

Микропластика и органске загађујуће материје

Наташа Марић, Дијана Гргас

Сажетак: Микропластика и органске загађујуће материје све више се препознају као тихи и упорни загађивачи савременог доба, који су широко распрострањени у води, земљишту, ваздуху и живим организмима. Њихова акумулација у екосистемима изазива све већу забринутост због негативних ефеката на биодиверзитет, функционисање екосистема и људско здравље. Посебну опасност представља микропластика која може адсорбовати токсичне супстанце попут пестицида, тешких метала и перзистентних органских загађујућих материја, дјелујући као вектор и повећавајући њихову покретљивост и биодоступност. Разумијевање извора, путева ширења и утицаја ових загађивача представља основу за адекватну процјену ризика и ефикасну заштиту животне средине. У овом поглављу представљене су савремене физичке, хемијске и биолошке методе санације, укључујући биоремедијацију, микоремедијацију, фиторемедијацију и напредне адсорпционе технике. Посебан акценат стављен је на одржива и на природи заснована рјешења, која могу допринијети ублажавању негативних посљедица загађења.

Кључне ријечи: микропластика, органске загађујуће материје, одређивање, уклањање, санација

Цитирање: Марић Н, Гргас Д (2025) Микропластика и органске загађујуће материје. У: Илић П, Пржуљ Н (уредници) Заштита животне средине и ремедијација. Академија наука и умјетности Републике Српске, Бања Лука, Монографија LXIII: 285–318

Cite as: Marić N, Grgas D (2025) Microplastics and Organic Pollutants. In: Ilić P, Pržulj N (eds) Environmental Protection and Remediation. Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Banja Luka, Monograph LXIV: 285–318

9.1. Увод

Данас је пластика свеприсутна у свакодневном животу. Производи који садрже полимере, као што су амбалажа, предмети за општу употребу, козметика и бројни други артикли, на крају свог животног циклуса завршавају као отпад, а веома често и у самој животној средини (Марић 2024). Један од најзахтјевнијих еколошких изазова модерног доба представља микропластика – ситне честице пречника мањег од 5 mm (Frias 2019), које настају као резултат физичке, хемијске и биолошке разградње већих пластичних производа или су намјерно произведене за индустријску употребу. Микропластика је постала један од најистакнутијих и најтрајнијих облика загађења водених екосистема, а њено присуство забиљежено је у готово свим сегментима животне средине – од површинских и подземних вода до мора, седимената, земљишта, па чак и у води за пиће (Wang 2017). До водоводних система доспијева преко индустријских и комуналних отпадних вода, атмосферског транспорта и преко различитих површинских токова.

Хемијска стабилност пластике омогућава микропластици да дуго опстаје у животној средини, а њена способност да адсорбује и преноси тешке метале и друге токсичне супстанце чини је потенцијално опасном по живи свијет. Ове честице улазе у ланац исхране и могу довести до биоаккумуляције и биомagniфикације токсина, што представља озбиљну пријетњу екосистемима и људском здрављу. Ксенобиотици, супстанце настале људским дјеловањем (Štefanac 2021), такође се адсорбују на површину микропластике и могу бити пренесени на веће удаљености путем ваздуха и воде (Hüffer 2018). Перзистентне органске загађујуће материје (енгл. *Persistent Organic Pollutants – POPs*) спадају у посебно ризичну групу због своје токсичности, стабилности и способности да се преносе на велике удаљености (Rosenfeld 2011). Дијеле се на вјештачка једињења и природне полицикличне ароматичне угљоводонике, а показано је да се лако акумулирају у храни и могу проузроковати хроничне здравствене проблеме код људи. Органска загађења су често полуиспарљива, што им омогућава транспорт до удаљених подручја као што је Арктик, гдје се кондензују у хладним условима (Gibson 2020).

Детекција микропластике у води представља сложен процес који захтијева примјену савремених аналитичких метода због мале величине и хемијске разноврсности ових честица. Примјеном техника као што су FTIR, Raman спектроскопија или GC-MS могуће је прецизно одредити тип и концентрацију микропластике у различитим типовима воде. Са напретком технологије, све више се развијају методе за ефикасно уклањање микропластике из вода, чиме се отварају могућности за ублажавање штетних утицаја на екосистеме и здравље људи (Tang 2021).

9.2. Микропластика и органске загађујуће материје

9.2.1. Микропластика

Производња и употреба пластике један је од узрока глобалног загађења, а годишња производња пластике на глобалном нивоу порасла је на више од 300 милиона тона. У 2022. години забиљежен је пад производње од 2%, док је у 2023. години забиљежен раст од 1,2% (Марић 2024). Планови за 2024. годину су обухватили производњу у складу са новим захтјевима и прописима који се односе на управљање и рециклажу пластичног отпада (Cassela 2024). Основни градивни елементи пластике су органски полимери (Bajsić 2017):

- Полиетилен-терефталат (енгл. *Polyethylene terephthalate*, PET),
- Полипропилен (енгл. *Polypropylene*, PP),
- Полистирен (енгл. *Polystyrene*, PS),
- Поливинил-хлорид (енгл. *Polyvinyl chloride*, PVC),
- Поликарбонат (енгл. *Polycarbonate*, PC),
- Полиетилен високе густоће (енгл. *High-density polyethylene*, PE-HD, HDP, HDPE),
- Полиетилен-терефталат (енгл. *Polyethylene terephthalate*, PET): терефтална киселина, етилен-гликол.

Микропластика укључује честице величине од 1 μm до 5 mm (Cole 2011). Европска агенција за безбједност хране (енгл. *European Food Safety Authority EFSA*) дефинише микропластику као хетерогену мјешавину полимерних материјала различитих облика, величина и структура, укључујући фрагменте, влакна, пелете, филмове, перле и пахуљице, у распону од 0,1 до 5 mm (EFSA 2016).

9.2.1.1. Класификација микропластике

Микропластика се дијели на примарну и секундарну, у зависности од начина на који се формира.

Примарна микропластика укључује честице које се намјерно додају козметици, хигијенским производима, производима за чишћење и пластичним компонентама у индустрији. Ове честице улазе у животну средину током производње, употребе и одлагања. Процењује се да 15–31% свих микропластичних честица у морима долази из примарне микропластике. Најчешћи извори укључују хабање синтетичке одјеће (35%), хабање аутомобилских гума (28%) и микрогрануле у производима за његу тијела (2%) (Марић 2024).

Секундарна микропластика се формира фрагментацијом већих пластичних комада као што су кесе, боце и рибарске мреже. Овај процес је узрокован физичким (абразија, таласи), хемијским (фотооксидација) и биолошким факторима. Секундарна микропластика чини 69–81% микропластике у мори-ма (Марић 2024).

9.2.2. Утицај микропластике на животну средину

Микропластика утиче на животну средину, воду, ваздух, земљиште и живе организме на неколико начина:

- **Хемијски утицај** – пластика садржи адитиве (бисфенол А, фталате, бром), а токсичне материје из околине могу се адсорбовати на њеној површини (Campanale 2020).
- **Физички утицај** – микропластика може изазвати физички поремећај у организмима који их уносе храном, укључујући рибе и морске организме (Akdogan 2019).
- **Разградња микропластике** – зависи од различитих фактора (Cole 2011):
 - Биоразградња – одређене групе микроорганизама (дјелимично) разграђују неке врсте пластике,
 - Фотодеградација – под утицајем ултраљубичастог зрачења,
 - Термичка разградња – услед високих температура,
 - Хидролитичка деградација – абразија, таласи и турбуленције доводе до фрагментације пластике,
 - Термооксидативна разградња (Singh 2008).

Миграција микропластике у животну средину зависи од вјетра, морских струја и густине честица. Гушћа микропластика се депонује у седиментима на дну океана, доприносећи њиховој акумулацији у ланцу исхране (Boucher 2017).

У регионима са ниским степеном пречишћавања отпадних вода, значајна количина микропластике допире до животне средине. У регионима са развијеним системом за пречишћавање отпадних вода, на уређајима се постиже висока ефикасност уклањања микропластике из отпадних вода, али микропластика остаје у муљу и на тај начин допире до животне средине. Иако се већина микропластике уклања током пречишћавања отпадних вода, дио микропластике који остаје у третираној води допире до животне средине (Dey 2021).

9.2.3. Перзистентне органске загађујуће материје POPs

POPs су токсичне хемикалије које се полако разграђују у животној средини и могу се акумулисати у ланцу исхране. Постоје три главне групе POPs (Gaur 2018):

1. Пестициди – елдрин, диелдрин, ендрин, токсафен, хлордан, мирекс, дихлородифенилтрихлороетан (*Dichlorodiphenyltrichloroethane, DDT*), хексахлоробензен (енгл. *Hexachlorobenzene, HCB*), хлордекан (енгл. *Chlordecone, CLD*), хексабромобифенил (енгл. *Hexabromobiphenyl, HBB*), хексахлорциклохексан (енгл. *Hexachlorocyclohexane, HCH*).
2. Индустијске хемикалије – полихлоровани бифенили (енгл. *Polychlorinated biphenyls PCBs*), хексахлоробензен (енгл. *Hexachlorobenzene, HCB*), полибромовани дифенил-етер (енгл. *Polybrominated diphenyl ethers, PBDEs*) и перфлуорооктансулфонат (енгл. *Perfluorooctanesulfonic acid, PFOS*).
3. Нуспроизводи индустијских процеса: полициклични ароматски угљоводоници (енгл. *Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs*), полхлоровани дибензофурани (PCDF) (енгл. *Polychlorinated dibenzofurans, PCDFs*) и полихлоровани диоксини (PCDD) (енгл. *Polychlorinated dibenzo-p-dioxins, PCDDs*).

9.3. Загађење микропластиком и постојаним органским загађујућим материјама

Микропластика дјелује као вектор загађивача у екосистемима – микропластика може транспортовати POP кроз екосистеме, омогућавајући им да уђу у ланац исхране. Због своје хидрофобне природе и велике специфичне површине, микропластичне честице адсорбују POPs из воде, седимента и атмосфере (Campanale 2020). Због сличности са храном, морски организми га уносе, што доводи до биоакумулације и биомагнификације (Abalos et al. 2018). POPs су липосолубле и акумулирају се у масном ткиву организама. имају висок афинитет за адсорпцију липофилних једињења као што су диоксини и PCB на микропластици (Boucher 2017). Ова једињења могу изазвати ендокрине поремећаје, неуротоксичне ефекте и друге здравствене проблеме (Alhabri 2018). Микропластичне честице транспортују POPs на велике удаљености кроз водене путеве, атмосферу и прехранбене мреже. На примјер, микропластика из ријечних система који допиру до океана може садржавати високе концентрације пестицида и индустијских хемикалија, што повећава токсично оптерећење морских екосистема (Bule et al. 2020).

Људи су изложени комбинованим ефектима микропластике и POPs првенствено кроз храну, посебно рибу и морске плодове. POPs везани за микропластику могу се ослободити у дигестивном тракту и ући у крвоток, потенцијално узрокујући хроничне болести као што су рак, кардиоваскуларне болести и поремећаји имуног система (Polder 2010). Остаци пестицида су најчешће пронађени контаминанти у храни, док су PCB, HCB, диоксини и фурани уобичајени контаминанти у прехранбеним производима (Ansari 2024). Органске и неорганске загађујуће материје у води имају штетан утицај на људско здравље и животну средину (Grgas et al. 2024). Европска комисија је поставила максималне дозвољене концентрације одређених PAH-ова у храни, како би се смањио ризик од излагања (Martorell 2010).

Стокхолмска конвенција и друге међународне иницијативе, Баселска конвенција, Ротердамска конвенција, Минамата конвенцију о живи, као и УН Конвенцију о биолошкој разноврсности, УНЕП-ов Глобални програм за океане и европске стратегије, попут ЕУ (EU Green Deal-а и Plastics Strategy), доприносе смањењу загађења хемикалијама и пластиком на глобалном нивоу и настоје смањити емисије POPs, док се у ЕУ и глобално уводе регулативе за ограничавање пластичног отпада (Dorico 2015). Интегрирани приступ, који укључује смањење производње пластике, побољшање рециклаже и замјену штетних хемикалија, кључан је за смањење ризика од микропластике и POPs у околишу (Greenpeace 2019).

POPs се сорбирају на микропластику. Сорпција је процес који обухвата адсорпцију (везивање молекула на површину сорбента) и апсорпцију (отапање и задржавање молекула унутар сорбента). Адсорпција преовладава при ниским концентрацијама органских загађујућих материја, док је апсорпција доминантна при високим концентрацијама. Овај процес зависи од својстава сорбента и сорбата, укључујући њихову хемијску структуру и физикалне карактеристике (Hartmann et al. 2017).

Фактори животне средине који утичу на сорпцију су:

- Температура и салинитет – више температуре могу повећати кинетику сорпције, док повећани салинитет смањује растворљивост хидрофобних једињења у води, што повећава њихову сорпцију на микропластику (Jahnke 2017);
- Природна органска материја – растворена органска материја може повећати сорпцију POPs кроз хидрофобне интеракције;
- Старење микропластике – фотооксидација, термооксидација и биоразградња мијењају хемијске и физичке особине микропластике, утичући на њихову способност да вежу POPs (Zhu 2023).

Физичко-хемијске особине микропластике и сорпцијски капацитет:

- Величина и облик – мањи фрагменти имају већу специфичну површину, што повећава сорпцијски капацитет (Velzeboer 2014);
- Хемијски састав полимера – различити полимери (PE, PS, PVC) имају различит афинитет за везивање POPs-а;
- Ароматичне структуре, попут нано-PS, показују већу способност везивања POPs-а у поређењу са микро-PE;
- Кристалност – микропластика садржи кристалне и аморфне зоне. Кристалне зоне имају густо паковане ланце, док аморфне имају више празнина, што утиче на интеракције са POPs-ом (Syberg 2015).

Поред POPs-а, микропластика може адсорбовати и транспортовати антибиотике. Полиамидна микропластика показује највећи капацитет адсорпције антибиотика због присуства водоникових веза, у поређењу с полиетиленом, полипропиленом и полистиреном, који имају хидрофобнију површину и слабије интермолекуларне интеракције (Li 2018).

Микропластика може да ослободи различите хемикалије које потичу из полимера или из адитива који су додани током производње (Марић 2024). Као адитиви и стабилизатори током производње пластике користе се:

- Пластификатор: фталат (DEHP – Di(2-ethylhexyl) (енгл. *Phthalate*), дибутилфталат (*Dibutyl phthalate, DBP*) – ендокрини дисруптор (Hahladakis 2018);
- Стабилизатори: бисфенол А (енгл. *Bisphenol A, BPA*), ултраљубичасто зрачење (*Ultraviolet, UV*), стабилизатори (бензофенони), који могу узроковати хормонске поремећаје код риба и других организама (Hermabessiere 2017);
- Антистатички агенси и боје: азо-боје, перфлуориране супстанце (*Per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS*), те тешки метали и катализатори: олово, кадмијум, хром, жива – из боја и стабилизатора (Turner 2016);
- Титанијум-диоксид (TiO_2) – користи се као пигмент у пластици (Weir 2012).

Микропластика у води и седименту може садржавати у концентрацијама вишим од оне у околној води:

- Пестициде, који могу доспјети у ткива организама након ингестије микропластике (Rochman 2013);
- Дибензодиоксине и фуране – индустријске нуспроизводе;
- PFAS – које имају висок потенцијал биоаккумуляције (Ahrens 2015).

Ове супстанце се могу ослободити у воду, храну и ткива организама када дође до разградње микропластике. У литератури се препознаје потреба за даљим истраживањима и регулаторним мјерама за смањење утицаја микропластике на екосистеме и људско здравље (Марић 2024).

9.3.1. Аналитичке методе за детекцију микропластике и органских загађујућих материја

Микропластика представља глобални еколошки проблем због свеprisутности и потенцијалних штетних утицаја на здравље и животну средину. За идентификацију и квантификацију микропластике користе се различите аналитичке методе, често у комбинацији због постизања прецизнијих резултата.

Спектроскопске методе, попут инфрацрвене (Фоуријеова трансформацијска инфрацрвена спектроскопија) (енгл. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR*), Раманове спектроскопије омогућавају идентификацију хемијског састава и морфолошке структуре микропластичних честица. FTIR спектроскопија се користи за идентификацију функционалних једињења у органским загађењима, док Раманова спектроскопија пружа информације о вибрацијским модовима молекула, што је корисно за идентификацију полимера и њихових интеракција са загађењем. Ове методе су комплементарне, јер FTIR детектује асиметричне, а Раман симетричне вибрације у молекулама (Вөке 2022).

Хроматографске методе, као што су гасна хроматографија (енгл. *Gas Chromatography, GC*) и течна хроматографија високе ефикасности (енгл. *High-Performance Liquid Chromatography, HPLC*) често се комбинују са масеном спектрометријом (енгл. *Gas Chromatography-Mass Spectrometry, MS-GC*) (Guo 2019) за идентификацију и квантификацију органских загађујућих материја попут пестицида, РСВ и РАН. Ове методе омогућавају високу осјетљивост и специфичност у анализи сложених узорака (Paуá 2007).

Екстракцијске методе, попут течно-течне екстракције (*Liquid-Liquid Extraction, LLE*) и чврсто-фазне екстракције (*Solid-Phase Extraction, SPE*) користе се за издвајање и концентрисање органских загађујућих материја из узорака. Метода QuEChERS (енгл. *quick, easy, cheap, effective, rugged, and safe*; брзо, једноставно, јефтино, ефикасно, робусно и безбједно) посебно је погодна за анализу пестицида у воћу и поврћу, јер комбинује екстракцију са солима и укључује чишћење узорка (Paуá 2007).

Интеракција микропластике и органских загађујућих материја представља додатни изазов у анализи, јер микропластика може адсорбовати и преносити ове загађујуће материје у животној средини. Разумијевање ових интеракција кључно је за процјену ризика за екосистеме и људско здравље. Комбинација спектроскопских и хроматографских метода омогућава детаљну карактеризацију и квантификацију како микропластике, тако и повезаних органских загађујућих материја (Goedecke 2017).

Нове методе детекције укључују (Kadadou 2024):

- Биосензоре, који омогућавају брзо и специфично откривање пестицида и микотоксина;
- Масену спектрометрију високе резолуције (енгл. *High-Resolution Mass Spectrometry, HRMS*) за детекцију трагова органских контаминаната;
- Имунохемијске методе (енгл. *Enzyme – Linked Immunosorbent Assay, ELISE*), што се преводи као имуноензимски тест везан за ензим или ензимски имунолошки тест у анализу специфичних једињења.

Примјена аналитичких метода у реалним узорцима показала је присуство микропластике и органских загађујућих материја у води, храни (риба, морски плодови, млијеко, поврће) (Kwon 2020) и различитим еколошким матрицама у воденој средини, копненој средини, земљишту и ваздуху, што додатно потврђује потребу за побољшањем метода детекције (Aranda 2023). Регулација и стандардизација анализа су такође важна област истраживања. Тренутно не постоје јединствени међународни стандарди за квантификацију микропластике у храни и води, што отежава упоређивање резултата различитих студија (Tang 2021).

9.3.2. Еко-токсиколошки ефекти микропластике и POPs

Микропластика и POPs представљају озбиљну пријетњу воденим екосистемама, јер могу негативно утицати на организме свих трофичких нивоа. Када микропластика адсорбује POPs, њихова биорасположивост се повећава, што олакшава овим токсичним једињењима да уђу у организме (Aranda 2023).

Планктонски организми, као примарна карика у ланцу исхране, лако уносе микропластику, која може ометати њихов метаболизам и физиолошке процесе. Студије су показале да гутање микропластике у зоопланктону може смањити унос хране и довести до енергетског дефицита (Cole 2011). С друге стране, рибе и шкољке акумулирају микропластику и адсорбоване POPs, што може довести до оксидативног стреса, оштећења ћелијских мембрана и промјена у репродуктивном систему (Rochman 2013).

Микропластика транспортује POP кроз трофичке нивое, чиме доприноси биомагнификацији. На вишим трофичним нивоима, као што су предатори, концентрације POPs-а могу бити знатно веће због кумулативног ефекта храњења загађених организама. На примјер, истраживање је показало да PCB и DDT могу да се пренесу из планктона на мале рибе, а затим на веће предаторске врсте, као што су туна и сабљарка (Мато 2001).

Присуство микропластике и POPs-а у организмима може изазвати оксидативни стрес, што доводи до повећане производње реактивних врста кисеоника (енгл. *Reactive Oxygen Species, ROS*). То може резултирати оштећењем ДНК (енгл. *Deoxyribonucleic Acid, DNA*; Дезоксирибонуклеинска киселина, ДНК) липидне пероксидације и апоптозе ћелија. На примјер, истраживања на рибама изложене полистиренској микропластици показала су повећани ниво малондиалдехида, индикатора оксидативног стреса (Lu 2016).

9.4. Методе уклањања и ремедијације микропластике и POPs-а

Санација микропластике и POPs-а захтијева комбинацију различитих метода које укључују физичке, хемијске и биолошке приступе. Свака метода има своје предности и ограничења у зависности од врсте загађења, фактора животне средине и доступних технологија (Anik 2021).

9.4.1. Физичко-хемијске методе за уклањање микропластике и POPs-а

Физичко-хемијске методе спадају у најчешће коришћене методе за уклањање микропластике и POPs-а из воде, земљишта и ваздуха. То укључује механичке процесе раздвајања, хемијску оксидацију и адсорпцију.

У склопу „Инцел“ пројекта, Ilić et al. (2024) спровели су свеобухватну анализу контаминације тла у индустријској зони, идентификујући екстремно високе концентрације PCB, PAH и тешких метала, које значајно премашују прописане еколошке и здравствене стандарде. Ови резултати потврђују да је индустријско наслијеђе овог локалитета створило комплексан проблем који захтијева хитну примјену напредних ремедијационих стратегија. Интегрисане ремедијационе методе, које комбинују биолошке, хемијске и физичке приступе, представљају једини ефикасан модел за санацију оваквих загађења. Имплементација ових метода у „Инцел“ пројекту показала је да се адекватним

комбиновањем микробиолошких и хемијских процеса може постићи значајно смањење концентрација ових загађујућих материја. Досадашња истраживања сугеришу да микробиолошке заједнице укључене у разградњу органских загађујућих материја могу имати потенцијал за адсорпцију и трансформацију микропластичних честица. Ови процеси су предмет актуелних истраживања у системима третмана отпадних вода и контаминираних тла, с циљем развоја ефикасних стратегија ремедијације.

9.4.1.1. Физичке методе

Физичке методе обухватају филтрацију, адсорпцију и сепарацију. Филтрација помоћу мембрана високих перформанси може уклонити микропластику из воде, док адсорпција на активном угљу или зеолитима омогућава издвајање органских загађујућих материја. Недостаци ових метода укључују високе трошкове и производњу отпада (Марић 2024).

Адсорпција (Tiwari 2020) се темељи на везивању контаминаната на површину адсорбенса путем физичких и хемијских интеракција. Ефикасност адсорпције зависи од порозности и површинских карактеристика материјала, као и од врсте загађујућих материја. Најчешће коришћени адсорбенти:

- Активни угљ – широко примјењиван због велике површине и способности уклањања различитих органских загађујућих материја и микропластике;
- Зеолити – природни или синтетички материјали са високом способношћу јонске измјене, погодни за уклањање тешких метала и других загађујућих материја;
- Графенски оксид и наноматеријали – показали су висок афинитет према микропластици и POPs материјама, али су још у фази истраживања због високих трошкова производње;
- Биоразградиви адсорбенти – биоматеријали попут хитосана и целулозних деривата постају све популарнији као еколошки прихватљиве алтернативе.

Предности:

- Висока ефикасност у уклањању микропластике и POPs-а;
- Релативно једноставна примјена у третману воде;
- Могућност регенерације и поновне употребе адсорбента.

Недостаци:

- Потреба за регенерацијом или замјеном адсорбенса;

- Потенцијално стварање секундарног отпада.

Филтрација и мембранске технологије:

- Микро и ултра филтрација омогућавају ефикасно уклањање микропластике из отпадних вода;
- Наномембране се користе за уклањање микрочестица пластике и POPs-а путем величинског искључивања (Sun 2019);
- Седиментација и флотација – примјеном гравитационих и центрифугалних метода могуће је уклонити микропластику из отпадних вода прије него што дође до природних ресурса (Sun 2019).

Физичке методе, попут мембранске филтрације, флотације и адсорпције, омогућавају ефикасно издвајање честица микропластике и одређених органских загађујућих материја, али често захтијевају високе енергетске трошкове и генеришу секундарни отпад.

9.4.1.2. Хемијске методе

Хемијске методе користе јаке оксиданте за разбијање загађујућих материја. Фотокатализа помоћу TiO_2 и озонирања су ефикасни у разбијању органских једињења и разбијању микропластике на мање фрагменте. Недостаци укључују потребу за оптимизацијом услова и потенцијално стварање токсичних нуспроизвода.

- Напредни оксидацијски процеси (енгл. *Advanced Oxidation Processes, AOPs*) – оксидација помоћу Фентоновог реагенса, озонације и фотокаталитичких процеса користи слободне радикале за разградњу POPs-а и полимерних структура микропластике (Liu 2021);
- Електрохемијска оксидација – електрокоагулација (Peren 2018) и електрокаталитичка оксидација користе електрохемијске реакције за разградњу POPs-а и разбијање микропластичних фрагмената (Sergienko 2023);
- Термичка разградња и пиролиза – пиролиза на високим температурама омогућава конверзију микропластике у гориве гасове и уља, смањујући њихову токсичност у околини (Yansaneh 2022).

Хемијске методе, укључујући оксидативне процесе и фотокаталитичку разградњу, нуде високу ефикасност, али могу довести до формирања токсичних нуспроизвода.

9.4.2. Биолошке методе ремедијације микропластике и POPs-а

Биоремедијација користи микроорганизме за разградњу органских загађујућих материја, док фиторемедијација укључује биљке које апсорбују и трансформишу загађујуће материје. Ензимска деградација микропластике коришћењем специфичних ензима показује потенцијал за ефикасно уклањање. Ове методе су еколошки прихватљиве, али могу бити споре и зависе од специфичних услова животне средине (Kumar 2020).

9.4.2.1. Микробна биоремедијација

Интензивно се истражује способност микроорганизама да разграђују различите загађујуће материје органског и неорганског поријекла у животној средини – воду, земљиште и ваздух. Показало се да одређене хетеротрофне бактерије имају способност да разграђују различите синтетичке супстанце, укључујући органофосфатна једињења (Singh 2006), ПАХ (Haritash 2009), пестициде и минерална ђубрива (Сусоћ 2017). *Pseudomonas*, који може да разгради неколико стотина различитих компоненти путем диоксигеназа, укључујући ПАХs (Haritash 2009), игра кључну улогу у биоремедијацији. Резултати лабораторијских и теренских тестова потврђују да практично не постоји нафтни супстрат или нуспроизвод нафтне индустрије који се не може деградирати *ex situ* (пречишћавање на мјесту загађења) или *in situ* (дислокација загађења, пречишћавање) (Das 2011). Највећи успјех се постиже примјеном аутохтоних организама (са мјеста загађења, тј. од самог загађења), јер су ови организми већ прилагођени или дјелимично прилагођени циљном супстрату (Hassanshahian 2012). Важни параметри за биоремедијацију су природа загађења, структура земљишта, рН, садржај воде, хидрологија, температура и редокс потенцијал (Head 2006). Carmen (2021) анализира способност микроорганизама да разграђују адитиве из пластике, као што су пластификатори и успоривачи пламена, наглашавајући њихову еко-токсичност и потребу за биотехнолошким рјешењима.

Бактеријска разградња микропластике и POPs-а. Бактерија користи *Ideonella sakaiensis* PET-азу за разградњу PET-а (Tanasupawat 2016).

Da Silva et al. (2024) спровели су систематски преглед 68 студија, идентификујући бактерије из родова *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas* и *Rhodococcus* као кључне за биоразградњу микропластике. Посебно су истакнути ензими попут хидролаза и алканских хидроксилаза због њихове улоге у овом процесу. Ови налази указују на значајан потенцијал бактеријске биоразградње као обећавајућег приступа за смањење еколошког утицаја микропластике.

Бактеријски конзорцијуми. Синергијско дјеловање бактеријских култура побољшава ефикасност разградње постојаних органских загађујућих материја (POPs) и микропластике. Студије су показале да комбинација сојева *Pseudomonas putida* и *Sphingomonas paucimobilis* може разградити одређене POPs. Кориштење микробних заједница омогућава бржу и ефикаснију разградњу због комплементарних метаболичких путева бактеријских врста, чиме се побољшава биоразградња сложених органских спојева (Zhang 2022). Осим тога, одређени морски бактеријски сојеви, као што су *Bacillus subtilis* и *Vibrio sp.*, показали су способност разградње микропластике, смањујући масу полиетиленских честица за око 20% у периоду од 30 дана (Harshvardhan 2013).

Биолошке методе представљају одрживију алтернативу, омогућавајући деградацију загађујућих материја уз минималан утицај на животну средину. Аеробни гранулирани муљ (енгл. *Aerobic Granular Sludge, AGS*) представља напредну биотехнолошку методу у третману отпадних вода која комбинује биолошке, физичке и физичко-хемијске процесе. Овај систем се заснива на формирању микробних гранула које садрже разнолике микроорганизме способне за разградњу органских загађујућих материја. Специфична структура гранулираног муља омогућава истовремено одвијање аеробних, аноксичних и анаеробних процеса, чиме се постиже ефикасно уклањање широког спектра загађујућих супстанци, укључујући органске загађујуће материје.

Загађујуће материје (Grgas et al. 2021). AGS је иновативна технологија за третман отпадних вода, која се одликује високом адсорптивном површином, стабилном микробном заједницом и присуством екстрацелуларних полимерних супстанци (енгл. *Extracellular polymeric substances, EPS*). Иако AGS није примарно развијен за уклањање микропластике, истраживања сугеришу да може задржавати микропластичне честице, али тренутно нема доказа да долази до њихове биолошке разградње.

Jachimowicz и Cydzik-Kwiatkowska (2023) показали су да присуство PET микропластике у отпадним водама утиче на структуру AGS-а и састав EPS-а. EPS се састоји од протеина, полисахарида, липида и нуклеинских киселина и игра кључну улогу у стабилности и функционалности микробиолошких заједница. Веће концентрације микропластике довеле су до повећања хидрофобности гранула и промјена у односу протеина и полисахарида у EPS-у, али није забиљежена разградња микропластике). Истраживањем заједничко компостирања канализационог муља, зеленог и прехрамбеног отпада потврђен је њихов потенцијал као одрживе методе управљања отпадом. Студија показује да овај процес може побољшати стабилност и квалитет компоста, потенцијално смањујући присуство одређених органских загађујућих материја (Grgas 2023a).

Гргас et al. (Grgas 2023b) пружају преглед биолошке разградње перфлуороалкил и полифлуороалкил супстанци (енгл. *Per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS*), истичући микробне и ензиматске механизме који могу допринијети њиховој трансформацији. Иако PFAS спадају у дуготрајне органске загађујуће материје отпорне на разградњу, бактерије *Pseudomonas spp.*, *Desulfovibrio spp.*, *Paracoccus spp.*, *Acidimicrobium spp.*, *Azoarcus spp.* и гљивице *Phanerochaete chrysosporium*, *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.* показују потенцијал за њихову биотрансформацију. Ове бактерије и гљивице користе различите ензиме, укључујући монооксигеназе, диоксигеназе, хидролазе и пероксидазе за разградњу или модификацију PFAS структура.

Иако су лабораторијске студије показале одређени потенцијал, примјена у реалним условима захтијева даља истраживања како би се оптимизовала ефикасност и интеграција у постојеће технологије третмана отпадних вода. Гргас et al. (Grgas 2021b) анализирали су биолошку денитрификацију, при чему бактерије као што су *Pseudomonas*, *Paracoccus* и *Bacillus* редукују нитрате до гасовитих азотних једињења. Иако примарно намијењена уклањању азотних загађујућих материја, стабилна микробна заједница у денитрификационим системима може омогућити сорпцију микропластичних честица, чиме се смањује њихова концентрација у третираној води.

Такође, Гргас et al. (2023c) истраживали су бактеријску разградњу лигнина и његових деривата. Микроорганизми попут *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Rhodococcus sp.*, *Sphingomonas* и *Acinetobacter* производе специфичне ензиме пероксидазу, манган-пероксидазу и лаказу, који омогућавају деградацију комплексних ароматичних структура. Ови ензими су значајни у разградњи органских загађујућих материја, укључујући одређене перзистентне органске супстанце (Ruikar 2022).

Докази о директној биолошкој разградњи микропластике у овим процесима су још у фази истраживања, али микробне заједнице у овим системима могу допринијети адсорпцији и потенцијалној трансформацији микропластичних честица. Даља истраживања су неопходна како би се прецизније утврдио утицај ових микробних процеса на судбину микропластике и органских загађујућих материја у третману отпадних вода.

9.4.2.2. Микоремедијација

Микоремедијација је врста биоремедијације у којој се користе печурке, са нагласком на гљивичном мицелијуму. Мицелијум лучи екстрацелуларне ензиме и киселине које разграђују лигнин и целулозу, два основна градивна блока

биљних влакана. То су органска једињења која се састоје од дугих ланаца угљеника и водоника, структурно сличних многим органским загађујућим материјама. VX (енгл. nerve agent) развијен је 1950-их у Великој Британији као потенцијални пестицид органофосфат, али је убрзо препознат као превише токсичан за ту сврху. Касније је развијен и сарин, који је такође органофосфат. VX и сарин (нервни гасови) постали су дио хемијских арсенала у неким земљама (Tušek 2019). Бројне студије објављене су са великим бројем примјерака из гљива *Aspergillus niger* и бактерија *Pseudomonas sp.*, *Bacillus* (Brajesh 2006). У проучавању земљишта контаминираног дизел уљем, упоређена је примјена мицелијума буковаче и традиционалне методе биоремедијације (бактерије). Након четири недјеље више од 95% већине ПАН-ова је сведено на нетоксични ниво. Аутори студије истичу да природна микробна заједница учествује са гљивама у разградњи загађујућих материја на угљен-диоксид и воду. Гљиве које разграђују дрво су посебно ефикасне у разбијању ароматичних загађујућих материја (токсичних нафтних компоненти), као и хлорисаних једињења (одређених упорних пестицида) (Singh 2006). Студија је спроведена у аеробним и анаеробним условима, а резултати су показали да је *Pestalotiopsis microspora* способна да деградира полиуретан (PUR) чак и у одсуству кисеоника, што је посебно важно за примјену у анаеробним срединама, као што су депоније. Деградација ПУР-а била је најефикаснија на температурама од 25 до 30 °C и pH 5–7, што одговара нормалним еколошким условима. Анализа ензимске активности показала је да су кључни ензими за разградњу полиуретана (PUR):

- Естеразе, које цијепају естарске везе у ПУР;
- Протеазе, које разграђују протеинске компоненте у полиуретанским материјалима;
- Уреазе, које катализују разградњу уретанских веза.

Ови ензими омогућавају гљивама да користе PUR као једини извор угљеника, претварајући га у једноставније органске спојеве. Иако су бактерије, попут *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, такође познате по способности разградње ПУР-а, њихова ефикасност је често нижа у анаеробним условима. У поређењу с бактеријама, *Pestalotiopsis microspora* показала је већу способност преживљавања и разградње PUR-а чак и без присуства кисика, што је чини посебно погодном за биоремедијацију у различитим еколошким срединама. Откриће да *Pestalotiopsis microspora* може разградити ПУР отвара могућности за развој нових биотехнолошких стратегија за управљање пластичним отпадом. Њена способност разградње у анаеробним условима чини је потенцијалним кандидатом за третман отпада на депонијама, док би се у комбинацији с другим микроорганизмима могла користити у индустријским процесима за разградњу полиуретана (Russell et al. 2011).

Гљива буковача (*Pleurotus ostreatus*) позната је по својој способности да разгради органске материјале, укључујући лигнин и целулозу. Недавна истраживања показују да такође може деградирати одређене врсте пластике, претварајући их у биоматеријал погодан за потрошњу. Један од иновативних пројеката у овој области јесте „Fungi Mutarium“, експериментални систем за кућну биоремедијацију пластике. Овај систем је развијен у сарадњи између дизајнерског студија „Ливин студио“ и Универзитета у Утрехту. Кључни аспект система укључује инкубацију пластике унутар капсула направљених од агара (тзв. „FU“ капсуле), које служе као супстрат за раст гљивица. Како функционира „Fungi Mutarium“:

- Комадићи пластике стављају се у капсуле направљене од биљног агара;
- У капсуле се додају споре гљива (буковаче и других јестивих печурки);
- Гљиве користе пластику као извор угљеника, постепено је разграђујући;
- Послије неколико недјеља формира се нова гљивична маса која може бити безбједна за конзумирање.

Иако је овај концепт још увијек експерименталан, он показује могућност развоја одрживих метода биоремедијације пластике и истовремене производње хране. Међутим, безбједност конзумирања гљива које се узгајају на овај начин треба даље истражити, јер пластика садржи различите адитиве који могу бити токсични (Unger 2014).

Гљиве које користе пластику као супстрат пружају органско рјешење за уклањање пластике. Различите врсте јестивих и нејестивих гљива, укључујући *Agaricus*, *Armillaria*, *Auricularia*, *Lentinulas*, *Pleurotus*, примјењују се као микоремедијатори за уклањање материја кроз биоакумулацију, бисорпцију и биоразградњу (Sahithya 2022). Гљиве производе лигнин-пероксидазе и манган-пероксидазе, као и *Phanerochaete chrysosporium* и *Aspergillus niger* које разграђују POPs (Harms 2011).

Бијелотрулежне гљиве показују значајан потенцијал за биоразградњу пластике захваљујући производњи лигнинолитичких ензима који могу разградити комплексне молекуларне структуре пластике. Рад Bautista-Zamudio et al. (2023) истиче да су ови ензими кључни за разградњу различитих врста пластике, при чему се ефикасност процеса може побољшати предтретманом материјала и комбиновањем пластике с природним влакнима или металним јонима. Ови резултати наглашавају могућност примјене бијелотрулих гљива у биотехнолошким стратегијама за смањење пластичног отпада и развој одрживих метода ремедијације (Bautista-Zamudio 2023).

9.4.2.3. Фикоремедијација

Фикоремедијација је врста биоремедијације у којој се макроалге и микроалге користе за уклањање или биотрансформацију загађујућих материја, укључујући хранљиве материје и ксенобиотику из отпадних вода и CO₂ из ваздуха. Предности фикоремедијације су (Muthukumaran 2005):

- Способност микроалги да се ухвате у коштац с више проблема истовремено – микроалге могу симултано уклањати тешке метале, нитрате, фосфате, органске загађујуће материје и чак микропластику из отпадних вода;
- Процес се може контролисати у серији, полуконтинуирано или континуирано – омогућава оптимизацију услова раста и ефикасности уклањања загађујућих материја;
- Комерцијалне користи од биомасе и извађеног дијела хемикалије – биомаса алги може се користити за производњу биогорива, биођубрива, сточне хране или за издвајање вриједних једињења као што су каротеноиди, липиди и протеини;
- Компатибилан с постојећим операцијама – може се интегрисати у постројења за пречишћавање отпадних вода, индустријске процесе који користе биореакторе, као и аквакултурне системе за побољшање квалитете воде;
- Ниска потрошња енергије и одрживост – у поређењу са конвенционалним методама третмана, фикоремедијација захтијева мање хемикалија и енергије, чиме се доприноси смањењу угљеничног отиска;
- Побољшање квалитета зрака – микроалге апсорбују CO₂ током фотосинтезе, доприносећи смањењу емисија гасова стаклене баште.

У фикоремедијацији се користе микроалге и макроалге.

Врсте микроалги показале су се ефикасним у уклањању различитих тешких метала и органских загађујућих материја, конкретно (Bellido-Pedraza 2024):

- Тешки метали: олово (Pb), кадмијум (Cd), жива (Hg), арсен (As), хром (Cr), никл (Ni) и бакар (Cu);
- Органске загађујуће материје: пестициди (нпр. атразин, паракват), фармацеутска једињења (антибиотици, хормони), феноли и РАН.

Микроалге уклањају ове загађујуће материје кроз процесе биосорпције, биоаккумуляције и биотрансформације, при чему се метали везују за ћелијски зид алги или њихов метаболизам унутар ћелија. Студије су такође спроведене на двије врсте слатководних микроалги, *Microcystis panniformis* и *Scenedesmus*

сп., као и двије врсте морских микроалги, *Tetraselmis* sp. и *Gleocapsa* sp. Проучавана је способност егзополисахарида (EPS), произведених од стране различитих врста микроалги, да уклоне микропластику из водених система. Студија истиче да ЕПС произведен од микроалги може значајно допринијети агрегацији и уклањању микропластике из водених средина. Резултати наглашавају потенцијал микроалги као биокомпатибилних рјешења за прераду микропластике у води (Cunha 2019). Према истраживању Cheng and Wang (2022), микроалге *Scenedesmus abundans* су показале високу ефикасност у уклањању различитих врста микропластике. Конкретно, за микрочестице полиметил-метакрилата (PMMA) постигнута је укупна ефикасност уклањања од 98%. За друге врсте микропластике, као што су полистирен (PS) и полилактид (PLA), ефикасност уклањања била је изнад 84%. Међутим, за постизање ових резултата био је потребан дужи период држања, што представља изазов за практичну примјену ове технике (Cheng and Wang 2022).

Kumar et al. (2019) истраживали су микроалге, укључујући зелене алге, плаво-зелене алге и дијатомеје, за биолошку обраду полиетиленских листова велике (енгл. *High-Density Polyethylene, HDPE*) и мале густоће (енгл. *Low-Density Polyethylene, LDPE*). Микроорганизми, попут микроалги, могу причврстити своје биофилмове на површину ових листова и поступно их разграђивати путем ензимских механизма. Најдоминантније врсте биле су *Scenedesmus dimorphus* (зелена микроалга), *Anabaena spiroides* (плавозелена алга) и *Navicula pupula* (дијатом). Међу три групе алги које су кориштене за обраду LDPE, *Anabaena spiroides* је показала највиши степен разградње пластике, док код осталих алги није примијећен такав ефекат. Према истраживању објављеном у часопису *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, *Anabaena spiroides* је показала највећи степен разградње LDPE (полиетилена ниске густине) међу испитиваним микроалгама. Након периода инкубације, ова плавозелена алга (цијанобактерија) остварила је разградњу од 8,18% ($\pm 0,66$). За поређење, зелена алга *Scenedesmus dimorphus* постигла је разградњу од 3,74% ($\pm 0,26$), док је дијатомеја *Navicula pupula* допринијела разградњи са 4,44% ($\pm 0,82$). Ови резултати указују на значајан потенцијал *Anabaena spiroides* у биолошкој разградњи LDPE пластике (Kumar et al. 2017).

Макроалге – Цвјетање алги је глобални еколошки проблем јер хватају и транспортују пластику у приобална подручја, чиме се повећава загађење у различитим екосистемима. Студије спроведене на обалама Кариба и Мексика показале су да врсте *Sargassum* sp. (Aldana et al. 2024) и *Fucus vesiculosus* (балон алга) (Råberg et al. 2005) имају потенцијал за примену у уклањању загађујућих материја из морске средине.

9.4.2.4. Фиторемедијација

Фиторедемија се односи на неколико различитих метода у којима се биљке користе за уклањање, стабилизацију или контролу опасног отпада. Фиторе-медијација се односи на природну способност одређених биљака, названих хиперакумулатори или биоаккумулатори, да разграђују или чине безопасне материје у земљишту, води или ваздуху. Ефекти загађујућих материја, као што су метали, пестициди, растварачи, експлозивни и сирови нафта и њени деривати су ублажени употребом биоремедијације широм свијета (Rupassara et al. 2002). Многе биљке, као што су горушица, алпска денарица (*Alpinne Pennyfrsh*), конопља (*Cannabis sativa*) и свињска трава (*Amaranthus retroflexus* – црвена свињска трава и *Polygonum aviculare* – обична свињска трава) показале су се успјешним у хиперакумулацији (пестициди, хербициди, РАН, органска халогена једињења, нафтни деривати) на токсичним локацијама отпада (McIntyre et al. 2003).

Примјери биљака које се користе као биоаккумулатори су *Phragmites australis* (обична трска), *Pteris vittata* (папрат) и *Helianthus annuus* (сунцокрет), који уклањају POPs и тешке метале из воде и земљишта (Kumar 2025).

Биоризофилтрација је поступак у којем микроорганизми у ризосфери биљака помажу у разградњи микропластике и ензимских POPs-а (Etim 2012). Коријенски систем (микоризосфера може бити и до 20.000 пута дужа од коријена) повећава активну површину за разградњу загађујућих материја и доприноси стварању оптималних услова за дјеловање микроорганизама. Предности ове методе укључују *in situ* услове разградње органских једињења, што значајно смањује материјалне трошкове санације загађења. Главни недостатак је дуго времена које је потребно да се овај процес одвија. Ова врста фиторемедијације је посебно ефикасна за разградњу органских једињења добијених из нафте и деривата, укључујући БТЕХ (бензен, толуен, етилбензен и ксилен) комплексе (енгл. Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylene, BTNE), пестициди итд. У процесу фиторемедијације вода, ризосфера игра кључну улогу због интеракције између коријена биљака и микроорганизама. Bilek et al. (2020) студије су показале да су врсте родова *Salix* (врба) и *Populus* (топола) најефикасније у фиторемедијацији због високог потенцијала за транспирацију и прилагодљивост коријеновог система. На ефикасност коријеновог система утиче и доступност хранљивих материја и рН водене средине, док присуство коријена стимулише микробиолошку активност повећањем броја микроорганизама. Истражен је механизам разградње трихлороетилена од стране *Populus sp.* (топола), који се разграђује на трихлорни етанол, хлорисане ацетате и на крају на CO₂. Биљни метаболизам ксенобиотика настаје кроз процесе оксидоредукције, гликолизе или

конјугације са глутатионом, са транспортом до централне вакуоле и/или ћелијског зида. Метаболички путеви следећих група органских загађујућих материја су релативно добро истражени (Salilh and Tarekegn 2020):

- Хлорисани угљоводоници (врбе и тополе);
- Експлозивни и остаци муниције (енгл. *Trinitrotoluene*, *TNT*);
- *Cyperus* (папирус), *Phaseolus* (пасуљ), *Medicago* (луцерка), *Allium* (лук; у нестерилним условима), водене врсте *Triticum aestivum* (пшеница; у стерилној култури);
- БХТ (енгл. *Butylated Hydroxytoluene*, *BHT*) (антиоксиданси на бази бензотриазола);
- Бијеле коријенске печурке од живих биљака;
- РСВ, РАН и сурфактанти;
- *Solanum nigrum* (црна помоћница или кокошије грожђе) (Yu et al. 2023);
- Цијаниди (врбе).

Рад Austen et al. (2022) представља прво документовано истраживање које указује на укључивање микропластике у ткива коријена дрвенастих биљака. У овом пилот-истраживању, флуоресцентно обојене микропластичне перле величине 5–50 μm додане су у тло саксија са младицама бијеле брезе (*Betula pendula* Roth.) током вегетационе сезоне. Након пет мјесеци, узорци коријена анализирани су помоћу флуоресцентне и конфокалне ласерске скенирајуће микроскопије, што је открило присуство микропластике унутар коријенских ткива. Ови налази сугеришу потенцијал брезе за фиторемедијацију тла контаминираног микропластиком (Austen 2022).

9.4.2.5. Фитоволатилизација

Биљке су у интеракцији са околним земљиштем, водом и ваздухом, при чему се унос и ослобађање хемијских једињења одвија током читавог животног циклуса. Када загађујуће материје уђу у биљку, може доћи до фиторазградње, фитоизлучивања или фитоиспаривања. Деградација или метаболизам укључује трансформацију, компартментализацију и секвестрацију загађујућих материја (Yan et al. 2020).

Фитоволатилизација је погодна за испарљива и полуиспарљива органска једињења (*Volatile and Semi-volatile Organic Compounds*, *VOCs*). Овај метод је економски најефикаснији за такве молекуле, јер се најчешће налазе на великим површинама у малим концентрацијама. Главни фактори који утичу на избор биљних врста укључују еколошке услове који су повољни за раст једне врсте, док могу бити неповољни за другу. Стога, избор биљака треба да

се врши у односу на одређени екосистем или комбинацију врста. Поред тога, одређени ксенобиотици могу бити токсични за биљке, па је важно узети у обзир степен толеранције на загађујуће материје приликом њиховог избора како би се успјешно користили у фиторемедијацији (Kafle et al. 2022).

Ефикасност фитоволатилизације такође зависи од присуства микоризе, док је за компоненте растворљиве у води значајан фактор високо разблаживање због преласка у атмосферу. У климатским условима, примјена фитоволатилизације показала је позитивне резултате у *in situ* и *ex situ* пројектима, при чему је примјена *in situ* чешћа (Kafle et al. 2022)

Постоје два облика фитоволатилизације: директна и индиректна. Директна фитоволатилизација настаје увођењем загађујућих материја у биљку, његовим преносом кроз биљно ткиво и коначним испаравањем из стабљике, дебла или лишћа. Индиректна фитоволатилизација се односи на повећање волатилности загађујућих материја из земљишта као резултат активности коријена (Limmer and Burken 2016).

9.4.2.6. Зооремедијација

Употреба животиња за биоремедијацију може се постићи на три начина:

- Уклањањем загађујућих материја из одређеног подручја сакупљањем дивљих популација;
- Увођењем, узгојем и сакупљањем животиња као дио аквакултуре;
- Попуњавањем или одржавањем популације дивљих животиња, што може довести до стабилизације или деградације загађујућих материја (Gifford et al. 2007).

Зооремедијација се може изводити помоћу сљедећих механизма (Gudimov 2002):

- Зооекстракција – жетва или обрада животињске биомасе која садржи загађујуће материје. Фокус је на животињским врстама које акумулирају одређене загађујуће материје;
- Зоостабилизација – кориштење животиња за спречавање миграције загађујућих материја. То укључује одржавање или допуњавање популација дивљих животиња без сакупљања њихове биомасе;
- Зоотрансформација или зоодеградација – употреба животиња за разградњу органских загађујућих материја у мање токсична једињења. Овај процес такође подразумијева одржавање и допуњавање популације дивљих животиња без прекомјерног риболова;

- Животињски метални хиперакумулатори – животињске врсте које акумулирају високе концентрације тешких метала, нпр. > 100 mg/kg Cd, Cr, Co или Pb; > 1.000 mg/kg Ni, Cu, Se, As или Al; > 10.000 mg/kg Zn и Mn. Ова пракса ограничена је на бескичмењаке из етичких разлога.

Најчешћа група животиња које се користи у зооремедијацији су шкољке. Примјер је заједнички узгој лососа са дагњама или остригама, како би се смањило загађење хранљивих материја из отпадних вода (Stirling 1995). Остриге су смањиле ниво азота и фосфора у отпадним водама шкампа за 72% и 86%, респективно, док су концентрације замућености и хлорофила смањене за 68%. Узгој и жетва бисерних острига (*Pinctada imbricata*) може помоћи у регулисању азота у постројењима за пречишћавање отпадних вода. Спужве имају способност да филтрирају (Gifford et al. 2007).

Амато et al., у проучавању морских спужви, указују на њену еколошку улогу као филтера, са великим значајем у бентоским заједницама мора. Захваљујући свом воденом систему, они могу филтрирати велике количине морске воде, задржавајући до 80% суспендованих честица, што их чини добрим системом за биоремедијацију морске средине од различитих загађујућих материја. Интеграција система аквакултуре који комбинују повећање биомасе сунђера и њихову употребу за биоремедијацију, показала је импресивне резултате и отворила нове могућности у сектору аквакултуре. Истраживање је обухватило *in situ* и лабораторијске методе аквакултуре за производњу сунђерасте биомасе, као и за биоремедијацију морског окружења у вези са сунђером, са нагласком на микроорганизме и загађујуће материје (тешки метали, пестициди, микропластика и други) (Amato et al. 2023).

Еколошка улога шкољки у воденим екосистемима је изузетно важна, јер доприносе самопречишћавању и одржавању еколошке равнотеже. Одрасла шкољка може филтрирати до 50 литара воде дневно, чиме се значајно побољшава квалитет воде. Међутим, шкољке су осјетљиви на промјене у воденом екосистему, укључујући загађење, температурне флуктуације и промјене у нивоу воде (O'Connor et al. 2003).

Истраживање Аросса et al. (2019) показало је да шкољке *Tridacna maxima* (дивовске шкољке) активно уносе микропластику, при чему је забиљежен просјечан унос од $7,55 \pm 1,89$ полиетиленских микроперли по јединки дневно. Такође, утврђено је да око 66% микропластике бива уклоњено из воденог стуба, при чему се значајан дио микроперли причвршћује за њихове љуштуре. Ови резултати указују на потенцијал шкољки *Tridacna maxima* у биоремедијацији микропластичног загађења у морским екосистемима.

Fraissinet et al. (2024) истраживали су сезонску присутност и дистрибуцију микропластике у четири бентоска организма који се хране филтрирањем:

- *Mytilus galloprovincialis* – медитеранска дагња, шкољка која филтрира воду и често се користи као биоиндикатор загађења;
- *Sabella spallanzanii* – чланковити црв, морски многочекињаш који гради цјевасти дом и такође филтрира честице из воде;
- *Phallusia mammillata* – морски плашташ из групе плашташа (*Ascidacea*) који се храни филтрацијом и има способност апсорпције микропластике;
- *Paraleucilla magna* – врста спужве која филтрира воду и уклања честице из окружења.

Бентоски организми унутар интегрисане мултитрофичке аквакултуре (енгл. *Integrated Multi-Trophic Aquaculturesistema – IMTA*) у Мар Грандеу, Таранто – студија указује на варијације у уносу микропластике међу врстама и сезонама, што сугерише њихов потенцијал за биоремедијацију у аквакултурним окружењима.

Ларве црне војничке мухе (*Hermetia illucens*) играју кључну улогу у третману органских отпада и обнови ресурса. Оне ефикасно разграђују широк спектар отпада, укључујући прехранбене остатке и стајски гној, претварајући их у биомасу богату протеинима и мастима погодним за сточну храну. Поред тога, преостали материјал након обраде може се користити као органско ђубриво, чиме се смањује количина отпада и доприноси одрживом управљању ресурсима. Овај приступ представља еколошки прихватљиво рјешење за управљање отпадом и оптимизацију биолошких ресурса (Li et al. 2020).

Закључак

Микропластика и органске загађујуће материје све више угрожавају водене екосистеме и људско здравље, што захтијева хитне и ефикасне стратегије санације. Њихова сложена природа и интеракција са околином отежавају њихово потпуно елиминисање конвенционалним методама, што наглашава потребу за интегрисаним приступом који комбинује биолошке, физичке и хемијске процесе. Биолошке методе, укључујући фиторемедијацију, биоремедијацију и зооремедијацију, показале су потенцијал у смањењу концентрације загађујућих материја на природан и еколошки прихватљив начин. Физичке методе, као што су мембранска филтрација и адсорпција, нуде брзо уклањање микропластике, док хемијски приступи омогућавају деградацију

органских загађујућих материја, али често захтијевају оптимизацију како би се смањио негативан утицај на животну средину.

Највећи изазов у санацији микропластике и органских загађујућих материја лежи у развоју исплативих и одрживих рјешења која ће омогућити дугорочну контролу и спречавање загађења. Даља истраживања и примјена напредних технологија, као што је ензимска деградација, могу значајно побољшати ефикасност санације и допринијети очувању водних ресурса за будуће генерације.

Литература

- Ábalos M, Barceló D, Parera J, Farré M, Llorca M, Eljarrat E, Giulivo M, Capri E, Paunović M, Milacic R, Abad E (2018) Levels of regulated POPs in fish samples from the Sava River Basin. Comparison to legislated quality standard values. *Sci. Total Environ.* 647: 20–28. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.07.371
- Ahrens L, Norström K, Viktor T, Cousins AP, Josefsson S (2015) Stockholm Arlanda Airport as a source of per- and polyfluoroalkyl substances to water, sediment and fish. *Chemosph.* 129:33–8. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.03.136.
- Akdogan Z, Guven B (2019) Mikroplastics in the envoroment: A critical review of current understanding and identification of future research needs *Environ. Pollut.* 254:113011. doi:10.1016/j.envpol.2019.113011
- Aldana AD, Gil Cortés TP, Castillo Escalante V, Rodríguez-Martínez RE (2024) Pelagic Sargassum as a Potential Vector for Microplastics into Coastal Ecosystems. *Phycology.* 4(1):139–152. doi:10.3390/phycology4010008
- Alhabri OML, Basheer AA, Khattab RA, Ali I (2018) Health and environmental effects of persistent organic pollutant. *J. Mol. Liq.* 263:442–453. doi:10.1016/j.molliq.2018.05.029
- Amato A, Esposito R, Federico S, Pozzolini M, Giovine M, Bertolino M, Guida M, Guida, Manfra L, Libralato G, Zupo V, Costantini M (2023) Marine sponges as promising candidates for integrated aquaculture combining biomass increase and bioremediation. *Front. Mar. Sci. Sec. Marine Biology.* doi:10.3389/fmars.2023.1234225
- Anik A, Hossain S, Alam M, Binte SM, Hasnine M T, Rahman MDM (2021) Microplastics Pollution: A Comprehensive Review on the Sources, Fates, Effects, and Potential Remediation. *Environ. Nanotech. Monit. Manage* 16:100530. doi:10.1016/j.enmm.2021.100530
- Ansari I, Maha, El-Kady M, Mahmoud A E D, Arora C, Verma A, Rajarathinam R, Singh, Verma D, Mittal J (2024) Persistent pesticides: Accumulation, health risk assessment, management and remediation: An overview. *Desalination and Water Treatment.* 317. doi:10.1016/j.dwt.2024.100274

- Aranda F, Rivas B L (2023) Microplastics: Formation, Disposition, and Associated Dangers. An Overview. J. Chil. Chem. Soc. 68(1):5755–5761. Dostupno na: www.jcchems.com/index.php/JCCHEMS/article/view/2281
- Arossa S, Martin C, Rossbach S, Duarte CM (2019) Microplastic removal by Red Sea giant clam (*Tridacna maxima*). Environ Pollut. 252(Pt B):1257–1266. doi:10.1016/j.envpol.2019.05.149
- Austen K, MacLean J, Balanzategui D, Hölker F (2022) Microplastic inclusion in birch tree roots. Sci. Total Environ. 808:152085. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.152085
- Bajsić EG (2017) Prerada polimera interna skripta. Zavod za polimerno inženjerstvo i organsku kemijsku tehnologiju, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije. Dostupno na: www.fkit.unizg.hr
- Bautista-Zamudio PA, Flórez-Restrepo MA, López-Legarda X, Monroy-Giraldo LC, Segura-Sánchez F (2023) Biodegradation of plastics by white-rot fungi: A review. Sci. Total Environ. 901:165950. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.165950.
- Bellido-Pedraza CM, Torres MJ, Llamas A (2024) The Microalgae *Chlamydomonas* for Bioremediation and Bioproduct Production. Cells 13(13):1137. doi:10.3390/cells13131137
- Bilek MA, Soolanayakanahally RY, Guy RD, Mansfield SD (2020) Physiological Response of *Populus balsamifera* and *Salix eriocephala* to Salinity and Hydraulic Fracturing Wastewater: Potential for Phytoremediation Applications. Inter. J. Environ. Res. Pub. Heal. 17(20):7641. doi:10.3390/ijerph17207641
- Böke JS, Popp J, Krafft C (2022) Optical photothermal infrared spectroscopy with simultaneously acquired Raman spectroscopy for two-dimensional microplastic identification. Sci. Rep. 12:18785. doi:10.1038/s41598-022-23318-2.
- Boucher J, Friot D (2017) Primary microplastics in the oceans, International Union for the Conservation of Nature. 1–43. doi:10.2305/IUCN.CH.2017.01.en
- Brajesh K Singh, Allan Walker (2006) Microbial degradation of organophosphorus compounds, FEMS Microbiol. Rev. 30(3):428–471. doi:10.1111/j.1574-6976.2006.00018.x
- Bule K, Zadro K, Tolić A, Radin E, Miloloža M, Ocelić Bulatović V, Kučić Grgić (2020) Mikroplastika u morskom okolišu Jadrana. Kem. indus. 69:303–310. doi:10.15255/KUI.2019.063
- Campanale C, Marssarelli C, Savino I, Locupato V, Uricchio F (2020) Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastic and Additives of Concern on Human Health. Int. J. Environ. Res. Public Health 17:1212. doi:10.3390/ijerph17041212
- Carmen S (2021) Microbial capability for the degradation of chemical additives present in petroleum-based plastic products: A review on current status and perspectives. J. Hazard. Mater. 402:123534. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123534
- Casella C, Vadivel D, Dondi D (2024) The Current Situation of the Legislative Gap on Microplastics (MPs) as New Pollutants for the Environment. Water Air Soil Pollut. 235. doi:10.1007/s11270-024-07589-1

- Cheng YR, Wang HY (2022) Highly effective removal of microplastics by microalgae *Scenedesmus abundans*. *Chem. Eng. J.* 435(2):135079. doi:10.2139/ssrn.3976141
- Cole M, Lindeque P, Halsband C, Galloway TS (2011) Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Mar. Pollut. Bull.* 62(12):2588–2597. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.09.025
- Cunha C, Faria M, Nogueira N, Ferreira A, Cordeiro N (2019) Marine vs freshwater microalgae exopolymers as biosolutions to microplastics pollution. *Environ. Pollut.* 249:372–380. doi:10.1016/j.envpol.2019.03.046.
- Cycoń M, Mrozik A, Piotrowska-Seget Z (2017) Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: A review. *Chemosphere.* 172:52–71. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.12.129
- da Silva MRF, Souza KS, Motteran F, de Araújo LCA, Singh R, Bhadouria R, de Oliveira MBM (2024) Exploring biodegradative efficiency: a systematic review on the main microplastic-degrading bacteria. *Front. Microbiol.* 15:1360844. doi:10.3389/fmicb.2024.1360844.
- Das N, Chandran P (2011) Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. *Biotechnol. Res. Int.* 2011:941810. doi:10.4061/2011/941810
- Dey T K, Uddin M E, Jamal M (2021) Detection and removal of microplastics in wastewater: evolution and impact. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28:16925–16947 doi:10.1007/s11356-021-12943-5
- Dopico M, Gómez A (2015) Review of the current state and main sources of dioxins around the world. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 65(9):1033–49. doi:10.1080/10962247.2015.1058869
- EFSA (2016) Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA J.* 14(6):04501. doi:10.2903/j.efsa.2016.4501.
- Etim E (2012) Phytoremediation and its mechanisms: A review. *Int. J. Environ. Bioenergy.* 2:120–136.
- Fraissinet S, Arduini D, Martinez A, De Benedetto GE, Malitesta C, Giangrande A, Rossi S (2024) Seasonal occurrence and distribution of microplastics in four different benthic suspension feeders from an Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA) facility: A bioremediation perspective. *Mar. Pollut. Bull.* 207:116811. doi:10.1016/j.marpolbul.2024.116811
- Frias JPGL, Nash R (2019) Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Mar Pollut Bull.* 138:145–147. doi:10.1016/j.marpolbul.2018.11.022
- Gaur N, Korrapati N, Pydisetty Y (2018) Recent advances in the bio-remediation of persistent organic pollutants and its effect on environment. *Clean. Prod.* doi:10.1016/j.jclepro.2018.07.076
- Gibson JC (2020) Emerging persistent chemicals in human biomonitoring for populations in the Arctic: A Canadian perspective. *Sci Total Environ.* 708:134538. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134538.

- Gifford S, Dunstan RH, O'Connor W, Koller CE, MacFarlane GR (2007) Aquatic zooremediation: deploying animals to remediate contaminated aquatic environments. *Trends Biotechnol.* 60–65. doi:10.1016/j.tibtech.2006.12.002
- Goedecke C, Mülrow-Stollin U, Hering S, Richter J, Piechotta C, Paul A, Braun U (2017) A first pilot study on the sorption of environmental pollutants on various microplastic materials. *J. Environ. Anal. Chem.* 4(1):1000191. doi:10.4172/2380-2391.1000191
- Greenpeace (2019) Otklon od jednokratnog: Vodič za provedbu Direktive o plastici za jednokratnu uporabu namijenjen nacionalnim donositeljima odluka. Dostupno na: www.greenpeace.org
- Grgas D, Galant M, Štefanac T, Ladavac A, Brozinčević A, Štrkalj A, Landeka Dragičević T (2021a) Aerobni granulirani mulj u obradi otpadnih voda: mehanizam granulacije i svojstva aerobnih granula. *Croat. J. Food Technol. Biotechnol. Nutr.* 16(1–2):20–27. doi:10.31895/hcptbn.16.1-2.3
- Grgas D, Landeka Dragičević T, Štefanac T, Vukušić Pavičić T, Herceg Z, Barešić M, Toromanović M, Ibrahimpašić J, Habuda-Stanić M (2023a) Co-composting of Sewage Sludge, Green Waste and Food Waste. *J. Sust. Develop. Ener. Wat. Environ. Syst.* 11(1):1–14. doi:10.13044/j.sdewes.d10.0415
- Grgas D, Marić N, Ilić P, Habuda-Stanić M, Štefanec T, Landeka Dragičević T (2024) Water pollution and human health. In 10th International Conference WATER FOR ALL 2024-Book of Abstracts (pp 45–45)
- Grgas D, Petrina A, Štefanac T, Bešlo D, Landeka Dragičević T (2023b) A review: Per- and polyfluoroalkyl substances – biological degradation. *Toxics* 11:446. doi:10.3390/toxics11050446
- Grgas D, Rukavina M, Bešlo D, Štefanac T, Crnek V, Šikić T, Habuda-Stanić M, Landeka Dragičević T (2023c) The bacterial degradation of lignin – A review. *Water* 15:1272. doi:10.3390/w15071272
- Grgas D, Štefanac T, Galant M, Bronzičević A, Štrkalj A, Landeka Dragičević T (2021b) Biološka denitrifikacija. *Croat. J. Food Technol. Biotechnol. Nutr.* 16(1–2):28–34. doi:10.31895/hcptbn.16.1-2.4
- Gudimov A (2002) Zooremediation, a new biotechnology solution for shoreline protection and cleanup. Environment Canada Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar (AMOP) Proceedings. 25:401–412.
- Guo W, Pan B, Sakikah S, Yavas G, Ge W, Zou W, Tong W, Hong H (2019) Persistent Organic Pollutants in Food: Contamination Sources, Health Effects and Detection Methods. *Int J Environ Res Public Health.* 8;16(22):4361. doi:10.3390/ijerph16224361
- Aquaculture (IMTA) facility: A bioremediation perspective. *Mar. Poll. Bull.* 207:116811. doi:10.1016/j.marpolbul.2024.116811.
- Hahladakis JN, Velis CA, Weber R, Iacovidou E, Purnell P (2018) An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *J. Hazard Mater.* 344:179–199. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.10.014.

- Haritash AK, Kaushik CP (2009) Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) J. Hazard. Mater. 169(1–3):1–15. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.03.137
- Harms H, Schlosser D, Wick LY (2011) Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. Nat. Rev. Microbiol. 9(3):177–92. doi:10.1038/nrmicro2519.
- Harshvardhan K, Jha B (2013) Biodegradation of low-density polyethylene by marine bacteria from pelagic waters, Arabian Sea, India. Mar. Pollut. Bull. 77(1–2):100–6. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.10.025.
- Hartmann N B, Rist S, Bodin J, Jensen L S H, Schmidt S N, Mayer P, Meibom A, Baun A (2017) Microplastics as vectors for environmental contaminants: Exploring sorption, desorption, and transfer to biota. Integr. Environ. Assess. Manag. 13(3):488–493. doi:10.1002/ieam.1904
- Hassanshahian M, Emtiazi G, Cappello S (2012) Isolation and characterization of crude-oil-degrading bacteria from the Persian Gulf and the Caspian Sea. Mar Pollut. Bull. 64(1):7–12. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.11.006
- Head IM, Jones DM, Röling WF (2006) Marine microorganisms make a meal of oil. Nat. Rev. Microbiol. 4(3):173–82. doi:10.1038/nrmicro1348
- Hermabessiere L, Dehaut A, Paul-Pont I, Lacroix C, Jezequel R, Soudant P, Duflos G (2017) Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: A review. Chemosphere. 182:781–793. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.05.096.
- Hüffer T, Weniger AK, Hofmann T (2018) Sorption of organic compounds by aged polystyrene microplastic particles. Environ. Pollut. 236:218–225. doi:10.1016/j.envpol.2018.01.022
- Ilić P, Mrazovac Kurilić S, Mushtaq Z, Rashid A, Marić N, Landeka Dragičević T, Grgas D, Stojanović Bjelić LJ, Nešković Markić D, Malić N, Farooqi ZUR, Jat Baloch MY, Mehmood T, Ullah Z, Riaz S (2024) Integrated Remediation Strategies for Urban and Industrial Pollution: Insights and Applications in the Incel Project. September 2024. Conference: The fourth international conference on sustainable environment and technologies "Let's create a sustainable community" At: University "Union - Nikola Tesla", Belgrade, Serbia (pp 232–246)
- Jachimowicz P, Cydzik-Kwiatkowska A. Impact of Polyethylene Terephthalate Microplastics on Aerobic Granular Sludge Structure and EPS Composition in Wastewater Treatment. Water. 7(2):270. doi:10.3390/w17020270.
- Jahnke A, Arp H P H, Escher B I, Gewert B, Gorokhova E, Kühnel D, Ogonowski M, Potthoff A, Rummel C, Schmitt-Jansen M, Toorman E, MacLeod M (2017) Reducing uncertainty and confronting ignorance about the possible impacts of weathering plastic in the marine environment. Environ. Sci. Techn. Lett. 4(3):85–90. doi:10.1021/acs.estlett.7b00008

- Kadadou D, Tizani L, Alsafar H, Hasan, SW (2024) Analytical methods for determining environmental contaminants of concern in water and wastewater. *MethodsX*, 12:102582. doi:10.1016/j.mex.2024.102582
- Kafle A, Timilsina A, Gautam A, Adhikari K, Bhattarai A, Aryal N (2022) Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environ. Adv.* 8:100203. doi:10.1016/j.envadv.2022.100203
- Kumar M, Xiong X, He M, Tsang DCW, Gupta J, Khan E, Harrad S, Hou D, Ok YS, Bolan NS (2020) Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environ Pollut.* 265(Pt A):114980. doi:10.1016/j.envpol.2020.114980.
- Kumar P (2025) Advances in phytoremediation approach for resource recovery from wastewater. In *Biotechnologies for Wastewater Treatment and Resource Recovery* (pp 1–16). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-443-27376-6.00013-X
- Kumar RV, Kanna GR, Elumalai S (2017) Biodegradation of Polyethylene by Green Photosynthetic Microalgae. *J. Bioremediat. Biodegrad.* 8:381. doi:10.4172/2155-6199.1000381. doi:10.1016/j.cej.2022.135079
- Kumar RV, Kanna GR, Elumalai S (2017) Biodegradation of Polyethylene by Green Photosynthetic Microalgae. *J. Bioremediat. Biodegrad.* 8:381. doi:10.4172/2155-6199.1000381
- Kwon JH, Kim JW, Pham TD, Tarafdar A, Hong S, Chun SH, Lee SH, Kang DY, Kim JY, Kim SB, Jung J (2020) Microplastics in Food: A Review on Analytical Methods and Challenges. *Intern. Jour. Environ. Res. Pub. Heal.* 17(18):6710. doi:10.3390/ijerph17186710
- Li J, Zhang K, Zhang H (2018) Adsorption of antibiotics on microplastics. *Environ. Pollut.* 2018237:460–467. doi:10.1016/j.envpol.2018.02.050.
- Li Q, Zhang J, Li H (2020) The role of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) in organic waste treatment and resource recovery: A review. *Critic. Revi. Biotech.* 40(4):564–585. doi:10.1080/07388551.2019.1627398.
- Lim K, Rossbach S, Geraldi N, Schmidt-Roach S, Serrao E, Duarte C (2020) The Small Giant Clam, *Tridacna maxima* Exhibits Minimal Population Genetic Structure in the Red Sea and Genetic Differentiation From the Gulf of Aden. *Fron. Mar. Sci.* 7:570361. doi:10.3389/fmars.2020.570361.
- Limmer M, Burken J (2016) Phytovolatilization of Organic Contaminants. *Envir. Sci. Techn.* 50(13):6632–6643. doi:10.1021/acs.est.5b04113
- Liu J, Peng C, Shi X (2022) Preparation, characterization, and applications of Fe-based catalysts in advanced oxidation processes for organics removal: A review. *Environ. Pollut.* 293:118565. doi:10.1016/j.envpol.2021.118565
- Liu Z, Demeestere K, Van Hulle S (2021) Comparison and performance assessment of ozone-based AOPs in view of trace organic contaminants abatement in water and wastewater: A review, *J. Envir. Chem. Eng.* 2213–3437. doi:10.1016/j.jece.2021.105599.
- Lu R, Munroe ME, Guthridge JM, Bean KM, Fife DA, Chen H, Slight-Webb SR, Keith MP, Harley JB, James JA (2016) Dysregulation of innate and adaptive serum mediators precedes systemic lupus erythematosus classification and improves

- prognostic accuracy of autoantibodies. *J. Autoimmun.* 74:182–193. doi:10.1016/j.jaut.2016.06.001.
- Lu Y, Zhang Y, Deng Y, Jiang W, Zhao Y, Geng J, Ding L, Ren H. Uptake and Accumulation of Polystyrene Microplastics in Zebrafish (*Danio rerio*) and Toxic Effects in Liver. *Environ. Sci. Technol.* 5.50(7):4054–60. doi:10.1021/acs.est.6b00183.
- Марић Н, Гргас Д (2024) Микропластика у животној средини и кружна економија. У: Илић П, Пржуљ Н (уредници) Кружна економија. Академија наука и умјетности Републике Српске, Бања Лука, Монографија LX:247–274. doi:10.7251/PRB2401247M
- Martorell I, Perelló G, Martí-Cid R, Castell V, Llobet JM, Domingo JL (2010) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in foods and estimated PAH intake by the population of Catalonia, Spain: Temporal trend. *Environ. Int.* 36(5):424–32. doi:10.1016/j.envint.2010.03.003
- Mato Y, Isobe T, Takada H, Kanehiro H, Ohtake C, Kaminuma T (2001) Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environ. Sci. Technol.* 15.35(2):318–24. doi:10.1021/es0010498.
- McIntyre T (2003) Phytoremediation of heavy metals from soils. *Phytoremediation.* 97–123. doi:10.1073/pnas.0135855100
- Muthukumaran M, Raghavan BG, Subramanian VV, Sivasubramanian V (2005) Bioremediation of industrial effluent using micro algae. *Indian Hydrobiology,* 7(1):105–122.
- O'Connor WA, Lawler NF, Heasman MP (2003) Trial farming the akoya pearl oyster, *Pinctada imbricata*, in Port Stephens, NSW. NSW Fisheries. Dostupno na: www.dpi.nsw.gov.au
- Payá P, Anastassiades M, Mack D, Sigalova I, Tasdelen B, Oliva J, Barba A (2007) Analysis of pesticide residues using the Quick Easy Cheap Effective Rugged and Safe (QuEChERS) pesticide multiresidue method in combination with gas and liquid chromatography and tandem mass spectrometric detection. *Anal. Bioanal. Chem.* 389(6):1697–714. doi:10.1007/s00216-007-1610-7
- Perren W, Wojtasik A, Cai Q (2018) Removal of Microbeads from Wastewater Using Electrocoagulation. *ACS Omega.* doi:3.10.1021/acsomega.7b02037
- Polder A, Savinova TN, Tkachev A, Løken KB, Odland JO, Skaare JU (2010) Levels and patterns of Persistent Organic Pollutants (POPs) in selected food items from Northwest Russia (1998–2002) and implications for dietary exposure. *Sci. Total Environ.* 408(22):5352–61. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.07.036
- Råberg S, Berger-Jönsson R, Björn A, Granéli E, Kautsky L (2005) Effects of *Pilayella littoralis* on *Fucus vesiculosus* recruitment: Implications for community composition. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 289:131–139. doi:10.3354/meps289131.
- Rochman CM, Hoh E, Hentschel BT, Kaye S (2013) Long-term field measurement of sorption of organic contaminants to five types of plastic pellets: implications for plastic marine debris. *Environ. Sci. Technol.* 47(3):1646–54. doi:10.1021/es303700s.

- Rosenfeld PE, Feng L (2011) *Risks of Hazardous Wastes*. Elsevier Inc.
doi:10.1016/C2009-0-62341-2
- Ruikar A, Pawar HS. Diversity and Interaction. In: *Microbial Community Studies in Industrial Wastewater Treatment*. 2022:185. Dostupno na:
www.books.google.ba. Pristupljeno: 20.02.2025.
- Rupassara SI, Larson RA, Sims GK, Marley KA (2002) Degradation of Atrazine by Hornwort in Aquatic Systems. *Bioremediat. J.* 6(3):217–224.
doi:10.1080/10889860290777576
- Russell JR, Huang J, Anand P, Kucera K, Sandoval AG, Dantzler KW, Hickman D, Jee J, Kimovec FM, Koppstein D, Marks DH, Mittermiller PA, Núñez SJ, Santiago M, Townes MA, Vishnevetsky M, Williams NE, Vargas MP, Boulanger LA, Bascom-Slack C, Strobel SA (2011) Biodegradation of polyester polyurethane by endophytic fungi. *Appl. Environ. Microbiol.* 677(17):6076–84. doi:10.1128/AEM.00521-11.
- Sahithya K, Mouli T, Ankita Biswas, Mercy Scorlet T(2022)Remediation potential of mushrooms and their spent substrate against environmental contaminants: An overview. *Biocatal, Agric, Biotechnol.* 4.102323.1878–8181.
doi:10.1016/j.bcab.2022.102323
- Salih FZ, Tarekeg MM (2020) Cleaning polluted environments by bioremediation: Review. *Int. J. Eng. Sci. Comput.* 10(8):27112–27119
- Sergienko N, Cuervo Lumbaq E, Duinslaeger N, Radjenovic J (2023) Electrocatalytic Removal of Persistent Organic Contaminants at Molybdenum Doped Manganese Oxide Coated TiO₂ Nanotube-based Anode. *Appl. Catal. B: Environ.* 334. 122831. doi:10.1016/j.apcatb.2023.122831
- Singh B, Sharma N (2008) Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer Degradation and Stability.* 93:561–584. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.
- Singh BK, Walker A (2006) Microbial degradation of organophosphorus compounds. *FEMS Microbiol. Rev.* 428–71. doi:10.1111/j.1574–6976.2006.00018.x.
- Singh H (2006) *Mycoremediation: Fungal Bioremediation*. Online ISBN:9780470050590. doi:10.1002/0470050594.
- Štefanac T, Grgas D, Landeka Dragičević T (2021) Xenobiotics—Division and Methods of Detection: A Review. *J. Xenobiot.* 11(4):130-141. doi:10.3390/jox11040009
- Stirling H P, Okumuş B (1995) Growth and production of mussels (*Mytilus edulis* L.) suspended at salmon cages and shellfish farms in two Scottish sea lochs. *Aquaculture.* 134:193–210. doi:10.1016/0044-8486%2895%2900033-X
- Sun J, Dai X, Wang Q, van Loosdrecht MCM, Ni BJ (2019) Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Res.* 152:21–37. doi:10.1016/j.watres.2018.12.050.
- Syberg K, Khan FR, Selck H, Palmqvist A, Banta G T, Daley J, Sano L, Duchaine B M(2015) Microplastics: addressing ecological risk through lessons learned. *Environ. Toxicol. Chem.* 34(5):945–53. doi:10.1002/etc.2914
- Tanasupawat S, Takehana T, Yoshida S, Hiraga K, Oda K (2016) *Ideonella sakaiensis* sp. nov., isolated from a microbial consortium that degrades poly(ethylene

- terephthalate). *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 66(8):2813–2818.
doi:10.1099/ijsem.0.001058.
- Tang KHD (2021) Interactions of Microplastics with Persistent Organic Pollutants and the Ecotoxicological Effects: A Review. *Trop. Aqua Soil Pollut.* 1(1):24–34.
doi:10.53623/tasp.v1i1.11
- Tiwari E, Singh N, Khandelwal N, Abdolapur MF, Darbha G (2020) Application of Zn/Al layered double hydroxides for the removal of nano-scale plastic debris from aqueous systems. *J. Hazard. Mater.* 397:122769.
doi:10.1016/j.jhazmat.2020.122769.
- Turner A (2016) Heavy metals, metalloids and other hazardous elements in marine plastic litter *Mar. Pollut. Bull.* 111(1-2):136–142.
doi:10.1016/j.marpolbul.2016.07.020.
- Tušek D, Cetina I, Pehar V (2019) Suvremena sredstva za dekontaminaciju bojnih otrova: I. dio – zeoliti i metal-organske mreže. *Kemija u industriji.* 68.
doi:10.15255/KUI.2019.021a.
- Unger K (2014) Fungi Mutarium – A prototype for a future food system. Available to: <https://thisismold.com/space/farm-systems/fungi-mutarium-livin-studio>
- Velzeboer I, Kwadijk C J A F, Koelmans AA (2014) Strong sorption of PCBs to nanoplastics, microplastics, carbon nanotubes, and fullerenes. *Envir. Sci. Tech.* 48(9):4869–76. doi: 10.1021/es405721v
- Wang W, Ndungu AW, Li Z, Wang J (2017) Microplastics pollution in inland freshwaters of China: a case study in urban surface waters of Wuhan, China. *Sci. Total Environ.* 575:1369–1374. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.213
- Weir A, Westerhoff P, Fabricius L, Hristovski K, von Goetz N(2012) Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products. *Environ. Sci. Technol.* 46(4):2242–50. doi:10.1021/es204168d.
- Yan A, Wang Y, Tan S N, Mohd Yusof M L, Ghosh S, Chen Z (2020) Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Front. Plant Sci.* 11:359. doi:10.3389/fpls.2020.00359
- Zhang S, Wang J, Liu X, Qu F, Wan X, Sun Y, Li Y, Wang X (2018) Microplastics in the environment: A review of analytical methods, distribution, and biological effects. *TrAC, Trends Anal. Chem.* 111:62–72. doi:10.1016/j.trac.2018.12.002
- Zhang T, Zhang H (2022) Microbial Consortia Are Needed to Degrade Soil Pollutants. *Microorganisms.* 10(2):261. doi:10.3390/microorganisms10020261
- Zhu Z, Hu M, Wang J (2023) Photo-oxidation of micro- and nanoplastics: Physical, chemical, and biological effects in the environment. *Enviro. Sci. Tech.* 57(20):7210–7227. doi:10.1021/acs.est.3c07035

Microplastics and Organic Pollutants

Nataša Marić, Diana Grgas

Summary

Microplastics and organic pollutants are increasingly recognized as silent and persistent contaminants of the modern era, commonly present in water, soil, air, and living organisms. Their accumulation in ecosystems poses growing concerns due to their harmful effects on biodiversity, ecosystem functions, and human health. Microplastics, in particular, can adsorb toxic substances such as pesticides, heavy metals, and persistent organic pollutants, acting as vectors that increase the mobility and bioavailability of these compounds. Understanding their sources, environmental pathways, and impacts is essential for accurate risk assessment and the development of effective environmental protection strategies. This chapter provides an overview of current physical, chemical, and biological remediation methods, including bioremediation, mycoremediation, phytoremediation, and advanced adsorption techniques. Emphasis is placed on sustainable, nature-based solutions and their potential application in mitigating the negative consequences of pollution.

Keywords: Microplastics, Organic Pollutants, Detection, Removal, Remediation