triptofana) (Le i sur. 2020). Njihovi razgradni produkti,

izotiocijanati i indoli, u ljudskom tijelu djeluju kao bioaktivni spojevi s antioksidacijskim, anitupalnim, antikancerogenim, antidiabeteskim i drugim svojstvima (Alloggia i sur. 2023).

Mikropovrće roda *Brassica* uglavnom sadrži značajne količine glukozinolata, a zabilježene vrijednosti kreću se od 1,0 do 397,1  $\mu\text{mol}$  po 100 g svježe mase. Kao najbogatije ističu se komatsuna i tatsoi, a najsiromašniji su varijeteti vrste *B. juncea* (gorušice) te cvjetača (Xiao i sur. 2019). Mnoge vrste mikropovrća, poput brokule (Lu i sur. 2018) i crvenog kupusa (Huang i sur. 2016), sadrže više glukozinolata od odgovarajućeg zrelog povrća. Najzastupljeniji glukozinolati u većini mikropovrća krstašica pripadaju alifatskoj skupini (Le i sur. 2020).

U mikropovrću brokule dominantni su glukeroerucin i glukorafanin (Lu i sur. 2018). Glukobrasicin i 4-metoksigliukobrasicin visoko su zastupljeni u mikropovrću gorušice i kupusa, dok osim njih, gorušica sadrži i mnogo sinigrina (Alrifai i sur. 2021), a kupus glukorafanina (Demir i sur. 2023). Glavni glukozinolati u mikropovrću crvenog kupusa su progoitrin i sinigrin (Huang i sur. 2016), a u mikropovrću vrste *B. carinata* sinigrin i glukobrasicin (Maina i sur. 2021).

Izotiocijanati su spojevi strukturne formule  $\text{R-N=C=S}$ , pri čemu R predstavlja alkilnu ili arilnu skupinu (Dereje i sur. 2023), a nastaju hidrolizom glukozinolata pomoću enzima mirozinaze ( $\beta$ -tioglukozidaza glukohidrolaza, E.C.3.2.3.1.) (Favela-González i sur. 2020). Glukozinolati su pohranjeni u vakuolama, a uslijed mehaničkog oštećenja stanice dolaze u kontakt s biljnim mirozinazama, nakon čega se oslobađaju izotiocijanati i drugi produkti hidrolize (Marchioni i sur. 2021). Izotiocijanati su najčešći produkti pri fiziološkom pH (Teng i sur. 2021) i imaju posebno izraženo antikancerogeno djelovanje (Le i sur. 2020).

Kyriacou i sur. (2021) zabilježili su da u 4 vrste mikropovrća roda *Brassica* (komatsuna, mibuna, mizuna i pak choi) preko 85% izotiocijanatnih spojeva čine 3-butenil izotiocijanat, alil izotiocijanat i fenetil izotiocijanat. Prema Marchioni i sur. (2021), u mikropovrću gorušice najzastupljeniji su alil i 3-butenil izotiocijanat, a u brokuli 4-pentenil, fenetil i 3-butenil izotiocijanat. Još jedan od glavnih produkata hidrolize glukozinolata brokule je sulforafan (Tomas i sur. 2021), koji je najistraživaniji kao jaki antikancerogen (Teng i sur. 2021).

## 4. BIOLOŠKI UČINCI

Kao što je prethodno opisano, mikropovrće roda *Brassica* sadrži obilje bioaktivnih spojeva, poput karotenoida, klorofila, askorbinske kiseline, tokoferola, fenolnih spojeva i glukozinolata. Mnogi od tih spojeva imaju antioksidacijske, antiupalne, antikancerogene, antidijabetičke i druge pozitivne zdravstvene učinke, čiji će primjeri i predloženi mehanizmi djelovanja biti predstavljani u ovom poglavlju.

Prije detaljnijeg razmatranja bioloških aktivnosti fitokemikalija prisutnih u mikropovrću, treba imati na umu njihovu biodostupnost. Naime, bioaktivni spojevi moraju preživjeti proces probave, apsorbirati se te doći do ciljnog mjesta gdje mogu obaviti svoju funkciju. Srećom, niz istraživanja pokazao je da veliki dio bioaktivnih sastavnica mikropovrća roda *Brassica* ostaje biološki dostupan i nakon probave *in vitro* (Alloggia i sur. 2023). Analiza 4 vrste mikropovrća porodice Brassicaceae utvrdila je da bioraspoloživost nakon probave simulirane *in vitro* iznosi 43-70% za ukupne topive fenole, 31-63% za ukupne izotiocijanate te 34-90% za makroelemente (de la Fuente i sur. 2019). Fenolni spojevi relativno su nestabilni i nešto teže prolaze intestinalnu barijeru od izotiocijanata, koji se lako apsorbiraju pomoću enterocita ili epitelnih stanica kolona (Oliviero i sur. 2018), ali dokazano je da pokazuju biološke odgovore i pri vrlo niskim koncentracijama u plazmi (Abourashed 2013).

### 4.1. REAKTIVNI KISIKOVI OBLICI

Jedan od glavnih uzroka većine kroničnih bolesti prevelika je proizvodnja slobodnih radikala, poput reaktivnih kisikovih oblika (ROS, engl. *reactive oxygen species*). Oni normalno nastaju tijekom različitih metaboličkih procesa, primjerice u mitohondrijskom lancu prijenosa elektrona (Bergamini i sur. 2004). Osim toga, određena količina ROS-ova generira se tijekom upale u svrhu obrane od patogena (Choe i sur. 2018). ROS-ovi imaju ulogu u mnogim fiziološkim procesima i signalnim putevima, ali u previsokim koncentracijama uzrokuju značajno oksidacijsko oštećenje biomolekula (Le i sur. 2020).

Već je spomenuto da mnogi spojevi prisutni u mikropovrću djeluju kao antioksidansi, a neki od značajnijih su askorbinska kiselina,  $\alpha$ -tokoferol, karotenoidi i različiti fenolni spojevi, što je



dokazano u nizu istraživanja *in vitro* i *in vivo* (Le i sur. 2020). Njihova je uloga direktno ukloniti slobodne radikale i sprječiti nastanak ROS-ova (Le i sur. 2020) ili indirektno utjecati na imunosne odgovore i signalne puteve regulirane ROS-ovima (Choe i sur. 2018). Ti spojevi čine većinu antioksidacijskog kapaciteta mikropovrća, primjerice 80-95% kod klijanaca brokule. Drugi mehanizam antioksidacijske aktivnosti mikropovrća je inhibicija prooksidacijskih enzima, poput lipoksigenaze i ksantin oksidaze, te aktivacija antioksidacijskih enzima, poput peroksidaze, katalaze, superoksid dismutaze i NAD(P)H:kinon oksidoreduktaze (Le i sur. 2020).

## 4.2. UPALA I REGULACIJA IMUNOSNOG SUSTAVA

Upala ima ključnu ulogu u razvoju i napredovanju niza kroničnih bolesti, uključujući rak, pretilost i kardiovaskularne bolesti, stoga njena modulacija može znatno pomoći u njihovoj prevenciji (Rizvi i sur. 2023). Istraživanja su pokazala da fenolni spojevi, izotiocijanati i indoli prisutni u mikropovrću imaju potencijal moderiranja antiupalnih aktivnosti (Alloggia i sur. 2023). Primjerice, Huang i sur. (2016) pokazali su da konzumacija mikropovrća crvenog kupusa može sniziti razine mRNA za neke proupalne proteine u jetri, poput C-reaktivnog proteina i čimbenika nekroze tumora alfa (TNF- $\alpha$ , engl. *tumor necrosis factor alpha*), te na taj način umanjiti upalni odgovor induciran prehranom s velikim udjelom masti.

Nadalje, transkripcija mnogih proupalnih citokina, primjerice TNF- $\alpha$  te interleukina 1 $\beta$ , 6 i 8, inducirana je transkripcijskim faktorom NF- $\kappa$ B (engl. *nuclear factor kappa-light-chain-enhancer of activated B cells*), stoga je njegova pravilna aktivnost ključna za započinjanje mnogih upalnih podražaja (Jambor i sur. 2022). Niz polifenola prisutnih u mikropovrću pokazao je sposobnost inhibicije fosforilacije i ubikvitinacije kinaza uključenih u signalni put NF- $\kappa$ B, kao i inhibicije interakcije NF- $\kappa$ B s molekulom DNA. Također, smatra se da glukozinolati sprječavaju katabolizam inhibitora NF- $\kappa$ B alfa. Put NF- $\kappa$ B jedan je od puteva koje reguliraju ROS-ovi, stoga i antioksidacijsko djelovanje fitokemikalija utječe na ovaj aspekt upale. Nizvodno od NF- $\kappa$ B djeluje ciklooksigenaza-2 (COX-2), još jedan od glavnih enzima uključenih u indukciju upale, odgovoran za regulaciju proizvodnje prostaglandina (Choe i sur. 2018). Nekoliko je istraživanja pokazalo da određeni flavonoidni spojevi prisutni u mikropovrću krstašica, poput kempferola, kvercetina i izoramnetina, djeluju kao inhibitori aktivnosti COX-2 (Rizvi i sur. 2023).

Transkripcijski faktor Nrf2 (engl. *nuclear factor erythroid 2-related factor 2*) regulira ekspresiju enzima povezanih s metabolizmom ksenobiotika, primjerice nekih antioksidacijskih enzima, poput NAD(P)H:kinon dehidrogenaze 1 (NQO1) i glutation *S*-transferaza, te enzima tzv. druge faze detoksifikacije. Njihovom aktivacijom stanica se može indirektno zaštititi od upale. Sam protein Nrf2 reguliran je inhibitornim proteinom Keap1 (engl. *kelch-like EHC-associated protein 1*), a utvrđeno je da i mnogi spojevi iz mikropovrća roda *Brassica*, poput sulforafana i 3,3'-diindolilmetana (DIM), mogu utjecati na signalni put Nrf2 i inducirati ga (Choe i sur. 2018). Primjerice, Subedi i sur. (2019) pokazali su da klijanci brokule obogaćeni sulforafanom inhibiraju aktivaciju puta NF- $\kappa$ B induciranu lipopolisaharidima, dok istovremeno pojačavaju ekspresiju Nrf2.

Drugi transkripcijski aktivator ksenobiotičkih puteva je put AhR (engl. *arylhydrocarbon receptor*), koji regulira djelovanje niza imunskih stanica, uključujući pomoćničke T-stanice, B-stanice, dendritičke stanice, monocite i astrocite (Choe i sur. 2018). Dokazano je da je mikropovrće bogato prirodnim ligandima receptora AhR, poput kvercetina, resveratrola, 3,3'-diindolilmetana i indol-3-karbinola (I3C), koji svojim vezanjem mogu modulirati imunosne puteve (Busbee i sur. 2013).

### **4.3. PRETILOST, KARDIOVASKULARNE BOLESTI I DIJABETES**

Pretilost uzrokovana prevelikom količinom masti u prehrani rastući je problem u svjetskoj populaciji i povezana je s povećanjem rizika za razvoj niza kroničnih bolesti, uključujući hiperkolesterolemiju, dijabetes i kardiovaskularne bolesti (Safaei i sur. 2021). Ateroskleroza je jedan od glavnih rizičnih faktora za razvoj kardiovaskularnih bolesti, stoga je važno držati razine cirkulirajućeg kolesterola i lipida u granicama kontrole (Choe i sur. 2018).

Huang i sur. (2016) pokazali su da konzumacija mikropovrća može biti učinkovit način snižavanja razine lipida i kolesterola u krvi. Miševe s pretilošću induciranom prehranom s visokim udjelom masti dohranjivali su prahom mikropovrća crvenog kupusa. Nakon 8 tjedana zabilježili su smanjene razine cirkulirajućih lipoproteina niske gustoće (LDL), jetrenih triacilglicerola i estera kolesterola, smanjenu ekspresiju upalnih citokina u jetri, kao i sporiji rast tjelesne mase u odnosu na pretile miševe dohranjivane zrelim crvenim kupusom. Također, miševi dohranjivani mikropovrćem pokazali su smanjenu ekspresiju sterol-O-aciltransferaze 1 i diacilglicerol-O-aciltransferaze 1, što je uzrokovalo inhibiciju sinteze kolesterola i triglicerida. Li i sur. (2021)

istraživali su učinak soka mikropovrća brokule na pretilost u miševima te su utvrdili da dovodi do smanjenja tjelesne mase, mase masnog tkiva i veličine adipocita te smanjenog nakupljanja masti u jetri povećanjem jetrenog antioksidacijskog kapaciteta.

Što se tiče samih bioaktivnih spojeva u mikropovrću, prepoznato je da I3C (indol-3-karbinol) inhibira diferencijaciju adipocita vezanjem i aktivacijom deacetilaze sirtuin 1 (Choi i sur. 2013). Neki flavonoidi, poput kvercetina, imaju sposobnost indukcije apoptoze u preadipocitima (Rayalam i sur. 2008), dok drugi, poput resveratrola, naringina, naringenina, rutina, hesperidina i genisteina, mogu inhibirati proliferaciju preadipocita (Choe i sur. 2018).

Dijabetes je kronični metabolički poremećaj koji karakterizira povišena razina glukoze u krvi (hiperglikemija) zbog neosjetljivosti stanica na inzulin ili nesposobnosti gušterače da proizvede i izluči dovoljne količine inzulina (Bhaswant i sur. 2023). Dijabetes tipa 2 često je posljedica pretilosti te se smatra da upala, preko sekrecije TNF- $\alpha$  i interleukina 6 od strane makrofaga, predstavlja poveznicu između pretilosti i razvoja inzulinske rezistencije (Chen i sur. 2015). Mnogi prirodni spojevi, poput flavonoida i izotiocijanata, pojačavaju osjetljivost na inzulin aktivacijom receptora PPAR (engl. *peroxisome proliferator-activated receptor*), koji djeluju kao regulatori metabolizma lipida, adipogeneze i unosa glukoze.

Mikropovrće bogato tim bioaktivnim spojevima stoga bi se moglo koristiti za tretiranje ili prevenciju dijabetesa tipa 2 (Choe i sur. 2018). Primjerice, Bahadoran i sur. (2012) pokazali su da uzimanje praha klijanaca brokule s visokom koncentracijom sulforafana značajno smanjuje razinu inzulina u krvi pacijenata s dijabetesom tipa 2. Nadalje, u istraživanju Ma i sur. (2022), miševi s dijabetesom tipa 2 uzrokovanim visokomasnom prehranom dohranjivani su liofiliziranim mikropovrćem brokule, što je uzrokovalo smanjenje tjelesne mase i poboljšanje homeostaze glukoze. Također, popravile su se razine lipida, antioksidansa i upalnih faktora u krvi te inzulinska rezistencija. Slično, Li i sur. (2021) utvrdili su da sok mikropovrća brokule, uz pozitivne učinke na pretilost, poboljšava toleranciju na glukozu i inzulinsku rezistenciju u miševa.

#### 4.4. RAK

Rak karakterizira nekontrolirano dijeljenje stanica zbog neravnoteže između proliferacije i apoptoze, koja nastaje kao rezultat poremećaja u staničnom ciklusu, aktivnosti njegovih regulatora ili mehanizmu programirane stanične smrti (Le i sur. 2020). Konzumacija krstašica preporuča se za prevenciju i tretiranje raka (Bhaswant i sur. 2023), uglavnom zbog visokog sadržaja glukozinolata i njihovih razgradnih produkata, posebice sulforafana, čiji mehanizam djelovanja uključuje upravo zaustavljanje staničnog ciklusa i indukciju apoptoze (Le i sur. 2020). Osim toga, neki vitamini i polifenoli prisutni u mikropovrću krstašica pokazuju antikancerogeni potencijal zbog utjecaja na više staničnih meta u različitim stadijima karcinogeneze (Teng i sur. 2021).

Mnoga istraživanja *in vitro* pokazala su izuzetnu citotoksičnu aktivnost klijanaca i mikropovrća brokule na različite tipove tumorskih staničnih linija, primjerice na stanice karcinoma jetre, prostate i pluća (Le i sur. 2020). Istraživanje de la Fuente i sur. (2020) pokazalo je utjecaj bioraspoloživih frakcija 4 vrste mikropovrća, uključujući brokulu, kelj i gorušicu kao predstavnike roda *Brassica* te rotkvicu iz roda *Raphanus*, na stanice raka kolona Caco-2. Svi su uzorci pokazali značajni antiproliferativni učinak, čija je jačina bila u skladu s koncentracijom askorbinske kiseline i izotiocijanata te ukupnim antioksidacijskim kapacitetom pojedine vrste mikropovrća. Zabilježeni učinci na tumorske stanice uključivali su povećanje razine ROS-ova i smanjenje razine unutarstaničnog glutaciona, zaustavljanje stanica u fazi G2/M staničnog ciklusa, gubitak mitohondrijskog membranskog potencijala te konačno indukciju apoptotičke smrti stanica.

Dokazano je da neki flavonoidi i indoli mogu regulirati procese nastanka malignih tvorbi ovisnih o spolnim hormonima, kao što su rak dojke ili rak prostate (Rizvi i sur. 2023). Primjerice, za I3C dokazano je da značajno blokira signalizaciju preko estrogenog receptora alfa (ER- $\alpha$ ) posredovanu 17 $\beta$ -estradiolom u stanicama raka dojke MCF-7. Osim toga, I3C smanjuje ekspresiju TFF1 (engl. *trefoil factor 1*) i katepsina D, gena osjetljivih na estrogen, te povećava ekspresiju tumor supresorskog gena BRCA1 (engl. *breast cancer 1*) (Meng i sur. 2000).

Konačno, upala igra ključnu ulogu i u karcinogenezi, stoga spojevi koji utječu na put NF- $\kappa$ B mogu sudjelovati i u smanjenju rizika za razvoj tumora (Jambor i sur. 2022). Također, I3C i DIM (3,3'-diindolilmetan) pokazali su učinke u prevenciji karcinogeneze aktivacijom metabolizma ksenobiotika preko signalnih puteva Nrf2 i AhR (Rizvi i sur. 2023), što pomaže stanicama da se obrane i uklone kancerogene spojeve (Choe i sur. 2018).

## 5. ZAKLJUČAK

Mikropovrće roda *Brassica* predstavlja uistinu obećavajuću novu generaciju „superhrane“ zahvaljujući brzom i jednostavnom uzgoju, čiji je rezultat izuzetno nutritivno bogata namirnica dobivena uz minimalnu potrošnju resursa. Različite svojte mikropovrća roda *Brassica* pokazale su se kao izvrsni izvori esencijalnih nutrijenata, poput vitamina i minerala, te niza biološki aktivnih spojeva koji promoviraju ljudsko zdravlje, posebice različitih polifenola i glukozinolata.

Primjeri predstavljeni u ovom radu samo su začetak prijeko potrebnih istraživanja učinaka mikropovrća i njihovih bioaktivnih sastavnica na zdravlje čovjeka. Daljnji znanstveni rad treba se fokusirati na otkrivanje detaljnih mehanizama njihovog djelovanja u organizmu, a dobivena saznanja usmjeriti u razvoj učinkovitijih načina prevencije i liječenja kroničnih bolesti, poput pretilosti, dijabetesa i raka, koje su i dalje rastući problem u svijetu.

## 6. LITERATURA

Abourashed, E. A. (2013). Bioavailability of plant-derived antioxidants. *Antioxidants*, 2(4), 309-325.

Alloggia, F. P., Bafumo, R. F., Ramirez, D. A., Maza, M. A., & Camargo, A. B. (2023). Brassicaceae microgreens: A novel and promissory source of sustainable bioactive compounds. *Current Research in Food Science*, 6, 100480.

Alrifai, O., Mats, L., Liu, R., Hao, X., Marcone, M. F., & Tsao, R. (2021). Effect of combined light-emitting diodes on the accumulation of glucosinolates in *Brassica* microgreens. *Food Production, Processing and Nutrition*, 3, 1-16.

Asensi-Fabado, M. A., & Munné-Bosch, S. (2010). Vitamins in plants: occurrence, biosynthesis and antioxidant function. *Trends in Plant Science*, 15(10), 582-592.

Bahadoran, Z., Tohidi, M., Nazeri, P., Mehran, M., Azizi, F., & Mirmiran, P. (2012). Effect of broccoli sprouts on insulin resistance in type 2 diabetic patients: a randomized double-blind clinical trial. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 63(7), 767-771.

Basset, G. J., Latimer, S., Fatihi, A., Soubeyrand, E., & Block, A. (2017). Phylloquinone (vitamin K1): occurrence, biosynthesis and functions. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 17(12), 1028-1038.

Bergamini, C. M., Gambetti, S., Dondi, A., & Cervellati, C. (2004). Oxygen, reactive oxygen species and tissue damage. *Current Pharmaceutical Design*, 10(14), 1611-1626.

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.

Busbee, P. B., Rouse, M., Nagarkatti, M., & Nagarkatti, P. S. (2013). Use of natural AhR ligands as potential therapeutic modalities against inflammatory disorders. *Nutrition Reviews*, 71(6), 353-369.

Cano-Lamadrid, M., Martínez-Zamora, L., Castillejo, N., Cattaneo, C., Pagliarini, E., & Artés-Hernández, F. (2023). How does the phytochemical composition of sprouts and microgreens from

*Brassica* vegetables affect the sensory profile and consumer acceptability?. *Postharvest Biology and Technology*, 203, 112411.

Castellaneta, A., Losito, I., Leoni, B., Santamaria, P., Calvano, C. D., & Cataldi, T. R. (2022). Glycerophospholipidomics of five edible oleaginous microgreens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(7), 2410-2423.

Chen, L., Chen, R., Wang, H., & Liang, F. (2015). Mechanisms linking inflammation to insulin resistance. *International Journal of Endocrinology*, 2015(1), 508409.

Choe, U., Yu, L. L., & Wang, T. T. (2018). The science behind microgreens as an exciting new food for the 21st century. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(44), 11519-11530.

Choi, Y., Um, S. J., Park, T. (2013). Indole-3-carbinol directly targets SIRT1 to inhibit adipocyte differentiation. *International Journal of Obesity*, 37(6), 881–884.

Chungchunlam, S. M., & Moughan, P. J. (2023). Comparative bioavailability of vitamins in human foods sourced from animals and plants. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-36.

de la Fuente, B., López-García, G., Máñez, V., Alegría, A., Barberá, R., & Cilla, A. (2019). Evaluation of the bioaccessibility of antioxidant bioactive compounds and minerals of four genotypes of Brassicaceae microgreens. *Foods*, 8(7), 250.

de la 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.

Demir, K., Sarıkamış, G., & Seyrek, G. Ç. (2023). Effect of LED lights on the growth, nutritional quality and glucosinolate content of broccoli, cabbage and radish microgreens. *Food Chemistry*, 401, 134088.

Demmig-Adams, B., López-Pozo, M., Stewart, J. J., & Adams III, W. W. (2020). Zeaxanthin and lutein: Photoprotectors, anti-inflammatories, and brain food. *Molecules*, 25(16), 3607.

Dereje, B., Jacquier, J. C., Elliott-Kingston, C., Harty, M., & Harbourne, N. (2023). Brassicaceae microgreens: phytochemical compositions, influences of growing practices, postharvest technology, health, and food applications. *ACS Food Science & Technology*, 3(6), 981-998.

- Di Bella, M. C., Niklas, A., Toscano, S., Picchi, V., Romano, D., Lo Scalzo, R., & Branca, F. (2020). Morphometric characteristics, polyphenols and ascorbic acid variation in *Brassica oleracea* L. novel foods: Sprouts, microgreens and baby leaves. *Agronomy*, *10*(6), 782.
- Ebert, A. W. (2022). Sprouts and microgreens—Novel food sources for healthy diets. *Plants*, *11*(4), 571.
- Favela-González, K. M., Hernández-Almanza, A. Y., & De la Fuente-Salcido, N. M. (2020). The value of bioactive compounds of cruciferous vegetables (*Brassica*) as antimicrobials and antioxidants: A review. *Journal of Food Biochemistry*, *44*(10), e13414.
- Ghoora, M. D., Babu, D. R., & Srividya, N. (2020). Nutrient composition, oxalate content and nutritional ranking of ten culinary microgreens. *Journal of Food Composition and Analysis*, *91*, 103495.
- Huang, H., Jiang, X., Xiao, Z., Yu, L., Pham, Q., Sun, J., Chen, P., Yokoyama, W., Yu, L., Luo, Y. S. & Wang, T. T. (2016). Red cabbage microgreens lower circulating low-density lipoprotein (LDL), liver cholesterol, and inflammatory cytokines in mice fed a high-fat diet. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *64*(48), 9161-9171.
- Jambor, T., Knizatova, N., Valkova, V., Tirpak, F., Greifova, H., Kovacik, A., & Lukac, N. (2022). Microgreens as a functional component of the human diet: A review. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, *12*(1), e5870-e5870.
- Johnson, S. A., Prenni, J. E., Heuberger, A. L., Isweiri, H., Chaparro, J. M., Newman, S. E., Uchanski, M. E., Omerigic, H. M., Michell, K. A., Bunnig, M., Foster, M. T., Thompson, H. J., & Weir, T. L. (2021). Comprehensive evaluation of metabolites and minerals in 6 microgreen species and the influence of maturity. *Current Developments in Nutrition*, *5*(2), nzaa180.
- Kowitcharoen, L., Phornvillay, S., Lekham, P., Pongprasert, N., & Srilaong, V. (2021). Bioactive composition and nutritional profile of microgreens cultivated in Thailand. *Applied Sciences*, *11*(17), 7981.
- Kyriacou, M. C., El-Nakhel, C., Graziani, G., Pannico, A., Soteriou, G. A., Giordano, M., Ritieni, A., De Pascale, S., & Roupael, Y. (2019). Functional quality in novel food sources: Genotypic



variation in the nutritive and phytochemical composition of thirteen microgreens species. *Food Chemistry*, 277, 107-118.

Kyriacou, M. C., El-Nakhel, C., Pannico, A., Graziani, G., Zarrelli, A., Soteriou, G. A., Kyratzis, A., Antoniou, C., Pizzolongo, F., Romano, R., Ritieni, A., De Pascale, S., & Roupheal, Y. (2021). Ontogenetic variation in the mineral, phytochemical and yield attributes of brassicaceous microgreens. *Foods*, 10(5), 1032.

Le, T. N., Chiu, C. H., & Hsieh, P. C. (2020). Bioactive compounds and bioactivities of *Brassica oleracea* L. var. *italica* sprouts and microgreens: An updated overview from a nutraceutical perspective. *Plants*, 9(8), 946.

Levander, O. A. (1990). Fruit and vegetable contributions to dietary mineral intake in human health and disease. *HortScience*, 25(12), 1486-1488.

Li, X., Tian, S., Wang, Y., Liu, J., Wang, J., & Lu, Y. (2021). Broccoli microgreens juice reduces body weight by enhancing insulin sensitivity and modulating gut microbiota in high-fat diet-induced C57BL/6J obese mice. *European Journal of Nutrition*, 60, 3829-3839.

Lila, M. A. (2009). Plant pigments and human health. *Plant pigments and their manipulation*, 248-274.

Liu, Z., Teng, Z., Pearlstein, D. J., Chen, P., Yu, L., Zhou, B., Luo, Y., & Sun, J. (2022). Effects of different light-emitting diode illuminations on bioactive compounds in ruby streaks mustard microgreens by Ultra-High Performance Liquid Chromatography–High-Resolution Mass Spectrometry. *ACS Food Science & Technology*, 2(9), 1483-1494.

Lu, Y., Dong, W., Alcazar, J., Yang, T., Luo, Y., Wang, Q., & Chen, P. (2018). Effect of preharvest CaCl<sub>2</sub> spray and postharvest UV-B radiation on storage quality of broccoli microgreens, a richer source of glucosinolates. *Journal of Food Composition and Analysis*, 67, 55-62.

Ma, S., Tian, S., Sun, J., Pang, X., Hu, Q., Li, X., & Lu, Y. (2022). Broccoli microgreens have hypoglycemic effect by improving blood lipid and inflammatory factors while modulating gut microbiota in mice with type 2 diabetes. *Journal of Food Biochemistry*, 46(7), e14145.

Maina, S., Ryu, D. H., Cho, J. Y., Jung, D. S., Park, J. E., Nho, C. W., Bakari, G., Misinzo, G., Jung, J. H., Yang, S. H., & Kim, H. Y. (2021). Exposure to salinity and light spectra regulates

glucosinolates, phenolics, and antioxidant capacity of *Brassica carinata* L. microgreens. *Antioxidants*, *10*(8), 1183.

Manchali, S., Murthy, K. N. C., & Patil, B. S. (2012). Crucial facts about health benefits of popular cruciferous vegetables. *Journal of Functional Foods*, *4*(1), 94-106.

Marchioni, I., Martinelli, M., Ascrizzi, R., Gabbriellini, C., Flamini, G., Pistelli, L., & Pistelli, L. (2021). Small functional foods: Comparative phytochemical and nutritional analyses of five microgreens of the Brassicaceae family. *Foods*, *10*(2), 427.

Marshall, M. R. (2010). Ash analysis. *Food analysis*, *4*, 105-116.

Martin, C., & Li, J. (2017). Medicine is not health care, food is health care: plant metabolic engineering, diet and human health. *New Phytologist*, *216*(3), 699-719.

Meng, Q., Yuan, F., Goldberg, I. D., Rosen, E. M., Auburn, K., & Fan, S. (2000). Indole-3-Carbinol Is a Negative Regulator of Estrogen Receptor- $\alpha$  Signalling in Human Tumor Cells. *Journal of Nutrition*, *130*(12), 2927-2931.

Młodzińska, E. (2009). Survey of plant pigments: molecular and environmental determinants of plant colors. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, *51*(1), 7-16.

Nakakaawa, L., Gbala, I. D., Cheseto, X., Bargul, J. L., & Wesonga, J. M. (2023). Oral acute, sub-acute toxicity and phytochemical profile of *Brassica carinata* A. Braun microgreens ethanolic extract in Wistar rats. *Journal of Ethnopharmacology*, *305*, 116121.

Oliviero, T., Verkerk, R., & Dekker, M. (2018). Isothiocyanates from *Brassica* vegetables—effects of processing, cooking, mastication, and digestion. *Molecular Nutrition & Food Research*, *62*(18), 1701069.

Palta, J. P. (1990). Leaf chlorophyll content. *Remote sensing reviews*, *5*(1), 207-213.

Pant, Y., Lingwan, M., & Masakapalli, S. K. (2023). Metabolic, biochemical, mineral and fatty acid profiles of edible Brassicaceae microgreens establish them as promising functional food. *Food Chemistry Advances*, *3*, 100461.

- Paradiso, V. M., Castellino, M., Renna, M., Gattullo, C. E., Calasso, M., Terzano, R., Allegretta, I., Leoni, B., Caponio, F., & Santamaria, P. (2018). Nutritional characterization and shelf-life of packaged microgreens. *Food & Function*, 9(11), 5629-5640.
- Raimondi, G., Roupael, Y., Kyriacou, M. C., Di Stasio, E., Barbieri, G., & De Pascale, S. (2017). Genotypic, storage and processing effects on compositional and bioactive components of fresh sprouts. *LWT-Food Science and Technology*, 85, 394-399.
- Rayalam, S., Della-Fera, M. A., & Baile, C. A. (2008). Phytochemicals and regulation of the adipocyte life cycle. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 19(11), 717-726.
- Renna, M., & Paradiso, V. M. (2020). Ongoing research on microgreens: Nutritional properties, shelf-life, sustainable production, innovative growing and processing approaches. *Foods*, 9(6), 826.
- Renna, M., Stellacci, A. M., Corbo, F., & Santamaria, P. (2020). The use of a nutrient quality score is effective to assess the overall nutritional value of three brassica microgreens. *Foods*, 9(9), 1226.
- Rizvi, A., Sharma, M., & Saxena, S. (2023). Microgreens: A Next Generation Nutraceutical for Multiple Disease Management and Health Promotion. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 70(2), 311-332.
- Safaei, M., Sundararajan, E. A., Driss, M., Boulila, W., & Shapi'i, A. (2021). A systematic literature review on obesity: Understanding the causes & consequences of obesity and reviewing various machine learning approaches used to predict obesity. *Computers in Biology and Medicine*, 136, 104754.
- 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.
- Subedi, L., Cho, K., Park, Y. U., Choi, H. J., & Kim, S. Y. (2019). Sulforaphane-enriched broccoli sprouts pretreated by pulsed electric fields reduces neuroinflammation and ameliorates scopolamine-induced amnesia in mouse brain through its antioxidant ability via Nrf2-HO-1 activation. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019(1), 3549274.

Sun, J., Xiao, Z., Lin, L. Z., Lester, G. E., Wang, Q., Harnly, J. M., & Chen, P. (2013). Profiling polyphenols in five *Brassica* species microgreens by UHPLC-PDA-ESI/HRMS<sup>n</sup>. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *61*(46), 10960-10970.

Šola, I., Vujčić Bok, V., Dujmović, M., & Rusak, G. (2020). Developmentally-related changes in phenolic and *L*-ascorbic acid content and antioxidant capacity of Chinese cabbage sprouts. *Journal of food science and technology*, *57*, 702-712.

Tan, L., Nuffer, H., Feng, J., Kwan, S. H., Chen, H., Tong, X., & Kong, L. (2020). Antioxidant properties and sensory evaluation of microgreens from commercial and local farms. *Food Science and Human Wellness*, *9*(1), 45-51.

Teng, J., Liao, P., & Wang, M. (2021). The role of emerging micro-scale vegetables in human diet and health benefits—An updated review based on microgreens. *Food & Function*, *12*(5), 1914-1932.

Tomas, M., Zhang, L., Zengin, G., Rocchetti, G., Capanoglu, E., & Lucini, L. (2021). Metabolomic insight into the profile, *in vitro* bioaccessibility and bioactive properties of polyphenols and glucosinolates from four Brassicaceae microgreens. *Food Research International*, *140*, 110039.

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.

Weber, C. F. (2017). Broccoli microgreens: A mineral-rich crop that can diversify food systems. *Frontiers in Nutrition*, *4*, 7.

Wojdyło, A., Nowicka, P., Tkacz, K., & Turkiewicz, I. P. (2020). Sprouts vs. microgreens as novel functional foods: Variation of nutritional and phytochemical profiles and their *in vitro* bioactive properties. *Molecules*, *25*(20), 4648.

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.

Xiao, Z., Codling, E. E., Luo, Y., Nou, X., Lester, G. E., & Wang, Q. (2016). Microgreens of Brassicaceae: Mineral composition and content of 30 varieties. *Journal of Food Composition and Analysis*, *49*, 87-93.

Xiao, Z., Rausch, S. R., Luo, Y., Sun, J., Yu, L., Wang, Q., Chen, P., Yu, L., & Stommel, J. R. (2019). Microgreens of Brassicaceae: Genetic diversity of phytochemical concentrations and antioxidant capacity. *LWT*, *101*, 731-737.

Zhang, Y., Ji, J., Song, S., Su, W., & Liu, H. (2020). Growth, nutritional quality and health-promoting compounds in Chinese Kale grown under different ratios of red: blue LED lights. *Agronomy*, *10*(9), 1248.

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.

## **ŽIVOTOPIS**

Rođena sam 2003. godine u Zagrebu. Nakon završene Osnovne škole Jure Kaštelana upisala sam XV. gimnaziju u Zagrebu i završila ju 2021. godine. Iste godine upisala sam Prijediplomski studij Molekularne biologije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.