

Prisutnost mikroplastike u hranidbenom lancu i makroplastike u morskim pticama – Projekt WASTEREDUCE – (Znanstvena studija)

Interreg



Co-funded by
the European Union

Italy – Croatia

 WASTEREDUCE



Naručitelj: Javna ustanova "Natura Histrica"
Riva 8
52100 Pula
OIB: 45370781471

Izrađivač: Blue Mark Consulting
Put za Marleru 20
52204 Ližnjan
OIB: 77663023371

Radni tim: dr. sc. Ana Markić
dr. sc. Ines Kovačić
dr. sc. Neven Iveša

Ugovor: KLASA: 112-07/25-01/15
URBROJ: 01/2025
Potpisan 01. kolovoza 2025. godine

svibanj, 2026.

Prisutnost mikroplastike u hranidbenom lancu i makroplastike u morskim pticama – Projekt WASTEREDUCE –

ZAVRŠNO IZVJEŠĆE

Autori: Ana Markić¹, Ines Kovačić², Neven Iveša²

Suradnici: Lara Mikac³, Filip Prošić² (student)

¹ Blue Mark Consulting, Put za Marleru 20, 52204 Ližnjan

² Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Fakultet prirodnih znanosti, Znanost o moru, Zagrebačka ul. 30, 52100 Pula

³ Institut Ruđer Bošković, Zavod za fiziku materijala, Laboratorij za molekulsku fiziku i sinteze novih materijala, Bijenička 54, 10000 Zagreb, Croatia

Sukladno Ugovoru o uslugama „Izrada studije o prisutnosti mikroplastike u hranidbenom lancu i makroplastike u morskim pticama – Projekt WASTEREDUCE“, **KLASA 112-07/25-01/15, URBROJ 01/2025**, potpisanog dana 1. kolovoza 2025. god. od strane ravnateljice JU Natura Histrica Silvia Buttignoni i vlasnice obrta Blue Mark Consulting Ana Markić, u okviru Interreg projekta WASTEREDUCE, provedena je znanstvena studija kojoj je cilj bio utvrditi prisutnosti mikro- i makroplastike u probavnom sustavu četiri skupine morskih organizama: školjkaša, rakova, riba i morskih ptica. Istraživanje je bilo provedeno na području Natura 2000 u Istarskoj županiji, uključujući obalne ekosustave posebno ranjive na antropogeno onečišćenje. Prikupljeni podaci poslužiti će za bolje razumijevanje unosa plastike u hranidbenu mrežu na više trofičkih razina. Sukladno projektnom zadatku, ovo završno izvješće sadrži detaljnu informaciju o studiji – uvod, metodologiju, rezultate, diskusiju, zaključak i reference.

Sažetak

Plastično onečišćenje mora i morskih organizama danas predstavlja jedan od najraširenijih i ekološki najznačajnijih antropogenih pritisaka na morske ekosustave. U sklopu istraživanja prisutnosti mikroplastike u hranidbenom lancu i makroplastike u morskim pticama analizirano je ukupno 183 jedinki školjkaša, rakova i riba te 10 gvalica morskih ptica prikupljenih na području Istarske Županije. Cilj istraživanja bio je procijeniti prisutnost plastike u različitim trofičkim razinama te identificirati potencijalne bioindikatorske skupine organizama.

Rezultati su pokazali da školjkaši iz urbanih i antropogeno opterećenih područja akumuliraju značajno veće koncentracije mikroplastike u odnosu na jedinke iz udaljenijih i manje opterećenih lokaliteta, što potvrđuje važnost lokalnih izvora onečišćenja i visoki biomonitoring potencijal filtratora. Nasuprot tome, rakovi su sadržavali relativno male količine plastike te su se pokazali metodološki zahtjevnima za analizu i manje pogodnima kao bioindikator mikroplastike. Među ribama su uočene izražene razlike između vrsta; cipli su sadržavali znatno veće količine mikroplastike od strijelki, što upućuje na važnost hranidbene ekologije i načina prehrane u unosu plastike. Rezultati sugeriraju da bi cipli mogli predstavljati prikladne bioindikatore mikroplastičnog onečišćenja u priobalnim područjima.

Analiza gvalica morskih ptica pokazala je izrazito visoku zastupljenost plastike, pri čemu je svih 10 detaljno analiziranih gvalica sadržavalo plastiku. Ukupno je izdvojeno 274 komada plastike, dominantno film plastike i vlakana. Plastika je potvrđena u svim istraživanim razinama hranidbenog lanca, međutim trofički prijenos i biomagnifikacija nisu mogli biti nedvojbeno potvrđeni.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. PLASTIČNO ZAGAĐENJE MORA	1
1.2. UTJECAJ PLASTIKE NA ORGANIZME	1
1.2.1. Utjecaj na morske organizme	1
1.2.2. Trofički prijenos i biomagnifikacija	2
1.2.3. Utjecaj plastičnog zagađenja na čovjeka	2
1.3. STANJE U JADRANU I MEDITERANU	2
1.4. MONITORING I BIOINDIKATORI	3
2. METODOLOGIJA	4
2.1. TERENSKO PRIKUPLJANJE UZORAKA	4
2.1.1. Pacifička kamenica (<i>Magallana gigas</i>)	5
2.1.2. Plavi rak (<i>Callinectes sapidus</i>)	7
2.1.3. Ribe: strijelka (<i>Pomatomus saltatrix</i>) i cipal plutaš (<i>Oedalechilus labeo</i>)	9
2.1.4. Morske ptice	11
2.2. LABORATORIJSKE ANALIZE	15
2.2.1. Kontrola kvalitete i sprječavanje kontaminacije	15
2.2.2. Izolacija mikroplastike i makroplastike	15
2.2.3. Spektrometrijska analiza izdvojenih čestica mikroplastike	18
2.3. STATISTIČKA ANALIZA	18
2.4. DOPUŠTENJE ZA TERENSKO PRIKUPLJANJE UZORAKA	18
3. REZULTATI I DISKUSIJA	19
3.1. MIKROPLASTIKA U ŠKOLJKAŠIMA	19
3.2. MIKROPLASTIKA U RAKOVIMA	24
3.3. MIKROPLASTIKA U RIBAMA	28
3.4. MAKROPLASTIKA U MORSKIM PTICAMA	33
4. ZAKLJUČAK	38
5. REFERENCE	39

Skraćenice

PP – polipropilen
PE – polietilen
PS – polistiren
PET – polietilen tereftalat
PVC – polivinil klorid
PA – poliamid

1. UVOD

1.1. PLASTIČNO ZAGAĐENJE MORA

Problem plastičnog onečišćenja započinje sredinom 20. stoljeća s naglim rastom industrijske proizvodnje plastike nakon Drugog svjetskog rata, kada se plastika zbog svoje jeftinoće, izdržljivosti i svestranosti počinje masovno koristiti u gotovo svim sektorima (Geyer et al., 2017). Poseban preokret događa se širenjem jednokratne plastike kada proizvodi poput vrećica, ambalaže, boca i pribora za jednokratnu uporabu postaju standard u svakodnevnom životu (UNEP, 2018). Iako su prvi znakovi problema u morskim ekosustavima zabilježeni već tijekom 1960-ih i 1970-ih godina, kada su istraživači počeli primjećivati plastični otpad u oceanima i morskim organizmima (Carpenter & Smith, 1972; Rothstein 1973), tadašnja znanstvena upozorenja ostala su uglavnom unutar akademskih krugova i nisu imala širi društveni odjek. Tijekom desetljeća koja su uslijedila, količina plastike u okolišu kontinuirano je rasla, potaknuta globalizacijom potrošnje i nedostatnim sustavima upravljanja otpadom (Jambeck et al. 2015). Tek u posljednjih desetak godina problem plastičnog onečišćenja ulazi u javni fokus na globalnoj razini, ponajviše zahvaljujući istraživanjima mikroplastike, aktivističkim medijskim kampanjama i dokumentarnim filmovima koji su vizualno prikazali razmjere zagađenja oceana. Danas je jasno da se radi o dugoročnom i kumulativnom problemu koji utječe na sve razine morskih ekosustava, od površinskih voda do dubokog mora, te da je posljedica desetljeća nekontrolirane proizvodnje i potrošnje jednokratne plastike.

Plastično onečišćenje, uključujući mikroplastiku (MP) (čestice <5 mm) i nanoplastiku (NP) (čestice <1 µm), postalo je ključni ekološki i prehrambeni problem zbog akumulacije u vodenim i kopnenim ekosustavima te integracije u hranidbene mreže (GESAMP, 2015; WHO, 2019). Ove čestice prolaze kroz trofičke razine, od fitoplanktona i zooplanktona do riba i školjaka, te mogu završiti u ljudskoj prehrani (Wright & Kelly, 2017). Također, mikroplastika može djelovati kao vektor za aditive ugrađene tijekom proizvodnje te za sorbirana hidrofobna onečišćiva iz okoliša, pri čemu je njihov doprinos izloženosti organizama uvjetovan okolišnim čimbenicima, svojstvima čestica i vremenom zadržavanja u probavnom sustavu (Koelmans et al., 2016).

Primarni izvori mikroplastike uključuju industrijske pelete te kozmetičke proizvode s mikrogranulama (Fendall & Sewell, 2009; Andrady, 2011). Sekundarna mikroplastika nastaje fragmentacijom većih plastičnih predmeta pod utjecajem UV zračenja, oksidacije i mehaničke degradacije (Barnes et al., 2009; Andrady, 2011).

1.2. UTJECAJ PLASTIKE NA ORGANIZME

1.2.1. Utjecaj plastike na morske organizme

Pregled eksperimentalnih studija dosljedno pokazuje da mikroplastika i nanoplastika mogu imati širok spektar negativnih učinaka na morske organizme, pri čemu se mehanizmi i ishodi značajno razlikuju ovisno o vrsti, veličini čestica, koncentraciji i trajanju izloženosti (Galloway et al., 2017; Bucci et al., 2020). Na fiziološkoj razini, zabilježeni su učinci poput smanjene aktivnosti hranjenja, energetskog deficita, oksidativnog stresa i upalnih odgovora, osobito kod filtratora poput školjaka i zooplanktona, gdje dolazi do mehaničke iritacije i blokade probavnog sustava (Cole et al., 2013; Avio et al., 2015). Reprodukativni učinci uključuju smanjenu plodnost, promjene u razvoju gameta i larvi te smanjeni uspjeh razvoja potomstva, što je posebno izraženo kod beskrjalješnjaka i riba u ranim životnim stadijima (Sussarellu et al., 2016). Na razini endokrinološkog sustava, eksperimentalni radovi ukazuju na poremećaje hormonalne regulacije, uključujući promjene u ekspresiji gena povezanih s reprodukcijom i stresnim odgovorom, što sugerira potencijalno djelovanje mikroplastike kao endokrinih disruptora, bilo izravno ili posredno putem vezanih kemikalija (Rochman et al., 2013). Uz to, nanoplastika pokazuje sposobnost prolaska kroz epitelne barijere i distribucije u unutarnja tkiva i organe, pri čemu eksperimentalni i pregledni radovi ukazuju na njezinu prisutnost izvan probavnog sustava te potencijal za sistemske učinke na staničnoj razini (Mattsson et al., 2017; Ma et al., 2021).

Veličina i oblik čestica ključni su za bioraspoloživost i translociranje (Koelmans et al., 2016). Mikroplastika može adsorbirati perzistentna organska zagađivala (persistent organic pollutants ili POPs) i druge kontaminante, djelujući kao vektor kemijske izloženosti (Teuten et al., 2009; Rochman et al., 2013).

1.2.2. Trofički prijenos i biomagnifikacija

U morskim ekosustavima mikroplastika i nanoplastika ulaze u hranidbene mreže primarno putem filtratora, uključujući zooplankton, školjkaše i male pelagične ribe, koji djeluju kao početni vektori trofičkog prijenosa. Eksperimentalne i terenske studije pokazuju da ingestija mikroplastike može utjecati na hranidbenu učinkovitost, ponašanje i preživljavanje organizama nižih trofičkih razina, s posljedičnim učincima na dostupnost energije za predatore (Cole et al., 2013; Botterell et al., 2020). Prijenos mikroplastike kroz odnose plijen–predator eksperimentalno je potvrđen u više morskih sustava, uključujući planktonske, bentoske i nektonske organizme u hranidbenim mrežama (Farrell & Nelson, 2013; Setälä et al., 2014; Santana et al., 2017; Markic et al., 2018).

Iako je klasična biomagnifikacija mikroplastike (povećanje koncentracije ili akumulacija s porastom trofičke razine) varijabilna i često ograničena (Koelmans et al., 2016; Wright & Kelly, 2017), čestice plastike mogu djelovati kao nosači kemijskih onečišćivala. Adsorpcija hidrofobnih organskih spojeva i drugih kontaminanata na površinu plastike doprinosi složenim “cocktail” efektima i može mijenjati njihovu distribuciju i bioraspoloživost u hranidbenim mrežama (Teuten et al., 2009; Koelmans et al., 2016). Stoga, iako biomagnifikacija samih čestica nije dosljedno potvrđena, trofički prijenos povezanih kontaminanata predstavlja ključan mehanizam ekološkog rizika, s potencijalnim posljedicama za više trofičke razine, uključujući komercijalno važne vrste i čovjeka (Diepens & Koelmans, 2018; Mercogliano et al., 2020).

1.2.3. Utjecaj plastičnog zagađenja na čovjeka

Mikroplastika i nanoplastika detektirane su u različitim ljudskim biološkim matricama, uključujući krv, pluća, stolicu, posteljicu i arterijske plakove, što potvrđuje njihovu sveprisutnu izloženost i sposobnost internalizacije u organizmu (Ragusa et al., 2021; Jenner et al., 2022; Leslie et al., 2022). Posebno zabrinjava činjenica da se nanoplastika može translocirati kroz epitelne barijere te potencijalno prijeći krvno-moždanu barijeru, pri čemu eksperimentalni i *in vivo* modeli upućuju na mogućnost akumulacije u mozgu i indukcije oksidativnog stresa te neuroinflamacije (Prüst et al., 2020; Danopoulos et al., 2022).

Izloženost ljudi mikroplastici odvija se putem ingestije i inhalacije, uključujući i trofički prijenos kroz konzumaciju kontaminiranih morskih i kopnenih organizama, pri čemu su morski plodovi prepoznati kao relevantan izvor unosa u ljudskoj prehrani (Cox et al., 2019; Mercogliano et al., 2020). Značajan izvor izloženosti također predstavlja unutarnje okruženje, uključujući sintetički tekstil, namještaj i tepihe, iz kojih se kontinuirano oslobađaju mikrovlakna i čestice plastike, kao i atmosferska izloženost (Dris et al., 2016; Vianello et al., 2019).

S obzirom na prisutnost mikroplastike u više organskih sustava te dokaze o staničnoj toksičnosti *in vitro*, uključujući oksidativni stres, upalne odgovore i potencijalne genotoksične učinke, fokus istraživanja usmjeren je na dugoročne posljedice kronične izloženosti i akumulacije u tkivima (Danopoulos et al., 2022).

1.3. STANJE U JADRANU I MEDITERANU

U Jadranskom moru i širem Mediteranu mikroplastika je široko rasprostranjena u sedimentima, vodenom stupcu i u organizmima, pri čemu je Mediteran prepoznat kao jedno od globalnih “hotspot” područja s povišenim koncentracijama mikroplastike u odnosu na otvorene oceanske sustave (UNEP/MAP, 2020; Terzi et al., 2024). U Jadranu, mikroplastika je, između ostalog, detektirana u školjkašima kao što je *Mytilus galloprovincialis* (npr. Gomiero et al., 2019; Kovačić et al., 2024) i rakovima (npr. Aliko et al., 2022). Također je dokumentirana i u komercijalnim ribljim vrstama, gdje se mikroplastika nalazi u probavnom traktu značajnog udjela analiziranih

jedinki, što potvrđuje njezinu integraciju u lokalne hranidbene mreže (Savoca et al. 2021; Mistri et al., 2022; Iveša et al., 2024).

1.4. MONITORING I BIOINDIKATORI

Biomonitoring mikroplastike u morskim ekosustavima temelji se na odabiru bioindikatorskih organizama koji integriraju prostorno i vremensko opterećenje okoliša. Prema preglednom radu Tang et al. (2026), najučinkovitiji bioindikatori su organizmi koji kombiniraju široku dostupnost, jasnu ekološku ulogu i sposobnost akumulacije mikroplastike na razinama koje se mogu pouzdano kvantificirati. Posebno se ističu filtratori poput školjkaša (npr. *Mytilus* spp.), ali i drugi trofički relevantni organizmi koji omogućuju praćenje prijenosa mikroplastike kroz hranidbene mreže, čime se omogućuje procjena ne samo prisutnosti nego i kretanja čestica kroz ekosustav.

Tang et al. (2026) naglašavaju da odabir bioindikatora mora biti usklađen s ciljevima monitoringa, pri čemu različite skupine organizama pružaju komplementarne informacije o izloženosti, bioakumulaciji i trofičkom transferu mikroplastike. Posebno se ističe potreba za standardizacijom izbora vrsta kako bi se omogućila usporedivost podataka između različitih regija i vremenskih serija, što je ključno za razvoj pouzdanih monitoring programa i procjenu ekološkog rizika.

2. METODOLOGIJA

2.1. TERENSKO PRIKUPLJANJE UZORAKA

U periodu od **01.09.2025.** do **08.03.2026.** obavljeno je terensko prikupljanje uzoraka u **17 terenskih izlazaka** i **5 kupovina uzoraka** riba u pulskoj ribarnici, tijekom kojih su prikupljeni uzorci školjkaša, rakova, riba i gvalice morskih ptica. Tablica 1 sadrži detalje terenskog uzorkovanja školjkaša, rakova i riba, kao što su ime vrste uzorkovanih organizama, lokacija i geografske koordinate, datum i vrijeme te tehničke pojedinosti uzorkovanja. Uzorci su prikupljeni oportunistički te je prikupljeno sveukupno **240 jedinki**, od čega je **80 jedinki pacifičke kamenica**, **100 jedinki plavog raka**, **60 jedinki riba** (30 jedinki cipla i 30 jedinki strijelke) i **45 gvalica morskih i velikih vranaca i galebova**.

Tablica 1. Terensko prikupljanje školjkaša, rakova i riba u periodu od 01.09.2025. do 17.01.2026.

Prikupljeni organizmi	Lokacija	Datum i vrijeme	Broj jedinki	Kratak opis terenske aktivnosti
<i>Magallana Gigas</i> (80) 	Pulska luka (44°52'23.2"N 13°50'49.0"E)	30.11.2025. 12:00 – 13:00	40	Uzorci pacifičke kamenice prikupljeni su u Pulskoj luci na dvije lokacije. Kamenice su skinute s podloge uz pomoć odvijača, stavljene u frižider-torbu s ledom, nakon čega su zamrznute na temperaturu od –20 °C do daljnje obrade.
		17.01.2026. 10:00 – 12:00	40	Uzorci pacifičke kamenice prikupljeni su u Nacionalnom Parku Brijuni, s pristaništa za brodove na Velom i Malom Brijunu.
<i>Callinectes sapidus</i> (100) 	Palud (45°01'32.8"N 13°42'04.6"E)	01.09.2025. 17:00 – 19:00	4	Uzorci plavog raka prikupljeni su u posebnom ornitološkom rezervatu Palud, u popodnevnom satima. Uzorkovanje je obavljao jedan ili dva stručnjaka uz upotrebu ručnih mrežica. Rakovi su potom spremljeni u prijenosne ručne frižider-torbe s ledom, nakon čega su isti dan odneseni na Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, u laboratorij Fakulteta prirodnih znanosti, te su pohranjeni u zamrzivač na temperaturu od –20 °C do daljnje obrade.
		02.09.2025. 16:00 – 18:00	16	
		06.09.2025. 14:00 – 16:00	18	
		07.09.2025. 13:00 – 16:00	14	
	Šćuza (44°49'11.7"N 13°53'01.6"E)	07.09.2025. 21:00 – 22:00	10	Uzorci plavog raka prikupljeni su u uvali Šćuza, u unutarnjem dijelu Pomorskog zaljeva. Uzorkovanje je provodio jedan ili dva stručnjaka pomoću ručnih mrežica. Prikupljanje je obavljano u večernjim satima, u noćnim uvjetima, uz korištenje čeonih svjetiljki. Nakon prikupljanja, svi uzorci su transportirani u laboratorij Fakulteta prirodnih znanosti Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli, gdje su pohranjeni u zamrzivaču na –20 °C do početka laboratorijske obrade.
		09.09.2025. 20:00 – 21:30	17	
		14.09.2025. 19:30 – 21:00	8	
		21.09.2025. 19:30 – 21:00	13	
<i>Pomatomus saltatrix</i> (30) 	Zapadna obala Istre i Medulinski zaljev	21.09.2025.	11	Uzorci strijelke dobavljeni su od podvodnog ribolovca. Jedinke su ulovljene na zapadnoj obali Istre podvodnom puškom, tako da je probavilo ostalo neoštećeno. Ribe su nakon ulova ohlađene u prijenosnoj frižider-torbi i naknadno zamrznute u zamrzivaču na –20 °C.
		15.11.2025.	3	Četiri jedinke strijelke kupljene su u pulskoj ribarnici, a ulovljene mrežama stajaćicama na zapadnoj obali Istre. Strijelke su zaledjene u zamrzivaču na –20 °C.
		29.11.2025.	1	
		18.11.2025.	1	Dvije jedinke strijelke kupljene su u pulskoj ribarnici, a ulovljene mrežama stajaćicama u Medulinskom zaljevu.
		29.11.2025.	1	
<i>Oedalechilus labeo</i> (30) 	Medulinski zaljev, (44°47'34.5"N 13°54'50.7"E)	01.10.2025. 15:00 – 17:00	15	Uzorci cipla plutaša prikupljeni su u Medulinskom zaljevu, u uvali Lokva i u uvali Portić. Prikupljanje je obavljeno ronjenjem uz upotrebu mreže stajačice (veličina oka 18 mm). Jedinke su spremljene u prijenosne ručne frižider-torbe, nakon čega su isti dan odnesene na Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, u laboratorij Fakulteta prirodnih znanosti, te su spremljene u zamrzivač na temperaturu od –20 °C do obrade.
		12.10.2025. 15:00 – 17:00	11	
	Medulinski zaljev, (44°46'42.4"N 13°55'05.0"E)	03.10.2025. 15:00 – 17:00	4	
Ukupno			240	

2.1.1. Pacifička kamenica (*Magallana gigas*)

Pacifička kamenica (*Magallana gigas*) odabrana je kao ciljni organizam za analizu mikroplastike u probavilima školjkaša. Ukupno je prikupljeno **80 jedinki** s dvije lokacije – **40 iz Pulske luke** (Slika 1 i 2) i **40 iz Nacionalnog parka (NP) Brijuni**. U Pulskoj luci uzorci su prikupljeni **30. 11. 2025.** oko podneva, za vrijeme oseke, na dvjema lokacijama kod stepenica, gdje je pristup kamenicama bio olakšan (Slika 3). Kamenice na tim dijelovima rive, u zoni plime i oseke, rastu u gustim obraštajima (Slika 4). Uzorci iz NP Brijuni prikupljeni su **17. 01. 2026.**, također na dvjema lokacijama, Veli Brijun i Mali Brijun, s pristaništa za brodove (Slika 5). Kamenice su odvajane pomoću odvijača, pritom pazeći da se ne ošteti ljuštura i ne stvori pukotina kroz koju bi moglo doći do kontaminacije uzorka mikroplastikom. Uzorci su fotodokumentirani i spremljeni u rashladnu torbu s ledom do transporta u laboratorij, gdje su zamrznuti na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do daljnje analize.



Slika 1. Uzorci pacifičke kamenice iz Pulske luke.



Slika 2. Dvije lokacije prikupljanja pacifičkih kamenica u Pulskoj luci (žute zvjezdice) (Izvor: Google Earth).



Slika 3. Stepenice kod kojih je bio olakšan pristup pacifičkim kamenicama.



Slika 4. Gusti obraštaji pacifičke kamenice.



Slika 5. Dvije lokacije prikupljanja pacifičkih kamenica u u NP Brijuni (žute zvjezdice), lijevo Veli Brijun, desno Mali Brijun (Izvor: Google Earth).

2.1.2. Plavi rak (*Callinectes sapidus*)

Kao predstavnik skupine rakova, odabran je invazivni alohtoni **plavi rak** (*Callinectes sapidus*) koji se pojavljuje u velikom broju na lokacijama **Palud** i **Šćuza**. Palud, posebni ornitološki rezervat južno od Rovinja, je plitko, izrazito muljevito lagunsko stanište, bogato močvarnom vegetacijom, u kojem su posljednjih godina vrlo brojni i stalno prisutni invazivni plavi rakovi. Značajno manje muljevito stanište plavih rakova je Šćuza, umjetno zatvorena i pregrađena uvala u Pomerskom zaljevu, predstavljajući najstariji sačuvani oblik tradicionalnog ribarenja na području Istre. Palud je hipersalina močvara, dok je Šćuza bočata uvala. Uzorci na Paludu su sakupljeni u predjelu kanala koji spaja lagunu s morem i njegovoj bližoj okolini (Slika 6 lijevo i Slika 7), a na Šćuzi je uzorkovanje odrađeno u zapadnom dijelu zaljeva, gdje je pristup terenu olakšan (Slika 6 desno, Slika 8).



Slika 6. Lokacije sakupljanja uzoraka plavog raka – Palud (lijevo) i Šćuza (desno).
Žuta zvjezdica označava područje uzorkovanja (Izvor: Google Earth).



Slika 7. Lokacija uzorkovanja plavog raka na Paludu (02.09.2025.).

U sveukupno **osam terenskih izlazaka** sakupljeno je **100 jedinki plavog raka**. U četiri navrata, na Paludu je sakupljeno 52 jedinke, a na Ščuži 48. Uzorkovanje na muljevitom Paludu (Slika 9 a) nešto je duže trajalo jer je pronalazak rakova u mulju otežan, za razliku od Ščuže, gdje je više kamene podloge i mulja znatno manje (Slika 9 b). Budući da smo procijenili da je vjerojatnost kontaminacije plastikom kod plavog raka veća ako se koriste vrše s plastičnom mrežom, uzorkovanje se vršilo ručnom mrežicom kako bi izloženost plastičnim materijalima prilikom sakupljanja bila što kraća (Slika 9 c). Međutim, nekoliko jedinki prikupljeno je mrežom stajačicom namijenjenom za drugu vrstu uzorkovanja. Rakovi su potom spremljeni u frižider-torbu s ledom u metalnu zdjelu (Slika 9 d i e) do transporta u laboratorij Fakulteta prirodnih znanosti na Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli (Slika 9 f), gdje su spremljeni u zamrzivač na -20°C do početka laboratorijske obrade.



Slika 8. Lokacija uzorkovanja plavog raka u Ščuži (14.09.2025.)



Slika 9. Uzorkovanje plavog raka: a) muljevito stanište u Paludu, b) kameno-muljevito stanište u Ščuži, c) frižider-torba i kanta za uzorkovanje, d) ručna mrežica za sakupljanje rakova, e) plavi rakovi u metalnoj zdjeli na hlađenju u frižider-torbi i f) plavi rakovi sa Ščuže.

2.1.3. Ribe: strijelka (*Pomatomus saltatrix*) i cipal plutaš (*Oedalechilus labeo*)

Strijelka (*Pomatomus saltatrix*) i **cipal plutaš** (*Oedalechilus labeo*) odabrani su kao ciljne vrste za ispitivanje prisutnosti mikroplastike u probavilima riba. Strijelka predstavlja vršnog predatora, dok je cipal plutaš bentopelagička vrsta koja se hrani neselektivnim usisavanjem sitnih čestica hrane s površine sedimenta i stijena te s površine vode.

Sveukupno je prikupljeno **30 jedinki strijelke** na dva načina: preuzimanjem od podvodnog ribolovca i kupnjom od preprodavača ribe u ribarnici. Podvodni ribolovac sakupio je 11 jedinki u području Natura 2000 (zapadna Istra) podvodnom puškom (Slika 10 lijevo), pri čemu je probavilo ostalo netaknuto, a ribe su u kratkom roku zamrznute na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ostalih 19 strijelki, kupljenih u ribarnici, ulovljene su mrežom stajaćicom (Slika 10 desno) na zapadnoj obali Istre i u Medulinskom zaljevu.



Slika 10. Strijelke ulovljene podvodnom puškom (lijevo) i mrežom stajaćicom veličine oka 80 mm (desno).

U tri izlaska na teren, sakupljeno je **30 jedinki cipla plutaša** na dvije lokacije u Medulinskom zaljevu, u uvali Lokva i u uvali Portić (Slika 11, žute zvjezdice). Riba su ulovljene ronjenjem na dah i utjerivanjem u mrežu stajaćicu veličine oka 18 mm (Slika 12 gornja i srednja fotografija), a potom su u što kraćem roku odvezene na zamrzavanje na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ u laboratorij Fakulteta prirodnih znanosti Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli (Slika 12 donja fotografija).



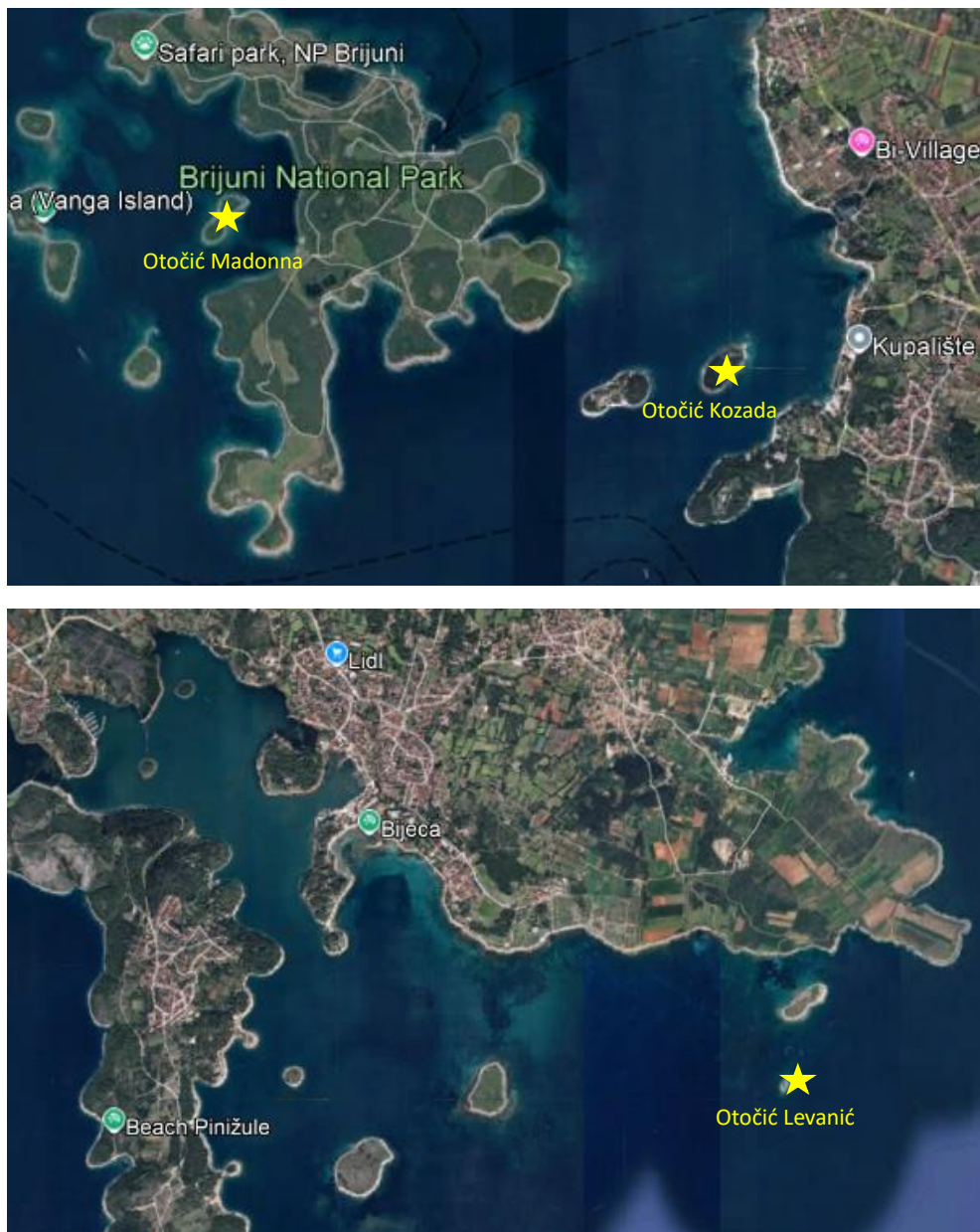
Slika 11. Lokacije uzorkovanja cipla plutaša (žute zvjezdice) u Medulinskom zaljevu (Izvor: Google Earth).



Slika 12. Uzorkovanje cipla plutaša mrežom stajaćicom oka 18 mm (gornja i srednja slika).
Uzorci cipla plutaša uzorokovani u Uvali Lokva, Premantura 12.10.2025. (donja slika).

2.1.4. Morske ptice

Sistematsko pretraživanje terena radi prikupljanja uginulih jedinki morskih ptica ili njihovih gvalica odrađeno je u tri navrata, **15. i 16.02.2026.** u NP Brijuni (**otok Kozada i Madonna**) s terenskim timom udruge BIOM i zaposlenicima Stručne službe nacionalnog parka (Slika 13 gore), i **08.03.2026.** na **otočiću Levaniću**, jednom od otoka u Medulinskom zaljevu (Slika 13 dolje).



Slika 13. Lokacije uzorkovanja morskih ptica (žute zvjezdice) u NP Brijuni na otočiću Madonna i Kozada (gore) i u Medulinskom zaljevu na otočiću Levaniću (Izvor: Google Earth).

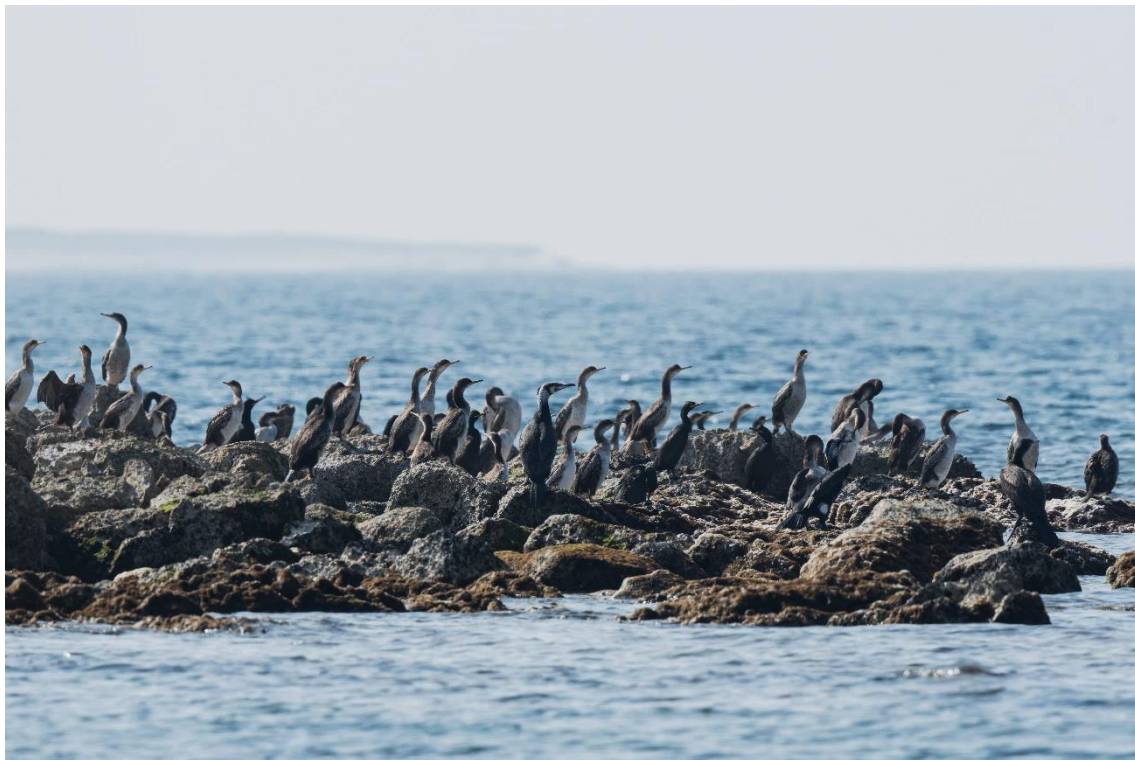
Višekratno oportunističko traženje uginulih ptica rezultiralo je pronalaskom samo dvije jedinke, jednog uginulog mladog **galeba klaukavca** (*Larus michahellis*) **21.02.2026.** na poluotoku Marlera i jednog **morskog vranca** (*Gulosus aristotelis*) **21.03.2026.** u NP Brijuni. Galeb je uginuo uslijed gutanja ribolovnog plastičnog mamca i upetljavanja u najlon, a za morskog vranca uzrok smrti nije određen. Budući da je krajem listopada, Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i ribarstva objavilo porast broja divljih ptica pozitivnih na ptičju gripu, probavila ovih jedinki nisu analizirana (Ministarstvo poljoprivrede Republike Hrvatske, 2025).

Pregled terena u NP Brijuni proveden je u sklopu **cenzusa morskih vranaca**, koji se 2026. godine provodi u brijunskom arhipelagu u suradnji zaposlenika Stručne službe nacionalnog parka i udruge BIOM. Na otocima Kozada i Madonna, gdje se morski vranaci gnijezde u niskom i gustom raslinju, zabilježen je velik broj gnijezda u čijoj su gradnji ptice koristile plastični otpad (Slika 14). U gnijezdima je najčešće uočena bijela plastična mrežica koja se koristi u akvakulturi za uzgoj dagnji.



Slika 14. Plastični materijal kao građevni materijal u gnijezdima morskih vranaca.
(Autorice fotografija: gore Ana Markić, dolje Ana Klarin).

Na drugoj lokaciji, otočiću Levaniću u Medulinskom zaljevu, morske ptice se ne gnijezde, već ga koriste kao područje za boravak i hranjenje. Zabilježene vrste uključuju **mlade morske vrance** koji se još ne gnijezde, **velike vrance** (*Phalacrocorax carbo*) i **galebove klaukavce** (Slika 15).



Slika 15. Morski vranci i veliki vranci (gore) i galebovi klaukavci (dolje) na otočiću Levaniću
(Autor fotografija: Filip Prošić).

Na Levaniću je pronađen velik broj gvalica (Slika 16) i izmeta vranaca i galebova na stijenama uz more. Ukupno je 45 gvalica bilo zadovoljavajuće kvalitete za daljnju laboratorijsku analizu. Gvalice su pažljivo prikupljene i svaka zasebno pohranjena u aluminijsku foliju s pripadajućom oznakom.



Slika 16. Gvalice morskih ptica sakupljene na otočiću Levaniću.

2.2. LABORATORIJSKE ANALIZE

Laboratorijska analiza uzoraka započela je **24. 10. 2025.** u **laboratoriju Fakulteta prirodnih znanosti Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli**, nakon nabave svih potrebnih kemikalija i opreme za izolaciju i identifikaciju mikroplastike te postavljanja protokola. Laboratorijska analiza probavila ukratko se sastojala od sljedećih koraka:

- otapanje jedinke i uzimanje biometrijskih podataka
- vađenje probavila i stavljanje u čašu s otopinom za kemijsku digestiju
- kemijska digestija/razgradnja probavila na sobnoj temperaturi ili na magnetskoj miješalici pri povišenoj temperaturi (do 40 °C)
- vakuum filtracija digestiranog uzorka uz pomoć vakuumske pumpe
- mikroskopsko pregledavanje filtera uz pomoć lupe s povećanjem do 40x
- pohrana pronađenih čestica mikroplastike za daljnju kemijsku analizu
- spektrometrijska analiza i identifikacija tipa polimera izdvojenih čestica mikroplastike

2.2.1. Kontrola kvalitete i sprječavanje kontaminacije

Kako bi se **sprječila kontaminacija uzoraka mikroplastikom** iz okolnog prostora, prije svakog laboratorijskog dana cijeli laboratorijski prostor temeljito je očišćen mokrom krpom, pri čemu je posebno važno detaljno očistiti podove radi smanjenja kontaminacije česticama koje se prenose zrakom. Dodatno, sve radne površine koje se koriste tijekom analize redovito se čiste spužvastim krpama od 100 % celuloze (npr. Vileda).

Nakon čišćenja radnog prostora, radi provjere čistoće provodila se tzv. **blank-kontrola**, odnosno „prazni uzorak” koji prolazi kroz sve korake analitičkog postupka do mikroskopiranja. Kao blank uzorak korištena je obična voda iz slavine, prethodno provjerena na prisutnost mikroplastike. Na nekoliko blank uzoraka uočena su vlakna, pri čemu je prostor nakon toga ponovno temeljito očišćen te je provedena dodatna kontrola kontaminacije, nakon koje se vlakna više nisu pojavljivala na filterima. Tijekom blank-kontrole povremeno su uočena i prozirna vlakna koja potječu od laboratorijskih kuta, te su takve čestice isključene iz rezultata.

2.2.2. Izolacija mikroplastike i makroplastike

Kemikalije potrebne za kemijsku digestiju sadržaja probavila i otapanje kalcijeva karbonata (vapnenački dio sadržaja probavila), **kalijev hidroksid** (10 % KOH), **vodikov peroksid** (15 % H₂O₂) i **octena kiselina** (9 % CH₃COOH), izmiješane su i filtrirane na metalnom filteru od nehrđajućeg čelika veličine pora 5 µm, te potom spremljene u staklene boce do daljnje upotrebe (Slika 17).

Nakon odmrzavanja organizama uzimaju se biometrijske mjere (Slika 18a i 18b). Ovisno o skupini, bilježe se dimenzije (dužina i širina), masa i spol. Primjerice, kod riba se mjeri standardna dužina (od gubice do početka repne peraje), totalna dužina (od gubice do kraja repa), ukupna masa i spol. Nakon mjerenja, probavilo se pažljivo vadi (Slika 18c i 18d) te se u što kraćem roku, radi smanjenja mogućnosti kontaminacije, prenosi u staklenku ili laboratorijsku čašu za kemijsku digestiju. Ako probavilo teži više od nekoliko grama, obavezno se homogenizira (usitnjava i izmiješa) radi učinkovitije razgradnje u 10 % KOH ili 15 % H₂O₂ (Slika 19).

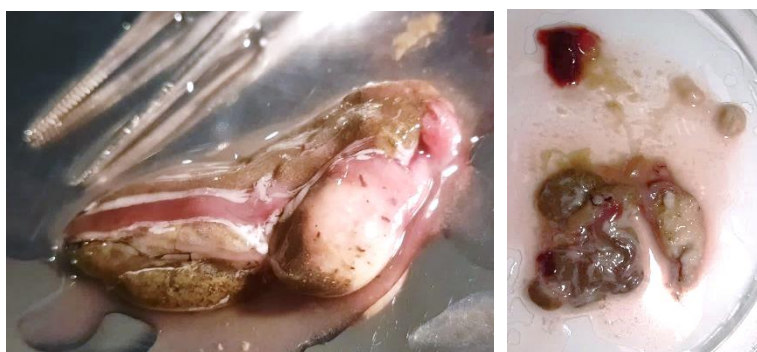


Slika 17. Filtrirane kemikalije.

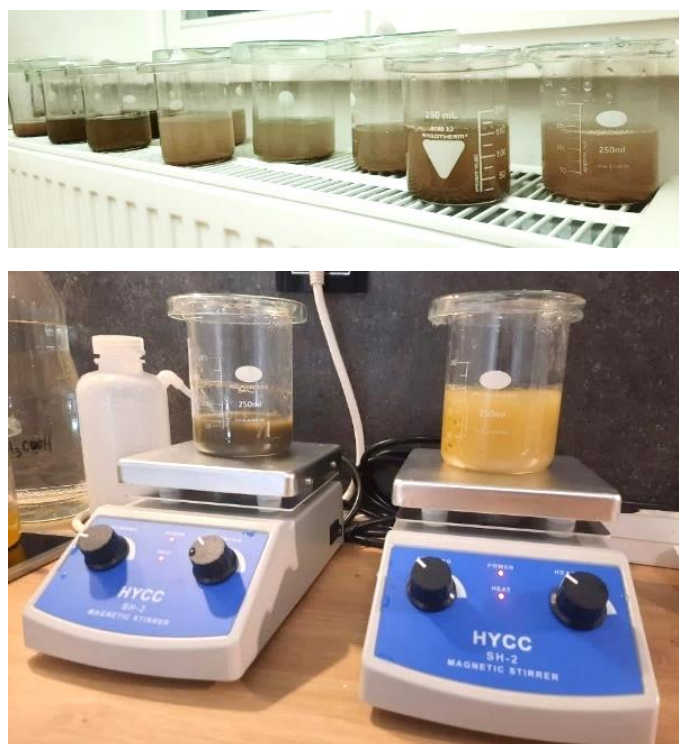
Homogenizirano probavilo ostavlja se u 10 % KOH ili 15 % H₂O₂ sve dok se sadržaj ne razgradi, što može trajati od nekoliko sati do nekoliko dana, ovisno o razgradivosti sadržaja. Kako bi se digestija ubrzala, uzorci se drže na toplom, a idealno je da se podvrgnu miješanju na magnetskoj miješalici s grijalicom (do 40 °C) barem neki kraći period prije filtriranja (Slika 20).



Slika 18. Bilježenje biometrijskih podataka kod a) strijelke i b) cipla plutaša, i vađenje probavila strijelke (c i d).



Slika 19. Izvađeno probavilo cipla plutaša (lijevo), koje je naknadno homogenizirano i tako pripremljeno za digestiju (desno).



Slika 20. Zagrijavanje uzoraka na radijatoru (gore) i na magnetskoj mješalici (dolje).

Nakon što uzorak prođe proces kemijske digestije, sadržaj se vakuum-filtrira na jednom ili dva filtera od nehrđajućeg čelika, ovisno o veličini čestica prisutnih u probavilu. Ako je sadržaj homogen i sitan, dovoljan je jedan filter veličine pora 50 µm, dok se u slučajevima prisutnosti krupnijih čestica primjenjuje dvostupanjska filtracija radi olakšane mikroskopske analize, pri čemu se koristi donji filter od 50 µm te gornji filter od 250 µm. Tijekom vakuum-filtracije, laboratorijska čaša ili posuda ispire se vodom pomoću štrcaljke kako bi se spriječio gubitak mikroplastike koja može ostati na stijenkama. Ako uzorak sadrži veću količinu kalcijeva karbonata, odnosno čestica vapnenca (CaCO_3) ili vapnenačkih ljuštura različitih organizama, može se dodatno tretirati octenom kiselinom radi njihove učinkovitije razgradnje.

Mikroskopiranje se provodi korištenjem laboratorijske lupe povećanja do 40× (Slika 21). U cijelosti je odrađena analiza **probavila 183 jedinke** ciljnih organizama (80 kamenica, 43 plavog raka, 30 cipala plutaša i 30 strijelki).



Slika 21. Mikroskopska analiza filtriranog uzorka.

Analiza gvalica morskih ptica na prisutnost makroplastike sastojala se od vaganja gvalice prije analize, izdvajanja plastike iz gvalice te vaganja pojedinih komponenti gvalice, brojanja, mjerenja, određivanja tipa i boje plastike i fotografiranja. Kada je to bilo potrebno, korišten je 10 % KOH ili obična voda za razmekšavanje tvrdog sadržaja gvalica kako bi se plastika lakše izdvojila (Slika 22). Tekućina s razmočenom gvalicom filtrirala se kroz cjedilo prekriveno gazom, nakon čega je materijal stavljen na sušenje i potom analiziran.



Slika 22. Otapanje sadržaja gvalice u 10 % KOH (lijevo i sredina) i filtriranje preko gaze i cjedila.

2.2.3. Spektrometrijska analiza izdvojenih čestica mikroplastike

Raman spektroskopska analiza čestica izdvojenih iz probavila provedena je na **Institutu Ruđer Bošković** u Zagrebu, na Zavodu za fiziku materijala, **Ramanovim spektrometrom WITec alpha300** (Oxford Instruments, Ulm, Njemačka) uz korištenje lasera valne duljine 532 nm. Na početku mjerenja, spektrometar je kalibriran pomoću standardnog uzorka silicija, pri čemu je referentna vrijednost postavljena na 520 cm^{-1} . Ramanovi spektri snimani su pri sobnoj temperaturi, uz snagu lasera od 5 mW, dok je za prikupljanje signala korišten objektiv povećanja 50×

Identifikacija materijala provedena je usporedbom dobivenih Ramanovih spektra s referentnim spektrima dostupnima u internim i komercijalnim **knjižnicama** unutar Raman softverskog paketa. Kao dodatni alat korišten je **Open Specy**, online platforma za identifikaciju mikroplastike koja omogućuje usporedbu dobivenih spektra s velikom bazom referentnih materijala (Cowger et al. 2025). Identifikacija se temeljila na položaju karakterističnih vibracijskih vrpca, njihovom intenzitetu te ukupnom obliku spektra, pri čemu je posebna pažnja posvećena prisutnosti dijagnostičkih vrpca specifičnih za pojedine polimere, pigmente ili mineralne faze. Na temelju toga određivan je tip materijala, odnosno polimera ili aditiva poput pigmenata.

Spektrometrijska analiza provedena je na 100 % izoliranih čestica. Primijenjen je konzervativan pristup interpretaciji rezultata. U slučajevima kada su se čestice izgubile tijekom prijenosa s filtra na mikroskopsko stakalce, a nije postojala visoka sigurnost da se radi o sintetskom polimeru, takve čestice su isključene iz analize. Također, čestice s niskim omjerom signal/šum (signal-to-noise), kod kojih nije bilo moguće pouzdano razlikovati polimerni materijal od potencijalnih prirodnih tkiva ili mineralnih čestica, također su isključene. Općenito, primijenjeni su strogi kriteriji identifikacije mikroplastike kako bi se osigurala visoka pouzdanost konačne klasifikacije materijala.

2.3. STATISTIČKA ANALIZA

Statističke analize provedene su u programskom paketu **jamovi** (verzija 2.6.44.0). Za ispitivanje razlika u učestalosti i koncentraciji mikroplastike između skupina (lokacija i vrsta) korištena je **jednosmjerna analiza varijance** (one-way ANOVA). Kada su rezultati ANOVA testa pokazali statistički značajne razlike, provedeni su post-hoc testovi radi utvrđivanja parnih razlika između pojedinih skupina. Normalnost raspodjele i homogenost varijanci provjerene su odgovarajućim dijagnostičkim testovima prije provedbe analize. Rezultati su smatrani statistički značajnima pri razini značajnosti **$p < 0,05$** .

2.4. DOPUŠTENJE ZA TERENSKO PRIKUPLJANJE UZORAKA

Za prikupljanje terenskih uzoraka, zatražena su i pribavljena su sljedeća dopuštenja:

- Dopuštenje Ministarstva zaštite okoliša i zelene tranzicije
Klasa: UP/I-352-02/25-15/75
URBROJ: 517-06-2-1-25-2
- Dopuštenje Istarske županije
Klasa: UP/I-352-01/25-01/24
URBROJ: 2163-08-02/5-25-3

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. MIKROPLASTIKA U ŠKOLJKAŠIMA

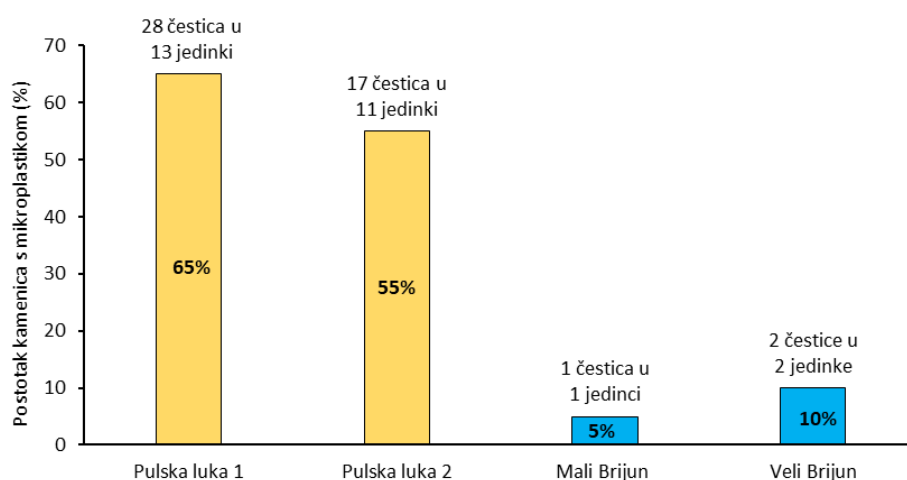
Uzorci školjkaša sakupljeni su s dvije lokacije: iz **Pulske luke**, koja se nalazi u blizini prometne ceste i drugih potencijalnih izvora plastičnog onečišćenja, poput sustava oborinske odvodnje, te iz **NP Brijuni**, koji su udaljeni od uobičajenih izvora onečišćenja povezanih s naseljenim područjima. Sa svake lokacije sakupljeno je po **40 jedinki** ($N = 40$), kako je prikazano u Tablici 2. Prosječna masa mekog tkiva kamenica uzorkovanih u Puli i u NP Brijuni bila je približno slična i iznosila je 6,0 i 6,4 g, redom.

Tablica 2. Uzorci kamenica i njihova prosječna masa (SE – standardna pogreška).

	Broj analiziranih jedinki (N)	Prosječna masa (g) $\pm$ SE
Pulska luka 1	20	5,0 $\pm$ 0,8
Pulska luka 2	20	7,0 $\pm$ 1,2
Pulska luka (ukupno)	40	6,0 $\pm$ 1,0
Mali Brijun	20	8,1 $\pm$ 0,8
Veli Brijun	20	4,6 $\pm$ 0,5
NP Brijuni (ukupno)	40	6,4 $\pm$ 0,8
Ukupno	80	6,2 $\pm$ 0,9

Analiza prisutnosti mikroplastike u kamenicama provedena je digestijom cjelokupnog mekog tkiva školjkaša, a ne samo njihovog probavnog sustava. Za kemijsku digestiju korištena je 10 % KOH, koja je vrlo učinkovita za razgradnju ove vrste tkiva, pa je za jednu jedinku ponekad bilo potrebno i manje od sat vremena da se uzorak u potpunosti razgradi. Budući da je digestija bila potpuna, rezidualnu otopinu bilo je lako filtrirati kroz filter veličine pora od 50 μm . Kamenice su općenito imale vrlo malo reziduala na filterima i mikroskopska analiza bila je brza i jednostavna.

Sveukupno je pronađeno **48 čestica mikroplastike u 27 jedinki** (33,8 %), što u prosjeku iznosi gotovo dvije čestice po jednoj kamenici. U kamenicama iz Pulske luke mikroplastika je bila prisutna u **60 %** ispitanih jedinki, dok je u kamenicama iz NP Brijuni mikroplastika pronađena u samo **7,5 %** jedinki. Više detalja o količini čestica mikroplastike po podlokacijama prikazano je na Slici 23 i u Tablici 3.

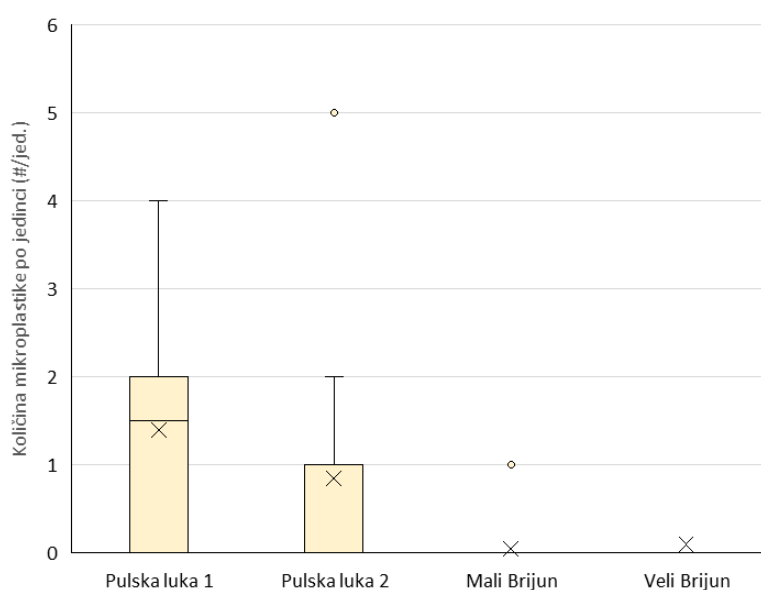


Slika 23. Prisutnost čestica mikroplastike u analiziranim kamenicama.

Tablica 3. Količina mikroplastike u kamenicama s različitim lokacija.

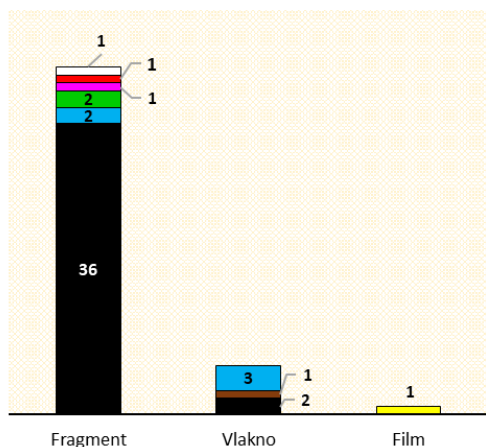
	Broj jedinki s mikroplastikom (#)	Postotak jedinki s mikroplastikom (%)	Broj čestica mikroplastike (#)	Broj čestica po jedinki (#MP/jedinka)
Pulska luka 1	13	65	28	2,2
Pulska luka 2	11	55	17	1,5
Pulska luka	24	60	45	1,9
Mali Brijun	1	5	1	1,0
Veli Brijun	2	10	2	1,0
NP Brijuni	3	7,5	3	1,0
Ukupno	27	56,3	48	1,8

Kako bi se usporedila količina mikroplastike (MP count) između četiri lokacije (Pulska luka 1, Pulska luka 2, Mali Brijun i Veli Brijun), statistička analiza **jednosmjerna analiza varijance** (One-way ANOVA) provedena je u **jamovi programu**. Rezultati su pokazali statistički značajne razlike između lokacija. **Post hoc Tukey test** pokazao je da se Pulska luka 1 značajno razlikuje od Malog i Velog Brijuna ($p < 0.05$), da je razlika između Pulske luke 2 i Velog Brijuna granična ($p = 0,05$), dok između Malog i Velog Brijuna ($p = 0.99$) i Pulske luke 1 i 2 ($p = 0.23$) nisu uočene statistički značajne razlike (Slika 24). Usporedive rezultate dobili su i autori studije iz Engleske gdje su populacije europske plosnate kamenice (*Ostrea edulis*) iz urbanih područja sadržavale značajno veće koncentracije mikroplastike u odnosu na one iz ruralnih lokacija (Zapata-Restrepo et al. 2025).



Slika 24. Količina mikroplastike po kamenici.

Od izdvojenih 48 čestica mikroplastike, najviše ih je u obliku **fragmenata** (41) (Slika 25). Osim fragmenata pronađeno je i sedam vlakana te jedan film. Najzastupljenija boja je **crna**, najčešće u obliku **fragmenata**, nakon koje slijedi plava (Slika 25). **Prosječne veličine čestica su ispod 1 mm**. Fragmenti su u prosjeku veličine oko 200 μm , vlakna oko 800 μm , a film oko 300 μm . Crni fragmenti pod lupom imaju **amorfan i grudast izgled** (Slika 26), a ubodom laboratorijske igle dobiva se dojam da se radi o **gumenastoj tvari**.



Vrsta MP	Količina (#)	Pr. dužina (μm)
Fragmenti	41	208
Vlakna	6	792
Film	1	300

Slika 25. Vrste i boje čestica mikroplastike izdvojenih iz kamenica. Prosječne veličine čestica prikazane su u tablici desno. Mjerena je najduža os, izražena u mikrometrima (μm).

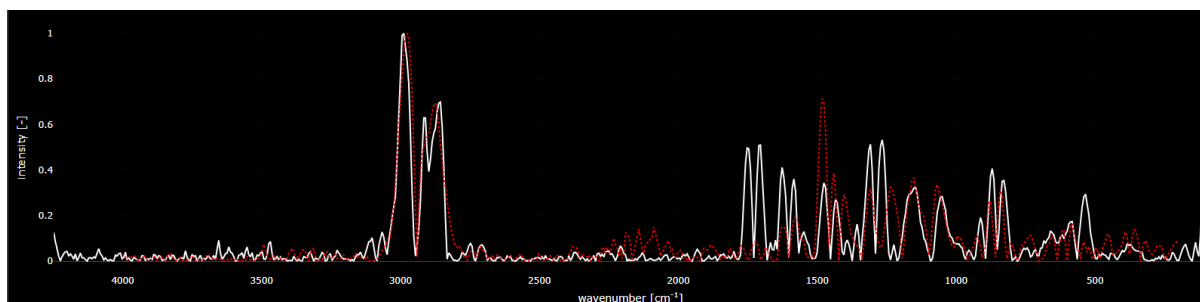


Slika 26. Crne čestice izdvojene iz kamenica iz Pulske luke (uzorci oznake MAG 41, 10 i 5).

Spektrometrijsko potvrđivanje i određivanje sastava mikroplastičnih čestica u kamenicama bilo je otežano. Čestice koje su vizualno prevladavale u većini uzoraka bile su sitni, crni, gumenasti fragmenti. Za velik dio tih čestica snimljeni Raman spektri imali su nizak signal-to-noise omjer, s izraženim šumom i bez jasno definiranih karakterističnih vrpca, što je otežavalo njihovu pouzdanu interpretaciju, a u brojnim slučajevima spektri nisu odgovarali referentnim spektrima iz spektralnih knjižnica.

Za dio čestica za koje je dobiven spektar dovoljno dobre kvalitete, kao najvjerojatniji materijal identificirana je guma (Slika 27). Budući da su pojedine crne gumenaste čestice dale pouzdane spektre, ostale morfološki istovjetne čestice (prema promatranju pod lupom) također su klasificirane kao guma, iako za njih nije bilo moguće dobiti spektralnu potvrdu visoke kvalitete.

Identifikacija čestica u uzorcima kamenica, stoga, temeljila se na kombinaciji spektralne analize i morfološke usporedbe s česticama za koje je dobiven pouzdan spektar.



Slika 27. Spektar crne čestice iz kamenice s lokacije Pulska luka 2 za koju program Open Specy pokazuje podudarnost od 75 % s gumom tzv. Tragacanth merck (Cowger et al. 2025).

Identifikacija mikroplastike Ramanovom spektroskopijom često je otežana kod tamnih i pigmentiranih čestica, osobito u uzorcima biološkog podrijetla poput školjkaša. Jedan od glavnih problema je fluorescencija uzrokovana pigmentima, aditivima i organskim ostacima, koja može biti višestruko intenzivnija od samog Ramanovog signala te maskirati karakteristične vrpce (Nava et al. 2021; Aloia et al. 2025). Posebno je naglašeno da boje i aditivi u plastici mogu značajno smanjiti točnost identifikacije jer prekrivaju spektralne značajke polimera (Azari et al. 2024). Ovaj problem je izražen kod crnih čestica, za koje je poznato da često daju neodređene ili neupotrebljive spektre. Crne čestice sadrže čađu (carbon black), pigment koji se široko koristi u potrošačkim proizvodima za bojenje plastike u crno, zaštitu od UV degradacije te poboljšanje njezinih svojstava (Konings et al. 2024). Dodatno, okolišno starenje, biofilm i organski materijal prisutan na česticama mogu povećati pozadinski signal i šum, što rezultira niskim signal-to-noise omjerom i otežanom usporedbom sa spektralnim knjižnicama (Umurhan et al. 2025). Zbog navedenih ograničenja, preporučuje se kombinirati spektroskopsku analizu s ostalim analizama kao što je Fourier Transform Infrared (FTIR) spektroskopija, kako bi se povećala pouzdanost klasifikacije čestica.

Iako guma najčešće nije dominantna frakcija mikroplastike, identificirana je kao relevantna komponenta mikroplastike u morskim organizmima, uključujući školjkaše, pri čemu se često povezuje s izvorima poput trošenja automobilskih guma i pomorskih aktivnosti (Wang et al. 2025). Kargar et al. (2025) navode da u školjkašima najčešće prevladavaju vlakna i fragmenti, pri čemu vlakna u pravilu čine dominantnu frakciju u različitim vrstama i okolišima. U preglednom radu o mikroplastici u kamenicama istaknuto je da sastav čestica može značajno varirati ovisno o lokalnim izvorima zagađenja i metodama identifikacije (Liu et al., 2023). Budući da se u Pulsu luku ispušta samo oborinska, ali ne i sanitarna kanalizacija, kojom se inače u morski okoliš unosi velika količina sintetičkih mikrovlakana (Mishra et al. 2019), u kamenicama s te lokacije umjesto vlakana prevladavaju fragmenti. S obzirom na to da je uzduž cijele Pulske luke prometna cesta, pretpostavljamo da se oborinskom kanalizacijom i površinskim ispiranjem u more unose znatne količine čestica automobilskih guma, koje potom završavaju u kamenicama. Naš nalaz podržava interpretaciju da prisutnost gumenastih fragmenata u uzorcima može biti posljedica specifičnih izvora onečišćenja u istraživanom području, kao što je u našem slučaju automobilsko onečišćenje.

Školjkaši se smatraju jednim od najpogodnijih bioindikatora onečišćenja mikroplastikom zbog svoje biologije i načina prehrane. Kao filtratori, oni procesiraju velike količine vode i neselektivno zadržavaju suspendirane čestice, uključujući mikroplastiku, čime učinkovito integriraju signal kontaminacije iz okoliša (Pizzuro et al. 2025). Zbog toga se često koriste u monitoring programima, poput Mussel Watch programa, kao indikatori kvalitete okoliša. Njihova dodatna prednost je jednostavno prikupljanje i obrada uzoraka, uključujući učinkovitu digestiju mekog tkiva (npr. KOH metodom), što omogućuje standardiziranu analizu mikroplastike. Nadalje, školjkaši brzo reagiraju na promjene u okolišu te akumuliraju čestice u koncentracijama koje odražavaju lokalne uvjete, što ih čini posebno korisnima za prostornu usporedbu zagađenja (Zapata-Restrepo et al. 2025). Invazivne strane vrste pritom imaju dodatnu prednost jer se njihovim iskorištavanjem za monitoring izbjegava uzorkovanje autohtonih vrsta, a često su i široko rasprostranjene, tolerantne na različite uvjete te dostupne u velikim gustoćama, što omogućuje konzistentno uzorkovanje i dugoročno praćenje promjena u okolišu.

Iako su kamenice invazivna vrsta te njihova kontaminacija mikroplastikom ima ograničen ekonomski značaj, njihova prisutnost može služiti kao indikator šireg okolišnog opterećenja, pri čemu se pretpostavlja da slični obrasci kontaminacije vrijede i za druge filtrirajuće organizme poput autohtone kamenice *O. edulis* i dagnje *Mytilus spp.*, koje imaju visoku ekološku i ekonomsku važnost. Čestice trošenja automobilskih guma i pripadajući kemijski spojevi mogu negativno utjecati na fiziologiju, reprodukciju i rane razvojne stadije školjkaša i drugih morskih organizama, uključujući smanjenje filtracijske aktivnosti, promjene u reproduktivnom uspjehu te toksične učinke ispuštenih kemijskih spojeva (eng. leachate) i samih čestica (Bernardini et al. 2024; Thomsen et al. 2024; Foscari et al. 2025; Savino et al. 2025; Michelangeli et al. 2026). Slični učinci zabilježeni su i kod drugih bentoskih organizama, uključujući morske ježince, gdje su spojevi ispušteni iz gumenih čestica pokazali toksičnost na rane razvojne faze (Rist et al. 2026), što upućuje na šire ekotoksikološke implikacije prisutnosti ovih čestica u obalnim ekosustavima.

S obzirom na potencijalnu akumulaciju mikroplastike u filtrirajućim organizmima, za ljudsku konzumaciju školjkaša preporučuje se izbjegavanje školjkaša iz područja s visokim stupnjem antropogenog utjecaja te primjena postupaka pročišćavanja (depuracije) prije konzumacije. Depuracija može smanjiti sadržaj kontaminanata u tkivu školjkaša, uključujući mikroplastiku, i time umanjiti potencijalni unos čestica putem hrane (Liu et al., 2023; Pizzuro et al., 2025).

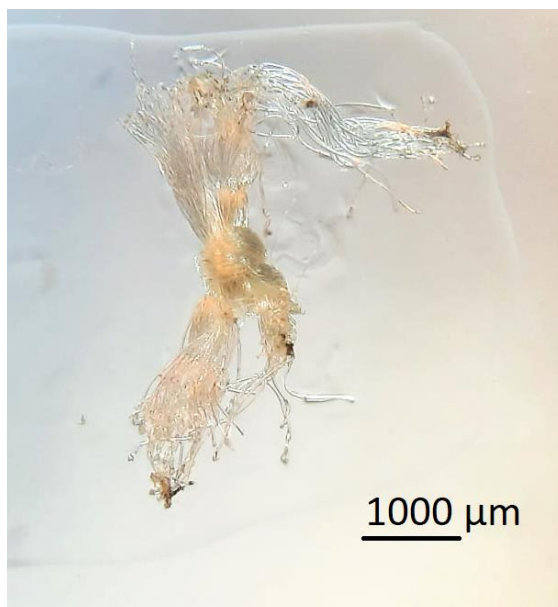
3.2. MIKROPLASTIKA U RAKOVIMA

Prisutnost mikroplastike u **plavim rakovima** određena je analizom isključivo želuca, budući da je crijeva teško odvojiti od okolnog tkiva bez njihovog oštećenja, a samo tkivo raka vrlo je teško kemijski digestirati. Stoga je bilo poželjno smanjiti količinu materijala za digestiju na minimum. Želuci su često sadržavali nerazgradive ili teško razgradive komponente, poput celuloze ili fragmenata ljuštura. Za prvih deset uzoraka želuca korištena je **10 %-tna otopina KOH**, no razgradnja je bila spora i ograničena. Zbog toga je za preostale uzorke korištena **15 %-tna otopina H₂O₂**, koja se često primjenjuje za učinkovitu razgradnju organske tvari u biološkim uzorcima uz očuvanje mikroplastičnih čestica (Wootton et al. 2025).

Prikupljeno je ukupno 100 uzoraka plavih rakova, no nakon analize prvih 20 uzoraka utvrđeno je da je **40 jedinki dovoljno za dobivanje statistički pouzdanih rezultata**, s obzirom na uočenu dosljednost nalaza. Sa svake lokacije nasumično je odabrano po 20 jedinki (N = 20), uz jednak omjer mužjaka i ženki. Jedinke su u prosjeku imale širinu karapaksa oko 10 cm, duljinu oko 5 cm i masu oko 75 g (Tablica 4). Budući da su tri jedinke bile kontaminirane fragmentima ribarske mreže stajačice (Slika 28), one bile su isključene iz daljnje analize i zamijenjene s nove tri jedinke te je u konačnici analiza provedena na ukupno 43 jedinke. Fragmenti mreže su također i vrijedan i zanimljiv nalaz koji potvrđuje da su rakovi u stanju fragmentirati veće plastične predmete i tako stvarati mikroplastiku.

Tablica 4. Broj analiziranih jedinki i biometrijski podaci (SE – standardna pogreška).

	Broj analiziranih jedinki (N)	Prosječna širina karapaksa, CW ± SE (cm)	Prosječna dužina karapaksa, CL ± SE (cm)	Masa ± SE (g)	Sex (F, M)
Palud	20	9,8 ± 0,2	4,7 ± 0,1	72,1 ± 4,6	10 F, 10 M
Šćuza	20	10,2 ± 0,3	4,9 ± 0,1	78,9 ± 5,8	10 F, 10 M
Ukupno	40	10,0 ± 0,3	4,8 ± 0,1	75,5 ± 5,2	



Slika 28. Komadić ribarske mreže izvađen iz probavila plavog raka.

Analiza želudaca na prisutnost mikroplastike pokazala je relativno nisku razinu kontaminacije. Od 40 analiziranih rakova, osam jedinki imalo je mikroplastiku u probavilu, što čini **20 %** ukupnog uzorka. Iz tih **osam probavila** izdvojeno je ukupno **15 čestica mikroplastike**, odnosno u prosjeku oko dvije čestice po jedinki (Tablica 5).

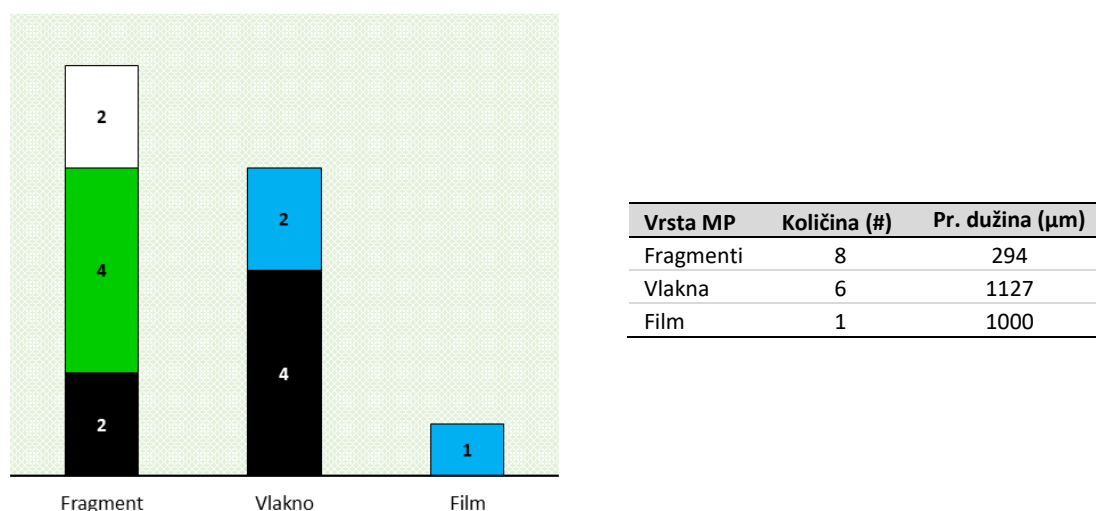
S druge strane, lokacija Šćuza nalazi se u blizini glavne prometnice te je pod potencijalnim utjecajem urbanih izvora onečišćenja, uključujući površinsko otjecanje i moguće ispuste oborinske ili sanitarne kanalizacije u zaljev, što može objasniti povećanu izloženost mikroplastici na toj lokaciji.



	Broj jedinki s mikroplastikom (#)	Postotak jedinki s mikroplastikom (%)	Broj čestica mikroplastike (#)	Broj čestica po jedinki (#MP/jedinka)
Palud	2	10	2	1,0
Šćuza	6	30	13	2,2
Ukupno	8	20	15	1,9

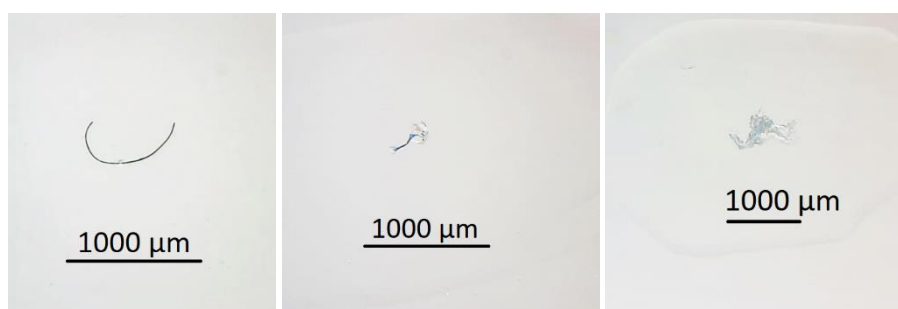
Mikroplastika izdvojena iz plavih rakova većinom je bila u obliku malih fragmenata i vlakana, kao što je prikazano na Slici 31. Kao i kod školjkaša, i kod rakova prevladava crna boja. U rakovima iz Paluda pronađena su samo dva crna vlakna, dok je u rakovima iz Šćuze pronađeno osam fragmenata, četiri vlakna i jedan film.





Slika 31. Vrste i boje čestica mikroplastike izdvojenih iz plavih rakova. Prosječne veličine čestica prikazane su u tablici desno. Mjerena je najduža os, izražena u mikrometrima (μm).

Spektrometrijskom analizom vrsta sintetskog polimera identificirana je za šest čestica mikroplastike, dok je za preostalih devet dobiven spektar loše kvalitete s niskim signal-to-noise omjerom. Unatoč tome, vizualni pregled čestica pod lupom potvrđuje da je riječ o antropogenom materijalu (Slika 32). Tri čestice mikroplastike identificirane su kao polietilen tereftalat ili PET (dva vlakna i jedan fragment), dvije kao polipropilen ili PP (jedan fragment i jedan film), te jedna kao polistiren ili PS (fragment).



Slika 32. Mikroplastika iz plavih rakova pod lupom (uzorci oznake CAL 5, CAL 14 i CAL 19).

U više recentnih studija potvrđena je prisutnost mikroplastike u plavim rakovima, pri čemu razine kontaminacije variraju ovisno o lokaciji i stupnju okolišnog pritiska. Primjerice, u istraživanju na Balearskim otocima mikroplastika je pronađena u 65,8 % jedinki, s prosjekom od oko 1,4 čestice po raku, pri čemu su vlakna dominirala nad fragmentima (Compa et al., 2023). U plavim rakovima iz Mar Menor Lagune u Španjolskoj, Villoria-Calvo et al. (2026) navode znatno višu prosječnu abundanciju ($17,28 \pm 2,90$ čestica po jedinki), s dominacijom fragmenata (87,7 %) te polimera poput PP, PE i PET, dok su Renzi et al. (2020) u laguni Lesina u Italiji zabilježili niže vrijednosti (oko 2,5 čestica po jedinki) uz prisutnost i vlakana i fragmenata, te prostornu raspodjelu čestica između različitih tkiva. U usporedbi s navedenim studijama, naši rezultati pokazuju nižu učestalost kontaminacije (20 % jedinki), ali usporediv broj čestica po kontaminiranoj jedinki (~2 čestice), pri čemu također dominiraju fragmenti nad vlaknima. Ovakav obrazac upućuje na lokalno ograničen, ali prisutan unos mikroplastike, koji je vjerojatno snažno uvjetovan specifičnim izvorima onečišćenja i karakteristikama staništa, što je u skladu s trendovima uočenima u drugim invazivnim populacijama plavog raka.

Plavi rak je epibentalni, oportunistički i generalist predator koji se hrani širokim spektrom bentoskih organizama, uključujući školjkaše, druge rakove, crve, sitne ribe, detritus i biljni materijal, pri čemu njegova prehrana snažno ovisi o dostupnosti plijena i okolišnim uvjetima (Gencer & Aguilar Vitorino, 2023). Zbog takve prehrane

fleksibilnosti zauzima važnu ulogu u bentoskim hranidbenim mrežama, gdje može djelovati i kao predator i kao strvinar, a istovremeno predstavlja plijen za veće ribe i druge više trofičke razine, osobito u juvenilnim stadijima. U invazivnim područjima pokazuje značajan utjecaj na strukturu zajednica plijena, uključujući komercijalno važne školjkaše, što može dovesti do promjena u lokalnim trofičkim odnosima i kompeticiji s autohtonim vrstama (Öndes et al. 2025). S obzirom na njegovu poziciju u hranidbenoj mreži, mikroplastika koja se akumulira u bentosu i planktonu može ulaziti u više trofičke razine kroz prehranu, uključujući i ljudsku konzumaciju, budući da je plavi rak postaje komercijalna i prehrambena vrsta u Mediteranu.

Plavi rakovi koji žive u područjima udaljenim od izravnih antropogenih utjecaja, poput prometnica i ispusta kanalizacije, prema našim rezultatima pokazuju niske razine kontaminacije mikroplastikom. S obzirom na njihovu ulogu kao prehrambene morske vrste, ovo ukazuje da je rizik unosa mikroplastike putem konzumacije u takvim područjima vjerojatno smanjen. Međutim, s obzirom na varijabilnost kontaminacije ovisno o lokaciji, oprez je i dalje opravdan, osobito pri konzumaciji jedinki iz urbanih i potencijalno onečišćenih područja.

Iako se plavi rakovi često predlažu kao potencijalni bioindikator morskog onečišćenja zbog svoje široke rasprostranjenosti i bentoskog načina života, njihova primjenjivost u rutinskom biomonitoringu ima određena ograničenja. Prikupljanje uzoraka je logistički zahtjevno, što može otežati standardizirano i ponovljivo uzorkovanje kroz vrijeme i prostor. Dodatno, složenost tkiva i prisutnost teško razgradivih komponenti u probavnom sustavu otežavaju laboratorijsku obradu. Zbog tih ograničenja, iako mogu pružiti korisne informacije o lokalnoj kontaminaciji, plavi rakovi nisu optimalan bioindikator zagađenja mikroplastikom u usporedbi s filtrirajućim organizmima poput školjkaša, koji omogućuju jednostavnije, standardiziranije i usporedivije monitoring pristupe.

3.3. MIKROPLASTIKA U RIBAMA

Za ispitivanje prisutnosti mikroplastike u probavilima riba odabrane su dvije vrste: **strijelka** i **cipal plutaš**. Strijelka je u Istri vrlo invazivna vrsta te je odabrana upravo da bi se dobio uvid u prisutnost mikroplastike u pelagičkim vršnim predatorima bez potrebe za uklanjanjem autohtonih vrsta iz prirode, unatoč tome što strijelku nije lako uzorkovati. Za razliku od nje, cipal plutaš je autohtona, neinvazivna vrsta česta u plitkim obalnim područjima, koja se hrani bentopelagički. Trofička razina strijelke je 4,5, a cipla plutaša 2,8, što znači da je strijelka pozicionirana znatno više u hranidbenoj mreži i da cipal plutaš može predstavljati njezin potencijalni plijen.

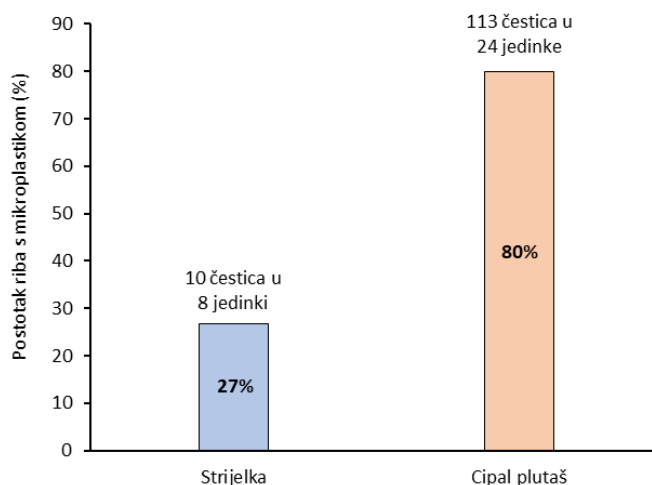
Analizirano je **30 probavila svake vrste** (N = 30), ukupno 60 jedinki. Strijelke su imale prosječnu standardnu dužinu of oko 32 cm, dok je cipal plutaš u prosjeku bio dug oko 13 cm (Tablica 6). Ženske jedinke su prevladavale u obje vrste.

Tablica 6. Broj analiziranih jedinki i biometrijski podaci (SE – standardna pogreška).

	Broj analiziranih jedinki (N)	Prosječna standardna dužina, SL $\pm$ SE (cm)	Prosječna totalna dužina, TL $\pm$ SE (cm)	Masa $\pm$ SE (g)	Sex (F, M, J)
Strijelka	30	32,3 $\pm$ 0,6	41,4 $\pm$ 0,8	72,1 $\pm$ 4,6	20 F, 10 M
Cipal plutaš	30	12,9 $\pm$ 0,2	16,1 $\pm$ 0,3	78,9 $\pm$ 5,8	17 F, 12 M, 1 J
Ukupno	60				

Za izolaciju mikroplastike kemijskom digestijom korištena je **10 %-tna otopina KOH**, a po potrebi i **9 %-tna octena kiselina**, kada je želučani sadržaj sadržavao kalcitne čestice ili fragmente ljuštura. Kod strijelke je digestija često bila potpuna, s vrlo malo nerastopljenog ostatka, te je u tim slučajevima otopina filtrirana kroz filter veličine pora 50 μ m. Međutim, želuci cipala često su sadržavali vrlo raznolik materijal (npr. fragmente stijena, riblje kosti i ljuštore beskralježnjaka) koji se nije uvijek u potpunosti razgradio, zbog čega je korišten i dodatni filter od 250 μ m postavljen iznad filtera od 50 μ m. Time su veće i manje čestice fizički odvojene na dva filtera, što je značajno olakšalo mikroskopsko pregledavanje.

Sveukupno je izdvojeno **123 čestica mikroplastike iz 32 jedinke obje vrste**. U strijelkama je pronađeno znatno manje mikroplastike nego u cipalu plutašu (Slika 33). Od 30 jedinki **strijelke**, njih osam sadržavalo je mikroplastiku (**27 %**), dok je od 30 **cipala plutaša** 24 jedinke imalo mikroplastiku u probavilu (**80 %**) (Tablica 7). U prosjeku, cipli plutaši sadržavali su gotovo pet čestica mikroplastike po pozitivnoj jedinki, dok je kod strijelke taj broj bio nešto viši od jedne čestice po pozitivnoj jedinki.

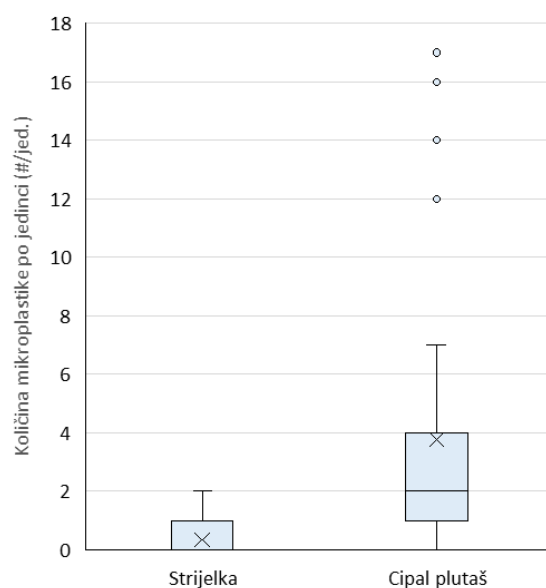


Slika 33. Prisutnost čestica mikroplastike u analiziranim ribama.

Tablica 7. Količina mikroplastike izdvojena iz probavila strijelke i cipala plutaša.

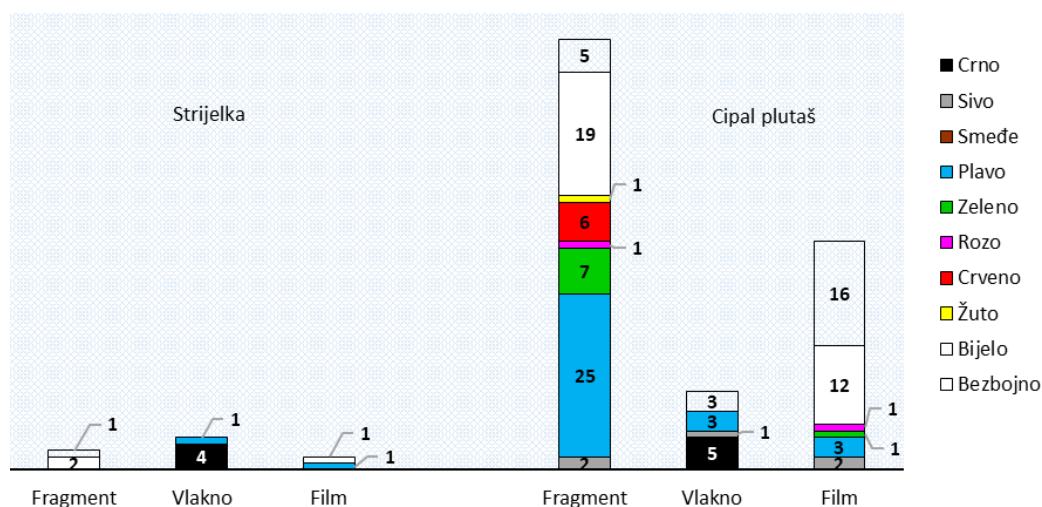
	Broj jedinki s mikroplastikom (#)	Postotak jedinki s mikroplastikom (%)	Broj čestica mikroplastike (#)	Broj čestica po jedinki (#MP/jedinka)
Strijelka	8	27	10	1,3
Cipal plutaš	24	80	113	4,7
Ukupno	32	53	123	3,8

Statistička analiza provedena je u programu **jamovi** korištenjem **jednosmjerne analize varijance** kako bi se usporedila količina mikroplastike između strijelke i cipala plutaša. Rezultati su pokazali **statistički značajnu razliku** između grupa ($p < 0.05$) (Slika 34).



Slika 34. Količina mikroplastike po jedinki.

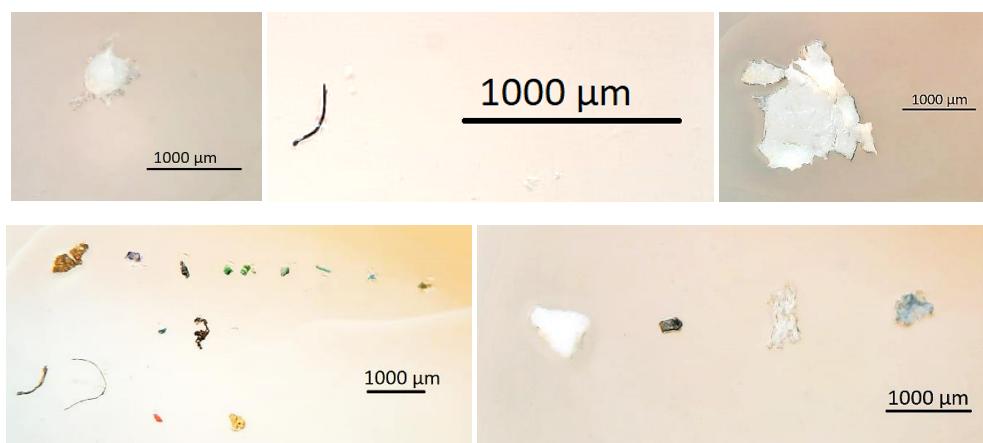
Od izolirane 123 čestice mikroplastike, više od polovice činili su **fragmenti** (Slika 35 i Tablica 8). Kod strijelke su prevladavala vlakna, dok su probavila cipala plutaša prvenstveno sadržavala fragmente i filmove, uz najmanji udio vlakana (slika 35 i 36). Prevladavajuće boje bile su **plava i bijela**.



Slika 35. Vrste i boje čestica mikroplastike izdvojenih iz riba.

Tablica 8. Količine i prosječne veličine čestica. Mjerena je najduža os, izražena u mikrometrima (μm).

Vrsta mikroplastike	Strijelka		Cipal plutaš	
	Količina	Pr. dužina (μm)	Količina	Pr. dužina (μm)
Fragmenti	3	435	66	381
Vlakna	5	1200	12	1250
Film	2	1075	35	999

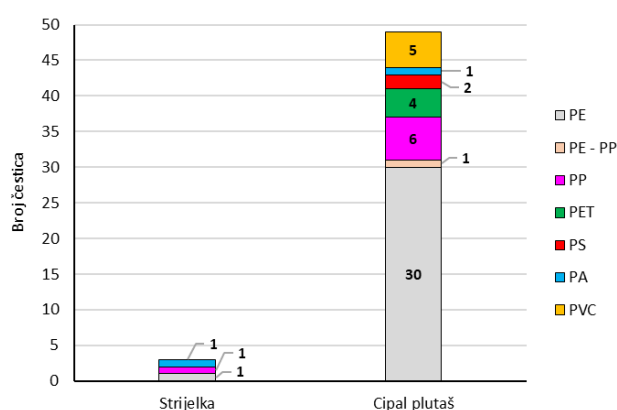


Slika 36. Fragmenti, vlakna i filmovi mikroplastike nađeni u probavilima strijelke (gore) i cipala plutaša (dolje).

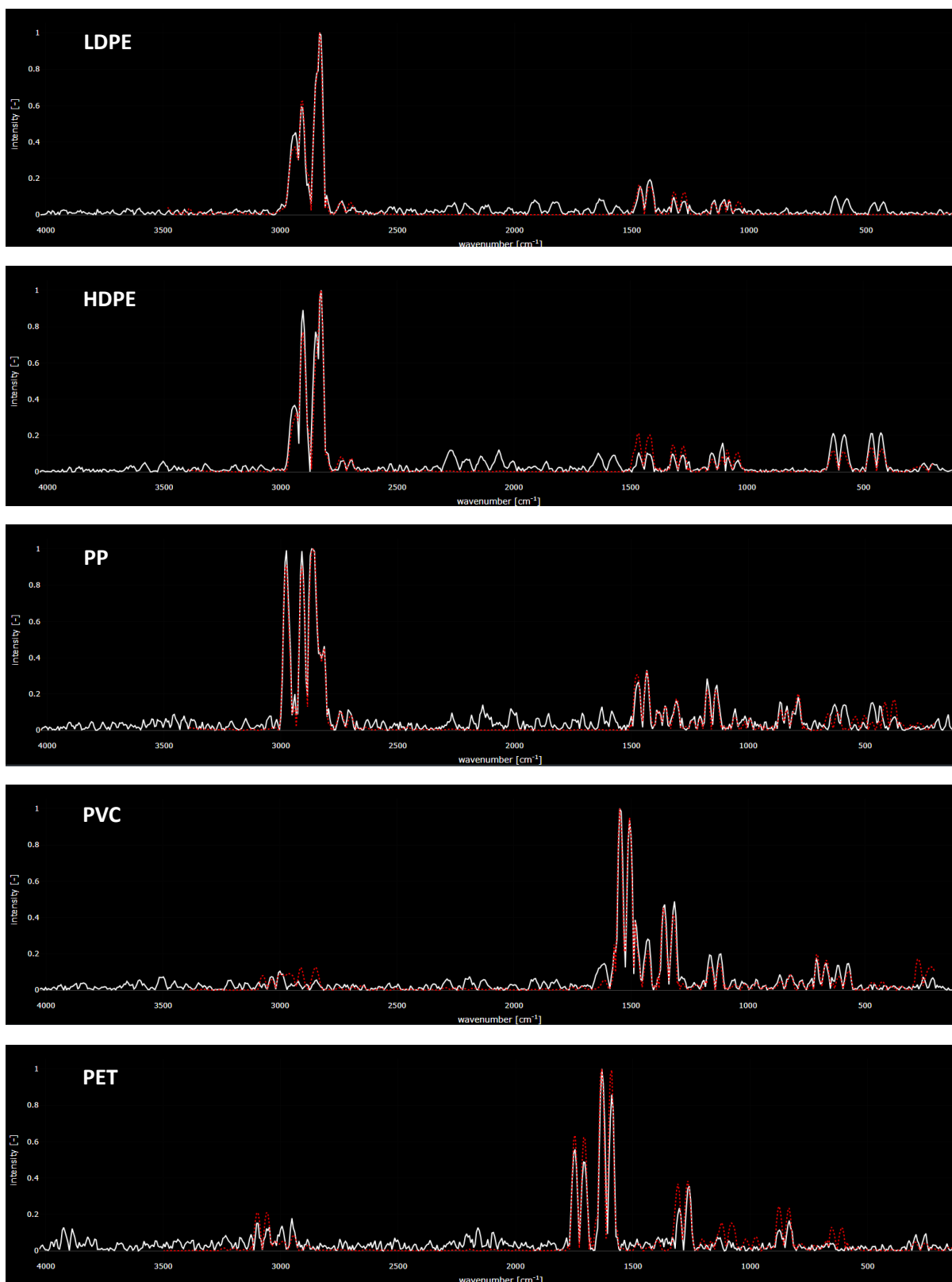
Ramanova analiza izoliranih čestica iz riba bila je znatno uspješnija nego kod školjkaša i plavih rakova. Neuspješna je bila za tri čestice izdvojene iz probavila riba (jedna iz strijelke i dvije iz cipala). Budući da su dobiveni spektri bili niske kvalitete, a vizualnim pregledom pod lupom nije bilo moguće jednoznačno potvrditi da je riječ o plastici, te su čestice isključene iz daljnje analize. Dodatne tri čestice identificirane su kao minerali kalcit (dvije) i rutil (jedna) te su također isključene.

Od preostalih 10 čestica iz strijelke i 113 iz cipala, tip polimera određen je za ukupno 52 čestice (tri iz strijelke i 49 iz cipala). Kod preostalih čestica dobiveni spektri imali su nizak omjer signal/šum, no vizualnim pregledom pod lupom potvrđeno je da se radi o antropogenom sintetskom materijalu, pa su te čestice zabilježene kao „sintetski polimer“. U devet slučajeva identificirani su pigmenti, a ne sam polimer, što je u skladu s navodima Azari et al. (2024), koji ističu da boje i aditivi mogu prekriti spektralne značajke polimera i otežati njegovu identifikaciju. Također, osam čestica izgubljeno je tijekom prijenosa s filtra na mikroskopsko stakalce, iako je prethodno mikroskopski potvrđeno da je riječ o polimerima. Općenito, primijenjen je oprezan pristup, pri čemu su kao mikroplastika klasificirane isključivo čestice za koje je postojala visoka razina sigurnosti.

Za čestice kod kojih je tip sintetskog polimera određen usporedbom sa spektrima iz knjižnice, utvrđeno je da dominiraju PE i PP, koje slijedi PVC i PET (Slika 37 i 38). PE i PP među najčešće su identificiranim polimerima u okolišu, što se pripisuje njihovoj širokoj primjeni u ambalaži, jednokratnim proizvodima, tekstilu i različitim industrijskim aplikacijama, odakle u okoliš dospijevaju putem nepravilnog odlaganja otpada, površinskog otjecanja i degradacije većih plastičnih predmeta.



Slika 37. Vrste sintetskih polimera prisutnih u ispitanim ribama.



Slika 38. Raman spektri čestica izdvojenih iz strijelke i cipla s podudarnošću sa spektralnom knjižnicom > 90 %, od vrha prema dnu: LDPE, HDPE, PP, PVC i PET (bijela linija je naš izmjeren spektar, a crvena linija je spektar iz knjižnice).

Trenutno nema dostupnih istraživanja o prisutnosti mikroplastike u ciplu plutašu, zbog čega je nemoguće izravno usporediti naše rezultate s postojećom literaturom i procijeniti je li ovako visoka stopa ingestije plastike (80 %) tipična za tu vrstu. Što se tiče strijelke, postoji nekolicina istraživanja koja omogućuju kontekstualizaciju dobivenih rezultata. Primjerice, Aytan et al. (2021) bilježe prisutnost mikroplastike u dvije od 17 ispitanih jedinki strijelke (12 %), što je niži udio u odnosu na strijelke iz naše studije (27 %). U radu Fiçıcılar et al. (2021), strijelka pokazuje jednu od viših stopa ingestije, s 67 % jedinki koje su imale mikroplastiku u probavilu. U oba navedena rada, kao i u ovoj studiji, prevladavaju mikrovlakna. Ovakve razlike u učestalosti pojave mikroplastike među studijama mogu se pripisati lokalnim okolišnim uvjetima i različitom stupnju antropogenog pritiska u istraživanim područjima, dok sličnosti u sastavu mikroplastike upućuju na zajedničke izvore onečišćenja u morskim ekosustavima.

Razlika u učestalosti mikroplastike između strijelke i cipla plutaša najvjerojatnije proizlazi iz razlika u načinu hranjenja. Cipli se hrane neselektivnim usisavanjem s morskog dna i površine mora, čime dolaze u izravni kontakt s akumuliranom mikroplastikom i unose veće količine okolišnih čestica, dok su strijelke aktivni, selektivni predatori koji love pokretni plijen u vodenom stupcu te su stoga manje izložene izravnom unosu mikroplastike. Iako cipal plutaš može predstavljati potencijalni plijen strijelke, što otvara mogućnost sekundarne ingestije putem hranidbenog lanca, znatno viša učestalost mikroplastike u ciplu u odnosu na strijelku upućuje na to da dominantni put unosa nije trofički prijenos, već izravna izloženost okolišnim izvorima onečišćenja. Ovakve razlike u načinu hranjenja i korištenju mikrostaništa vjerojatno objašnjavaju niže razine mikroplastike u strijelkama unatoč njihovom višem trofičkom položaju, te također sugeriraju da cipli plutaši vjerojatno nisu bili zastupljeni kao plijen u analiziranim jedinkama strijelke u ovoj studiji.

S obzirom na relativno nisku učestalost i koncentraciju mikroplastike zabilježenu u strijelki u našem istraživanju, ova se vrsta može smatrati prihvatljivijom za konzumaciju. Dodatno, strijelka je invazivna vrsta u mnogim područjima, uključujući i istraživano područje, te njezino uklanjanje iz okoliša može imati pozitivan ekološki učinak kroz smanjenje pritiska na autohtone zajednice. Stoga konzumacija strijelke predstavlja potencijalno koristan pristup koji istovremeno smanjuje izloženost potrošača mikroplastici i doprinosi kontroli invazivne populacije u morskim ekosustavima.

Za potrebe biomonitoringa mikroplastike, cipal plutaš se pokazuje kao prikladniji bioindikatorski organizam u odnosu na strijelku, unatoč većoj tehničkoj zahtjevnosti obrade njegovih probavila. Naime, iako je priprema uzoraka cipla kompleksnija zbog raznolikog i često teško razgradivog sadržaja želuca, ova vrsta pokazuje višu i stabilniju učestalost mikroplastike te time omogućuje osjetljivije detektiranje lokalnih razina onečišćenja. Suprotno tome, strijelka je teže dostupna za uzorkovanje i u ovom istraživanju pokazuje nisku razinu kontaminacije, što ograničava njezinu informativnu vrijednost kao bioindikatora. Ovakav pristup u skladu je s preporukama Valente et al. (2025), koji naglašavaju da izbor bioindikatorskih vrsta treba biti prilagođen lokalnom kontekstu. U tom smislu, cipal plutaš predstavlja bolji indikator stvarne dostupnosti mikroplastike u istraživanom području i pogodniji je za buduće monitoring programe u usporedbi sa strijelkom.

3.4. MAKROPLASTIKA U MORSKIM PTICAMA

Analiza gvalica predstavlja jednu od najčešće korištenih i široko prihvaćenih metoda za proučavanje prehrane vranaca i galebova, budući da omogućuje neinvazivno određivanje sastava plijena i drugih ingestiranih materijala kod morskih ptica (Barrett et al., 2007) (Slika 39). Na terenskom obilasku otočica Levanića na kojem obitavaju vranaci i galebovi, prikupljeno je 45 gvalica, od kojih je nasumično analizirano **10 uzoraka**. Budući da je plastika pronađena u svim analiziranim gvalicama (100 % učestalost), a njena prisutnost je uočena i terenskim pregledom većine preostalih uzoraka, zaključeno je da analizirani uzorci pokazuju visoku razinu konzistentnosti te je N = 10 odabran kao praktičan i dovoljno informativan poduzorak za daljnju detaljnu analizu.



Slika 39. Gvalice vranaca i galebova u posudicama veličine 6 x 6 cm.

Sadržaj gvalica ukazuje da dio uzoraka vjerojatno pripada galebima, dok dio pripada vrancima. Pojedine gvalice sadržavale su raznolik materijal poput koštica masline, fragmenata stijena, kostiju kopnenih životinja, stakla, papira i biljnog materijala, dok su druge sadržavale isključivo riblje ostatke, uključujući kosti i ljuške. Budući da galebovi imaju oportunističku i izrazito generalističku prehranu, često povezanu s antropogenim izvorima hrane, dok se vranaci dominantno hrane ribom, pretpostavili smo da gvalice s isključivo ribljim sadržajem pripadaju vrancima, a one s raznovrsnim sadržajem galebima (Barrett et al., 2007; Vieira et al. 2026; Cosolo et al., 2011).

Ukupna masa analiziranih gvalica iznosila je 46,65 g, dok je masa plastike bila 1,91 g, što je u prosjeku **4,1 %** ukupne mase gvalica (Tablica 9). U nekim gvalicama maseni udio plastike bio je više od **30 %**. Bez obzira na to pripadaju li gvalice vrancima ili galebima, sve su sadržavale plastiku – minimalno 1 komad plastike (gvalica od vranca), a maksimalno 59 (gvalica od galeba). Sveukupno je iz 10 gvalica izdvojeno **274 komada plastike**, odnosno prosječno 27 komada po gvalici.

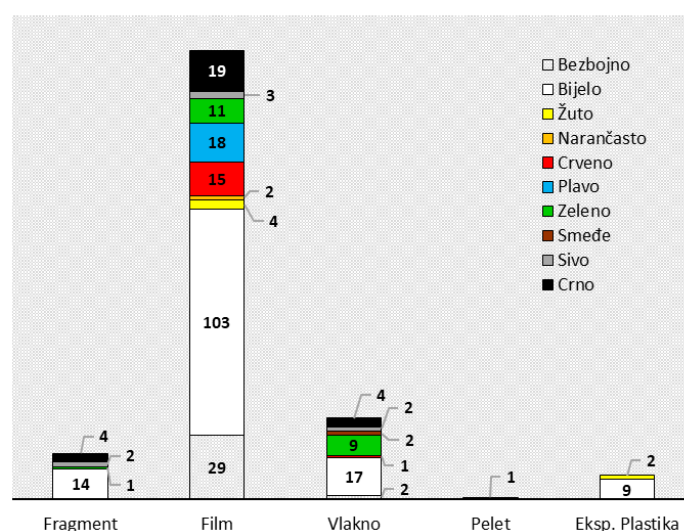
Tablica 9. Podaci o gvalicama i izdvojenoj plastici.

Uzorak	Masa gvalice (g)	Masa plastike (g)	Postotak plastike (%)	Količina plastike (#)
LVNC 3 (galeb)	2,9	0,09	3,1	9
LVNC 6 (vranac)	3,48	0,01	0,3	1
LVNC 13 (galeb)	1,44	0,67	46,5	41
LVNC 17 (galeb)	9,94	0,27	2,7	56
LVNC 24 (vranac)	3,61	0,12	3,3	16
LVNC 29 (galeb)	14,3	0,17	1,2	32
LVNC 30 (galeb)	0,67	0,23	34,3	15
LVNC 36 (galeb)	1,75	0,06	3,4	19
LVNC 39 (galeb)	1,28	0,08	6,3	26
LVNC 45 (galeb)	7,28	0,21	2,9	59
Ukupno (N = 10)	46,65	1,91	4,1	274

Najzastupljenija vrsta plastike u gvalicama bio je plastični film (Tablica 10). Od ukupno 274 komada plastike, 204 su činila film plastika, najčešće u obliku fragmenata tankih plastičnih vrećica različitih veličina. Vlakna su također bila prisutna, često u obliku zapetljanih kuglica, dok su fragmenti, komadići ekspandirane plastike (kao što su, na primjer, stiropor i spužva) i plastični peleti bili rjeđi. Prosječna veličina svih komada plastike iznosila je 1,23 cm, s rasponom od 2 mm do 7 cm. Najzastupljenije boje bile su bijela, crna, zelena, plava i crvena, a bilo je i bezbojne plastike (Slika 40).

Tablica 10. Tipovi plastike izolirane iz gvalica morskih ptica.

Fragment	Film	Vlakno	Plastični pelet	Ekspandirana plastika	Ukupno
21	204	37	1	11	274



Slika 40. Vrsta i boja plastike iz gvalica.

Bez obzira na to što je maseni udio plastike u gvalicama relativno nizak, njezina brojnost (Slika 41 i Slika 42) ukazuje na značajnu učestalost ingestije. Svaki pojedini komad plastike predstavlja neprobavljiv i nekaloričan materijal koji zauzima prostor u probavnom sustavu i može istisnuti nutritivno vrijednu hranu, što u uvjetima visoke učestalosti unosa potencijalno vodi prema energetsom deficitu i smanjenoj kondiciji jedinke.

Kod vranaca i galebova učestalost formiranja i izbacivanja gvalica varira, i ovisi o veličini i vrsti plijena. Russell et al. (1995) utvrdili su da morski vranici izbacuju gvalice u razmacima od 1 do 7 dana, s prosjekom od 3,7 dana odnosno približno 89 sati. Za galebove su u literaturi dostupni podaci o vremenu zadržavanja hrane u probavnom sustavu, a ne o formiranju gvalica. Hilton et al. (1998) navode da se vrijeme zadržavanja hrane kreće između 4 i 7 sati, ovisno o veličini obroka. Također, plijen poput riba i lignji razgrađuje se znatno brže od rakova i drugih organizama s čvrstim oklopom ili ljušturom. Predodžbe radi, ako se uzme prosjek od osam komada plastike po gvalici kod vranca te pretpostavi da vranac izbacuje gvalicu svakih približno 89 sati, proizlazi da u prosjeku proguta jedan komad plastike svakih 11 sati. Kod galebova je unos vjerojatno znatno učestaliji. Ako se uzme prosjek od 32 komada plastike u razdoblju zadržavanja hrane od 4 do 7 sati, to odgovara unosu od približno 5 do 8 komada plastike po satu. Takva stopa upućuje na kontinuiranu i kroničnu izloženost plastici, a ne na izolirane događaje ingestije.

Kako se plastika i druga onečišćivala akumuliraju u okolišu, a prirodni izvori hrane postaju sve ograničeniji, divlje populacije sve će se češće suočavati s korištenjem antropogenih izvora hrane (Nono Almeida et al., 2023). Morske ptice prvi su morski organizmi u kojima je plastika pronađena još krajem 1960-ih (Rothstein, 1973), a do danas je objavljen velik broj znanstvenih radova koji dokumentiraju taj fenomen na globalnoj razini.

Visoke stope ingestije plastike zabilježene su kod galebova i vranaca i drugim studijama. Primjerice, 84 % gvalica australskog pacifičkog galeba (Stewart et al., 2020) te 84 % gvalica galebova iz Francuske (Nono Almeida et al., 2023) sadržavalo je plastiku. Nono Almeida et al. (2023) su iz 143 gvalice izdvojili 284 komada plastike, uglavnom filma, što je usporedivo s našim nalazima, iako na znatno većem uzorku gvalica.



Slika 41. Sadržaj gvalica: Gore - gvalica galeba s 32 komada plastičnih vrećica i 9 vlakana i vlaknastih komada plastike. U donjem redu je prirodni materijal koji se sastoji od papirnatog i biljnog materijala. Dolje - gvalica galeba s 43 komada plastičnih vrećica i 9 vlakana i vlaknastih komada plastike, 3 fragmenta i 1 kuglicom od stiropora. U donjem redu su koštice maslina, kost kopnene životinje i papirnati materijal.



Slika 42. Sadržaj gvalice vranca sa 16 komada plastičnih vrećica i ribljim ostacima.

Maaseide et al. (2024) analizirali su izmet morskih vranaca u Norveškoj i pronašli mikroplastiku u 69 % uzoraka, pri čemu je većina čestica bila manja od 300 μm . Álvarez et al. (2018) su pronašli visok udio mikrovlakana u 63 % gvalica vranaca. Santín & Álvarez (2026) u novijoj studiji ponovno potvrđuju visoku prisutnost mikrovlakana, s ukupno 521 vlaknom u 49 analiziranih gvalica. Međutim, u studijama kao što su Álvarez et al. (2018) i Maaseide et al. (2024) postoji povećan rizik kontaminacije uzoraka vlaknima iz okoliša i tijekom laboratorijske obrade, dok Santín & Álvarez (2026) također navode da nisu provodili proceduralne blank uzorke.

U nekoliko gvalica galebova s Levanića pronađen je i stiropor. Bearzi et al. (2022) opisuju kako galebovi u zapadnom Jadranu povremeno ključaju polistirenske bove koje koriste ribari, pri čemu dolazi do mehaničkih oštećenja. Taj je fenomen uglavnom zabilježen zimi, varira među godinama, a ekonomska šteta za ribarstvo je relativno mala (oko 3–4 eura po bovi), međutim time se stvara dodatna količina mikroplastike koja ulazi u more. Uzrok takvog ponašanja nije jasno objašnjen, a autori naglašavaju potrebu za daljnjim praćenjem zbog mogućih posljedica za ptice i morski okoliš.

Dok se vranici hrane isključivo u moru i pri tome slučajno mogu konzumirati plastiku kao dio plijena, u našoj smo studiji galebove prepoznali kao vektore prijenosa plastike s kopna u morski okoliš. U njihovim su gvalicama pronađeni brojni kopnjeni predmeti poput stakla, tkanine, fragmenata stijena i koštica masline. To upućuje na to da galebovi na obali često pogrešno konzumiraju antropogene materijale, a njihovim izbacivanjem u obliku gvalica unose plastiku i drugi otpad u morski okoliš.

Osim direktne ingestije iz okoliša, plastika može dospjeti u morske ptice i trofičkim putem, konzumacijom kontaminiranog plijena, što je eksperimentalno i terenski potvrđeno u više predatorsko-plijenskih sustava (Farrell & Nelson, 2013; Markić et al., 2018). Međutim, naše analize nisu mogle dokazati postojanje takvog prijenosa, odnosno biomagnifikacije, sa sigurnošću. Primjerice, u jednom sadržaju gvalice morskog vranca nalazilo se 16 komada plastične vrećice, međutim vjerojatnije je da je to rezultat direktne ingestije nego sekundarne.

Pregledom probavila pojedinačnih uginulih jedinki možda se ne bi uvijek detektirala plastika, budući da i vranici i galebovi redovito izbacuju gvalice. Primjerice, Benjaminsen et al. (2024) u jedinkama velikih i morskih vranaca u Norveškoj, koje su bile slučajni ulov u ribarstvu (bycatch – slučajni ulov), nisu pronašli plastiku u probavnom

sustavu. U našoj studiji nismo analizirali žive jedinke, te smatramo da je za rutinski monitoring plastične kontaminacije kod morskih ptica koje izbacuju gvalice dovoljna analiza gvalica. Takav pristup čini monitoring znatno manje vremenski zahtjevnim, a ujedno i troškovno učinkovitijim te praktičnijim za dugoročna istraživanja.

4. ZAKLJUČAK

Rezultati studije *“Prisutnost mikroplastike u hranidbenom lancu i makroplastike u morskim pticama – Projekt WASTEREDUCE”*, pokazuju da je mikro- i makroplastično onečišćenje široko integrirano u morske hranidbene mreže s izraženim razlikama između trofičkih skupina, ali bez jasnog linearnog odnosa između trofičke razine i količine unesene plastike. Najviša razina kontaminacije mikroplastikom zabilježena je u ribama, a najniža u rakovima.

Pacifičke kamenice potvrđuju svoju ulogu osjetljivih bioindikatora, bez obzira na to što u ovom istraživanju ne predstavljaju skupinu s najučestalijim unosom mikroplastike (34 %). Njihova vrijednost kao organizma prikladnog za praćenje plastičnog onečišćenja leži u stabilnoj filtracijskoj izloženosti i sposobnosti integracije lokalnog signala onečišćenja, što ih čini pouzdanim indikatorima prostorne razlike u kontaminaciji, osobito između urbanih i zaštićenih područja.

Plavi rak pokazuje umjerenu, lokalno varijabilnu prisutnost mikroplastike (20 % jedinki) s jasnim utjecajem lokalnog antropogenog pritiska. Rakovi funkcioniraju kao bentoski oportunisti i njihova izloženost mikroplastici proizlazi iz kontakta sa sedimentom i prehrane detritusom i bentoskim organizmima. Budući da su uzorkovanje plavog raka i njegova laboratorijska obrada otežani, ne smatramo ih idealnim organizmom za praćenje stanja okoliša s obzirom na plastično onečišćenje.

Cipal plutaš pokazao je izuzetno visoku učestalost ingestije (80 % jedinki), dok je kod strijelke učestalost bila znatno manja (27 %). Ova razlika jasno upućuje na dominantnu ulogu načina hranjenja u određivanju izloženosti mikroplastici. Cipli, kao bentopelagični i neselektivni hranitelji, kontinuirano unose čestice iz sedimenta i površinskog sloja mora, gdje se mikroplastika akumulira. Strijelka, kao aktivni pelagički predator više trofičke razine, pokazuje nižu učestalost i količinu mikroplastike, što sugerira da porast trofičke razine ne rezultira nužno većom akumulacijom čestica, odnosno biomagnifikacijom. Kao indikator plastičnog onečišćenja u nekom području prikladnijim smatramo cipla plutaša radi neselektivnog načina hranjenja.

Morske ptice pokazuju najekstremniji obrazac akumulacije plastike na makrorazini. Gvalice su sadržavale visoke količine plastičnih čestica, dominantno filmova, što ukazuje na intenzivnu i ponavljaju ingestiju makroplastike. U ovom slučaju dominantan mehanizam unosa nije trofički prijenos nego direktna konzumacija antropogenog otpada, uz dodatnu ulogu ptica kao vektora prijenosa otpada između kopnenih i morskih sustava.

U kontekstu trofičkog prijenosa i biomagnifikacije, naši rezultati ne podržavaju klasičnu biomagnifikaciju mikroplastike kroz hranidbene lance. Umjesto toga, obrazac distribucije čestica ukazuje na to da je izloženost primarno određena ekološkom nišom i načinom hranjenja, dok trofička razina ima sekundarni ili čak ograničen utjecaj. Time se potvrđuje da mikroplastika ne slijedi tipične obrasce biomagnifikacije poput perzistentnih organskih zagađivala, iako ostaje moguć prijenos povezanih kemikalija i aditiva kroz hranidbene mreže.

Za biomonitoring, rezultati jasno ukazuju da su školjkaši filtratori i neke vrste riba, osobito bentopelagične vrste poput cipla plutaša, informativni pokazatelji dostupnosti mikroplastike u obalnim ekosustavima. Nasuprot tome, rakovi imaju ograničenu vrijednost kao bioindikator zbog otežanog uzorkovanja i laboratorijske obrade. Morske ptice, kroz analizu gvalica, predstavljaju osjetljiv indikator makroplastike.

5. REFERENCE

- Aliko, v., Beqiraj, E. G., Qirjo, M., Cani, C., Rama, A., Bego, K., Reka, A. & Faggio, C. (2022). Plastic invasion tolling: First evaluation of microplastics in water and two crab species from the nature reserve lagoony complex of Kune-Vain, Albania. *Science of The Total Environment*, 849: 157799. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157799>
- Aloia, R., Annunziata, L., Di Giacinto, F., De Simone, S., Profico, C., Fanelli, I. Di Francesco, G. et al. (2025). Application of Raman spectroscopy for the analysis of microplastics in food and beverages: a comprehensive review. *Applied Spectroscopy Reviews*, 61:3, 213-247. <https://doi.org/10.1080/05704928.2025.2512771>
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Azari, A., Ronsmans, S., Vanoirbeek, J. A. J., Hoet, P. H. M. & Ghosh, M. (2024). Challenges in Raman spectroscopy of (micro)Plastics: The interfering role of colourants. *Environmental Pollution*, 363(2), 125250. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125250>
- Aytan, U., Esensoy, F.B., Senturk, Y., Arifoğlu, E., Karaoğlu, K., Ceylan, Y. & Valente, A. (2022). Plastic Occurrence in Commercial Fish Species of the Black Sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 22(SI), TRJFAS20504. <http://doi.org/10.4194/TRJFAS20504>
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris. *Philosophical Transactions B*, 364, 1985–1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Barrett, R. T., Camphuysen, K. C. J., Anker-Nilssen, T., Chardine, J. W., Furness, R. W., Garthe, S., Hüppop, O. et al. (2007). Diet studies of seabirds: A review and recommendations. *ICES Journal of Marine Science*, 64(9), 1675–1691. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm152>
- Bearzi, G., Bonizzoni, S., Fanesi, F., Tenan, S. & Battisti, C. (2022). Seabirds pecking polystyrene items in offshore Adriatic Sea waters. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 8338–8346. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24290-0>
- Benjaminsen, S. C., Dehnhard, N., Herzke, D., Johnsen, A., Anker-Nilssen, T., Bourgeon, S., Collard, F. et al. (2024). The challenges of opportunistic sampling when comparing prevalence of plastics in diving seabirds: A multi-species example from Norway. *Marine Pollution Bulletin*, 199, 116037. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116037>
- Bernardini, I., Tallec, K., Paul-Pont, I., Peruzza, L., Dalla Rovere, G., Huber, M., Di Poi, C. et al. (2024). Effects of tire particles and associated-chemicals on the Pacific oyster (*Magallana gigas*) physiology, reproduction and next-generation. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 135742. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135742>
- Botterell, Z. L. R., Beaumont, N., Dorrington, T., Steinke, M., Thompson, R. C., & Lindeque, P. K. (2019). Bioavailability and effects of microplastics on marine zooplankton: A review. *Environmental Pollution*, 245, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.065>
- Bucci, K., Tulio, M., Rochman, C. M. (2020). What is known and unknown about the effects of plastic pollution: A meta-analysis and systematic review. *Ecological Applications*, 30(2), e02044. <https://doi.org/10.1002/eap.2044>
- Carpenter, E. J., & Smith, K. L. (1972). Polystyrene spherules in coastal waters. *Science*, 178(4062), 749–750. <https://doi.org/10.1126/science.178.4062.749>
- Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., et al. (2013). Microplastic ingestion by zooplankton. *Environmental Science & Technology*, 47(12), 6646–6655. <https://doi.org/10.1021/es400663f>
- Compa, M., Perelló, E., Box, A., Colomar, V., Pinya, S. & Sureda, A. (2023). Ingestion of microplastics and microfibers by the invasive blue crab *Callinectes sapidus* (Rathbun 1896) in the Balearic Islands, Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, 30:119329–119342. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30333-x>

- Cosolo, M., Privileggi, N., Cimador B. & Sponza, S. (2011). Dietary changes of Mediterranean Shags *Phalacrocorax aristotelis desmarestii* between the breeding and post-breeding seasons in the upper Adriatic Sea. *Bird Study*, 58:4, 461-472. <https://doi.org/10.1080/00063657.2011.603290>
- Cowger, W., Karapetrova, A., Lincoln, C., Chamas, A., Sherrod, H., Leong, N., Lasdin et al. (2025). "Open Specy 1.0: Automated (Hyper)spectroscopy for Microplastics." *Analytical Chemistry*. 97(32). doi: 10.1021/acs.analchem.5c00962. <https://www.openanalysis.org/openspecy/>
- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. F., Juanes, F. & Dudas, S. E. (2019). Human consumption of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7068–7074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
- Danopoulos, E., Twiddy, M., West, R. & Rotchell, J. M. (2022). A rapid review and meta-regression analyses of the toxicological impacts of microplastic exposure in human cells. *Journal of Hazardous Materials*, 427, 127861. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127861>
- Diepens, N. J., & Koelmans, A. A. (2018). Accumulation of Plastic Debris and Associated Contaminants in Aquatic Food Webs. *Environmental Science & Technology*, 52(15), 8510–8520. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02515>
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C. & Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104(1-2): 290-293. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>
- Farrell, P., & Nelson, K. (2013). Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). *Environmental Pollution*, 177, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.046>
- Fendall, L. S., & Sewell, M. A. (2009). Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. *Marine Pollution Bulletin*, 58(8), 1225–1228. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.025>
- Fıçıcılar, B. B., Aydın, M. & Korkmaz, K. (2025). Microplastic contamination in commercial fish from the Central Black Sea. *Journal of Ecological Engineering*, 2025, 26(8), 108–119. <https://doi.org/10.12911/22998993/203812>
- Foscari, A., Herzke, D., Mowafi, D., Seiwert, B., De Witte, B., Delbare, D., Heras, G. B. et al. (2025). Uptake of chemicals from tire wear particles into aquatic organisms - search for biomarkers of exposure in blue mussels (*Mytilus edulis*). *Marine Pollution Bulletin*, 219, 118311. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118311>
- Galloway, T. S., Cole, M., & Lewis, C. (2017). Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nature Ecology & Evolution*, 1, 0116. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>
- Gencer, O. & Aguilar Vitorino, H. (2023). Effect of Diet on Growth Performance of First Crab Stage *Callinectes sapidus* Rathbun, 1896 (Brachyura: Portunidae): A Comparison of Three Different Regimens. *Animals*, 13, 1242. <https://doi.org/10.3390/ani13071242>
- GESAMP (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: A global assessment. (Kershaw, P. J., Ed.). IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. <https://www.gesamp.org/publications/reports-and-studies-no-90>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gomiero, A., Strafella, P., Birger Øysæd, K. & Fabi, G. (2019). First occurrence and composition assessment of microplastics in native mussels collected from coastal and offshore areas of the northern and central Adriatic Sea. *Environmental Science and Pollution Research*, 26:24407–24416. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05693-y>
- Hilton, G. M., Houston, D. C. & Furness, R. W. (1998). Which components of diet quality affect retention time of digesta in seabirds? *Functional Ecology*, 12, 929–939. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1998.00267>
- Iveša, N., Turković, D., Jelenović, R., Zanchi, E., Markić, A., Buršić, M., Pustijanac, E., Kovačić, I., Burić, P. & Paliaga, P. (2024). Prevalence of Fibers as the Dominant Microplastic Fraction in the Digestive Tract of Three Commercially Important Fish

- Species (*Sparus aurata* Linnaeus 1758, *Pagellus erythrinus* Linnaeus 1758 and *Chelon auratus* Risso, 1810) from the Southeastern Coast of Istria, Northern Adriatic, Croatia. *Naše more*, 71(3), 36–143. <https://doi.org/10.17818/NM/2024/3.6>
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., et al. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Jenner, L. C., Rotchell, J. M., Bennett, R. T., Cowen, M., Tentzeris, V., & Sadofsky, L. R. (2022). Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Science of the Total Environment*, 831, 154907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154907>
- Kargar, M., Hamidian, A. H. & Basaran, B. (2025). A review on microplastics in bivalves: analysis, quantification, and effects. *Environmental Monitoring and Assessment*, 198 (70). <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14931-5>
- Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A. & Janssen, C. R. (2016). Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies. *Environmental Science and Technology*, 50(7), 3315–3326. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06069>
- Konings, M. C., Zada, L., Schmidt, R. W. & Ariesse, F. (2024). Optimization of sample preparation, fluorescence- and Raman techniques for environmental microplastics. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 319: 124537. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124537>
- Kovačić, I., Štefanko, K., Špada, V., Pustijanac, E., Buršić, M., & Burić, P. (2024). Microplastics in Mediterranean Mussel *Mytilus galloprovincialis*: Comparison between Cultured and WildType Mussels from the Northern Adriatic. *Applied Sciences*, 14(5), 2056. <https://doi.org/10.3390/app14052056>
- Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>
- Li, J., Green, C., Reynolds, A., Shi, H., & Rotchell, J. M. (2018). Microplastics in mussels sampled from coastal waters and supermarkets in the United Kingdom. *Environmental Pollution*, 214, 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.038>
- Liu, Y., Shi, H., Chen, L., Teng, X., Xue, C. & Li, Z. (2023). An overview of microplastics in oysters: Analysis, hazards, and depuration. *Food Chemistry*, 422, 136153. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136153>
- Ma, C., Chen, Q., Li, J., Li, B., Liang, W., Su, L., & Shi, H. (2021). Distribution and translocation of micro- and nanoplastics in fish. *Critical Reviews in Toxicology*, 51(9), 740–753. <https://doi.org/10.1080/10408444.2021.2024495>
- Maaseide, B. M. T., Ofstad, J., Erbe, A., Jaspers, V. L. B., Monclús, L. & Dehnhard, N. Microplastics in faeces of European shags *Gulosus aristotelis* in central Norway. *Marine Pollution Bulletin*, 208, 117026. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117026>
- Markic, A., Niemand, C., Bridson, J. H., Mazouni-Gaertner, N., Gaertner, J.-C., Eriksen, M., & Bowen, M. (2018). Double trouble in the South Pacific subtropical gyre: Increased plastic ingestion by fish in the oceanic accumulation zone. *Marine Pollution Bulletin*, 136, 547–564. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.031>
- Mattsson, K., Johnson, E. V., Malmendal, A., Linse, S., Hansson, L.-A., Cedervall, T. (2017). Brain damage and behavioural disorders in fish induced by plastic nanoparticles delivered through the food chain. *Scientific Reports*, 7, 11452. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10813-0>
- Mercogliano, R., Avio, C. G., Regoli, F., Anastasio, A., Colavita, G., & Santonicola, S. (2020). Occurrence of microplastics in commercial seafood under the perspective of the human food chain: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(19), 5296–5301. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01209>
- Michelangeli, M. E., Brooks, S., Kuehr, S., Forsman, E., Rødland, E. S., Brandsma, S. H., Margalef, M. et al. (2026). Tyre-derived ecotoxicity: Differentiating the effects from particles and chemical leachates on the blue mussel *Mytilus edulis*. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 8, 934–951. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2026.01.003>

Ministarstvo poljoprivrede Republike Hrvatske (2025, 31. listopada). Porast broja pozitivnih divljih ptica na visokopatogenu influencu ptica (VPIP) podtipa H5N1. <https://poljoprivreda.gov.hr/vijesti/porast-broja-pozitivnih-divljih-ptica-na-visokopatogenu-influncu-ptica-vpip-podtipa-h5n1/7971>

Mishra, S., charan Rath, C. & Das, A. P. (2019). Marine microfiber pollution: A review on present status and future challenges. *Marine Pollution Bulletin*, 140: 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.039>

Mistri, M., Sfriso, A. A., Casoni, E., Nicoli, M., Vaccaro, C. & Munari, C. (2022). Microplastic accumulation in commercial fish from the Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 174, 113279. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113279>

Nava, V., Frezzotti, M. L. & Leoni, B. (2021). Raman Spectroscopy for the Analysis of Microplastics in Aquatic Systems. *Applied Spectroscopy*, 75(11) 1341 –1357. <https://doi.org/10.1177/00037028211043>

Nono Almeida, F. N., Leray, C., Boutry, J., ter Halle, A., Vittecoq, M., Provencher, J. & McCoy, K. (2023). Changes in plastic ingestion by yellow-legged gulls (*Larus michahellis*) over the breeding season. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 187, pp.114483. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114483>

Öndes, F., Estesó, I., Guijarro-García, E., Barcala, E., Giménez-Casaldueiro, F., Ramos-Esplá, A. A. & Barberá, C. (2025). Feeding Habits of the Invasive Atlantic Blue Crab *Callinectes sapidus* in Different Habitats of the SE Iberian Peninsula, Spain (Western Mediterranean). *Water*, 17, 1615. <https://doi.org/10.3390/w17111615>

Pizzurro, F., Nerone, E., Di Domenico, M., Ancora, M., Mincarelli, L. F., Salini, R., Di Renzo, L. et al. (2025). Realistic Environmental Exposure of Microplastics in European Flat Oyster, *Ostrea edulis*: Evaluation of Accumulation and Depuration Under Controlled Conditions and Molecular Assessment of a Set of Reference Genes. *Water*, 17(7), 1063. <https://doi.org/10.3390/w17071063>

Prüst, M., Meijer, J., & Westerink, R. H. S. (2020). The plastic brain: Neurotoxicity of micro- and nanoplastics. *Particle and Fibre Toxicology*, 17, 24. <https://doi.org/10.1186/s12989-020-00358-y>

Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, et al. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

Renzi, M., Cilenti, L., Scirocco, T., Grazioli, E., Anselmi, S., Broccoli, A., Pauna, V. et al. (2020). Litter in alien species of possible commercial interest: The blue crab (*Callinectes sapidus* Rathbun, 1896) as case study. *Marine Pollution Bulletin*, 157, 111300. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111300>

Rochman, C. M., Hoh, E., Kurobe, T., & Teh, S. J. (2013). Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports*, 3, 3263. <https://doi.org/10.1038/srep03263>

Rothstein, S. I. (1973). Plastic particle pollution of the surface of the Atlantic Ocean: Evidence from a seabird. *The Condor*, 75:344-366.

Russell, A. F., Wanless, S. & Harris, M. P. (1995). Factors affecting the production of pellets by Shags *Phalacrocorax aristotelis*. *SEABIRD*, 17: 44-49.

Santana, M. F. M., Moreira, F. T., & Turra, A. (2017). Trophic transference of microplastics under a low exposure scenario: Insights on the likelihood of particle cascading along marine food-webs. *Marine Pollution Bulletin*, 121(1–2), 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.05.061>

Santín, N. & Alvarez, D. (2026). Plastic ingestion in European shags (*Gulosus aristotelis*): Temporal patterns and possible trophic transfer via Labridae prey in northern Spain. *Marine Pollution Bulletin*, 229, 119772. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119772>

Savino, I., Nobahar, A., Da Silva, J. P., Cotugno, P., Notariale, R., Corriero, G., Uricchio, V. F. et al. (2025). New insights into car tire rubber particle toxicity: chemical composition and ecotoxicity assessment of leachate on gamete quality of the Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Environment International*, 202, 109587. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109587>

- Savoca, S., Matanović, K., D'Angelo, G., Vetri, V., Anselmo, S., Bottari, T., Mancuso, M. et al. (2021). Ingestion of plastic and non-plastic microfibers by farmed gilthead sea bream (*Sparus aurata*) and common carp (*Cyprinus carpio*) at different life stages. *Science of The Total Environment*, 782, 146851. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146851>
- Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V., & Lehtiniemi, M. (2014). Ingestion and transfer of microplastics in planktonic food webs. *Environmental Pollution*, 185, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.013>
- Stewart, L.G., Lavers, J.L., Grant, M.L., Puskic, P.S. & Bond, A.L. (2020). Seasonal ingestion of anthropogenic debris in an urban population of gulls. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111549. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111549>
- Sussarellu, R., Suquet, M., Thomas, Y., et al. (2016). Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics. *PNAS*, 113(9), 2430–2435. <https://doi.org/10.1073/pnas.1519019113>
- Tang, K. H. D. (2026). Tracing Microplastic Pollution Through Animals: A Narrative Review of Bioindicator Approaches. *Applied Sciences*, 16(3), 1413. <https://doi.org/10.3390/app16031413>
- Terzi, Y., Gündoğdu, S., Tekman, M. B., Gedik, K., Ustaoglu, D., Ismail, N. P., Altinpinar, İ., Öztürk, R. Ç., & Aydın, İ. (2024). How much do we know about the microplastic distribution in the Mediterranean Sea: A comprehensive review. *Marine Pollution Bulletin*, 208, 117049. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117049>
- Teuten, E. L., Saquing, J. M., Knappe, D. R. U., et al. (2009). Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philosophical Transactions B*, 364 (1526), 2027–2045. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0284>
- Thomsen, E. S., Almeda, R. & Nielsen, T. G. (2024). Tire particles and their leachates reduce the filtration rate of the mussel *Mytilus edulis*. *Marine Environmental Research*, 95, 106348. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106348>
- Umurhan, Y., Songsart-Power, M., Limbu, T. B. & Phan, T. (2025). Applications of Raman spectroscopy for microplastic detection and characterization: a comprehensive spectral reference. *Environmental Science and Pollution Research*, 32:28630–28677. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-37224-3>
- UNEP (2018). Single-use plastics: A roadmap for sustainability. United Nations Environment Programme, Nairobi. <https://www.unep.org/resources/report/single-use-plastics-roadmap-sustainability>
- UNEP/MAP (2020). State of the Environment and Development in the Mediterranean. Nairobi: United Nations Environment Programme / Mediterranean Action Plan.
- Valente, T., Costantini, M. L., Ventura, D., Careddu, G., Ciaralli, L., Monfardini, E., Tomassetti, P., Piermarini, R., Silvestri, C. & Matidd, M. (2025). Hit the target: A new experimental method to select bioindicators of microplastic ingestion by marine fish. *Environmental Research*, 269, 120940. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.120940>
- Van Cauwenberghe, L., & Janssen, C. R. (2014). Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environmental Pollution*, 193, 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.010>
- Vianello, A., Jensen, R. L., Liu, L., & Vollertsen, J. (2019). Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin. *Scientific Reports*, 9, 8670. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45054-w>
- Vieira, B., Gonçalves, D. & Oliveira, N. (2026). Diet and breeding productivity in European Shag (*Gulosus aristotelis*): insights from two Portuguese colonies. *bioRxiv*, 715095. <https://doi.org/10.64898/2026.03.29.715095>
- Villoria-Calvo, S., Blanco-Heras, G., Gago, J., Filgueiras, A. V., Martínez-Gómez, C. & Viñas, L. (2026). Atlantic blue crab (*Callinectes sapidus* Rathbun, 1896): microplastic pollution indicator in invaded Mediterranean coastal ecosystems. *Regional Studies in Marine Science*, 97, 105015. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2026.105015>
- Wang, Y., Xu, J. Zhao, Y., Pan, Y., Zhang, Z., Liu, S., Chen, X. et al. (2025). Tire wear particles in the marine environment: sources, migration, ecological risk and control strategy. *Front. Mar. Sci.*, 12 – 2025. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1668826>
- WHO (2019). Microplastics in drinking-water. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516198>

Wootton, N., Reis-Santos, P., Przeslawski, R., Adyel, T. M., Blewitt, M., Clarke, B., Crutchett, T., et al. (2025). A field and laboratory manual for sampling, processing and reporting microplastics in coastal and marine environments. *Frontiers in Marine Science*, 12:1674412. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1674412>

Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: A micro issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634–6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>

Zapata-Restrepo, L. M., Bawden, K., Sidaoui-Haddad, G., Spencer, E., Williams, I. D. & Hudson, M. (2025). Microplastics in the European native oyster, *Ostrea edulis*, to monitoring pollution-related patterns in the Solent region (United Kingdom). *Environmental Monitoring Assessment* (2025) 197:544. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-13975-x>

Napomena:

Ilustracije *Callinectes sapidus*, *Magallana gigas* i *Pomatomus saltatrix* generirane od strane ChatGPT, a *Oedalechilus labeo* je preuzet sa stranice Colapisci.it <https://www.colapisci.it/pescitalia/pisces/Mugiliformes/Mugilidi/CefaloLabbrone.htm>

Morske mjene preuzete sa sljedeće stranice: <https://www.adip.hr/servisi.html>

Satelitske snimke lokacija uzorkovanja preuzete s aplikacije Google Earth.