

# Toksični učinci mikroplastike na vodene biljke

---

**Vidović, Natalija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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:217:176387>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-03**



*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Biološki odsjek

Natalija Vidović

**Toksični učinci mikroplastike  
na vodene biljke**

Završni rad

Zagreb, 2023.

University of Zagreb  
Faculty of Science  
Department of Biology

Natalija Vidović

**Toxic effects of microplastics  
on aquatic plants**

Bachelor thesis

Zagreb, 2023.

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

# TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

---

Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Biološki odsjek

Završni rad

## Toksični učinci mikroplastike na vodene biljke

Natalija Vidović

Rooseveltov trg 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Mikroplastika je jedan od najznačajnijih čimbenika onečišćenja okoliša koji nastaje degradacijom plastike na fragmente mikrometarskih dimenzija. Prisutna je u gotovo svim ekosustavima u kojima stupa u izravnu interakciju sa živim organizmima. Slatkovodna staništa česti su izvori visokih koncentracija mikroplastike koja se deponira s kopna iz otpadnih voda, ispiranjem obrađenog tla ili neodgovornim odlaganjem otpada. Slatkovodne biljke (makrofiti) su, uz alge, primarni proizvođači i prva trofička razina hranidbenih lanaca, zbog čega značajno utječu na stabilnost slatkovodnog ekosustava. Stoga je cilj recentnijih istraživanja bio ustanoviti prirodu odnosa između slatkovodnih biljaka i čestica mikroplastike. Toksični učinci mikroplastike ovise o njenim fizikalnim i kemijskim svojstvima: dimenziji, obliku, gustoći, naboju, sastavu, aditivima itd. S druge strane, najrelevantniji fiziološki odgovori biljaka temelje se na promjeni u vrijednostima parametara koji su povezani s rastom, procesom fotosinteze, morfološkim stanjem i proliferacijom. Da bi mikroplastika mogla imati učinak na biljke, treba prionuti na njihovu površinu ili apsorbirati unutar vaskularnog sustava, što ovisi o nizu okolišnih čimbenika. Prednosti proučavanja interakcije između mikroplastike i slatkovodnih makrofita je njihovo potencijalno korištenje kao bioindikatora kontaminacije i za proces bioremedijacije *in situ*, za što je ključno precizno poznavati moguće toksične učinke mikroplastike na određenu biljnu vrstu.

Ključne riječi: makrofiti, slatkovodna staništa, kontaminacija okoliša, fitotoksičnost, bioindikator, bioremedijacija

(27 stranica, 7 slika, 0 tablica, 80 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski)

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

# Toxic effects of microplastics on aquatic plants

Natalija Vidović

Rooseveltova trg 6, 10000 Zagreb, Croatia

Microplastic is one of the most important factors of environmental pollution, caused by the degradation of plastics into micrometre-sized fragments. It is present in almost all ecosystems where they interact directly with living organisms. Freshwater habitats are common sources of high concentrations of microplastics deposited on land from wastewater, leaching from croplands or irresponsible waste disposal. Freshwater plants (macrophytes), together with algae, are the primary producers and the first trophic level of food chains, and therefore they have a significant impact on the stability of the freshwater ecosystem. Therefore, the objective of recent researches was to determine the nature of a relationship between freshwater macrophytes and microplastic particles. The toxic effects of microplastics depend on their physical and chemical properties: size, shape, density, charge, composition, additives, etc. On the other hand, the main physiological responses of plants are based on changes in parameters related to growth, photosynthesis process, morphological state and proliferation. For microplastics to affect plants, they must adhere to their surface or be taken up into the vascular system, which depends on a number of environmental factors. The advantage of studying the interaction between microplastics and freshwater *in situ* macrophytes is the potential use as bioindicators of contamination and for the process of bioremediation, for which it is crucial to know precisely the potential toxic effects of microplastics on a given plant species.

Keywords: macrophytes, freshwater habitats, environmental contamination, phytotoxicity, bioindicators, bioremediation

(27 pages, 7 figures, 0 tables, 80 references, original in: croatian)  
Thesis is deposited in Central Biological Library.

Mentor: prof. dr. sc. Biljana Balen

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KARAKTERIZACIJA I SVOJSTVA MIKROPLASTIKE .....	3
2.1. Izvori mikroplastike u okolišu.....	4
2.2. Svojstva mikroplastike .....	5
3. EKSPERIMENTALNE BILJNE VRSTE.....	7
4. INTERAKCIJA BILJNIH VRSTA I MIKROPLASTIKE .....	8
4.1. Slatkovodne biljke kao biondikatori kontaminacije.....	9
4.2. Prianjanje mikroplastike na dijelove biljke i bioremedijacija .....	9
5. UČINCI MIKROPLASTIKE NA VODENE BILJKE .....	14
5.1. Utjecaj oblika i aditiva .....	14
5.2. Utjecaj prianjanja .....	15
5.3. Utjecaj vremena izlaganja .....	16
5.4. Utjecaj koncentracije.....	17
5.5. Utjecaj mikroplastike s fluorescentnim probama.....	18
6. ZAKLJUČAK .....	21
7. LITERATURA.....	22

# 1. UVOD

Razvoj gospodarstva i tehnologije preduvjet je za opstanak standarda života kakvog danas poznajemo, međutim, neosporno ima negativan utjecaj na biosferu. Jedno od najčešćih pitanja koje zaokuplja pozornost znanstvenika, ali i javnosti, u zadnjih nekoliko godina je: kakav učinak ima plastika na organizme? Naime, svake se godine proizvedu milijuni tona plastike koja se koristi u gotovo svakoj sferi ljudskog života. Prema Azeem i sur. (2021), 2019. godine proizvelo se čak 368 milijuna tona plastike na svjetskoj razini. Brojne su prednosti korištenja plastike: vrlo je izdržljiv i dugovječan materijal, relativno male mase, a pogodan je za višestruku upotrebu i čuvanje hrane, dok su troškovi proizvodnje relativno niski. U posljednjih nekoliko godina su u tijeku iscrpne studije s korištenjem inovativnih metoda kako bi se dobio uvid u količinu proizvedene plastike i njezine eksploatacije i transporta u okoliš (Wang i sur. 2021). Pod utjecajem vremenskih prilika, erozijom i ispiranjem tla, neodgovornim odlaganjem otpada, otpadnim vodama itd., plastika dospijeva u okoliš i pri tome se degradira na čestice manjih veličina (Thompson i sur. 2009, Enfrin i sur. 2019, Lebreton i Andrady 2019). Degradacija plastike u okolišu moguća je procesom fotooksidacije (djelovanjem ultraljubičastih zraka), pod utjecajem fizičke sile ili biorazgradnjom (Senavirathna i sur. 2022).

Mikroplastikom (MP) nazivamo fragmente plastike veličine u rasponu 1 mm – 1 µm (Rozman i Kalčíková 2022), iako se još uvijek raspravlja o široko prihvaćenoj definiciji (Hartmann i sur. 2019). Provedena su mnogobrojna istraživanja u kojima je potvrđena prisutnost MP u tlu (Guo i sur. 2020), zraku (Gasperi i sur. 2018), rijekama, jezerima, močvarama (Ziajahromi i sur. 2020) te morima. Unatoč tome što su slatkovodni ekosustavi često izravna poveznica između kopnenih i morskih ekosustava te se putem njih transportiraju značajne količine čestica MP (Rochman 2018), oni su najslabije istraženi. Glavnim uzrocima onečišćenja slatkovodnih ekosustava smatraju se postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda i otjecanje s poljoprivrednih površina (Enfrin i sur. 2019, Bretas Alvim i sur. 2020). Ali, MP također može dospjeti u vodeni okoliš na druge načine, na primjer putem vjetra u sastavu prašine, abrazijom industrijskih i građevinskih materijala poput automobilskih guma, boja za ceste i elemenata arhitektonske građe (Horton i sur. 2017) ili može nastati *in situ* degradacijom makroplastike koja se već prethodno nalazila na tom mjestu (Julienne i sur. 2019).



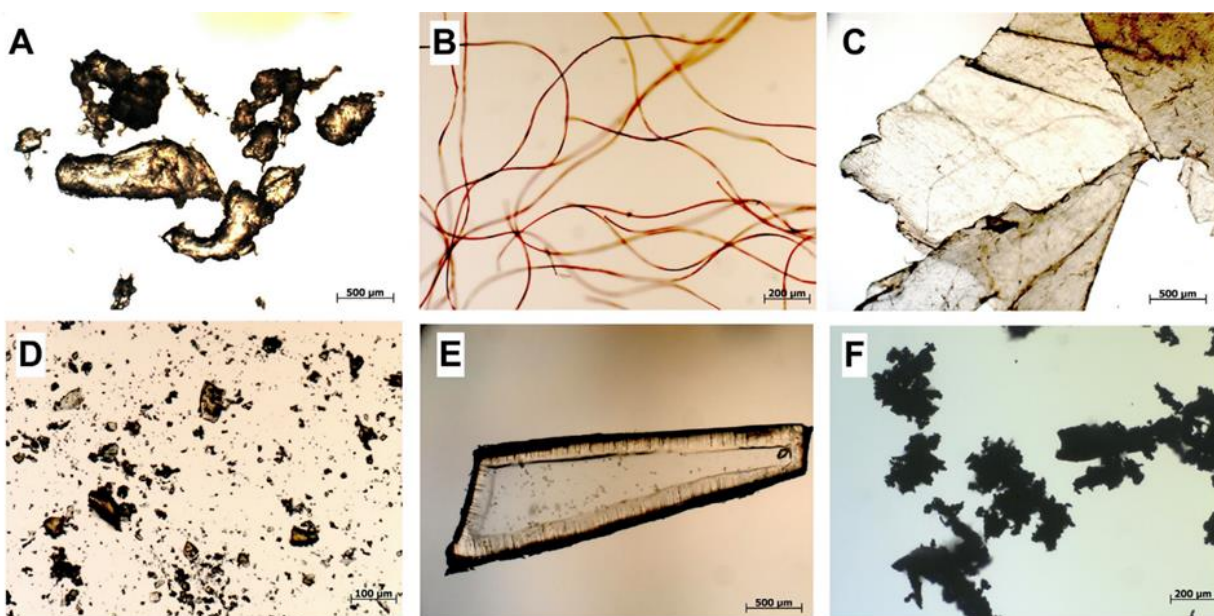
Osim dokazivanja prisutnosti MP u okolišu, istraživanja su usmjerena i na njeno dokazivanje unutar organizama na svim trofičkim razinama, pri čemu se naglasak stavlja na životinjske vrste (Riling i sur. 2019). Uz to, opsežno se proučava djelovanje MP na morfologiju, fiziologiju i ponašanje organizama kako bi se utvrdilo ima li štetan utjecaj na biotu. Stoga je, cilj nekolicine novijih znanstvenih radova otkriti prirodu odnosa između MP i slatkovodnih biljaka koje su uz mikroalge i makrofitne alge s talusom prva karika u hranidbenim lancima (Kalčíková i sur. 2020, Ceschin i sur. 2021, Rozman i Kalčíková 2021). Također, biljke predstavljaju vezu između abiotskih čimbenika i biote te su prva točka biomagnifikacije (procesa nakupljanja kemijskih tvari duž hranidbenog lanca) te su stoga od iznimne važnosti za kontrolu kontaminacije u okolišu (Ceschin i sur. 2021).

Slatkovodne biljke su, za razliku od kopnenih biljaka u izravnom doticaju s MP u vodenom mediju jer se lako mogu prihvatiti za njihovu površinu. Prianjanje im je olakšano slabim elektrostatskim silama i razgranatom morfologijom habitusa te ljepljivim slojem perifitona koji se formira djelovanjem mikroorganizama koji se učestalo nalaze na površini biljke (Kalčíková i sur. 2020). Svojstvo slatkovodnih biljaka da učinkovito mogu primati čestice mikroplastike pokazalo se vrlo korisnim za njihovu upotrebu kao pokazateljima onečišćenja – bioindikatorima te za bioremedijaciju tj. pročišćavanje otpadnih voda (Rozman i Kalčíková 2021). Nažalost, budući da predstavljaju najznačajniji izvor hrane za slatkovodne organizme uključujući mnoge beskralježnjake i kralješnjake poput riba i vodenih ptica te služe kao sklonište velikom broju organizama i njihovim potomcima (Ockenden i sur. 2021, Tang i sur. 2021), MP adherirana na slatkovodne biljke može utjecati na njihove navike hranjenja, potrošnju kisika, rast, razvoj, reprodukciju i povećanje smrtnosti (Au i sur. 2015, Li i sur. 2021).

Cilj ovog rada bio je proučiti i sistematizirati rezultate istraživanja djelovanja MP na morfološke promjene i fiziološki odgovor različitih vrsta slatkovodnih biljaka u ovisnosti o tipu i koncentraciji MP kako bi se mogli izvući zaključci o potencijalnom iskorištavanju nekih vrsta kao bioindikatora i za bioremedijaciju, ali i za sustavno praćenje posljedica kontaminacije okoliša MP.

## 2. KARAKTERIZACIJA I SVOJSTVA MIKROPLASTIKE

Najčešći polimeri od kojih se proizvodi plastika, a čine otprilike 80 % sveukupnih materijala za proizvodnju su polistiren (PS), poliuretan (PUR), poli(vinil-klorid) (PVC), polipropilen (PP), polietilen (PE), polietilen-tereftalat (PET) i njihovi kopolimerni spojevi (Almroth i sur. 2019). MP može biti u obliku sfere, vlakna i filmova (Goss i sur. 2018) te imati pravilne (glatke) ili nepravilne (oštre) rubove kako je prikazano na slici 1.



Slika 1. Primjeri raznolikosti morfoloških oblika mikroplastike (MP): A – polistirenske (PS) mikrokuglice iz pilinga za lice, B – vlakna sintetičkog poliester, C – polietilenski (PE) fragmenti vrećice za kupovinu, D – industrijska MP od bakelita, E – polietilen-tereftalatni (PET) fragmenti plastične boce, F – čestice istrošene gume. Preuzeto iz Rozman i sur. (2021).

Pojedinačne čestice MP mogu biti građene od niza polimera koji imaju specifična fizikalna i kemijska svojstva. Sastav MP je moguće razlučiti korištenjem fizikalnih i kemijskih metoda kao što su infracrvena spektroskopija s Fourierovom transformacijom, kojom se mjeri apsorpcija i emisija dugovalnog zračenja tvari te toplinskom analizom, prilikom čega se mjeri vrijeme i temperatura do nastanka fizikalne promjene (Kalčíková i sur. 2021, Rozman i Kalčíková 2022).

Dimenzije čestica se mogu odrediti skenirajućom elektronskom mikroskopijom emisije polja, laserskom difrakcijskom analizom i optičkom mikroskopijom (Kalčíková i sur. 2021, Rozman i Kalčíková 2022). MP se međusobno mogu razlikovati i prema sposobnosti da na sebe vežu različite mikroorganizme i druge tvari iz okoliša koje mogu nepovoljno utjecati na organizme s kojima su u neposrednom kontaktu (Acosta-Coley i sur. 2019, Kalčíková i sur. 2021). Osim toga, prilikom procesa proizvodnje nerijetko se mogu dodati aditivi koji služe za poboljšavanje svojstva polimera, a ako se mogu ispirati s površine polimera, to dodatno može povećati toksičan učinak MP (Schrank i sur. 2019).

## 2.1. IZVORI MIKROPLASTIKE U OKOLIŠU

Glavni izvori MP u slatkovodnim ekosustavima su poljoprivredne i industrijske otpadne vode te spontana degradacija većih čestica plastike, tzv. makro i mezoplastike. Kada MP dospije u vodeni okoliš, čestice se prostorno raspoređuju ovisno o svojoj gustoći: neki tipovi MP se slobodno zadržavaju u stupcu vode, oni manje gustoće isplivaju na površinu vode, a oni veće gustoće se talože na dno. Vodeni organizmi na taj način dolaze u doticaj s tipovima MP zavisno o ekološkoj niši koju zauzimaju u svome staništu (Ma i sur 2019). Položaj MP u vodenom mediju nije trajan jer ovisi o masi: čestice se s vremenom mogu degradirati na manje i tako prijeći u više slojeve vodenog stupca, ali i zbog prijanjanja mikroorganizama koji stvaraju biofilm poput bakterijskih kolonija ili mikroalgi, mogu potonuti dublje zbog veće gustoće (Kalčíková i sur. 2022). Uz sve navedeno, teško ih je pratiti u okolišu jer pasivno mijenjaju svoj položaj ovisno o gibanjima vodenog toka, a i mogu se taloženjem ugraditi u sediment (Huang i sur. 2020).

Najveći postotak MP građen je od PS i PE koji su dokazano sveprisutni i gustoće koja približno odgovara gustoći vode (0,92 do 1,04 g/cm<sup>3</sup>) pa iz tog razloga plutaju na površini i često su u izravnom kontaktu sa slatkovodnim biljkama, posebice slobodnoplivajućim biljkama na površini vode poput vodene leće (rod *Lemna*) i nepačke (rod *Salvinia*) (Ceschin i sur. 2016, Xiao i sur. 2022). PS i kopolimerni spojevi koji ga sadrže koriste se u građevinarstvu kao toplinska i električna izolacija, za pakiranje proizvoda i naširoko se upotrebljavaju za svakodnevne predmete koji služe za jednokratno korištenje poput higijenskih i kozmetičkih potrepština (npr. britvice, gelovi za tuširanje i piling kože), pribora za jelo, u industriji igračaka, namještaja, bijele tehnike, itd. (Scudo

i sur. 2017). PS se najčešće i koristi u eksperimentima s MP, međutim, u obliku sfere koja nije toliko zastupljena u prirodnom okruženju (Wong i sur. 2020). Recentnija istraživanja zbog toga nastoje uključiti raznovrsnije oblike, dimenzije i sastav MP u korištene materijale kako bi ostvarili realniju sliku interakcija s organizmima. Ponekad se koriste i čestice prirodnog porijekla poput kore drveta (npr. bukve) kao kontrola kako bi se jasnije razlučila razlika između umjetnih i organskih materijala (Scherer i sur. 2020).

## 2.2. SVOJSTVA MIKROPLASTIKE

Za provođenje eksperimenta s MP nužno je provesti mjerenje raspodjele tj. distribucije čestica kojom se određuje njihov raspon veličine u uzorku (Rozman i sur. 2021). Dimenzija MP (uglavnom promjer) se mjeri optičkim mikroskopom, laserskim difrakcijskim analizatorom i računalnim programima poput AxioVision v4.8.2 (Hidalgo-Ruz i sur. 2012). Za određivanje veličine MP ne postoji univerzalno pravilo jer mogu biti u potpunosti različitih oblika pa se zato moraju koristiti alternativni pristupi s računalnim programima ako je potrebno jer optička mikroskopija i difrakcijski analizatori nisu uvijek primjenjivi. Primjerice, dimenzije MP u obliku vlakana se jako međusobno razlikuju (duljina i širina) pa je pogrešno odrediti veličinu na temelju samo jedne dimenzije (Rozman i sur. 2021).

Odgovor organizama na izlaganje MP ovisi o njezinoj koncentraciji (Liu i sur. 2022, Yu i sur. 2022). Koncentracija MP se univerzalno izražava u mg/L, a rjeđe kao broj čestica/L. Standardno se koriste visoke koncentracije MP na kojima je prethodno potvrđen uočljiv odgovor organizama i niže koncentracije koje su prisutne u okolišnim uvjetima, tzv. ekološki relevantne koncentracije (Jemec Kokalj i sur. 2019, Kalčíková i sur. 2020, Xiao i sur. 2022). Često se za ispitivanje ekotoksičnosti koristi upravo granična koncentracija od 100 mg/L MP jer je preporučena od strane međunarodne organizacije *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD) (Zong i sur. 2021). Prema Pivokonsky i sur. (2018) ta koncentracija je čak 2,5 puta veća od realne najveće koncentracije izmjerene u slatkovodnim jezerima. Visoke koncentracije omogućuju proučavanje fizikalnih mehanizama i procesa koji bi se hipotetski odvijali ako se u budućnosti nastave trendovi onečišćenja okoliša s MP. Za promatranje učinaka prethodno opisanih procijednih

voda MP (koje sadrže isprane aditive) također se koriste odgovarajuće koncentracije kao i za MP (Rozman i sur. 2021).

Jedan od značajnih parametara za proučavanje MP je i tzv. specifična površina koja je relevantna za učinkovitost prijanjanja za podlogu, a uglavnom se određuje Brunauer–Emmett–Tellerovom (BET) metodom (Rozman i sur. 2021). Ona podrazumijeva mjerenje volumena inertnog plina, u pravilu dušika, koji se veže za površinu uzorka koja je izložena za vezanje. U početku se pretpostavljalo da čestice MP imaju veliku specifičnu površinu, s obzirom na to da su malih dimenzija, a s lakoćom mogu prionuti na podlogu i apsorbirati dodane aditive. Ali, materijali s velikom specifičnom površinom su većinom porozni, tj. imaju i veliku unutarnju površinu, međutim, to nije svojstvo polimera poput MP, osim ako nisu ciljano industrijski napravljeni (Rozman i sur. 2021). Prijanjanje i apsorpcija MP su zato vjerojatnije povezane s kemijskim i fizikalnim svojstvima, primjerice sastavom, oblikom, teksturom i nabojem.

### 3. EKSPERIMENTALNE BILJNE VRSTE

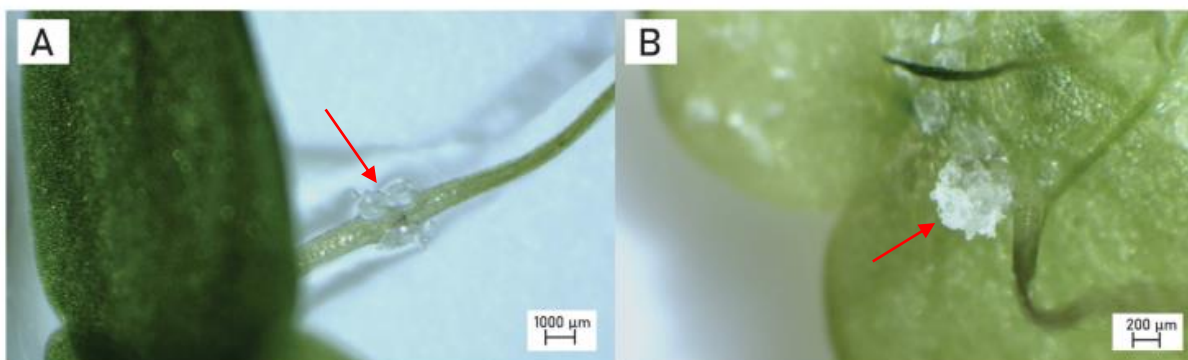
Pleustofiti su vodene biljke koje slobodno plutaju na vodenoj površini te im je abaksijalna strana listova direktno izložena vodenoj površini, kao i korijenje. Najpoznatija porodica pleustofita je Lemnaceae, odnosno vodene leće koje karakterizira maleni vegetativni habitus. Vodene leće su vrlo široko upotrebljavani modelni organizmi zbog jednostavne manipulacije, brzog vegetativnog razmnožavanja i lake dostupnosti jer su kozmopolitski rasprostranjene (Rozman i Kalčíková 2022). Vrsta vodene leće *Lemna minor* pokazala se kao jedan od najučinkovitijih makrofita za bioremedijaciju raznih izvora kontaminacije: teških metala, agrokemikalija u poljoprivredi, lijekova, higijenskih i kozmetičkih proizvoda itd. (Ekperusi i sur. 2019). Vrsta *Spirodela polyrhiza* (velika vodena leća) se također često koristi za testove fitotoksičnosti (Singh i sur. 2019) i bioremedijaciju (Cui i sur. 2020) jer ima brzu stopu razmnožavanja s relativno kratkim ciklusom rasta (Wang i sur. 2023). Za praćenje odgovora učinaka MP na veliku vodenu leću većinom se prati proliferacija jedinki vegetativnim razmnožavanjem (Uhram i sur. 2023).

Još neke slatkovodne vrste, koje se smatraju modelnim biljkama za istraživanje mikroplastike, su *Myriophyllum* sp., *Salvinia natans*, *Salvinia cucullata*, *Phragmites australis* i *Utricularia vulgaris*. *Myriophyllum* sp. (krocanj) je rod emergentnih vrsta koje su dijelom uronjene u vodeni medij, a povoljne su zbog svoje velike brzine rasta koja iznosi do čak 1,5 cm/dan pa su bilo kakve morfološke i fiziološke promjene brzo uočljive (Senavirathna i sur. 2022). Vrsta *S. natans* (plivajuća nepačka) upotrebljena je u eksperimentu koji su provodili Uhram i sur. (2023), a radi se o vrsti koja je poput vodene leće slobodno plutajuća. Za razliku od praćenja odgovora kod vodene leće, rast plivajuće nepačke je učinkovitije pratiti prema broju stabljika i listova. Vrsta *S. cucullata* raste na raznolikim staništima, vrlo je tolerantna na organsko zagađenje okoliša, lako se uzgaja i brzo razmnožava (Yu i sur. 2021). Vrsta *P. australis* (obična trska) je široko rasprostranjena, emergentna biljka koja se isto često upotrebljava za testiranje fitotoksičnosti (Song i sur. 2018), a njeno lišće se nalazi izvan vode te je na njoj kao i kod krocnja moguće pratiti dvostruki odgovor: na dijelove koji se nalaze ispod i iznad površine vode. Vrsta *U. vulgaris* (obična mješinka) je kozmopolitska, višegodišnja biljka mesožderka koja je specifična po mjehurićima koji joj služe kao zamka za praživotinje. Za nju je karakteristično da ne posjeduje korijen, već sve hranjive tvari prima razgradnjom uhvaćenog plijena te je zbog toga pogodna za proučavanje djelovanja MP jer se tako izravno može pratiti njezina ingestija (Yu i sur. 2020).

## 4. INTERAKCIJA SLATKOVODNIH BILJAKA I MIKROPLASTIKE

Izbor biljne vrste pogodne za istraživanje utjecaja MP ovisi o cilju istraživanja. Neki od uobičajenih ciljeva su opsežno proučavanje djelovanja MP na fiziološko stanje biljke, mogućnost unošenja MP unutar tkiva, ispitivanje sposobnosti biljaka da zadrže čestice MP na dijelovima svog habitusa (većinom listovi i plutajuće korijenje), što je pogodno za bioremedijaciju kao što je prikazano na slici 3., korištenje biljaka za signalizaciju onečišćenja kao bioindikatori itd.

U prirodnim uvjetima, slatkovodne biljke formiraju agregate, npr. slojeve obraštaja i livade, koje su usko povezane s nakupljanjem kontaminanata uključujući MP (Dahl i sur. 2021, Huang i sur. 2021). MP je u velikoj mjeri akumulirana u zatvorenim vodenim staništima u kojima protok vode nije značajno izražen pa se zato slatkovodne biljke koje rastu u njima mogu koristiti strateški za izravno uklanjanje *in situ* (Zhang i sur. 2015, Di i Wang 2018). Međutim, takva žarišta akumulacije MP mogu predstavljati izazov za slatkovodne biljke jer vrlo visoke koncentracije MP nepovoljno utječu na njihovu stopu rasta i fiziologiju (van Weert i sur. 2019, Yu i sur. 2022).



Slika 3. Prianjanje sferične polistirenske mikroplastike (PS-MP, označene crvenim strelicama) na korijen (A) i list (B) vrste *Lemna minor*. Preuzeto iz Rozman i sur. (2022).

## 4.1. SLATKOVODNE BILJKE KAO BIOINDIKATORI KONTAMINACIJE

Primarno se slatkovodne biljke mogu koristiti kao bioindikatori, a pogodnim modelima za to ih čini ispunjavanje nekoliko uvjeta: akumuliraju visoku koncentraciju kontaminanata, široko su rasprostranjene vrste s velikom gustoćom populacija te su sesilne, što znači da su realna reprezentacija lokalnog stanja populacije (Zhou i sur. 2008). Slatkovodne biljke su autotrofni predstavnici bazalnih dijelova hranidbenih lanaca, a to nije slučaj s mnogobrojnim životinjskim vrstama kao što su ribe i beskralješnjaci koje, budući da žive na višim trofičkim razinama, akumuliraju manju količinu MP, a aktivnim metabolizmom ih brzo izlučuju iz organizma. Nadalje, ove vrste zbog pokretljivosti vlastitog mišićnog sustava ili kretanja pod utjecajem vodenog toka nemaju stalan prostorni položaj pa nisu povoljne za lokalizaciju izvora onečišćenja (Woods i sur. 2018). Interesantno je spomenuti nedavno otkriće Fogašová i sur. (2022) da se MP može akumulirati i u kopnenim biljkama u tzv. fitotelmatima (biljne šupljine s vodenim mikrosustavom) češljugovine roda *Dipsacus* mogućim posredstvom životinja koje mogu kontaminirati biljke tjelesnim izlučevinama ili fizičkim dodiranjem pa se pretpostavka da zadržane čestice predstavljaju blizak izvor kontaminacije MP treba uzeti uz oprez. Pogotovo se to odnosi na slatkovodne biljke koje služe kao sklonište životinjama koje su sposobne prijeći velike udaljenosti poput riba, ali i beskralješnjaka (npr. puževa), vodozemaca i ptica koje mogu prenijeti MP ne samo iz drugih vodnih tijela, već i s kopna.

## 4.2. PRIANJANJE MIKROPLASTIKE NA DIJELOVE BILJKE I BIOREMEDIJACIJA

Bioremedijacija je proces u kojem se koriste živi organizmi (mikroorganizmi, alge i biljke) za uklanjanje onečišćenja u okolišu. Glavni preduvjet za bioremedijaciju sa slatkovodnim biljkama je tzv. fitostabilizacija koja podrazumijeva vezanje i stabilizaciju čestica tako da se adsorbiraju na vegetativne dijelove (listove i korijenje) (Rezania i sur. 2016). Proces prianjanja još nije u potpunosti razjašnjen, ali se razmatra nekoliko mogućih mehanizama. Jedan od njih podrazumijeva djelovanje elektrostatičkih sila, što je posljedica celulozne građe stijenki biljnih stanica koje su

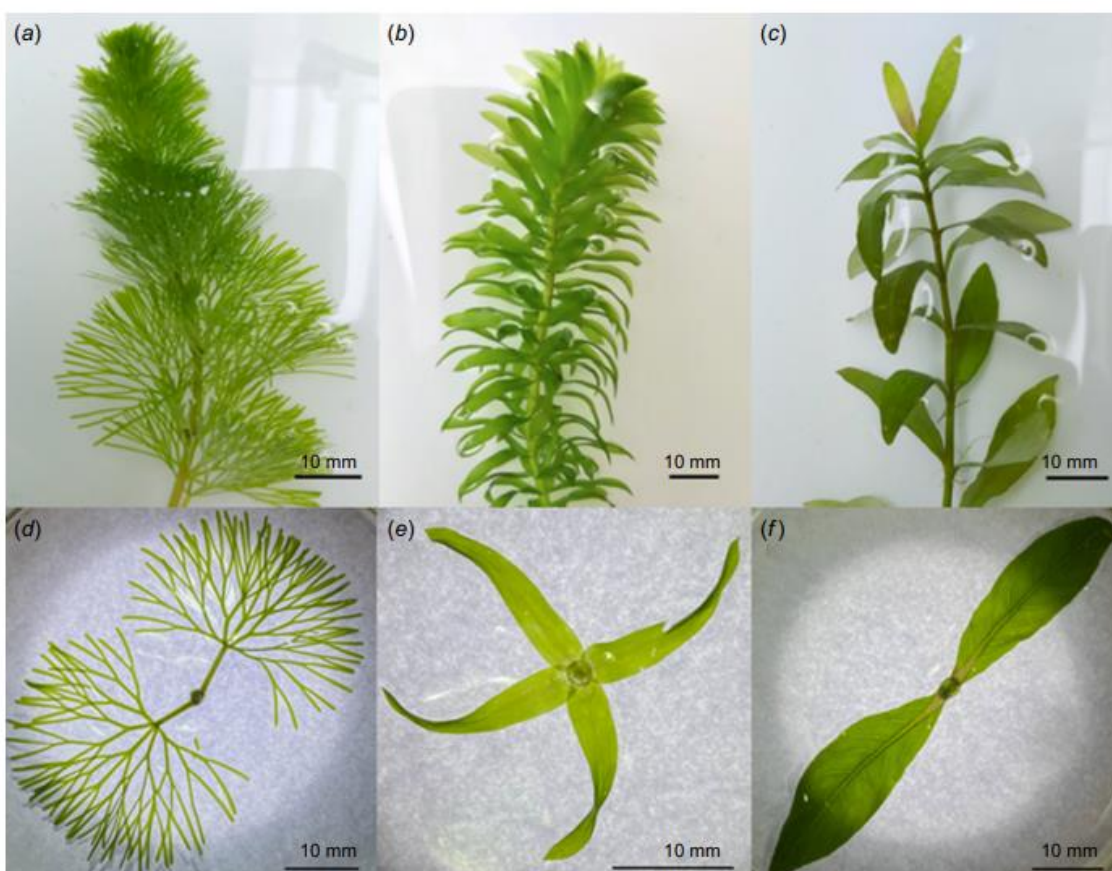


negativno nabijene što uzrokuje privlačenje MP, pogotovo ako je pozitivno nabijena. Ustanovljeno je da se sferična PS-MP adherira u desetak puta većoj količini u odnosu na ostale korištene oblike MP (Kalčíková i sur. 2017, Rozman i Kalčíková 2022). S druge strane, MP u obliku vlakana (tekstilnog sastava) i kora dreveta koja se koristi kao eksperimentalna kontrola su isto negativnog naboja zbog celulozne građe pa ne prijanjanju na biljna tkiva i ne uzrokuju njihova oštećenja. (Rozman i Kalčíková 2022). Slično je dokazano i ispitivanjem učinka dijelova istrošene gume koja je negativno nabijena zbog preuzimanja viška elektrona tijekom kontakta gume i ceste za vrijeme vožnje (Rozman i Kalčíková 2022).

Prianjanje MP je prvenstveno moguće zbog biljnih površina (listovi, stabljika, korijen) dostupnih za zadržavanje, pri čemu glavnu ulogu ima morfologija vrste: što je složenija (razgranatija) struktura habitusa biljke, učinkovitije će zadržavati čestice MP zapetljavanjem (Mateos-Cárdenas i sur. 2021, Savio i sur. 2022). Neki od primjera razgranatih struktura su dlake stanica smeđih algi (Gutow i sur. 2016, Sundbæk i sur. 2018), korijenje slobodnoplutajućih biljaka (Kalčíková i sur. 2017, Yu i sur. 2021), abaksijalna (donja) površina listova (Mateos-Cárdenas i sur. 2019, Dovidat i sur. 2020) i složeno građeni talusi makrofitnih algi (Gutow i sur. 2016), a Yuan i sur. (2019) su uočili i da površine spora i ovojnice sjemenki mogu na sebe vezati MP. Mehanizmi koji omogućuju zadržavanje MP na navedenim strukturama i sprječavaju da dođe do njihove ponovne resuspenzije su promjene u turbulenciji vode smanjenjem protoka, što znači da manji volumeni vode neometano prolaze među biljnim strukturama (Hendriks i sur. 2010), te gubitak momenta sile koji je uzrokovan fizičkim sudarima između čestica MP i gore navedenih biljnih struktura (Hendriks i sur. 2008). Prema tome, slatkovodne biljke su ključne za usporavanje protoka (fluksa) MP u vodenom toku. Štoviše, nedavna terenska studija (Huang i sur. 2023) pokazala je da se tri puta više čestica MP zadržava na područjima s vegetacijom, nego na neobraslim područjima, s time da je procijenjeno da je prosječni omjer MP koji se zadržao između biotičke i abiotičke frakcije 2193:1.

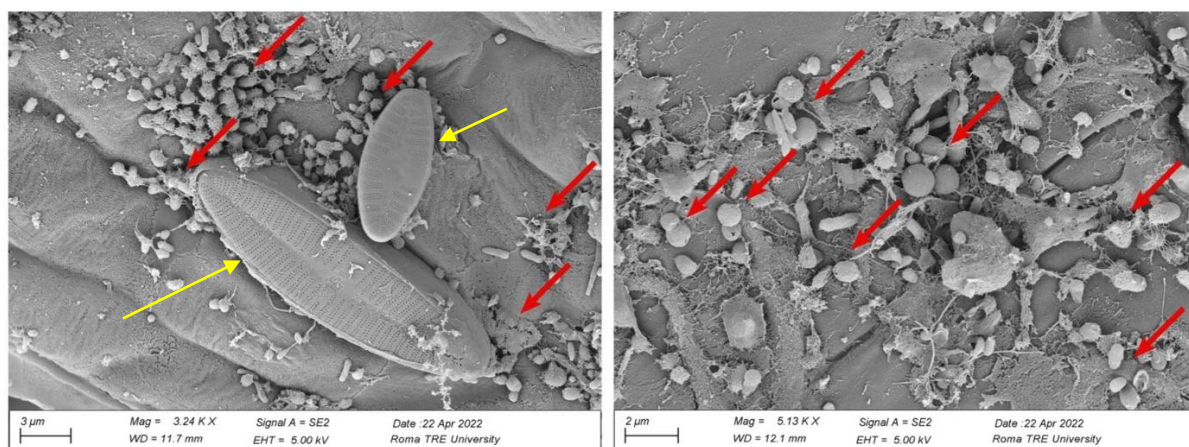
U recentnijem istraživanju kojeg su proveli Joel i sur. (2023), gdje je uspoređivana učinkovitost triju slatkovodnih biljaka (*Cabomba caroliniana*, *Egeria densa* i *Hygrophila polysperma*) da uhvate čestice MP poliamidnog sastava prosječne veličine oko 900  $\mu\text{m}$ , uočeno je da je najveći postotak MP u eksperimentalnim posudama zadržan na listovima vrste *C. caroliniana* (39,3%) koja ima najslabiju morfologiju s diseciranim listovima, a najmanje na listovima vrste *H. polysperma* (17,6%), koja ima nerazgranjene lancelaste listove, kako je prikazano na slici 4. Također, osim

stupnja razgranatosti listova, vidljiva je i povezanost udaljenosti nodija, odnosno duljine internodija, s dobivenim rezultatom: dulji internodiji smanjuju brojnost površina za hvatanje MP (slika 4.). Isto vrijedi i za raspored pršljenova listova: spiralni raspored u vrsti *C. caroliniana* učinkovitije zadržava MP od nasuprotnog rasporeda u vrsti *H. polysperma*, što su potvrdili i Rovira i sur. (2016). Slabije uočljive karakteristike koje isto mogu igrati ulogu u vezanju MP su i mikrostrukture lisne površine, kao lisni trihomi na rubovima listova u vrsti *C. caroliniana*, jednostanične bodlje i nazubljeni rubovi listova u vrsti *E. densa* te prstenovi dlaka u vrsti *H. polysperma*, koji povećavaju hrapavost lisne površine i služe kao fizička barijera. Sukladno tome, biljke koje imaju mrežastu strukturu pogodnije su za praćenje stanja kontaminacije u okolišu kao bioindikatori, ali i za iskorištavanje u svrhu bioremedijacije zadržavanjem čestica MP.



Slika 4. Usporedba morfologije habitusa i nodija vrsta: a,d - *Cabomba caroliniana*, b,e - *Egeria densa*, c,f - *Hygrophila polysperma*. Preuzeto iz Joel i sur. (2023).

Dodatno, ako na površini biljke postoji tzv. perifitonski sloj, koji je većinski sastavljen od mikroorganizama koji stvaraju viskozne ljepljive izlučevine, MP se snažnije veže za biljku (Goss i sur. 2018). Nakon vezanja MP olakšano je vezanje drugih organizama poput mikroalgi kao što je prikazano na slici 5. Njihova prisutnost može dodatno negativno povećati toksični učinak MP, pogotovo ako prekriju veće površine biljnog tkiva ili izlučuju toksične tvari (Ceschin i sur. 2023).



Slika 5. Perifitonski sloj s penatnim dijatomejama (žute strelice) na koji su zalijepljene čestice MP (crvene strelice) s abaksijalne strane lista vrste *Lemna minor*. Preuzeto iz rada Ceschin i sur. (2023).

S obzirom na sve navedeno, čestice MP mogu prionuti na biljke slabije i snažnije, ovisno jesu li povezane samo elektrostatskim interakcijama za samu površinu biljke ili na druge čestice MP koje su povezane ili su direktno fizički zalijepljene na površinu. Ako su slabije adherirane mogu se lagano ukloniti ispiranjem, a ako su snažnije, moguće ih je odvojiti samo digestijom biljnog tkiva. U pravilu puno više čestica MP je slabije adherirano na površinu i lako se ispiru (Rozman i sur. 2022). U nekoliko provedenih istraživanja primjećeno je da izravan utjecaj na snagu prijanjanja MP ima njezina površina: MP u obliku sfere glatkih rubova većinom slabije prijanjaju od onih s oštrim rubovima. Osim toga, uočeno je da sferični oblici lakše prijanjaju na listove, a nanoplastika, koja je manjih dimenzija od MP, na korijenje. Pretpostavlja se da je to zbog glatke površine listova dostupne za interakciju, odnosno mnogobrojnih šupljina između korjenčića koje mogu zadržavati čestice (Sundbæk i sur. 2018, Mateos-Cárdenas i sur. 2019, Dovidat i sur. 2020, Li i sur. 2020, Rozman i sur. 2022). Trenutačno se uglavnom koristi mikroskopsko promatranje za procjenu prijanjanja MP-a na površinu biljaka.

Pleustofiti su izrazito učinkoviti za zadržavanje MP, što ih čini korisnim za proces bioremedijacije (Kalčíková i sur. 2017). Prednost tzv. bioremedijacije je uklanjanje izvora kontaminacije u što kraćem roku, prije nego što se transportira dalje u druga staništa, u ovom slučaju u more. Dokazano je da mnogi mikroorganizmi poput bakterija (rodovi *Bacillus* sp. i *Paenibacillus* sp.) mogu djelomično razgraditi MP (Park i Kim 2019), međutim, one nisu prirodno prisutne u slobodnom stupcu vode slatkih voda i zahtjevaju specifične uvjete za proliferaciju. Štoviše, degradacija MP bakterijama i dalje je vrlo spori proces koji za posljedicu može imati nastanak nanoplastike, koja također uzrokuje neželjene toksične učinke na organizme, jer zbog još manjih dimenzija može biti apsorbirana u vaskularni sustav biljaka (Jaiswal i sur. 2022).

## 5. UČINCI MIKROPLASTIKE NA VODENE BILJKE

Učinci MP na slatkovodne biljke posljedica su njenog djelovanja na podlogu na kojoj biljka raste ili na vodeni medij u koji je biljka uronjena, a iz kojeg preuzima hranjive tvari i vodu te prianjanja na površinu i apsorpcije unutar biljke (Dovidat i sur. 2020, Lozano i Rillig 2020). MP može izazvati morfološke ili fiziološke odgovore (Mateos-Cárdenas i sur. 2019), a jačina odgovora ovisna je o biljnoj vrsti i svojstvima MP (Horton i sur. 2017). Prema provedenim istraživanjima, najčešći fitotoksični učinci na slatkovodne biljke su inhibicija rasta korijena i izdanka i smanjenje stope fotosinteze što utječe na koncentraciju metabolita, a vjerojatno su uzrokovani fizičkom blokadom MP na fotosintetskim tkivima s vanjske strane biljaka čime se smanjuje intenzitet svjetlosti i onemogućuje respiracija (Kalčíková i sur. 2017, Mateos-Cárdenas i sur. 2019). Uz to, Hwang i sur. (2020) su izvijestili da čestice MP koje su manje od 1,5  $\mu\text{m}$  u promjeru mogu prodrijeti u animalna tkiva te uzrokovati bioakumulaciju pa je stoga i još jedno od pitanja kakav je odnos veličine čestica MP i biljnih tkiva.

### 5.1. UTJECAJ OBLIKA I ADITIVA

Rozman i sur. (2021) su istraživali utjecaj nekoliko tipova MP (sferična PS zrnca, tekstilna vlakna, komadići rabljene gume, industrijski bakelit, komadići PET boce i film PE vrećica) i njihovih ispranih aditiva (plastifikatori, antioksidansi, usporivači gorenja) na vodenu leću *L. minor*. Utvrdili su da MP oštih rubova i hrapave površine uzrokuje inhibiciju rasta korijena, ali nijedan tip MP nije utjecao na specifičnu brzinu rasta i količinu klorofila *a*. Najveći toksičan utjecaj na leću pokazala je MP od bakelita (industrijski abraziv), kao i njezini aditivi (heksametilentetramin i fenol) koji su se intenzivno ispirali s površine čestica MP. Bakelitna MP je smanjila rast korijena prosječno za čak 40 % u usporedbi s kontrolom, a inhibicija je bila vidljiva i u tretmanima s PS mikrozrcima (17 %) i fragmentima automobilske gume (37 %), koji su imali nepravilne rubove. S druge strane, aditivi bakelita su imali identičan učinak kao i bakelitna MP, inhibirajući rast korijena za 40 %. Drugim riječima, MP može imati dvostruki učinak na biljke, uzrokujući mehanička oštećenja biljnih tkiva i organa svojom tvrdoćom ili djelovanjem toksičnih kemikalija koje se dodaju kao aditivi, što sprječava optimalni rast i razvoj biljaka. Slično je uočeno i u kasnijem istraživanju Rozman i Kalčíková (2022) korištenjem sferične PE-MP. S druge strane, prirodne čestice (kora drveta) koje su se koristile kao kontrola nemaju negativan utjecaj na

slatkovodne biljke zbog svoje mekoće pa ne mogu prouzrokovati mehanički stres, a građene su od biljnog materijala pa ne djeluju kemotoksično (Rozman i sur. 2021). Uz to, ako na MP prijanjaju mikroorganizmi koji stvaraju biofilm (npr. bakterije), on može prekriti oštre rubove MP i tako ublažiti mehanička oštećenja (Jemec Kokalj i sur. 2019).

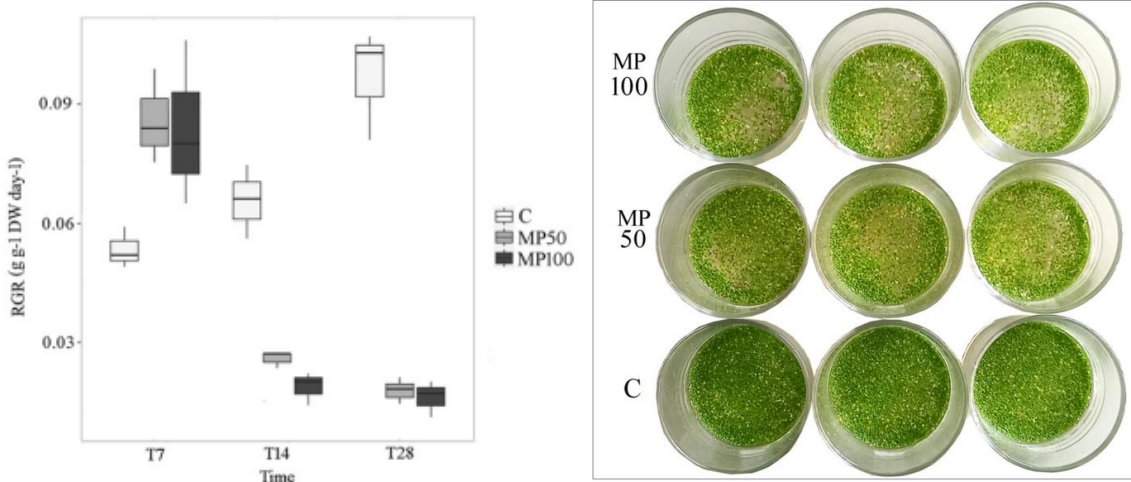
Naposljetku, znakovito je spomenuti i moguće sinergističko (zajedničko) negativno djelovanje kombinacije kontaminanata, kao što je predstavljeno u radu Yu i sur. (2021) u kojem je praćen učinak glifosata koji je globalno raširen herbicid i PS-MP koja je označena fluorescentnom probom (objašnjeno u potpoglavlju 5.5.) na vrstu *S. cucullata*. Toksični učinci MP u toj studiji su bili ograničeni na inhibiciju relativne stope rasta i aktivnosti korijena, međutim, u sinergiji s glifosatom došlo je do pojave aktivacije antioksidacijskih enzima: superoksid dismutaze, askorbatne peroksidaze i katalaze, što je direktni pokazatelj oksidacijskog stresa. Pri višim zajedničkim koncentracijama obje vrste tvari (15 mg/L glifosata i 25 mg/L MP) uočena je kloroza (žućenje) listova, što je posljedica smanjene stope fotosinteze. Ovakvo saznanje dodatno naglašava važnost odgovornog korištenja herbicida u poljoprivredi, ali i zabrinjava s činjenicom da je nedostavno pratiti učinak MP individualno, neovisno od drugim faktorima onečišćenja.

## 5.2. UTJECAJ PRIANJANJA

MP može smanjiti stopu fotosinteze i respiracije, a time sekundarno i produkciju metabolita, fizičkim blokiranjem aktivnog fotosintetskog tkiva, tako da prijanjaju na površinu lišća. Yu i sur. (2020) su pretpostavili da je upravo zasjenjenje PS-MP fotosintetskih tkiva biljke *U. vulgaris* bio uzrok smanjene količine klorofila *a* i drugih fotosintetskih pigmenata te proteina koji su ključni za provođenje fotosinteze. Do identičnog zaključka su došli Wang i sur. (2023) proučavajući učinak PVC-MP na vrstu *S. polyrhiza* koji su dokazali da je visoka koncentracija (1000 mg/L) smanjila stopu adventivnog izduživanja korijena za otprilike 42 % i stopu umnožavanja listova za 61 %. Nedostatna površina listova je umanjila stopu fotosinteze, što je rezultiralo smanjenjem sadržaja antocijana (64 %) i dušika (84 %) u odnosu na kontrolu.

### 5.3. UTJECAJ VREMENA IZLAGANJA

Toksičan učinak MP ovisi i o vremenu izlaganja biljaka tretmanima određenih koncentracija MP te simptomi mogu biti akutni i kronični. Većina provedenih istraživanja bazirala se na akutnim simptomima biljaka jer je trajanje eksperimenta bilo nekoliko dana, u pravilu tjedan dana. Ceschin i sur. (2023) istaknuli su važnost i potrebu da se učinci MP promatraju tijekom duljeg razdoblja, pogotovo u svrhu ispitivanja biljaka predisponiranih za bioremedijaciju. Oni su analizirali učinke dvije koncentracije (50, 100 mg/L) poli(stiren-ko-metil metakrilatne) MP na vrstu *Lemna minuta* tijekom 4 tjedna te su uočili da su simptomi toksičnog utjecaja bili jače izraženi što je period izlaganja dulje trajao. Naime, zabilježena je značajno smanjena količina biomase i sadržaja ukupnog klorofila nakon 4. tjedna, kao što je vidljivo na slici 6., dok se pri tome duljina korijena povećala u tretmanima s obje koncentracije u usporedbi s kontrolom i do 85 %.



Slika 6. Ovisnost relativne stope rasta (*relative growth rate*, RGR) vrste *Lemna minor*, izražene kao omjer suhe tvari (*dry weight*, DW) ukupne biomase po danu, o trajanju izlaganja poli(stiren-ko-metil metakrilatne) MP različitih koncentracija – kontrola (C), 50 mg/L (MP50), 100 mg/L (MP100) (lijevo) i morfološko stanje triju replikanata nakon 4. tjedna izlaganja (desno).

Unatoč prethodnoj studiji (Kalčíková i sur. 2017) na istoj vrsti biljke gdje se duljina korijena smanjila, produljenje korijena je vjerojatno bila posljedica dugotrajnog izlaganja MP, što može značiti da se *L. minor* sposobna aklimatizirati kako bi rastom korijena dosegla dublje dijelove



vodenog stupca koji nisu kontaminirani s MP i učinkovitije apsorbirala hranjive tvari. Dodatno, parametri oksidacijskog stresa nisu se mijenjali u odnosu na kontrolu, što je pokazatelj da se MP nije apsorbirala unutar tijela vodene leće jer bi u protivnom uzrokovala oštećenja tkiva. *L. minor* se zato može smatrati modelnom vrstom za bioremedijaciju, a to je potvrdilo i prethodno istraživanje Rozman i sur. (2022) u kojem se koristila PE-MP. Rezultati su pokazali da se *L. minor* prilagodila koncentraciji MP od 100 mg/L u periodu od 8 tjedana, nakon čega se učinak inhibicije rasta korijena smanjio do kraja eksperimenta (12. tjedna). Osim na korijen, MP nije djelovala na druge fiziološke i morfološke parametre nakon 1. tjedna u kojem su aktivnost respiracijskog sustava i količina proteina bile povećane, a to se isto može pripisati periodu potrebnom da se biljka aklimatizira na MP.

## 5.4. UTJECAJ KONCENTRACIJE

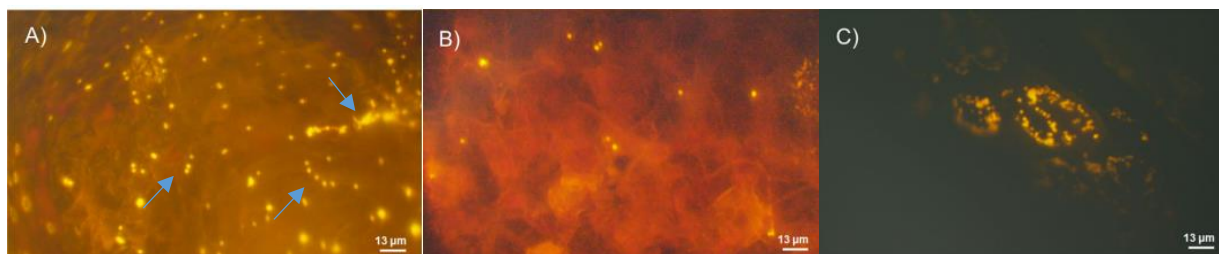
Prema Senavirathna i sur. (2022) čak i različiti dijelovi slatkovodnih biljaka drugačije mogu reagirati na istu koncentraciju MP, a jačina odgovora biljke i porast koncentracije MP nisu nužno linearno proporcionalni. U tom istraživanju upotrebljena je vrsta iz roda krocanj i PS-MP koncentracija 0,05, 0,25, 1,25 i 6 mg/L. Za praćenje oksidacijskog stresa može se mjeriti i omjer  $F_v/F_m$  koji predstavlja odnos između fluorescencije klorofila *a* unutar fotosistema II i maksimalne fluorescencije nakon adaptacije na tamu. Vrijednosti  $F_v/F_m$  niže od 0,8 se smatraju pokazateljem oksidativnog stresa i u takvim uvjetima fotosistem II ne funkcionira normalno (Baker i Oxborough, 2004). Najznačajnije promjene, kao što su nizak omjer  $F_v/F_m$ , najveći sadržaj vodikovog peroksida i antocijana te aktivnost antioksidacijskih enzima katalaze i askorbatne peroksidaze, bile su izmjerene nakon izlaganja MP koncentracija od 1,25 i 6 mg/L, međutim, bile su izraženije pri koncentraciji od 1,25 mg/L. Parametri koji su se najviše razlikovali između podvodnog i nadvodnog dijela biljke bili su sadržaj klorofila *a* i *b*, karotenoida i antocijana. U nadvodnim dijelovima se količina pigmenta povećavala s koncentracijom MP, ali se omjer klorofila *a* i *b*, koji je važan za fotosintezu, smanjivao, dok je u podvodnom dijelu smanjena količina klorofila *b* pri najvišoj koncentraciji MP, ali ostali parametri nisu bili proporcionalni s koncentracijom MP. Duljina korijena se značajno povećala pri koncentraciji MP od 1,25 mg/L u usporedbi s rezultatima izlaganja drugim koncentracijama, a zatim smanjila pri koncentraciji od 6 mg/L. Objašnjenje ovih



pojava leži u činjenici da se MP apsorbira putem korijena u podvodnom, zreom dijelu biljke, ali akumulira se prvenstveno u njegovim rastućim nadvodnim dijelovima pa stoga različiti dijelovi biljke nemaju isti fiziološki odgovor. Povezano s time, biljka se može nalaziti u različitim fiziološkim stanjima (Senavirathna i sur. 2020), na primjer u obrambenom stanju stresa pa ne reagira na jednaki način na isti tip podražaja.

## 5.5. UTJECAJ MIKROPLASTIKE S FLOURESCENTNIM PROBAMA

Fluorescentne probe su molekule koje apsorbiraju svjetlost određene valne duljine i emitiraju svjetlost duže valne duljine od one koja se apsorbirala, a može se detektirati fluorescencijskim mikroskopom. Eksperimenti koji koriste MP koja je označena fluorescentnom probom (FMP), nepobitno mogu dokazati njezinu prisutnost na površini i unutar biljnih tkiva. Njihov značaj je u tome što se može uspostaviti izravna korelacija između koncentracije FMP i fitotoksičnog odgovora modelne biljke. U novijem istraživanju Uhram i sur. (2023) su koristili ružičasto-narančastu, fluorescentno označenu PS-MP (PS-FMP) (PS-FMP;  $\lambda_{\text{ekscitacije}}$  543 nm, 603 nm), veličine 1  $\mu\text{m}$ . Kao razlog korištenja PS-MP osim većih koncentracija u okolišu i olakšanog prijanjanja na slatkovodne biljke, kako je opisano u prethodnom poglavlju, naveli su i njezinu fitotoksičnost (Dong i sur. 2020). U eksperimentu su se koristile dvije suspenzije PS-FMP (0,1 % i 0,01 %), razrijeđene s destiliranom vodom. Kako bi učinkovito usporedili učinak na slatkovodne biljke koristili su tri vrste različite morfologije: *S. polyrhiza*, *S. natans* i *P. australis*. Aktivan unos PS-FMP potvrđen je detekcijom laserom, a fotografije su dobivene konfokalnom i optičkom mikroskopijom mjerenjem specifičnog spektra fluorescencije PS-FMP (450 – 630 nm) (slika 7.).



Slika 7. Fotografije tkiva listova s uklonjenom epidermom, snimljene nakon 3 tjedna tretmana s fluorescentno obilježenom PS-MP (PS-FMP) suspenzijom (0,1% razrjeđenje s destiliranom vodom), pri valnoj duljini 603 nm, PS-FMP mikroznrca su označena ružičasto-narančastom bojom, plave strelice označavaju mjesta akumulacije PS-FMP (nastavak u tekstu), A – *Spirodela polyrhiza*, B – *Salvinia natans*, C – *Phragmites australis*

Ustanovili su da su vrste *S. polyrhiza* i *P. australis* pokazale značajno smanjenu biomasu, a vrsta *S. polyrhiza* i smanjen sadržaj ukupnog klorofila i stopu aseksualne reprodukcije, pri većoj koncentraciji PS-FMP (0,1%), dok nije bilo vidljivog toksičnog učinka na vrstu *S. natans*. Najvjerojatniji razlog snažnijeg toksičnog učinka PS-FMP na vrstu *S. polyrhiza* je fizičko blokiranje žilne vaskulature, a to se može vizualno objasniti nakupljanjem velike količine PS-FMP koja je na nekim mjestima linearnog rasporeda (slika 7. A, plave strelice). U biljci *S. natans* PS-FMP je pronađena u tkivu listova pri višoj koncentraciji (0, 1%) u maloj količini (nekoliko čestica FMP) kao što je vidljivo na slici 7. B, dok je u listovima vrste *P. australis* koji su se nalazili iznad vode i nisu bili u izravnom kontaktu s PS-FMP, pronađena pri obje ispitane koncentracije (0,01% i 0,1%). Inhibicija rasta vrste *P. australis* je pak posljedica stvaranja klastera (nakupina) PS-FMP koji isto mogu blokirati vaskularni sustav i tako ometati unos i translokaciju hranjivih tvari. Yu i sur. (2020) su koristeći konfokalnu mikroskopiju također uočili akumulaciju PS-FMP označene zelenom fluorescentnom probom (PS-FMP;  $\lambda_{\text{ekscitacije}}$  488 nm,  $\lambda_{\text{emisije}}$  518 nm) u zamkama za lov kod biljke *U. vulgaris* (spomenuto u prethodnom potpoglavlju). Dakle, zahvaljujući direktnoj vizualizaciji može se odrediti točan položaj u biljci, koncentracija i prostorni raspored apsorbirane MP koju prethodno samo treba fluorescentno obilježiti i na temelju toga zaključiti kakva je ovisnost među promjenama u parametrima i kontaminacije s MP.

Unatoč navedenim prednostima korištenja fluorescentnih boja, one se mogu ispirati s površine MP i potencijalno doprinijeti toksičnim učincima MP poput ranije spomenutih kemijskih aditiva (potpoglavlje 5.1.). Međutim, fluorescentne boje se već dugo koriste u molekularnim metodama i još nije dokazano da uzrokuju toksične učinke zbog nedovoljno provedenih istraživanja, pogotovo u eksperimentima s MP. Jedino su Malafaia i sur. (2022) pretpostavili da je toksičnost PE-MP bila uzrokovana fluorescentnom bojom nilsko crvenilo (*nile red*) na punoglavce vrste *Physalaemus cuvieri*. Prema tome, nije sa sigurnošću potvrđeno da fluorescentne boje djeluju toksično na organizme, između ostalog, na slatkovodne biljke, ali tu mogućnost treba uzeti u obzir u eksperimentima s FMP.

## 7. ZAKLJUČAK

U okolišu u kojem organizmi, uključujući i čovjeka, dolaze u izravan doticaj s MP čije slobodne koncentracije nikad nisu bile veće, a zasigurno se neće smanjiti u bliskoj budućnosti, nužno je poznavati kakav je njihov međuodnos. Biljke su kao dominantna komponenta u biomasi (80 %), strukturni dijelovi biotopa, primarni proizvođači organskih tvari, a time i izvor hrane, neophodni dio ekusustava koji se ne smije zanemarivati ako se želi proučavati učinak onečišćenja nekome tvari. Većina istraživanja koja su se bavila ovom problematikom provedena su u laboratorijskim uvjetima i zato nije moguće dovesti potpuno relevantne zaključke kakav utjecaj ima MP na slatkovodne biljke i njihovu upotrebu kao bioindikatore i za bioremedijaciju ako se usporedno ne provedu i terenska istraživanja. Nejasno i je kako različiti tipovi, dimenzije i oblici MP utječu na određene vrste, ovisi li toksičan učinak samo o MP i dodanim aditivima ili o vremenu izlaganja i prilagođenosti vrste na stresne uvjete, što može biti uvjetovano raznim čimbenicima. Neminovno je, u svakom slučaju, da ako čestice MP imaju ikakav vidljiv učinak na slatkovodne biljke, da je on negativan za njihovo fiziološko stanje, uzrokujući stresne uvjete za rast i razvoj. Toksični učinci se potencijalno mogu i pojačati degradacijom MP na čestice nanoplastike (NP) koja se lakše može apsorbirati unutar biljnih tkiva, ali i sinergističkim djelovanjem drugih kontaminanata kao biljnih herbicida koji su isto prisutni u okolišu u visokim koncentracijama. U konačnici, intenzitet toksičnih učinaka koje MP ima na određenu vrstu bi mogao utjecati na njen opstanak: otporne vrste će biti u mogućnosti zauzeti nove ekološke niše i potisnuti vrste koje su osjetljivije na MP. Takve fluktuacije u brojnosti vrsta uvelike utječu na ravnotežu u ekosustavu i mogu dovesti do nepovratnih promjena (Horton i Barnes 2020). Kontradiktorni rezultati i zaključci koji se javljaju među malobrojnim istraživanjima o MP upućuju na potrebu da se znanstvenici nastave baviti ovom temom u svrhu uvođenja mjera za zaštitu okoliša, ali i poticanja javnosti na razvoj svijesti o ekološkoj održivosti.

## 8. LITERATURA

- Acosta-Coley, I., Duran-Izquierdo, M., Rodriguez-Cavallo, E., Mercado-Camargo, J., Mendez-Cuadro, D., Olivero-Verbel, J., 2019. Quantification of microplastics along the caribbean coastline of Colombia: pollution profile and biological effects on *Caenorhabditis elegans*. Mar. Pollut. Bull. 146, 574-583.
- Almroth, C.B., Eggert, H. 2019. Marine plastic pollution: Sources, impacts, and policy issues. Rev. Env. Econ. Policy 13, 317–326.
- Au, S.Y., Bruce, T.F., Bridges, W.C., Klaine, S.J. 2015. Responses of *Hyalella azteca* to acute and chronic microplastic exposures. Environ. Toxicol. Chem. 34 (11), 2564–2572.
- Azeem, I., Adeel, M., Ahmad, M.A., Shakoor, N., Jiangcuo, G.D., Azeem, K., Ishfaq, M., Shakoor, A., Ayaz, M., Xu, M. 2021. Uptake and accumulation of nano/microplastics in plants: A critical review. Nanomaterials 11, 2935.
- Baker N. R., Oxborough K. (2004): Chlorophyll fluorescence as a probe of photosynthetic productivity. U: Chlorophyll *a* fluorescence a signature of photosynthesis. Dordrecht, Springer, str. 66-79.
- Bretas Alvim, C., Mendoza-Roca, J.A., Bes-Piá, A. 2020. Wastewater treatment plant as microplastics release source – quantification and identification techniques. J. Environ. Manage. 255, 109739.
- Ceschin, S., Della Bella, V., Piccari, F., Abati, S. 2016. Colonization dynamics of the alien macrophyte *Lemna minuta* Kunth.: A case study from a semi-natural pond in Appia Antica Regional Park (Rome, Italy). Fundam. Appl. Limnol. 188, 93–101.
- Ceschin, S., Bellini, A., Scalici, M. 2021. Aquatic plants and ecotoxicological assessment in freshwater ecosystems: A review. Environ. Sci. Pollut. Res. 28, 4975–4988.
- Ceschin, S., Simona, Flaminia Mariani, Dario Di Lernia, Iole Venditti, Emanuele Pelella, Maria Adelaide Iannelli. 2023. Effects of microplastic contamination on the aquatic plant *Lemna minuta* (least duckweed). Plants 12, 1: 207.
- Cui, R., Nam, S.-H., An, Y.-J. 2020. *Salvinia natans*: a potential test species for ecotoxicity testing. Environ. Pollut. 267, 115650.
- Di, M., Wang, J. 2018. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China. Sci. Total Environ. 616–617, 1620–1627.
- Dong, C.-D., Chen, C.-W., Chen, Y.-C., Chen, H.-H., Lee, J.-S., Lin, C.-H. 2020. Polystyrene microplastic particles: *In vitro* pulmonary toxicity assessment. J. Hazard. Mater. 385, 121575.
- Dovidat, L.C., Brinkmann, B.W., Vijver, M.G., Bosker, T. 2020. Plastic particles adsorb to the roots of freshwater vascular plant *Spirodela polyrhiza* but do not impair growth. Limnol. Oceanogr. Lett. 5, 37–45.

- Ekperusi, A.O., Sikoki, F.D., Nwachukwu, E.O. 2019. Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective. *Chemosphere* 223, 285–309.
- Enfrin, M., Dumée, L.F., Lee, J. 2019. Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – origin, impact and potential solutions. *Water Res.* 161, 621–638.
- Fogašová, K., Manko, P., Oboňa, J., 2022. The first evidence of microplastics in plant-formed fresh-water micro-ecosystems: *Dipsacus* teasel phytotelmata in Slovakia contaminated with MPs. *BioRisk* 18, 133–143.
- Gasperi, J., Wright, S.L., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Kelly, F.J., Tassin, B. 2018. Microplastics in air: are we breathing it in? *Curr. Opin. Environ. Sci. Heal.* 1, 1–5.
- Goss, H., Jaskiel, J., Rotjan, R. 2018. *Thalassia testudinum* as a potential vector for incorporating microplastics into benthic marine food webs. *Mar. Pollut. Bull.* 135, 1085–1089.
- Guo, J.-J., Huang, X.-P., Xiang, L., Wang, Y.-Z., Li, Y.-W., Li, H., Cai, Q.-Y., Mo, C.-H., Wong, M.-H. 2020. Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environ. Int.* 137, 105263.
- Gutow, L., Eckerlebe, A., Giménez, L., Saborowski, R. 2016. Experimental evaluation of seaweeds as a vector for microplastics into marine food webs. *Environ. Sci. Technol.* 50, 915–923.
- Hartmann, N.B., Hüffer, T., Thompson R, C., Hassellöv, M., Verschoor, A.E., Dagaard, A., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M.P., Herrling, M.C., Hess, M.P., Ivleva, N.L., Lusher, A., Wagner, M. 2019. Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environ. Sci. Technol.* 53, 1039–1047.
- Hendriks, I.E., Sintes, T., Bouma, T.J., Duarte, C.M. 2008. Experimental assessment and modeling evaluation of the effects of the seagrass *Posidonia oceanica* on flow and particle trapping. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 356, 163–173.
- Hendriks, I.E., Bouma, T.J., Morris, E.P., Duarte, C.M. 2010. Effects of seagrasses and algae of the *Caulerpa* family on hydrodynamics and particle trapping rates. *Mar. Biol.* 157 (3), 473–481.
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R.C., Thiel, M. 2012. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environ. Sci. Technol.* 46, 3060–3075.
- Horton, A. i Barnes D. 2020. Microplastic pollution in a rapidly changing world: Implications for remote and vulnerable marine ecosystems. *Sci. Total Environ.*, 738, 140349.
- Horton, A.A., Walton, A., Spurgeon, D.J., Lahive, E., Svendsen, C. 2017. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Sci. Total Environ.* 586, 127–141.
- Huang, Y., Xiao, X., Xu, C., Perianen, Y.D., Hu, J., Holmer, M. 2020. Seagrass beds acting as a trap of microplastics-emerging hotspot in the coastal region? *Environ. Pollut.* 257, 113450.

- Huang, S., Peng, C., Wang, Z., Xiong, X., Bi, Y., Liu, Y., Li, D. 2021. Spatiotemporal distribution of microplastics in surface water, biofilms, and sediments in the world's largest drinking water diversion project. *Sci. Total Environ.* 789, 148001.
- Huang, S., Jiang, R., Craig, N. J., Deng, H., He, W., Li, J. Y., Su, L.. 2023. Accumulation and re-distribution of microplastics via aquatic plants and macroalgae - a review of field studies. *Mar. Environ. Res.* 187, 105951.
- Hwang, J., Choi, D., Han, S., Jung, S.Y., Choi, J., Hong, J. 2020. Potential toxicity of polystyrene microplastic particles. *Sci. Rep.* 10, 1–12.
- Jaiswal, K.K., Dutta, S., Banerjee, I., Pohrmen, C.B., Singh, R.K., Das, H.T., i sur. 2022. Impact of aquatic microplastics and nanoplastics pollution on ecological systems and sustainable remediation strategies of biodegradation and photodegradation. *Sci. Total Environ.* 806, 151358.
- Jemec Kokalj, A., Kuehnel, D., Puntar, B., Žgajnar Gotvajn, A., Kalčíkova, G. 2019. An exploratory ecotoxicity study of primary microplastics versus aged in natural waters and wastewaters. *Environ. Pollut.* 254, 112980.
- Joel, W. Q., Tan, Ray J., Tong, Z., Tang, Colin, Z. D., Lee, Clara, L. X., Yong, Peter, A. Todd. 2023. Leaf morphology affects microplastic entrapment efficiency in freshwater macrophytes. *Mar. Freshw. Res.* 74 (7), 641-650.
- Julienne, F., Delorme, N., Lagarde, F. 2019. From macroplastics to microplastics: role of water in the fragmentation of polyethylene. *Chemosphere* 236, 124409.
- Kalčíková, G., Žgajnar Gotvajn, A., Kladnik, A., Jemec, A. 2017. Impact of polyethylene microbeads on the floating freshwater plant duckweed *Lemna minor*. *Environ. Pollut.* 230, 1108–1115.
- Kalčíková, G. 2020. Aquatic vascular plants - A forgotten piece of nature in microplastic research. *Environ. Pollut.* 262, 114354.
- Lebreton, L., Andrady, A. 2019. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Commun.* 5, 1–11.
- Li, Z., Li, Q., Li, R. i sur. 2020. Physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to microplastic pollution. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 30306–30314.
- Li, B., Liang, W., Liu, Q.-X., Fu, S., Ma, C., Chen, Q., Su, L., Craig, N.J., Shi, H. 2021. Fish ingest microplastics unintentionally. *Env. Sci. Tech.* 55(15), 10471–10479.
- Lozano, Y.M., Rillig, M.C. 2020. Effects of microplastic fibers and drought on plant communities. *Environ. Sci. Technol.* 54, 6166– 6173.
- Ma, P., Wei Wang, M., Liu, H., Feng Chen, Y., Xia, J. 2019. Research on ecotoxicology of microplastics on freshwater aquatic organisms. *Env. Poll. Bioavailab.* 31, 131–137.

- Malafaia, G., da Luz, T.M., Ahmed, M.A.I., Karthi, S., da Costa Araújo, A.P. 2022. When toxicity of plastic particles comes from their fluorescent dye: a preliminary study involving neotropical *Physalaemus cuvieri* tadpoles and polyethylene microplastics. *J. Hazard. Mater.* 6, 100054.
- Mateos-Cárdenas, A., Scott, D.T., Seitmaganbetova, G., van P John, O.H., Marcel, A.K.J. 2019. Polyethylene microplastics adhere to *Lemna minor* (L.), yet have no effects on plant growth or feeding by *Gammarus duebeni* (Lillj.). *Sci. Total Environ.* 689, 413-421.
- Mateos-Cárdenas, A., van Pelt, F.N., O'Halloran, J., Jansen, M.A. 2021. Adsorption, uptake and toxicity of micro-and nanoplastics: Effects on terrestrial plants and aquatic macrophytes. *Environ. Pollut.* 284, 117183.
- Ockenden, A., Tremblay, L.A., Dikareva, N., Simon, K.S. 2021. Towards more ecologically relevant investigations of the impacts of microplastic pollution in freshwater ecosystems. *Sci. Total Environ.* 792, 148507.
- Park, S.Y., Kim, C.G. 2019. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. *Chemosphere* 222, 527–533.
- Pivokonsky, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T., Janda, V. 2018. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Sci. Total Environ.* 643, 1644–1651.
- Rezania, S., Taib, S.M., Md Din, M.F., Dahalan, F.A., Kamyab, H. 2016. Comprehensive review on phytotechnology: Heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *J. Hazard. Mater.* 318, 587–599.
- Rillig, M.C., Lehmann, A., de Souza Machado, A.A., Yang, G. 2019. Microplastic effects on plants. *New Phytol* 223, 1066–1070.
- Rochman, C.M. 2018. Microplastics research—from sink to source. *Sci.* 360, 28–29.
- Rovira, A., Alcaraz, C., Trobajo, R. 2016. Effects of plant architecture and water velocity on sediment retention by submerged macrophytes. *Freshw. Biol.* 61(5), 758–768.
- Rozman, U., Kalčíková, G. 2021. The first comprehensive study evaluating the ecotoxicity and biodegradability of water-soluble polymers used in personal care products and cosmetics. *Ecotox. and Env. Saf.* 228, 113016.
- Rozman, U., Kalčíková, G. 2022. Seeking for a perfect (non-spherical) microplastic particle – the most comprehensive review on microplastic laboratory research. *J. Hazard. Mater.* 424, 127529.
- Rozman, U., Turk, T., Skalar, T., Zupančič, M., Čelan Korošin, N., Marinšek, M. 2021. An extensive characterization of various environmentally relevant microplastics – material properties, leaching and ecotoxicity testing. *Sci. Total Environ.* 773, 145576.
- Rozman, U., Kokalj, A.J., Dolar, A., Drobne, D., Kalčíková, G. 2022. Long-term interactions between microplastics and floating macrophyte *Lemna minor*: The potential for phytoremediation of microplastics in the aquatic environment. *Sci. Total Environ.* 831, 154866.



- Savio, S., Farrotti, S., Di Giulio, A., De Santis, S., Ellwood, N.T.W., Ceschin, S., Congestri, R. 2022. Functionalization of frustules of the diatom *Staurosirella pinnata* for nickel (Ni) adsorption from contaminated aqueous solutions. *Front. Mar. Sci.* 9, 889832.
- Scherer, C., Wolf, R., Völker, J., Stock, F., Brennhold, N., Reifferscheid, G., Wagner, M. 2020. Toxicity of microplastics and natural particles in the freshwater dipteran *Chironomus riparius*: same same but different? *Sci. Total Environ.* 711, 134604.
- Schrank, I., Trotter, B., Dummert, J., Scholz-Böttcher, B.M., Löder, M.G.J., Laforsch, C. 2019. Effects of microplastic particles and leaching additive on the life history and morphology of *Daphnia magna*. *Environ. Pollut.* 255, 113233
- Scudo, A., Liebmann, B., Corden, C. i sur. 2017. Intentionally added microplastics in products final report of the study on behalf of the european commission, [Internet], < raspoloživo na: <http://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/pdf/39168%20Intentionally%20added%20microplastics%20-%20Final%20report%2020171020.pdf> >, [2.9.2023].
- Senavirathna, M.D.H.J., Muhetaer, G., Zhaozhi, L., Fujino, T. 2020. Allelopathic influence of low concentration *Microcystis aeruginosa* on *Egeria densa* under diferent light intensities. *Chem. Ecol.* 36, 903– 921.
- Senavirathna, M.D.H.J., L. Zhaozhi, T. Fujino. 2022. Short-duration exposure of 3- $\mu$ m polystyrene microplastics affected morphology and physiology of watermilfoil (sp. *roraima*). *Env. Sci. Poll. Res.* 29, 34475–34485.
- Singh, V., Pandey, B., Suthar, S. 2019. Phytotoxicity and degradation of antibiotic ofloxacin in duckweed (*Spirodela polyrhiza*) system. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 179, 88–95.
- Song, U., Waldman, B., Park, J.S., Lee, K., Park, S.-J., Lee, E.J. 2018. Improving the remediation capacity of a landfull leachate channel by selecting suitable macrophytes. *J. Hydro-Environ. Res.* 20, 31–37.
- Sundbæk, K.B., Koch, I.D.W., Villaro, C.G., Rasmussen, N.S., Holdt, S.L., Hartmann, N.B. 2018. Sorption of fluorescent polystyrene microplastic particles to edible seaweed *Fucus vesiculosus*. *J. Appl. Phycol.* 30, 2923–2927.
- Thompson, R.C., Moore, C.J., Saal, F.S.V., Swan, S.H. 2009. Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends. *Philos. Trans. R. Soc. B.. Biol Sci.* 364, 2153–2166.
- Uhram, S., Jungkil, K., Hojun, R. 2023. Assessing phytotoxicity of microplastics on aquatic plants using fuorescent microplastics. *Env. Sci. and Pol. Res.* 30 (29), 1-10.
- van Weert, S., Redondo-Hasselerharm, P.E., Diepens, N.J., Koelmans, A.A. 2019. Effects of nanoplastics and microplastics on the growth of sediment-rooted macrophytes. *Sci. Total. Environ.* 654, 1040–1047.
- Wang, C., Zhao, J., Xing, B. 2021. Environmental source, fate, and toxicity of microplastics. *J. Hazard. Mater.* 407, 124357.

- Wang, Y., Bai, J., Wen, L., Wang, W., Zhang, L., Liu, Z., Liu, H. 2023. Phytotoxicity of microplastics to the floating plant *Spirodela polyrhiza* (L.): Plant functional traits and metabolomics. *Env. Sci. Poll. Res.* 322, 121199.
- Wong, J.K.H., Lee, K.K., Tang, K.H.D., Yap, P.-S. 2020. Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: prevalence, fates, impacts and sustainable solutions. *Sci. Total Environ.* 719, 137512.
- Woods, M.N., Stack, M.E., Fields, D.M., Shaw, S.D., Matrai, P.A. 2018. Microplastic fiber uptake, ingestion, and egestion rates in the blue mussel (*Mytilus edulis*). *Mar. Pollut. Bull.* 137, 638–645.
- Xiao F., Li-Juan F., Sun, X.-D., Wang, Y., Wang, Z-W, Zhu, F-P., Yuan X.-Z. 2022. Do polystyrene nanoplastics have similar effects on duckweed (*Lemna minor* L.) at environmentally relevant and observed-effect concentrations? *Environ. Sci. Technol.* 56 (7), 4071-4079.
- Yu, H., Zhang, X., Hu, J., Peng, J., Qu, J. 2020. Ecotoxicity of polystyrene microplastics to submerged carnivorous *Utricularia vulgaris* plants in freshwater ecosystems. *Environ. Pollut.* 265, 114830.
- Yu, H., Peng, J., Cao, X., Wang, Y., Zhang, Z., Xu, Y., Qi, W. 2021. Effects of microplastics and glyphosate on growth rate, morphological plasticity, photosynthesis, and oxidative stress in the aquatic species *Salvinia cucullata*. *Environ. Pollut.* 279, 11690.
- Yu, H., Qi, W., Cao, X., Wang, Y., Li, Y., Xu, Y. 2022. Impact of microplastics on the foraging, photosynthesis and digestive systems of submerged carnivorous macrophytes under low and high nutrient concentrations. *Environ. Pollut.* 292, 118220.
- Yuan, W., Zhou, Y., Liu, X., Wang, J. 2019. New perspective on the nanoplastics disrupting the reproduction of an endangered fern in artificial freshwater. *Environ. Sci. Technol.* 53 (21), 12715–12724.
- Zhang, K., Gong, W., Lv, J., Xiong, X., Wu, C. 2015. Accumulation of floating microplastics behind the three gorges dam. *Environ. Pollut.* 204, 117–123.
- Zhou, Q., Zhang, J., Fu, J., Shi, J., Jiang, G. 2008. Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Anal. Chim. Acta.* 606, 135–150.
- Ziajahromi, S., Drapper, D., Hornbuckle, A., Rintoul, L., Leusch, F.D.L. 2020. Microplastic pollution in a stormwater floating treatment wetland: detection of tyre particles in sediment. *Sci. Total Environ.* 713, 136356.
- Zong, X., Zhang, J., Zhu, J., Zhang, L., Jiang, L., Yin, Y., Guo, H. 2021. Effects of polystyrene microplastic on uptake and toxicity of copper and cadmium in hydroponic wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 217, 112217.

## ŽIVOTOPIS

Moje ime je Natalija Vidović. Rođena sam 15. listopada 2001. u Zagrebu. Pohađala sam Osnovnu školu Savski gaj u Zagrebu (2008. – 2016.). U višim razredima osnovne škole sam se počela intenzivnije zanimati za biologiju te sam sudjelovala na državnim natjecanjima iz biologije (2015. i 2016.). Srednjoškolsko obrazovanje sam završila u Prirodoslovnoj školi Vladimira Preloga gdje sam pohađala gimnazijski smjer (2016. – 2020.). U srednjoj školi sam sudjelovala na još dva državna natjecanja iz biologije (2018. i 2019.). Nakon srednje škole upisala sam Preddiplomski studij Biologije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu (2020.) gdje trenutno završavam treću godinu. Tijekom trajanja cijelog preddiplomskog studija primala sam STEM stipendiju i ostvarivala pravo na stipendiju Sveučilišta u Zagrebu za izvrsnost. Odlučila sam upisati Preddiplomski smjer biologije kako bih stekla znanje iz svih osnovnih područja biologije, a tijekom studija sam se najviše zainteresirala za genetiku i mikrobiologiju te stoga planiram upisati Diplomski studij Molekularne biologije. U slobodno vrijeme bavim se fotografijom i mikroskopiranjem te umjetničkim radom.