

Fitotoksični učinak mikroplastike na fotosintezu

Rumin, Paola

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:217:778960>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-19**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Biološki odsjek

Paola Rumin

**Fitotoksični učinak mikroplastike na
fotosintezu**

Završni rad

Zagreb, 2022.

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Biology

Paola Rumin

**Phytotoxic effect of microplastics on
photosynthesis**

Bachelor thesis

Zagreb, 2022.

Ovaj završni rad je izrađen u sklopu studijskog programa Biologije na Zavodu za molekularnu biologiju Biološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, pod mentorstvom prof. dr. sc. Biljane Balen.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Biološki odsjek

Završni rad

Fitotoksični učinak mikroplastike na fotosintezu

Paola Rumin

Rooseveltov trg 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Obzirom da je mikroplastika jedan od gorućih problema današnjice, proučavanje njenog utjecaja na živa bića od iznimne je važnosti. Biljke kao primarni producenti koji se nalaze na dnu hranidbenog lanca dobivaju još jednu dimenziju važnosti. Naime, mikroplastika na mnogo načina prikazanih u ovom radu, može umanjiti fotosintetsku sposobnost biljaka. Smanjenje primarne produkcije te akumulacija plastike u biljnim tkivima predstavljaju problem za sva živa bića koja ovise o biljkama, kao i za same biljke. Cilj ovog rada je približiti čitaocu probleme koje mikroplastika može stvoriti u prirodi i agrikulturi.

Ključne riječi: (mikroplastika, biljke, fotosinteza, RUBISCO)

(15 stranica, 6 slika, 27 literaturnih navoda, jezik izvornika: engleski)

Rad je pohranjen u Središnjoj biološkoj knjižnici.

Mentor: prof. dr. sc. Biljana Balen

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Biology

Bachelor thesis

Phytotoxic effect of microplastics on photosynthesis

Paola Rumin

Rooseveltova trg 6, 10000 Zagreb, Croatia

Given that microplastics are one of the most pressing problems of today, studying their impact on living beings is extremely important. Plants, as primary producers at the bottom of the food chain, gain another dimension of importance. Namely, microplastics in many ways shown in this paper can reduce the photosynthetic capacity of plants. The reduction of primary production and the accumulation of plastic in plant tissues represent a problem for all living beings that depend on plants, as well as for the plants themselves. The aim of this paper is to bring the reader closer to the problems that microplastics can create in nature and agriculture.

Key words: (microplastics, plants, photosynthesis, RUBISCO)

(15 pages, 6 figures, 27 references, original in: english)

Thesis is deposited in Central Biological Library.

Mentor: prof. dr. sc. Biljana Balen

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1 PLASTIKA.....	1
1.2 MIKROPLASTIKA.....	1
1.3 FOTOSINTEZA.....	3
1.4 FOTOSINTETSKI PIGMENTI.....	4
1.5 RUBISCO.....	5
2. RAZRADA.....	6
2.1 MIKROPLASTIKA U TLU.....	6
2.2 GENERALNI ŠTETNI UTJECAJ MIKROPLASTIKE NA BILJKE.....	8
2.2.1 ROS I OKSIDACIJSKI STRES.....	8
2.2.2 KLIJANJE.....	9
2.3 FOTOSINTETSKI PIGMENTI.....	10
2.4 RUBISCO.....	11
2.5 VISINA I BIOMASA.....	11
2.6 BROJ I POVRŠINA LISTOVA.....	12
3. ZAKLJUČAK.....	12
4. LITERATURA.....	13

KRATICE

MP – mikroplastika

NP – nanoplastika

PET – poli(etilen-tereftalat)

PE – polietilen

HDPE – polietilen visoke gustoće (eng. *high-density polyethylene*)

LDPE – polietilen male gustoće (eng. *low-density polyethylene*)

PP – polipropilen

PVC – poli(vinil-klorid) (eng. *polyvinyl chloride*)

PS – polistiren

PSII – fotosustav 2 (eng. *photosystem II*)

PSI – fotosustav 1 (eng. *photosystem I*)

NADP⁺ - nikotinamid adenin dinukleotid-fosfat (eng. *nicotinamide adenin dinucleotide-phosphate*)

ATP – adenzin trifosfat (eng. *adenosine triphosphate*)

RUBISCO – ribuloza-1,5-bisfosfat karboksilaza/oksigenaza (eng. *ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase*)

ROS – reaktivni kisikovi spojevi (eng. *reactive oxygen species*)

1. UVOD

1.1 PLASTIKA

Iako je već 1862. godine Alexander Parkes proizveo prvi komad plastike ikad iz celuloze, tek nakon Drugog svjetskog rata, gotovo sto godina kasnije, plastika postaje popularna. Olakšana proizvodnja iz nafte te niz karakteristika poput otpornosti na razne kemikalije, termo- i elektroizolacija, sposobnost poprivanja različitih oblika i boja te lakoća i čvrstoća materijala neke su od osobitosti plastike koje su ju učinile tako svakodnevnom u životu ljudi (https://web.archive.org/web/20100317004747/http://www.americanchemistry.com/s_plastics/doc.asp?CID=1571&DID=5972). Međutim, već 1960.-ih godina zabilježen je plastični otpad u oceanima, a tijekom '70.-ih i '80.-ih godina prošlog stoljeća zabrinutost glede plastičnog otpada raste. Plastika se, naime, razlikuje od drugih vrsta otpada po tome što, iz perspektive čovjeka, traje gotovo vječno u okolišu te je praktično svaki komad plastike ikad proizveden i dalje na Zemlji. Tu se pojavljuje recikliranje plastike, koje je predložila sama industrija plastike. No, obim recikliranja je daleko od idealnog obzirom da se većina plastike ne reciklira, a i ona koja se reciklira može se reciklirati ograničeni broj puta (<https://www.sciencehistory.org/the-history-and-future-of-plastics>). Ono što nam preostaje je sve više plastike u prirodi i na odlagalištima otpada koja se vremenom raspada na sve manje komadiće tzv. mikroplastiku (MP), koja je srž ovog rada, te još sitniju nanoplastiku (NP).

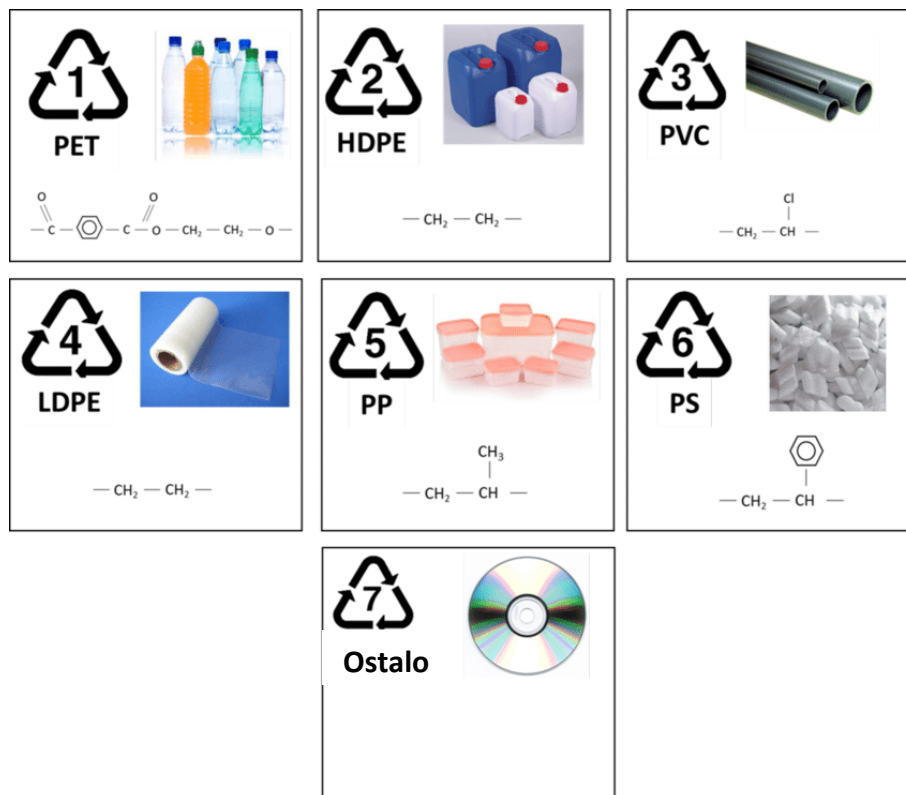
1.2 MIKROPLASTIKA

Mikroplastika su čestice plastike veličine manje od 5 mm. Dijelimo je na primarnu i sekundarnu. Primarna mikroplastika su sitne čestice plastike koje kao takve dolaze u nekim komercijalnim proizvodima, primjerice kozmetici ili tekstilu, dok sekundarna mikroplastika nastaje raspadom većih komada plastike na manje čestice mikroplastike. Do raspadanja dolazi utjecajem okolišnih faktora, primarno UV zračenja (<https://education.nationalgeographic.org/resource/microplastics>). Pretpostavlja se da plastici trebaju i stotine tisuća godina da se u potpunosti razgradi, a tijekom tog dugog perioda raspada se na sve manje i manje čestice koje na razne načine dolaze u doticaj sa živim svijetom. Mikroplastika je danas već prepoznati gorući problem pa se zato sve više istražuje njezin potencijalni toksični učinak na živi svijet. Iako se zasada još relativno malo zna o njenom utjecaju na živa bića, malo je

vjerojatno da je taj utjecaj pozitivan. Dapače, dosadašnja istraživanja ukazuju na neutralan ili negativan utjecaj (Pignattelli i sur. 2020.).

Bitno je napomenuti da mikroplastika nije jedinstveni spoj niti uniformna čestica. Postoje razne vrste plastike s kemijskog pogleda. Poli(etilen-tereftalat) (PET), polietilen visoke gustoće (eng. *high-density polyethylene*) (HDPE), polietilen male gustoće (eng. *low-density polyethylene*) (LDPE), polipropilen (PP), poli(vinil-klorid) (eng. *polyvinyl chloride*) (PVC) i polistiren (PS) samo su neki od najčešćih polimera plastike koje koristimo u svakodnevnom životu (Slika 1.). Plastika može biti linearni homopolimer ugljikovih atoma ili može sadržavati i aromatske komponente, atome kisika, dušika i sumpora te je tada heteropolimer (<https://www.britannica.com/technology/bioplastic>). Oblikom se, dakako, mikroplastika također može razlikovati. Nalazimo ju, primjerice, u sferičnom, vlaknastom ili nepravilnom obliku od kojih svaki može drukčije djelovati na pojedine žive organizme (Schwarzer i sur. 2022.). Mikroplastiku nalazimo u različitim veličinama pa promjer čestice te koncentracija kojoj je biljka izložena mogu imati različit učinak.

Nadalje, postoji i biorazgradiva plastika. Treba razlikovati biorazgradivu plastiku od bioplastike. Naime, bioplastika se odnosi na plastiku proizvedenu iz biljaka ili iz tvari koje su sintetizirali mikroorganizmi, no može i ne mora biti biorazgradiva. Ipak, razlikuje se od obične plastike jer se proizvodi iz obnovljivih resursa umjesto iz nafte (<https://www.britannica.com/technology/bioplastic>). Biorazgradiva plastika može biti 100% biorazgradiva, no i ne mora. Bitno je napomenuti da i 100% biorazgradiva plastika nije najbolje rješenje za problem zagađenja plastikom jer ukoliko se proizvodi iz biljaka može sadržavati herbicide i pesticide kojima se biljke špricaju te će oni dospjeti u tlo ukoliko se biorazgradiva plastika ne odlaže propisno. Također, biorazgradiva plastika bi se trebala kompostirati u za to predviđenim postrojenjima u uvjetima visoke temperature, kojih zasada nema puno, kako bi se razgradila brzo. Ukoliko biorazgradiva plastika završi na odlagalištu otpada, u uvjetima manjka kisika neće se razgraditi stoljećima te će otpuštati metan, moćan staklenički plin. Nadalje, kad bi se proizvodila na velikoj skali, znatno bi povećala površinu zemlje koju čovječanstvo trenutno koristi za agrikulturu (Robbins 2020.).



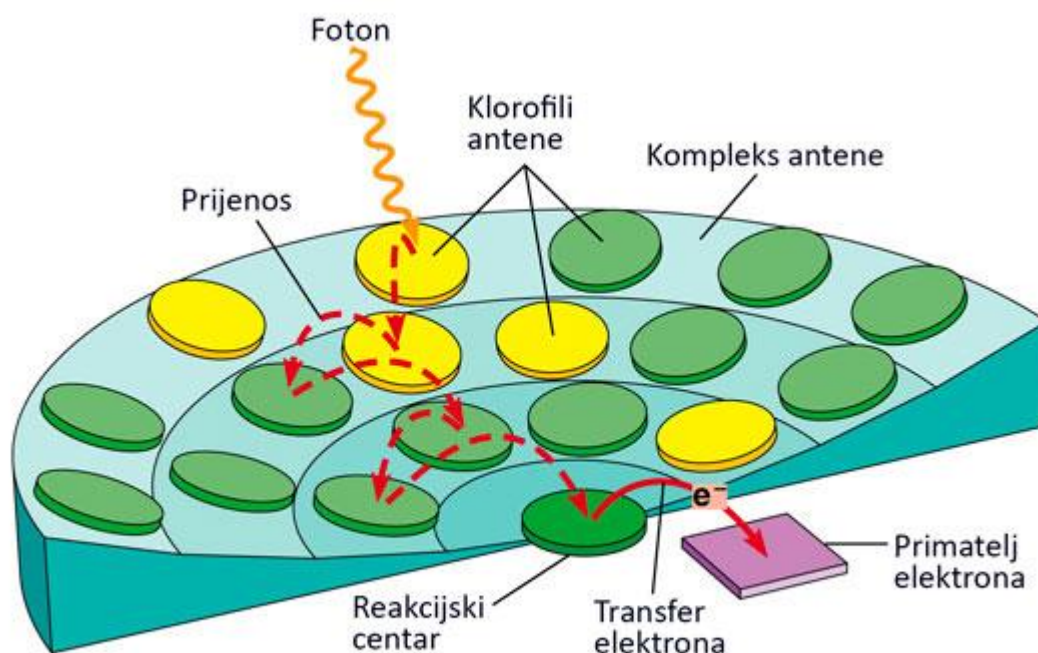
SLIKA 1.: Vrste plastike s primjerima predmeta iz svakodnevnog života sačinjenih od nje te pripadajućih monomera i konvencionalnih oznaka. (PET – poli(etilen-tereftalat), HDPE – polietilen visoke gustoće (eng. *high-density polyethylene*), PVC – poli(vinil-klorid) (eng. *polyvinyl chloride*), LDPE – polietilen male gustoće (eng. *low-density polyethylene*), PP – polipropilen)

(Preuzeto iz Dris (2016.))

1.3 FOTOSINTEZA

Fotosinteza je u suštini niz kemijskih reakcija kojima biljke i drugi fotosintetski organizmi svjetlosnu energiju pretvaraju u kemijsku energiju. Odvija se u kloroplastu te se može podijeliti na dva osnovna dijela: reakcije na svjetlu, koje se događaju na tilakoidnim membranama i Calvinov ciklus, koji se događa u stromi kloroplasta. Na membranama tilakoida nalaze se fotosintetske jedinice koje se sastoje od sustava antena i reakcijskih centara (Slika 2.). Antene sadrže pigmente te im je svrha hvatanje fotosintetski aktivnog Sunčevog zračenja koje dalje prenose do reakcijskog centra. Osnovni dijelovi reakcijskog centra su fotosustav II (eng. *photosystem II* - PSII), proteinski kompleks citokrom *b₆f* (cit *b₆f*), fotosustav I (eng. *photosystem I* - PSI) i protein ATP-sintaza. U

reakcijskom centru dolazi do pretvaranja svjetlosne energije u elektrokemijski potencijal na način da se elektroni prenose kroz proteinske komplekse uklopljene u tilakoidnu membranu, stvarajući time elektrokemijski gradijent. ATP-sintaza koristi energiju iz stvorenog elektrokemijskog gradijenta za sintezu adenozin trifosfata (eng. *adenosine triphosphate* - ATP). U reakcijskom centru također se reducira nikotinamid adenin dinukleotid-fosfat (eng. *nicotinamide adenin dinucleotide-phosphate* - NADP⁺) koji služi kao izvor energije kasnije tijekom reakcija Calvinovog ciklusa (Barber i Archer 2004.)



SLIKA 2.: Shematski prikaz sustava antena te prijenosa energije do reakcijskog centra u tilakoidnim membranama.

(Preuzeto iz <https://nova-akropola.com/znanost-i-priroda/znanost/fotosinteza-izvor-energije-zivih-bica/#PrettyPhoto/2/>)

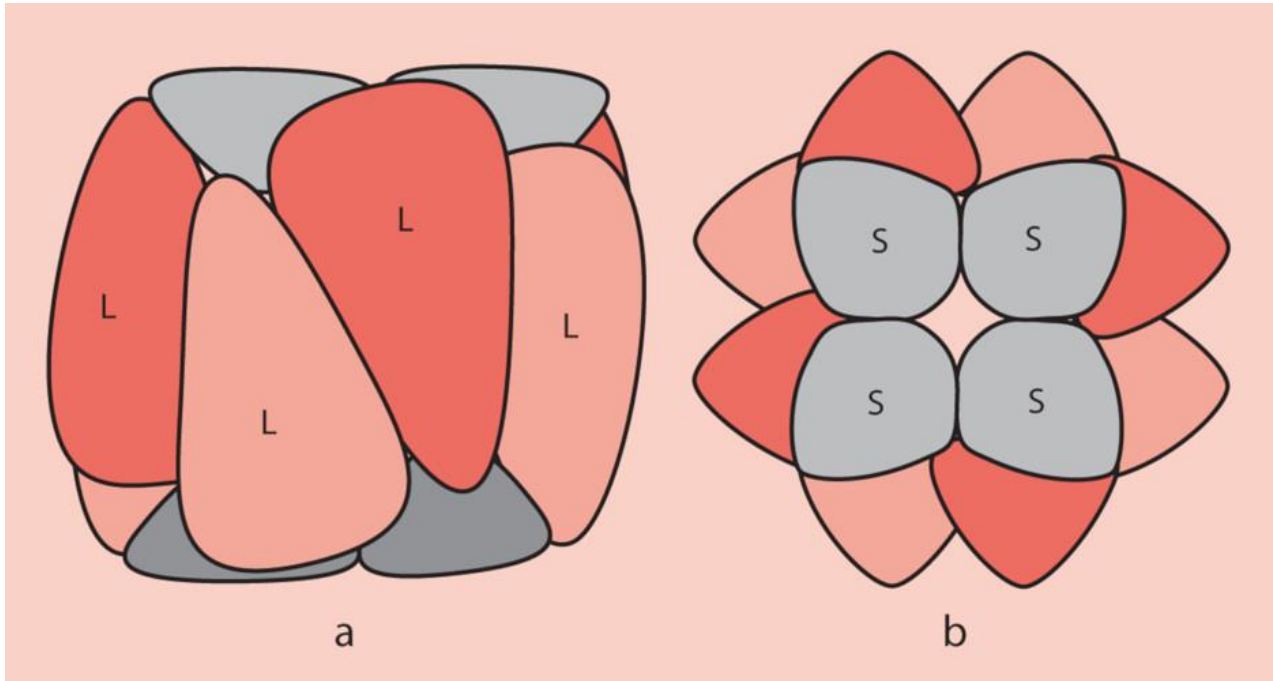
1.4 FOTOSINTETSKI PIGMENTI

Fotosintetski pigmenti su molekule koje mogu apsorbirati svjetlost, prenositi energiju i elektrone. Biljke sadrže pigmente klorofil *a*, klorofil *b* i karotenoide. Klorofil *a* služi kao glavni

fotosintetski pigment, dok su klorofil *b* i karotenoidi pomoćni pigmenti. Karotenoidi također štite klorofil od fotooksidacije u uvjetima visokih intenziteta svjetlosti tako što preuzimaju višak energije na sebe i otpuštaju je u obliku topline. Klorofili imaju prstenastu porfirinsku strukturu od četiri pirolova prstena te se u sredini molekule koordinacijski veže magnezijev ion (Mg^{2+}). Također posjeduju dugi esterski vezani alkohol fitol koji pomaže učvrstiti klorofil s proteinima u hidrofobnoj okolini. Karotenoidi su pak molekule s lancem konjugiranih dvostrukih veza na čijim se krajevima nalaze prstenovi od šest ugljikovih atoma koji mogu ili ne moraju imati kisik u svome sastavu. Bez kisika su karoteni, a kisik imaju ksantofili (Holzwarth 2004.).

1.5 RUBISCO

Ribuloza-1,5-bisfosfat karboksilaza/oksigenaza (eng. *ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase* – RUBISCO) je enzim ključan za reakcije Calvinovog ciklusa. Naime, u prvom koraku Calvinovog ciklusa RUBISCO katalizira karboksilaciju ribuloze-1,5-bisfosfata s ugljikovim dioksidom (CO_2). RUBISCO se sastoji od velike (55 kDa) i male (14 kDa) podjedinice (Slika 3.). Velika podjedinica kodirana je kloroplastnom DNA, dok je mala podjedinica kodirana molekulom DNA iz jezgre, sintetizira se u citoplazmi stanice te se prenosi u kloroplast. Ioni Mg^{2+} i njihovo ispravno pozicioniranje u aktivnom mjestu, potrebni su za enzimsku aktivnost enzima RUBISCO. RUBISCO je relativno spor enzim jer jedna molekula enzima obradi tek 3 do 10 molekula CO_2 u sekundi. To ga čini limitirajućim faktorom brzine Calvinovog ciklusa tijekom dana. Nadalje, u mraku se RUBISCO inaktivira, a na svjetlu aktivira što je još jedna forma regulacije jer se ne moraju aktivirati sve molekule enzima RUBISCO, već po potrebi, ovisno o vanjskim čimbenicima (Edwards i Walker 2004.).



SLIKA 3.: Shema trodimenzionalne strukture enzima RUBISCO. (L – velika podjedinica, S – mala podjedinica)

(Preuzeto iz <https://www.encyclopedie-environnement.org/en/zoom/rubisco/>)

2. RAZRADA

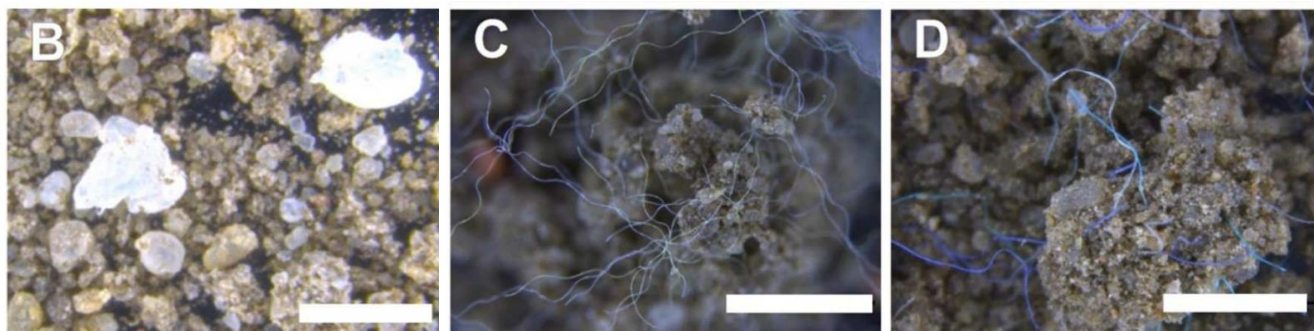
2.1 MIKROPLASTIKA U TLU

Plastika može sadržavati razne toksične tvari dodane prilikom proizvodnje, primjerice plastifikatore, usporivače plamena, antioksidanse te stabilizatore (Ge i sur. 2021.), ili se tvari naknadno mogu adsorbirati na nju (Galloway i sur. 2017.) i time dodatno utjecati na njezinu toksičnost. Naime, nakon što MP dospije u tlo, može direktno utjecati na samu biljku ili mikrobiotu korijenskog sustava i izazvati negativne učinke na rast i razvoj biljke.

Vremenom se MP raspada na NP, koja obuhvaća čestice plastike manje od 100 nm. Obzirom da su čestice MP uglavnom prevelike (100 nm do 5 mm) da bi se apsorbirale u korijen, učinci MP uglavnom su fizikalni. Nasuprot tome, čestice NP, ali i sitnije čestice MP, dovoljno su male da ih korijen apsorbira te da uđu u biljku, što čini njihov učinak pretežito kemijskim (Rillig i

sur. 2019.). One bi potencijalno mogle oštetiti stanične membrane, unutarstanične molekule te potaknuti stvaranje reaktivnih kisikovih spojeva (eng. *reactive oxygen species*, ROS) (Navarro i sur. 2008.). Ukoliko bi se apsorbirale i inkorporirale u biljku, prenijele bi se dalje hranidbenim lancem, što bi u slučaju usjeva kojima se hrane ljudi ili stoka rezultiralo time da NP i MP dođu i do ljudskog organizma. Međutim, postojanje NP u tlu zasada još nije dokazano (Rillig i sur. 2019.), dok je MP sveprisutna u tlu (Yang i sur. 2021.).

de Souza Machado i sur. (2018.) pokazali su da mikrovlakna poliestera i poliakrila te fragmenti PE-MP smanjuju nasipnu gustoću tla. Nasipna gustoća je indikator kompaktnosti tla. Naime, ona se izražava kao omjer mase suhog tla i volumena kojeg zauzima. U taj volumen ulaze i čestice tla i pore i kanalići između njih. Smanjenje nasipne gustoće može se objasniti činjenicom da je plastika uglavnom manje gustoće od minerala prisutnih u tlu. Nadalje, mikrovlakna poliestera i poliakrila povezuju tlo u grumene što smanjuje rasipnost tla. Na slici 4. vidljivi su grumeni te fragmenti PE-MP inkorporirani u tlo.



SLIKA 4.: Fragmenti PE-MP slabo povezani s česticama tla (B) te mikrovlakna poliestera (C) i poliakrila (D) vezana na čestice tla, spajajući ih tako u grumene.

(Preuzeto iz de Souza Machado i sur. (2018.))

Smanjenjem nasipne gustoće tla stvara se više kanalića među česticama tla što omogućuje prodiranje zraka i vode te smanjeni otpor rastu korijena, što bi se dakako pozitivno odrazilo na rast biljke. Više kanalića u tlu moglo bi rezultirati povećanim otjecanjem vode i sušom (Rillig i sur. 2019.), što bi bilo posebno zabrinjavajuće u sušnijim predjelima uzevši u obzir globalni porast temperature. Međutim, de Souza Machado i sur. (2018.) pokazali su da se tlu s inkorporanim

mikrovlaknima poliestera povećava kapacitet zadržavanja vode, što bi se pozitivno odrazilo na vlažnost tla i evapotranspiraciju. Evapotranspiracija označava gubitak vode u atmosferu s neke Zemljine površine, uključujući isparavanje s tla i površine biljke i transpiraciju biljaka. Biljke bi dakako tada imale pristup većim količinama vode što pozitivno utječe na stopu fotosinteze, no veći kapacitet zadržavanja vode u tlu generalno je dobar za sušna predjela i sve veće temperature u njima.

2.2 GENERALNI ŠTETNI UTJECAJ MIKROPLASTIKE NA BILJKE

Osim štetnog utjecaja na molekule ključne za proces fotosinteze, koji je naveden kasnije u tekstu, zabilježeno je da mikroplastika ima štetan utjecaj na biljke i na razne druge načine koji će se neminovno odraziti i na stupanj fotosinteze.

2.2.1 ROS I OKSIDACIJSKI STRES

Koncentracija superoksidnog aniona (O_2^-), jedne od molekula ROS, povećava se s dodatkom PE-MP u tlo biljke duhana (*Nicotiana tabacum*) (Teng i sur. 2022.). O_2^- nastaje redukcijom molekule kisika (O_2) s jednim elektronom. Enzim superoksid dismutaza (SOD) zatim katalizira prevođenje O_2^- u vodikov peroksid (H_2O_2), koji je također ROS molekula te se on dalje prevodi u H_2O i O_2 djelovanjem enzima katalaze. Povećane koncentracije molekula ROS upućuju na pojavu oksidacijskog stresa i aktivaciju antioksidacijskog sustava. Obzirom da su molekule ROS jaki oksidansi, njihova povećana koncentracija može rezultirati narušavanjem strukture kloroplasta i inhibiranjem ključnih enzima fotosinteze (Arora i sur. 2002.).

Antioksidacijski sustav služi za uklanjanje molekula ROS te zaštitu stanica od njihovog štetnog djelovanja. Dijeli se na enzimatske i neenzimatske komponente, od kojih neke imaju ulogu i u drugim staničnim procesima kao što su mitozu, elongacija stanice, senescencija te stanična smrt (Das i Roychoudhury 2014.).

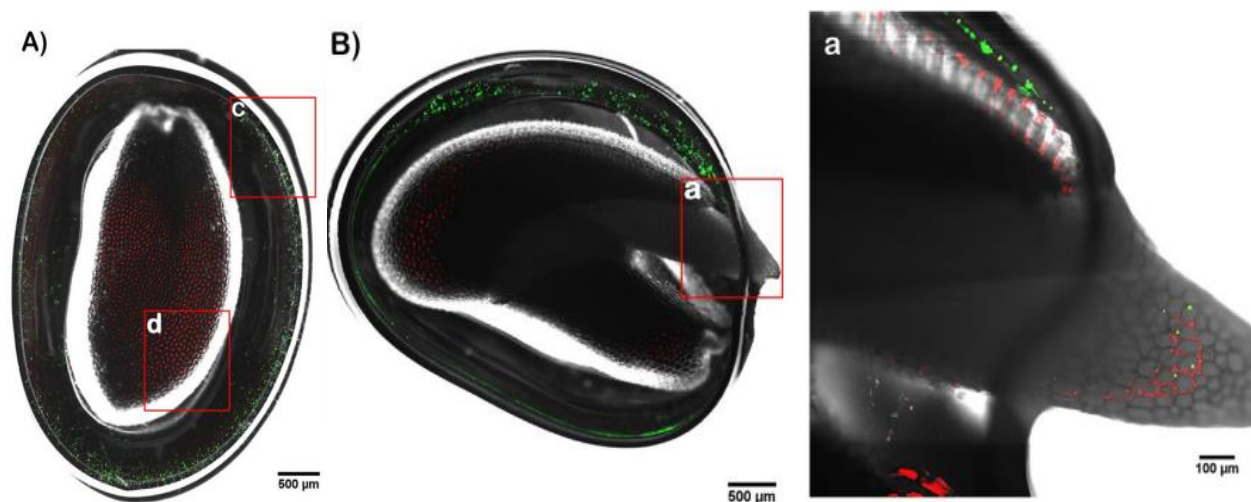
Što se tiče neenzimskih komponenti antioksidacijskog sustava, istraživanja su pokazala da je nakon izlaganja kres salate (*Lepidium sativum*) tretmanu s PVC-MP koncentracija prolina značajno porasla u odnosu na kontrolu, dok su tretmani s PE-MP, PP-MP ili kombinacijom PE-MP i PVC-MP izazvali vrlo male promjene (Pignattelli i sur. 2020.). Što se tiče enzimskih komponenti antioksidacijskog sustava, Yu i sur. (2020.) pokazali su da je nakon izlaganja obične mješinke (*Utricularia vulgaris*) 2 μm i 5 μm PS-MP, koncentracija enzima SOD značajno porasla u odnosu

na kontrolu i biljke iste vrste izložene 1 μm PS-MP. Međutim, koncentracija enzima katalaze povećala se kod običnih mješinki izloženih 1 μm i 2 μm PS-MP u odnosu na kontrolu i običnih mješinki izloženih 5 μm PS-MP. Nadalje, koncentracija enzima askorbat peroksidaza povećala se kod običnih mješinki izloženih tretmanu 1 μm , 2 μm i 5 μm PS-MP u odnosu na kontrolu.

MP u tlu također rezultira smanjenom ekspresijom nekih gena koji kodiraju za proteine koji se nalaze u PSII, PSI ili fotosintetskom sustavu antena. Iako je nekim genima ekspresija povećana, sumarno MP smanjuje sposobnost hvatanja svjetla, prijenos elektrona niz transportni lanac elektrona te kružnog toka elektrona (Teng i sur. 2022.).

2.2.2. *KLIJANJE*

Bosker i sur. (2019.) pokazali su da različite veličine čestica MP smanjuju brzinu klijanja sjemenki kres salate na način da su čestice MP najvećeg promjera najmanje smanjile brzinu klijanja. Međutim, nakon 24 sata izloženosti sjemenki MP, negativni učinak MP u potpunosti nestaje. Eksperiment proveden s fluorescento obilježenim česticama MP pokazao je da se tijekom prvih 4 do 8 sati MP zadržavaju u testu sjemenke i to najviše u porama, što je vidljivo na slici 5. Kada klijanje započne te radikula i plumula probiju testu, čestice MP se adsorbiraju na njih te se rastom biljke raspodijele po biljci (Bosker i sur. 2019.). To je značajno zato što, čak i ako sama biljka ne apsorbira MP, praktički je sigurno da će biljojedi unijeti MP s površine biljke u svoj organizam, unoseći time MP u hranidbeni lanac. Zadržavanje čestica MP u porama teste u potpunosti objašnjava prijašnja opažanja. Naime, začepljenem pora čestice MP otežavaju izlazak radikule i plumule te ulazak vode koja je nužna za sam početak klijanja. No, jednom kada klijanje sjemenke započne, ona klije gotovo neometano (Bosker i sur. 2019.).



SLIKA 5.: Nakon 4 sata izloženosti sjemenke kres salate (*Lepidium sativum*) česticama MP (zeleno), čestice se akumuliraju u testu, ponajviše u porama (A, c). Nakon 8 sati izloženosti, odnosno nakon početka klijanja, MP se adsorbira i na radikulu (B, a).

(Preuzeto iz Bosker i sur. (2019.))

2.3 FOTOSINTETSKI PIGMENTI

Dokazano je da se dodatkom PE-MP u tlo u kojem raste duhan, linearno smanjuje koncentracija klorofila povećanjem koncentracije mikroplastike (Teng i sur. 2022.). Pignattelli i sur. (2020.) su pak pokazali da se dodatkom PE-MP, PVC-MP i PP-MP u tlo povećavaju koncentracije klorofila *a* i *b* te karotena u kres salati, dok dodatkom kombinacije PE-MP i PVC-MP koncentracije klorofila *a* i *b* te karotena ostaju iste kao u kontroli. Nadalje, pokazali su da se dodatkom PVC-MP koncentracija aminolevulinske kiseline značajno povećava. Dodatkom PP-MP također se povećava koncentracija aminolevulinske kiseline, dok se dodatkom PE-MP ili kombinacije PE-MP i PVC-MP njena koncentracija smanjuje. Sintaza aminolevulinske kiseline je korak na kojem se sinteza prekursora klorofila, protoklorofilid, regulira. Manje koncentracije protoklorofilida su za biljku zapravo povoljne jer će povećati stupanj fotosinteze, no u većim koncentracijama on postaje toksičan. Ti eksperimenti potvrđuju da različite vrste dodane mikroplastike različito utječu na različite vrste biljaka.

2.4 RUBISCO

Teng i sur. (2022.) pokazali su da se dodatkom sve veće koncentracije čestica PE-MP, koncentracija enzima RUBISCO sve više smanjuje u biljci duhana. Nadalje, osim smanjenja same koncentracije enzima RUBISCO, pokazali su i da se smanjuje njegova maksimalna brzina karboksilacije te njegova maksimalna brzina regeneracije, što direktno usporava brzinu fotosinteze. Dong i sur. (2021.) pokazali su da dodatak čestica PS-MP smanjuje aktivnost enzima RUBISCO u biljci mrkve (*Daucus carota*).

2.5 VISINA I BIOMASA

Dodatak biorazgradive mikroplastike u tlu utjecao je na visinu obične pšenice (*Triticum aestivum*), dok dodatak LDPE-MP nije imao utjecaja. Međutim, nakon 40. dana stabljika pšenice izložena biorazgradivoj mikroplastici počela se naglo izduživati (Qi i sur. 2018.). Na slici 6. vidljiva je pak promjena u rastu biljke duhana nakon 48 dana izloženosti različitim koncentracijama čestica PE-MP u odnosu na kontrolu (Teng i sur. 2022.).



SLIKA 6.: Promjena u rastu biljke duhana (*Nicotiana tabacum*) nakon 48 dana izloženosti različitim koncentracijama čestica PE-MP u odnosu na kontrolu.

(Preuzeto iz Teng i sur. (2022.))

Nakon 2 mjeseca izloženosti obične pšenice česticama biorazgradive mikroplastike, biomasa korijena i izdanka bila je značajno manja. Za razliku od toga, pšenica izložena LDPE-MP nakon 2 mjeseca imala je podjednaku biomasu kao kontrola (Qi i sur. 2018.). Iz tih se podataka

vidi da i biorazgradiva plastika može naštetiti biljkama. Dapače, njen kemijski sastav ne mora nužno biti 100% biorazgradiv, kao što je to i slučaj u eksperimentu Qi i sur. (2018.), u kojem je primijenjena biorazgradiva mikroplastika sadržavala 44.6% PET-MP.

Pignatelli i sur. (2020.) su pak pokazali da izloženost kres salate PE-MP, PVC-MP, PP-MP te kombinaciji PE-MP i PVC-MP smanjuje visinu izdanka u odnosu na kontrolu. Biomasa kres salate se pak povećava u svim tretmanima osim u tretmanu PE-MP gdje opada u odnosu na kontrolu.

2.6 BROJ I POVRŠINA LISTOVA

Izloženost obične pšenice česticama biorazgradive mikroplastike rezultirala je smanjenjem broja i površine listova (Qi i sur. 2018.). Nasuprot tome, nakon izlaganja kres salate česticama PE-MP, PVC-MP, PP-MP te kombinaciji PE-MP i PVC-MP nije zabilježeno statistički značajno odstupanje u broju listova od kontrole (Pignatelli i sur. 2020.). Dakle, različite vrste mikroplastike imaju različit utjecaj na broj i površinu listova različitih vrsta biljaka. Iako utjecaj ne mora biti negativan, kao što je to slučaj u istraživanju Pignatelli i sur. (2020.), može biti te treba imati to na umu. Smanjen broj i površina listova smanjiti će i stopu fotosinteze obzirom da se praktično sva fotosinteza većine biljaka odvija u listovima.

3. ZAKLJUČAK

Plastika je stekla veliku popularnost u raznim industrijskim i komercijalnim domenama zbog svoje „plastičnosti“, odnosno mogućnosti da poprimi razne oblike, boje, tvrdoće pa time i funkcije. Iako smo već odavno svjesni sve većih količina otpada u prirodi, prednosti plastike bile su prevelike da bi se odbacile, uključujući njenu relativno nisku cijenu. Proizvodnja i korištenje plastike se nastavila pa je posljedica toga činjenica da danas postajemo sve više svjesni njene štetnosti po živi svijet. Plastika na biljke može negativno utjecati na gotovo svim razinama. Od promjene ekspresije gena i uzrokovanja staničnog stresa u kojem stanica funkcionira suboptimalno, preko smanjenja koncentracija pigmenata i enzima RUBISCO, do očitih promjena poput znatno manje biomase biljke izložene česticama MP u odnosu na kontrolu. Sve od navedenog smanjuje stupanj fotosinteze koja je dakako važna i za biljke i za nas, ljude, uzevši u obzir njenu dvostruku prednost za nas: proizvodnja kisika i uklanjanje ugljikovog dioksida iz atmosfere. Nažalost, utjecaj MP na biljke ovisi o velikom broju varijabli, kao što su vrsta biljke, vrsta polimera, veličina i oblik

čestice, koncentracija MP i slično, pa su tako mnogi rezultati eksperimenata provedeni s MP i biljkama dali neutralne ili čak pozitivne rezultate za biljku. To značajno otežava razumijevanje utjecaja MP, kao i samo istraživanje njenog utjecaja. Međutim, previše je negativnih rezultata istraživanja utjecaja MP po živi svijet da ne bismo sve veće količine plastike smatrali alarmantnim stanjem. Naravno, bilo bi nerealno očekivati da će čovječanstvo napraviti korak unazad i odbaciti sve prednosti plastike u korist ostalih materijala. No, kombinacija „starijih“ materijala s novijim ekološki prihvatljivijim vrstama plastike mogla bi poboljšati trenutnu situaciju. Daljnja istraživanja trebala bi se kretati prema razvitku novijih materijala, jednakih prednosti i isplativnosti poput plastike, a manjoj štetnosti za okoliš. Također je potrebno provesti još mnogo istraživanja utjecaja mikroplastike na živi svijet da bismo ga u potpunosti razumjeli, što je važno jer će se plastika, i ako ju zamijenimo drugim materijalima, zadržati na planetu još nekoliko stotina tisuća godina.

4. LITERATURA

Arora A., Sairam R. K., Srivastava G. C. (2002.): Oxidative stress and antioxidative system in plants. **Current Science** 82 (10): 1227-1238.

Barber J., Archer M. D. (2004.): Photosynthesis and photoconversion. U: Barber J., Archer M. D. (ur.) Molecular to global photosynthesis. Imperial College Press, World Scientific Publishing, str. 1-43.

Bosker T., Bouwman L. J., Brun N. R., Behrens P., Vijver M. G. (2019.): Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. **Chemosphere** 226: 774-781.

Das K., Roychoudhury A. (2014.): Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. **Frontiers in Environmental Science** 2: 53.

de Souza Machado A. A. S., Lau C. W., Till J., Kloas W., Lehmann A., Becker R., Rillig M. C. (2018.): Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. **Environmental Science & Technology** 52 (17): 9656-9665.

Dong Y., Gao M., Qiu W., Song Z. (2021.): Uptake of microplastics by carrots in presence of As (III): Combined toxic effects. **Journal of Hazardous Materials** 441: 125055.

Dris R. (2017.): First assessment of sources and fate of macro- and micro- plastics in urban hydrosystems: case of Paris megacity. Doktorski rad, Université Paris-Est, Environmental Sciences, Pariz.

Edwards G. E., Walker D. A. (2004.): Photosynthetic carbon assimilation. U: Barber J., Archer M. D. (ur.) Molecular to global photosynthesis. Imperial College Press, World Scientific Publishing, str. 189-221.

Fotosinteza – izvor energije živih bića (2018.) Nova Akropola <https://nova-akropola.com/znanost-i-priroda/znanost/fotosinteza-izvor-energije-zivih-bica/#PrettyPhoto/2/> (pristupljeno 28.8.2022.)

Fridovich-Keil J.L.: bioplastic. Encyclopedia Britannica <https://www.britannica.com/technology/bioplastic> (pristupljeno 15.8.2022.).

Galloway T., Cole M., Lewis C. (2017.): Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. **Nature Ecology & Evolution** 1 (5): 1-8.

Ge J., Li H., Liu P., Zhang Z., Ouyang Z., Guo X. (2021.): Review of the toxic effect of microplastics on terrestrial and aquatic plants. **Science of the Total Environment** 791: 148333.

History and Future of Plastics. Science History Institute <https://www.sciencehistory.org/the-history-and-future-of-plastics> (pristupljeno 10.8.2022.).

Holzwarth A. (2004.): Light absorption and harvesting. U: Barber J., Archer M. D. (ur.) Molecular to global photosynthesis. Imperial College Press, World Scientific Publishing, str. 43-117.

life cycle of a plastic product (2010.). americanchemistry https://web.archive.org/web/20100317004747/http://www.americanchemistry.com/s_plastics/doc.asp?CID=1571&DID=5972 (pristupljeno 10.8.2022.).

Microplastics. National Geographic Society <https://education.nationalgeographic.org/resource/microplastics> (pristupljeno 10.8.2022.).

Navarro E., Baun A., Behra R., Hartmann N., Filser J., Miao A., Quigg A., Santschi P., Sigg L. (2008.): Environmental behavior and ecotoxicity of engineered nanoparticles to algae, plants, and fungi. **Ecotoxicology** 17 (5): 372-386.

Pignattelli S., Broccoli A., Renzi M. (2020.): Physiological responses of garden cress (*L. sativum*) to different types of microplastics. **Science of the Total Environment** 727: 138609.

Qi Y., Yang X., Pelaez A. M., Lwanga E. H., Beriot N., Gertsen H., Garbeva P., Geissen V. (2018.): Macro- and micro- plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth. **Science of the Total Environment** 645: 1048-1056.

Rillig M., Lahmann A., de Souza Machado A. A. S., Yang G. (2019.): Microplastic effects on plants. **New Phytologist** 223 (3): 1066-1070.

Robbins J. (2020.): Why bioplastics will not solve the world's plastics problem. Yale Environment 360 <https://e360.yale.edu/features/why-bioplastics-will-not-solve-the-worlds-plastics-problem> (pristupljeno 15.8.2022.).

Rodriguez F.: plastic. Encyclopedia Britannica <https://www.britannica.com/science/plastic> (pristupljeno 11.8.2022.).

RubisCO. Encyclopedia of the Environment <https://www.encyclopedie-environnement.org/en/zoom/rubisco/> (pristupljeno 2.9.2022.)

Schwarzer M., Brehm J., Vollmer M., Jasinski J., Xu C., Zainuddin S., Fröhlich T., Schott M., Greiner A., Scheibel T., Laforsch C. (2022.): Shape, size, and polymer dependent effects of microplastics on *Daphnia magna*. **Journal of Hazardous Materials** 426: 128136.

Teng L., Zhu Y., Li H., Song X., Shi L. (2022.): The phytotoxicity of microplastics to the photosynthetic performance and transcriptome profiling of *Nicotiana tabacum* seedlings. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 231: 113155.

Yang L., Zhang Y., Kang S., Wang Z., Wu C. (2021.): Microplastics in soil: a review on methods, occurrence, sources, and potential risk. **Science of The Total Environment** 780: 146546.

Yu H., Zhang X., Hu J., Peng J., Qu J. (2020.): Ecotoxicity of polystyrene microplastics to submerged carnivorous *Utricularia vulgaris* plants in freshwater ecosystems. **Environmental Pollution** 265: 114830.

ŽIVOTOPIS

Zovem se Paola Rumin. Osnovnoškolsko obrazovanje završila sam u Osnovnoj školi Juršići, a srednjoškolsko u Gimnaziji Pula, opći smjer. Studiram na Biološkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, smjer Biologija. Članica sam BIUS-a, gdje sam aktivna u sekciji za primjenjenu botaniku. Daljnje obrazovanje planiram usmjeriti na područje botanike.