Pregledni članak | Review paper | UDK: 504.5:678
Primljeno (Received): 25.02.2026; Prihvaćeno (Accepted): 17.07.2026.

MIKROPLASTIKA U OKOLIŠU: IZVORI, RASPROSTRANJENOST I EKOLOŠKI UČINCI U KONTEKSTU EKOLOŠKOG OTISKA, ODRŽIVOG RAZVOJA I OBRAZOVANJA

Milica Nedeljković, mag. educ. biol. et chem.
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku,
Fakultet za odgojne i obrazovne znanosti
Vukajlova ulica 41, Bobota, Hrvatska
mnedeljkovic@foozos.hr

Mikroplastika predstavlja jedan od najsloženijih i najraširenijih suvremenih okolišnih problema zbog svoje globalne rasprostranjenosti, dugotrajnosti i kumulativnih učinaka na prirodne i društvene sustave. Definira se kao plastične čestice manje od 5 mm koje nastaju fragmentacijom većih plastičnih proizvoda ili se namjerno proizvode kao primarne mikročestice za industrijsku i potrošačku uporabu. Znanstvena istraživanja potvrđuju prisutnost mikroplastike u svim okolišnim medijima, uključujući vodene, kopnene i atmosferske sustave, pri čemu ona pokazuje sposobnost dugotrajnog zadržavanja i bioakumulacije u živim organizmima. Negativni učinci mikroplastike očituju se kroz poremećaje bioloških procesa, promjene u strukturi i funkciji ekosustava te narušavanje hranidbenih mreža. Osim ekoloških i bioloških posljedica, mikroplastika značajno doprinosi povećanju ekološkog otiska suvremenih društava, budući da je usko povezana s linearnim modelima proizvodnje, potrošnje i gospodarenja otpadom. Time mikroplastika predstavlja prepreku ostvarivanju ciljeva održivog razvoja, osobito onih vezanih uz očuvanje ekosustava, sigurnost hrane i kvalitetu života. Globalni karakter problema dodatno potvrđuju recentne sintezne studije koje naglašavaju složene interakcije mikroplastike unutar ekosustava i njezinu sposobnost prijenosa između različitih okolišnih medija.

Ključne riječi: ekološki otisak, ekološki učinci, kopneni i vodeni ekosustavi, mikroplastika, obrazovanje za održivi razvoj, onečišćenje okoliša

1. UVOD

Plastika je postala neizostavan dio suvremenog društva zbog svoje svestranosti, niske cijene i široke primjene u gotovo svim sektorima ljudske djelatnosti. Međutim, intenzivna proizvodnja i potrošnja plastike, uz neadekvatno gospodarenje plastičnim otpadom, dovela je do ozbiljnih okolišnih problema koji se očituju na globalnoj razini. Poseban izazov predstavlja pojava mikroplastike, sitnih plastičnih čestica koje zbog svoje veličine, postojanosti i rasprostranjenosti predstavljaju jedan od najsloženijih oblika onečišćenja suvremenog okoliša (Thompson i dr. 2004).

Mikroplastika se definira kao plastične čestice manje od 5 mm koje nastaju fragmentacijom većih plastičnih proizvoda ili se namjerno proizvode kao primarne mikročestice za industrijsku, kozmetičku i potrošačku uporabu. Zbog svoje male veličine lako prodire u različite okolišne medije, uključujući vodu, tlo i zrak te postaje dostupna širokom spektru organizama. Znanstvena istraživanja potvrđuju da mikroplastika može biti unesena u organizme različitih trofičkih razina, gdje se zadržava i akumulira, uzrokujući mehaničke, kemijske i biološke učinke (Andrady, 2011; Rochman i dr. 2016). Dodatno, recentne studije upozoravaju na potrebu standardizacije terminologije i metodoloških pristupa kako bi se omogućila usporedivost rezultata istraživanja mikroplastike (Hartmann i dr. 2019).

Problem mikroplastike nadilazi granice pojedinih ekosustava i država, što ga čini globalnim okolišnim izazovom. Prisutnost mikroplastike zabilježena je ne

samo u gusto naseljenim i industrijskim područjima, već i u udaljenim i naizgled netaknutim okolišima, poput planinskih i polarnih regija. Takva rasprostranjenost ukazuje na njezinu visoku mobilnost i dugotrajno zadržavanje u okolišu, kao i na složene putove prijenosa između kopnenih, vodenih i atmosferskih sustava (Allen i dr. 2019). Posebno važnu ulogu u globalnom prijenosu mikroplastike imaju slatkovodni sustavi, koji djeluju kao poveznica između kopnenih izvora i morskih ekosustava (Li i dr. 2018).

Osim izravnih ekoloških i bioloških učinaka, mikroplastika je usko povezana s konceptom ekološkog otiska i održivog razvoja. Njezina prisutnost odražava neodržive obrasce proizvodnje i potrošnje te linearne modele gospodarenja resursima koji rezultiraju akumulacijom otpada u okolišu. Na taj način mikroplastika postaje pokazatelj dugoročnog pritiska ljudskih aktivnosti na prirodne sustave i prepreka ostvarenju ciljeva održivog razvoja (Galloway i dr. 2017).

S obzirom na složenost problema i njegove dugoročne posljedice, nužno je integrirano i interdisciplinarno sagledavanje mikroplastike koje uključuje prirodoslovne, društvene i obrazovne perspektive. Upravo stoga ovaj pregledni članak nastoji pružiti cjelovit uvid u problematiku mikroplastike u okolišu, s posebnim naglaskom na njezine izvore, rasprostranjenost, ekološke učinke te implikacije na održivi razvoj i obrazovne sustave.

2. METODOLOGIJA

Cilj ovoga preglednog članka jest sintetizirati relevantne znanstvene spoznaje o izvorima, rasprostranjenosti i ekološkim učincima mikroplastike, s posebnim naglaskom na njezinu povezanost s ekološkim otiskom i održivim razvojem te na mogućnosti integracije ove tematike u obrazovne i kurikularne pristupe radi razvoja ekološke svijesti i odgovornoga ponašanja mladih. Metodološki okvir rada oslanja se na načela Preporučenih stavki za izvještavanje o sustavnim pregledima i metaanalizama (engl. *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*, PRISMA), kako bi proces identifikacije, selekcije i sinteze izvora bio jasan i ponovljiv (Page i dr. 2021; Moher i dr. 2009).

Rad je strukturiran kao pregledni znanstveni članak temeljen na sustavnom pregledu relevantne znanstvene literature dostupne u bazama Web of Science (WOS) i Scopus. Odabrani su radovi objavljeni u recenziranim časopisima koji se bave pojavom, rasprostranjenošću, ekološkim i biološkim učincima mikroplastike u okolišu. Kriteriji uključivanja radova obuhvaćali su tematsku relevantnost, metodološku jasnoću i interdisciplinarnu vrijednost (Grant i Booth, 2009).

Dizajn rada odgovara narativnom pregledu s elementima sustavno organiziranog pretraživanja i odabira, pri čemu je proces rada vođen SALSA okvirom (engl. *Search–Appraisal–Synthesis–Analysis*), koji jasno razdvaja faze pretraživanja, procjenu kvalitete, sintezu i analizu literature (Grant i Booth 2009). Pritom je u obzir uzeta potreba za terminološkom i klasifikacijskom usklađenošću u području mikroplastike, jer razlike u definicijama (npr. veličinski razredi, oblici, porijeklo) mogu otežati usporedbu rezultata i zaključivanje (Hartmann i dr. 2019).

Pretraživanje je provedeno u bazama znanstvenih radova Web of Science (WOS) i Scopus, jer omogućuju širok uvid u recenziranu literaturu iz okolišnih znanosti, ekologije i interdisciplinarnih područja. U pretraživanju su korištene kombinacije ključnih riječi na engleskom jeziku i Booleovi operatori, primjerice: "microplastic*" AND (environment OR marine OR freshwater OR soil OR atmosphere) te "microplastic*" AND (ecological effect* OR bioaccumulation OR food web), uz dodatne pojmove povezane s održivim razvojem i obrazovanjem. Vremenski raspon pretraživanja bio je usmjeren na razdoblje od seminalnih radova koji su otvorili temu mikroplastike do recentnih sinteznih te izvora strateških i političkih dokumenata (Thompson i dr. 2004 ; UNEP 2021). Odabir literature usklađen je s recentnim preporukama za standardizaciju terminologije i klasifikacije mikroplastike u znanstvenim istraživanjima (Hartmann i dr. 2019).

Kriteriji uključivanja definirani su unaprijed: (1) radovi objavljeni u recenziranim časopisima; (2) radovi koji izravno obrađuju mikroplastiku (≤ 5 mm) u barem jednom okolišnom mediju (voda, tlo ili zrak) ili kroz prijenos između medija; (3) radovi s jasnim opisom uzorkovanja i/ili analitičke identifikacije čestica ili pregledni radovi s eksplicitnim kriterijima; (4) radovi koji izvještavaju o ekološkim i biološkim učincima (npr. hranjenje, rast, reprodukcija, promjene u mikrobiološkim zajednicama) ili omogućuju interpretaciju u okviru održivog razvoja (Andrady 2011; Rochman i dr. 2016; Rillig i dr. 2019). Kriteriji isključivanja obuhvatili su radove bez dostupnog punog teksta, radove bez metodološke jasnoće te radove fokusirane isključivo na makroplastiku bez veze s mikroplastikom.

Selekcija literature provedena je kroz više uzastopnih koraka koji su obuhvatili pregled naslova i sažetaka, procjenu cjelovitih tekstova te odabir radova prema unaprijed definiranim kriterijima uključivanja i isključivanja. Pri tome su primijenjena načela transparentnog prikaza postupka pretraživanja i odabira literature, u skladu s preporukama za pregledne radove (Page i dr. 2021; Grant i Booth 2009). Budući da je riječ o narativnom preglednom članku, a ne o sustavnom pregledu ili metaanalizi, nije vođena numerička evidencija svih faza selekcije literature.

Iz svakog uključenog izvora ekstrahirane su ključne informacije: okolišni medij i lokacija istraživanja, tip mikroplastike (primarna/sekundarna), njezin veličinski razred i morfologija (npr. vlakna, fragmenti), dominantni izvori i putevi unosa (otpadne vode, promet, tekstil, ambalaža, poljoprivredne prakse), korištene metode detekcije/identifikacije te opisani ekološki i biološki učinci. Posebna pozornost posvećena je radovima koji tematiziraju prijenos mikroplastike između kopnenih,

Tablica 1: Kriteriji uključivanja/isključivanja i izvori podataka

Element	Opis
Baze podataka	Web of Science; Scopus (recenzirani znanstveni radovi).
Vrsta pregleda	Pregledni članak s narativnom sintezom; proces vođen SALSA okvirom.
Kriteriji uključivanja	Recenzirani radovi; mikroplastika ≤ 5 mm; voda/tlo/zrak; jasna metodologija; relevantni učinci ili održivi razvoj.
Kriteriji isključivanja	Nedostupan cjeloviti tekst; metodološka nejasnoća; fokus isključivo na makroplastiku bez poveznice s mikroplastikom.
Tematski blokovi sinteze	Izvori; rasprostranjenost/prijenos; ekološki učinci; održivi razvoj i obrazovanje.
Okvir izvještavanja	Prema PRISMA načelima za transparentan prikaz identifikacije i selekcije literature.

slatkovodnih i morskih sustava (Li i dr. 2018) te atmosferski transport na velike udaljenosti (Allen i dr. 2019), jer takvi nalazi i podaci doprinose razumijevanju globalne rasprostranjenosti mikroplastike.

Procjena pouzdanosti dokaza provedena je kvalitativno kroz vrednovanje metodološke jasnoće (opis uzorkovanja, kriteriji identifikacije i dosljednost izvještavanja), što je uobičajeno za pregledne radove koji ne provode metaanalizu (Grant i Booth 2009). Zbog heterogenosti dizajna uključenih studija i mjerenih ishoda rezultati su objedinjeni narativnom sintezom te organizirani u tematske cjeline koje obuhvaćaju izvore i vrste mikroplastike, njezinu rasprostranjenost i prijenos u okolišu, ekološke i biološke učinke, povezanost s ekološkim otiskom i održivim razvojem te implikacije za obrazovanje i kurikularne pristupe (Geyer i dr. 2017; UNEP 2021). Takav način organizacije omogućio je cjelovitu interpretaciju dostupnih znanstvenih spoznaja u skladu sa strukturom rada i tematskim blokovima prikazanim u tablici 1.

S obzirom na to da se u radu koristi isključivo objavljena literatura, formalno etičko odobrenje istraživanja, budući da rad ne uključuje primarne pokuse, nije bilo potrebno. Ograničenja metodologije uključuju razlike u terminologiji i klasifikaciji mikroplastike (Hartmann i dr. 2019), varijabilnost analitičkih metoda te potencijalnu pristranost u objavljivanju. Unatoč tome, transparentno opisani koraci pretraživanja, selekcije i sinteze, u skladu s PRISMA načelima, povećavaju vjerodostojnost i korisnost preglednih zaključaka (Page i dr. 2021).

3. REZULTATI I RASPRAVA

3.1. Izvori i vrste mikroplastike

Mikroplastika se prema podrijetlu dijeli na primarnu i sekundarnu. Primarna mikroplastika obuhvaća čestice koje se izvorno proizvode u veličini manjoj od 5 mm za industrijsku, kozmetičku i drugu potrošačku primjenu. Sekundarna mikroplastika nastaje fragmentacijom većih plastičnih proizvoda pod utjecajem različitih fizikalnih, kemijskih i mehaničkih procesa, uključujući fotolizu, UV zračenje, hidrolitičku razgradnju, abraziju i trošenje, pri čemu nastaju sitne plastične čestice i mikrovlakna (Andrady 2011; Hartmann i dr. 2019).

Procjenjuje se da najveći doprinos imaju sintetički tekstil (oko 35 %) i abrazija automobilskih guma (oko 28 %), koji zajedno čine gotovo dvije trećine ukupne mikroplastike dospjele u okoliš. Značajni izvori uključuju i gradsku prašinu, oznake na cestama, premaze plovila te proizvode za osobnu njegu koji sadrže primarne plastične mikročestice (Boucher i Friot 2017; UNEP 2021).

Uređaji za pročišćavanje otpadnih voda važan su izvor mikroplastike u vodenim ekosustavima.. Premda suvremeni uređaji mogu ukloniti više od 90 % većih mikroplastičnih čestica, zbog iznimno velikih količina obrađene vode značajan broj sitnih čestica svakodnevno prolazi kroz sustave pročišćavanja i dospijeva u rijeke i jezera. Dodatni problem predstavlja mulj nastao tijekom pročišćavanja, koji zadržava velik dio mikroplastike te se njegovom primjenom u poljoprivredi mikroplastika ponovno vraća u okoliš i kopnene ekosustave (Iyare i dr. 2020; Miino i dr. 2024).

3.2. Rasprostranjenost mikroplastike u okolišu

Mikroplastika je danas prisutna u svim glavnim okolišnim medijima – vodenim, kopnenim i atmosferskim – uključujući i udaljena područja bez izravnog antropogenog utjecaja. Njezina globalna rasprostranjenost rezultat je različitih putova prijenosa između okolišnih sustava, pri čemu slatkovodni ekosustavi čine važnu poveznicu između kopnenih izvora i morskih područja (Li i dr. 2018), dok atmosferski transport omogućuje prijenos čestica na velike udaljenosti (Allen i dr. 2019).

Vodeni ekosustavi smatraju se glavnim izvorištem mikroplastike. Velike količine plastičnog otpada dospijevaju u rijeke i mora putem urbanih otpadnih voda, oborinskog otjecanja i industrijskih ispuštanja. Iako se istraživanja mikroplastike tradicionalno fokusiraju na vodene sustave, sve više dokaza ukazuje na značajnu prisutnost mikroplastike i u kopnenim ekosustavima. Istraživanja provedena u poljoprivrednim tlima pokazala

su da mikroplastika nije ravnomjerno raspoređena u tlu, već se akumulira u različitim frakcijama njegovih agregata, što može utjecati na strukturu i procese koji određuju funkcionalnost tog medija (Zhang i Liu 2018). Poljoprivredna tla izložena su mikroplastici putem mulja nastalog u uređajima za pročišćavanje otpadnih voda, plastičnih folija i atmosferskog taloženja.

Vodeni ekosustavi čine jedan od najvažnijih okolišnih spremnika mikroplastike, pri čemu su slatkovodni sustavi ključna poveznica između kopnenih izvora onečišćenja i morskih ekosustava. Iako se značajan dio mikroplastike zadržava u riječnim sedimentima, velik udio transportira se nizvodno prema estuarijima i morima, zbog čega se slatkovodni sustavi smatraju glavnim prijenosnim koridorima mikroplastičnog onečišćenja (Wang i dr. 2020; Talbot i Chang 2022).

Posljednjih godina znanstvenici posebnu pozornost posvećuju prisutnosti mikroplastike u vodnim resursima namijenjenima ljudskoj uporabi. Mikroplastične čestice zabilježene su u površinskim i podzemnim vodama, vodi za piće te pakiranoj vodi, što upućuje na široku rasprostranjenost ovog onečišćivala u sustavima opskrbe pitkom vodom. Iako trenutačne procjene rizika još uvijek ne ukazuju na neposrednu opasnost za ljudsko zdravlje pri uobičajenim koncentracijama, Svjetska zdravstvena organizacija i brojni autori naglašavaju potrebu za standardizacijom metoda uzorkovanja, identifikacije i procjene izloženosti kako bi se pouzdanije procijenili dugoročni učinci (Koelmans i dr. 2019; WHO 2022).

Sve veći broj istraživanja stoga naglašava da upravljanje mikroplastikom treba usmjeriti na smanjenje emisija na samom izvoru, unaprjeđenje tehnologija pročišćavanja otpadnih voda, razvoj standardiziranih metoda monitoringa te sustavno praćenje mikroplastike u slatkovodnim ekosustavima i vodnim resursima. Takav pristup važan je preduvjet za očuvanje kvalitete voda i ostvarenje ciljeva održivog razvoja, osobito Cilja 6 (Čista voda i sanitarni uvjeti) i Cilja 14 (Život u vodi) koje su Ujedinjeni narodi definirali u sklopu Agende 2030.

Atmosferska mikroplastika relativno je novo istraživačko područje, ali dostupni podaci ukazuju na to da plastične čestice zbog svoje male mase mogu biti prenesene na velike udaljenosti strujanjem zraka (vjetrom). Studije provedene u udaljenim planinskim i polarnim područjima potvrđuju prisutnost mikroplastike u atmosferi, što ukazuje na globalni karakter onečišćenja (Allen i dr. 2019).

3.3. Ekološki i biološki učinci mikroplastike

Mikroplastika uzrokuje brojne ekološke i biološke posljedice koje se očituju na razini pojedinačnih organizama, populacija i cijelih ekosustava. Zbog svoje male veličine i velike postojanosti lako ulazi u hranidbene mreže te se prenosi između različitih trofičkih stupnjeva. U vodnim ekosustavima mikroplastika negativno djeluje na brojne skupine organizama, uključujući alge, zooplankton, beskralježnjake i ribe. Na razini pojedinačnih organizama biološki učinci mikroplastike očituju se kroz mehanička, fiziološka i biokemijska oštećenja. Nakon unosa mikroplastike dolazi do začepljenja probavnog sustava i stvaranja lažnog osjećaja sitosti, zbog čega jedinke smanjuju unos hrane, što može rezultirati izgladnjivanjem, usporenim metabolizmom, zaostajanjem u rastu te smanjenom stopom preživljavanja. Brojna istraživanja također ukazuju na smanjeni reproduktivni uspjeh, poremećaje u razvoju te slabljenje imunološkog odgovora organizama izloženih mikroplastici (Wright i dr. 2013; Rochman i dr. 2016).

Posebnu zabrinutost izazivaju sitnije čestice mikroplastike koje mogu prijeći biološke barijere i prodrijeti u tkiva te pojedine organe. Njihova prisutnost povezuje se s nastankom oksidativnog stresa, upalnih procesa, oštećenjem stanica i narušavanjem normalnih fizioloških funkcija organizama. Iako intenzitet učinaka ovisi o veličini, obliku, kemijskom sastavu i koncentraciji čestica te o osjetljivosti pojedinih vrsta, dostupni znanstveni dokazi potvrđuju da mikroplastika predstavlja ozbiljnu prijetnju očuvanju biološke raznolikosti i stabilnosti ekosustava (Andrady 2011; Hartmann i dr. 2019).

Osim izravnih učinaka, mikroplastika služi kao prikladan supstrat za razvoj mikrobnih biofilmova i prijenos patogenih mikroorganizama na velike udaljenosti (Koelmans i dr. 2019; Wang i dr. 2020; Talbot i Chang 2022). Značajan problem stvara sposobnost mikroplastike da adsorbira različite onečišćujuće tvari. Zbog velike specifične površine i porozne strukture, ona može na svoju površinu vezati teške metale, postojane organske onečišćivače, pesticide i druge toksične spojeve te ih prenositi u organizme nakon ingestije. Time mikroplastika djeluje kao prijenosnik kemijskih onečišćivala, povećavajući njihovu biološku dostupnost i potencijalnu toksičnost za organizme (Rochman i dr. 2016).

U kopnenim ekosustavima nakupljanje mikroplastike može mijenjati fizikalna i kemijska svojstva tla i sedimenta. Terenska istraživanja pokazala su da se mikroplastika zadržava u različitim agregacijskim frakcijama tla, pri čemu njezina raspodjela ovisi o veličini agregata i svojstvima tla, što dodatno potvrđuje mogućnost promjena u strukturi tla i procesima kruženja tvari (Zhang i Liu 2018). Promjene u poroznosti, prozračnosti, zadržavanju vode i temperaturnim svojstvima tla mogu utjecati na sastav i aktivnost mikrobioloških zajednica te poremetiti procese razgradnje organske tvari i kruženja hranjivih tvari, čime se dugoročno narušava funkcioniranje ekosustava (Rillig i dr. 2019).

3.4. Mikroplastika u kontekstu održivog razvoja

Prisutnost mikroplastike značajna je prepreka ostvarivanju ciljeva održivog razvoja (engl. *Sustainable Development Goals*, SDGs) definiranih u okviru Agende 2030 Ujedinjenih naroda. Budući da mikroplastika utječe

na različite sastavnice okoliša i društva, njezini se učinci ne mogu promatrati isključivo kao problem onečišćenja, već kao složen i višedimenzionalan izazov koji istodobno otežava ostvarivanje više međusobno povezanih ciljeva održivog razvoja (SDGs). Program Ujedinjenih naroda za okoliš (engl. *United Nations Environment Programme*, UNEP) naglašava da mikroplastično onečišćenje zahtijeva koordinirano djelovanje u području zaštite okoliša, održive proizvodnje i potrošnje te upravljanja prirodnim resursima (UNEP 2021).

Najizraženiji utjecaj vidljiv je u okviru Cilja 14 – Život u vodi (*Life Below Water*), budući da mikroplastika ugrožava morske i slatkovodne ekosustave, narušava hranidbene mreže, smanjuje biološku raznolikost te negativno utječe na brojne vodene organizme. Istodobno je usko povezana i s Ciljem 15 – Život na kopnu (*Life on Land*) jer se nakuplja u tlu, mijenja njegova fizikalna i kemijska svojstva, utječe na mikrobiološke zajednice te narušava procese kruženja hranjivih tvari i funkcioniranje kopnenih ekosustava (Rillig i dr. 2019).

Prisutnost mikroplastike također donosi izazov za Cilj 2 – Nulta glad (*Zero Hunger*), budući da onečišćenje tla i voda može negativno utjecati na sigurnost hrane, kvalitetu poljoprivredne proizvodnje i održivost ribarstva. Ulazak mikroplastike u hranidbene lance povećava mogućnost prijenosa čestica i adsorbiranih onečišćujućih tvari do organizama koji se koriste u ljudskoj prehrani, čime se dodatno naglašava potreba za zaštitom prehrambenih sustava i prirodnih resursa (Rochman i dr. 2016).

Osim navedenih ciljeva, problem mikroplastike izravno je povezan i s Ciljem 3 – Zdravlje i dobrobit (*Good Health and Well-being*) budući da brojna suvremena istraživanja upozoravaju na izloženost ljudi mikroplastici putem hrane, vode i zraka te na moguće zdravstvene posljedice dugotrajne izloženosti. Nadalje, mikroplastično onečišćenje otežava ostvarivanje Cilja 6 – Čista voda i sanitarni uvjeti (*Clean Water and Sanitation*) jer sustavi za pročišćavanje otpadnih voda ne mogu u potpunosti ukloniti najsitnije plastične čestice koje potom dospijevaju u rijeke, jezera i mora. Istodobno, mikroplastika jasno ukazuje na potrebu ostvarivanja Cilja 12 – Odgovorna potrošnja i proizvodnja (*Responsible Consumption and Production*), budući da je njezina pojava posljedica prekomjerne proizvodnje plastike, jednokratne potrošnje i nedostatnog gospodarenja otpadom (Geyer i dr. 2017; UNEP 2021).

Dugoročno, prisutnost mikroplastike povećava ekološki otisak suvremenih društava te ukazuje na ograničenja linearnog modela gospodarstva koji se temelji na načelu „proizvedi – upotrijebi – odbaci". Smanjenje mikroplastičnog onečišćenja stoga zahtijeva sustavne promjene u upravljanju resursima i prijelaz na kružno biogospodarstvo koje se temelji na smanjenju nastanka otpada, ponovnoj uporabi proizvoda, recikliranju materijala te produljenju životnog vijeka proizvoda. Takav pristup pridonosi učinkovitijem korištenju prirodnih resursa, smanjenju emisija i očuvanju funkcionalnosti ekosustava te je ujedno i jedan od ključnih preduvjeta za ostvarivanje ciljeva održivog razvoja (Geyer i dr. 2017; UNEP 2021).

3.5. Mikroplastika i ekološki otisak

Ekološki otisak jest pokazatelj ukupnog pritiska koji ljudske aktivnosti ostvaruju na okoliš kroz potrošnju prirodnih resursa i sposobnost ekosustava da apsorbiraju otpad i onečišćenja. Mikroplastika se u tom kontekstu pojavljuje kao specifičan i dugotrajan oblik okolišnog opterećenja jer je izravno povezana s masovnom proizvodnjom plastike, linearnim modelima potrošnje i neodrživim gospodarenjem otpadom (Geyer i dr. 2017).

Proizvodnja plastike pretežno se temelji na fosilnim gorivima, što pridonosi povećanju emisija stakleničkih plinova, a taj se ugljični otisak dodatno povećava tijekom prerade i zbrinjavanja otpada. Tijekom životnog ciklusa plastičnih proizvoda dolazi do njihove fragmentacije i stvaranja mikroplastike koja se akumulira u okolišu, čime se dodatno povećava ekološki otisak društva. Za razliku od mnogih drugih onečišćujućih tvari, mikroplastika pokazuje iznimnu postojanost te se ne razgrađuje u potpunosti prirodnim procesima, već se kontinuirano prenosi između okolišnih medija (Rochman i dr. 2016).

U ekosustavima, mikroplastika smanjuje otpornost prirodnih sustava jer narušava biološke procese poput fotosinteze, razgradnje organske tvari i kruženja hranjivih tvari. Posljedično se smanjuje sposobnost prirodnih sustava da pružaju ključne ekološke usluge, uključujući proizvodnju hrane, regulaciju klime i održavanje bioraznolikosti. Stoga, mikroplastika ne djeluje samo kao izolirani zagađivač, već kao čimbenik koji dugoročno povećava kumulativni ekološki otisak ljudskih aktivnosti.

Povezanost mikroplastike i ekološkog otiska posebno je izražena u urbanim i industrijskim sredinama, gdje su potrošnja plastike i generiranje otpada najintenzivniji. Otpadne vode, promet, sintetički tekstil i ambalaža predstavljaju ključne izvore mikroplastike, a njihova kontrola zahtijeva sustavne promjene u proizvodnim i potrošačkim obrascima. U tom smislu, smanjenje mikroplastičnog onečišćenja usko je povezano s prijelazom na kružno biogospodarstvo i odgovornije upravljanje prirodnim resursima (UNEP 2021).

U obrazovnom kontekstu, koncept ekološkog otiska u povezanosti s mikroplastikom pruža snažan didaktički okvir za razvoj ekološke osviještenosti kod učenika, a posebice ekološke pismenosti. Analiza osobnog i društvenog doprinosa mikroplastičnom onečišćenju omogućuje učenicima i studentima razumijevanje globalnih ekoloških problema kroz vlastite svakodnevne izbore. Na taj se način mikroplastika ne promatra isključivo u kontekstu znanstvene pojave, nego i kao društveni izazov koji zahtijeva promjenu vrijednosti i ponašanja u svim društvenim sferama, uz primjenu suvremenih obrazovnih pristupa.

3.6. Obrazovne implikacije mikroplastike

Problematika mikroplastike ima snažan potencijal za integraciju u kurikularne pristupe odgojno-obrazovnih ustanova. Interdisciplinarni karakter teme omogućuje povezivanje prirodoslovnih i društvenih znanosti, potičući razvoj ekološke svijesti i kritičkog mišljenja kod učenika od rane i predškolske dobi do viših razreda osnovne i srednje škole.

Uključivanje dodatnih **tema o mikroplastici** u obrazovne programe pridonosi razumijevanju održivog razvoja i odgovornog upravljanja prirodnim resursima, što je ključno za smanjenje budućeg ekološkog otiska.

U kurikularnom smislu, mikroplastika se može strukturirati kao sadržaj koji razvija ključne kompetencije za održivost (npr. sustavno razmišljanje, anticipacijsko i kritičko mišljenje te integrirano rješavanje problema), što je u skladu s preporukama Organizacije Ujedinjenih naroda za obrazovanje, znanost i kulturu (engl. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, UNESCO), za obrazovanje za održivi razvoj (UNESCO 2017).

Istodobno, ova tema prirodno podupire cjeloinstitucijski (*whole-school*) pristup, u kojem učenici "uče ono što žive i žive ono što uče", jer se školska praksa (npr. smanjenje jednokratne plastike, odvajanje otpada, nabava) i školska kultura mogu izravno povezati s nastavnim aktivnostima i lokalnim djelovanjem (UNESCO 2020). Na razini ishoda, provedba se može uskladiti s nacionalnim okvirom međupredmetne teme Održivi razvoj, koji naglašava razvoj generičkih kompetencija (kritičko mišljenje, rješavanje problema, poduzetnost) i poticanje odgovornog postupanja s resursima i otpadom kroz praktičan rad i suradnju u zajednici (Ministarstvo znanosti i obrazovanja 2019). Iz pedagoške perspektive, preporučljivo je osloniti se na istraživačku nastavu (*inquiry - based*) i problemsko učenje (npr. uzorkovanje i analiza školskog / kvartovskog otpada, interpretacija podataka, argumentiranje rješenja), jer europske smjernice za znanstveno obrazovanje upravo takav pristup ističu kao učinkovit za motivaciju i razvoj znanstvene pismenosti (Rocard i dr. 2007). Konačno, očekivanja se mogu dodatno mapirati na suvremene europske i globalne standarde. Primjerice, europski kompetencijski okvir GreenComp, koji je razvio Zajednički istraživački centar Europske komisije (engl. Joint Research Centre, JRC), zagovara vrijednosti održivosti, prihvaćanje kompleksnosti, zamišljanje održivih budućnosti te aktivno djelovanje. Slično tome OECD Learning Compass 2030, okvir koji je razvila Organizacija za ekonomsku suradnju i razvoj (engl. *Organisation for Economic Co-operation and Development*, OECD), naglašava učenikovu angažiranost i ciklus anticipacije–djelovanja–refleksije kao put prema odgovornom odlučivanju i dobrobiti (European Commission, JRC 2022; OECD 2019).

Problematika mikroplastike ima izrazit obrazovni potencijal jer objedinjuje znanstvene spoznaje, društvene vrijednosti i kulturne obrasce ponašanja povezane s proizvodnjom, potrošnjom i odgovornim odnosom prema okolišu (Orr 1992; Sterling 2001). U tom smislu, mikroplastika se ne može promatrati isključivo kao sadržaj prirodoslovnog obrazovanja, već kao interdisciplinarna tema koja povezuje znanost i kulturu sa svakodnevicom.

U kurikularnom okviru, mikroplastika se može integrirati horizontalno i vertikalno (UNESCO 2017; Ministarstvo znanosti i obrazovanja 2019). Horizontalna integracija omogućuje povezivanje sadržaja biologije, kemije i geografije s društveno-humanističkim predmetima poput sociologije, etike, građanskog odgoja i kulture potrošnje. Vertikalna integracija osigurava postupno produbljivanje razumijevanja problema – od upoznavanja s osnovnim pojmovima (plastika, otpad, okoliš) u ranom i predškolskom odgoju, preko analize izvora i posljedica mikroplastike u osnovnoj školi, do kritičkog razmatranja održivih razvojnih modela i javnih politika u srednjoškolskom i visokoškolskom obrazovanju.

Tema mikroplastike nadovezuje se izravno na međupredmetnu temu Održivi razvoj te omogućuje ostvarivanje ishoda koji se odnose na odgovorno korištenje resursa, razumijevanje međuovisnosti prirodnih i društvenih sustava te aktivno građanstvo (Ministarstvo znanosti i obrazovanja 2019; UNESCO 2020). Kurikularno usmjerenje na ishode učenja, a ne isključivo na sadržaje, omogućuje korištenje mikroplastike kao problemskog konteksta kroz koji se razvijaju ključne kompetencije za cjeloživotno učenje.

Mikroplastika je istodobno znanstvena i kulturna pojava jer je njezina prisutnost rezultat kulturno uvjetovanih obrazaca potrošnje, estetike jednokratnosti i percepcije komfora u suvremenim društvima (Sterling 2001; Kollmuss i Agyeman 2002). U tom smislu, obrazovanje o mikroplastici treba uključivati kritičko propitivanje kulturnih navika, medijskih poruka i društvenih normi koje potiču prekomjernu uporabu plastike.

Uključivanje kulturne dimenzije u kurikularni pristup omogućuje učenicima da razumiju da su okolišni problemi povezani s identitetom, stilom života i vrijednosnim sustavima zajednice. Analiza lokalnih primjera (npr. ambalaža u prehrambenoj industriji, tekstilna moda, turizam) pridonosi razvoju osjećaja osobne odgovornosti i pripadnosti zajednici, čime se jača ekološka kultura kao sastavni dio opće kulture.

Iz didaktičke perspektive, mikroplastika je iznimno pogodna za istraživačku, problemsku i projektno orijentiranu nastavu (Rocard i dr. 2007; Tilbury 2011). Učenici mogu sudjelovati u jednostavnim istraživanjima (razvrstavanje otpada u školi ili kućanstvu, praćenje izvora plastike u lokalnoj zajednici), interpretirati rezultate i predlagati rješenja. Takav pristup potiče znanstvenu pismenost, ali i pridonosi razvoju socijalnih i komunikacijskih vještina učenika.

Posebnu vrijednost ima cjeloinstitucijski (*whole-school*) pristup, u kojem škola postaje model održivog

djelovanja (UNESCO 2020). Smanjenje uporabe jednokratne plastike, uvođenje višekratnih materijala i uključivanje učenika u donošenje odluka povezuju formalni kurikulum s neformalnim učenjem i školskom kulturom.

Integracijom tematike mikroplastike u kurikulum ne razvija se samo znanje o jednom okolišnom problemu, već se potiče razvoj ekološke pismenosti i održive kulture življenja (Orr 1992; Wiek i dr. 2011; European Commission, JRC 2022). Obrazovanje bi time postalo moćan i ključan alat za promjenu društvenih obrazaca koji su u temelju mikroplastičnog onečišćenja. Dugoročno, takav pristup pridonosi oblikovanju generacija koje su sposobne kritički promišljati odnose između znanosti, tehnologije, kulture i okoliša te postati aktivni sudionici izgradnje održivijeg društva.

4. ZAKLJUČAK

Mikroplastika predstavlja jedan od najozbiljnijih i najsloženijih izazova našeg vremena, čije posljedice prelaze granice pojedinih ekosustava i znanstvenih disciplina. Kao trajni i globalno rasprostranjeni onečišćivač, mikroplastika je prisutna u vodenim, kopnenim i atmosferskim ekosustavima te pokazuje sposobnost akumulacije i prijenosa kroz hranidbene lance i mreže. Pregled recentne znanstvene literature potvrđuje da mikroplastika negativno utječe na biološke procese, strukturu ekosustava i njihovu funkcionalnost, čime dugoročno ugrožava biološku raznolikost i otpornost prirodnih sustava.

Osim ekoloških i bioloških učinaka, mikroplastika ima značajne društvene i razvojne implikacije. Njezina povezanost s masovnom proizvodnjom plastike, linearnim modelima potrošnje i neučinkovitim gospodarenjem otpadom izravno pridonosi povećanju ekološkog otiska suvremenih društava. Posljedično, mikroplastika postaje prepreka ostvarivanju ciljeva održivog razvoja, osobito u kontekstu očuvanja ekosustava, sigurnosti hrane i kvalitete ljudskog života. Analizirani radovi upućuju na potrebu za sustavnim i interdisciplinarnim pristupima koji uključuju znanstvena istraživanja, regulatorne mjere i tehnološke inovacije.

U budućim naporima usmjerenima na razumijevanje i suzbijanje mikroplastičnog onečišćenja posebnu važnost ima razvoj usporedivih i standardiziranih metodoloških pristupa, uključujući jasne definicije i kategorije mikroplastike, kako bi se rezultati različitih istraživanja mogli pouzdano uspoređivati i koristiti u izradi učinkovitih mjera upravljanja. Također je nužno jačati sustave monitoringa i prevencije na izvoru, osobito u urbanim i industrijskim područjima te u slatkovodnim sustavima kao ključnim prijenosnim koridorima koji povezuju kopnene izvore s morskim ekosustavima. Dodatnu pozornost treba usmjeriti i na atmosferski transport koji omogućuje prijenos čestica na velike udaljenosti. U tom smislu, dugoročna rješenja zahtijevaju prelazak s linearnog modela „proizvedi–upotrijebi–odbaci" na kružno gospodarstvo i odgovornije upravljanje plastikom tijekom cijelog životnog ciklusa, čime se smanjuje i ukupno opterećenje okoliša.

Posebno je važno istaknuti ulogu odgoja i obrazovanja te kurikularnih pristupa u osvještavanju mladih generacija i njihovu suočavanju s problemom mikroplastike. Integracija ove tematike u odgojno-obrazovne sustave omogućuje razvoj ekološke svijesti, kritičkog mišljenja i odgovornog ponašanja, čime se stvaraju preduvjeti za dugoročno smanjenje mikroplastičnog onečišćenja. Zaključno, mikroplastika zahtijeva holističko promišljanje i djelovanje, pri čemu znanstvena spoznaja, održivi razvoj i obrazovanje imaju ključnu ulogu u oblikovanju održivije budućnosti. ■

LITERATURA

Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., … Galop, D. (2019). *Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment*. *Nature Geoscience, 12*(5), 339–344. https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5

Andrady, A. L. (2011). *Microplastics in the marine environment*. *Marine Pollution Bulletin, 62*(8), 1596– 1605. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030

Boucher, J., & Friot, D. (2017). *Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources*. International Union for Conservation of Nature (IUCN). https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en

European Commission, Joint Research Centre. (2022). *GreenComp: The European sustainability competence framework*. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/13286

Galloway, T. S., Cole, M., & Lewis, C. (2017). *Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem*. *Nature Ecology & Evolution, 1*(5), 0116. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). *Production, use, and fate of all plastics ever made*. *Science Advances, 3*(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

Grant, M. J., & Booth, A. (2009). *A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies*. *Health Information & Libraries Journal, 26*(2), 91–108. https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x

Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E., … Wagner, M. (2019). *Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris*. *Environmental Science & Technology, 53*(3), 1039– 1047. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297

Iyare, P. U., Ouki, S. K., & Bond, T. (2020). *Microplastics removal in wastewater treatment plants: A critical review*. *Environmental Science: Water Research & Technology, 6*, 2664–2675. https://doi.org/10.1039/D0EW00397B

Koelmans, A. A., Mohamed Nor, N. H., Hermsen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & De France, J. (2019). *Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality*. *Water Research, 155*, 410–422. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054

Kollmuss, A., & Agyeman, J. (2002). *Mind the gap: Why do people act environmentally and what are the barriers to pro-environmental behavior? Environmental Education Research, 8*(3), 239–260. https://doi.org/10.1080/13504620220145401

Li, J., Liu, H., & Chen, J. P. (2018). *Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection*. *Water Research, 137*, 362–374. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056

Ministarstvo znanosti i obrazovanja. (2019). *Kurikulum međupredmetne teme Održivi razvoj za osnovne i srednje škole*. Republika Hrvatska.

Miino, M. C., Galafassi, S., Zullo, R., Torretta, V., & Rada, E. C. (2024). *Microplastics removal in wastewater treatment plants: A review of the different approaches to limit their release in the environment*. *Science of the Total Environment, 930*, 172675. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172675

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group. (2009). *Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement*. *PLOS Medicine, 6*(7), e1000097. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097

OECD. (2019). *OECD Learning Compass 2030: A series of concept notes*. OECD Publishing.

Orr, D. W. (1992). *Ecological literacy: Education and the transition to a postmodern world*. State University of New York Press.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., … Moher, D. (2021). *The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews*. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Rillig, M. C., Lehmann, A., Ryo, M., & Bergmann, J. (2019). *Shaping up: Toward considering the shape and form of pollutants*. *Environmental Science & Technology, 53*(14), 7925–7926. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03520

Rocard, M., Csermely, P., Jorde, D., Lenzen, D., Walberg-Henriksson, H., & Hemmo, V. (2007). *Science education now: A renewed pedagogy for the future of Europe*. European Commission.

Rochman, C. M., Browne, M. A., Underwood, A. J., van Franeker, J. A., Thompson, R. C., & Amaral- Zettler, L. A. (2016). *The ecological impacts of marine debris: Unraveling the demonstrated evidence from what is perceived*. *Ecology, 97*(2), 302–312. https://doi.org/10.1890/14-2070.1

Sterling, S. (2001). *Sustainable education: Re-visioning learning and change*. Green Books.

Talbot, R., & Chang, H. (2022). *Microplastics in freshwater: A global review of factors affecting spatial and temporal variations*. *Environmental Pollution, 292*(Part B), 118393. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118393

Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004). *Lost at sea: Where is all the plastic? Science, 304*(5672), 838. https://doi.org/ 10.1126/science.1094559

Tilbury, D. (2011). *Education for sustainable development: An expert review of processes and learning*. UNESCO.

UNESCO. (2017). *Education for sustainable development goals: Learning objectives*. UNESCO Publishing. https://doi.org/10.54675/CGBA9153

UNESCO. (2020). *Education for sustainable development: A roadmap*. UNESCO Publishing. https://doi.org/10.54675/YFRE1448

Wang, W., Ge, J., & Yu, X. (2020). *Bioavailability and toxicity of microplastics to fish species: A review*. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 189*, 109913. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109913

Wiek, A., Withycombe, L., & Redman, C. L. (2011). *Key competencies in sustainability: A reference framework for academic program development*. *Sustainability Science, 6*(2), 203–218. https://doi.org/10.1007/s11625-011-0132-6

Zhang, G. S., & Liu, Y. F. (2018). *The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China*. *Science of the Total Environment, 642*, 12–20. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004

MICROPLASTICS IN THE ENVIRONMENT: SOURCES, DISTRIBUTION AND ECOLOGICAL IMPACTS IN THE CONTEXT OF ECOLOGICAL FOOTPRINT, SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND EDUCATION

Abstract. Microplastics represents one of the most complex and widespread modern environmental challenges due to its global distribution, durability and cumulative impacts on natural and social systems. It is defined as plastic particles smaller than 5 mm that occur by fragmentation of larger plastic products or are deliberately produced as primary microparticles for industrial and consumer uses. Scientific research confirm microplastics presence in all environmental media, including aquatic, terrestrial and atmospheric systems, whereby it shows the ability for long-term persistence and bioaccumulation in living organisms. The negative impacts of microplastics can be seen in disturbances of biological processes, changes in the structure and function of ecosystems and deterioration of food webs. In addition to ecological and biological consequences, microplastic significantly contributes to the increase in the ecological footprints of modern societies due to its close relation to the linear models of production, consumption and waste management. In this manner, microplastics represents a barrier to achieving the objectives of sustainable development, particularly those related to ecosystem conservation, food safety and the quality of living. The global character of the issue has been additionally confirmed by recent synthetic studies, which emphasize complex interactions of microplastics within an ecosystem and its ability to carry over among different environmental media.

Key words: ecological footprint, ecological impacts, terrestrial and aquatic systems, microplastics, education for sustainable development, environmental pollution

MIKROPLASTIK IN DER UMWELT: QUELLEN, VERBREITUNG UND ÖKOLOGISCHE AUSWIRKUNGEN IM KONTEXT VON ÖKOLOGISCHEM FUSSABDRUCK, NACHHALTIGER ENTWICKLUNG UND AUSBILDUNG

Zusammenfassung. Mikroplastik stellt aufgrund seiner globalen Verbreitung, seiner langfristigen Persistenz und seiner kumulativen Auswirkungen auf natürliche und soziale Systeme eines der komplexesten und am weitesten verbreiteten Umweltprobleme unserer Zeit dar. Als Mikroplastik werden Kunststoffpartikel definiert, die kleiner als 5 mm sind und durch die Fragmentierung größerer Kunststoffprodukte entstehen oder gezielt als primäre Mikropartikel für industrielle und Verbraucherzwecke hergestellt werden. Wissenschaftliche Untersuchungen bestätigen das Vorhandensein von Mikroplastik in allen Umweltmedien, einschließlich aquatischer, terrestrischer und atmosphärischer Systeme, wobei es die Fähigkeit besitzt, über lange Zeiträume zu bestehen und sich in lebenden Organismen anzureichern. Die negativen Auswirkungen von Mikroplastik manifestieren sich durch die Störung biologischer Prozesse, Veränderungen in der Struktur und Funktion von Ökosystemen sowie die Störung von Nahrungsnetzen. Neben den ökologischen und biologischen Folgen tragen Mikroplastikpartikel erheblich zur Vergrößerung des ökologischen Fußabdrucks moderner Gesellschaften bei, da sie eng mit linearen Produktions-, Konsum- und Abfallmanagementmodellen verknüpft sind. Mikroplastik stellt somit ein Hindernis für das Erreichen der Ziele für nachhaltige Entwicklung dar, insbesondere jener Ziele, die mit dem Erhalt der Ökosysteme, der Ernährungssicherheit und der Lebensqualität zusammenhängen. Der globale Charakter des Problems wird durch aktuelle Synthesestudien weiter bestätigt, die die komplexen Wechselwirkungen von Mikroplastik innerhalb von Ökosystemen und deren Fähigkeit zur Übertragung zwischen verschiedenen Umweltmedien hervorheben.

Schlüsselwörter: ökologischer Fußabdruck, ökologische Auswirkungen, terrestrische und aquatische Ökosysteme, Mikroplastik, Ausbildung für nachhaltige Entwicklung, Umweltverschmutzung