

Učinak mikroplastike i nanoplastike na poljoprivredne biljke

Žabčić, Alan

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:217:212540>

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

Alan Žabčić

**Učinak mikroplastike i nanoplastike na
poljoprivredne biljke**

Završni rad

Zagreb, 2022.

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Biology

Alan Žabčić

**Effects of microplastics and nanoplastics on
agricultural plants**

Bachelor thesis

Zagreb, 2022.

Ovaj završni rad je izrađen u sklopu studijskog programa Preddiplomski sveučilišni studij Molekularna biologija na Botaničkom zavodu Biološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu, pod mentorstvom prof. dr. sc. Željke Vidaković-Cifrek.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Biološki odsjek

Završni rad

Učinak mikroplastike i nanoplastike na poljoprivredne biljke

Alan Žabčić

Rooseveltova trg 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Mikroplastika je globalno prisutna u poljoprivrednim tlima. Jednokratni plastični materijali za pokrivanje tla, primjena otpadnog mulja kao dodatka gnojivima i navodnjavanje su glavni izvori mikroplastike u poljoprivrednim tlima. Prisutnost mikroplastike u tlu uglavnom smanjuje kapacitet tla za vodu, a biljke koje rastu u tlu zagađenom mikroplastikom i nanoplastikom većinom imaju smanjen rast, dolazi do oksidacijskog stresa i smanjena im je klijavost sjemena. Mikroplastika vrlo malih dimenzija i nanoplastika mogu ulaziti u korijen i listove biljaka, akumulirati se u provodnim elementima i prenositi u druge dijelove biljke. Vršak korijena te mjesta ozljeda i odvajanja bočnog korijenja su kritična mjesta ulaska plastike u korijen. Dodatan izvor zagađenja predstavljaju aditivi prisutni u plastici koji se otpuštaju iz plastike u okoliš. Nadalje, mikroplastika može adsorbirati teške metale u tlu i smanjiti njihovu biološku dostupnost. Prisutnost mikroplastike i nanoplastike u jestivim dijelovima biljaka ukazuje na potrebu daljnjeg istraživanja njihovog učinka, ne samo na poljoprivredne prinose nego i na ljude i životinje koji konzumiraju biljke izložene plastici.

Ključne riječi: okoliš, oksidacijski stres, rizosfera, tlo, zagađenje
(24 stranice, 2 slike, 43 literaturna navoda, jezik izvornika: hrvatski)
Rad je pohranjen u Središnjoj biološkoj knjižnici.

Mentor: Prof. dr. sc. Željka Vidaković-Cifrek

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Biology

Bachelor thesis

Effects of microplastics and nanoplastics on agricultural plants

Alan Žabčić

Rooseveltov trg 6, 10000 Zagreb, Croatia

Microplastics are present in agricultural soils worldwide. Single-use plastic mulch films, sewage sludge used as supplement to fertilisers and irrigation are the largest sources of microplastics in agricultural soils. The presence of microplastics in soil generally reduces the water capacity of the soil, and plants growing in soils contaminated with microplastics and nanoplastic generally have reduced growth, experience oxidative stress, and have reduced seed germination rates. Nanoplastics and very small microplastics can enter plant roots and leaves, accumulate in transport elements, and translocate to other plant organs. Root tips, wounds, and sites where lateral roots emerge are the most critical points for uptake of plastics into roots. Additives present in plastics can leach into the environment and also pose a pollution risk. In addition, microplastics can adsorb heavy metals, and reduce their bioavailability. The presence of microplastics and nanoplastics in edible parts of commonly consumed plants indicates the need for further research on the effects of these substances, not only on agricultural yields, but also on humans and animals that consume plants contaminated with plastics.

Keywords: environment, oxidative stress, pollution, rhizosphere, soil
(24 pages, 2 figures, 43 references, original in: Croatian)
Thesis is deposited in Central Biological Library.

Mentor: Prof. Željka Vidaković-Cifrek, PhD

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. MIKROPLASTIKA I NANOPLASTIKA U POLJOPRIVREDNIM TLIMA.....	3
2.1. Svojstva mikroplastike i nanoplastike.....	3
2.2. Izvori mikroplastike i nanoplastike.....	4
2.3. Svojstva tala zagađenih mikroplastikom i nanoplastikom	6
3. UTJECAJ MIKROPLASTIKE NA BILJKE.....	7
3.1. Unos mikroplastike u biljke i interakcije s površinom biljaka.....	7
3.2. Utjecaj mikroplastike na rast biljaka i klijavost sjemena.....	9
3.3. Utjecaj mikroplastike na metabolizam biljaka.....	11
3.4. Mikroplastika manja od 3 µm i unos u biljke	11
4. UTJECAJ NANOPLASTIKE NA BILJKE.....	12
4.1. Unos nanoplastike u biljku.....	12
4.2. Utjecaj nanoplastike na rast i metabolizam biljaka.....	14
5. PROMJENE MIKROBIOMA TLA.....	15
6. MEĐUDJELOVANJE MIKROPLASTIKE S DRUGIM OBLICIMA ZAGAĐENJA	16
6.1. Interakcije mikroplastike i teških metala	16
6.2. Interakcije mikroplastike i organskih onečišćenja	17
7. POTENCIJALAN UTJECAJ NA ORGANIZME U TLU I OSTALE ORGANIZME U HRANIDBENOJ MREŽI	18
8. ZAKLJUČAK.....	19
9. LITERATURA	20

Popis kratica:

PA – poliamid

PAH – policiklički aromatski ugljikovodici (*engl. polycyclic aromatic hydrocarbons*)

PE – polietilen

PET – polietilen tereftalat

PLA – polilaktat

PP – polipropilen

PS – polistiren

PVC – polivinil klorid

1. UVOD

Pojam plastike uključuje širok spektar organskih polimera koji u procesu proizvodnje postoje u tekućem ili polutekućem stanju u kojem se oblikuju, nanose kao premazi, izlijevaju, i sl. Većina modernih vrsta plastike proizvodi se iz nafte uz raznolike aditive, ali postoje i noviji oblici plastike na bazi biljaka poput kukuruza i pamuka (Thompson i sur. 2009) i zastarjele vrste plastike poput one na bazi kazeina iz mlijeka (Southward 1994). Plastika se u dvadesetom stoljeću globalno proširila i danas se masovno proizvodi u velikim količinama. U 2017. godini je proizvedeno ukupno 348 milijuna tona plastike od čega 30% proizvodi Kina. Ako se takav trend nastavi, predviđa se da će godišnja proizvodnja do 2050. narasti na 33 milijarde tona (Sajjad i sur. 2022).

Bioplastika, poput prethodno spomenute na bazi kukuruza, se definira kao plastika koja se u aerobnim normalnim okolišnim uvjetima raspada na vodu, ugljikov dioksid, i ugrađuje u biomasu organizama koji ju razgrađuju i asimiliraju. Danas se proizvode različite vrste bioplastike poput polihidroksibutirata, polilaktata (PLA), i mješavina na bazi škroba, ali one ukupno predstavljaju samo 1% globalne proizvodnje plastike (Sajjad i sur. 2022).

Problem također predstavlja nekonzistentno recikliranje i sanacija plastičnog otpada. Prema podacima iz 2009. neke države u Europi koje su pri vrhu stope recikliranja recikliraju 84% upotrebljene plastike, dok one pri dnu liste recikliraju 25% ili manje (Bouwmeester i sur. 2015). Globalno se reciklira samo 18% plastike, dok se 24% spaljuje i 56% završava u nasipima, smetlištima ili nezbrinuto u prirodi (Chamas i sur. 2020). Većina vrsta plastike se sporo razgrađuje u prirodi i ostaje kao dugotrajno onečišćenje u okolišu, a s proizvodnjom koja se približava stopi od ukupno 400 milijuna tona godišnje, količina plastike u okolišu samo raste (Chamas i sur. 2020). Plastika u okolišu se prema veličini grubo dijeli na megaplastiku (komadi plastike veći od 50 cm), makroplastiku (komadi veći od 5 mm), mikroplastiku (između 100 nm i 5 mm) i nanoplastiku (manji od 100 nm) (Sajjad i sur. 2022.).

Prva istraživanja o mikroplastici objavljena su krajem 1990-ih i početkom 2000-ih nakon što je otkrivena velika nakupina plastike u Tihom oceanu („Great Pacific garbage patch“) i mikroplastika je prvi put ciljano istraživana u okolišu, ali istraživanja su brzo proširena na slatkovodne ekosustave i kasnije na kopnene ekosustave (Campanale i sur. 2022). Nanoplastika je slabije istražena od mikroplastike jer je nanočestice plastike, koje su po definiciji manje od 100 nm, teže detektirati i ukloniti iz otpada. Istraživanja se u prethodnih nekoliko godina

provode intenzivnije i otkriveni su mnogi negativni učinci na biljke, životinje, i mikroorganizme (Bouwmeester i sur. 2015, Shen i sur. 2019).

Plastika je prisutna u svakodnevnim proizvodima u različitim oblicima. Najrašireniji polimeri u svakodnevnoj uporabi su polietilen (PE) i polietilen tereftalat (PET) u proizvodima široke potrošnje, polistiren (PS) u industriji i građevinarstvu te polipropilen (PP) koji se također masovno koristi u više područja. Mikroplastika je prisutna u kozmetičkim proizvodima i pastama za zube zbog blagih abrazivnih svojstava (Rillig i sur. 2019, Bouwmeester i sur. 2015). Zbog masovne uporabe plastike u poljoprivredi, osobito jednokratne plastike, poljoprivredna tla postaju zagađena i smatra se da je globalno 10% poljoprivrednih površina zagađeno mikroplastikom (Ramos i sur. 2015). Plastični materijali se koriste u poljoprivredi u obliku folija za prekrivanje tla (malčiranje), u platenicima, cijevima za navodnjavanje i sl. (Gong i sur. 2021). Značajan dio mikroplastike dolazi u tlo iz otpadnih voda i mulja koji se koristi kao dodatak gnojivima. Otpadni mulj sadrži veliku količinu korisnih nutrijenata, ali često sadrži i značajnu količinu nepoželjne mikroplastike (Tian i sur. 2022). I navodnjavanje može biti izvor mikroplastike jer se u regijama gdje je čista voda manje dostupna u tu svrhu koriste otpadne vode, a i neke rijeke su zagađene mikroplastikom (Yang i sur. 2021).

Mikroplastika prisutna u tlu ima negativan utjecaj na biljke na više načina, uključujući smanjen rast i indukciju oksidacijskog stresa (Azeem i sur. 2021). Istraživanja o utjecaju nanoplastike na biljke su još uvijek relativno nova, ali u više biljaka je nađeno da nanočestice plastike i sitnije čestice mikroplastike mogu ući u korijenje biljke i transpiracijskom strujom se prenijeti u nadzemne dijelove biljke, uključujući jestive dijelove (Li i sur. 2019). Stoga čestice nanoplastike putem hranidbenih mreža mogu doći i u organizme konzumente biljaka, tj. u ljude i životinje (Bouwmeester i sur. 2015, De Silva i sur. 2021).

U ovom radu obrađena je mikroplastika i nanoplastika i pobliže njihov utjecaj na poljoprivredne biljke. Mikroplastika i nanoplastika na različite načine stupaju u interakcije s biljkama i mijenjaju svojstva tla što utječe na biljke. Dodatni ekološki problem predstavlja sposobnost čestica plastike da na sebe adsorbiraju metalne ione i organske zagađivače i akumuliraju ih u tlu, što može naškoditi biljkama i ostalim organizmima u tlu (Tang 2020).

2. MIKROPLASTIKA I NANOPLASTIKA U POLJOPRIVREDNIM TLIMA

2.1. Svojstva mikroplastike i nanoplastike

Mikroplastika se definira kao čestice plastike veličine između 100 nm i 5 mm, a nanoplastika kao čestice plastike manje od 100 nm (Azeem i sur. 2021). Budući da su istraživanja mikroplastike i nanoplastike relativno mlado područje, nomenklatura još nije u potpunosti uvriježena i u nekim starijim izvorima pojam nanoplastike ne postoji, nego se jednostavno mikroplastikom smatraju i čestice koje su danas uvrštene u nanoplastiku.

Mikroplastika se pojavljuje u više oblika. Najbitniji oblici mikroplastike su zrnata i okrugla mikroplastika, fragmenti plastičnih folija, i dulja plastična vlakna. Oblik čestica je značajan za učinak plastike na biljke. Također postoje različiti polimeri s različitim fizikalnim i kemijskim svojstvima i utjecajem na biljke (Ramos i sur. 2015, Rillig i sur. 2019, Chamas i sur. 2020).

Prema postanku, mikroplastika se dalje dijeli na primarnu i sekundarnu. Primarna mikroplastika (i nanoplastika) je namjerno proizvedena u obliku malih čestica. Prisutna je u kozmetičkim i higijenskim proizvodima (često u pastama za zube i gelovima za „peeling“), elektronicima, i građevinarstvu i najčešće se proizvodi od PE-a ili PS-a. Sekundarna mikroplastika nastaje degradacijom većih komada plastike kroz razne procese, uključujući utjecaj sunčeve svjetlosti i mehaničko trošenje. Prisutan je i utjecaj drugih organizama, kao što je bioasimilacija kod organizama koji mogu asimilirati plastiku. Sekundarna mikroplastika je vrlo raznolika po sastavu zbog svog različitog porijekla (Silva i sur. 2021).

Plastika može sadržavati brojne aditive koji mogu obuhvaćati u prosjeku 4% mase u smjesi plastike. Aditivi uključuju plastifikatore u koje se vrlo često ubrajaju ftalati i ftalatni esteri, bromirane spojeve protiv zapaljenja, spojeve koji plastiku štite od zračenja, bojila, i sl. Aditivi su slabije vezani za plastiku i, ako plastika završi u okolišu, lako se ispiru i otpuštaju u tlo i vodu (Lithner i sur. 2009, Bouwmeester i sur. 2015).

Zbog svojih iznimno malih dimenzija, čestice nanoplastike su problematične za istraživanje i uklanjanje iz otpadnih voda i tala. Čestice veličine 100 nm se teško detektiraju konvencionalnim metodama (Rillig i sur. 2019). U istraživanju se taj problem često rješava pomoću fluorescentnih čestica plastike (Jiang i sur. 2019). U procesima pročišćavanja filteri s porama manjim od 100 nm nisu uobičajeni pa se često nanoplastika u otpadnim vodama ne detektira i ne ukloni (Gong i sur. 2021).

2.2. Izvori mikroplastike i nanoplastike

Mikroplastika i nanoplastika u okoliš dolaze iz mnogih izvora, i u poljoprivrednim tlima najčešće se nalaze PE, PP i PS (Ullah i sur. 2021). Procjene o količini mikroplastike koja godišnje završi u tlu su nekonzistentne, ali procjene za Sjevernu Ameriku se kreću između 40 i 300 tisuća tona, a za Europu između 60 i 420 tisuća tona godišnje (Nizzetto i sur. 2016, Sajjad i sur. 2022,)

Velik dio mikroplastike u okoliš dolazi iz urbanih sredina gdje su značajno prisutni industrija i građevinarstvo. Prema procjenama, 20% proizvedene plastike u Europi koristi se za različite namjene u građevinarstvu (Campanale i sur. 2022). Velik doprinos imaju i moderne boje i lakovi na bazi polimera koji se s vremenom pod utjecajem prirodnih sila troše, ljušte i degradiraju. Trošenje guma na vozilima i cesta (zajednički TRWP – *tyre and road wear particles*) je također značajan izvor mikroplastike u okolišu i u sjevernoeuropskim gradovima tvore oko 50% urbane mikroplastike (Campanale i sur. 2022).

Iako su u početku istraživanja mikroplastike bili zapostavljeni, ekosustavi tla u prosjeku sadrže višestruko veću količinu mikroplastike nego oceanski ekosustavi. Najzagađeniji su agronomski ekosustavi, čemu doprinosi široka upotreba otpadnog mulja i malčiranja s plastičnim folijama (Gong i sur. 2021, Nizzetto i sur. 2016). Otpadni mulj se koristi kao gnojivo na poljoprivrednim površinama jer sadrži velike količine organske tvari i mikronutrijenata koji pospješuju rast biljaka, ali značajan je izvor mikroplastike u poljoprivredi (Corradini i sur. 2019). U otpadnim vodama iz urbanih sredina čestice mikroplastike uvelike dolaze iz trošenja odjeće izrađene od tkanina poput poliestera i poliakrila. Odjeća se u procesima pranja, sušenja, i nošenja mehanički troši i s nje se ispiru i oslobađaju vlaknaste čestice mikroplastike (Azeem i sur. 2021, Bouwmeester i sur. 2015). Otpadne vode se često koriste za navodnjavanje u regijama siromašnim vodom, a procesi pročišćavanja vode ne mogu ukloniti svu prisutnu mikroplastiku u vodi. Mikroplastika je također prisutna u rijekama i jezerima i dolazi u tlo ako se te vode koriste za navodnjavanje ili ako dođe do poplava. (Yang i sur. 2021).

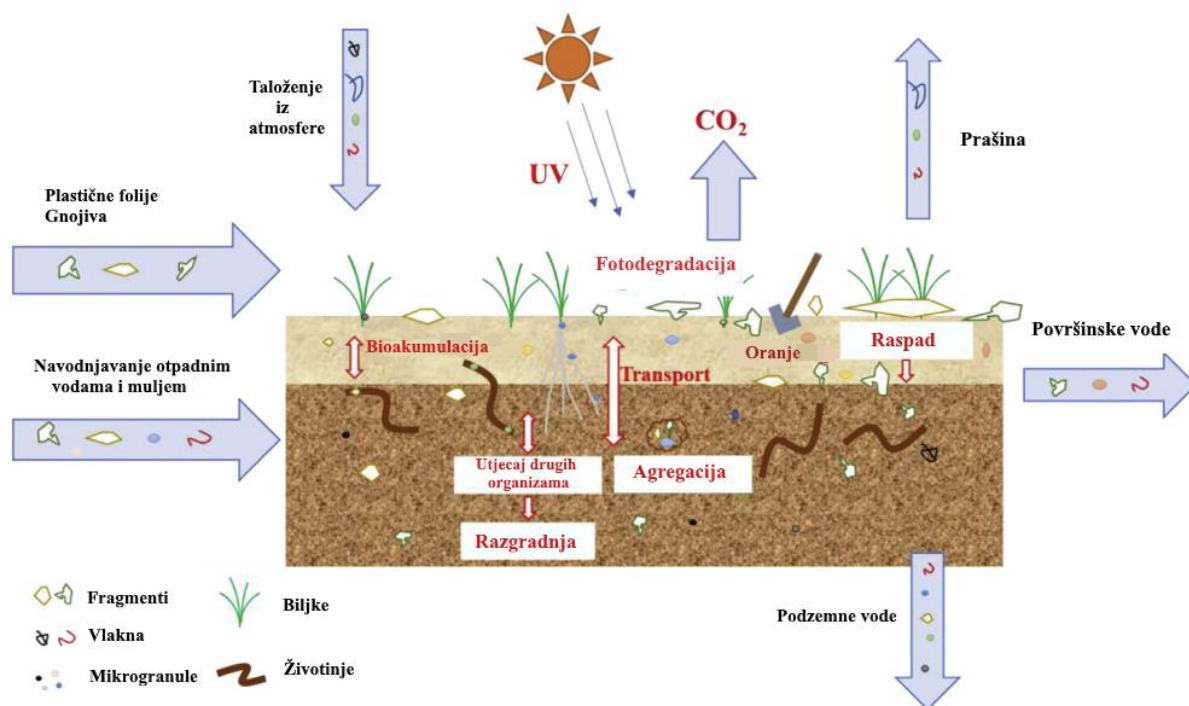
Moderna umjetna gnojiva sadrže veliku količinu nutrijenata, ali u cilju postupnog oslobađanja nutrijenata i izbjegavanja nanošenja puno puta u sezoni, peleti umjetnog gnojiva se pakiraju u polupropusne polimerne kapsule koje reguliraju otapanje gnojiva. Sastav kapsula je iznimno varijabilan i uključuje polimere od onih „klasičnih“ poput poliuretana i PE-a do biorazgradivih polimera poput PLA-a (Campanale i sur. 2022).

Iako se smatraju prirodnijom i čistom opcijom, prirodna gnojiva na bazi komposta i biootpada su također poznata kao izvor mikroplastike u tlu, i povišena temperatura koja nastaje u procesu kompostiranja ubrzava procese raspada i usitnjavanja plastike (Tang i sur. 2022).

Doprinos gnojiva količini mikroplastike u tlu je ipak relativno malen u usporedbi s globalno raširenom praksom malčiranja plastičnim folijama. Tehnika malčiranja plastičnim folijama se počela koristiti 1970-ih godina i danas se koristi globalno. Jednokratnim plastičnim folijama od kojih se uglavnom koristi PE niske gustoće (LDPE), a često i PET, se tlo pokriva oko zasađenih biljaka što kratkoročno suzbija rast korova, povećava učinkovitost navodnjavanja i štiti biljke od hladnoće, ali količina plastike koja zaostaje nakon upotrebe predstavlja ekološki problem (Tian i sur. 2022). Malčiranje s plastičnim folijama i uporaba otpadnog mulja se zajedno smatraju najvećim izvorima mikroplastike u tlu i godišnje se tim procesima u tla u Europi i Sjevernoj Americi ukupno unosi više tisuća tona mikroplastike godišnje (Sajjad i sur. 2022). Najveći korisnik plastičnih folija za malčiranje je Kina u kojoj 80% poljoprivrednih površina, tj. 20 milijuna hektara, koristi plastične folije, dok Europa folijama pokriva oko 427 tisuća hektara (De Silva i sur. 2021). Plastične folije se nakon uporabe uklanjaju s površine tla uglavnom bez osobite pažnje pa fragmenti mogu zaostati na tlu, što ih uz utjecaj atmosferskih uvjeta i djelovanja životinja čini velikim izvorom sekundarne mikroplastike u poljoprivredi (Sajjad i sur. 2022).

Ostatci plastičnih folija koji nisu uklonjeni s tla završavaju u dubljim slojevima tla tijekom oranja, djelovanjem padalina, i kretanjem organizama u tlu (Tian i sur. 2022, Wan i sur. 2019). Prema jednoj od teorija, gujavice i slični organizmi u tlu doprinose fragmentaciji plastike samim svojim kretanjem i hranjenjem, te preko mikrobiote probavila koja degradira čestice plastike koje je gujavica pojela (Sajjad i sur. 2022). Dugoročno, mikroplastika i nanoplastika završavaju i u okolnim vodenim ekosustavima (Campanale i sur. 2022).

Iz navedenih podataka vidljivo je da su najznačajniji izvori mikroplastike u tlu korištenje jednokratnih plastičnih folija, gnojiva i otpadnog mulja te navodnjavanje otpadnim vodama. U manjoj mjeri značajno je i taloženje čestica mikroplastike iz atmosfere (Slika 1) (Tian i sur. 2022). Prema Weber i sur. (2022), do kretanja mikroplastike u tlu primarno dolazi zbog oranja polja, a prirodni procesi poput erozije manje doprinose kretanju mikroplastike.



Slika 1. Osnovni izvori mikroplastike u tlu su korištenje plastičnih folija, gnojiva i otpadni mulj te navodnjavanje otpadnim vodama. Plastika se u tlu nalazi u obliku fragmenata, vlakana i mikrogranula. U njenom kretanju sudjeluju prirodni procesi poput erozije tla, djelovanja površinskih voda, životinja i biljaka, ali za kretanje mikroplastike u tlu je najzaslužnije djelovanje ljudi (npr. oranje). Izvori i kretanje mikroplastike su prikazani strelicama (preuzeto i prilagođeno iz Tian i sur. 2022).

2.3. Svojstva tala zagađenih mikroplastikom i nanoplastikom

Procesi nakupljanja mikroplastike u tlu i postojanost plastike u tlu još nisu u potpunosti opisani, ali prema aktualnim istraživanjima smatra se da se mikroplastika dugoročno nakuplja u tlu (Campanale i sur. 2022). Mikroplastika se uglavnom akumulira u gornjih 30 cm tla, s najvećom količinom u gornjih 10 cm (Ullah i sur. 2021). Utjecaj mikroplastike na tlo uvelike ovisi o veličini i obliku čestica plastike, ali zajednički utjecaj je pad ukupne gustoće tla s nakupljanjem plastike (Rillig i sur. 2019). Moguć je i porast gustoće tla specifično u području rizosfere (de Souza Machado i sur. 2019).

Mikroplastika ima značajan utjecaj na kapacitet tla za vodu i brzinu isparavanja vode iz tla, ali učinak ovisi o obliku i sastavu čestica plastike te o vrsti tla. Pjeskovita tla koja sadrže mikroplastiku u određenoj mjeri imaju povećan kapacitet za vodu dok se glinasta tla zagađena plastikom brže isušuju i više pucaju po površini (Sajjad i sur. 2022). Poliesterska vlakna (i u

manjoj mjeri poliakrilna i polietilenska) prisutna u tlu u manjoj količini povećavaju kapacitet tla za vodu, ali ti rezultati su dobiveni s manjim udjelima plastike u tlu i ne može se zaključiti kakav učinak imaju veći udjeli (de Souza Machado 2019, Tang 2020). Fragmenti plastičnih folija, detaljnije spomenuti u prethodnom poglavlju, su vrlo rašireni i povećavaju stopu isparavanja vode iz tla i pucanje površine tla (Wan i sur. 2019). Naime, fragmenti folija stvaraju kanale u tlu kroz koje voda isparava, što može uzrokovati da se tlo u sušnim razdobljima brže isušuje i biljke ostaju bez vode (Tang 2020).

U vrlo velikoj količini, mikroplastika može „začepiti“ pore u tlu i smanjiti sposobnost ulaska vode i zraka u tlo, što u krajnjem slučaju može dovesti do hipoksičnih, ili čak anoksičnih uvjeta u tlu (Sajjad i sur. 2022).

Utjecaj nanoplastike na svojstva tla je još uvijek nejasan. Pretpostavlja se da nanoplastika može utjecati na polarnost čestica tla, ali glavni utjecaji su na mikroorganizme u tlu i na biljke (Rillig i sur. 2019).

3. UTJECAJ MIKROPLASTIKE NA BILJKE

3.1. Unos mikroplastike u biljke i interakcije s površinom biljaka

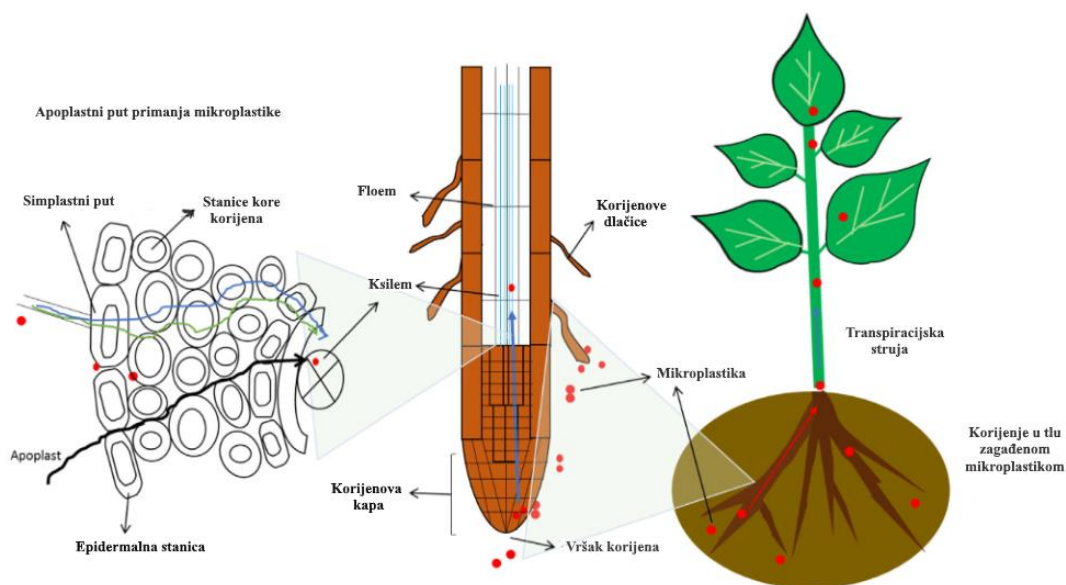
Glavno mjesto interakcije mikroplastike i biljaka je rizosfera. Mikroplastika se može adsorbirati na korijenje biljaka, što remeti rast korijenovih dlačica i primanje vode i nutrijenata (Bosker i sur. 2019, Ullah i sur. 2021), a mikroplastika vrlo malih dimenzija može i direktno ući u biljku i akumulirati se u tkivu korijena ili ksilemskim elementima se prenositi u druge dijelove biljaka, uključujući jestive dijelove (Li i sur. 2019). U početku istraživanja interakcija mikroplastike i biljaka smatralo se da su čestice plastike prevelike da se akumuliraju u biljci zbog prisutnosti staničnih stijenki, ali novija istraživanja pokazuju da to nije slučaj i da su stanične stijenke propusnije od očekivanog, osobito pri vršcima korijena (Ullah i sur. 2021).

Biljke u rizosferu oslobađaju širok spektar spojeva uključujući aminokiseline, ugljikohidrate, fenolne spojeve, enzime i druge molekule kojima mijenjaju lokalne uvjete oko korijena i poboljšavaju primanje nutrijenata. Koncentracija tvari u izlučevinama korijena se mijenja ovisno o uvjetima u tlu i poznato je da se pri djelovanju abiotičkog stresa koncentracije nekih spojeva u izlučevinama mogu povećati do tri reda veličine (Azeem i sur. 2021). Izlučevine korijena su prva linija obrane od mikroplastike u rizosferi i većina čestica se zaustavi

u području korijena, najviše oko korijenove kape, u sluzi. Manja količina mikroplastike, ako je dovoljno malih dimenzija, može se unijeti u korijen (Slika 2). Tamo se najviše akumulira u provodnim elementima i apikalnom meristemu korijena (Azeem i sur. 2021). Mjesta odvajanja bočnog korijenja i ozljede korijena su najrizičnija jer su na tim mjestima stanične stijenke oštećene ili nisu u potpunosti formirane (Li i sur. 2019). Meristemsko tkivo je također mjesto akumulacije čestica plastike zbog vrlo aktivne diobe stanica i mekih staničnih stijenki. Do ulaska u ksilemske elemente dolazi pri vršcima korijena gdje Casparijeve pruge nisu u potpunosti formirane pa nisu učinkovita barijera stranim česticama (Azeem i sur. 2021).

Uz rizosferu, manji, ali bitan izvor mikroplastike koja može utjecati na biljke je atmosfera. Lake čestice plastike su prisutne u zraku, osobito u blizini gradova, cesta i industrijskih postrojenja i mogu se taložiti na nadzemnim organima biljaka. Čestice dovoljno malih dimenzija mogu ući u biljno tkivo kroz puči i mogu se kroz provodne elemente kretati u druge biljne organe, uključujući korijen, ali na taj se način češće kreću čestice nanoplastike (Sun i sur. 2021, Sajjad i sur. 2022).

Čestice mikroplastike i nanoplastike utječu i na sjemenke u tlu. I prije nego sjemenke u tlu prokliju, mikroplastika i nanoplastika se mogu adsorbirati na njihove površine. Čestice plastike se akumuliraju u porama na sjemenoj lupini što remeti primanje vode u sjemenku (Bosker i sur. 2019).



Slika 2. Primanje mikroplastike iz tla i kretanje unutar biljaka. Čestice mikroplastike (crvene točke) ulaze u tkivo korijena simplastnim i apoplastnim putem se kreću kroz koru korijena do ksilemskih elemenata (lijevo). Čestice koje nakon adsorpcije na površinu uđu u korijen i završe u ksilemu se transpiracijskom strujom kreću kroz biljku (sredina) i dolaze do nadzemnih organa (desno) (preuzeto i prilagođeno iz Ullah i sur, 2021).

3.2. Utjecaj mikroplastike na rast biljaka i klijavost sjemena

Najočitiji učinci mikroplastike su oni koji su vidljivi makroskopski i bez složenih metoda. Primjer je smanjena klijavost te promjena stope i obrasca rasta i biomase. Na klijavost sjemena značajniji utjecaj imaju manje čestice - mikroplastika u rasponu od nekoliko mikrometara ili čestice koje se smatraju nanoplastikom, jer je glavni mehanizam utjecaja na klijanje akumulacija u porama na sjemenoj lupini (Bosker i sur. 2019). Utjecaj na klijavost je uglavnom privremen, i sjeme proklija normalno nešto kasnije, ali mladi klijanac je osobito izložen učinku mikroplastike jer manje čestice plastike mogu ući u biljku kroz osjetljivi proklijali korijen (Tang 2020, Gong i sur. 2021)

Utjecaj mikroplastike na rast biljaka varira ovisno o vrsti biljaka, a učinak ovisi i o vrsti plastike. Primjerice, u slučaju kukuruza (*Zea mays*) i boba (*Vicia faba*), prisutnost

mikroplastike u tlu inhibira rast korijenja (Jiang i sur. 2019, Gong i sur. 2021, Sajjad i sur. 2022), dok kod pšenice (*Triticum aestivum*) stimulira produžni rast korijenja i porast ukupne biomase (Campanale i sur. 2022). Ipak, porast biomase kod pšenice se ne može jednostavno protumačiti kao pozitivan utjecaj jer se u stresnim uvjetima može događati da korijen raste i stanjuje se, kao da „izbjegava“ onečišćenje koje smeta biljci. Stoga je potrebno pratiti i druge parametre poput omjera biomase izdanka i korijena i razine makronutrijenata poput ugljika i dušika u biljci (de Souza Machado i sur. 2019, De Silva i sur. 2021).

Mikroplastika također može smanjivati rast izdanka i listova. Mikročestice PS-a smanjuju biomasu izdanka i listova riže (*Oryza sativa*) (Wu i sur. 2020), a biljke krastavca (*Cucumis sativum*) rastu sporije i imaju manje internodija u izdancima (Li i sur. 2019).

Prethodno više puta spomenuti ostatci plastičnih folija za malčiranje imaju negativan utjecaj na biljke i smanjuju rast biljaka. Negativan utjecaj fragmenata tog materijala je obrnuto proporcionalan veličini fragmenata i manji fragmenti imaju izraženiji negativni utjecaj na rast biljaka (Qi i sur. 2018). Usporedbom utjecaja ostataka PET folija i ostataka biorazgradivih folija na bazi škroba i polibutilen tereftalata na pšenicu dokazano je da biorazgradiva folija izraženije smanjuje rast pšenice, ali rezultati se ne mogu primijeniti na sve biorazgradive polimere budući da postoji velik broj vrlo različitih vrsta bioplastike. Također, rezultati pokusa u kontroliranim uvjetima i relativno kratkom vremenu nisu pokazatelj dugoročnih utjecaja kroz više generacija biljaka jer se PET razgrađuje vrlo sporo u usporedbi s biorazgradivim polimerima (Silva i sur. 2021). Sličan slučaj je nađen pri usporedbi utjecaja PE-a i PLA-a na kukuruz, gdje je nađeno da biorazgradivi PLA, uz prisutnost kadmija u tlu, izraženije smanjuje biomasu biljke i sadržaj klorofila u listovima od PE-a, također uz prisutnost kadmija (Wang i sur. 2020).

Poliamidi (PA) su polimeri u kojima su monomeri povezani amidnim vezama. Primjeri su najlon i različite varijante najlona (Palmer 2001). Mikro-PA u tlu izaziva produžni rast i stanjivanje korijena uz smanjenje mase lukovica mladog luka (*Allium fistulosum*) uz porast ukupne površine korijena, ali također izaziva porast biomase, porast sadržaja dušika u tkivu i porast omjera dušika prema ugljiku (Azeem i sur. 2021, Ullah i sur. 2021). Ovakav porast biomase i dušika u biljci ukazuje da PA „gnoji“ tlo, ali utjecaj nije u potpunosti istražen i u budućim istraživanjima trebala bi se pratiti i koncentracija dostupnog dušika u ispitivanom tlu. Većina eksperimenata koristi novu, čistu, primarnu mikroplastiku, pa nije u potpunosti jasno je li ovo utjecaj samih čestica mikroplastike koja u tlo otpušta dostupni dušik, ili se s novih

čestica ispiru zaostali monomeri i kemikalije iz procesa proizvodnje (de Souza Machado i sur. 2019).

3.3. Utjecaj mikroplastike na metabolizam biljaka

Uz očite, vidljive učinke na biljke, mikroplastika ima velik utjecaj na metabolizam biljaka, osobito na koncentraciju reaktivnih oblika kisika (ROS) i na antioksidacijski sustav u stanicama. U eksperimentu s bobom (*Vicia faba*) izloženom česticama PS-a promjera 5 μm , uz smanjeni rast korijena i biomase, pronađen je i porast aktivnosti superoksid dismutaze (SOD) i pad aktivnosti katalaze (CAT) proporcionalan koncentraciji mikro-PS-a, uz značajan jednolik porast peroksidaze (POD) u svim ispitanim koncentracijama mikro-PS -a (10, 50, i 100 mg/L) (Jiang i sur. 2019). Kod salate (*Lactuca sativa*) je također prisutan porast aktivnosti SOD nakon izlaganja PS-u (Gong i sur. 2021).

U eksperimentu s rižom, nakon 21 dana tretmana s mikročesticama PS -a, dolazi do porasta aktivnosti CAT i pada aktivnosti SOD i POD pri nižim koncentracijama (50 mg/L), ali pri višim koncentracijama (250 i 500 mg/L) aktivnost ovih triju enzima pada. Istovremeno, duljina izdanaka i biomasa biljaka se smanjuje i može se zaključiti da nastali stres pri višim koncentracijama mikroplastike nadilazi kapacitet antioksidacijskog sustava. Također pada koncentracija više različitih organskih kiselina u biljci. Manja količina intermedijera u fotosintezi i respiraciji pokazuje da mikroplastika vjerojatno remeti te procese. Osobito dolazi do pada razine hidroksibenzojeve kiseline koja je esencijalna za izgradnju stanične stijenke i ukazuje na moguće narušavanje procesa biosinteze stanične stijenke (Wu i sur. 2020).

Mikroplastika također može remetiti ravnotežu hormona u biljkama. U ječma (*Hordeum vulgare*) tretiranog PS-om i polimetilmetakrilatom (PMMA) je uz inhibiciju rasta korijena, porast količine vodikova peroksida i superoksidnog aniona u korijenu i promjene u antioksidacijskim enzimima dokazan i porast koncentracije citokinina *trans*-zeatina i pad dihidrozeatina te pad koncentracije auksina indol-3-octene (IAA) i indol-3-maslačne kiseline (IBA). Također dolazi do pada aktivnosti peroksidaze stanične stijenke i promjene aktivnosti više enzima u metabolizmu glukoze i fruktoze (Li i sur. 2021).

3.4. Mikroplastika manja od 3 μm i unos u biljke

Podjela na mikroplastiku i nanoplastiku striktno prema veličini čestica često u praksi predstavlja probleme. Čestice mikroplastike koje su manje od 3 μm često imaju više sličnosti s nanoplastikom nego s ostalim česticama mikroplastike. Veličina čestica od 3 μm odabrana je kao granica u ovom primjeru jer su čestice mikroplastike ispod te granice nađene unutar tkiva

ispitivanih biljaka i imaju učinke usporedive s nanoplastikom. Učinci su često sličniji nanoplastici nego učincima većih čestica mikroplastike. Dokazani su citotoksični učinaci i indukcije oksidacijskog stresa (Bosker i sur. 2019, Jiang i sur. 2019).

Najveće čestice plastike koje su nađene unutar biljaka su veličine 2,52 μm . Takve su čestice nađene u listovima salate (*Lactuca sativa*), a drugi primjeri biljaka u kojima je dokazano primanje čestica manjih od 3 μm su primjerice korijen mrkve (*Daucus carota*) u kojem su bile čestice veličine 1,51 μm te provodno tkivo riže (*Oryza sativa*) koje je sadržavalo čestice od 1 μm (Oliveri Conti i sur. 2020, Liu i sur. 2022).

Još veće sličnosti s nanoplastikom su prisutne kod čestica veličine nekoliko stotina nanometara, ali ne smatraju se nanoplastikom jer su veće od 100 nm. Kod biljke *Arabidopsis thaliana* koja nije poljoprivredna biljka, ali u istraživanju je sveprisutna, istraženo je primanje čestica promjera 200 nm u biljku. Obrasci akumulacije i transporta su slični nanoplastici, ali uz više akumulacije čestica u provodnim elementima, a manje unutar samih stanica (Sun i sur. 2020).

Nanoplastika je detaljnije obrađena u sljedećem poglavlju, ali bitno je spomenuti problematiku preklapanja učinaka prave nanoplastike i vrlo sitne mikroplastike do koje dolazi zbog nomenklature.

4. UTJECAJ NANOPLASTIKE NA BILJKE

4.1. Unos nanoplastike u biljku

Za razliku od mikroplastike kod koje do unosa čestica u biljku dolazi vrlo rijetko i jedino kod najmanjih čestica, nanoplastika je poznata po sposobnosti ulaska u biljno tkivo i prenošenja u druge organe. Nanoplastika u tkivo korijena ulazi istim putem kao i vrlo sitna mikroplastika. To su mjesta ozljeda korijena, odvajanja bočnog korijenja, vršni dijelovi korijena u blizini meristema i mjesta gdje Casparijeve pruge nisu u potpunosti formirane. U tkivu korijena kreće se apoplastnim i simplastnim putem. Također se pretpostavlja da nanoplastika u biljne stanice može ulaziti endocitozom ili preko ionskih kanala i proteinskih nosača, ali potrebno je daljnje istraživanje mehanizama ulaska (Li i sur. 2019, Gong i sur. 2021). Dokazano je da akvaporini mogu omogućiti ulazak nanoplastike u stanice korijena riže. Dugoročno, prisutnost nanoplastike izaziva smanjenu ekspresiju akvaporina (Campanale i sur. 2022).

Čestice nanoplastike koje u biljku ulaze kroz korijen se vrlo vjerojatno prenose u nadzemne organe transpiracijskom strujom, kroz ksilemske elemente zajedno s vodom, na što ukazuje dokazani porast transpiracije u biljaka izloženih nanoplastici (Azeem i sur. 2021, Ullah i sur. 2021). Nanoplastika se u biljci može kretati i akumulirati kao pojedinačne čestice, ali češće formira agregate. Agregati se akumuliraju u izdanku, listovima, i u plodovima, i postižu dimenzije do 700 nm (Azeem i sur. 2021).

Istraživanja učinka nanočestica na bazi ugljika su pokazala da nanočestice mogu narušiti integritet stanične stijenke i ući u prostor između stanične stijenke i membrane, iako su veće od normalnih pora u staničnoj stijenci (Gong i sur. 2021). Podatci o ovim nanočesticama se potencijalno mogu primijeniti na nanoplastiku, ali treba napomenuti da ponašanje nanoplastike nije u potpunosti istraženo.

Iako je u pitanju manja količina, nanoplastika prisutna u zraku može utjecati na biljke. Nanočestice koje se talože na listovima biljaka mogu ući u tkivo listova kroz puči (Campanale i sur. 2022). Nanoplastika koja uđe u listove može izazvati smanjenje površine listova i smanjiti stopu fotosinteze (Lian i sur. 2021, Sun i sur. 2021).

Ako nanočestice potiču od polimera koji sadrže nabijene skupine, naboj čestica također utječe na njihovo primanje i nakupljanje. Eksperimenti provedeni s PS-om modificiranim s amino- (PS-NH₂) i karboksilnim skupinama (PS-COOH) te nanesenim na listove kukuruza pokazuju da se pozitivno nabijena plastika (PS-NH₂) intenzivnije nakuplja na listovima jer stupa u interakciju s negativno nabijenim staničnim stijenkama. PS-NH₂ se manje translocira u druge dijelove biljke i formira veće agregate nego PS-COOH (Sun i sur. 2020).

U rizosferi, pozitivno nabijenu nanoplastiku jače privlači korijen, ali više se agregira na površini korijena nego negativno nabijena plastika koja više ulazi u tkivo i više se translocira u druge dijelove biljke. Izlučevine korijena smanjuju primanje PS-NH₂. PS-NH₂ koji uđe u provodne elemente formira veće agregate (Sun i sur. 2020).

Praćenje kretanja nanoplastike u biljkama nije u potpunosti istraženo jer tehnike za tu svrhu još nisu usavršene. Česta je uporaba fluorescentnih čestica nanoplastike koje se u biljci prate pomoću konfokalne fluorescentne mikroskopije i elektronske mikroskopije, ali u zelenim dijelovima biljaka nastaju problemi zbog autofluorescencije klorofila koja unosi pozadinske šumove u slike (Azeem i sur. 2021, Campanale i sur. 2022).

4.2. Utjecaj nanoplastike na rast i metabolizam biljaka

Utjecaj nanoplastike se djelomično preklapa s utjecajem mikroplastike, ali nanoplastika uglavnom ima značajniji utjecaj na oksidacijski stres i genotoksične učinke (Li i sur. 2019, Gong i sur. 2021, Campanale i sur. 2022).

Nanoplastika također ima negativan utjecaj na klijavost sjemena. Nano-PS smanjuje klijavost salate (*Lactuca sativa*), i ima kratkotrajne utjecaje na klijavost luka (*Allium cepa*), ali smanjuje rast korijena za 41,5% (Azeem i sur. 2021, Gong i sur. 2021). Princip djelovanja nanoplastike na klijavost je sličan djelovanju sitne mikroplastike. Čestice se nakupljaju u porama na sjemenoj lupini i remete primanje vode (Bosker i sur. 2019). Utjecaj na klijavost je nekonzistentan i, u slučaju pšenice, nano-PS čak potiče klijanje sjemena, ali pozitivni učinci su kratkotrajni jer nakon što biljka proklija, dolazi do pojačanog rasta korijena, a smanjenog rasta izdanka te pada razine mikronutrijenata pod utjecajem istog nano-PS (Lian i sur. 2020).

Zbog sposobnosti ulaska u biljku, nanoplastika može remetiti građu i funkciju stanične stijenke unutar biljke, što nije ograničeno samo na površinu korijena. Može blokirati protok u provodnim elementima, a kod kukuruza i pšenice je također uočeno odvajanje epiderme korijena pod utjecajem nanoplastike što za biljku predstavlja dodatni rizik (Gong i sur. 2021). Nanoplastika također utječe na rast korijena i, slično mikroplastici, učinak ovisi o biljnoj vrsti. Primjerice, nano-PS smanjuje biomasu korijena krastavca (*Cucumis sativum*) i kukuruza (*Zea mays*), ali povećava biomasu korijena pšenice (*Triticum aestivum*), ali uz pad razine mikronutrijenata mangana, željeza, bakra, i cinka i porasta dušika i ugljika (Azeem i sur. 2021, De Silva i sur. 2021). Utjecaj nanoplastike na pšenicu je sličan utjecaju mikroplastike na tu biljnu vrstu - dolazi do produljenja korijena i pada omjera biomase izdanka i korijena (Campanale i sur. 2022).

Nanoplastika u više biljaka ima potvrđen citotoksični i genotoksični učinak i dovodi do oksidacijskog stresa. Primarni mehanizam indukcije stresa je vjerojatno vezanje čestica plastike na površinu stanica u vanjskim slojevima korijena, ulazak i kompartmentalizacija čestica u stanicama (Giorgetti i sur. 2020), blokiranje toka vode i nutrijenata kroz provodne elemente i remećenje komunikacije između stanica (Jiang i sur. 2019). Transmisijskom elektronskom mikroskopijom (TEM) praćene su čestice nano-PS-a u stanicama luka (*Allium cepa*). U citoplazmi i vakuoli nađene su čestice nano-PS-a veličine u rasponu od 25 do 130 nm. Čestice veličine 25 nm također su nađene unutar jezgre što ukazuje na potencijalan utjecaj nanoplastike na strukturu i funkciju kromatina, što bi moglo objasniti cito- i genotoksične

učinke koji su prikazani kao smanjen mitotski indeks i pojava kromosomskih aberacija (Azeem i sur. 2021).

Nano-PS nanesen na listove salate izaziva pad razina mikronutrijenata, stabilnih antioksidansa, aminokiselina, i topivih proteina što rezultira značajnim oksidacijskim stresom, i smanjenim rastom listova u odnosu na netretirane biljke. Nanesena na listove kukuruza smanjuje stopu fotosinteze i izaziva oksidacijski stres (Lian i sur. 2021, Sun i sur. 2021).

5. PROMJENE MIKROBIOMA TLA

Mikroplastika u tlu sadrži veliku količinu ugljika, ali taj ugljik je većinom inertan, osim kod biorazgradive plastike. Inertne čestice plastike mogu na svojoj površini imobilizirati veliku količinu mikroorganizama koji su inače slobodniji u rahlijem tlu (Rillig i sur. 2019).

Na površini čestica mikroplastike se formira zajednica mikroorganizama koje su Zettler i sur. (2013) prozvali „plastisfera.“ Na česticama može doći do formiranja biofilмова koji smanjuju hidrofobnost čestica plastike, utječu na interakcije s teškim metalima u tlu i povećavaju gustoću plastike što olakšava prijenos u dublje slojeve tla. Postoje teorije i da ove plastisfere na mikroplastici omogućuju globalni geografski prijenos mikroorganizama u nove regije (Zettler i sur. 2013, Zong i sur. 2021, Sajjad i sur. 2022).

Mikroplastika u tlu utječe na simbiotske bakterije i mikorizne gljive što direktno utječe na biljke koje su u zajednicama s tim organizmima (Rillig i sur. 2019). Nakupljanje mikroplastike mijenja ravnotežu vrsta i rodova mikroorganizama i gljiva u tlu i dugoročno smanjuje bioraznolikost mikroorganizama u tlu (Wang i sur. 2020). Polivinil klorid (PVC) uz promjene bioraznolikosti također mijenja količinu biološki dostupnog fosfora u tlu (Ullah i sur. 2021).

Oblik čestica mikroplastike utječe i na mikroorganizme u tlu – vlaknasta mikroplastika najznačajnije snižava aktivnost i bioraznolikost mikroorganizama u tlu, što je vjerojatno povezano s utjecajem vlaknaste mikroplastike na agregaciju tla (Tang 2020, Sajjad i sur. 2022).

Aktivnost različitih enzima se mijenja u prisutnosti mikroplastike. PVC i PE u tlu u koncentracijama od 1% i 5% stimulira aktivnost ureaza i kiselih fosfataza, a inhibira fluorescein diacetat hidrolaze. Pri većim koncentracijama PP-a (7% i 28%) unutar 14 dana raste količina otopljene organske tvari u tlu (DOM – dissolved organic matter). Raspad organske

tvori povezan je s povišenom aktivnosti fenol oksidaza koje razgrađuju spojeve velike molekulske mase i povećavaju količinu ugljika dostupnog mikrobima (Tang 2020, Campanale i sur. 2022).

Na mikroorganizme također utječe sposobnost mikroplastike da adsorbira metalne ione i organska onečišćenja poput pesticida, lijekova, i policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH) koji se ovim putem akumuliraju u tlu i postupno otpuštaju što utječe na mikroorganizme i na biljke (Wang i sur. 2020, Sajjad i sur. 2022)

6. MEĐUDJELOVANJE MIKROPLASTIKE S DRUGIM OBLICIMA ZAGAĐENJA

6.1. Interakcije mikroplastike i teških metala

U realnim uvjetima, mikroplastika često ne djeluje sama, nego su istovremeno prisutni različiti oblici zagađenja. Jedan od čestih oblika zagađenja je višak metala u tlu i mikroplastika mijenja interakcije metala i biljaka na različite načine.

U pokusima s česticama PS-a veličine 1 i 5 μm koje su bile prisutne zajedno s ionskim arsenom, dokazano je da čestice plastike veličine 1 μm lakše ulaze u korijen mrkve jer arsen dodatno narušava integritet staničnih stijenki (Dong i sur. 2021). Ovo je primjer interakcije u kojoj negativni učinci mikroplastike i teških metala djeluju sinergistički.

U drugom istraživanju s mikro-PS-om i ionskim kadmijem i bakrom, uočeno je da mikro-PS nema značajne učinke na klijance pšenice, dok kadmij i bakar potiču stvaranje ROS-ova. U uvjetima rasta s kadmijem i bakrom zajedno s mikro-PS-om, negativni učinci kadmija i bakra su umanjeni u odnosu na uvjete samo s kadmijem i bakrom (Zong i sur. 2021). Mikroplastika može adsorbirati metalne ione, čime oni postaju manje dostupni biljkama. Prisutnost biofilmova na česticama plastike dodatno smanjuje dostupnost teških metala putem interakcija mikroba s metalima i stvaranjem stabilnih kompleksa iona teških metala i organskih spojeva u biofilmu. Metalni ioni se vežu na amino, karboksilne i hidroksilne skupine u biofilmovima na česticama mikroplastike (Guan i sur. 2020). Daljnja istraživanja su potrebna kako bi se opisale interakcije teških metala s nanoplastikom i vrlo malom mikroplastikom, jer bi čestice plastike

koje su dovoljno male da uđu u biljku, mogle imati suprotni učinak i povećavati akumulaciju teških metala u biljkama (Zong i sur. 2021).

Metalni ioni se jače vežu na čestice mikroplastike u slučaju starije, potrošene plastike nego u slučaju nove, neoštećene, *virgin* („djevičanske“) plastike, vjerojatno zbog grublje površine, tj. veće ukupne površine te vezane organske tvari i mikroba. Rad na ovoj problematici je u tijeku jer velik dio dosadašnjih istraživanja koristi isključivo svježu mikroplastiku proizvedenu za eksperimente, koja se značajno razlikuje od one prisutne u okolišu po sposobnosti adsorpcije metalnih iona (Turner i Holmes 2015).

6.2. Interakcije mikroplastike i organskih onečišćenja

Plastika u svojem sastavu često sadrži značajnu količinu aditiva poput ftalata i ftalatih estera (do 4% masenog udjela). Ftalati su hidrofobne molekule i adsorbiraju se na čestice hidrofobne plastike i postupno otpuštaju u okoliš. Oni se lako ispiru iz plastike mnogo ranije nego što se plastika počne raspadati i na organizme u tlu mogu imati toksični, pa čak i letalni učinak (Sajjad i sur. 2022).

PE koji je zbog uporabe plastičnih folija sveprisutan i, budući da je hidrofoban, potencijalno može adsorbirati hidrofobne pesticide kao i druga organska onečišćenja te stvarati lokalne promjene u koncentraciji spojeva u tlu (Sajjad i sur. 2022). Za PET je dokazano da može adsorbirati policikličke aromatske ugljikovodike (PAH) i transportirati ih dublje u tlo i u rizosferu. PAH-ovi poput fenantrena i naftalena se mogu desorbirati u rizosferi i primiti u biljku, pa i završiti u jestivim dijelovima biljke i postati izvor ovih spojeva za ljude (Abbasi i sur. 2016).

Plastika također sadrži, i često međudjeluje s mnogim poznatim toksičnim spojevima poput polikloriranih bifenila, dioksina, i bromiranih spojeva koji su danas zabranjeni, ali prisutni u plastici koja je otprije u okolišu (Nizzetto i sur. 2016). Mikroplastika također može adsorbirati antibiotike u otopini koji, ako se desorbiraju u rizosferi, biljka može primiti i akumulirati. Antibiotici imaju direktan fitotoksični učinak na biljke i akumuliraju se u izdanku, listovima, i plodovima. Ekološke posljedice i potencijalan utjecaj na ljude koji konzumiraju biljke zagađene antibioticima je potrebno istražiti (Ullah i sur. 2021).

U prethodnom poglavlju spomenuto je da nova, neoštećena plastika stupa u slabije interakcije s metalima. U slučaju organskih onečišćenja, nova *virgin* plastika u sebi sadrži više

spojeva preostalih iz procesa proizvodnje koji se mogu lako isprati u okolinu, i sadrži više slabije vezanih aditiva koji se sporije ispiru (de Souza Machado i sur. 2019).

7. POTENCIJALAN UTJECAJ NA ORGANIZME U TLU I OSTALE ORGANIZME U HRANIDBENOJ MREŽI

Problematika utjecaja mikroplastike i nanoplastike nije ograničena samo na biljke. Negativan utjecaj na usjeve može smanjiti prinose u poljoprivredi, a u slučaju plastike koja se prima u biljke, predstavlja potencijalan izvor mikroplastike za organizme koji se hrane biljkama (Ullah i sur. 2021). Također, biljke u tlu nisu izolirane od ostalih organizama. U stalnoj su interakciji s brojnim mikroorganizmima, člankonošcima, oblicima, i kolutićavcima na koje plastika može utjecati.

Fragmenti plastičnih folija, i klasičnih na bazi PE-a ili PET-a i onih na bazi biorazgradivih polimera, imaju negativan utjecaj na populaciju gujavica (*Lumbricus terrestris*) u tlu. Biorazgradiva plastika značajnije smanjuje masu gujavica, ali PET uz smanjenje mase ima izražen negativan utjecaj i na razmnožavanje gujavica, do mjere da ga može zaustaviti (Qi i sur. 2018).

Utjecaj mikroplastike ovisi o veličini životinja. Kod manjih životinja poput kukaca i oblića učinci su često raznolikiji i imaju teže posljedice, dok su kod većih životinja poput glodavaca ograničeni na probavilo i manje drastični. Kukci *Folsomia candida* izloženi mikroplastici u tlu imaju promijenjen mikrobiom probavila. Kod riba zebrica (*Danio rerio*) mikro-PS izaziva iritaciju crijeva, a kod miševa može doći do zastoja rada crijeva (Sajjad i sur. 2022). U istraživanjima s glodavcima, nađeno je da se plastika konzumirana u hrani većinom eliminira i manje od 1% se apsorbira u tkivo, ali i ta manja frakcija koja se apsorbira ne dospije duboko u organe (Bouwmeester i sur. 2015).

Trenutna istraživanja uglavnom pokazuju da je glavni rizik za ljude otpuštanje aditiva iz plastike i interakcije s drugim potencijalno štetnim spojevima, a sama plastika koja je eventualno prisutna u hrani se eliminira (Shen i sur. 2019, Campanale i sur. 2022). Daljnja istraživanja su potrebna kako bi se učinci razjasnili i kvantificirali.

Podatci o široj prisutnosti mikroplastike u hrani su još uvijek oskudni, ali značajna količina mikroplastike manje od 3 μm jest prisutna u svakodnevnim namirnicama poput mrkve, jabuka,

i zelene salate. U plodovima jabuke je nađena najveća prosječna količina mikroplastike (~200 000 čestica po gramu suhe tvari), dok su najveće čestice nađene u listovima salate (2,52 μm) (Oliveri Conti i sur. 2020).

8. ZAKLJUČAK

S konstantnim rastom proizvodnje plastike i procesima recikliranja i sanacije otpada koji kaskaju za stopom proizvodnje, količina plastike koja završava u okolišu postaje sve veći problem. Nakupljanje mikroplastike u tlu ima negativne učinke na poljoprivredne biljke. Uzrokuje smanjenja rasta i poremećaje metabolizma, što konačno može smanjiti prinose. Mikroplastika također mijenja fizikalno-kemijska svojstva i mikrobiom tla te može ubrzati isušivanje tla, što je osobito problematično u današnje vrijeme nepredvidivih klimatskih promjena. Budući da je plastika samo jedan od brojnih oblika nekontroliranog zagađenja u modernom dobu, potrebno je istraživati i interakcije mikroplastike i teških metala, pesticida, i drugih organskih onečišćenja.

Istraživanje učinaka mikroplastike na biljke još je uvijek relativno novo područje i na mnoga pitanja još nema cjelovitog odgovora. Mnogi eksperimenti nisu reprezentativni jer se uglavnom izvode u kraćem vremenu, u kontroliranim uvjetima, i s plastikom koja se razlikuje od one u prirodi. Potrebno je specifično istražiti utjecaj mikroplastike na prinose u poljoprivredi istraživanjima na biljkama tijekom cijele poljoprivredne sezone te na poljima umjesto u loncima sa zemljom ili u hidroponskim sustavima.

Mikroplastika prisutna u jestivim dijelovima biljaka može dospjeti u konzumente i stoga je potrebno istražiti njezin učinak na ljude i životinje. Velik dio podataka još nije dobro kvantificiran i mnogi se stavovi temelje na pretpostavkama. I kad bi se plastika uskoro u potpunosti prestala koristiti, zbog sporog raspada i velike već prisutne količine u okolišu, ona ostaje kao problem za buduće generacije. Ako se zagađenje plastikom i neodgovorna uporabe jednokratne plastike značajno ne umanje, prinosi u poljoprivrednoj proizvodnji bi se mogli smanjiti i uzrokovati osjetno smanjenje količine raspoložive hrane.

U razvoj bioplastike je potrebno više ulagati kako bi se razvili polimeri sa što manjim negativnim učincima na biljke čime bi se iz poljoprivrede uklonila nerazgradiva jednokratna plastika.

9. LITERATURA

- Abbasi, S., Moore, F., & Keshavarzi, B. (2021). PET-microplastics as a vector for polycyclic aromatic hydrocarbons in a simulated plant rhizosphere zone. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101370. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101370>
- Azeem, I., Adeel, M., Ahmad, M. A., Shakoor, N., Jiangcuo, G. D., Azeem, K., Ishfaq, M., Shakoor, A., Ayaz, M., Xu, M., & Rui, Y. (2021). Uptake and accumulation of nano/microplastics in plants: A critical review. *Nanomaterials*, 11(11), 2935. <https://doi.org/10.3390/nano11112935>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>
- Bouwmeester, H., Hollman, P. C. H., & Peters, R. J. B. (2015). Potential health impact of environmentally released micro- and nanoplastics in the human food production chain: experiences from nanotoxicology. *Environmental Science & Technology*, 49(15), 8932–8947. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01090>
- Campanale, C., Galafassi, S., Savino, I., Massarelli, C., Ancona, V., Volta, P., & Uricchio, V. F. (2022). Microplastics pollution in the terrestrial environments: Poorly known diffuse sources and implications for plants. *Science of the Total Environment*, 805, 150431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150431>
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., Abu-Omar, M., Scott, S. L., & Suh, S. (2020). Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494–3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
- Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2019). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of the Total Environment*, 671, 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>
- De Silva, Y. S. K., Rajagopalan, U. M., & Kadono, H. (2021). Microplastics on the growth of plants and seed germination in aquatic and terrestrial ecosystems. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 7(3). <https://doi.org/10.22034/GJESM.2021.03.03>
- de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., Becker, R., Görlich, A. S., & Rillig, M. C. (2019). Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental Science & Technology*, 53(10), 6044–6052. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>

- 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*, 411, 125055. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125055>
- Giorgetti, L., Spanò, C., Muccifora, S., Bottega, S., Barbieri, F., Bellani, L., & Ruffini Castiglione, M. (2020). Exploring the interaction between polystyrene nanoplastics and *Allium cepa* during germination: Internalization in root cells, induction of toxicity and oxidative stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 149, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.014>
- Gong, W., Zhang, W., Jiang, M., Li, S., Liang, G., Bu, Q., Xu, L., Zhu, H., & Lu, A. (2021). Species-dependent response of food crops to polystyrene nanoplastics and microplastics. *Science of the Total Environment*, 796, 148750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148750>
- Jiang, X., Chen, H., Liao, Y., Ye, Z., Li, M., & Klobučar, G. (2019). Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*. *Environmental Pollution*, 250, 831–838. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.055>
- Li, L., Zhou, Q., Yin, N., Tu, C., & Luo, Y. (2019). Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant. *Chinese Science Bulletin*, 64(9), 928–934. <https://doi.org/10.1360/N972018-00845>
- Li, S., Wang, T., Guo, J., Dong, Y., Wang, Z., Gong, L., & Li, X. (2021). Polystyrene microplastics disturb the redox homeostasis, carbohydrate metabolism and phytohormone regulatory network in barley. *Journal of Hazardous Materials*, 415, 125614. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125614>
- Lian, J., Liu, W., Meng, L., Wu, J., Chao, L., Zeb, A., & Sun, Y. (2021). Foliar-applied polystyrene nanoplastics (PSNPs) reduce the growth and nutritional quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Environmental Pollution*, 280, 116978. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116978>
- Lian, J., Wu, J., Xiong, H., Zeb, A., Yang, T., Su, X., Su, L., & Liu, W. (2020). Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Hazardous Materials*, 385, 121620. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121620>
- Lithner, D., Damberg, J., Dave, G., & Larsson, Å. (2009). Leachates from plastic consumer products – Screening for toxicity with *Daphnia magna*. *Chemosphere*, 74(9), 1195–1200. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.022>
- Liu, Y., Guo, R., Zhang, S., Sun, Y., & Wang, F. (2022). Uptake and translocation of nano/microplastics by rice seedlings: Evidence from a hydroponic experiment. *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126700. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126700>

- Nizzetto, L., Futter, M., & Langaas, S. (2016). Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science & Technology*, *50*(20), 10777–10779. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140>
- Oliveri Conti, G., Ferrante, M., Banni, M., Favara, C., Nicolosi, I., Cristaldi, A., Fiore, M., & Zuccarello, P. (2020). Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research*, *187*, 109677. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>
- Palmer, R. J. (2001). Polyamides, Plastics. U: *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. John Wiley & Sons, Inc., str. 618-643. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst251>
- Qi, Y., Yang, X., Pelaez, A. M., Huerta Lwanga, E., 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.229>
- Ramos, L., Berenstein, G., Hughes, E. A., Zalts, A., & Montserrat, J. M. (2015). Polyethylene film incorporation into the horticultural soil of small periurban production units in Argentina. *Science of the Total Environment*, *523*, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.142>
- Rillig, M. C., Lehmann, A., Souza Machado, A. A., & Yang, G. (2019). Microplastic effects on plants. *New Phytologist*, *223*(3), 1066–1070. <https://doi.org/10.1111/nph.15794>
- Sajjad, M., Huang, Q., Khan, S., Khan, M. A., Liu, Y., Wang, J., Lian, F., Wang, Q., & Guo, G. (2022). Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation*, *27*, 102408. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>
- Shen, M., Zhang, Y., Zhu, Y., Song, B., Zeng, G., Hu, D., Wen, X., & Ren, X. (2019). Recent advances in toxicological research of nanoplastics in the environment: a review. *Environmental Pollution*, *252*, 511–521. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.102>
- Silva, G. C., Galleguillos Madrid, F. M., Hernández, D., Pincheira, G., Peralta, A. K., Urrestarazu Gavilán, M., Vergara-Carmona, V., & Fuentes-Peñailillo, F. (2021). Microplastics and their effect in horticultural crops: food safety and plant stress. *Agronomy*, *11*(8), 1528. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081528>
- Southward, C. R. (1994). Utilisation of milk components: casein. U: Robinson, R. K. (ur.) *Modern dairy technology*. Springer US, str. 375-432 https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2057-3_8

- Sun, H., Lei, C., Xu, J., & Li, R. (2021). Foliar uptake and leaf-to-root translocation of nanoplastics with different coating charge in maize plants. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125854. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125854>
- Sun, X.-D., Yuan, X.-Z., Jia, Y., Feng, L.-J., Zhu, F.-P., Dong, S.-S., Liu, J., Kong, X., Tian, H., Duan, J.-L., Ding, Z., Wang, S.-G., & Xing, B. (2020). Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nature Nanotechnology*, 15(9), 755–760. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>
- Tang, K. H. D. (2020). Effects of microplastics on agriculture: A mini-review. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 1–9. <https://doi.org/10.9734/ajee/2020/v13i130170>
- Thompson, R. C., Swan, S. H., Moore, C. J., & vom Saal, F. S. (2009). Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1973–1976. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0054>
- Tian, L., Jinjin, C., Ji, R., Ma, Y., & Yu, X. (2022). Microplastics in agricultural soils: Sources, effects, and their fate. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100311. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100311>
- Turner, A., & Holmes, L. A. (2015). Adsorption of trace metals by microplastic pellets in fresh water. *Environmental Chemistry*, 12(5), 600. <https://doi.org/10.1071/EN14143>
- Ullah, R., Tsui, M. T., Chen, H., Chow, A., Williams, C., & Ligaba-Osena, A. (2021). Microplastics interaction with terrestrial plants and their impacts on agriculture. *Journal of Environmental Quality*, 50(5), 1024–1041. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20264>
- Wan, Y., Wu, C., Xue, Q., & Hui, X. (2019). Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of the Total Environment*, 654, 576–582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>
- Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., & Sun, Y. (2020). Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere*, 254, 126791. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126791>
- Weber, C. J., Santowski, A., & Chiffard, P. (2022). Investigating the dispersal of macro- and microplastics on agricultural fields 30 years after sewage sludge application. *Scientific Reports*, 12(1), 6401. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10294-w>
- Wu, X., Liu, Y., Yin, S., Xiao, K., Xiong, Q., Bian, S., Liang, S., Hou, H., Hu, J., & Yang, J. (2020). Metabolomics revealing the response of rice (*Oryza sativa* L.) exposed to polystyrene microplastics. *Environmental Pollution*, 266, 115159. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115159>

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.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146546>

Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. (2013). Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7137–7146.

<https://doi.org/10.1021/es401288x>

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.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 112217.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112217>

ŽIVOTOPIS

Rođen sam 2000. u Zagrebu. Osnovnu školu sam završio u Osnovnoj školi Sveta Nedelja (Područna škola Rakitje). Nakon osnovne škole pohađao sam Prirodoslovnu školu Vladimira Preloga, smjer Prirodoslovna gimnazija. 2019. godine upisao sam Preddiplomski studij molekularne biologije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.