

PREGLEDNI RAD

# Stanje onečišćenja morskih školjkaša mikroplastikom

Bogdanović Tanja<sup>1\*</sup>, Sandra Petričević<sup>1</sup>, Zvonimir Jažo<sup>1</sup>, Irena Listeš<sup>1</sup>, Eddy Listeš<sup>1</sup>, Darja Sokolić<sup>2</sup>, Jelka Pleadin<sup>3</sup>, Kristina Kvirgić<sup>4</sup>

## Sažetak

Praćenjem stanja okoliša putem mjerenja sadržaja različitih onečišćujućih tvari (kontaminanata) u školjkašima ujedno se mogu pratiti biološke promjene i štetni učinci onečišćujućih tvari kojima su ti organizmi izloženi te se može procijeniti utjecaj ljudskih aktivnosti na određeni ekosustav. Akumulacija različitih onečišćujućih tvari u školjkašima namijenjenim za prehranu je stalna opasnost za ljude, kao potrošače na vrhu hranidbenog lanca. Mikroplastika je složeni kontaminant, koji uključuje vrlo širok skup čestica koje u procjeni rizika zbog njihove iznimne raznolikosti (veličina, oblik, topljivost, sastav polimera, adsorbirane kemikalije, biološki materijal, itd.) predstavljaju jedinstveni izazov. Glavni razlog opasnosti konzumacije školjkaša leži u biologiji njihovog organizma budući se oni hrane filtriranjem vode ili mora u kojem se uzgajaju ili prirodno žive, nakupljajući u svom organizmu različite tvari iz okoline. U razumijevanju kemijskog rizika mikroplastike koristi se model profila polimera, odnosno toksičnosti njihovih monomera. Nesumnjivo, analiza mikroplastike uključuje uz kemijsku karakterizaciju i određivanje ukupnog broja čestica kako bi se procijenila izloženost ljudi mikroplastici temeljem podataka o prehrambenim navikama ciljane populacije. U ovom radu dan je pregled literaturnih spoznaja o istraživanjima mikroplastike u dvolužturnim mekušcima, kemijskoj karakterizaciji mikroplastike i pojavnosti u različitim vrstama školjkaša.

**Ključne riječi:** mikroplastika, morski školjkaši, onečišćenje, kemijski rizik mikroplastike

## Uvod

Praćenjem stanja okoliša putem mjerenja sadržaja različitih onečišćujućih tvari (kontaminanata) u školjkašima ujedno se mogu pratiti biološke promjene i štetni učinci onečišćujućih tvari kojima su ti organizmi izloženi, te se može procijeniti utjecaj ljudskih aktivnosti na određeni ekosustav. Zbog specifičnog načina hranidbe, u školjkašima

namijenjenim za prehranu, moguća je kumulacija mikrobioloških (Džafić i sur., 2021.) i kemijskih kontaminanata poput toksičnih metala (živa, kadmij i olovo) (Hillwalker i sur., 2006.), prirodnih kemijskih spojeva kao što su morski biotoksi- ni (Bogdanović i sur., 2022., Kvirgić i sur., 2021.), ali i postojanih organskih onečišćujućih tvari (POPs),

<sup>1</sup> Dr. sc. Tanja Bogdanović, viša znanstvena suradnica; dr. sc. Sandra Petričević, znanstvena suradnica; Zvonimir Jažo, stručni suradnik; dr. sc. Irena Listeš, znanstvena suradnica; dr. sc. Eddy Listeš, znanstveni savjetnik u trajnom zvanju; Hrvatski veterinarski institut, Veterinarski zavod Split, Poljička cesta 33, Split, Hrvatska

<sup>2</sup> Doc. dr. sc. Darja Sokolić; Fakultet za turizam i ruralni razvoj, Vukovarska ulica 17, Požega, Hrvatska

<sup>3</sup> Prof. dr. sc. Jelka Pleadin, dipl. ing. biotehnol., znanstvena savjetnica u trajnom zvanju, redovita profesorica; Hrvatski veterinarski institut, Zagreb, Hrvatska

<sup>4</sup> Dr. sc. Kristina Kvirgić, stručna suradnica; Hrvatski veterinarski institut, Veterinarski zavod Rijeka, Podmurvice 29, Rijeka, Hrvatska  
\*autor za korespondenciju: t.bogdanovic.vzs@veinst.hr

što predstavlja neposrednu opasnost za ljude, kao potrošače na vrhu hranidbenog lanca (Hillwalker i sur., 2006.).

Zagađenje morskih sustava plastikom je globalni problem koji je sve izraženiji. Plastika je zbog svoje izdržljivosti i plovnosti prisutna u svim morima i oceanima, a plastični otpad predstavlja opasnost budući se pod utjecajem vremenskih uvjeta i sunca ne razgrađuje već se raspada na manje dijelove i širi u okoliš, dok u sebi sadrži razne toksične spojeve koji imaju štetan utjecaj na organizme (Rochman i sur., 2013.). Kontaminacija okoliša cijelom plastikom ili njezinim komadima (mikroplastika, MP) uvrštena je u geološke indikatore antropocena (doba čovjeka) ukazujući na sveprisutnost otpada ovog umjetnog materijala u atmosferskom, kopnenom i vodenom okolišu. Mikroplastika kao sveopći zagađivač okoliša predstavlja globalni problem zbog interakcije sa živim svijetom i potencijalnog rizika po zdravlje životinja, okoliša i ljudi. Nadalje, meso školjkaša uobičajeno se konzumira bez ikakve vrste evisceracije. Iz tog je razloga Europska agencija za sigurnost hrane označila školjkaše kao hranu s vjerojatnim profilom rizika od MP koji je potrebno dodatno proučiti (EFSA, 2016.).

Procjena izloženosti početni je korak u procjeni stupnja potencijalnog zdravstvenog rizika koji predstavlja MP, a količina unosa u organizam ovisi o kombinaciji vrlo promjenjivih parametara, ne samo karakteristikama, nego i o starosti, tjelesnoj težini, demografiji, kulturnom nasljeđu, geografskom položaju, prirodi razvoja okoline svakog pojedinca, okruženju i načinu života (Senathirajah i sur., 2021.). Akumulacija polimera MP u školjkašima predstavlja rizik za potrošače, te su stoga ispitivanja pojavnosti i kumulacije u ovim organizmima, kao i izloženosti potrošača, neophodne za karakterizaciju rizika koji predstavljaju. U ovom radu dan je pregled literaturnih spoznaja o istraživanjima mikroplastike u dvoljuštornim mekušcima, kemijskoj karakterizaciji mikroplastike i pojavnosti u različitim vrstama školjkaša.

### **Istraživanja pojavnosti kontaminanata u dvoljuštornim mekušcima -mikroplastika kao kontaminant**

Istraživanja pojavnosti kontaminanata u školjkašima datiraju od 1974. sa dagnjama *Mytilus californianus* kao bioindikatorskom vrstom u određivanju kloriranih ugljikovodika u Južnokaliifornijskom zaljevu (Young i sur., 1976.). Od tada

su morski školjkaši najučestalije bioindikatorske vrste morskog okoliša (Ding i sur., 2021.; Ward i sur., 2019.), slijedom široke rasprostranjenosti, slabe pokretljivosti, uspijevaju u različitim okolišnim uvjetima, lako su dostupni i imaju sposobnost nakupljanja kontaminanata tijekom relativno dugog životnog vijeka (Beyer i sur., 2017.). Osim toga, dagnje se globalno konzumiraju i stoga su korisne za procjenu rizika kao izvora hrane povezanog s onečišćenjem morske vode. Vrste *Chlamys farreri*, *Mytilus galloprovincialis*, kamenica *Crassostrea gigas*, te školjkaš *Ruditapes philippinarum* koriste se u istraživanju pojavnosti mikroplastike (Ding i sur., 2021.), *Donax trunculus* se koristi kao indikator kemijskih elemenata i mikrobiološkog onečišćenja (Bogdanović i sur., 2014.; Chahouri i sur., 2022., 2023.; Lamine i sur., 2023.), *Ruditapes philippinarum* i dagnja *M. galloprovincialis* za proučavanje utjecaja ekstremnih vremenskih prilika na antioksidativne obrambene mehanizme (De Marchi i sur., 2022.) te *M. galloprovincialis* za procjenu učinaka antimikrobnih spojeva (Louros i sur., 2022.). Ove su vrste aktivne filtratorne vrste plitkih obalnih voda, što dovodi do njihove izloženosti velikim količinama suspendirane tvari, uključujući niz onečišćujućih tvari iz kopnenih izvora (Cho i sur., 2019.; Newell, 2004.), što ih čini povoljnijim koncentradorima zagađivala slijedom bioakumulacije u odnosu na okoliš (Wang i sur., 2021.). Školjkaši su otporni na promjenjive uvjete okoline i omogućuju utvrđivanje negativnih utjecaja prije nego što isti postanu nevidljivi (Helmholz i sur., 2016.). Ti se učinci očituju u fiziološkim procesima, ponašanju i smrtnosti školjkaša, te poremećaju hranidbene mreže, ekosustava i ljudi (Kim i sur., 2019.).

Slijedom globalnog gospodarskog rasta posljednjih desetljeća, dolazi do sve većeg pritiska na vodene ekosustave, što izaziva veliku zabrinutost u cijelom svijetu. Onečišćenje mora i neodrživa uporaba morskih resursa narušavaju strukturu i funkcije mnogih vodenih staništa, što dovodi do njihove neravnoteže i narušene flore i faune (Österblom i sur., 2017.; Rocha i Pinkerton, 2015.; Selim i sur., 2016.). Nakon stvaranja u morskom okolišu, zagađivači iz različitih izvora nošeni oceanskim strujama prelaze velike razdaljine i često dolazi do njihovog gomilanja i nakupljanja prije zakonske zabrane, što upravljanje onečišćenjem okoliša čini vrlo zahtjevnim i kontinuiranim izazovom (Lepom i sur., 2009.).

U promicanju istraživanja statusa ekosustava

kojeg karakteriziraju komplementarnost i integracija primjenjuju se dva pristupa, tzv. kemijski pristup istraživanja (putem fizikalno-kemijskih parametara) i biološki pristup (biokemijski, fiziološki, molekularni, stanični). Prvi se temelji na kvalitativnoj odnosno kvantitativnoj procjeni onečišćujućih tvari u okolišu, dok se drugi temelji na procjeni utjecaja onečišćujućih tvari u živim organizmima svih trofičkih razina ekosustava (Depledge i sur., 1993.).

Mikroplastika pripada kategoriji kontaminanata s rizikom u nastajanju (Bogdanović i sur., 2025.). Kontaminante s rizikom u nastajanju čine skupovi molekula i metabolita čija prisutnost u okolišu najčešće nije prethodno uočena i čije su proučavanje i praćenje relativno novi, primjerice sintetičke ili prirodne kemikalije, moguće i mikroorganizmi koji se uobičajeno ne prate u okolišu te nisu obuhvaćeni postojećim propisima o sigurnosti i kvaliteti, a smatraju se potencijalnom prijetnjom ekosustavima i posljedično zdravlju i sigurnosti ljudi. Kemijski sastojci plastike uključuju polimere, monomere i ostatke pomoćnih tvari pri provedbi reakcija polimerizacije. Čestice MP su izvor opasnosti zbog svog fizičkog oblika, kao vektori kemikalija, uključujući monomere, aditive i apsorbirane kemikalije, te kao vektori mikroorganizama u biofilmovima.

U vodenom okolišu plastika se razgrađuje, lomi i međudjeluje s okolinom producirajući mikroplastiku, kao složenu mješavinu nepoznatih polimera, plastičnih dodataka i okolišnih kontaminanata (Galloway i sur., 2017.). U industriji polimera koristi se nekoliko tisuća različitih aditiva. Aditivi za

polimerizaciju postaju dio polimera (npr. sredstva za umrežavanje, sredstva za stvrdnjavanje, inhibitori, inicijatori) ili su neophodni za očuvanje stabilnosti polimera. Ostali aditivi, tzv. inherentni aditivi se kombiniraju s polimerom kako bi se formirala smjesa s posebnim svojstvima potrebnim za izradu proizvoda. Plastični polimeri smatraju se biokemijski inertni zbog velike molekulske mase; međutim, reakcije polimerizacije rijetko su potpune, pa se stoga u plastičnom materijalu mogu pronaći zaostali monomeri. Studije migracije pokazale su da se pod određenim uvjetima takvi monomeri mogu osloboditi iz plastične matrice. Neki od tih monomera su vrlo otrovni. Nakon reakcija polimerizacije, zaostaju neizreagirani monomeri, oligomeri i u nekim slučajevima nusprodukti reakcije prisutni nakon proizvodnje nekih vrsta plastike. Važno je napomenuti kako izloženost MP ujedno pridonosi povećanju izloženosti navedenim toksičnim kemikalijama. Za neke od aditiva plastike propisane su razine dopuštenog dnevnog unosa (tablica 1).

Mikroplastika je posebno identificirana kao novi zagađivač okoliša, utječe na morski ekosustav i smatra se rastućim kontaminantom hrane. Između 5 i 13 tona plastike (1,5–4 % ukupne globalne proizvodnje) dospjeva u morske ekosustave svake godine. Mikroplastika je sveopći zagađivač okoliša i rastući zagađivač hrane koji utječe na fiziološke i biološke procese u morskih i kopnenih organizama. MP je vektor za prijenos onečišćujućih tvari i patogeni, čija ingestija pruža potencijalni put za prijenos onečišćujućih tvari poput monomera, toksičnih

**Tablica 1.** Odobreni dnevni unos pojedinih aditiva plastike (prema Garrido-Gamarro i Costanzo, 2024.)  
**Table 1** Tolerable daily intakes (TDI) for plastic additives (adapted from Garrido-Gamarro and Costanzo, 2024)

Aditiv plastike / Additive	Odobreni dnevni unos (TDI) / TDI*	Literatura / References
Bisfenol A (BPA) / Bisphenol A (BPA)	0,2 ng/kg tjelesne mase/danu / 0,2 ng/kg of body weight/day	EFSA, 2022.
Nonilfenol (NP) / Nonylphenol (NP)	5 µg/kg tjelesne mase/danu / 5 µg/kg of body weight/day	Nielsen i sur., 2000.
Di-n-butilftalat (DPB), butil-benzil-ftalat (BBP), di(2-etilheksil)ftalat (DEHP) i di-izononilftalat (DINP) / Di-n-butyl phthalate (DPB), butyl-benzyl-phthalate (BBP), di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) i di-	50 µg/kg tjelesne mase/danu / 50 µg/kg of body weight/day	EFSA, 2019.
DIDP	150 µg/kg tjelesne mase/danu / 150 µg/kg of body weight/day	EFSA, 2019.
Di(2-etilheksil)adipat (DEHA) / Di(2-ethylhexyl)adipate (DEHA)	0,3 mg/kg tjelesne mase/danu / 0,3 mg/kg of body weight/day	EFSA, 2005.

\*TDI, tolerable daily intake/ prosječni dnevni unos

aditiva i ostalih zagađivača. In vivo i in vitro studija je potvrđeno ispiranje kemikalija iz mikroplastike kao jednog od štetnih učinaka, te je stoga teško utvrditi pripisivanje štetnih učinaka samim česticama ukoliko se ne ispituju i koncentracije kemijskih kontaminanata. Neke su od desorbiranih/izlučenih komponenti inherentno otrovne. Što se tiče sigurnosti hrane, toksičnost komponenti je povezana s njihovim potencijalnim prijenosom duž prehrambenog lanca putem mikroplastike, ili u nekim slučajevima s njihovim prijenosom iz materijala koji dolaze u dodir s hranom. Stoga se i posljednja istraživanja povezana s pojavnošću mikroplastike usmjeravaju na pojavnost aditiva plastike i perzistentnih, bioakumulirajućih toksičnih tvari (*persistent, bioaccumulative and toxic substances*, PBTs) poput diklordifenildikloroetana (DDD), diklorodifenildikloretilena (DDE) i diklorodifeniltri-kloroetana (DDT), budući se radi o sastavnicama plastike/mikroplastike koje nisu kemijski vezane za polimere i mogu se nakon prethodne okolišne apsorpcije (kao PBTs) otpustiti sa čestica mikroplastike. Pod djelovanjem okolišnih i procesnih uvjeta oslobađaju se iz polimera i doprinose lakšoj apsorpciji pri konzumaciji (Gamarro i sur., 2024.).

### Pojavnost mikroplastike u dvoljuštturnim školjkašima

Pojavnost mikroplastike i njen potencijalni utjecaj na organizme i ljudsko zdravlje zauzimaju veliku javnu i znanstvenu pozornost tijekom više od dva desetljeća (Andrady i sur., 2003.). Kako je prethodno istaknuto, zbog lakog uzorkovanja, načina ishrane, sedentarnog načina života i niza drugih karakteristika, školjkaši se uvelike koriste kao indikatorske vrste. Morski školjkaši uzgajaju se stoljećima i prepoznati su kao održivi resurs niskog prehrambenog lanca koji hranu priskrbljuju iz svog okoliša. Ukupna proizvodnja školjkaša u 2015. godini iznosila je 16 milijuna tona (Smaal i sur., 2019.), što je oko 14 % ukupne akvakulturne proizvodnje. Akvakultura i ulov školjkaša bilježe stalni porast, od 5 do 16 milijuna tona godišnje tijekom razdoblja 1995. – 2015. (Smaal i sur., 2019.). Akvakultura školjkaša danas dominira nad divljim ulovom gotovo deveterostruko (89 %) i u stalnom je porastu. Zbog globalnog porasta konzumacije školjkaša, izrazito je važna uspostava monitoringa prisutnosti čestica mikroplastike kod uzgojnih, a i divljih jedinki radi potencijalne direktne ugroze zdravlja potrošača, kontroliranja mogućeg ulaska

mikroplastike u hranidbenu mrežu te potencijalnog utjecaja mikroplastike na energetske metabolizam školjkaša, a time i na učinkovitost akvakulturne proizvodnje. Istraživanja kumulacije mikroplastike u izlovnim i uzgojenim dvoljuštturnim školjkašima vrlo su zastupljena i obuhvaćaju globalno rasprostranjene lokalitete. Svi školjkaši vezani su za vodeni okoliš. Većina živi potpuno ukopana u meku podlogu dna ili provodi semisesilni ili sesilni način života. Mnogi od njih su jestivi. Kontrolirano se, u znatnim količinama, uzgajaju kamenice (*Ostrea*), dagnje (*Mytiloidea*) i češljače (*Pectinoidea*).

Analizom MP u školjkašima se primarno dobivaju podaci o broju identificiranih čestica, veličini, obliku, boji te u smislu kemijskog sastava, broju i vrsti kemijskih polimera. Dodatno je, ovisno o primijenjenoj tehnici identifikacije i kvantifikacije, poželjno dobiti informacije o aditivima (plastifikatori ili omekšivači, pojačivači, punila, boje, usporavala gorenja, modifikatori) i apsorbiranim štetnim tvarima (poliklorirani bifenili – PCB, insekticidi poput diklorodifeniltrikloroetana (DDT), policiklički aromatski ugljikovodici – PAH). Svi navedeni analitički podaci neophodni su za karakterizaciju utjecaja na živi svijet, uključujući i ljude.

Istraživanja onečišćenja školjkaša mikroplastikom na svjetskoj razini sažeta u tablici 2. prikazuju podatke o brojnosti i karakterizaciji mikroplastike u uzgojnim i divljim vrstama morskog okoliša. Pojavnost mikroplastike kategorizirana je u odnosu na pet glavnih konzumnih vrsta školjkaša koje uključuju dagnje, kamenice, te vrste koje karakterizira život u sedimentu, odnosno skupine kućice, srčanke i kapice. Rezultati ukazuju na varijabilnost onečišćenja mikroplastikom zavisno o ukupnom broju čestica mikroplastike iskazanom po gramu mokre mase, rasponima veličine čestica, udjelima polimera mikroplastike kojima doprinose sama vrsta školjkaša, način i mjesto proizvodnje te okolišni čimbenici područja. Na razini fizikalne karakterizacije mikroplastike iskazane oblikom čestica dominiraju vlakna. Primjerice vlakna su zastupljena s više od 80 % u ukupnom broju čestica mikroplastike u dagnjama (*Perna viridis*) iz Tajlanda (Phaksopa i sur., 2023.), obale Portugala (*M. galloprovincialis*) (Pequeno i sur., 2021.), obalnih područja Kine (*P. viridis*, *M. edulis*) (Qu i sur., 2018.) itd. Nadalje, utvrđeno je kako su sadržaji vlakna mikroplastike u dvoljuštturnih mekušaca veći u usporedbi s morskim stupcem i sedimentom što se objašnjava selektivnom kumulacijom i poteškoća-

ma eliminacije vlakana mikroplastike iz probavnog trakta školjkaša (Xu i sur., 2024.). Neki autori općenitu dominaciju oblika vlakana pripisuju utjecaju otpadnih voda i septičkih jama (Waite i sur., 2018.).

Dužinski rasponi kategorija mikroplastike (vlakna, fragmenti, ostali) u istraživanim vrstama školjkaša diljem svijeta su raznoliki. Širokoj različitosti veličine čestica MP u školjkašima doprinose razlike između vrijednosti granica detekcije za parametar veličine čestica raspona od 30  $\mu\text{m}$  – 150  $\mu\text{m}$ . Pri razmatranju utvrđenih veličina mikroplastike u školjkašima autori ističu da se trebaju uzeti u obzir dodatni čimbenici poput različitih geografskih područja i protokola uzorkovanja, primijenjenih analitičkih metoda te različitih vrsta školjkaša, drugačijeg indeksa kondicije i brzine hranjenja svake jedinke. Kategorizacija raspona veličina u istraživanjima ukazuje na dominaciju manjih raspona (npr. 5-250  $\mu\text{m}$ , 10-300  $\mu\text{m}$ , 50-100  $\mu\text{m}$ , 50-250  $\mu\text{m}$ , 100-500  $\mu\text{m}$ , 0,25-1 mm). Provedena istraživanja dagnji ukazuju na veće udjele čestica manjih dužinskih raspona u usporedbi s okolišnim medijem (Li i sur., 2018.a; Qu i sur., 2018.; Digka i sur., 2018.). Na primjer MP čestice <1 mm, čine 62 %, 97 % i 100 % ukupnih čestica MP u morskoj vodi, sedimentu i školjkama iz sjevernog Jonskog mora (Digka i sur., 2018.). Dagnje podrijetlom iz Ujedinjenog Kraljevstva su imale udjele dužinskih raspona čestica < 250  $\mu\text{m}$  od 44 - 83 % u usporedbi s morskom vodom gdje su udjeli čestica < 250  $\mu\text{m}$  iznosili od 30 – 40 % (Li i sur., 2018.b).

Utvrđene koncentracije u jestivom tkivu dagnji iznosile su između 0,04 i 12,8 čestica MP/g mokre mase, za kamenice od 0,07-8,90 čestica MP/g mokre mase, kod školjkaša skupine kućice vrijednosti MP su bile između 0,03-41,63 čestica MP/g mokre mase, kod skupine srčanki sadržaj MP je bio između 0,28-2,14 čestica MP/g mokre mase te kod skupine kapica vrijednosti su iznosile od 0,08-3,40 čestica MP/g mokre mase (tablica 2). Zavisno o načinu izražavanja ukupnog broja čestica mikroplastike u školjkašima, odnosno iskazivanja ukupnog broja čestica MP/jedinki školjkaša, literaturno se ističe i veći sadržaj kod školjkaša porodice *Veneridae*, koje većinu svog života provode napola zakopane u pijesku morskog dna ili riječnih korita (poput vrsta *R. philippinarum*, *M. meretrix*, *S. Constricta*). Primjerice, kod školjkaša podrijetlom iz područja Šangaja, Kina, jakovljevih kapica (*Patinopecten yessoensis*) i *Scapharca subcrenata* su utvrđene razine MP iznosi-

le 55 odnosno 40 čestica MP/jedinki (Li i sur., 2015.). Ovdje nesumnjiv doprinos razinama MP donosi i sam okoliš - Šangaj kao megagrad, a rijeka Jangce kao najveći izvor čestica MP u oceanu (Mai i sur., 2020.).

Prirodno stanište školjkaša utječe na sadržaj MP što se očituje u tome da školjkaši koji nastanjuju muljevita tla kumuliraju veće razine MP u odnosu na vrste koje nastanjuju vodeni stupac i pješčana područja iste regije. Tako su kod dagnji *M. galloprovincialis* (5 čestica MP/jedinki), kamenica *Alectryonella plicatula* (10 čestica MP/jedinki), vrsta skupine kućice *Sinonovacula constricta* (15 čestica MP/jedinki), *Ruditapes philippinarum* (7 čestica MP/jedinki), *Meretrix lusoria* (10 čestica MP/jedinki) i *Cyclina sinensis* (5 čestica MP/jedinki) iste regije Šangaja utvrđene niže razine MP u odnosu na prethodno navedene sadržaje jakovljevih kapica i vrste *C. Gallina*, koje za razliku od vrsta koje nastanjuju vodeni stupac i pješčana područja iste regije, obitavaju na muljevitim područjima (Cho i sur., 2019.; Khuyen i sur., 2021.).

Trendovi pojavnosti mikroplastike povezani s vrstom dvoljuštarnih školjkaša u odnosu na način života, primjerice kod sedentarnih vrsta (dagnje i kamenice) i školjkaša koji većinu svog života provode napola zakopani u pijesku (kućice) nisu razjašnjeni. Često se utvrđeni veći sadržaji MP u dagnjama u usporedbi s kamenicama pripisuju načinu ishrane kojeg kod kamenica karakterizira veća selektivnost ishrane budući se selekcija čestica odvija na dva mjesta (labijalnoj palpi i škrgama), dok je kod drugih školjkaša labijalna palpa jedino mjesto selekcije čestica (Ward i sur., 2019.).

Smatra se kako su vrijeme zadržavanja u probavnom sustavu i nakupljanje MP u tkivu školjkaša negativno povezani sa veličinom čestica MP (Ward i Kach, 2009.). Budući je udio malih čestica MP u vodi znatno veći u odnosu na sediment (Ding i sur., 2019.; Tang i sur., 2022.; Zhang i sur., 2021.), za dagnje koje žive u vodenom stupcu se očekuje duže vrijeme zadržavanja čestica MP u crijevima i tkivu u odnosu na druge školjkaše. Nadalje, veća koncentracija MP u uzgojnim dagnjama u usporedbi s drugim uzgojnim vrstama može, po nekim autorima, biti posljedica uporabe plastične infrastrukture i materijala uzgojnih školjaka s kojima dagnje dolaze u kontakt (Mathalon i Hill, 2014.; Zhu i sur., 2019.). Slijedom svega navedenog, trendovi nakupljanja MP u različitim vrstama školjkaša nisu

**Tablica 2.** Stanje onečišćenja morskih školjkaša mikroplastikom  
**Table 2** Status of microplastic pollution in marine bivalves reported in the literature from different regions worldwide

Vrsta školjkaša i proizvodno područje / Species & Location	Izlov / uzgoj / Wild / Farmed	Sadržaj mikroplastike (broj čestica / g mokre mase) / Microplastic concentration (per gram wet weight): range / average size ± SD	Klasifikacija oblika / Classification	Raspon i / ili prosječna veličina čestica / Size in µm: range / average size ± SD	Vrste polimera / Polymer types	Literatura / References
<b>Dagnje / Mussels</b>						
<i>Mytilus galloprovincialis</i> , Portugal / Portugal	Izlov / Wild	0,393 – 0,709	Vlakna, peleti, fragmenti / Fibres, pelets, foams, fragments	98 µm – 2960 µm / 479 ± 434 µm	PE, PA, PS, PP, PEVA	Barboza i sur., 2024.
<i>Mytilus galloprovincialis</i> , Crna Gora, istočni Jadran / Monte Negro, Eastern Adriatic	Uzgoj / Farmed	0,03 – 0,10	Vlakna, film, fragmenti / Fibres, films, fragments	< 100 - 5000	PE, PP, PET, PA, PVC, PVS, PS	Bošković i sur., 2023.
<i>Perna perna</i> , Brazil / Brazil	Izlov / Wild	0,80 – 28,10	Vlakna / Fibres	< 1000	PMMA	Ribeiro et al., 2023
<i>Perna viridis</i> , Malezija / Malaysia	Izlov / Wild	0,79 – 1,31	Vlakna / Fibres	23 - 4930	PA	Zahid et al., 2022.
<i>Perna viridis</i> , Malezija / Malaysia	Izlov, Uzgoj / Wild, Farmed	0,4 ± 0,24 / 0,44 ± 0,34	Fragment / Fragments	<100 - 5000	PET, PP	Zin i sur., 2022.
<i>Mytilus galloprovincialis</i> , Portugal / Portugal	Izlov / Wild	0,18 ± 0,31	Vlakna / Fibres	73 - 4680	Poliester, PET / Polyester, PET	Pequeno i sur., 2022.
<i>Perna viridis</i> , Tajland / Thailand	Izlov / Wild	0,14 – 0,86	Vlakna / Fibres	<1000	Rajon, PP, PET / Rayon, PP, PET	Chinfak i sur., 2021.
<i>Mytilus galloprovincialis</i> , Kina / China	Uzgoj / Farmed	1,6 – 2,6	Vlakna / Fibres	7 – 5000	Rajon / Rayon	Ding i sur., 2021.
<i>Mytilus edulis</i> , morsko obalno područje Francuske / France	Uzgoj / Farmed	0,41 – 2,76	Fragmenti, vlakna / Fragments, fibres	>200	PS	Kazour i Amara, 2020.
<i>Mytilus edulis</i> , Koreja / Korea	Izlov / Wild	1,43 ± 1,45	Fragment, vlakno / Fragments, fiber	50 - 1000	PET	Jang i sur., 2020.
<i>Mytilus galloprovincialis</i> , obala Turske / Turkish coasts	Izlov / Wild	2,30	Fragment / Fragments	<500	PET	Gedik i Eriasar, 2020.
<i>Choromytilus meridionalis</i> Južna Afrika / South Africa	Izlov / Wild	5,60	Vlakna / Fibres	50-1000	-	Sparks i sur., 2020.
<i>Mytilus galloprovincialis</i> , Južna Afrika / South Africa	Izlov / Wild	3,40	Vlakna / Fibres	50 - 1000	-	Sparks i sur., 2020.
<i>Mytilus edulis</i> , jugozapadna Engleska / South west of England	Izlov / Wild	-	Vlakna / Fibres	<1500	PP, PET	Scott i sur., 2019.
<i>Perna perna</i> , Brazil / Brazil	Izlov / Wild	-	Vlakna / Fibres	-	PA	Brinstiel i sur., 2019.
<i>Perna perna</i> , Brazil / Brazil	Uzgoj / Farmed	-	Vlakna / Fibres	-	PA	Brinstiel i sur., 2019.
<i>Perna perna</i> , Vijetnam / Vietnam	Izlov / Wild	0,29 ± 0,14	-	-	PP	Nam i sur., 2019.
<i>Mytilus edulis</i> , Kina / China	-	0,1 ± 0,03	Vlakna / Fibres	100-1000	PET, Poliakrilonitril / PET, Polyacrylonitrile	Fang i sur., 2019.
<i>Perna viridis</i> , Kina / China	-	0,3 1 ± 0,10	Vlakna / Fibres	100-1000	PET	Fang i sur., 2019.
<i>Mytilus edulis</i> , obala kanala Francuska / Channel coast France	Izlov / Wild	0,15 ± 0,06	Vlakna / Fibres	50-100	PET	Hermabessiere i sur., 2019.

Vrsta školjkaša i proizvodno područje / Species & Loca- tion	Izlov / uzgoj / Wild / Farmed	Sadržaj mikroplastike (broj česti- ca / g mokre mase) / Microplastic concentration (per gram wet weight): range / average size ± SD	Klasifikacija oblika / Classification	Raspon i / ili prosječna veličina čestica / Size in µm: range / average size ± SD	Vrste polimera / Polymer types	Literatura / References
<i>Mytilus sp.</i> , područ- je Viga, Španjolska / Vigo area, Spain	Izlov / Wild	1,59 ± 1,28	Vlakna / Fibres	200-500	-	Reguera i sur., 2019.
<i>Mytilus gallopro- vincialis</i> , Tunis / Tunisia	-	0,8 ± 0,01	Vlakna / Fibres	100-1000	PET PP	Abidli i sur., 2019.
<i>Mytilus edulis</i> , Juž- na Koreja / South Korea	Uzgoj / Farmed	0,12	Fragment / Fragments	43 - 4720	Akril i PP / Acrylic PP	Cho i sur., 2019.
<i>Mytilus sp.</i> , obala Norveške / Norwe- gian coastal waters	Izlov / Wild	0,97 ± 2,61	Vlakna / Fibres	<1000	Celuloza, PET / Cellulose, PET	Brate i sur., 2018.
<i>Mytilus galloprovin- cialis</i> , Italija / Italy	Uzgoj / Farmed	4,40 – 11,40	Filamenti / Filaments	1150-2290	-	Renzi i sur., 2018.
<i>Mytilus sp.</i> , Škotska, UK / Scotland, UK	Izlov / Uzgoj	3,0 ± 0,9	Vlakna / Fibres	-	-	Catarino i sur., 2018.
<i>Mytilus edulis</i> , Škotska / Scotland	Izlov / Uzgoj	0,79 – 2,90 / 0,90	Vlakna / Fibres	8-4700	-	Li, Gren i sur., 2018.
<i>Mytilus gallopro- vincialis</i> , Grčka / Greece	Izlov / Wild	-	Fragment / Fragments	100-500	PET	Digka i sur., 2018.
<i>Mytilus edulis</i> , obala kanala Francuska / French Atlantic Coast	-	-	Fragment / Fragments	50-100	PET, PP	Phuong i sur., 2018.
<i>Mytilus galloprovin- cialis</i> , Italija, Por- tugal, Španjolska / Italy, Portugal, Spain	Izlov / Wild	0,12 ± 0,4	Vlakno, čestica	-	-	Vandermeersch i sur., 2015.
<i>Mytilus edulis</i> , French, francuska, belgijska i nizozems- ka obala Sjevernog more / French, Belgian and Dutch North Sea Coast	Izlov / Wild	0,20 ± 0,3	-	-	-	Van Cauwen- berge i sur., 2015.
<i>Mytilus edulis</i> , Sjeverno more, Njemačka / North Sea, Germany	Izlov / Wild	0,36 ± 0,07	Particles	-	-	Van Cauwen- berge i sur., 2014.
<b>Kamenice / Oysters</b>						
<i>Crassostrea brasili- ana</i> , Brazil / Brazil	Izlov / Wild	1,06 – 8,90	Vlakna / Fibres	<1000	PS, PIC, POM	Ribeiro i sur., 2024.
<i>Crassostrea tulipa</i> , Gana / Ghana	Izlov / Wild	0,34 – 1,70	Vlakna / Fibres	33 - 4870	PET	Addo i sur., 2022.
<i>Crassostrea gigas</i> , Kina / China	Uzgoj / Farmed	0,3 – 3,0	Vlakna / Fibres	7 – 5000	Poliester, PVC / Polyester, PVC	Ding i sur., 2021.
<i>Crassostrea gigas</i> , Koreja / Korea	Uzgoj / Farmed	1,13 ± 0,84	Fragmenti, vlakna / Fragments, fibres	50 - 1000	PET	Jang i sur., 2020.
<i>Magallana bilin- eata</i> , Indija / India	Izlov / Wild	0,81 ± 0,45	Vlakna / Fibres	25 - 500	PET, PP	Patterson i sur., 2019.
<i>Crassostrea hong- kongensis</i> , Kina / China	Izlov / Wild	0,80 ± 0,20	Vlakno, flake, foam, fragment	<250	PET	Zhu i sur., 2019.
<i>Crassostrea spp.</i> , Kina / China	Uzgoj / Farmed	1,05 – 5,63	Vlakna / Fibres	20,3 – 4807,2	PET	Teng i sur., 2019.
<i>Crassostrea gigas</i> , Tunis / Tunisia	-	1,48 ± 0,02	Vlakna / Fibres	100 - 1000	PET	Abidli i sur., 2019.
<i>Crassostrea gigas</i> , Južna Koreja / South Korea	Uzgoj / Farmed	0,07	Fragment / Fragments	43 - 4720	Akril i PET / Acrylic, PET	Cho i sur., 2019.
<b>Kučice / Clams</b>						
<i>Meretrix lyrata</i> , Vijetnam / Vietnam	Izlov / Wild	4,71 – 5,36	Vlakna / Fibres	300 - 1500	Poliester, PET, PP / Polyester, PET, PP	Tran-Nguyen i sur., 2023.

Vrsta školjkaša i proizvodno područje / Species & Location	Izlov / uzgoj / Wild / Farmed	Sadržaj mikroplastike (broj čestica / g mokre mase) / Microplastic concentration (per gram wet weight): range / average size ± SD	Klasifikacija oblika / Classification	Raspon i / ili prosječna veličina čestica / Size in µm: range / average size ± SD	Vrste polimera / Polymer types	Literatura / References
<i>Paratapes undulatus</i> , Vijetnam / Vietnam	Izlov / Wild	2,17 -2,38	Vlakna / Fibres	300 - 1500	Poliester, PET, PP / Polyester, PET, PP	Tran-Nguyen i sur., 2023.
<i>Ruditapes philippinarum</i> , Južna Koreja / South Korea	Uzgoj / Farmed	15,64 – 41,63	kugle	20 - 100	PS	DeGuzman i sur., 2022.
<i>Ruditapes philippinarum</i> , Kina / China	Uzgoj / Farmed	44,5 – 20,1	Vlakna / Fibres	1200	Poliester, PVC / Polyester, PVC	Ding i sur., 2021.
<i>Meretrix lyrata</i> , Tajland / Thailand	Izlov / Wild	0,03 – 0,28	Vlakna / Fibres	640 - 1748	Rajon, PP, PET / Rayon, PP, PET	Chinfak i sur., 2021.
<i>Limecola baltica</i> , <i>Scrobicularia plana</i> , Italija / Italy	Izlov / Wild	-	Vlakna / Fibres	60-900, 1800	Poliester, poliakrilonitril / Polyester, polyacrylonitrile	Piarulli i sur., 2020.
<i>Meretrix meretrix</i> , Kina / China	-	4,09 ± 0,21/4,20 ± 0,17	Vlakna / Fibres	100-1000	PET, poliakrilonitril / PET, Polyacrylonitrile	Fang i sur., 2019.
<i>Ruditapes decussatus</i> , Tunis / Tunisia	-	1,40 ± 0,20	Vlakna / Fibres	100 - 1000	Celofan PET	Abidli i sur., 2019.
<i>Tapes philippinarum</i> , Južna Koreja / South Korea	Uzgoj / Farmed	0,34	Fragment / Fragments	43 - 4720	PE T, PP, poliester / PET, PP, polyester	Cho i sur., 2019.
<i>Amiantis purpuratus</i> , <i>Amiantis umbonella</i> , Perzijski zaljev / Persian Gulf	-	1,50 –2,90	Vlakna / Fibres	10-5000	PET, PP, najlon / PET, PP, nylon	Naji i sur., 2018.
<b>Srčanke / Cockles</b>						
<i>Tegillarca granosa</i> , Tajland / Thailand	Izlov / Wild	0,28 – 2,14	Vlakna / Fibres	-	-	Ruairuen i sur., 2022.
<i>Cerastoderma glaucum</i> , Italija / Italy	Izlov / Wild	-	Fragment / Fragments	3000	PP	Piarulli i sur., 2020.
<i>Cerastoderma edulis</i> , obala uz kanal La Manche, Francuska / Channel coastline, France	Izlov / Wild	0,74 ± 0,35	Vlakna / Fibres	< 100	PET	Hermabessiere i sur., 2019.
<b>Kapice / Scallops</b>						
<i>Chlamys farreri</i> , Kina / China	Uzgoj / Farmed	0,4 - 3,40	Vlakna / Fibres	7 – 5000	Rajon / Rayon	Ding i sur., 2021.
<i>Argopecten purpuratus</i> , Peru / Peru	-	0,13	Vlakna / Fibres	-	Poliester, PP / Polyester, PP	De La Torre i sur., 2019.
<i>Patinopecten yessoensis</i> , Južna Koreja / South Korea	Uzgoj / Farmed	0,08	Fragment / Fragments	43 - 4720	PS, PP, poliester / PS, PP, polyester	Cho i sur., 2019.

Polimeri mikroplastike: PA - poliamid, PE - polietilen, PET - polietilentereftalat, PIC- klorirani poliizopren; PMMA – polimetilmetakrilat, POM-polioksimetilen, PP - polipropilen, PVC - polivinilklorid, PVS - polivinilstearat, PS - polistiren; SD, standardna devijacija / Microplastic polymers: PA-polyamide, PE-polyethylene, PET-polyethylene terephthalate, PIC-polyisoprene chlorinated; PMMA-polymethyl methacrylate, POM-polyoxymethylene, PP-polypropylene, PVC-polyvinyl chloride, PVS- polyvinyl Stearate, PS-polystyrene; SD, standard deviation

jasni, zbog čega je neophodna provedba praćenja pojavnosti MP u različitim vrstama školjkaša.

Istraživanjima školjkaša je utvrđen veći sadržaj čestica MP u manjih školjkaša što se pripisuje činjenici aktivnije hranidbe manjih školjkaša kako bi se zadovoljila veća potražnja za energijom, poboljšao metabolizam i povećala stopa rasta

(Kreeger i sur., 2018.). U određenom broju istraživanja nisu utvrđene značajne razlike u sadržaju MP u odnosu na veličinu školjkaša (Cherdsukjai i sur., 2022.; Joshy i sur., 2022.), a postoje i istraživanja koja ukazuju kako veći školjkaši kumuliraju više



čestica MP od manjih školjkaša (Bråte i sur., 2018.; de Guzman i sur., 2022.; Ding i sur., 2018.; Patterson i sur., 2019.). Patterson i sur. (2019.) nižu koncentraciju čestica MP u manjim školjkašima pripisuje nemogućnosti ingestije većih čestica MP zbog čega su izloženi užem rasponu veličina čestica MP u odnosu na veće školjkaše. Karakterizacija pojavnosti MP izlovljenih i uzgojenih školjkaša pokazuje nižu razinu kontaminacije kod uzgojenih dagnji u odnosu na dagnje iz slobodnog izlova. Istraživanja Andersona i sur. (2016.), Coverntona i sur. (2019.), Dinga i sur. (2022.), Mathalona i Hill (2014.) te Phuonga i sur. (2018.) ukazuju na više razine MP-a uzgojnih u odnosu na izlovne vrste školjkaša. Najčešće vrste plastike koje se koriste u marikulturi su: polietilen, polipropilen, polistiren i polivinil klorid (PVC) a ujedno predstavljaju i moguće izvore onečišćenja MP (Mathalon i Hill, 2014.; Zhu i sur., 2019.).

Li i sur. (2016.) su utvrdili približno dvostruko veći sadržaj MP izlovnih u odnosu na uzgojne školjkaše pripisujući navedene rezultate činjenici da su uzgajališta dagnji u Kini općenito podložna manjem antropogenom utjecaju i s visokom kvalitetom vode.

Kemijski sastav mikroplastike izolirane u školjkašima pokazuje najveću zastupljenost polimera polietilena (PE, polietilen niske gustoće - LDPE, polietilen visoke gustoće - HDPE), a zatim polietilen tereftalata (PET), polipropilena (PP), poliamida (PA) i polistirena (PS). PP i ekspanzirani PS (EPS) izolirani su u uzgojnim dagnjama, a njihova je prisutnost najvjerojatnije povezana s upotrebom ovih polimera u izradi užadi za uzgoj dagnji i plutača (Cho i sur., 2019.; Mathalon i Hill, 2014.). PA (najlon) i poliester (PEST) također se intenzivno koriste u školjkarstvu.

### Pojavnost mikroplastike u školjkašima Jadranskog mora

Jadransko more čini poluzatvoreni bazen s niskom stopom recirkulacije vode i visokim antropogenim pritiscima povezanim s neodrživim ribolovom i unosom onečišćenja. Neracionalno zbrinjavanje otpada rezultiralo je velikim količinama jednokratne plastike ispuštene u prirodni okoliš (Eriksen i sur., 2018.). Sve češća upotreba plastičnih polimera u svakodnevnom životu rezultira širokom prisutnošću plastičnog otpada u prirodnom okolišu. Prvu pojavu i procjenu sastava MP u autohtonim dagnjama prikupljenim u obalnim i pučinskim područjima

sjevernog i srednjeg Jadrana proveli su Gomeiro i sur. (2019.). Utvrđeni sadržaj u dagnjama obalnih područja iznosio je 1,06–1,33 fragmenata MP/g mokre mase te 0,62–0,63 vlakana/g mokre mase, dok su se u dagnjama pučinskih područja utvrđeni sadržaji ovog kontaminanta kretali u rasponu 0,65–0,66 fragmenata/g mokre mase i od 0,24–0,35 vlakana/g mokre mase. Profil veličine utvrđenih čestica MP ukazao je na izrazitu prevalenciju manjih čestica (raspon od 20 do 40  $\mu\text{m}$ ), a najzastupljeniji polimeri analiziranih dagnji u padajućem nizu bili su PE, PP, PET te podjednaki udjeli PS, PA i PVC. Slijedom preliminarnih nalaza, odnosno sveprisutnosti plastičnog onečišćenja u sjevernom Jadranskom moru, autori zaključuju o jasnoj potrebi provedbe programa praćenja ovog kontaminanta u školjkašima u cilju osiguranja sigurnosti potrošača i razumijevanja stvarnih rizika za zdravlje. Analizom MP u kamenicama sjevernog (Limski kanal), srednjeg (Šibenski kanal) i južnog Jadrana (Malostonski zaljev) potvrđena je mikroplastika kod uzgojnih i divljih jedinki. U uzgojnim jedinkama su detektirani fragmenti (0,58 MP/g mokre mase), vlakna (0,70 MP/g mokre mase) i peleti (0,04 MP/g mokre mase). Ukupan broj mikroplastike je varirao od 0,33 do 5,43 komada/jedinki. Prosječne dužine različitih pronađenih kategorija su bile 20,55  $\mu\text{m}$ , 31,88  $\mu\text{m}$  i 456,57  $\mu\text{m}$  (Vranjić, 2020.).

U preliminarnom istraživanju autora Bogdanović i sur. (2021.) o kontaminaciji s MP i aditivima (BPA) provedenog na dagnjama (*M. galloprovincialis*) prikupljenih s talijanske i hrvatske obale Jadranskog mora tijekom ljeta 2020. godine, utvrđen je potencijalni rizik izloženosti mikroplastici, sa sveukupnim prosječnim rasponima kontaminacije od 0,3 do 4,8 čestica MP/g mokre mase. Opseg ovog istraživanja odnosio se na 12 proizvodnih područja dagnji (11 uzgojnih područja obiju obala Jadranskog mora i jednog izlovnog područja Hrvatske). Istraživanjem je utvrđena kontaminacija dagnji koje se uzgajaju duž talijanske i hrvatske obale Jadranskog mora s dominacijom polimera MP koji uključuju PEST i PP.

Mikroplastiku prosječna sadržaja od  $2,53 \pm 1,1$  čestica MP/jedinki je sadržavalo 53,3 % ispitivanih dagnji s područja južnog Jadrana (zaljev Boke Kotorske). Većina mikroplastike su sačinjavala vlakna (63,7 %), plave boje. Profil identificiranih polimera dagnji zaljeva Boke Kotorske u opadajućem sadržaju sačinjavali su PE, PP i PET (Bošković i sur., 2023.).

### Kemijski rizik polimera mikroplastike

**Tablica 3.** Kategorizacija plastike i razine opasnosti polimera plastike (prema Lithner i sur., 2011.)  
**Table 3** Classification of plastics and hazard levels of polymers (according to Lithner et. al., 2011)

Vrsta polimera / Polymer type	Monomer / Monomer	Primjena / Application	Primarna opasnost / Primary hazard statement	Ocjena opasnosti (brojčana) / Hazard score	Razina opasnosti / Hazard level
Polietilen tereftalat / Polyethylene terephthalate	Etilen glikol / Ethylene glycol	Boce za piće, mineralnu vodu i poliester za odjeću / Beverage bottles, mineral water, and polyester for clothing	Štetno ako se proguta / Harmful if swallowed	4	II
Polietilen / Polyethylene	Etilen / Ethylene	Spremnici, ambalaža za hranu i industrijski pribor / Containers, food packaging, and industrial accessories	Iznimno zapaljivo, Može izazvati vrtoglavicu i povraćanje / Extremely flammable gas May cause drowsiness or dizziness	11	II
Polipropilen / Polypropylene	Propilen / Propylene	Užad s primjenom u poljoprivredi, ribarske mreže, industrijski pribor i pletenina / Agricultural ropes and fishing nets, industrial accessories, and knitwear	Iznimno zapaljivo / Extremely flammable gas	1	I
Poliamid / Polyamide	ε-Kaprolaktam / ε-Caprolactam	Najlonski tekstil i industrijski pribor / Agricultural ropes and fishing nets, industrial accessories, and knitwear	Štetno u dodiru s kožom, štetno ako se proguta. izaziva respiratorne iritacije, ozbiljne opekline kože i oštećenja oka / Harmful in contact with skin, harmful if swallowed, may cause respiratory irritation, causes severe skin burns and eye damage	50	II
Polimetiltakrilat / Polystyrene	Metiltakrilat / Methyl methacrylate	Ljepila i brtvila Tekućine/deterdženti za strojno pranje Proizvodi za održavanje automobila / Adhesives and sealants Machine wash liquids/detergents Automotive care products	Nadražuje dišne puteve (STOT jednokratna izloženost Kat. 3/ H335) / Irritant to the respiratory tract (STOT single exposure Cat. 3/ H335).	1021	IV
Polistiren / Polymethyl methacrylate (Acrylic)	Stiren / Styrene	Industrijski pribor, ambalaža za zaštitu jaja, plutajuće lopte za akvakulturu, posuđe za jednokratnu upotrebu / Industrial accessories, egg protection packaging, aquaculture floating balls, disposable tableware	Zapaljiva tekućina i para, štetno ako se udiše, uzrokuje ozbiljno oštećenje očiju i iritaciju, izaziva iritaciju kože / Flammable liquid and vapor, harmful if inhaled, causes serious eye irritation, causes skin irritation	30	II
Polivinilklorid / Polyvinyl chloride	Vinil klorid / Vinyl chloride	Građevinski materijal, kozmetika, prozirna ambalaža za hranu, vodovodne cijevi / Building materials, cosmetics, transparent food packaging, water pipes	Izuzetno zapaljivi plin, može uzrokovati rak / Extremely flammable gas, may cause cancer	10 551	V
Polikarbonat / Polycarbonate	Bisfenol A / Bisphenol A	Dječje bočice, staklarstvo, automobilska industrija, industrija elektroničkih uređaja / Baby bottles, glass assembly industry, automotive industry, electronic appliances industry accessories	Izaziva alergijske kožne reakcije, potencijalno oštećenje ploda u trudnoći, može izazvati pospanost ili vrtoglavicu / May cause an allergic skin reaction, suspected of damaging fertility or the unborn child, may cause drowsiness or dizziness	1 177	IV

Istraživanja utjecaja mikroplastike na dvolušturke školjkaše ukazuju na niz nepovoljnih učinaka koji uključuju promjene načina ishrane (redukcija filtracije i stope pročišćavanja), metabolizma, odnosno izmijenjenog fiziološkog odgovora (Green i sur., 2016., Rist i sur., 2016.; Xu i sur., 2017.). Utjecaj mikroplastike očituje se u izazivanju stresa i aktivacije enzimatskog i imunološkog odgovora morskih školjkaša te ometanja reprodukcije s potencijalnim negativnim učinkom na dinamiku reprodukcije vrste (Sendra i sur., 2020.; Pandey i sur., 2022.).

U pogledu sigurnosti hrane, školjkaši kao vrste koje se konzumiraju cijele, značajno doprinose izlaganju mikroplastici. U ljudi čestice MP mogu izazvati oštećenja organizma fizičkim i kemijskim putovima, uključujući genotoksičnost, oksidativni stres, apoptozu i sl. (Schirinzi i sur., 2017.; Wright i Kelly, 2017). Laboratorijske studije potvrđuju kako čestice MP izazivaju citotoksičnost cerebralnih i epitelnih humanih stanica putem oksidativnog stresa (Schirinzi i sur., 2017.).

Rizik od štete prouzročene bilo kojom kemikalijom posljedica je opasnosti povezane s kemikalijom u kombinaciji s izlaganjem toj kemikaliji. Karakterizacija kemijskog rizika koju MP predstavlja izražava se preko toksičnosti njenih polimera, odnosno sastavnica monomera. Stoga su i dosadašnje procjene potencijalnih rizika od MP u školjkaša prvenstveno usmjerene na vrstu polimera, učestalost pojave i njegovu potrošnju. U ocjeni potencijalnog rizika od izloženosti MP se koristi pristup Lithnera i suradnika (2011.) prema kojem se u zavisnosti od toksičnosti monomera kao temeljne sastavnice polimera, polimeru pridružuje brožani indeks (tablica 3). Primjenom jednostavne jednadžbe se izražava potencijalni indeks rizika (PHI) kao umnožak sume doprinosa postotnog udjela polimera mikroplastike izoliranog iz školjkaša i pridružene brožane vrijednosti opasnosti monomera. Potencijalni rizik koji polimeri predstavljaju kategorizira se na sljedeći način: Razina opasnosti I (PHI < 10) = nizak rizik; Stupanj opasnosti II (PHI 10-100) = srednji rizik; Razina opasnosti III (PHI 100-1000) = umjereni rizik; Razina opasnosti IV (PHI 1000-10 000) = visoki rizik i razina opasnosti V (PHI > 10 000) = vrlo visok rizik. Literaturni podaci potencijalnog rizika od polimera u školjkaša na globalnoj razini iznose od III - IV i ukazuju na umjerenu do visoku razinu opasnosti, primjerice kod izlovnih i uzgoj-

nih dagnji (Barboza i sur., 2024.; Chinfak i sur., 2024.; Ding i sur., 2022.; Fang i sur., 2019.). Ipak, opisani model kemijskog rizika koji temeljem dostupnih istraživanja ukazuje na umjeren do visoki rizik treba razmatrati s oprezom, budući primarno izražava mogućnost opasnosti da se iz sastavnice utvrđenog polimera školjkaša oslobode opasne tvari. Neupitna je važnost budućih istraživanja pojavnosti i kemijskog sastava MP u dvolušturkih školjkaša, s ciljem potpunije procjene rizika kojeg polimeri MP predstavljaju.

## Zaključak

Iz pregleda rezultata obuhvaćenih sadržajem ovog rada proizlazi kako je onečišćenje morskih školjkaša MP različitih oblika, veličina i sastava polimera sveprisutno diljem svijeta. Različite vrste morskih školjkaša, neovisno o tome da li su uzgojne ili izlovnne, podložne su utjecajima mikroplastike. Zbog lakog uzorkovanja, načina ishrane, sedentarnog načina života, sposobnosti kumulacije mikroplastike i odgovora na stres, morski školjkaši su poželjne indikatorske vrste u istraživanjima pojavnosti i opasnosti koju ovi složeni kontaminanti predstavljaju. Uspostava praćenja pojavnosti čestica MP kod uzgojnih i divljih jedinki dvolušturkih školjkaša neophodna je radi potencijalne direktne ugroze zdravlja potrošača i kontrole mogućeg ulaska MP u hranidbenu mrežu. Karakterizacija kemijskog rizika MP prisutne u morskih školjkaša izražena preko toksičnosti njenih polimera ukazuje na umjerenu do visoku razinu opasnosti.

**Zahvala:** Pregledni rad je financiran iz sredstava Europske Unije NextGenerationEU, Nacionalnog plana oporavka i otpornosti 2021. - 2026. (NPOO), a podržalo Ministarstvo znanosti i obrazovanja Republike Hrvatske kroz projekt br. NPOO 6 Hrvatskog veterinarskog instituta pod nazivom „Pojavnost mikroplastike i bisfenola u školjkašima hrvatske obale Jadranskog mora“ (PLASTICshell).

## Literatura

- [1] Anderson, J. C., B. J. Park, V. P. Palace (2016): Microplastics in aquatic environments: Implications for Canadian ecosystems. *Environ Pollut*, 218, 269–280 doi: 10.1016/j.envpol.2016.06.074
- [2] Andrady, A. L., M. R. Gregory (2003): *Plastics in marine environment* / Andrady, Anthony L. (ur.). New Jersey; John Wiley & Sons, 2003 *Plastics and the Environment*, str. 379-398
- [3] Barboza, L. G. A., X. L. Otero, L. Guilhermino (2024): Microplastic contamination in marine mussels from the Atlantic coast of North Portugal and human risk of microplastic intake through mussel consumption. *Environ Pollut*, 352, 124133 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124133>
- [4] Beyer, J., N. W. Green, S. Brooks, I. J. Allan, A. Ruus, T. Gomes, I. L. N. Bråte, M. Schøyen (2017): Blue mussels (*Mytilus edulis* spp.) as sentinel organisms in coastal pollution monitoring: a review. *Mar Environ Res*, 130, 338–365 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.marenvres.2017.07.024>
- [5] Bogdanović, T., I. Ujević, M. Sedak, E. Listeš, V. Šimat, S. Petričević, V. Poljak (2014): As, Cd, Hg and Pb in four edible shellfish species from breeding and harvesting areas along the eastern Adriatic Coast, Croatia. *Food Chem* 146(1), 197-203 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.foodchem.2013.09.045>
- [6] Bogdanović, T., L. Di Renzo, S. Petričević, G. Mascilongo, M. Brkljača, C. P. Calistri, V. Notarstefano, G. Gioacchini, E. Giorgini, C. Giansante, M. Berti, D. Sokolić, N. Ferri, E. Listeš, F. Di Giacinto (2021): Microplastics and bisphenol A in mussels along Italian and Croatian coast of the Adriatic Sea. Conference: EFSA Scientific Colloquium 25 “A coordinated approach to assess the human health risks of micro- and nanoplastics in food,” 6-7 May 2021 <https://events.efsa.europa.eu/bundles/app/assets/website/css/media/colloquium/doc/book-ofabstracts.pdf>
- [7] Bogdanović, T., F. Di Giacinto, M. Berti, P. Visciano, S. Petričević, M. Rogošić, Z. Rogić, G. Mascilongo, L. Di Renzo, N. Ferri, M. Schirone (2022): Surveillance Plan of Lipophilic Marine Biotoxins in Molluscs from the Croatian Coast. *Expos Health*, 14(1), 129-138 <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-210807/v1>
- [8] Bogdanović, T., S. Petričević, F. Di Giacinto, I. Listeš, D. Sokolić, E. Listeš, J. Gjerde, J. Pleadin (2025): The bisphenol microplastics issue in marine bivalves. *Veterinarska stanica*, 56(1), 13-27 doi: 10.46419/vs.56.1.10
- [9] Bošković, N., D. Joksimović, O. Bajt (2023): Microplastics in mussels from the Boka Kotorska Bay (Adriatic Sea) and impact on human health. *Food Chem Toxicol*, 173, 113641 <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113641>
- [10] Bråte, I. L. N., R. Hurley, K. Iversen, J. Beyer, K. V. Thomas, C. C. Steindal, N. W. Green, M. Olsen, A. Lusher (2018): *Mytilus* spp. as sentinels for monitoring microplastic pollution in Norwegian coastal waters: A qualitative and quantitative study. *Environ Pollut (Pt A)*, 243, 383–393 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.envpol.2018.08.077>
- [11] Chahouri, A., B. Yacoubi, A. Moukrim, A. Banaoui (2022): Integration assay of bacteriological risks in marine environment using salmonella spp and multimarker response in the bivalve *Donax trunculus*: novel biomonitoring approach. *Chemosphere* 297, 134149 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134149>
- [12] Chahouri, A., I. Lamine, H. Ouchene, B. Yacoubi, A. Moukrim, A. Banaoui (2023): Assessment of heavy metal contamination and ecological risk in Morocco's marine and estuarine ecosystems through a combined analysis of surface sediment and bioindicator species: *Donax trunculus* and *Scrobicularia plana*. *Mar Pollut Bull* 192, 115076 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.marpolbul.2023.115076>
- [13] Cherdskajai, P., V. Vongpanich, P. Akkajit (2022): Preliminary study and first evidence of presence of microplastics in green mussel, *Perna viridis* from Phuket. *App Envi Res*, 44(1), 28–41 <https://doi.org/10.35762/AER.2021.44.1.3>
- [14] Chinfak, N., C. Charoenpong, A. Sampanporn, C. Wongpa, P. Sompongchaiyakul (2024): Microplastics in commercial bivalves from coastal areas of Thailand and health risk associated with microplastics in ingested bivalves. *Mar Pollut Bull*, 208, 116937 doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.116937
- [15] Cho, Y., W. J. Shim, M. Jang, G. M. Han, S. H. Hong (2019): Abundance and characteristics of microplastics in market bivalves from South Korea. *Environ Pollut*, 245, 1107–1116 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.envpol.2018.11.091>
- [16] Covernton, G. A., B. Collicutt, H. J. Gurney-Smith, C. M. Pearce, J. F. Dower, P. S. Ross, S. E. Dudas (2019): Microplastics in bivalves and their habitat in relation to shellfish aquaculture proximity in coastal British Columbia, Canada. *Aquacult Env Interac*, 11, 357–374 <http://sci-hub.tw/10.3354/aei00316>
- [17] Depledge, M. H., J. J. Amaral-Mendes, B. Daniel, R. S. Halbrook, P. Kloepper-Sams, M. N. Moore, D. B. Peakall (1993): The conceptual basis of the biomarker approach. U: *Biomarkers*. Springer, pp. 15–29
- [18] Digka, N., C. Tsangaris, M. Torre, A. Anastasopoulou, C. Zeri (2018): Microplastics in mussels and fish from the northern Ionian Sea. *Mar Pollut Bull*, 135, 30–40 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.marpolbul.2018.06.063>
- [19] Ding, J., J. Li, C. Sun, C. He, F. Jiang, F. Gao, L. Zheng (2018): Separation and identification of microplastics in digestive system of bivalves. *Chinese J Anal Chem*, 46, 690–697 doi: 10.1016/S1872-2040(18)61086-2
- [20] Ding, L., R. F. Mao, X. T. Guo, X. Yang, Q. Zhang, C. Yang (2019): Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China. *Sci Total Environ*, 667, 427–434 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.scitotenv.2019.02.332>
- [21] Ding, J. F., C. J. Sun, C. F. He, J. Li, P. Ju, F. Li (2021): Microplastics in four bivalve species and basis for using bivalves as bioindicators of microplastic pollution. *Sci Total Environ*, 782, 146830 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.scitotenv.2021.146830>
- [22] Ding, J.; Y. Sun, C. He, J. Li, F. Li (2022): Towards Risk Assessments of Microplastics in Bivalve Mollusks Globally. *J Mar Sci Eng*, 10, 288 <https://doi.org/10.3390/jmse10020288>
- [23] Džafić, N., K. Kvrgić, L. Kozačinski, A. Humski (2021): Halofilni vibriji u školjkašima kao potencijalno patogeni uzročnici zoonoza u ljudi. *Veterinarska stanica*, 52(6), 725-736 doi: 10.46419/vs.52.6.12
- [24] Eriksen, M., M. Thiel, M. Prindville, T. Kiesling (2018): Microplastic: what are the solutions? U: *Freshwater Microplastics*, Springer, Cham, pp 273-298
- [25] European Food Safety Authority, EFSA (2016): Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM) (2016): Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *The EFSA J* 14 (6), 4501

- [26] Fang, C., R. Zheng, H. Chen, F. Hong, L. Lin, H. Lin, H. Guo, C. Bailey, H. Segner, J. Mu, J. Bo (2019): Comparison of microplastic contamination in fish and bivalves from two major cities in Fujian province, China and the implications for human health. *Aquaculture*, 512, 734322 <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734322>
- [27] Galloway, T. S., M. Cole, C. Lewis (2017): Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nat Ecol Evol* 1(5), 1–8 <http://sci-hub.tw/10.1038/s41559-017-0116>
- [28] Gamarro E. G., D. L. S. Rojas, R. M. Garcinuño Martínez, G. Paniagua González, P. F. Hernando (2024): Occurrence of common plastic additives and contaminants in raw, steamed and canned mussel samples from different harvesting areas using MSPD-HPLC methodology. *Food Res Int*, 181, 114109 [doi: 10.1016/j.foodres.2024.114109](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114109)
- [29] Gomiero, A., P. Strafella, K. Birger Øysæd, G. Fabi (2019): First occurrence and composition assessment of microplastics in native mussels collected from coastal and offshore areas of the northern and central Adriatic Sea. *Environ Sci Pollut R*, 26, 24407-24416 <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05693-y>
- [30] Green, D. S. (2016): Effects of microplastics on European flat oyster, *Ostrea edulis* and their associated benthic communities. *Environ Pollut*, 216, 95-103 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.043>
- [31] de Guzman, M. K., M. Andjelkovic, V. Jovanovic, J. Jung, J. Kim, L. A. Dailey, A. Rajković, B. De Meulenaer, T. Ćirković Veličković (2022): Comparative profiling and exposure assessment of microplastics in differently sized Manila clams from South Korea by  $\mu$ FTIR and Nile red staining. *Mar Pollut Bull*, 181, 113846 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.marpolbul.2022.113846>
- [32] Helmholtz, H., C. Ruhnau, D. Pröfrock, H. B. Erbslöh, A. Prange (2016): Seasonal and annual variations in physiological and biochemical responses from transplanted marine bioindicator species *Mytilus* spp. during a long term field exposure experiment. *Sci Total Environ*, 565, 626–636 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.202>
- [33] Hillwalker, W. E., P. C. Jepson, K. A. Anderson (2006): Selenium accumulation patterns in lotic and lentic aquatic systems. *Sci Total Environ*, 366, 367-379 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.scitotenv.2005.12.024>
- [34] Joshy, A., S. R. K. Sharma, K. G. Mini (2022): Microplastic contamination in commercially important bivalves from the southwest coast of India. *Environ Pollut*, 305, 119250 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.envpol.2022.119250>
- [35] Khuyen, V. T. K., D. V. Le, A. R. Fischer, C. Dornack (2021): Comparison of microplastic pollution in beach sediment and seawater at UNESCO can Gio mangrove biosphere reserve. *Glob Chall*, 5(11), 2100044 <https://doi.org/10.1002/gch2.202100044>
- [36] Kim, E. K., M. Barghi, M. Choi, H. B. Moon (2019): Spatial and temporal trends of PCDD/Fs in sediment and bivalves along the Korean coasts during 2001–2012. *Mar Pollut Bull*, 146, 183–189 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.002>
- [37] Kreeger, D. A., C. M. Gatenby, P. W. Bergstrom (2018): Restoration potential of several native species of bivalve molluscs for water quality improvement in mid- Atlantic watersheds. *J Shellfish Res*, 37(5), 1121–1157 [doi: 10.2983/035.037.0524](https://doi.org/10.2983/035.037.0524)
- [38] Kvirgić, K., N. Džafić, J. Pleadin (2021): Fikotoksini u morskim organizmima - potencijalna prijetnja sigurnosti potrošača. *Veterinarska stanica*, 52, 6, 739-749 <https://doi.org/10.46419/vs.52.6.13>
- [39] Lamine, I., A. Elazzaoui, M. Ben-Haddad, M. Agnaou, A. Moukrim, A. Ait Alla (2023): Integrated biomarker responses and metal contamination survey in the wedge clam *Donax trunculus* from the Atlantic coast of Morocco. *Environ Sci Pollut R*, 30, 38465–38479 <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24943-0>
- [40] Lepom, P., B. Brown, G. Hanke, R. Loos, P. Quevauviller, J. Wollgast (2009): Needs for reliable analytical methods for monitoring chemical pollutants in surface water under the European Water Framework Directive. *J Chromatogr A*, 1216, 302–315 <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.06.017>
- [41] Li, J., D. Yang, L. Li, K. Jabeen, H. Shi (2015): Microplastics in commercial bivalves from China. *Environ Pollut*, 207, 190–195 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.018>
- [42] Li, J., X. Qu, L. Su, W. Zhang, D. Yang, P. Kolandhasamy, D. Li, H. Shi (2016): Microplastics in mussels along the coastal waters of China. *Environ Pollut*, 214, 177–184 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.012>
- [43] Li, J., A. Lusher, J. M. Rotchell, S. D. Company, A. Turra, I. L. N. Brâte, C. Sun, M. Shahadat Hossain, Q. Li, P. Kolandhasamy, H. Shi (2018a): Using mussel as a global bioindicator of coastal microplastic pollution. *Environ Pollut*, 244, 522-533 [doi: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.032](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.032)
- [44] Li, J., C. Green, A. Reynolds, H. Shi, J. M. Rotchell (2018b): Microplastics in mussels sampled from coastal waters and supermarkets in the United Kingdom. *Environ Pollut*, 241, 35–44 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.038>
- [45] Lithner, D., Å. Larsson, G. Dave (2011): Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Sci Total Environ*, 409, 3309-3324 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.038>
- [46] Louros, V. L., V. Silva, C. P. Silva, V. Calisto, M. Otero, V. I. Esteves, R. Freitas, D. L. D. Lima (2022): Sulfadiazine's photodegradation using a novel magnetic and reusable carbon based photocatalyst: photocatalytic efficiency and toxic impacts to marine bivalves. *J Environ Manag*, 313, 115030 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115030>
- [47] Mai, L., X. F. Sun, L. L. Xia, L. J. Bao, L. Y. Liu, E. Y. Zeng (2020): Global riverine plastic outflows. *Environ Sci Technol*, 54(16), 10094–10056 <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02273>
- [48] De Marchi, L., L. R. Vieira, L. Intorre, V. Meucci, F. Battaglia, C. Pretti, A. Soares, R. Freitas (2022): Will extreme weather events influence the toxic impacts of caffeine in coastal systems? Comparison between two widely used bioindicator species. *Chemosphere* 297, 134069 <http://sci-hub.tw/10.1016/j.chemosphere.2022.134069>
- [49] MATHALON, A., P. Hill (2014): Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia. *Mar Pollut Bull*, 81, 69–79 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.02.018>
- [50] Newell, R. I. E. (2004): Ecosystem influences of natural and cultivated populations of suspension-feeding bivalve molluscs: a review. *J Shellfish Res*, 23, 51–62
- [51] Österblom, H., J. B. Jouffray, C. Folke, J. Rockström (2017): Emergence of a global science–business initiative for ocean stewardship. *Proc Natl Acad Sci USA* 114, 9038–9043 <https://doi.org/10.1073/pnas.1704453114>
- [52] Pandey, B., J. Pathak, P. Singh, R. Kumar, A. Kumar, S. Kaushik, T. Kumar Thakur (2022): Microplastics in the ecosystem: An overview on detection, removal, toxicity assessment, and control release. *Water*, 15, 51 <https://doi.org/10.3390/w15010051>

- [53] Patterson, J., K. I. Jeyasanta, N. Sathish, A. M. Booth, J. K. P. Edward (2019): Profiling microplastics in the Indian edible oyster, *Magallana bilineata* collected from the Tuticorin coast, Gulf of Mannar, Southeastern India. *Sci Total Environ*, 691:727-735 doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.063. Epub 2019 Jul 6. PMID: 31325870.
- [54] Pequeno, J., J. Antunes, V. Dhimmer, F. Bessa, P. Sobral (2021): Microplastics in marine and estuarine species from the coast of Portugal. *Front Environ Sci*, 9-2021 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.579127>
- [55] Phaksopa, J., R. Sukhsangchan, R. Keawsang, K. Tanapivattanakul, B. Asvakittimakul, T. Thamrongnawasawat, S. Worachananant (2023): Assessment of microplastics in green mussel (*Perna viridis*) and surrounding environments around Sri Racha Bay, Thailand. *Sustainability*, 15, 9 <https://doi.org/10.3390/su15010009>
- [56] Phuong, N. N., L. Poirier, Q. T. Pham, F. Lagarde, A. Zalouk-Vergnoux (2018): Factors influencing the microplastic contamination of bivalves from the French Atlantic coast: Location, season and/or mode of life? *Mar Pollut Bull*, 129(2), 664–674 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.054>
- [57] Qu X., L. Su, H. Li, M. Liang, H. Shi (2018): Assessing the relationship between the abundance and properties of microplastics in water and in mussels. *Sci Total Environ*, 621:679-686 doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.284
- [58] Rist, S. E., K. Assidqi, N. P. Zamani, D. Appel, M. Perschke, M. Huhn, M. Lenz (2016): Suspended micro-sized PVC particles impair the performance and decrease survival in the Asian green mussel *Perna viridis*. *Mar Pollut Bull*, 111(1–2), 213–220 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.07.006>
- [59] Rocha, L.M., E. Pinkerton (2015): Comanagement of clams in Brazil: a framework to advance comparison. *Ecol Soc* 20 (1), 7 doi:10.5751/ES-07095-200107
- [60] Rochman, C. M., M. A. Browne, B. S. Halpern, B. T. Hentschel, E. Hoh, H. K. Karapanagioti, L. M. Rios-Mendoza, H. Takada, S. Teh, R.C. Thompson (2013): Policy: Classify plastic waste as hazardous. *Nature*, 494(7436), 169-71 doi: 10.1038/494169a
- [61] Schirinzii, G. F., I. Pérez-Pomeda, J. Sanchís, C. Rossini, M. Farré, D. Barceló (2017): Cytotoxic effects of commonly used nanomaterials and microplastics on cerebral and epithelial human cells. *Environ Res*, 159:579-587 doi: 10.1016/j.envres.2017.08.043
- [62] Selim, S. A., J. L. Blanchard, J. Bedford, T. J. Webb (2016): Direct and indirect effects of climate and fishing on changes in coastal ecosystem services: a historical perspective from the North Sea. *Reg Environ Change*, 16, 341–351 doi:10.1007/s10113-014-0635-7
- [63] Senathirajah, K., S. Attwood, G. Bhagwat, M. Carbery, S. Wilson, T. Palanisami (2021): Estimation of the mass of microplastics ingested - A pivotal first step towards human health risk assessment. *J Hazard Mater*, 15, 404(Pt B):124004 doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124004
- [64] Sendra, M, A. Saco, M. P. Yeste, A. Romero, B. Novoa, A. Figueras (2020): Nanoplastics: From tissue accumulation to cell translocation into *Mytilus galloprovincialis* hemocytes. resilience of immune cells exposed to nanoplastics and nanoplastics plus *Vibrio splendidus* combination. *J Hazard Mater*, 388, 121788 doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121788.
- [65] Smaal, A. C., J. G. Ferreira, J. G. J. K. Petersen, Ø. Strand (2019): Goods and Services of Marine Bivalves. Dostupno sa: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-96776-9.pdf>
- [66] Tang, R., T. Zhang, K. Song, Y. Sun, Y. Chen, W. Huang, Z. Feng (2022): Microplastics in commercial clam from the intertidal zone of the South Yellow Sea. *China Front Mar Sci* 9:905923 doi: 10.3389/fmars.2022.905923
- [67] Vranjić, E. (2020): Kvantifikacija i karakterizacija mikroplastike u uzgojnih i divljih kamenica (*Ostrea edulis*) uz hrvatsku obalu Jadrana, diplomski rad, Split, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za studije mora, 2020 <https://repozitorij.more.unist.hr/islandora/object/morest:178/datastream/PDF/view>, preuzeto 01.09.2024.
- [68] Waite, H. R., M. J. Donnelly, L. J. Walters, (2018): Quantity and types of microplastics in the organic tissues of the eastern oyster *Crassostrea virginica* and Atlantic mud crab *Panopeus herbstii* from a Florida estuary. *Mar Pollut Bull*, 129, 179–185 doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.02.026
- [69] Wang, G., M. Singh, J. Wang, L. Xiao, D. Guan (2021): Effects of marine pollution, climate, and tidal range on biomass and sediment organic carbon in Chinese mangrove forests. *Catena* 202, 105270 <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105270>
- [70] Ward, J. E., D. J. Kach (2009): Marine aggregates facilitate ingestion of nanoparticles by suspension-feeding bivalves. *Mar Environ Res*, 68 (3), 137–142 doi: 10.1016/j.marenvres.2009.05.002
- [71] Ward, J. E., S. Zhao, B. A. Holohan, K. M. Mladinich, T. W. Griffin, J. Wozniak, S. E. Shumway (2019): Selective ingestion and egestion of plastic particles by the blue mussel (*Mytilus edulis*) and eastern oyster (*Crassostrea virginica*): implications for using bivalves as bioindicators of microplastic pollution. *Environ Sci Technol* 53, 8776–8784 doi: 10.1021/acs.est.9b02073
- [72] Wright, S. L., F. J. Kelly (2017): Plastic and human health: A micro issue? *Environ Sci Technol*, 51, 6634–6647 doi: 10.1021/acs.est.7b00423
- [73] Xu X. Y., W. T. Lee, A. K. Y. Chan, H. S. Lo, P. K. S. Shin, S. G. Cheung (2017): Microplastic ingestion reduces energy intake in the clam *Atactodea striata*. *Mar Pollut Bull*, 124 (2), 798–802 doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.12.027
- [74] Xu, Z., L. Huang, P. Xu, L. Lim, K. L. Cheong, Y. Wang, K. Tan (2024): Microplastic pollution in commercially important edible marine bivalves: A comprehensive review. *Food Chem X*, 23:101647 <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101647>
- [75] Young, D. R., T. C. Heesen, D. J. McDermott (1976): An offshore biomonitoring system for chlorinated hydrocarbons. *Mar Pollut Bull*, 7, 156–159 [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(76\)90134-X](https://doi.org/10.1016/0025-326X(76)90134-X)
- [76] Zhang, Q., T. Liu, L. Liu, Y. Fan, W. Rao, J. Zheng, X. Qian (2021): Distribution and sedimentation of microplastics in Taihu Lake. *Sci Total Environ*, 795, 148745 doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148745
- [77] Zhu, J., Q. Zhang, Y. Li, S. Tan, Z. Kang, X. Yu, W. Lan, L. Cai, J. Wang, H. Shi (2019): Microplastic pollution in the Maowei Sea, a typical mariculture bay of China. *Sci Total Environ*, 658, 62-68 doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.192

Dostavljeno/Received: 15.10.2024.

Prihvaćeno/Accepted: 23.11.2024.

## Status of Microplastic Pollution in Marine Bivalves

### Abstract

Monitoring the state of the environment by measuring the levels of various pollutants (contaminants) in mussels also makes it possible to observe biological changes and harmful effects of pollutants to which these organisms are exposed and to assess the impact of human activities on a given ecosystem. The accumulation of various pollutants in shellfish intended for consumption poses a constant threat to humans, who as consumers are at the top of the food chain. Microplastics are a complex pollutant comprising a very broad spectrum of particles that pose a unique challenge for risk assessment due to their extraordinary diversity (size, shape, solubility, polymer composition, adsorbed chemicals, biological material, etc.). The main reason why shellfish represent a potential threat to consumers lies in the biology of their organism, as they are filter feeders capable of accumulating various substances from the environment in their tissues. To understand the chemical risk of microplastics, a polymer profile model, i.e. the toxicity of their monomers, is used. In addition to chemical characterization, the analysis of microplastics undoubtedly includes the determination of the total number of particles in order to assess human exposure to microplastics, based on data on the dietary habits of the target population. This article reviews the literature data considering the microplastics in bivalves, the chemical characterization of microplastics and their occurrence in different marine bivalves.

**Keywords:** microplastics, marine bivalves, pollution, chemical risk of microplastics

## Status der Mikroplastikverschmutzung in Schalentieren

### Zusammenfassung

Die Überwachung des Zustands der Umwelt durch Messung des Gehalts an verschiedenen Schadstoffen (Kontaminanten) in Schalentieren ermöglicht es auch, biologische Veränderungen und schädliche Auswirkungen von Schadstoffen zu beobachten, denen diese Organismen ausgesetzt sind, und die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf ein bestimmtes Ökosystem zu bewerten. Die Anreicherung verschiedener Schadstoffe in Schalentieren, die für den Verzehr bestimmt sind, stellt eine ständige Bedrohung für den Menschen dar, der als Verbraucher an der Spitze der Nahrungskette steht. Mikroplastik ist ein komplexer Schadstoff, der ein sehr breites Spektrum von Partikeln umfasst, die aufgrund ihrer außerordentlichen Vielfalt (Größe, Form, Löslichkeit, Polymerzusammensetzung, adsorbierte Chemikalien, biologisches Material usw.) eine einzigartige Herausforderung für die Risikobewertung darstellen. Der Hauptgrund, warum Schalentiere eine potenzielle Gefahr für die Verbraucher darstellen, liegt in der Biologie ihres Organismus, da sie als Filtrierer in der Lage sind, verschiedene Stoffe aus der Umwelt in ihrem Gewebe zu akkumulieren. Um das chemische Risiko von Mikroplastik zu verstehen, wird ein Polymerprofilmodell, d. h. die Toxizität ihrer Monomere, verwendet. Neben der chemischen Charakterisierung umfasst die Analyse von Mikroplastik zweifellos auch die Bestimmung der Gesamtzahl der Partikel, um die Exposition des Menschen gegenüber Mikroplastik auf der Grundlage von Daten über die Ernährungsgewohnheiten der Zielbevölkerung beurteilen zu können. Dieser Artikel gibt einen Überblick über die Literaturdaten zu Mikroplastik in Muscheln, zur chemischen Charakterisierung von Mikroplastik und zu dessen Vorkommen in verschiedenen Muschelarten.

**Schlüsselwörter:** Mikroplastik, Schalentiere, Verschmutzung, chemisches Risiko von Mikroplastik

## Estado de la contaminación por microplásticos en bivalvos marinos

### Resumen

El monitoreo del estado del medio ambiente mediante la medición de los niveles de diversos contaminantes en mejillones permite no solo observar los cambios biológicos y los efectos nocivos de los contaminantes a los que estos organismos están expuestos, sino también evaluar el impacto de las actividades humanas en un ecosistema determinado. La acumulación de diversos contaminantes en los moluscos destinados al consumo humano plantea una amenaza constante para las personas, quienes, como consumidores, ocupan el nivel más alto de la cadena alimenticia. Los microplásticos constituyen un contaminante complejo que abarca un espectro muy amplio de partículas, lo que plantea un desafío único para la evaluación de riesgos debido a su extraordinaria diversidad (tamaño, forma, solubilidad, composición polimérica, químicos adsorbidos, material biológico, etc.). La principal razón por la cual los moluscos representan una amenaza potencial para los consumidores radica en la biología de estos organismos, ya que son filtradores capaces de acumular diversas sustancias del medio ambiente en sus tejidos. Para entender el riesgo químico de los microplásticos, se utiliza un modelo de perfil polimérico que evalúa la toxicidad de sus monómeros. Además de la caracterización química, el análisis de microplásticos incluye indudablemente la determinación del número total de partículas con el fin de evaluar la exposición humana a los microplásticos, considerando los datos sobre los hábitos dietéticos de la población objetivo. Este artículo revisa los datos disponibles en la literatura relacionados con los microplásticos en bivalvos, la caracterización química de estos contaminantes y su presencia en diferentes especies de bivalvos marinos.

**Palabras claves:** microplásticos, bivalvos marinos, contaminación, riesgo químico de microplásticos

## Stato di contaminazione dei molluschi bivalvi marini da microplastiche

### Riassunto

Monitorando lo stato dell'ambiente tramite la misurazione del contenuto di vari inquinanti (contaminanti) nei molluschi bivalvi, è possibile monitorare anche i cambiamenti biologici e gli effetti nocivi degli inquinanti a cui questi organismi sono esposti e valutare l'impatto delle attività umane su un determinato ecosistema. L'accumulo di vari inquinanti nei molluschi bivalvi destinati al consumo rappresenta un pericolo costante per l'uomo, in quanto consumatore al vertice della catena alimentare. La microplastica è un contaminante complesso. Essa comprende un insieme molto ampio di particelle che, a causa della loro eccezionale diversità (dimensioni, forma, solubilità, composizione polimerica, sostanze chimiche assorbite, materiale biologico, ecc.), rappresentano una sfida molto impegnativa nella valutazione del rischio. Il motivo principale del pericolo di consumare i molluschi risiede nella biologia del loro organismo, poiché si nutrono filtrando l'acqua o il mare in cui crescono o vivono naturalmente, accumulando nel loro organismo varie sostanze provenienti dall'ambiente. Per comprendere il rischio chimico delle microplastiche, viene utilizzato il modello del profilo polimerico, ovvero della tossicità dei loro monomeri. L'analisi delle microplastiche comprende certamente, oltre alla caratterizzazione chimica, anche la determinazione del numero totale di particelle al fine di valutare l'esposizione umana alle microplastiche sulla base dei dati sulle abitudini alimentari della popolazione target. Questo articolo fornisce una panoramica della letteratura sulle ricerche sulle microplastiche presenti nei molluschi bivalvi, sulla loro caratterizzazione chimica e sulla loro presenza in diversi tipi di molluschi.

**Parole chiave:** microplastica, molluschi bivalvi marini, inquinamento, rischio chimico delle microplastiche