



UNIVERZITET CRNE GORE
METALURŠKO – TEHNOLOŠKI FAKULTET

SUZANA BERILAŽA

**ISPITIVANJE PRISUSTVA MIKROPLASTIKE U VODOTOKU RIJEKE
CIJEVNE U CRNOJ GORI**

MASTER RAD

Podgorica, 2025. godine



UNIVERZITET CRNE GORE
METALURŠKO – TEHNOLOŠKI FAKULTET

Suzana Berilaža

ISPITIVANJE PRISUSTVA MIKROPLASTIKE U VODOTOKU
RIJEKE CIJEVNE U CRNOJ GORI
MASTER RAD

Studijski program: Zaštita životne sredine

Studentkinja: Suzana Berilaža

Broj indeksa: 6/23

Mentor: Prof. dr Željko Jaćimović

Podgorica, 2025. godine

PODACI I INFORMACIJE O MASTER RADU

Ime i prezime: Suzana Berilaža

Datum i mjesto rođenja: 13.01.1991. godine, Podgorica, Crna Gora

Prethodne studije: Metalurško – tehnološki fakultet, studijski program – zaštita životne sredine

Godina diplomiranja: 2013.

INFORMACIJE O MASTER RADU

Metalurško – tehnološki fakultet

Studijski program: Zaštita životne sredine

Naslov rada: Ispitivanje prisustva mikroplastike u vodotoku rijeke Cijevne u Crnoj Gori

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 08.03.2024. godine

Datum sjedice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema master rada: 08.04.2024. godine

Mentor: Prof. dr Željko Jaćimović

KOMISIJA ZA OCJENU TEME I PODOBNOSTI MAGISTRANDA/OCJENU RADA/ODBRANU RADA

- 1. Prof. dr Miljan Bigović, PMF Podgorica, predsjednik**
- 2. Prof. dr Željko Jaćimović, MTF Podgorica, mentor**
- 3. Prof. dr Vanja Asanović, MTF Podgorica, članica**

LEKTOR: autolektura

DATUM ODBRANE:

Univerzitet Crne Gore
Metalurško-tehnološki fakultet

IZJAVA O AUTORSTVU

Kandidat: **Suzana Berilaža**

Na osnovu člana 22 Zakona o akademskom integritetu, ja, dolje potpisani/potpisana

IZJAVLJUJEM

pod punom krivičnom i materijalnom odgovornošću da je master rad pod nazivom:

**„Ispitivanje prisustva mikroplastike u vodotoku rijeke Cijevne u
Crnoj Gori“**

rezultat sopstvenog istraživačkog rada, da nijesam kršio/kršila autorska prava i koristio/koristila intelektualnu svojinu drugih lica i da je navedeni rad moje originalno djelo.

U Podgorici,

Potpis studenta

ZAHVALNICA

Izražavam duboku zahvalnost svom mentoru, prof. dr Željku Jaćimoviću, koji mi je omogućio da istražujem ovu inovativnu i aktuelnu temu. Njegov nenametljiv, ali inspirativan pristup, dokaz je da je "Znanje moć", i zahvaljujem mu što me je neprestano podsjećao na značaj te misli.

Posebnu zahvalnost dugujem Nedi Bošković, koja je podijelila svoje bogato znanje o mikroplastici i usmjerila me pravim putem tokom istraživanja.

Takođe, veliko hvala prof. dr Polonci Trebše na njenom angažovanju i požrtvovanosti, kao i timu sa Nacionalnog hemijskog instituta u Ljubljani – doc. dr Ivu Jermanu, Nigelu Van de Veldeu i dr Ani Drinčić – koji su svojim stručnim doprinosom značajno unaprijedili kvalitet ovog rada.

Zahvaljujem se članovima komisije na njihovoj ažurnosti i korisnim sugestijama. Takođe, hvala mojim kolegama i koleginicama iz preduzeća "Čistoća" d.o.o. Podgorica, koji su mi bili potpora tokom master studija.

Najdublju zahvalnost upućujem svojoj porodici i prijateljima, čija su безусловna podrška i ljubav bile neprocjenjiva snaga tokom mog studiranja. Posebno hvala mojim roditeljima, koji su svojim odricanjima nesebično podržavali moje ciljeve, posmatrajući ih kao svoje vlastite i vjerujući u moj potencijal. Njihova vjera da uvijek mogu više pokazala se potpuno opravdanom.

Sažetak

Problem mikroplastike postaje sve izraženiji u vodenim ekosistemima, uključujući rijeke, koje su ključni putevi za transport čestica mikroplastike ka morskim sredinama. U ovom radu se istražuje prisustvo mikroplastike u sedimentima rijeke Cijevne, pritoke rijeke Morače, sa ciljem identifikacije broja, vrsta, distribucije i potencijalnih izvora zagađenja. Uzorci su prikupljeni na tri lokacije tokom dvije sezone, a analizirani su primjenom standardnih laboratorijskih metoda i Fourierove transformacije infracrvene spektroskopije (FTIR) i Raman spektroskopije.

Rezultati ukazuju na dominaciju polietilena (PE) i polistirena (PS), pri čemu su plava, providna i crvena boja bile najzastupljenije u analiziranim uzorcima. Sezonske razlike u broju čestica su jasno izražene – tokom jeseni zabilježen je veći broj čestica, što se može povezati sa povećanim padavinama i intenzivnijim transportom mikroplastike nizvodno. Mogući izvori mikroplastike uključuju komunalni otpad, otpadne vode i lokalne industrijske aktivnosti.

Analiza rezultata pokazala je značajnu sličnost s prethodnim istraživanjem u rijeci Morači, što potvrđuje doprinos rijeke Cijevne ukupnom zagađenju Morače. Veliki broj identifikovanih čestica u sedimentima rijeke Cijevne ukazuje na važnost njene uloge u transportu mikroplastike u Jadranski sliv.

Dobijeni podaci analizom uzoraka priobalnog sedimenta rijeke Cijevne, pružaju važne informacije o zagađenju mikroplastikom u riječnim ekosistemima Crne Gore i ukazuju na potrebu za što hitnijim sprovođenjem mjera iz Državnog plana za upravljanje otpadom. Zabrana plastičnih kesa predstavlja korak ka smanjenju plastičnog zagađenja, međutim, zabrinjavajuće je što stopa reciklaže plastike u Crnoj Gori iznosi manje od dva posto. Ovo istraživanje doprinosi razumijevanju dinamike mikroplastike u slatkovodnim sistemima i ističe značaj edukacije i strožijeg sprovođenja politika zaštite životne sredine.

Ključne riječi: mikroplastika, rijeka Cijevna, sediment, FTIR, zagađenje

Abstract

The problem of microplastics is becoming increasingly pronounced in aquatic ecosystems, including rivers, which serve as key pathways for transporting this pollution to marine environments. This study investigates the presence of microplastics in the sediments of the Cijevna River, a tributary of the Morača River, with the aim of identifying the number, types, distribution, and potential sources of pollution. Samples were collected from three locations during two seasons and analyzed using standard laboratory methods as well as Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy and Raman Spectroscopy.

The results indicate a dominance of polyethylene (PE) and polystyrene (PS), with blue, transparent, and red particles being the most prevalent among the analyzed samples. Seasonal differences in particle abundance were evident – a higher number of particles was recorded during autumn, likely due to increased rainfall and more intensive downstream transport of microplastics. Potential sources of microplastics include municipal waste, wastewater, and local industrial activities.

Analysis of the results revealed significant similarities with previous research conducted on the Morača River, confirming the contribution of the Cijevna River to the overall pollution of the Morača River. The large number of microplastic particles identified in the sediments of the Cijevna highlights its important role in transporting microplastics to the Adriatic basin.

The data obtained from the analysis of the Cijevna River's coastal sediment provide valuable insights into microplastic pollution in Montenegro's river ecosystems and underline the urgent need for the implementation of measures outlined in the National Waste Management Plan. The ban on plastic bags is a step toward reducing plastic pollution; however, it is concerning that the plastic recycling rate in Montenegro is less than two percent. This study contributes to the understanding of microplastic dynamics in freshwater systems and underscores the importance of education and stricter enforcement of environmental protection policies.

Keywords: microplastics, Cijevna River, Moraca River, sediment, FTIR, pollution

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO.....	4
2.1 Vrste i karakteristike mikroplastike.....	5
2.2 Fizička svojstva mikroplastike.....	5
2.3 Hemijska svojstva mikroplastike	7
2.4 Izvori mikroplastike	8
3. LITERATURNI PREGLED.....	12
4. HIDROGEOMORFOLOŠKE KARAKTERISTIKE RIJEKE CIJEVNE	17
5. EKSPERIMENTALNI DIO	19
5.1 Metode i tehnike ispitivanja prisustva mikroplastike	20
5.2 Uzorkovanje u dvije sezone	20
5.2 Priprema uzoraka u dvije sezone.....	26
5.3 Hemijska identifikacija mikroplastike	32
6. REZULTATI I DISKUSIJA.....	36
6.1 Analiza i poređenje dobijenih rezultata	36
6.2 Identifikacija nedostataka i ograničenja	46
7. ZAKLJUČAK.....	47
8. LITERATURA	48

1. UVOD

Sa sve većom upotrebom plastike, koja je postala neizostavni dio svakodnevnog života, savremeno doba se sve češće naziva "plastično doba". Plastika izaziva ozbiljnu zabrinutost zbog svog uticaja na životnu sredinu i opstaje u svim ekosistemima zbog otpornosti na razgradnju. Od 1950-ih, industrija plastike se ubrzano razvijala i raste i dalje. Visoka potrošnja plastike i njeno brzo odlaganje, zajedno sa fizičko-hemijskim karakteristikama koje usporavaju razgradnju, kao i neadekvatno upravljanje otpadom, rezultiraju zagađenjem u gotovo svim segmentima životne sredine [1].

Naziv plastika potiče iz grčkog jezika od riječi *plastikos*, koja označava sposobnost oblikovanja. Prvi sintetički polimeri su razvijeni u 19. vijeku, sa pronalascima poput vulkanizovane gume i polistirena. Današnja plastika se uglavnom dobija polimerizacijom monomera iz nafte, gasa ili uglja. Monomeri koji se najčešće koriste u proizvodnji plastike uključuju etilen (eten), propilen (propen), stiren (vinil-benzen) i vinil-hlorid, koji omogućavaju stvaranje različitih vrsta plastike, kao što su polietilen, polipropilen, polistiren i polivinil-hlorid i druge [2]. Podatak da je u Evropskoj uniji registrovano oko 30.000 različitih polimernih materijala ukazuje na ogromnu raznolikost i kompleksnost industrije plastike [1].

Plastika se široko primjenjuje u različitim industrijama zbog svojih jedinstvenih svojstava kao što su niska cijena, dugotrajnost, fleksibilnost i lakoća. Glavne oblasti primjene uključuju pakovanje (oko 36% ukupne proizvodnje plastike), građevinsku industriju (16%), tekstilnu industriju (15%), i transportnu industriju (33%). Takođe, plastika se koristi u proizvodnji elektronike, automobila, tekstila i proizvoda za potrošače. Zbog ovih svojstava, plastika ima ključnu ulogu u globalnoj industriji, ali i izaziva probleme sa zagađenjem, posebno u oblasti upravljanja otpadom [3].

Svjetska proizvodnja plastike pokazuje konstantan rast, te se predviđa da će do 2050. godine dostići 33 milijarde tona, što je značajan porast u odnosu na 322 miliona tona, koliko je bilo 2016. godine. Evropa, zajedno sa Kinom i Sjevernom Amerikom, predstavlja jedno od vodećih tržišta za plastiku, sa godišnjom proizvodnjom sintetičkih polimera od 64,4 miliona tona i potražnjom od 51,2 miliona tona. Zemlje sa najvećom potražnjom u Evropi su Njemačku, Italiju, Francusku, Ujedinjeno Kraljevstvo i Španiju [1].

Mhlanga i sar. (2024), predlažu razvoj naučnih pristupa koji uključuju globalne napore i strategije, uz jačanje međunarodne saradnje i promjenu pristupa u upravljanju plastičnim otpadom [4].

Prema zvaničnim podacima Evropske Agencije za zaštitu životne sredine (European Environment Agency) procjenjuje se da je samo oko 9% plastike, od ukupno proizvedene, reciklirano, dok je 12% spaljeno. Ostatak je odložen na deponijama, još uvijek u upotrebi ili odbačen u životnu sredinu. Izvještaj Svetskog ekonomskog foruma i Fondacije Elen Makartur ukazuje da će do 2050. godine u okeanima više biti plastike nego ribe [5].

Proizvodnja plastike, osim što zagađuje životnu sredinu, doprinosi klimatskim promjenama. Godišnje emisije ugljen-dioksida povezane sa proizvodnjom plastike u Evropskoj uniji iznose približno 13,4 miliona tona CO₂, što čini oko 20% ukupnih emisija hemijske industrije u regionu [5]. Ovo je podstaklo istraživače i stručnjake iz mnogih oblasti da aktivnije prate procjenu uticaja plastike na životnu sredinu [6].

Uprkos dostupnosti mnogih polimera, 75% ukupne potražnje za plastikom je ograničeno na nekoliko vrsta plastike: polietilen (PE), polistiren (PS), polietilen – tereftalat (PET), polivinilhlorid (PVC) i poliuretan (PU) [1].

Osim što se može klasifikovati po porijeklu, plastika se može klasifikovati i po veličini. Čestice plastike veličine od 0.1 do 5 mm nazivaju se česticama mikroplastike. Mikroplastika je privukla pažnju javnosti zbog svoje sveprisutnosti i postojanosti u vodenoj sredini, kao i potencijalnih rizika po životnu sredinu i zdravlje ljudi [6].

Dostupni podaci iz globalnih programa monitoringa i terenskih istraživanja pokazali su da se mikroplastika već identifikuje na polarnom regionu [7]. Rijeke transportuju 1,1 – 2,4 miliona tona plastike godišnje u morsko okruženje i smatraju se glavnim putem plastike do okeana. Nastojeći da se prošire znanja o pojavi, izvorima i daljoj sudbini čestica mikroplastike u rijekama, istraživačke aktivnosti su sve više usmjerene na zagađenje mikroplastike u slatkovodnim ekosistemima [8]. Ove aktivnosti su koncentrisane na kvalitativno i kvantitativno praćenje mikroplastike u različitim vodenim ekosistemima širom svijeta u cilju što boljeg razumijevanja uticaja mikroplastike na životnu sredinu. Postoji širok spektar operativnih tehnika koje se koriste za uzorkovanje, obradu, identifikaciju i kvantifikaciju mikroplastike u različitim tipovima uzorka [9].

Na području Crne Gore prvi put je procijenjena zastupljenost mikroplastike u rijekama: Zeti, Morači i Bojani tokom 2022. godine [10]. Rezultati ukazuju da je nivo zagađenja umjeren. Takođe, ukazuje se na direktan uticaj rijeke Bojane, kao i indirektan uticaj rijeka Morače i Zete, na koncentraciju mikroplastike na crnogorskom primorju.

Ovaj rad pruža jasan uvid u količinu i vrstu prisutne mikroplastike u vodotoku rijeke Cijevne, njenih mogućih izvora i puteva distribucije. Analizom dobijenih rezultata proširila su se znanja o sudbini čestica mikroplastike u rijeci Morači i doprinosu rijeke Cijevne, kao njene pritoke, na sveukupnu količinu prisutne mikroplastike. Kako podaci o istraživanju prisustva mikroplastike u rijeci Cijevni nisu poznati, kao i njenom značajnom uticaju na životnu sredinu, ovo je bio jedan od motiva u procesu istraživanja.

Istraživanje je koncipirano na bazi raspoloživih studija, oslanjajući se na studiju autora Bošković i sar. (2023) „Microplastic pollution in rivers of the Adriatic Sea basin in Montenegro: Impact on pollution of the Montenegrin coastline“, koje je prvo istraživanje zastupljene količine mikroplastike u crnogorskim rijekama.

2. TEORIJSKI DIO

2.1 Vrste i karakteristike mikroplastike

Glavna svojstva mikroplastike se mogu identifikovati iz njene definicije i opše karakterizacije: čestice mikroplastike su čvrste čestice, dimenzija manjih od 5 mm, nerastvorljive u vodi, nerazgradive i sastavljene od sintetičkih materijala sa visokim sadržajem polimera [11].

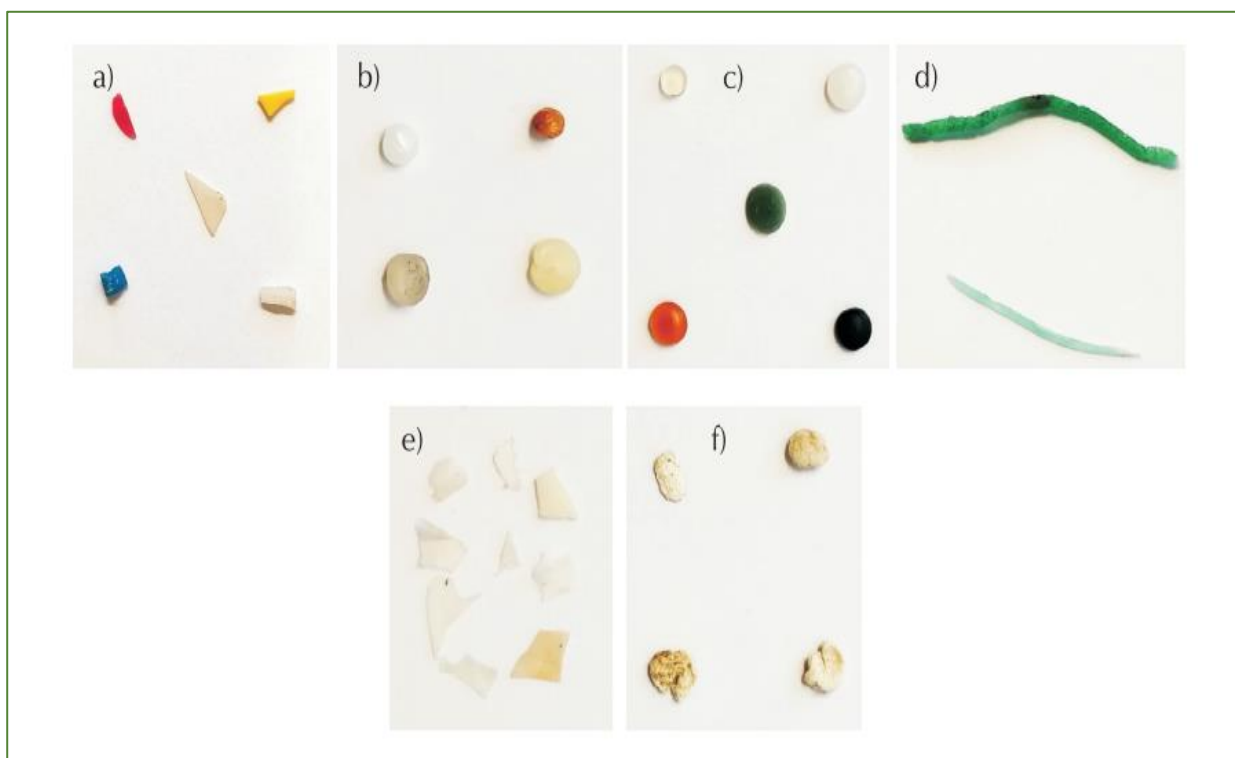
Osobine mikroplastike možemo grupisati na osnovu njihovih fizičkih i hemijskih svojstava [12].

2.2 Fizička svojstva mikroplastike

Ključni parametar u distribuciji mikroplastike u rječnim ekosistemima je gustina, pri čemu čestice manje gustine od vode plutaju na njenoj površini ili su suspendovane u vodi. Raspon gustine je specifična karakteristika svakog tipa polimera. Tako se gustine polivinil-hlorida, polietilen-tereftalata, polikarbonata, polistirena, polietilena i polipropilena kreću u rasponima od 1,38–1,51 g/cm³, 1,38–1,41 g/cm³, 1,20 g/cm³, 1,20–1,08 g/cm³, 0,89–0,98 g/cm³ i 0,85–0,91 g/cm³, respektivno [12].

Mikroplastika može imati različite boje, među kojim najčešće dominiraju: plava, crna, crvena, narandžasta, žuta i bijela. Ovo može predstavljati jednu od važnijih karakteristika koju treba uzeti u obzir kada se ocjenjuje toksičnost mikroplastike. Zastupljenost boja mikroplastike varira u odnosu na analizirano područje, ali je zavisna i od vrste uzoraka koji se analiziraju [12]. U Kini su najčešće identifikovane providne, bijele, crne i obojene čestice mikroplastike [13], dok su centralnoj Pomeraniji u Poljskoj (u rijekama Slupia i Lupava) boje mikroplastike bile slične onima u prirodnim komponentama poput hrane, vode i sedimenata [14]. Wu i sar. (2020) ukazuju da slatkovodne ribe biraju čestice mikroplastike prema njihovoj boji, što može biti povezano sa njihovim navikama hranjenja i sposobnošću prepoznavanja objekata u vodi [15]. Takođe, opsežna istraživanja su pokazala da je plava boja mikroplastike najzastupljenija u okeanima i da ima veću otpornost na UV degradaciju u poređenju s drugim bojama [16].

U odnosu na oblik, mikroplastika bi se mogla klasifikovati u nekoliko kategorija: sferni, nepravilni i vlaknasti [12]. Takođe, ove čestice se mogu naći i u drugim oblicima, kao što su fragmenti, filmovi, folije i slično. Primjeri oblika mikroplastike: a) fragmenti, b) peleti, c) granule, d) filament, e) filmovi i f) pjenasti oblici dati su na slici 1. [17].



Slika 1. *Primjeri oblika mikroplastike: a) fragmenti, b) peleti, c) granule, d) filament, e) filmovi i f) pjenasti oblici*

Porijeklo fragmenata, filma i folija se obično povezuje sa razgradnjom veće plastike [8]. Studije Au i sar. (2015) sugeriraju da čestice sfernog oblika imaju tendenciju da potonu mnogo brže od filmova i vlakana jednake gustine. Oblik mikroplastike utiče na vrijeme tokom kojega čestice ostaju u organizmima životinja nakon što ih progutaju, kao i na proces eliminacije. Zbog poteškoća u izbacivanju vlaknastih čestica, ovaj oblik čestica mikroplastike predstavlja opasnost po živa bića, zbog čega se, posmatraju kao veća prijetnja u odnosu na ostale oblike [18].

Kao što je već napomenuto, čestice mikroplastike se kreću u rasponu od 1 μ m do 5 mm, što je ključno za interakciju između mikroplastike i svih komponenti slatkovodnih ekosistema (voda, sediment, mikroorganizmi, biljni i životinjski organizmi). Njihova mala veličina omogućava slatkovodnim organizmima da ih lako progutaju ili integrišu u svoje tijelo. Osim toga, veličina mikroplastike utiče na transport, akumulaciju i vrijeme zadržavanja u organizmima [12].

Prema rasporedu molekulskih lanaca, polimeri se dijele na kristalne, amorfne i polikristalne. U kristalnim polimerima molekularni lanci su gusto i pravilno raspoređeni, dok su kod amorfni polimera molekulskih lanci raspoređeni nasumično i labavo. Što je niža kristalnost mikroplastike, to je veći udio amorfnih rasporeda molekulskih lanaca, koji, zbog svoje strukture, omogućavaju lakše vezivanje i adsorpciju zagađivača, čime mikroplastika postaje efikasniji prenosnik štetnih materija. Liu i sar. (2023) otkrili su negativnu korelaciju između stepena kristalnosti mikroplastike

i njene sposobnosti adsorpcije. Mnoge studije potvrđuju da smanjenje kristalnosti kod polimera poput PE i PS pojačava sorpcione kapacitete za hidrofobne organske zagađivače. Kod mikroplastike u izvornom obliku, veći stepen kristalnosti umanjuje adsorpciju, dok kod one koja je prošla proces vremenskog starenja—usled promjena u specifičnoj površini, kristalnosti i funkcionalnim površinskim grupama—dolazi do povećanja adsorptivnih kapaciteta [19].

2.3 Hemijska svojstva mikroplastike

Hemijska struktura mikroplastike zavisi od vrste plastike od koje je izgrađena. Iako može sadržati i polimere prirodnog porijekla, mikroplastika većim dijelom sadrži sintetičke polimere, među kojima su najzastupljeniji: polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinil-hlorid (PVC) i polistiren (PS), što značajno utiče na njene fizičke i hemijske interakcije sa okolinom [20].

Analiza hemijskog sastava mikroplastike pokazuje da su ove čestice često povezane sa specifičnim molekulima i hemikalijama. U zavisnosti od porijekla i okolnosti, mikroplastika može biti povezana sa dva glavna tipa čestica:

- Aditivi i polimerne sirovine – dodaju se plastici u cilju poboljšanja njenih osobina, u zavisnosti od namjene (stabilizatori, plastifikatori i boje).
- Hemijska jedinjenja iz okruženja – zagađivači koji se vezuju na površinu mikroplastike, uključujući teške metale, pesticide i organska jedinjenja poput policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH) [12].

Studije pokazuju da određeni tipovi mikroplastike, poput polivinil-hlorida (PVC) i polietilena (PE), imaju visok afinitet za teške metale kao što su kadmijum (Cd), olovo (Pb) i bakar (Cu). Na primjer, PVC u vodenim ekosistemima može adsorbovati do 21 mg Cd po gramu PVC-a pod specifičnim uslovima [21]. Shodno tome, čestice mikroplastike, adsorbujući na svojoj površini teške metale, djeluju kao njihovi vektori za transport u životnoj sredini [12].

Takođe, formiranje biofilma na mikroplastici igra ključnu ulogu u njenom ponašanju u životnoj sredini, naročito u vodenim ekosistemima. Mikroorganizmi se prilagođavaju kolonizaciji mikroplastike, formirajući biofilm u kojem mikrobi formiraju zajednice unutar ekstracelularnih polimernih supstanci [23].

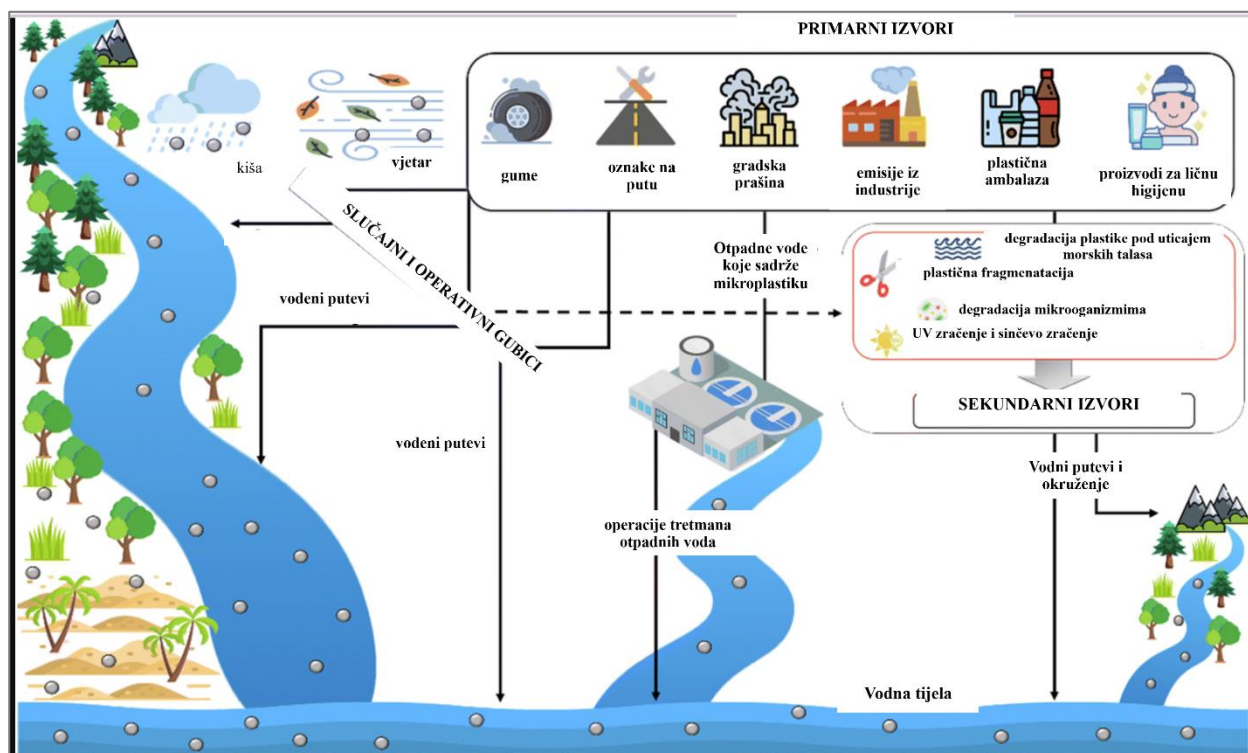
Ovaj biofilm omogućava mikroorganizmima da prežive i funkcionišu na površinama mikroplastike, što može uticati na ekološke sisteme kroz povećanje stabilnosti mikroplastike u vodi, njen transport i ulazak u lanac ishrane, što može imati negativne efekte na živi svijet [22]. Biofilmovi na površini mikroplastike formiraju dodatne funkcionalne grupe, poput karboksilnih i estarskih, koje povećavaju njenu sposobnost vezivanja teških metala. Zavisno od uslova u vodenim i kopnenim okruženjima, ove funkcionalne grupe čine mikroplastiku reaktivnijom, što omogućava intenzivnije interakcije sa zagađivačima [23].

Zhang i sar. (2022) ukazuju da različite vrste plastike, poput polietilena (PE), polipropilena (PP) i polistirena (PS) imaju različite sposobnosti za adheziju mikroorganizama, što može uticati na brzinu i obim formiranja biofilma [24].

Istraživanja pokazuju da plastika koja je izložena UV svjetlosti i morskoj vodi može razviti porozne površine koje olakšavaju naseljavanje mikroorganizama. UV svjetlost utiče na fotodegradaciju plastike, što dovodi do stvaranja mikroskopski sitnih pukotina i oštećenja na njenoj površini. Ove promjene čine plastiku pogodnijom za adheziju mikroorganizama, koji mogu kolonizovati plastiku u morskim ekosistemima. Takve površinske promjene mogu omogućiti brže naseljavanje i rast bioloških zajednica, što zauzvrat može uticati na biogeochemijske procese u vodenim ekosistemima, kao i na dinamiku plastičnog zagađenja [24].

2.4 Izvori mikroplastike

Kada je riječ o izvorima mikroplastike, izdvaja se nekoliko glavnih puteva mehanizama nastanka ovih čestica: razlaganje većih fragmenata, direktno ispuštanje otpadnih voda u vodotokove, kao i slučajno ispuštanje industrijske sirovine [25]. Detaljan pregled izvora i puteva distribucije mikroplastike do vodenim ekosistema, detaljno je ilustrovan na slici 2 [26].



Slika 2. Primarni i sekundarni izvori mikroplastike

U zavisnosti od puta formiranja, odnosno njenih izvora, mikroplastika se klasifikuje u dvije kategorije:

- primarna mikroplastika
- sekundarna mikroplastika [27].

Primarni izvori uključuju ciljano proizvedene čestice mikroplastike koje se koriste u industrijskim proizvodima, kao što su: plastika korišćena u proizvodima lične higijene poput pilinga, paste za zube, šampona i sličnih proizvoda. Studije su otkrile da proizvodi poput gelova za čišćenje lica sadrže mikroplastiku u koncentracijama do 0,05 g/g (2.450 čestica/g) [25]. Važan izvor zagađenja, koji se često pominje u istraživanjima na temu mikroplastike su i čestice od habanja guma. Krhkotine se mehanički stvaraju prilikom trenja gume i površine, kao i isparavanjem odloženih otpadnih guma [12].

Dakle, glavni izvori primarne mikroplastike su sintetički tekstil, lični proizvodi za njegu, gume, gradska prašina, postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda i atmosferske padavine [28].

Atmosferske padavine igraju značajnu ulogu u transportu mikroplastike u vodene ekosisteme. Istraživanja pokazuju da se mikroplastika, koja nastaje različitim ljudskim aktivnostima, kao što

su proizvodnja plastike, industrijski procesi i trošenje guma, transportuje vazduhom i taloži na površine kopna i vode putem padavina [29]. Studija Drisa i sar. (2016) ukazuje da 29 % mikroplastike u atmosferi Pariza čine plastični polimeri, što potvrđuje da padavine mogu značajno doprinijeti širenju mikroplastike u vodenim ekosistemima [30].

Mikroplastika u vodene ekosisteme može direktno dospjeti putem postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (PPOV). Razumijevanje uloge PPOV u transportu mikroplastike u vodenim ekosistemima je od ključne važnosti. U područjima sa visokom gustom naseljenosti, PPOV predstavljaju jedan od glavnih izvora mikroplastike. Cheung i Fok (2017) procjenjuju da oko 80% mikroplastike u vodama Kine potiče od otpadnih voda iz PPOV [1]. Nedavne studije su istakle da je poljoprivreda, takođe, jedan od glavnih antropogenih aktivnosti koja generiše dospijeće mikroplastike u zemljište, kroz upotrebu kanalizacionog mulja i plastičnih materijala u cilju poboljšanja efikasnosti rada u ovoj oblasti [31].

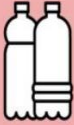
Sekundarni izvori mikroplastike su definisani kao sekundarna mikroplastika, koja nastaje razgradnjom većih plastičnih djelova kroz procese fizičke, hemijske i biološke razgradnje. Ovi procesi podrazumijevaju:

- Fotodegradaciju sunčevom svjetlošću – najčešće uzorkovano UV zračenjem,
- Mehaničku degradaciju– dejstvo talasa i trenje pijeska,
- Termooksidativnu degradaciju,
- Biorazgradnju mikroorganizmima koji mogu razgraditi ugljovodonike u polimernom lancu [32].

Čestice mikroplastike se sporo biorazgrađuju, odnosno mogu opstati u vodenim ekosistemima stotinama hiljada godina. Oko polovine mikroplastike u prirodnim vodama ima gustinu manju od vode, omogućavajući joj distribuciju, pod uticajem plime, osjeke i vjetra. Dio ovih čestica ulazi u okeanske struje, stvarajući zone akumulacije, kao što je na primjer slučaj sa Sjevernopacifičkim otpadom. Drugi dio se taloži usled promjena gustine koje izaziva mikrobiološko vezivanje i flokulaciju sedimenta. Proces distribucije mikroplastike je kompleksan i zavisi od različitih faktora, uključujući topografiju i hidrodinamiku. Osim što se distribuira, mikroplastika može biti zarobljena u sedimentima, čime se produžava njen uticaj na ekosistem [33]. Stoga, promjenljivi putevi transporta i uticaja mikroplastike, sugerišu da je veći dio organizama izložen njenoj kontaminaciji. Različite interakcije unutar vodenih ekosistema rezultiraju akumulacijom mikroplastike u organizmima, što dovodi do njenog ulaska u lanac ishrane [34].

Često se struktura čestica mikroplastike povezuje sa izvorima njenog zagađenja. Proučavanje profila polimera pomaže istraživačima da prepoznaju glavne izvore zagađenja u određenim oblastima. Tako, polietilen (PE) i polipropilen (PP) su najviše zastupljeni oblici plastike morskim ekosistemima, a često dolaze iz ambalaže i plastičnih proizvoda za jednokratnu upotrebu (Slika 3) [35].

Njihova prisutnost u vodi ukazuje na to da je plastični otpad potrošačkog porijekla jedan od glavnih uzroka zagađenja u morima. S druge strane, poliamidi (kao što je najlon), često pronađeni u rijekama i priobalnim područjima, obično potiču od sintetičkih tekstila, koji ispuštaju mikrovlakna tokom pranja odjeće [35]. Na slici 3 su prikazane vrste plastike (polietilen-tereftalat, polietilen visoke gustine, polivinil-hlorid, polietilen niske gustine, polipropilen, polistiren i drugi), njihovi simboli za reciklažu i najčešći izvori porijekla, odnosno namjene, ovih polimera [36].

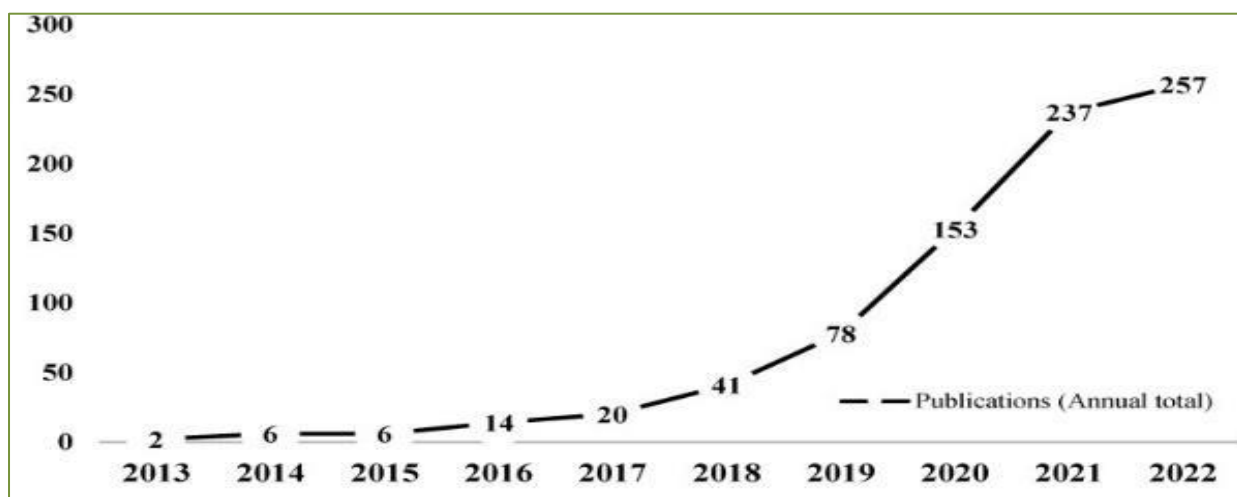
						
PETE	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	OTHER
Polietilen teraftalat	Polietilen visoke gustine	Polivinil hlorid	Polietilen niske gustine	Polipropilen	Polistiren	Drugo
						
flaše za vodu i bezalkoholna pića, pakovanja za hranu	flaše za mlijeko, deterdžente, hemikalije	plastične cijevi, flašice za kozmetiku	kese za otpad, kese za vakumiranje, folije za pakovanje	plastične čaše i pribor za jelo, zatvarači, igračke	jednokratne čaše za vruća napitke, kartoni za jaja, zaštitna pakovanja	rashladne flaše za vodu, bočice za bebe, djelovi automobila

Slika 3. *Primjeri porijekla različitih vrsta polimera*

Studija Perdomo-González i sar. (2022) ukazuje da prisustvo pesticida na česticama mikroplastike može biti pokazatelj poljoprivrednog porijekla zagađenja, dok biološki kontaminanti, kao što su bakterije, mogu dati trag o izvorima u blizini kanalizacionih ispusta [37].

3. LITERATURNI PREGLED

Procjena uticaja mikroplastike na životnu sredinu podstakla je na brojna istraživanja, koja bilježe svoj porast svake godine. Ovaj trend je naročito izražen u broju istraživanja i publikacija u slatkovodnim ekosistemima, što je prikazano na slici 4 [38].



Slika 4. Kretanje trenda istraživanja i publikacija iz oblasti mikroplastike u slatkovodnim ekosistemima

Iako se manje pažnje posvećuje istraživanjima uticaja mikroplastike u rječnim tokovima, brojne analize i istraživanja pokazuju veoma veliku prisutnost ovih čestica u gotovo svim rijekama u svijetu. U tabeli 1 su prikazani primjeri lokacija na kojima je vršeno istraživanje, sa identifikovanim količinama, veličinama i bojama čestica mikroplastike, kao i vrsti polimera [39].

Tabela 1. Prikaz prisutnosti mikroplastike u sedimentu rijeka i jezera sa različitih kontinenata, prilagođeno izvoru

Lokacije	Količina čestica/kg	Veličina čestica(mm)	Oblik čestica	Boja čestica	Vrsta plastike	Referenca
Istočno Dongting jezero, Kina	180 ± 111 do 163 ± 95	<0.5	Vlakno	Providna	PET	Ying i sar.2020
Jezero Ulansuhai, Kina	14 ± 3 do 24 ± 7	<0.2	Vlakno	Crna	PE	Qin i sar.2019
Rijeka Pearl, Kina	685 ± 342	1.0 - 5.0	Film	Bijela	PP i PE	Fan i sar.2019
Rijeka Wei, Kina	360 - 1320	0.5	Vlakno	NA	NA	Ding i sar.2019
Jezero Poiang, Kina	45 - 506	0.5	Vlakno	Više boja	PP i PE	Yuan i sar.2019
Jezero Dongting, Kina	200 - 1150	0.5	Vlakno	Proziran	PE i PET	Jiang i sar. 2018
Rijeke u Šangaju, Kina	802	NA	Sfera	Bijela	PP	Peng i sar. 2018
Tri klisure rezervoara, Kina	25 - 300	1	Vlakno	Providno	PS	Di i wang, 2018
Rijeka Skudai i Tebrau, Malezija	200 ± 80 i 680 ± 140	1.0 - 5.0	Folija	Plava	NA	Sarjan i sar.2018
Rijeka Beijang, Kina	544 ± 107	NA	NA	NA	NA	Wang i sar.2017
Sedam potoka u Brizetu, Northern Tunisia	2340 ± 227.15 - 6920 ± 395.98	NA	Vlakno	Crna	PP i PE	Toumi i sar. 2019
Sliv rijeke Atoyac, grad Puebla, Meksiko	833.33 ± 80.79 - 1633.34 ± 202.56	NA	Folija	Više boja	NA	Shruti i sar.2019
Rijeka Otava Kanada	0.22 čestice po gramu	NA	Vlakno	Plava i crvena	NA	Vermaire i sar.2017
Rijeka Sv. Lovre, Kanada	13 832 ± 13 677 mikroperla po m2	NA	Mikroperla	NA	NA	Castaneda i sar. 2014
Rijeka Antua, Portugal	U martu: 100- 629; u oktobru: 18 - 514	NA	Fragmenti	Više boja	PP i PE	Rodrigues i sar. 2018
UK Urban Jezero	25 - 30 čestica/100g	NA	Folija i vlakno	NA	NA	Vaughan i sar. 2017
Rijeka Rajna-Majn, Njemačka	4000	0.63 - 5.0	NA	NA	PP, PE i PS	Klein i sar.2015

Zbyszewski i Corcoran (2011) su prvi put otkrili mikroplastiku 2011. godine duž obale jezera Huron u Kanadi, dok godinu iza njih Faure i sar. (2012) prijavljuju značajne količine mikroplastike u Ženevskom jezeru (dio Francuske obale). Zagađenje mikroplastikom u različitim slatkovodnim sistemima, od tada, počinje da se identifikuje kao važan problem u životnoj sredini [40].

U studiji Bošković i sar. (2023) prikazani su rezultati istraživanja prisustva čestica mikroplastike u rijekama sliva Jadranskog mora u Crnoj Gori. Ovom studijom ispitivane su koncentracije mikroplastike na obalnim sedimentima rijeka Zete, Morače i Bojane u Crnoj Gori. Koncentracija mikroplastike u ispitivanim uzorcima varirala je u zavisnosti od rijeke, lokacije i sezone uzorkovanja. Najzastupljeniji oblici mikroplastike bili su: vlakna i fragmenti, dok su najzastupljeniji tipovi polimera bili: polietilen i polipropilen. Rezultati ove studije ukazuju na prisustvo i distribuciju mikroplastike u riječnim sedimentima i naglašavaju potrebu za unapređenjem znanja o izvorima i sudbini mikroplastike i njihovim uticajima na riječne ekosisteme, kao i da su glavni izvori mikroplastike u proučavanim rijekama otpadne vode i komunalni otpad [10].

Studija Matjašiča i sar. (2023) se odnosi na istraživanje uzoraka dobijenih iz dva sliva u Sloveniji: Kamniška Bistrica i Ljubljance, sa fokusom na određivanju obrazaca i tipova dužine zagađenja manjih razmjera. Razumijevanje izvora i sudbine mikroplastike ključno je za smanjenje njenog uticaja na ekosisteme koji je akumuliraju. Glavni cilj studije bio je da se istraže ekološki i antropogeni faktori koji utiču na mikroplastiku, uključujući hidrogeomorfologiju, koncentraciju, tip, oblik i veličinu čestica mikroplastike. Kao zaključak studije navodi se da su karakteristike sliva, mjesto uzorkovanja duž rijeke, vrsta uzorka i metoda uzorkovanja, kao i hidrometeorološke karakteristike u vrijeme uzorkovanja važni faktori za uočenu količinu mikroplastike [41].

U studiji Penga i sar. (2018) procijenjene su količine mikroplastike u riječnom sedimentu Šangaja, kao najvećeg urbanog područja u Kini. Cilj istraživanja je bio bolje razumijevanje distribucije mikroplastike u urbanim rijekama. Svi uzorci su sadržali mikroplastiku u različitim količinama [42].

Idowua i sar. (2024) u svojoj studiji prikazuje zabrinjavajuće rezultate o nivou zagađenja česticama mikroplastike u rijeci Osun, koja služi kao izvor vode za piće za određene zajednice u državi Osun u Nigeriji. Izobilje mikroplastike u uzorcima vode iz rijeke predstavlja najviše prijavljenu koncentraciju za riječnu vodu na globalnom nivou [43].

U cilju boljeg razumijevanja obrazaca disperzije i transporta mikroplastike u riječnim tokovima, He i sar. (2021) naglasak stavljaju na modeliranje ovih pojava. Trodimenzionalnim i hidrodinamičkim modeliranjem transporta čestica mikroplastike stvoren je okvir za istraživanje procesa disperzije i transporta čestica mikroplastike, koje su obično prisutne u životnoj sredini, sa naglaskom na polietilen, polipropilen, poliamid i polietilen-tereftalat u riječnim sedimentima. S obzirom na ograničenje disperzije i transporta, rezultati studije su pokazali da bi riječni sedimenti djelovali kao ponor za čestice mikroplastike, umjesto da budu transportni put [44].

Velika se pažnja posvećuje istraživanju uticaja mikroplastike na čovjeka. Istraživanje uzoraka nazalnog sekreta otkrilo je prisustvo 21 vrste mikroplastike. Takođe, sugerise se i da disanje predstavlja potencijalnu ulaznu tačku mikroplastike, pri čemu je ustanovljena bioraspodjeljivost čestica mikroplastike u ljudskom krvotoku. Pronađene su četiri vrste polimera koji se koriste u plastici, kao što je polietilen-tereftalat, polietilen, polimeri stirena i metil-metakrilat, u krvi 22 zdrava ispitanika. Naučnici su otkrili mikroplastiku prvi put u ljudskoj posteljici, što je izazvalo zabrinutost da bi ove čestice mogle da ometaju embrionalni razvoj (otkriveno prisustvo 12 fragmenata mikroplastike) [45].

U Crnoj Gori, u poslednjih par godina, sprovedeno je više istraživanja o prisustvu mikroplastike na crnogorskom primorju, kao i u rijekama Jadranskog sliva. Jadransko more je jedno od tri najzagađenija evropska mora, odnosno sediment Crnogorskog primorja je umjereno do jako zagađen mikroplastikom (u zavisnosti od lokacije) [46].

Ispitivano je prisustvo mikroplastike i u komercijalnim ribama sa crnogorskog primorja, u osliću i barbunu. Utvrđeno je da su 7 od 10 riba sa crnogorskog primorja u sebi sadržale mikroplastiku. Takođe, osim ispitivanja prisustva mikroplastike u sedimentu i ribama sa crnogorskog primorja, ispitano je prisustvo mikroplastike u školjkama (dagnjama) iz Bokotorskog zaliva. Utvrđeno je da 8 od 15 školjki Bokotorskog zaliva u sebi sadrži mikroplastiku i procijenjeno je da potrošač godišnje može unijeti oko 99 čestica mikroplastike [34]. Mikroplastika je pronađena u 53,3% istraživanih dagnji (*Mytilus sp.*), sa prosječnom zastupljenošću od $2,53 \pm 1,1$ komada mikroplastike. Najzastupljeniji polimeri koji su pronađeni su polietilen, polipropilen i polietilen-tereftalat. Uz jednu porciju dagnji, potrošač bi godišnje unio 99 čestica mikroplastike [47].

Sveukupno rezimirajući, ubrzan rast broja radova o mikroplastici, posebno u poslednjoj deceniji, može se povezati sa sve većim priznavanjem njenog uticaja na živi svijet. Razumijevanje vrsta i

koncentracija mikroplastike u različitim vodenim organizmima ključno je za procjenu njihovih dugoročnih posljedica na lokalne i globalne ekosisteme.

Dakle, mala veličina čestica mikroplastike im omogućava da uđu u lanac ishrane kroz gutanje od strane organizama u vodenim sistemima. Progutane čestice mogu izazvati fizička oštećenja i blokirati digestivni sistem životinja [48]. Morske ptice su, takođe, pogođene prisustvom mikroplastike u njihovom digestivnom sistemu. Konstatovano je i prisustvo mikroplastike kod morskih sisara, kao što su kitovi, foke, morske kornjače i polarni medvedi [49].

Čestice mikroplastike, takođe, mogu biti nosioci postojećih organskih zagađivača i mikroorganizama kroz sposobnost akumuliranja u tkivima organizama, kada kroz lanac ishrane, na kraju, dopijevaju do čovjeka [48].

Glavni izvori izloženosti čovjeka mikroplastikom su:

- Gutanje vode ili hrane
- Udisanje unutrašnjeg i spoljašnjeg vazduha
- Kožni kontakt preko prašine, proizvoda za ličnu njegu i odjeće [50].

Iako mikroplastika ima toksične efekte, procjena rizika po ljudsko zdravlje usled izloženosti mikroplastici nije jednostavna. Većina postojećih metoda pruža kvantitativne podatke o broju čestica mikroplastike, njihovoj veličini i obliku, ali ne uspijeva da prevede ove podatke u relevantne vrijednosti doze ili mase [50]. Prema istraživanju Rahman i sar. (2021) procenjuje se da količina mikroplastike koju prosječna osoba može unijeti tokom godine varira između 11.845 i 193.200 čestica, pri čemu većina tih čestica dolazi iz konzumiranja vode za piće [51].

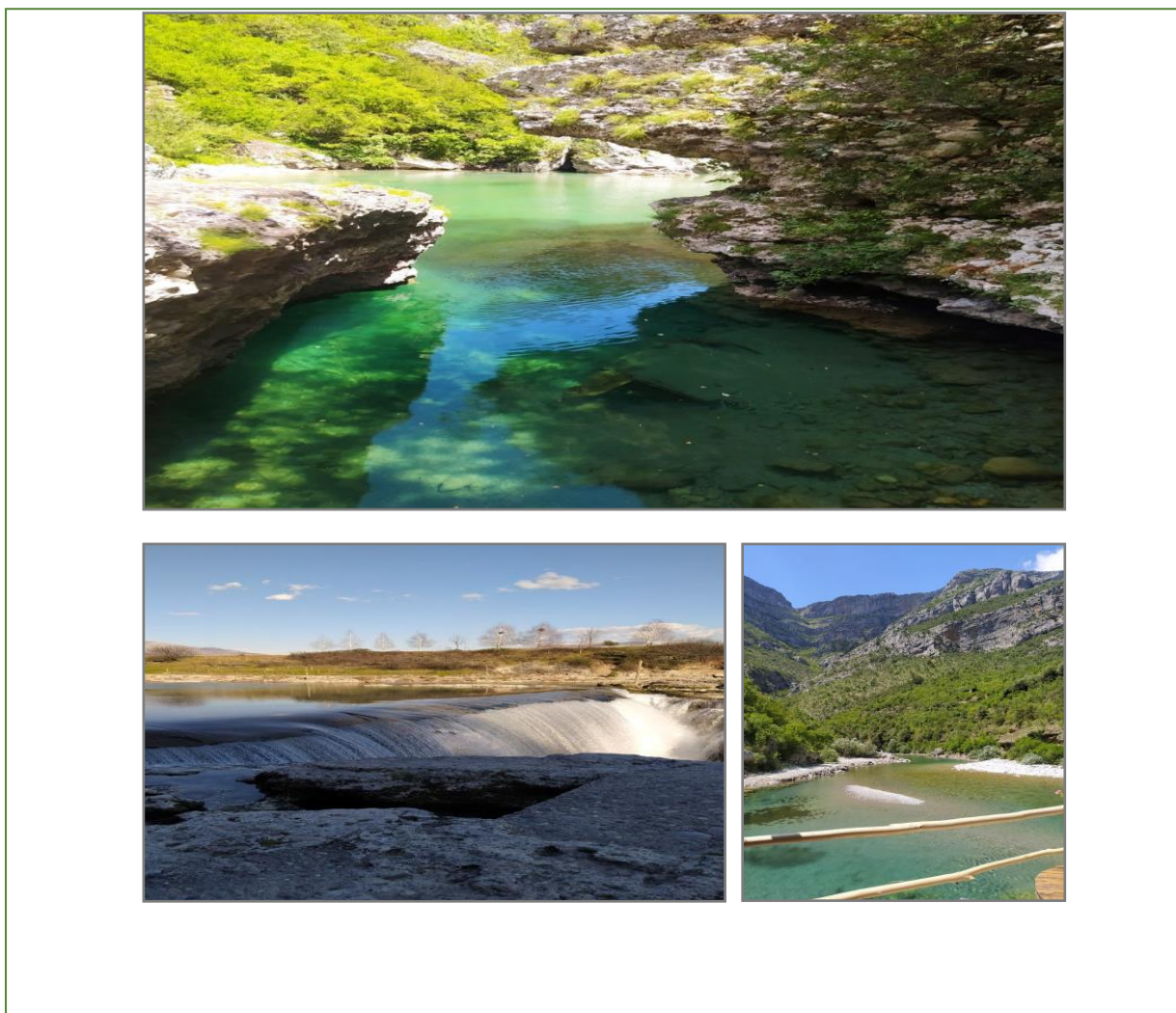
Jedan od načina unošenja mikroplastike u organizam čovjeka je i inhaliranje, gdje Viršek i sar. (2016) u studiji ističu povećanu izloženost ljudi mikroplastikom u područjima sa višim nivoima zagađenja vazduha [48].

U Crnoj Gori, a i u regionu, veliki naglasak se stavlja na plastiku koja je biorazgradiva, kao ekološki prihvatljiva alternativa. Međutim, iako biorazgradiva mikroplastika teoretski može brže da se razgrađuje u odnosu na tradicionalnu plastiku, ona može opstati u ekosistemima gdje su uslovi za degradaciju nepovoljni, što implicira da može izazvati dugoročne negativne posljedice na

ekosisteme. Konkretno, prisustvo razgradive bioplastike može dovesti do smanjenja kvaliteta tla, usporavanja rasta biljaka i ugrožavanja zdravlja vodenih biljaka [52].

4. HIDROGEOMORFOLOŠKE KARAKTERISTIKE RIJEKE CIJEVNE

Kanjonska regija rijeke Cijevne (Slika 5), kao dio sliva Morače i Skadarskog jezera, ističe se kao izuzetna prirodna vrijednost koja prevazilazi granice Crne Gore. Ova oblast funkcioniše kao prirodna veza između donjeg dijela Nacionalnog parka „Skadarsko jezero“ i izvornih područja Nacionalnog parka „Prokletije“. Zbog svojih karakteristika, Cijevna predstavlja jedan od najvažnijih ekoloških lokaliteta na Balkanskom poluostrvu [53].



Slika 5: *Riječni tok rijeke Cijevne (iz arhive autora rada)*

Hidrogeološki, rijeka Cijevna pokriva jugoistočni dio sliva Skadarskog jezera, koji se, zajedno sa basenom rijeke Bojane, svrstava u Jadranski sliv. Njena dužina od 58,8 km čini je najvećom rijekom u regionu Prokletija, sa 32,3 km kroz Crnu Goru i 26,5 km kroz Albaniju, prosječno se nalazeći na 1.237 metara nadmorske visine. Kanjonski ekosistem je prepoznat kao značajno

stanište za biljke i ptice, te se zaštitno tretira kao EMERALD (evropski okvir za zaštitu biodiverziteta definisan Bernskom konvencijom) područje [53].

Geomorfološki, kanjon rijeke Cijevne posjeduje karakteristične holokarstne oblike kao što su jame, pećine i ponori, a specifične erozijske forme su rezultat istorijskih klimatskih promjena. Geomorfologija ovog područja se oblikovala pod uticajem tektonskih struktura i fluvijalne erozije. U slivu Cijevne preovladavaju stijene iz perioda mezozoika i kenozoika, pri čemu su fluvioglacialni sedimenti najzastupljeniji, dok su aluvijalni sedimenti rjeđi [54].

Hidrometeorološki podaci pokazuju da ovaj region ima mediteranski tip klime, sa manje padavina tokom ljeta i više u hladnijim mjesecima. Godišnji prosjek padavina iznosi 2.500 mm, pri čemu se najviše padavina bilježi u novembru (361,0 mm), dok je jul najsušniji mjesec sa 69,9 mm padavina [54].

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1 Metode i tehnike ispitivanja prisustva mikroplastike

Metode koje su korišćene u cilju ispitivanja prisustva mikroplastike u sedimentu su: uzorkovanje, laboratorijska obrada (sušenje uzorka, razdvajanje po gustini, filtracija, razgradnja organske materije), vizuelna i hemijska identifikacija i statističke analize. Za primjenu ovih metoda korišteni su sljedeći instrumenti: sušnica (DRYSCN43), optički mikroskop (STEBD optički profesionalni mikroskop, sa zumom koji posjeduje ekran veličine 13 inča, Intel integrisana grafika), stereomikroskopom (Zeiss Discovery V8, Plan S, 1.0x FWD 81mm), infracrveni spektrometar sa Furijeovom transformacijom - FTIR mikroskop - Bruker Hyperion 3000 i Raman spektroskopom (Witec alpha 300 AFM, Raman, Scanning Near-field Optical Microscope (SNOM)). Mjerenja su obrađena softverom Purency.

5.2 Uzorkovanje u dvije sezone

Sakupljanje uzoraka priobalnog sedimenta je vršeno u toku dvije sezone: proljeće i jesen (Tabela 2).

Tabela 2: Prikaz obilježavanja uzoraka sa opisom lokacije

Naziv uzorka	Opis lokacije	Sezona uzorkovanja
L₁-A	Granica sa Republikom Albanijom; naselje Delaj	Proljeće
L₂-A	Središnji dio toka; naselje kuća Rakića	Proljeće
L₃-A	Ušće rijeke Cijevne u rijeku Moraču; naselje Ljajkovići	Proljeće
L₁-B	Granica sa Republikom Albanijom; naselje Delaj	Jesen
L₂-B	Središnji dio toka; naselje kuća Rakića	Jesen
L₃-B	Ušće rijeke Cijevne u rijeku Moraču; naselje Ljajkovići	Jesen

Uzorkovanje je vršeno sa tri odabrane lokacije: na granici sa Republikom Albanijom, po sredini riječnog toka i na ušću rijeke Cijevne u rijeku Moraču (Tabela 3).

Tabela 3: Opis lokacija sa koordinatama sa kojih je izvršeno sakupljanje uzoraka u obje sezone

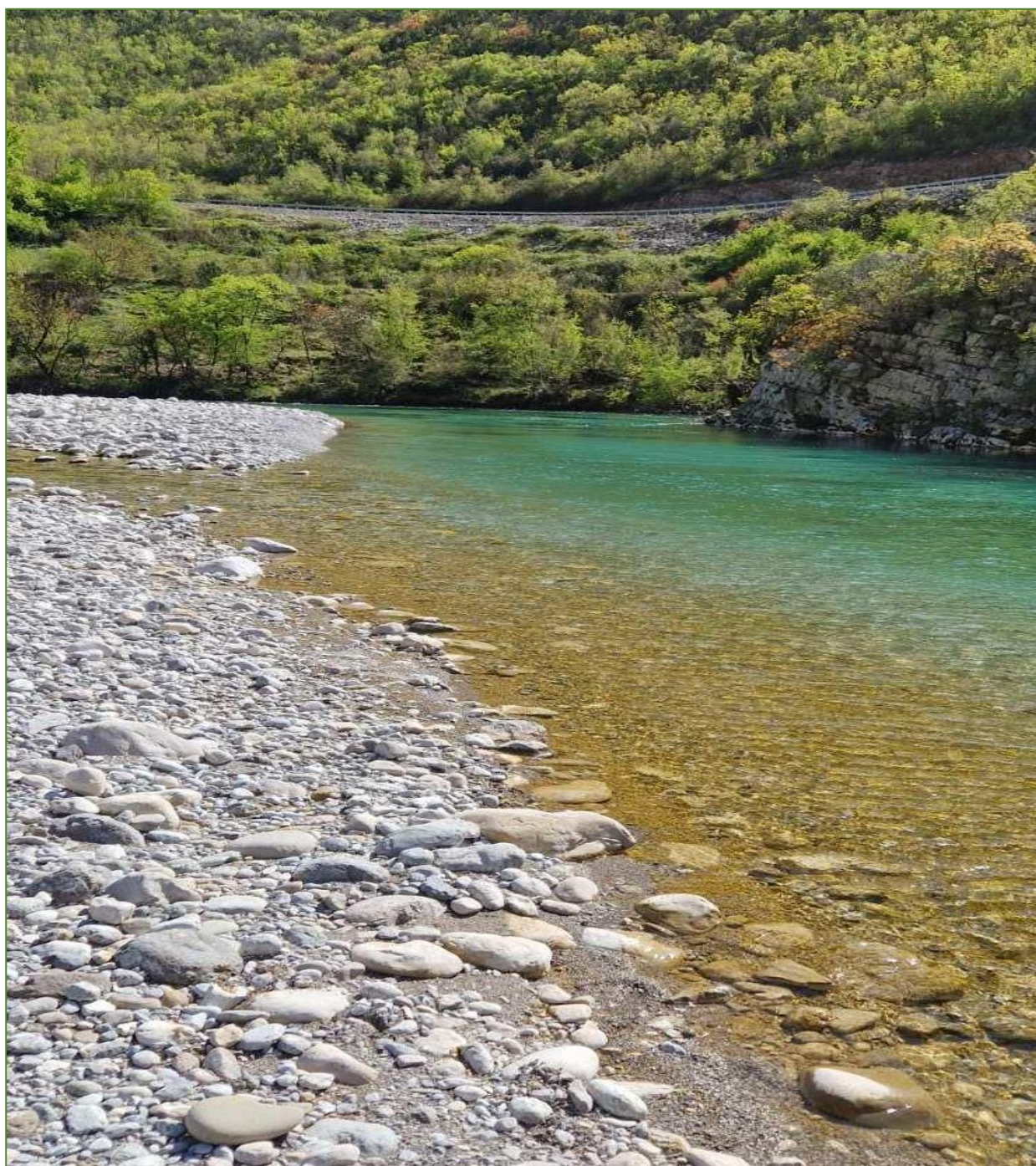
Redni broj	Opis lokacije	Koordinate
Lokacija 1	Granica sa Republikom Albanijom, naselje Delaj, Opština Tuzi	42.4285031°, 19.4857891°, ± 5 m
Lokacija 2	Središnji dio riječnog toka rijeke Cijevne, naselje Kuća Rakića, Opština Tuzi	42.3849066°, 19.2802695°, ± 5 m
Lokacija 3	Ušće rijeke Cijevne u rijeku Moraču, naselje Ljajkovići, Opština Zeta	42.3521888°, 19.2080932°, ± 4 m

Prije samog uzorkovanja, vršen je detaljan obilazak rječnog toka rijeke Cijevna u cilju analize najrelevantnijih lokacija za uzorkovanje. Pored navedenog, prilikom određivanja datuma uzorkovanja, praćena je vremenska prognoza u cilju povezivanja pet sunčanih dana. Mapa sa označenim lokacijama uzorkovanja je prikazano na slici 6.



Slika 6. Mapa lokacija sa kojih je izvršeno uzorkovanje (iz arhive autora rada)

Na Slici 7. je prikazana Lokacija 1 uzorkovanja, koja se nalazi na granici sa Republikom Albanijom. U blizini ove lokacije, u trenutku uzorkovanja u obje sezone se uočava jedan sezonski restoran na obali rijeke Cijevne (u jesenjoj sezoni je bio u fazi zatvaranja), jedna manja stočarska farma i par individualnih stambenih jedinica. Takođe, pored rječnog toka prolazi saobraćajnica duga cca 17 km, koja vodi ka graničnom prelazu sa republikom Albanijom.



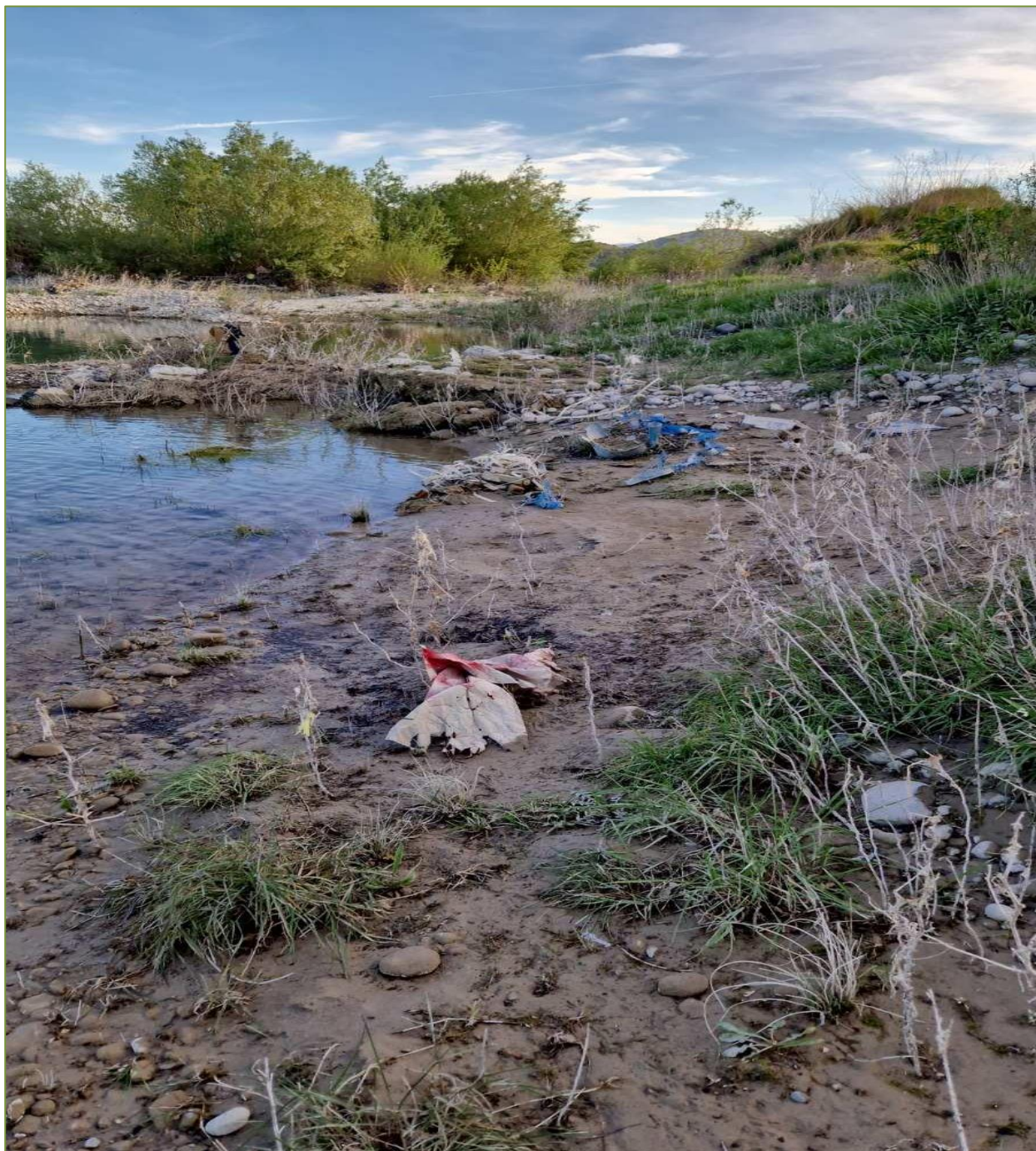
Slika 7. Lokacija 1 (iz arhive autora rada)

Na Slici 8 se nalazi Lokacija 2 na kojoj je vršeno uzorkovanje priobalnog sedimenta. U blizini ove lokacije se nalazi nacionalni restoran, plantaže vinove loze, nekoliko javnih kupališta, fabrika namještaja, centar za sakupljanje sekundarnih sirovina, prodajni i skladišteni objekti građevinskog materijala, jedna auto - mehaničarska radnja, kao i lokalna saobraćajnica uz gotovu cijelu dužinu rječnog toka do njenog ušća u rijeku Moraču. Takođe, uočava se veliki broj stambenih individualnih jedinica, što čini da je na ovoj lokaciji sveukupno veći antropogeni pritisak u odnosu na prvu lokaciju.



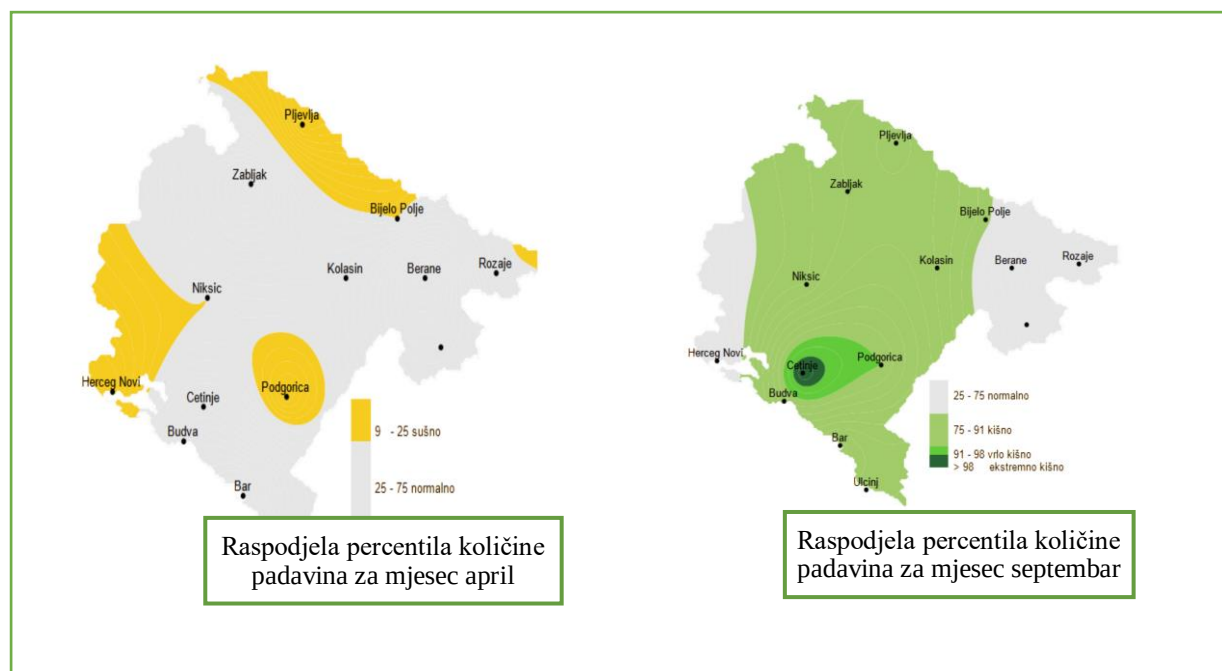
Slika 8. Lokacija 2 (iz arhive autora rada)

Na slici 9 je prikazana Lokacija 3 uzorkovanja. U odnosu na Lokaciju 2, sa obje strane obale se nalaze gusto naseljena područja, nekoliko građevinskih separacija i proizvodnja betona i nelegalnih odlagališta, skladište i radionica aluminijske bravarije i sličnih objekata. Terenskim obilaskom se kontatuje da je antropogeni pritisak najveći na ovoj lokaciji.



Slika 9. Lokacija 3 (iz arhive autora rada)

Prema zvaničnom izvještaju Zavoda za hidrometeorologiju i seizmologiju (Slika 10) u Podgorici je u mjesecu aprilu palo 73 lit/m², što čini 54 % od klimatske normale za april, dok je u mjesecu septembru palo 294 lit/m² kiše što je za 99 % veća količina padavina od klimatske normale 1991. - 2020.god [55].



Slika 10: Prikaz raspodjele padavina [55]

Kako bi se izbjegla kontaminacija uzoraka, za uzorkovanje je korišćena nerđajuća metalna kašika i staklene tegle (cca 1000 mL) sa metalnim poklopcem u kojima su sedimenti bili smješteni do dalje obrade u laboratoriji. Navedeni pribor je opran i ispran dejonizovanom vodom, pokriven aluminijumskom folijom prilikom sušenja.

Sa navedenih lokacija sakupljeno je oko 600 g priobalnog sedimenta sa gornjih pet centimetara (cm) granične linije vode i kopna. Ovo je urađeno prema preporukama Frias i sar. (2018) i Stock i sar. (2019) [6]. Sakupljeni uzorci su čuvani u obilježenim staklenim teglama i prenijeti u laboratoriju na dalju obradu. Uzorci su iz staklenih tegli premješteni u aluminijumske posude, koje su takođe, prethodno oprane i isprane dejonizovanom vodom. Dalja obrada uzoraka podrazumijevala je sušenje u sušnici (DRYSCN43) 48 h, na temperaturi od 44° C, nakon čega su smješteni u staklene tegle (Slika 11).



Slika 11. Obrada uzoraka (iz arhive autora rada)

5.2 Priprema uzoraka u dvije sezone

Najčešći metod za ekstrakciju čestica mikroplastike je razdvajanje na osnovu razlike u gustini. Ovo se može postići korišćenjem zasićenog rastvora NaCl, što je i primijenjeno u daljem radu pripreme uzoraka za identifikaciju mikroplastike [56]. Prezasićenom rastvoru NaCl je data prednost zbog sigurnosti i ekološke prihvatljivosti, efikasnosti, niske cijene i jednostavnosti primjene [57].

Prezasićeni rastvor je napravljen u normalnom sudu (2000 mL). Korak koji je uslijedio je vaganje 100 g osušenog sedimenta i miješanja istog sa 400 mL pripremljenog zasićenog rastvora NaCl, koji je manuelno miješan u zatvorenoj tegli oko 2 minuta. Nakon miješanja, uzorci su ostavljeni da se talože 24 h (Slika 12).



100g odmjereneog suvog uzorka



Izgled uzoraka, nakon miješanja sa prezasićenim rastvorom NaCl i taloženja

Slika 12. Postupak razdvajanja gustine (iz arhive autora rada)

Uzorci su filtrirani pod vakumom pomoću staklenog fileter papira (Whaman Glass filters - GF/C 1,2 μ m, 4,7 cm). Zidovi lijevka su isprani dejonizovanom vodom, kako bi se otklonile čestice mikroplastike koje bi se mogle „zakačiti“ za iste. Filteri su prebačeni u Petrijeve posude, a potom i podvrgnuti sušenju na 40° C (Slika 13).



Prirema za vakum filtraciju



Filtriranje uzoraka



Filtrirani uzorci



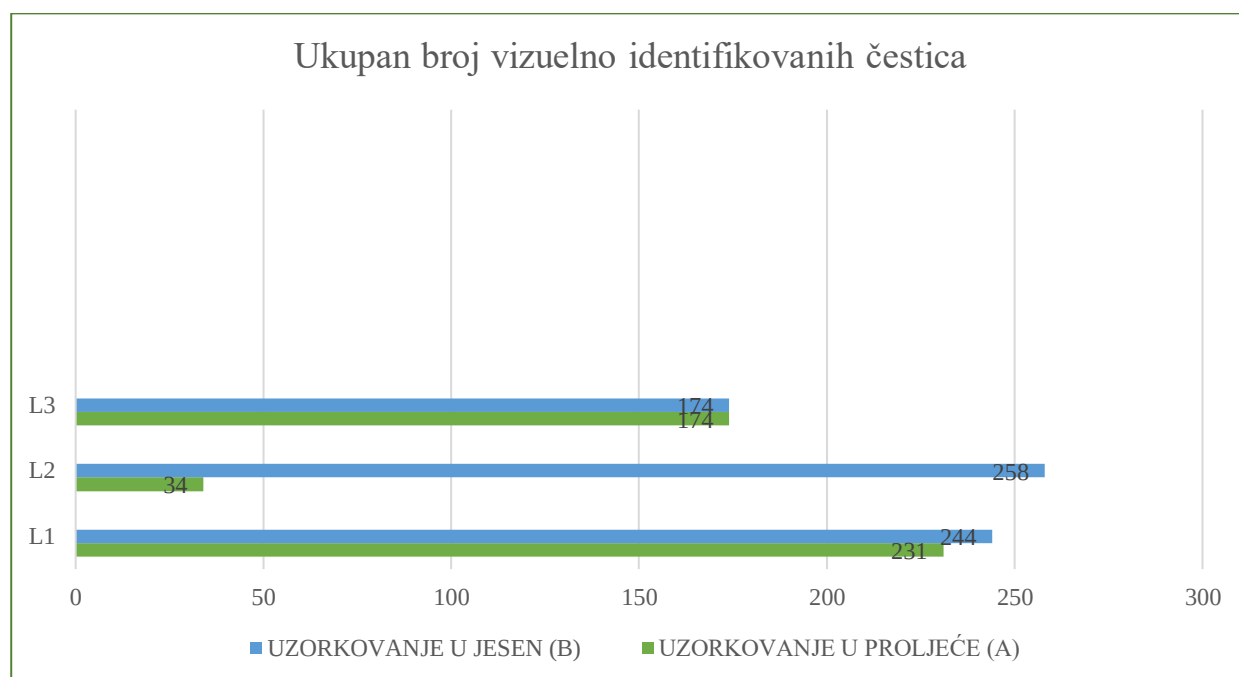
Sušenje filtera

Slika 13. Filtriranje i sušenje uzoraka (iz arhive autora rada)

Nakon sušenja, filteri su posmatrani pod optičkim mikroskopom. Cjelokupna površina filtera je ispitana, od gornjeg lijevog do donjeg desnog ugla filter-papira, da bi se izbjeglo dvostruko brojanje. U cilju identifikacije čestica mikroplastike, praćene su preporuke Hidalgo-Ruz i sar. (2012), kao što su: konzistentna debljina vlakna po cijeloj dužini, fragmenti upadljivih boja, izostajanje djelova koji ukazuju na organsku materiju i dr.

Čestice, koje su vizuelno identifikovane kao mikroplastika, su fotografisane i kvantifikovane po veličini, boji i obliku.

Na Grafiku 1 su prikazani rezultati vizuelne identifikacije, koji su pokazali razliku u broju vizuelno identifikovanih čestica u tri uzorka (L1, L2 i L3) prikupljena tokom proljeća i jeseni. U uzorku L2 jasno se vidi značajan porast broja čestica u jesen (258) u poređenju sa proljećem (34). Ova razlika može biti posledica povećanih padavina tokom jeseni (Slika 9), koje su vjerovatno doprinijele ispiranju mikroplastike iz okolnih izvora u vodotokove.

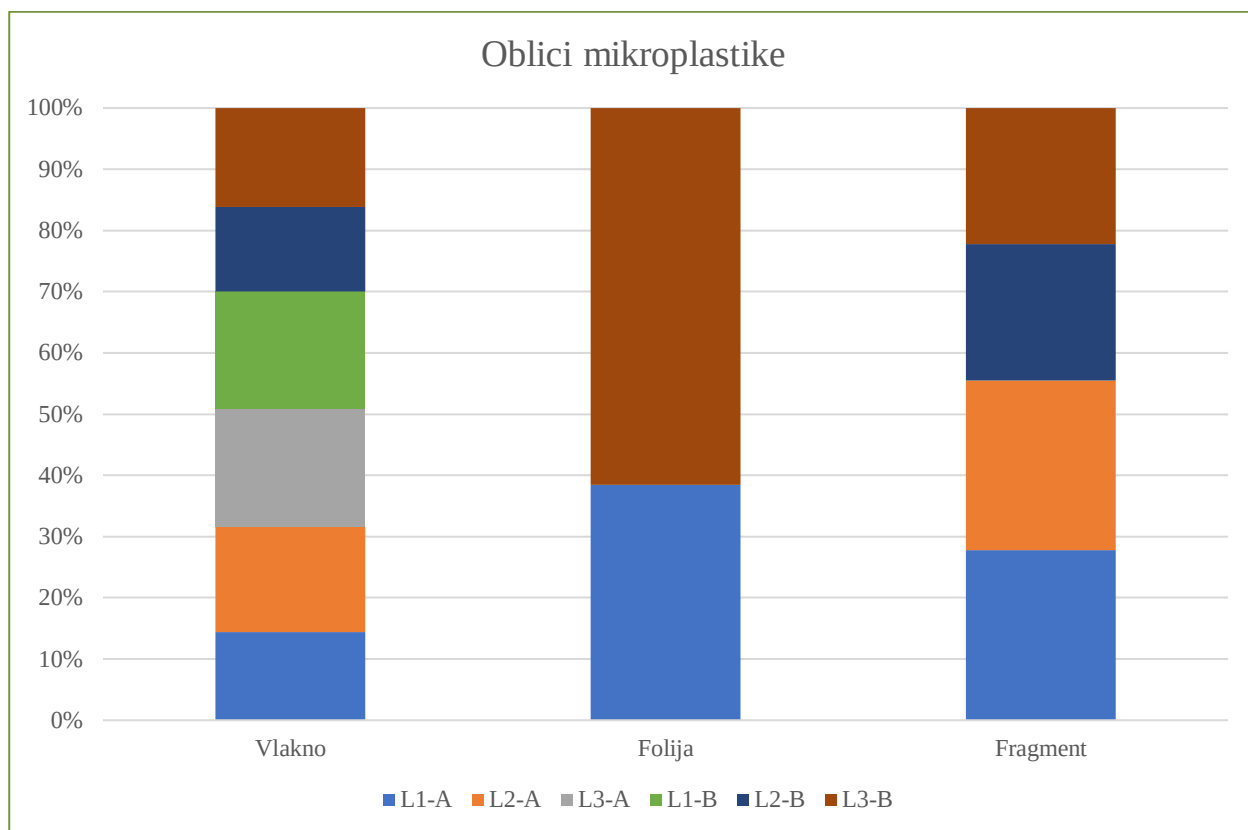


Grafik 1. Prikaz ukupnog broja kvantifikovanih čestica mikroplastike stereomikroskopom

Kod uzoraka L1 i L3 razlike su manje izražene.

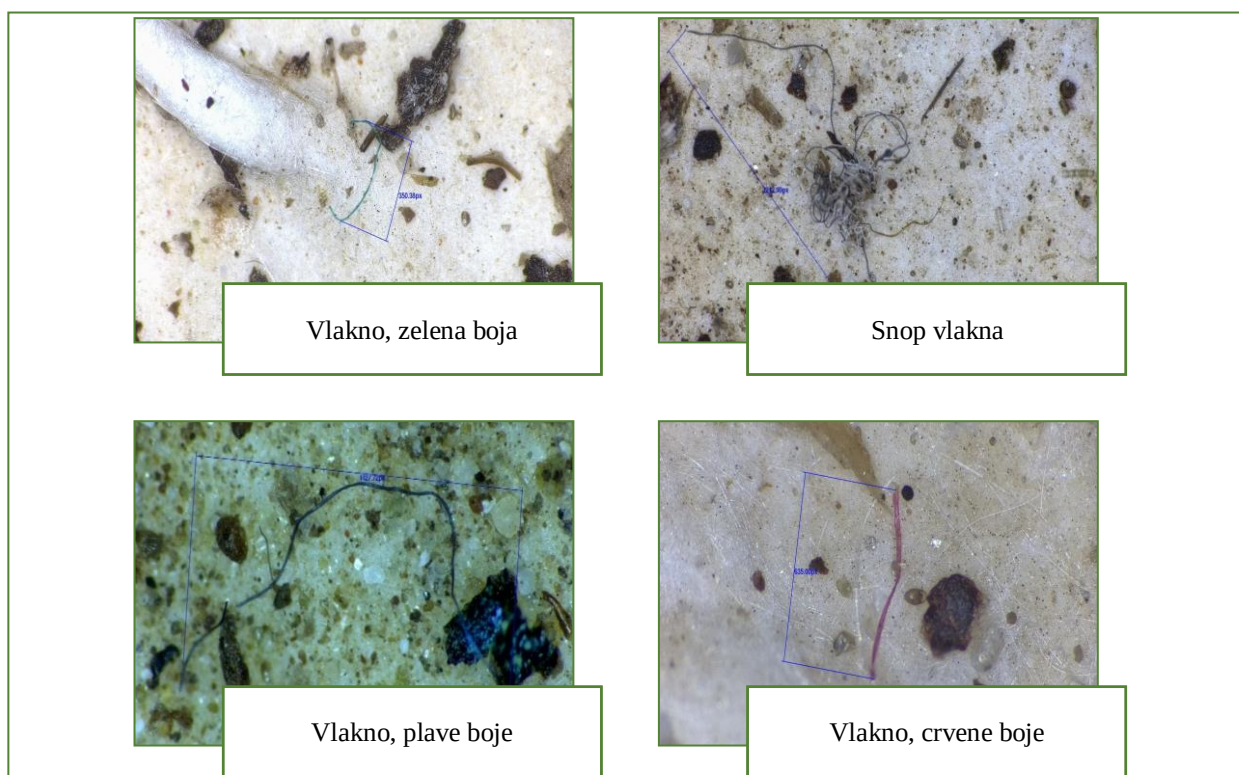
Povećana količina padavina u jesen može igrati ključnu ulogu u transportu i redistribuciji mikroplastike iz površinskih izvora ka vodotokovima, posebno u područjima sa izraženim antropogenim uticajem, što je najvidljivije u uzorku L2.

Grafikom 2. prikazani su zastupljeni oblici vizuelno identifikovanih čestica mikroplastike, prilikom čega se može uočiti da vlakno, fragmenti i folije su oblici mikroplastike koji su vizuelno identifikovani. Vlakno je zastupljeno na svim uzorcima u obje sezone uzorkovanja.

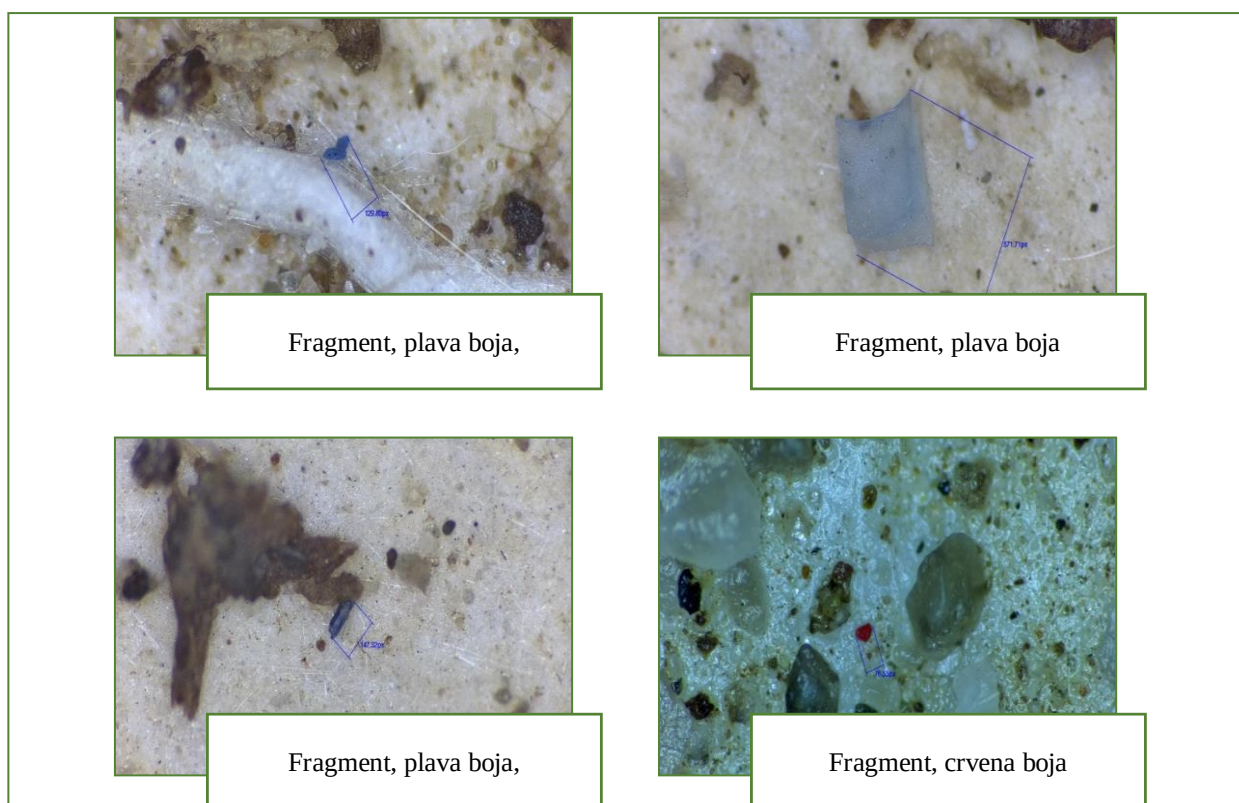


Grafik 2. Vizuelno identifikovani oblici čestica mikroplastike u obje sezone uzorkovanja

Primjeri uočenih tipova oblika čestica mikroplastike prikazani su na slikama 14 i 15.

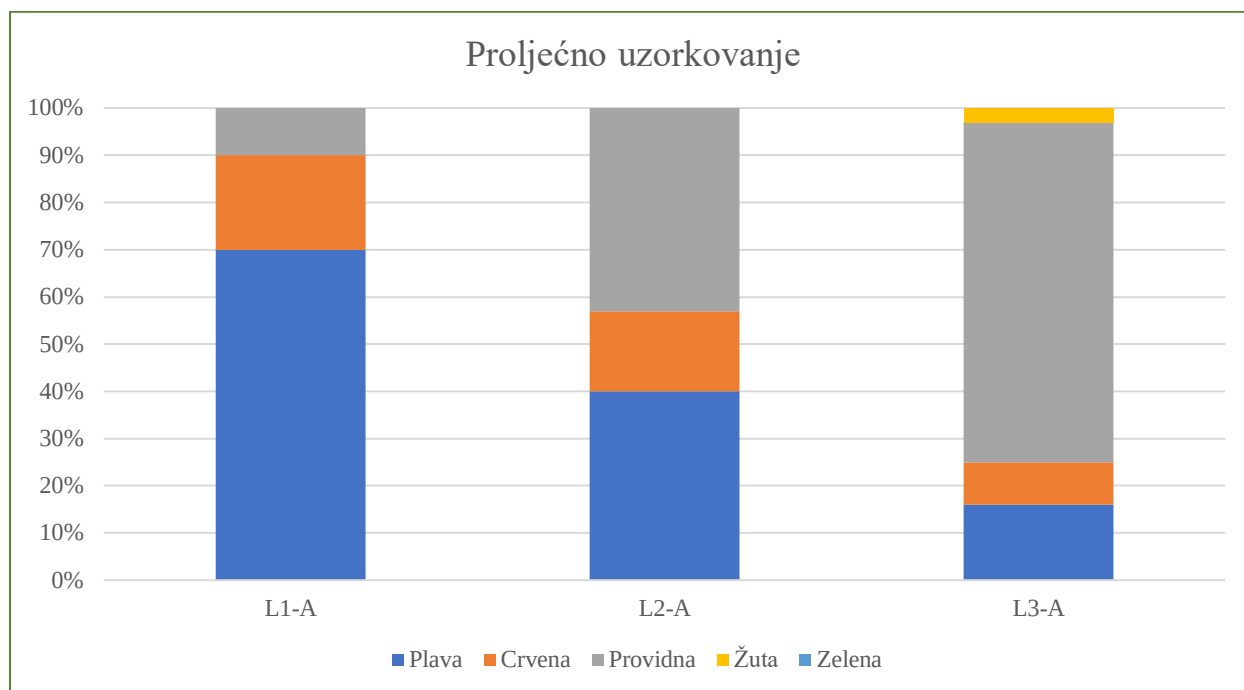


Slika 14. *Primjeri vizuelno identifikovanih vlakana mikroplastike (iz arhive autora rada)*



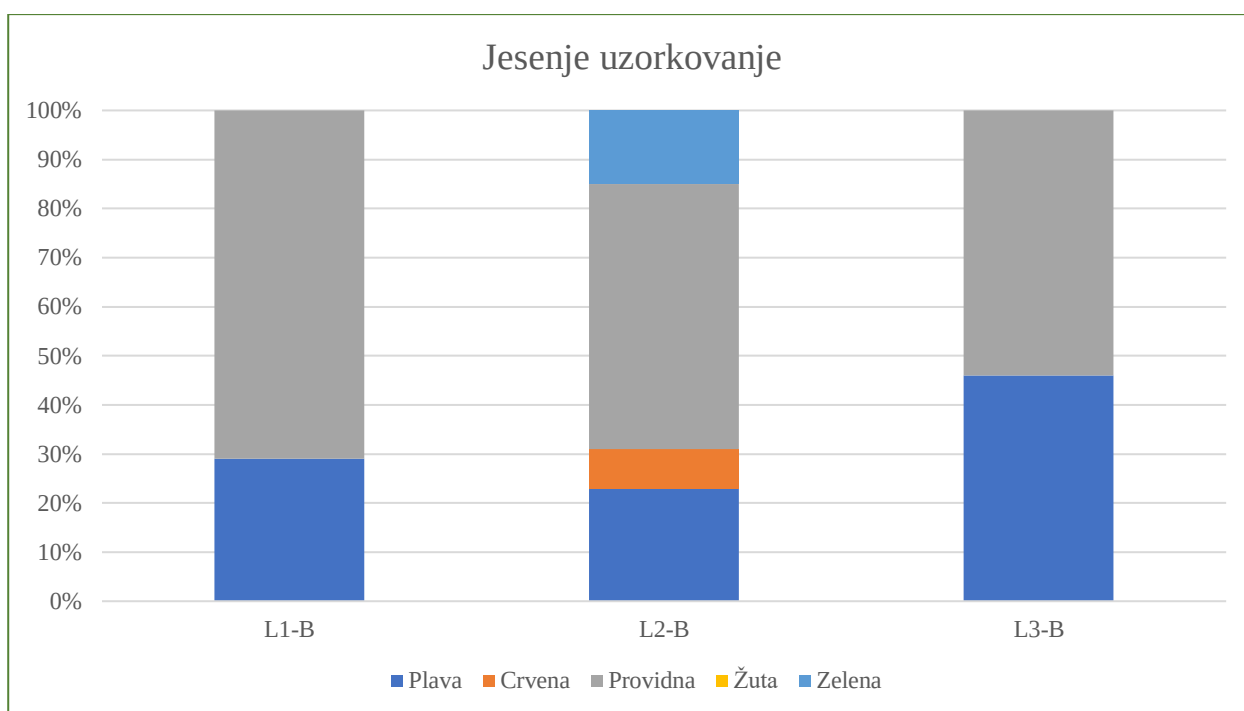
Slika 15. *Primjeri vizuelno identifikovanih fragmenata mikroplastike (iz arhive autora rada)*

Na Grafcima 3 i 4 dat je prikaz zastupljenih boja čestica mikroplastike u proljećnom i jesenjem uzorkovanju u procentima. Uočava se da su plava, providna i crvena najzastupljenije boje u obje sezone uzorkovanja, sa manjim varijacijama u procentu zastupljenosti po lokacijama.



Grafik 3. *Identifikovane boje čestica mikroplastike u proljećnom uzorkovanju*

Uočava se da je u proljećnom uzorkovanju dominirala plava, dok u jesenjem uzorkovanju zastupljena bezbojna mikroplastika.



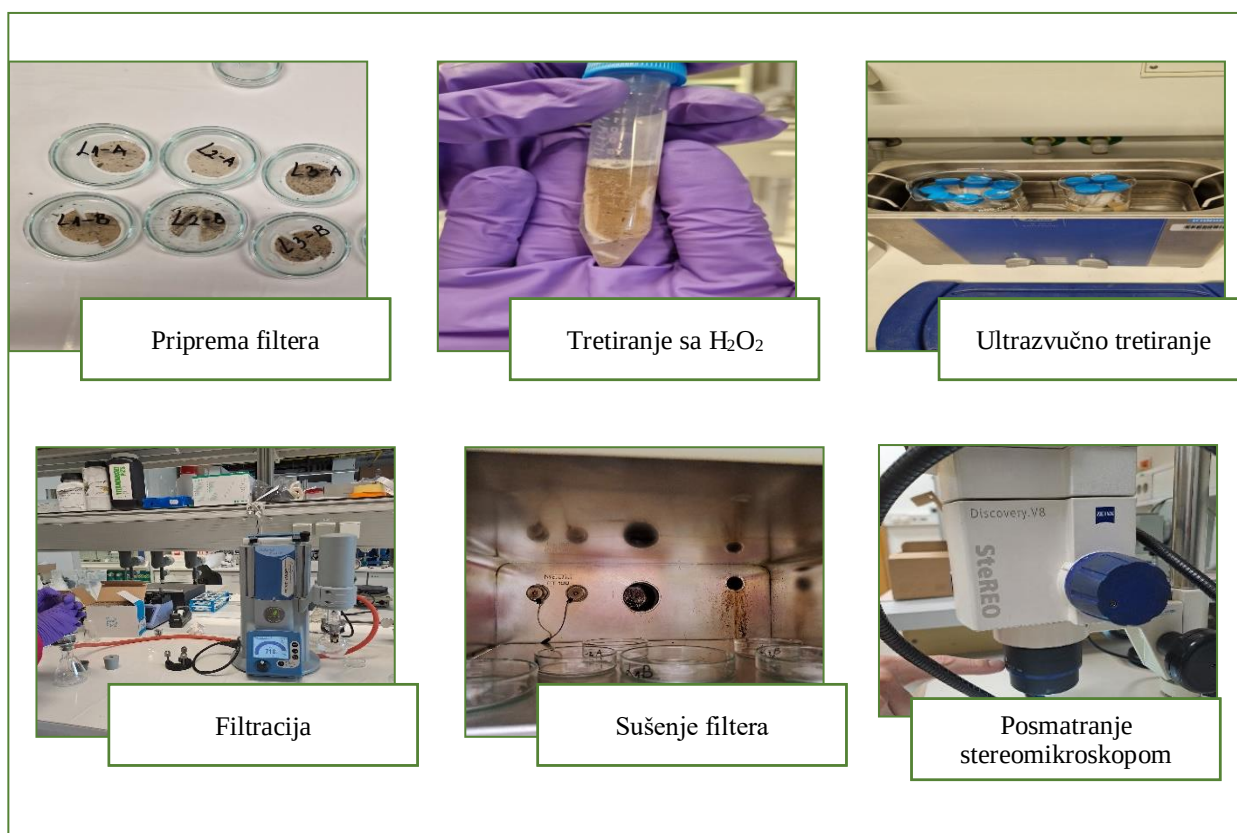
Grafik 4. *Identifikovane boje čestica mikroplastike u jesenjem uzorkovanju*

Plava boja je često povezana sa ribarskom opremom, dok bezbojna mikroplastika najčešće potiče od polietilena, plastičnih kesa i pakovanja [58].

5.3 Hemijska identifikacija mikroplastike

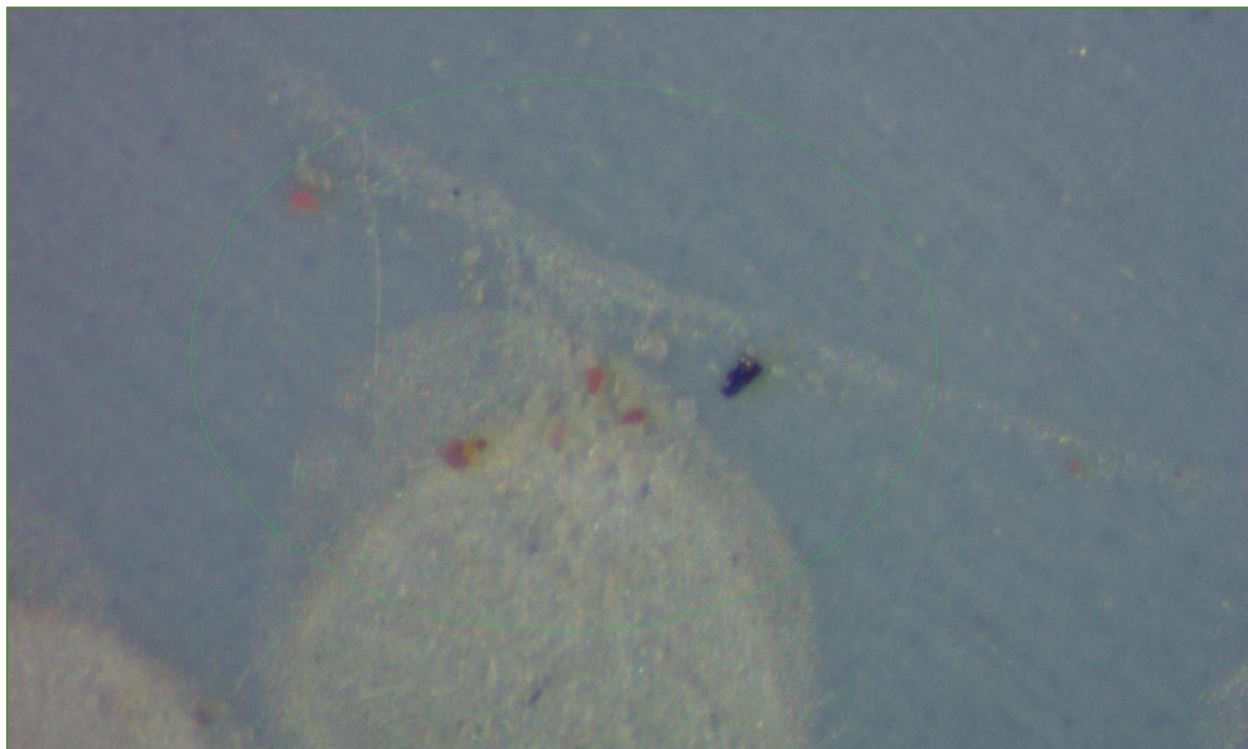
Identifikacija čestica mikroplastike može biti otežana zbog prisustva organske materije, koja će, zajedno sa česticama mikroplastike plutati na površini prezasićenog rastvora NaCl. Stoga, rastvaranje organske materije je ključno za minimiziranje mogućnosti netačne kvantifikacije čestica mikroplastike [59].

Na filter papirima uzoraka, konstatovana je velika količina organske materije, koja je ometala rad na FTIR-u. Neophodno je bilo pristupiti razgradnji organske materije, za šta je korišćen 30% H_2O_2 (vodonik-peroksid). Filter je tretiran sa $\pm 5 \text{ ml}$ H_2O_2 na kontrolisanoj temperaturi od 45°C u toku 24 h, nakon čega je izvršena vakum filtracija na Al - filteru (veličina pora $0.2 \mu\text{m}$, diameter 25 mm). Filteri su smješteni u Petrijeve šolje i podvrgnuti sušenju (Slika 16). Nakon sušenja vršeno je posmatranje filtera stereomikroskopom .



Slika 16. *Procesi razgradnje organske materije (iz arhive autora rada)*

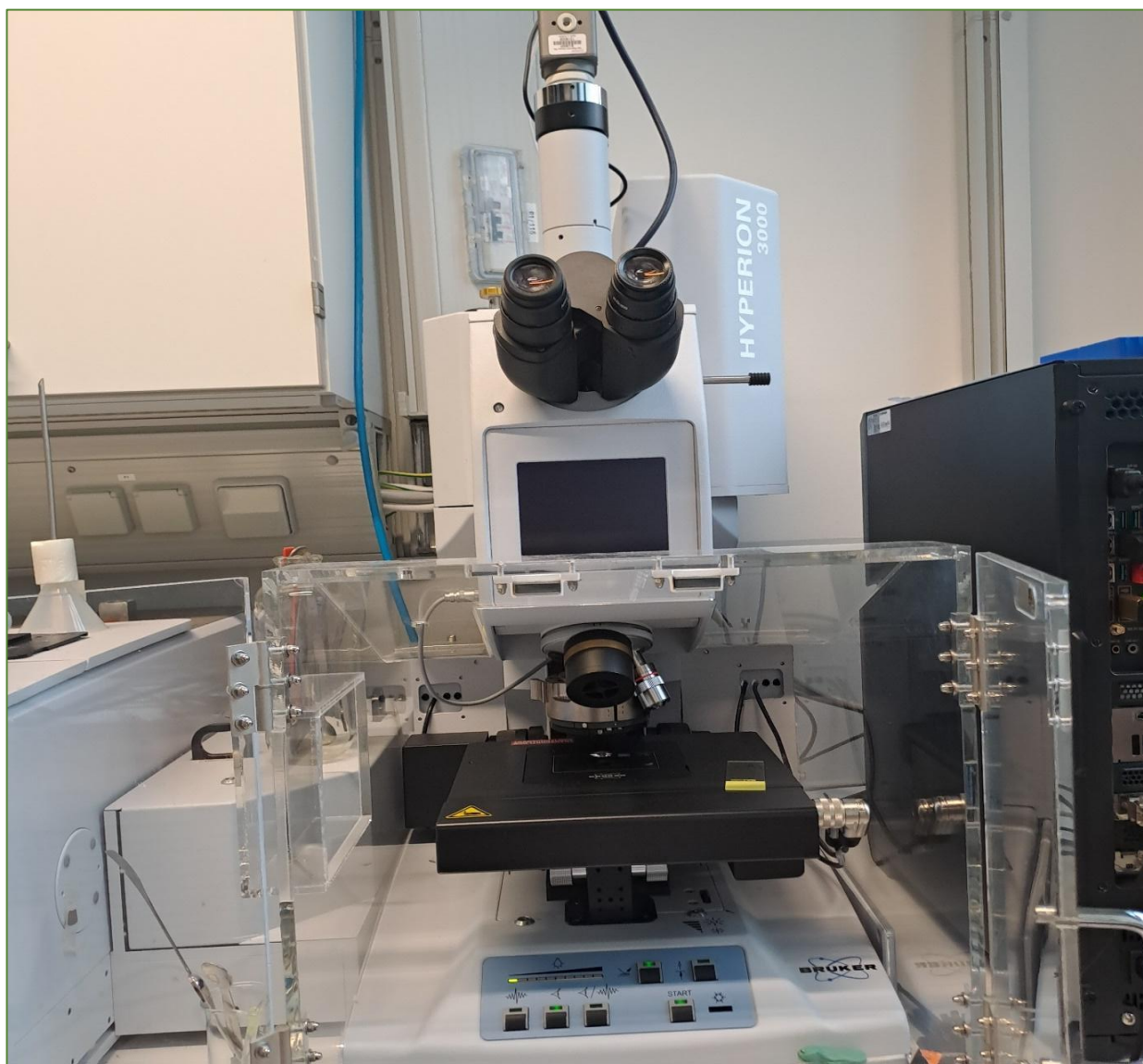
Posmatrajući filtere uzoraka stereomikroskopom, lako se uočava da je organska materija rastvorena, te se jasnije mogu vidjeti čestice koje su fragmenti i vlakna mikroplastike (Slika 17).



Slika 17. *Izgled čestica mikroplastike nakon razgradnje organske materije*

Uzorci su nakon razgradnje organske materije bili podvrgnuti procesu hemijske identifikacije mikroplastike, primjenom infracrvene spektroskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR) u cilju utvrđivanja porijekla polimera i sastava mikroplastike. Izgled FTIR mikroskopa prikazan je na slici 18.

Navedeni mikroskop je napredni FTIR mikroskop namijenjen visokorezolutivnom hemijskom mapiranju i mikroanalizi. Pored MCT-a, opremljen je FPA detektorom koji ima opciju mapiranja heterogenih uzoraka. Jedno FPA polje pokriva površinu do 400x400 μm [60].



Slika 18. FTIR mikroskop (iz arhive autora)

Prilikom analize uzoraka korišćenjem FTIR mikroskopa, primijenjena je tehnika "background removal" kako bi se eliminisali šumovi i izdvojili relevantni signali, naročito oni koji se odnose na tipove polimera. Ovaj proces je omogućio precizno očitavanje spektra i tačnu identifikaciju prisutnih polimera. Opseg analiziranih čestica obuhvatio broj čestica na osnovu statističkog korelacijskog faktora (R) od $R < 0,2$ do $R > 0,8$.

Spektri dobijeni za svaku od čestica upoređeni su sa referentnim podacima o plastičnim polimerima iz baze podataka softvera Purency, pri čemu je utvrđeno da su najzastupljeniji polimeri u uzorcima polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), poliamid (PA), polimetil-metakrilat (PMMA), akrilonitril-butadien-stiren (ABS), i etilen-vinil-alkoholni polimer (EVOH). Takođe, u cilju prepoznavanja specifičnih polimernih struktura, fileteri su posmatrati sa Raman spektroskopom koji je prikazan na slici 19.



Slika 19. Raman spektroskop (iz arhive autora rada)

Raman i FTIR spektroskopija, kao tehnike za identifikaciju mikroplastike, imaju svoje prednosti i nedostatke. Raman spektroskopija omogućava detekciju vrlo malih čestica, čije su veličine ispod $20\ \mu\text{m}$, ne zahtijeva sušenje uzoraka i ima visoku prostornu rezoluciju, ali je podložna interferenciji fluorescencije i često je skuplja [61].

FTIR spektroskopija je brža, pristupačnija i manje sklona “problemima” sa fluorescencijom, ali ima ograničenja u detekciji čestica ispod $20\ \mu\text{m}$ i zahtijeva suve uzorke [62]. Kombinovana upotreba ovih metoda često se koristi kako bi se obuhvatila široka paleta veličina i tipova mikroplastike [61, 62]. U analizi uzoraka Raman spektroskop je korišćen samo kao podrška preciznosti identifikacije FTIR-om na jednom uzorku, prilikom čega su rezultati identifikovanih polimera nisu razlikovali.

6. REZULTATI I DISKUSIJA

Predmet istraživanja u ovom radu je bolje razumijevanje obrazaca zagađenja mikroplastikom rijeke Morače, kroz njenu pritoku rijeku Cijevnu, pri čemu obje pripadaju Jadranskom slivu. Istraživanje prisustva mikroplastike u vodotoku rijeke Cijevne se fokusira na antropogene pritiske i hidrogeomorfološke karakteristike koje utiču na zagađenje mikroplastikom. Rezultati istraživanja su prikupljeni putem softvera Purency, koji je korišćen za klasifikaciju čestica mikroplastike u uzorcima prema njihovoj vrsti i distribuciji. Softver je omogućio preciznu analizu distribucije čestica u različitim uzorcima, što je bilo od ključne važnosti za dalje razumijevanje prisutnosti mikroplastike u vodotoku rijeke Cijevne. U procesu obrade podataka korišćen je program Excel, koji je omogućio dalju analizu i vizualizaciju rezultata.

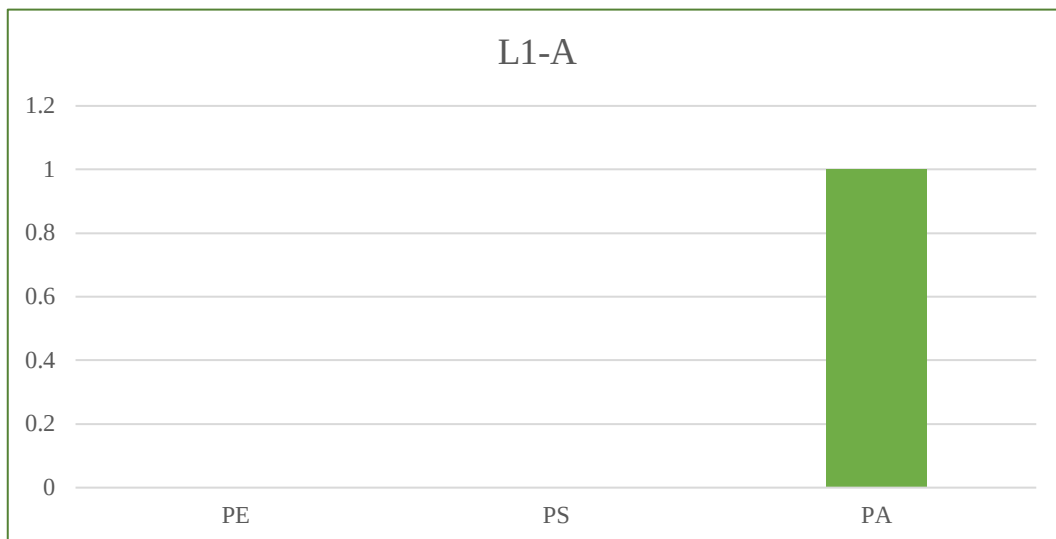
Rezultati su predstavljeni pomoću različitih grafičkih prikaza, uključujući clustered bar grafikone, i dijagrame. Ovi vizuelni grafici su korišćeni da bi se jasno prikazale razlike u broju mikroplastike, kao i varijacije u vrstama čestica mikroplastike kroz različite uzorke.

Rezultati analiziranih uzoraka omogućavaju precizan uvid u vrste prisutne mikroplastike u priobalnom sedimentu, kao i moguće distribuciju mikroplastike u vodenom toku. Ovo istraživanje ima za cilj da pruži jasniju sliku o ključnim lokacijama koje zahtijevaju poseban monitoring, čime se doprinosi budućim naporima u zaštiti vodnih ekosistema.

S obzirom na značaj interpretacije ovih podataka u kontekstu doprinosa zagađenja mikroplastikom u rijeci Morači, rezultati su se primarno poredili sa prethodnim istraživanjem u rijeci Morači, odnosno sa studijom autora Bošković i sar. (2023), koja je jedina predstavila rezultate dobijenih istraživanjem mikroplastike u crnogorskim rijekama.

6.1 Analiza i poredenje dobijenih rezultata

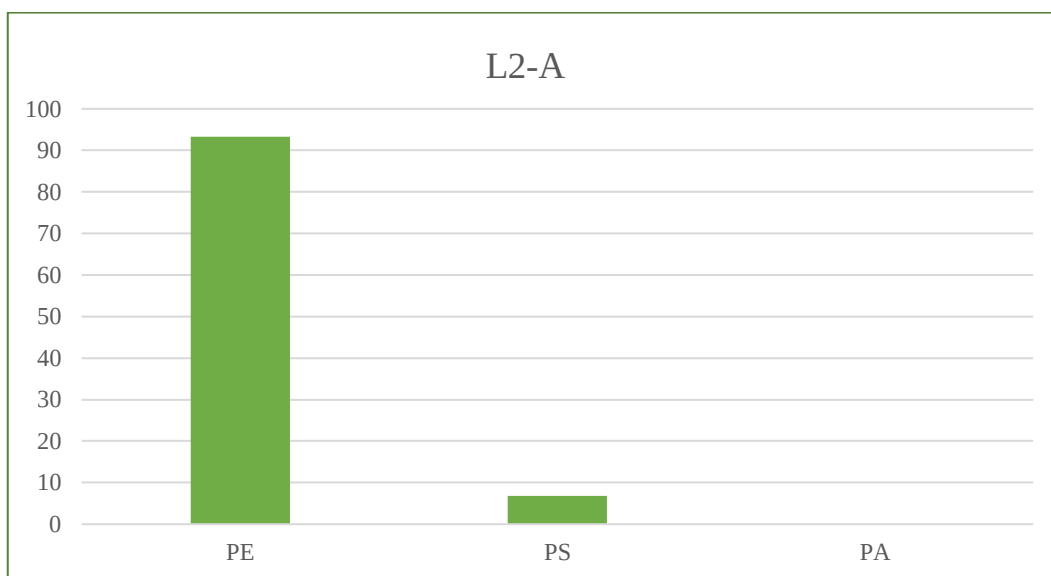
Mikroplastika je identifikovana u svim uzorcima sedimenata. U nastavku su prikazani grafici sa vrstom i brojem mikroplastike identifikovane FTIR-om u svim uzorcima. Na Grafiku 5 su prikazani rezultati uzorka L1-A.



Grafik 5. *Prikaz zastupljenih vrsta čestice mikroplastike u uzorku L1-A*

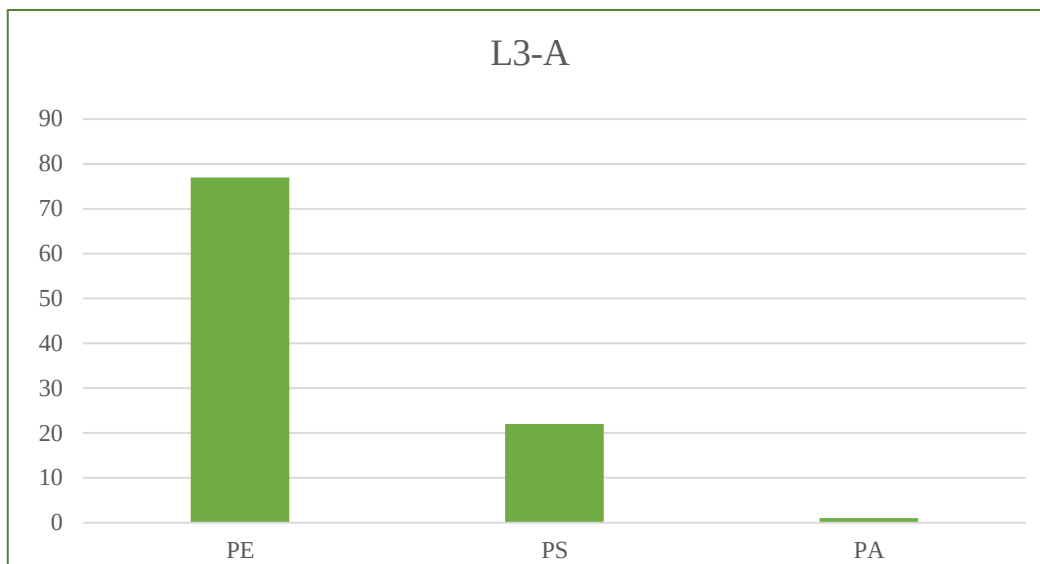
Rezultati sugerišu da na lokaciji L1-A dominira mali broj identifikovanih čestica mikroplastike (4), među kojima dominira poliamid (PA). Ovo može ukazivati na određene izvore zagađenja, kao što su veći komadi plastične ambalaže ili proizvoda koji se vremenom razbijaju u manje čestice. PA se često koristi u industriji (proizvodnji tekstilnih vlakana, autoindustriji i elektronici), što može značiti da zagađenje na toj lokaciji dolazi od ovih izvora [10].

Na grafiku 6 je prikazana zastupljenost različitih vrsta čestica mikroplastike u procentima za lokaciju L2-A tokom proljećnog uzorkovanja. Dominantna vrsta čestica mikroplastike je PE (polietilen), koja čini približno 94% ukupnih čestica, dok PS 6%. U poređenju sa lokacijom L1-A, može se primijetiti promjena u proporcijama i vrstama zastupljenih čestica mikroplastike, što može ukazivati na nove izvore zagađenja nizvodno.



Grafik 6. *Prikaz zastupljenih vrsta čestice mikroplastike u uzorku L2-A*

U uzorku L3-A broj identifikovanih čestica je 136, gdje su dominirale čestice PE i PS, kao i manja količina PA, što je prikazano na Grafiku 7. Najzastupljenija vrsta čestica je PE (polietilen), koja čini približno 75% ukupnih čestica. Čestice PS (polistiren) su zastupljene sa 20 %, dok PA (poliamid) zastupljen u umjerenoj mjeri - 5 %.



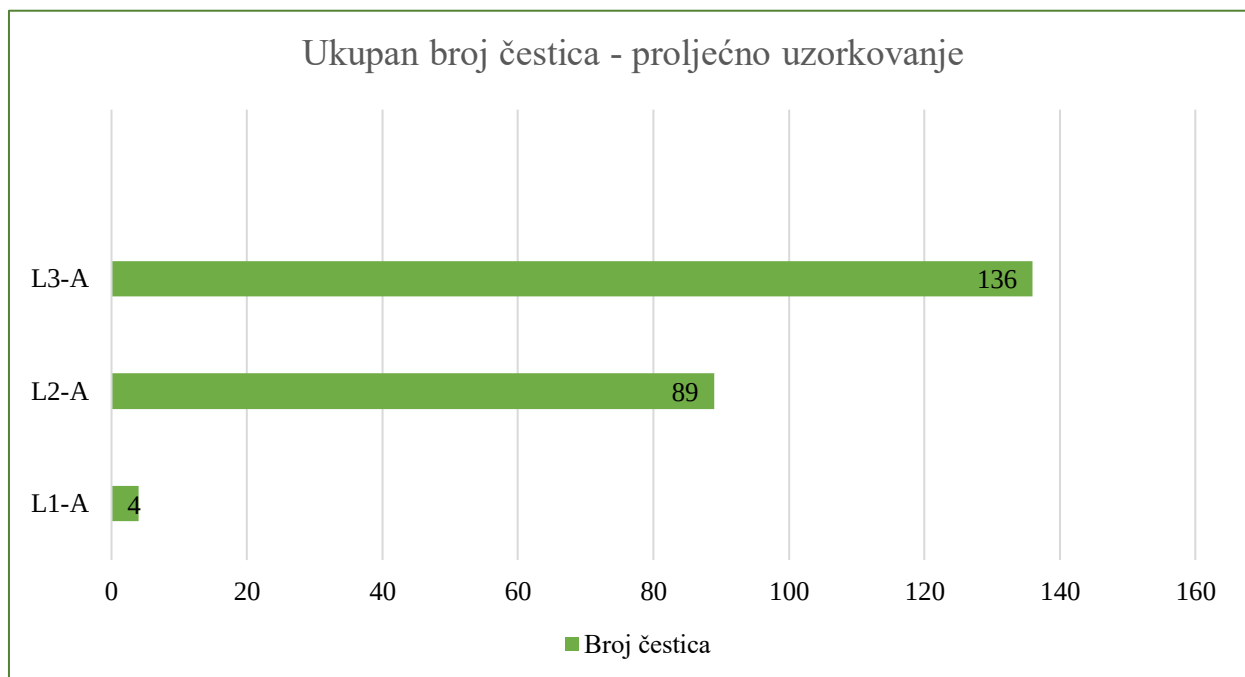
Grafik 7: Prikaz zastupljenih vrsta čestice mikroplastike i u uzorku L3-A

Najzastupljeniji polimeri su bili PE i PS. PE je dominantan polimer u uzorcima L2-A i L3-A, dok je PA specifičan za uzorak L1-A.

Postoji mogućnost da PE i PS potiču od plastičnih pakovanja, folija, plastičnih kesa i drugih plastičnih proizvoda za pakovanje. Ovi polimeri su uobičajeni u svakodnevnom otpadu i zbog svoje niske gustine, koja je manja od gustine vode [12], imaju sposobnost da plutaju. To im omogućava jednostavno kretanje i transport duž riječnih tokova [63]. Ovo bi moglo objasniti njihovu akumulaciju na lokacijama L2-A i L3-A.

Takođe, specifično prisustvo PA na lokaciji L1-A može ukazivati na lokalni izvor zagađenja, kao što su otpad iz tekstilne industrije, automobilske materijali ili elektronski proizvodi [63]. Ovo je u skladu sa mogućnošću lokalnog zagađenja na ovoj lokaciji, ali zahtijeva dodatna istraživanja kako bi se precizno identifikovali izvori, kao i faktori koji mogu doprinijeti distribuciji PE, PS i PA u ovom ekosistemu.

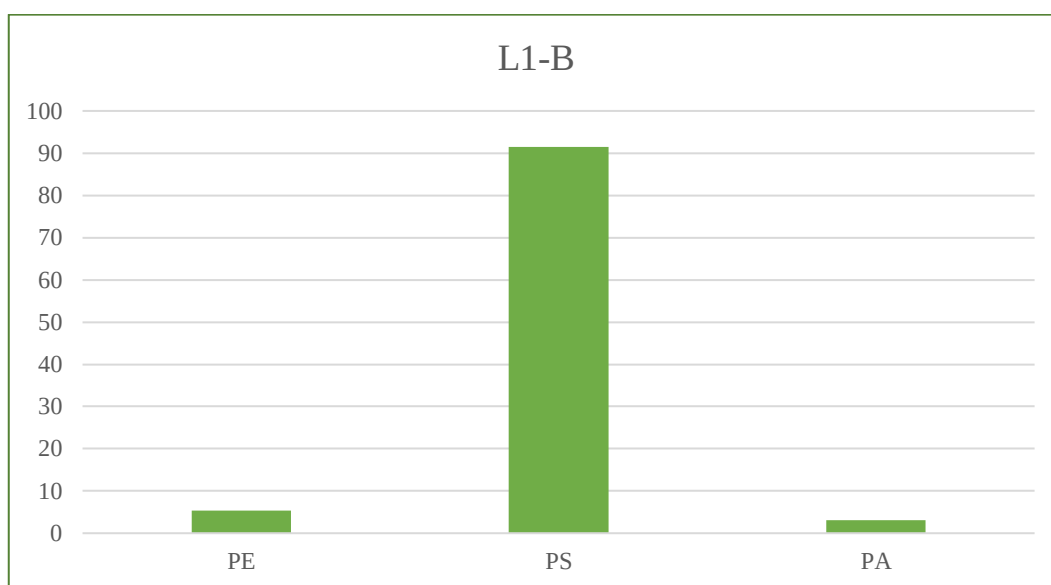
Na grafiku 8 prikazan je ukupan broj identifikovanih čestica mikroplastike FTIR-om, u proljećnom uzorkovanju, pri čemu se uočava povećanje broja čestica nizvodo, što ukazuje na transport mikroplastike kroz vodene tokove.



Grafik 8. *Ukupan broj identifikovanih čestica u proljećnom uzorkovanju*

Pored pojačanog antropogenog pritiska nizvodno, ovaj fenomen bi se dodatno mogao objasniti sa hidrogeomorfološkim karakteristikama rijeke Cijevne, po uzoru na Schuyeler i sar. (2018) koji u svojoj studiji ukazuje da aluvijalni sedimenti, koji su mekši i uglavnom zastupljeni na lokacijama L2 i L3 [54], imaju tendenciju da se lako pomjere zajedno sa mikroplastikom, a naročito u kišnim periodima. Kroz eroziju, mikroplastika može biti remobilisana iz viših u niže djelove rječnog sistema, stvarajući nova "žarišta" zagađenja mikroplastikom u priobalnim područjima [64].

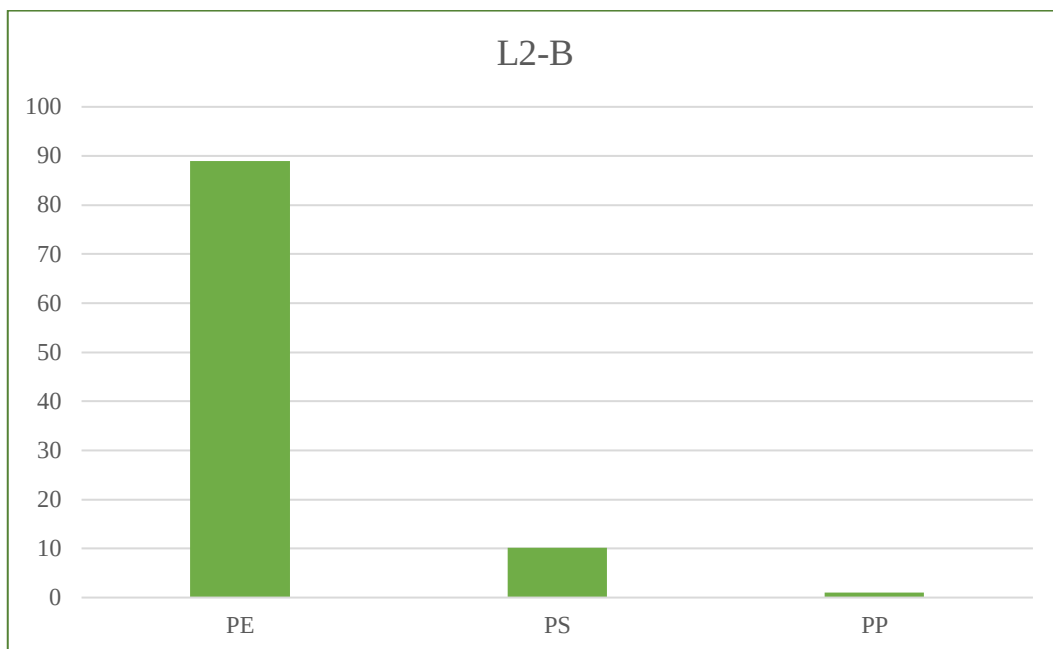
Rezultati jesenjeg uzorkovanja na prvoj lokaciji – L1-B ukazuju na odstupanja vrsta zastupljenih čestica mikroplastike u odnosu na prolječno uzorkovanje na ovoj lokaciji, što je prikazano grafikom 9.



Grafik 9. *Prikaz zastupljenih vrsta čestice mikroplastike u uzorku L1-B*

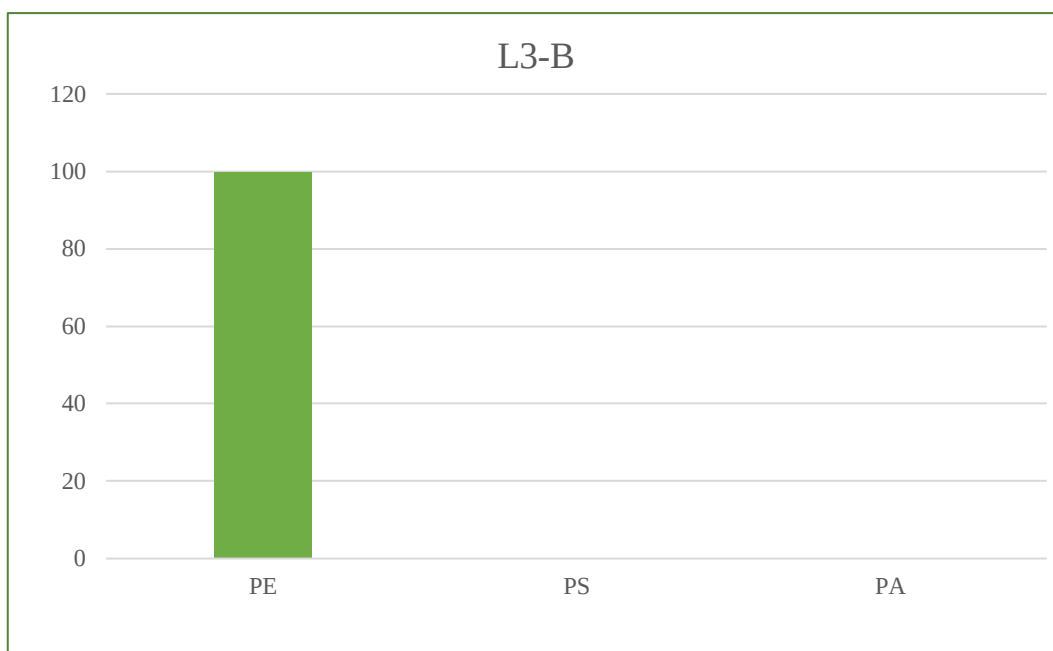
Dominiraju polimeri PS (90 %), dok čestice PE i PS sa oko 5 %. Primjećuje se prisustvo PA čestica, u vezi čega su potrebna dodatna istraživanja, kako bi se utvrdili izvori nastanka ovog polimera, koji je u kontinuitetu prisutan na ovoj lokaciji.

Na grafiku 10 prikazane su vrste identifikovanih čestica mikroplastike, te od 118 čestica mikroplastike, hemijskom identifikacijom utvrđeno je da 89 % čini PE, 10 % PS i 1 % PP.



Grafik 10. Prikaz zastupljenih vrsta čestice mikroplastike u uzorku L2-B

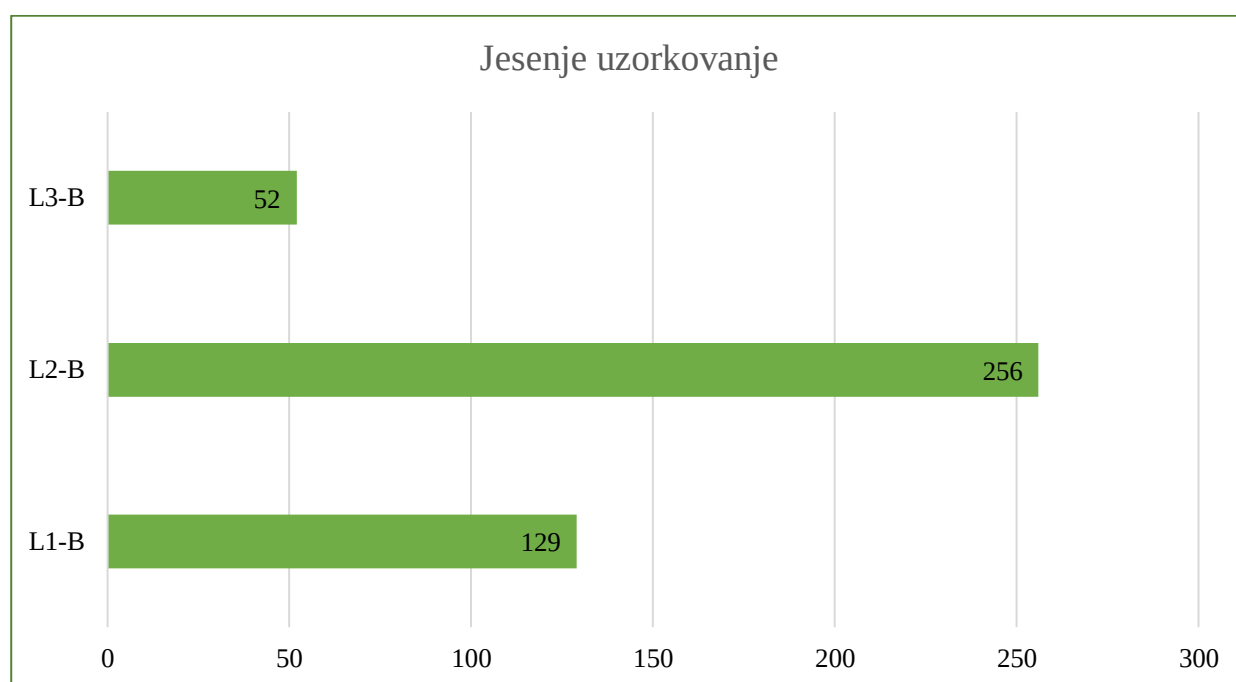
Ukupan broj kvantifikovanih čestica u uzorku L3-B je 52, gdje su dominirale čestice PE – 100 %, što je prikazano grafikom 11.



Grafik 11. Prikaz zastupljenih vrsta čestice mikroplastike u uzorku L3-B

PE i PS su najzastupljeniji polimeri u analiziranim uzorcima, sa značajnim varijacijama u njihovoj zastupljenosti između uzoraka. Učestalost PE u uzorcima L2-B i L3-B, može ukazivati na široko prisustvo, odnosno upotrebu, ovog polimera u okolini uzorkovanih reona.

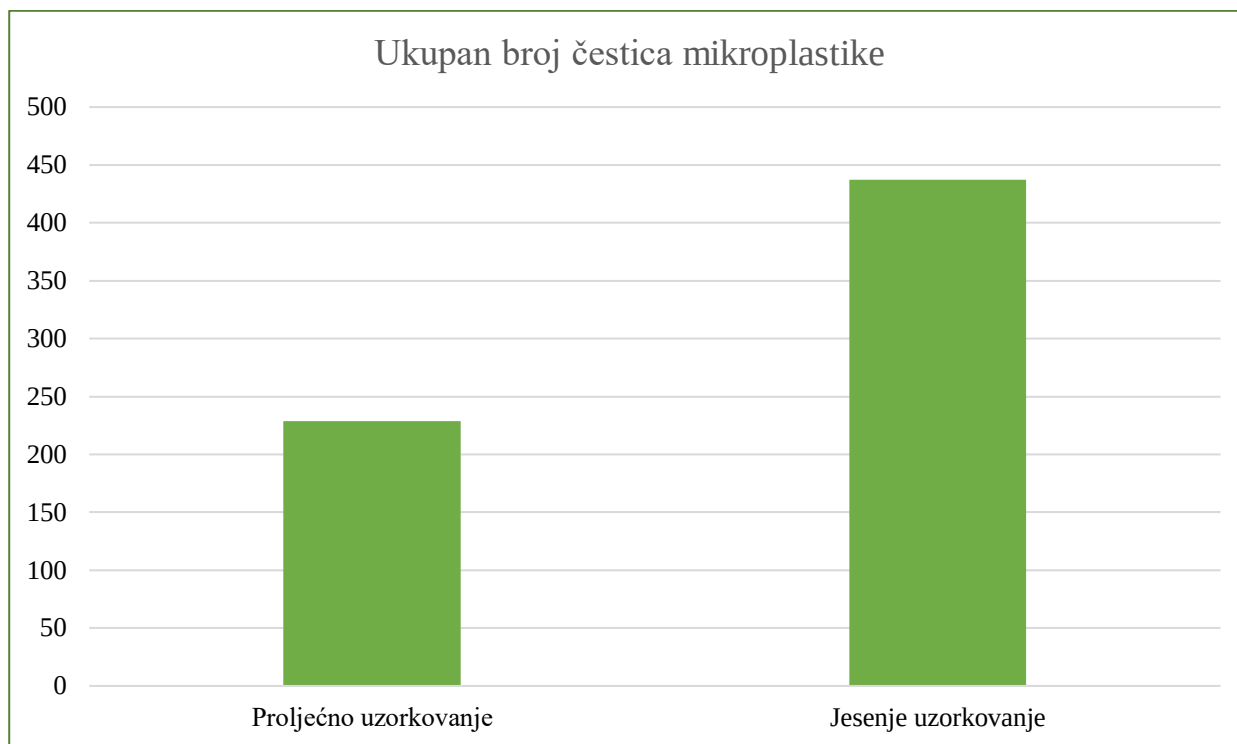
Uzimajući u obzir kvantifikovane čestice mikroplastike, ne primjećuje se trend rasta broja čestica nizvodno, što je prikazano grafikom 12.



Grafik 12. Ukupna količina identifikovanih čestica u jesenjem uzorkovanju

Najveći broj kvantifikovanih čestica mikroplastike se uočava na drugoj lokaciji, dok najmanja, trećoj. Posmatrajući rezultate proljećnog uzorkovanja, ovo je neočekivano s obzirom da mnoge studije potvrđuju nizvodan trend rasta broja identifikovanih čestica mikroplastike u sedimentu vodotoka rijeka. Studije Schwabl i sar.(2023) i Browne i sar. (2024) ukazuju da se koncentracija mikroplastike često povećava nizvodno u rječnim tokovima, što ukazuje na transport čestica od izvora zagađenja ka ušćima rijeka, što nastaje kao rezultat hirodinamičkih procesa. Studije naglašavaju potrebu za kontinuiranim praćenjem i upravljanjem zagađenjem mikroplastikom u rječnim ekosistemima, posebno u nizvodnim područjima gdje se akumulacija čestica može povećati [65, 66].

Na osnovu analize, zabilježeno je da je tokom proljećnog uzorkovanja kvantifikovano znatno manje čestica mikroplastike (229), dok je u uzorcima jesenjeg uzorkovanja njihov broj značajno veći (439), što je prikazano grafikom 13. Ova razlika može biti povezana sa meteorološkim i antropogenim faktorima, poput sezonskih aktivnosti, kao i intenzivnijeg turističkog djelovanja tokom ljeta i jeseni.

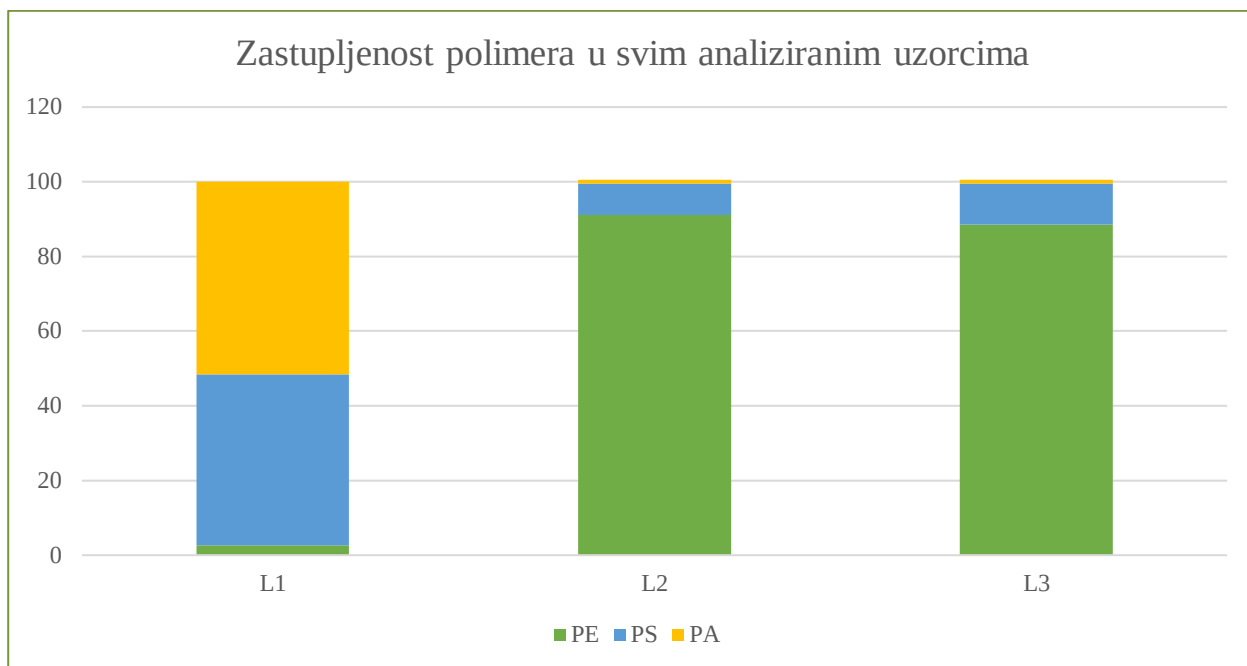


Grafik 13. Sezonska varijacija broja identifikovanih čestica mikroplastike FTIR-om

Brojne studije podržavaju postojanje sezonskih varijacija u broju identifikovanih čestica mikroplastike, što dodatno ukazuje na značaj ljudskih aktivnosti i promjena u okruženju na distribuciju mikroplastike [10, 39, 67, 68].

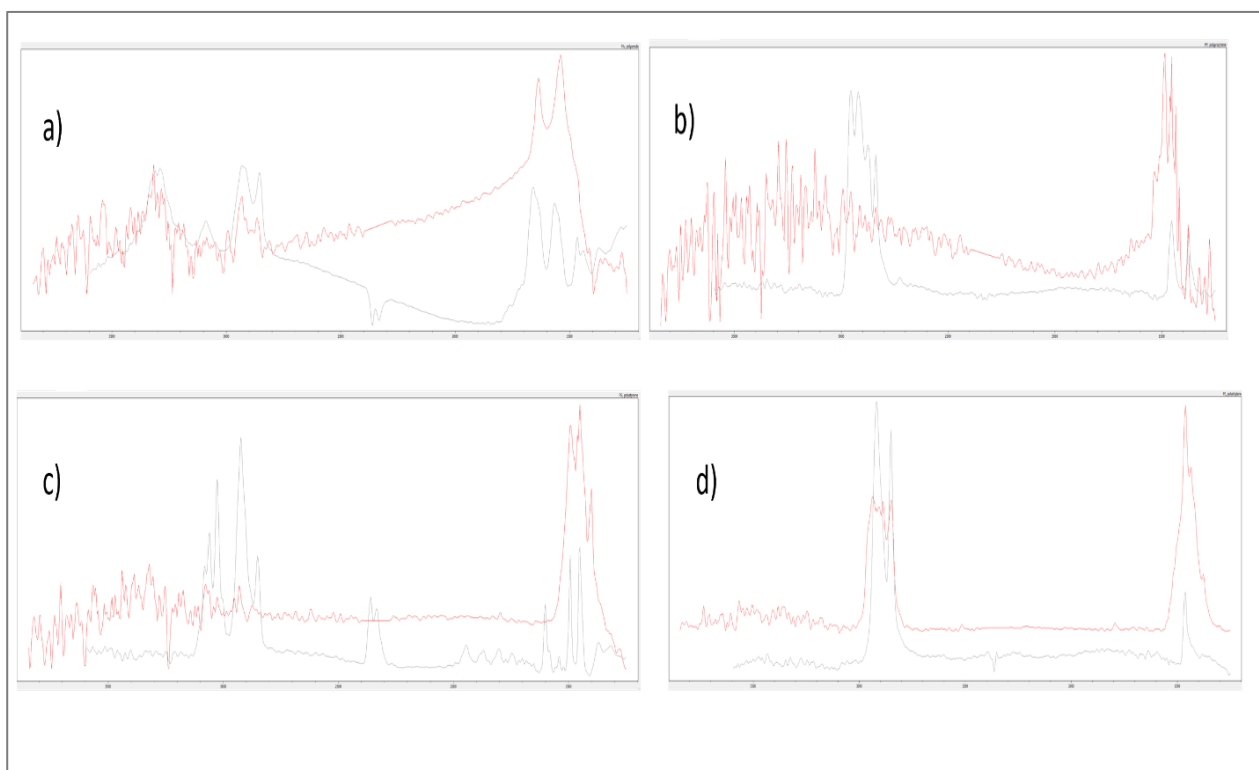
Najzastupljeniji polimeri čestica mikroplastike PE, PS i PA tokom obje sezone uzorkovanja, što je prikazano Grafikom 14. Ovo može ukazati na dosljednost u vrstama čestica mikroplastike koje dolaze iz izvora zagađenja tokom godine. Ovi rezultati su u skladu sa studijom Cassola i sar. (2024) koja ukazuje da su tipovi polimera PS, PP i PE najčešće identifikovani u uzorcima vodotoka rijeka. [69].

Pored PE (60,8 %) i PS (21,7 %), koje su najzastupljeniji polimeri u svim analiziranim uzorcima, u manjem broju, ali u kontinuitetu, primjećuje se prisutvo PA (17,5 %) sa najvećom zastupljenošću na lokaciji broj 1, u obje sezone uzorkovanja. PA polimeri imaju veću gustinu od vode, zbog čega se talože u riječnom vodotoku, osim ako ih jaka riječna struja ne prenese nizvodno do područja sa manjim protokom [70]. U vezi sa tim, može se pretpostaviti da polimeri potiču od istog izvora zagađenja, te su potrebna dodatna istraživanja, kako bi se ove činjenice potvrdile, uzimajući u obzir da se lokacija 1 nalazi na granici sa Republikom Albanijom.



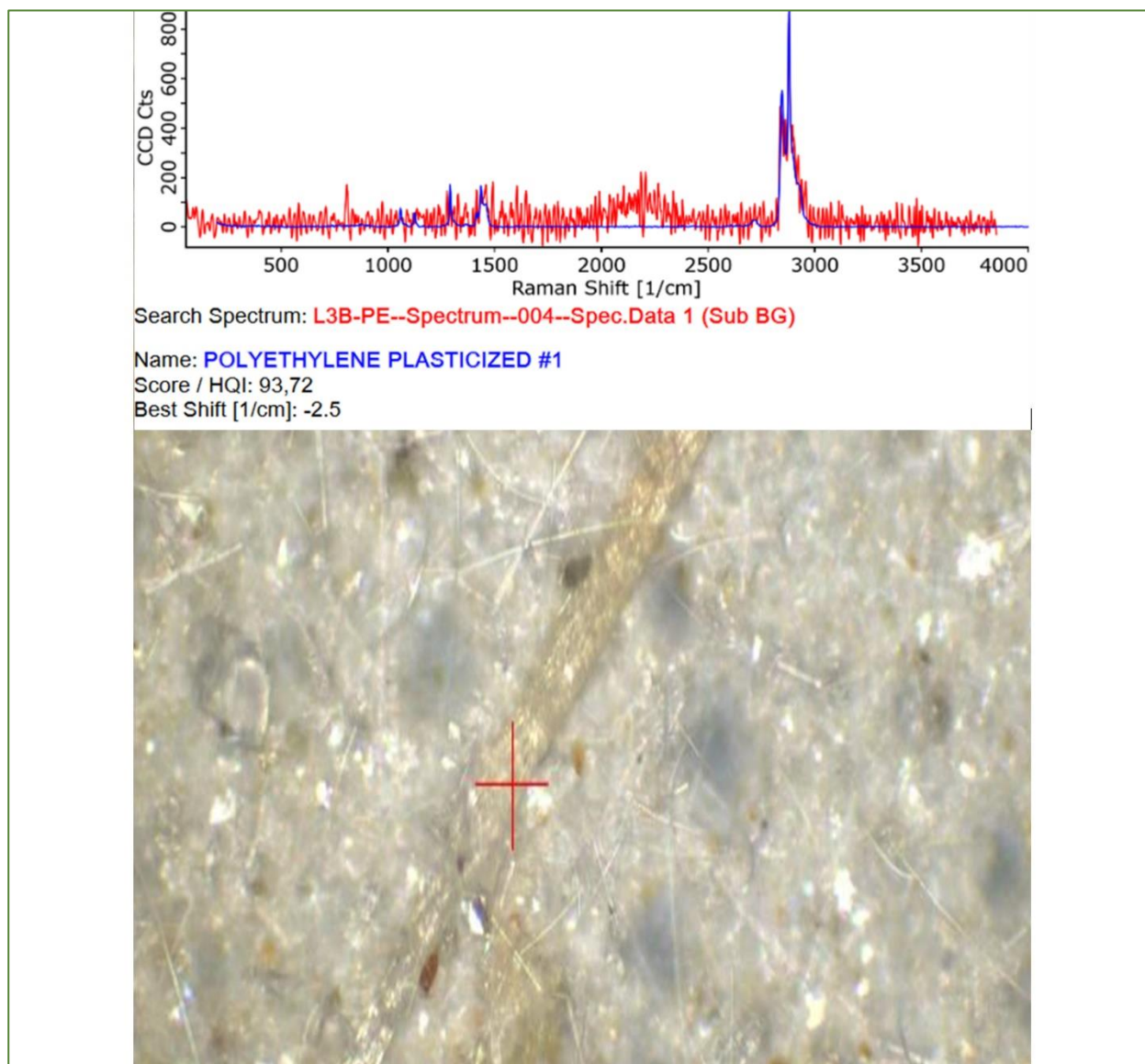
Grafik 14. Zastupljenost polimera u svim analiziranim uzorcima

Slika 19 prikazuje FTIR spektre četiri uzorka polietilena, označenih kao (a), (b), (c) i (d). Na svakom grafiku, crvena linija predstavlja spektar analiziranog uzorka, dok siva linija prikazuje referentni spektar. U svim slučajevima referentni i analizirani spektar pokazuju određene stepene sličnosti, sa manjim odstupanjima.



Slika 19. Prikaz IR Transmission - High Similarity. a) PA u uzorku L1-A, b) PP u uzorku L2-A, c) PS u uzorku L3-A, d) PE u uzorku L3-B

U cilju dobijanja što preciznijih rezultata, a uzimajući u obzir da Ramanov spektroskop daje dobre rezultate zbog visoke osjetljivosti, izvršena je probna analiza na jednom od uzoraka u kojem su detektovani najzastupljeniji polimeri. Iz rezultata Raman analize (Slika 20) uzorka zabilježeni su indeksi kvaliteta (HQI) od 93,40% za PP, 93,72% za PE, 97,30% za PA. Shodno navedenom, može se zaključiti da visoki indeksi kvaliteta potvrđuju identifikaciju ovih materijala putem FTIR analize.



Slika 20. Čestica PE snimljena Raman spektroskopom, zajedno sa prikazom spektra sa HQI od 93,72%

Kako je već istaknuto, cilj ovog istraživanja je da pruži detaljniji uvid u doprinos rijeke Cijevne, sveukupnom zagađenju mikroplastike u rijeci Morači, kao njene pritoke. Na svim lokacijama, tokom obje sezone uzorkovanja, identifikovane su varijacije u broju čestica mikroplastike. Varijacije u broju se uočavaju između lokacija i sezona uzorkovanja.

Upoređujući sa podacima za rijeku Moraču, dobijenim istraživanjem u studiji Boković i sar. (2022) rezultati analizom ovih uzoraka rijeke Cijevne ukazuju na prisustvo većeg broja čestica mikroplastike, u odnosu na broj čestica u rijeci Morači. Polimeri PS, PE i PA su najčešće zastupljeni, što je u skladu sa podacima studije Bošković i sar. (2023), gdje su ove vrste mikroplastike, takođe bile zastupljene. Boje čestica mikroplastike su plava, crvena i mikroplastika bez boje, što je, takođe, u skladu sa prethodno navedenom studijom. Odstupanja nema ni u najčešće zastupljenim oblicima ovih čestica.

Na svim analiziranim lokacijama su zastupljeni polimeri PS i PE, što je u skladu sa analizama za rijeku Moraču, gdje su ove vrste mikroplastike, takođe, bile zastupljene. Kako Bošković i sar. (2022) navode u svom radu da prema klasifikaciji Evropske hemijske agencije (ECHA), zasnovanoj na hemijskom sastavu čistih polimera, poliamid (PA) se smatra opasnim materijalom jer može izazvati ozbiljna oštećenja na koži i očima. Takođe, ovaj polimer je toksičan za vodene organizme. U slučaju gutanja ili udisanja ovih čestica, PA mogu dugoročno izazvati alergijske reakcije na koži ili iritacije respiratornog sistema [10]. Shodno prethodno navedenom, može se zaključiti da pažnju treba posvetiti prisutnim PA (poliamid) česticama, koje su identifikovane u obje sezone uzorkovanja. Ovo je takođe u skladu sa pomenutom studijom koja, takođe, ukazuje na prisutnost PA na lokaciji u blizini kolektora za prečišćavanje otpadnih voda u Morači, u Podgorici. Takođe, uočava se da odstupanja nema u boji (plava i providna) i obliku čestica (vlakna i fragmenti).

Rijeka Cijevna protiče u blizini regionalne deponije „Livade“ u Podgorici i Plantaža „13.Jul“, što je jedan od mogućih izvora zagađenja mikroplastikom u vezi sa čim su, takođe, potrebna dalja istraživanja.

Rezultati ukazuju na to da rijeka Cijevna doprinosi zagađenju rijeke Morače, a ujedno pruža uvid u to kako se mikroplastika transportuje nizvodno i kako meteorološki faktori mogu eventualno uticati na distribuciju i redistribuciju čestica. Slično, autor Balla A. i sar. (2022) istražujući o prostornim varijacijama transporta mikroplastike u slivu rijeke Tise, ukazuje na značaj pritoka, kao faktora koji doprinosi zagađenju glavnog toka rijeke. Dakle, pritoke nisu samo pasivni elementi, već aktivno učestvuju u širenju, odnosno transportu zagađenja mikroplastikom [71].

Za procjenu uticaja mikroplastike na lokalne ekosisteme neophodna su dodatna istraživanja, uključujući analize prisustva mikroplastike u ribama, drugim vodenim organizmima i različitim vrstama uzoraka iz rijeke Cijevne. Praćenje prisustva mikroplastike pružilo bi bolji uvid u njene efekte na ekosisteme rijeke Cijevna. Ovakav monitoring bi omogućio bolje razumijevanje izvora mikroplastike, njene distribucije i nakupljanja u organizmima, kao i njenog uticaja na životnu

sredinu. Rezultati bi pomogli u identifikaciji glavnih izvora zagađenja, što bi dalo podršku u zaštiti ekosistema kroz sprovođenje adekvatnih mjera za smanjenje zagađenja.

6.2 Identifikacija nedostataka i ograničenja

Zbog nedostataka u standardizaciji protokola uzorkovanja, teško je uporediti količine mikroplastike u riječnim sedimentima između studija. Uzimajući u obzir da su čestice mikroplastike prisutne u svim segmentima, određivanje najrelevantnije lokacije za uzorkovanje predstavlja izazov.

Nedostatak adekvatne laboratorijske infrastrukture i opreme dodatno povećava troškove, jer je često neophodno sprovesti ključne faze istraživanja van granica Crne Gore. Takođe, ova oblast nije u prioritetnim oblastima u budžetima Crne Gore za nauku i tehnologiju.

Pored navedenog, nemogućnost kontrole kontaminacije uzorka zahtijeva mnogo iskustva.

Zbog složenosti procesa između mikroplastike i svih elemenata vodenih ekosistema, potrebna su dalja istraživanja da bi se identifikovali različiti faktori koji doprinose zagađenju mikroplastikom, kao što su izvori, meteorološki uslovi, hidrološki uslovi, ljudske aktivnosti, transportni procesi.

Iako je problem mikroplastike sve prisutniji, znanja o njenom uticaju na kvalitet vode i sedimenta u vodenim ekosistemima i dalje su ograničena, što ukazuje na potrebu za dodatnim istraživanjima. Naučnici sve više usmjeravaju svoje napore ka razvoju unaprijeđenih metoda analize i kreiranju bogatijih biblioteka podataka za efikasnije proučavanje ovog problema.

Kako je proučavanje mikroplastike u slatkovodnom sedimentu još uvijek na samom početku u Crnoj Gori i regionu, ne postoji dugoročno dovoljan broj sprovedenih istraživanja, kako bi se budući dobijeni podaci mogli upoređivati i shodno tome donositi eventualne standardizacije metoda uzorkovanja i analize čestica mikroplastike.

7. ZAKLJUČAK

Istraživanje prisustva mikroplastike u priobalnom sedimentu rijeke Cijevne pružilo je detaljan uvid u vrste, distribuciju i sezonske promjene u broju čestica mikroplastike u okviru ovog ekosistema. Kvantitativna analiza je pokazala značajne sezonske varijacije, pri čemu je veći broj čestica zabilježen u jesenjem uzorkovanju (439) u odnosu na prolječno uzorkovanje (229). Ova razlika može biti povezana sa meteorološkim i antropogenim faktorima, poput sezonskih aktivnosti, kao i intenzivnijeg turističkog djelovanja tokom ljeta i jeseni. Primjenom FTIR i Raman spektroskopije omogućena je precizna identifikacija prisutnih polimera. Dobijeni rezultati ukazali su na prisustvo različitih polimernih struktura, pri čemu su PE (60,8 %) i PS (21,7 %) dominirali među identifikovanim česticama mikroplastike. Dominantnost plave, crvene i mikroplastike bez boje, zajedno sa ovim polimerima, može ukazati na različite izvore zagađenja mikroplastikom u vezi sa čim su potrebna dodatna istraživanja.

Kontinuirano prisustvo PA čestica u uzorcima potvrđuju značaj kontrole i upravljanja mikroplastikom, kako bi se smanjili negativni uticaji na ekosisteme i zdravlje ljudi, kao i to da je potrebno što hitnije sprovesti dodatna istraživanja.

Rezultati ovog istraživanja ukazuju da rijeka Cijevna doprinosi sveukupnom zagađenju rijeke Morače česticama mikroplastike, te da, kao njena pritoka, aktivno transportuje ove čestice do Jadranskog sliva. Ovo naglašava potrebu za kontinuiranim monitoringom i mjerama za smanjenje zagađenja mikroplastikom, ali i potrebom za daljim istraživanjima.

Posebno je zabrinjavajuće što je u Crnoj Gori, prema zvaničnim podacima, procenat recikliranja plastičnog otpada manji od dva posto, što ukazuje na ozbiljne nedostatke u upravljanju otpadom. Ovo istraživanje dodatno osnažuje potrebu za primjenom Državnog plana za upravljanje otpadom, kao i poštovanjem odredbi Zakona o upravljanju otpadom, koji naglašavaju važnost smanjenja, ponovne upotrebe i reciklaže otpada. Nedavno uvedena zabrana korišćenja plastičnih kesa, koja je stupila na snagu 20. oktobra 2024. godine, predstavlja pozitivan korak u ovom pravcu, usklađen sa ciljevima EU i strateškim pravcem Crne Gore ka održivijem upravljanju otpadom.

Očuvanje ekosistema rijeke Cijevne i ostalih vodenih tokova zahtijeva sistematski pristup i aktivnu posvećenost nauke, politike i zajednice, koji će u sinergiji obezbijediti održivije upravljanje ovim resursom.

8. LITERATURA

- [1] Bellasi, A., Binda, G., Pozzi, A., Galafassi, S., Volta, P., & Bettinetti, R. (2020). Microplastic contamination in freshwater environments: A review, focusing on interactions with sediments and benthic organisms. *Environments*, 7(4), 30, 2-28 <https://www.mdpi.com/2076-3298/7/4/30>
- [2] Ziegenbalg, N., Elbinger, L., Schubert, U. S., & Brendel, J. C. (2022). Polymers from S-vinyl monomers: Reactivities and properties. *Polymer Chemistry*, 13(18), 5019–5041. <https://doi.org/10.1039/D2PY00850E>
- [3] Choi, K., Kim, S. Y., Kim, J. H., Cho, H. J., & Hwang, Y. J. (2022). Plastic waste recycling, applications, and future prospects for a sustainable environment. *Sustainability*, 14(18), 11637. <https://doi.org/10.3390/su141811637>
- [4] Mhlanga, S. D., Mthembu, N., Mavhungu, S., Mpotokwane, L., Mahlangu, Z., & Mashau, M. (2024). Perspectives on plastic waste management: Challenges and possible solutions to ensure its sustainable use. *Recycling*, 9(5), 77. <https://doi.org/10.3390/recycling9050077>
- [5] Izvještaj o količini plastike, European Enviroment Agency, <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/plastics>
- [6] Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., & Wu, C. (2021). Microplastics in freshwater sediment: A review on methods, occurrence, and sources. *Science of The Total Environment*, 754, 141948. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141948>
- [7] Peng, G., Xu, P., Zhu, B., Bai, M., & Li, D. (2018). Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: A case study of risk assessment in mega-cities. *Environmental Pollution*, 234, 448-456. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.034>
- [8] Sánchez, L., Grelaud, M., Orellana, J., & Ziveri, P. (2019). River Deltas as hotspots of microplastic accumulation: The case study of the Ebro River (NW Mediterranean). *Science of the Total Environment*, 687, 1186–1196. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.168>
- [9] Wang, W., & Wang, J. (2018). Investigation of microplastics in aquatic environments: An overview of the methods used, from field sampling to laboratory analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 108, 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.026>
- [10] Bošković, N., Jaćimović, Ž., & Bajt, O. (2023). Microplastic pollution in rivers of the Adriatic Sea basin in Montenegro: Impact on pollution of the Montenegrin coastline. *Science of the Total Environment*, 905, 167206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167206>
- [11] Verschoor, A. J. (2015). Towards a definition of microplastics: Considerations for the specification of physico-chemical properties. National Institute for Public Health and Environment, Ministry of Health, Welfare and Sport RIVM Letter report -0116.
- [12] Badea, M. A., Balas, A., & Dinischiotu, A. M. (2023). Microplastics in Freshwaters: Implications for Aquatic Autotrophic Organisms and Fauna Health. *Microplastics*, 2(1), 3959. <https://doi.org/10.3390/microplastics2010003>
- [13] Zhao, H., Zhou, Y., Han, Y., Sun, Y., Ren, X., Zhang, Z., & Wang, Q. (2022). Pollution status of microplastics in the freshwater environment of China: A mini review. *Water Emerg. Contam. Nanoplastics*, 1, 5. <http://dx.doi.org/10.20517/wecn.2021.05>

- [14] Paulina, P., & Astel, M. A. (2022). Microplastics occurrence in two mountainous rivers in the lowland area—A case study of the Central Pomeranian region, Poland. *Microplastics*, 1(1), 167-185. <https://doi.org/10.3390/microplastics1010011>
- [15] Wu, P., Tang, Y., Dang, M., Wang, S., Jin, H., Liu, Y., Jing, H., Zheng, C., Yi, S., & Cai, Z. (2022). Spatial-temporal distribution of microplastics in surface water and sediments of Maozhou River within Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Science of The Total Environment*, 717, 135187. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135187>
- [16] Godoy, V., Calero, M., González-Olalla, J., Martín-Lara, M., Olea, N., Ruiz-Gutierrez, A., & Villar-Argaiz, M. (2022). The human connection: First evidence of microplastics in remote high mountain lakes of Sierra Nevada, Spain. *Environmental Pollution*, 119922. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119922>
- [17] Radić, R., & Mustać, B. (2020). Karakterizacija mikroplastike u sedimentu plaže Prapratno. *Zbornik radova Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu*, 15, 19-28. Dostupno na <https://hrcak.srce.hr/file/345666>
- [18] Au, S. Y., Bruce, T. F., Bridges, W. C., & Klaine, S. J. (2015). Responses of *Hyalella azteca* to acute and chronic microplastic exposures. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 34(11), 2564-2572. <https://doi.org/10.1002/etc.3093>
- [19] Li, W., Zu, B., Yang, Q., Guo, J., & Li, J. (2023). Sources, distribution, and environmental effects of microplastics: A systematic review. *RSC Advances*, 13, 15566-15574. <https://doi.org/10.1039/D3RA02169F>
- [20] Li, W. (2024). Microplastics analysis: From qualitative to quantitative. *Environmental Science: Advances*, 2024. <https://doi.org/10.1039/D4VA00244J>
- [21] Chen, Q., Zhao, H., Liu, Y., Jin, L., Renyi, & Peng, R. (2023). Factors affecting the adsorption of heavy metals by microplastics and their toxic effects on fish. *Toxics*, 11(6), 490. <https://doi.org/10.3390/toxics11060490>
- [22] Pete, A., Brahana, P., Bello, M., Benton, M., & Bharti, B. (2022). Biofilm formation influences the wettability and settling of microplastics. *Environmental Science & Technology Letters*, 10(2), 159-164. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00728>
- [23] Frost, H., Bond, T., Sizmur, T., & Felipe-Sotelo, M. (2022). A review of microplastic fibres: Generation, transport, and vectors for metal(loid)s in terrestrial environments. *Environmental Science Processes & Impacts*, 24, 504–524. <https://doi.org/10.1039/d1em00541c>
- [24] Zhang, K., Wang, X., & Li, L. (2020). Microplastic biofilms on marine debris and their environmental consequences. *Science of the Total Environment*, 711, 134445. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134445>
- [25] Acarer Serer, (2023). Microplastics in wastewater treatment plants: Sources, properties, removal efficiency, removal mechanisms, and interactions with pollutants. *Water Science & Technology*, 87(3), 685. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.022>
- [26] Tursi, A., Baratta, M., Easton, T., Chatzisymeon, E., Chidichimo, F., De Biase, M., & De Filpo, G. (2022). Microplastics in aquatic systems, a comprehensive review: origination, accumulation, impact, and removal technologies. *RSC Advances*, 12, 28318-28340. <https://doi.org/10.1039/D2RA04713F>

- [27] Hossain, R., Ghose, A., & Sahajwalla, V. (2025). Microplastics pollution in Australia: Sources, impacts, and mitigation strategies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101036. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.101036>
- [28] Long, Z., Pan, Z., Wang, W., Ren, J., Yu, X., Lin, L., Lin, H., Chen, H., & Jin, X. (2019). Microplastic abundance, characteristics, and removal in wastewater treatment plants in a coastal city of China. *Water Research*, 155, 255-265. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.028>
- [29] Knight L. J, Parker-Jurd, F. N. F., Al-Sid-Cheikh, M., & Thompson, R. C. (2020). Tyre wear particles: An abundant yet widely unreported microplastic? *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 18345–18354. doi:10.1007/s11356-020-08187-4
- [30] Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Jiménez, P. D., Simonneau, A., Binet, S., & Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 12(5), 339-344. doi:10.1038/s41561-019-0335-5
- [31] Gies, J. P., Keiner, A., Scavuzzo, C., Raber, L., Sengewald, S., Prasse, C., & Kümmerer, K. (2023). Plastic contamination in agricultural soils: A review. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 1-17. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00720-9>
- [32] Tursi, A., Baratta, M., Easton, T., Chatzisymeon, E., Chidichimo, F., De Biase, M., & De Filpo, G. (2022). Microplastics in aquatic systems, a comprehensive review: origination, accumulation, impact, and removal technologies. *RSC Advances*, 12, 28318-28340. <https://doi.org/10.1039/D2RA04713F>
- [33] Ma H, Liqiang C, Hang W, Qin Z. (2024) Microplastic Pollution in Water Systems: Characteristics and Control Methods. *Diversity* 16, no. 1: 70. <https://doi.org/10.3390/d16010070>
- [34] do Sul, I., Costa, M. F., Barletta, M., & Cysneiros, F. J. A. (2013). Pelagic microplastics around an archipelago of the Equatorial Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*, 75(1-2), 305-309. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.040>.
- [35] Yu, R.-S., & Singh, S. (2023). Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. *Sustainability*, 15(17), 13252. <https://doi.org/10.3390/su151713252>.
- [36] Maitlo, G., Ali, I., Maitlo, H. A., Ali, S., Unar, I. N., Ahmad, M. B., Bhutto, D. K., Karmani, R. K., Naich, S. R., Sajjad, R. U., & et al. (2022). Plastic Waste Recycling, Applications, and Future Prospects for a Sustainable Environment. *Sustainability*, 14(18), 11637. <https://doi.org/10.3390/su141811637>
- [37] Perdomo-González, A., Kropp, R. M., Hernández-Borges, J., & Díaz-Peña, F. J. (2022). "Microplastics in Agricultural Systems: Analytical Methodologies and Effects on Soil Quality and Crop Yield." *Agriculture*, 12(8), 1162. <https://doi.org/10.3390/agriculture12081162>.
- [38] Wang, Y., Liu, G., Wang, Y., Mu, H., Shi, X., Wang, C., & Wu, N. (2023). The Global Trend of Microplastic Research in Freshwater Ecosystems. *Toxics*, 11(6), 539. <https://doi.org/10.3390/toxics11060539>
- [39] Sarijan, S., Azman, S., Mohd Said, M. I., & Jamal, M. H. (2024). Microplastics in freshwater ecosystems: A recent review of occurrence, analysis, potential impacts, and research needs. *Environmental Pollution*, 268, 115945. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115945>

- [40] He, B., Goonetilleke, A., Ayoko, G., & Rintoul, L. (2019). Abundance, distribution patterns, and identification of microplastics. *Science of the Total Environment*, 700, 134467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134467>
- [41] Matjašič, T., Mori, N., Hostnik, I., Bajt, O., & Viršek, M. (2023). Microplastic pollution in small rivers along rural–urban gradients: Variations across catchments and between water column and sediments. *Science of the Total Environment*, 858, 160043. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160043>
- [42] Peng, G., Bellerby, R., Zhang, F., Sun, X., & Li, D. (2018). The plastic pollution of the world's largest urban area: Microplastics in the Shanghai Metropolitan Region. *Environmental Pollution*, 234, 779–786. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.070>
- [43] Idowu, G., Oriji, A., Olorunfemi, K., Sunday, M., Sogbanmu, T., Bodunwa, O., Shokunbi, O., & Aiyesanmi, A. (2024). Why Nigeria should ban single-use plastics: Excessive microplastic pollution of the water, sediments, and fish species in Osun River, Nigeria. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 13, 100409. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100409>
- [44] He, B., Smith, M., Egodawatta, P., Ayoko, G., Rintoul, L., & Goonetilleke, A. (2021). Dispersal and transport of microplastics in river sediments. *Environmental Pollution*, 279, 116884. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116884>
- [45] Osman, A., Hosny, E., Eltaweil, A., Omar, S., Elgarahy, A., Farghali, M., Pow-Seng, Y., Yuan-Seng, W., Nagandran, S., Batumalaie, K., Subash, B., John, J., Sekar, M., Saikia, T., Karunanithi, P., Hatta, M., Akinyede, K. (2023). Microplastic sources, formation, toxicity and remediation. *Springer Nature*, 21, 2129–2169. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01593-3>
- [46] Bošković, N., Joksimović, D., Peković, M., Perošević, A., & Oliver, B. (2022). Microplastics in surface sediments along the Montenegrin coast, Adriatic Sea: Types, occurrence, and distribution. *Science of The Total Environment*, 9(8), 841. <https://doi.org/10.3390/jmse9080841>
- [47] Bošković, N., Joksimović, D., Peković, M., Bajčeta, A., & Bajt, O. (2022). Microplastics in fish and sediments from the Montenegrin coast (Adriatic Sea): Similarities in accumulation. *Science of The Total Environment*, 850, 158074. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158074>
- [48] Viršek, M., Palarinus, A., Koren, Š., Peterlin, M., Horvat, P., & Kržan, A. (2016). Protocol for microplastics sampling on the sea surface and sample analysis. *Journal of Visualized Experiments*. <https://doi.org/10.3791/55161>
- [49] Sanchez, M., Carrillo, C., et al. (2022). Microplastic pollution in agricultural soils: Sources, distribution, and potential ecological impacts. *RSC Advances*, 12(39), 24676–24686. <https://doi.org/10.1039/d2ra04713f>
- [50] Rahman, A., et al. (2021). A review of human exposure to microplastics and insights into microplastics as obesogens. *Frontiers in Endocrinology*, 12, 724989. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.724989>
- [51] Rahman, A., Sarkar, A., Yadav, O. P., Achari, G., & Slobodnik, J. (2021). Microplastic pollution in agricultural soils: Sources, fate, and impact on the environment. *Science of The Total Environment*, 757, 143872. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143872>
- [52] Zhang, Y., Li, Y., & Zhang, Y. (2024). Recent advances in the recycling of polyethylene terephthalate (PET) in the context of sustainability. *Polymers*, 15(18), 3680. <https://doi.org/10.3390/polym15183680>

- [53] Agencija za zaštitu životne sredine (2015) Studija zaštite za spomenik prirode „Kanjon rijeke Cijevne“ – Nacrt, https://sekretarijat-za-ppor.podgorica.me/wp-content/uploads/2023/08/cijevna_decembar_javna_rasprava.pdf
- [54] Čulafić, G., & Krstajić, J. (2024). Hydrology of surface water and climate characteristics of Montenegro. In *Speleology of Montenegro* (pp. 51–65). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65581-2_4
- [55] Zavod za hidrometeorologiju i seizmologiju. Mjesečni izvještaj o raspodjeli percentila količina padavina. Retrieved from <https://www.meteo.co.me/page.php?keyword=reports>
- [56] Quinn, B., Murphy, F., & Ewins, C. (2017). Validation of density separation for the rapid recovery of microplastics from sediment. *Analytical Methods*, 9, 1491–1498. <https://doi.org/10.1039/C6AY02542K>
- [57] 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>
- [58] Montarsolo, A., Mossotti, R., Patrucco, A. et al. Study on the microplastics release from fishing nets. *Eur. Phys. J. Plus* 133, 494 (2018). <https://doi.org/10.1140/epjp/i2018-12415-1>
- [59] Zhu, X., Liu, G., Liu, L., & Li, J. (2018). The effects of microplastics on the environment and human health. *Science of The Total Environment*, 644, 1450-1460. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.30>
- [60] Optik Instrument (n.d.) Hyperion 3000 FTIR microscope. <https://www.optikinstrument.hr/ponuda/ftir-mikroskopi/hyperion-3000/>
- [61] K  ppler, A., Fischer, M., Oberbeckmann, S., et al. (2018). Comparison of Raman and Fourier Transform Infrared Spectroscopy for the Quantification of Microplastics in the Aquatic Environment. *Environmental Science & Technology*, 52(22), 13279–13289. DOI: 10.1021/acs.est.8b03438
- [62] Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., et al. (2020). Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Environmental Science & Technology*, 54(6), 3334–3349. DOI: 10.1021/acs.est.9b05660
- [63] Schuyler, Q., Hardesty, B. D., Lawson, T., Opie, K., & Wilcox, C. (2018). Economic incentives reduce plastic inputs to the ocean. *Science Advances*, 4(8), eaas9290. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aas9290>
- [64] Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985-1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- [65] Schwabl, P., Beyer, R., & Pr  frock, D. (2023). Microplastics in the Water Column of the Rhine River Near Basel: 22 Months of Sampling. *Environmental Science & Technology*, 57(20), 11420–11432. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08364>
- [66] Browne, M. A., Galloway, T. S., & Thompson, R. C. (2024). Microplastic pollution in the River Thames: A review of the sources, transport pathways, and accumulation. *Environmental Pollution*, 265, 114988

- [67] Gündoğdu, S., Çevik, C., Ayat, B., Aydoğan, B., & Karaca, S. (2018). How microplastics quantities increase with flood events? An example from Mersin Bay NE Levantine coast of Turkey. *Environmental Pollution*, 239, 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.042>
- [68] Rodrigues, M. O., Abrantes, N., Gonçalves, F. J. M., Nogueira, H., Marques, J. C., & Gonçalves, A. M. M. (2018). Spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of a freshwater system (Antuã River, Portugal). *Science of the Total Environment*, 633, 1549–1559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.233>
- [69] Erni-Cassola, G., Dolf, R., & Burkhardt-Holm, P. (2024). Microplastics in the Water Column of the Rhine River Near Basel: 22 Months of Sampling. *Environmental Science & Technology*, 58(12), 4321–4332. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08364>
- [70] Hoellein, T. J., McCormick, A. R., Hittie, J., London, M. G., Scott, J. W., & Kelly, J. J. (2017). Longitudinal patterns of microplastic concentration and bacterial assemblages in surface and benthic habitats of an urban river. *Freshwater Science*, 36(3), 491–507
- [71] Balla, A., & Mohsen, A. (2022). Spatial variations in microfiber transport in a transnational river basin: The case of the Tisza River. *Applied Sciences*, 12(21), 10852. <https://doi.org/10.3390/app122110852>