

Микропластика у води: извори, одређивање, уклањање и ремедијација

Наташа Марић, Дијана Гргас, Тибела Ландека Драгичевић

Сажетак: Микропластика, ситне пластичне честице мање од 5 милиметара, постала је значајан загађивач водених система широм свијета. Извори микропластике у води укључују индустријске процесе, производњу и употребу полимерних материјала, као и деградацију већих пластичних предмета. Ове честице су изузетно стабилне; због своје отпорности на разградњу и способност адсорпције токсичних материја, микропластика може преносити загађиваче кроз ланац исхране, угрожавајући екосистеме и здравље људи.

Присуство микропластике је утврђено у води за пиће, ријекама, језерима, морима, океанима. Анализирањем извора микропластике у води, технологијом за њено одређивање и уклањање, као и ремедијационе технике усмјерене на смањење њеног негативног утицаја на животну средину, омогућава смањење присуства микропластике у воденим екосистемима, доприносећи одрживом управљању воденим ресурсима.

Кључне ријечи: микропластика у води, одређивање, уклањање, ремедијација

Цитирање: Марић Н, Гргас Д, Ландека Драгичевић Т (2025) Микропластика у води: извори, одређивање, уклањање и ремедијација. У: Илић П, Пржуљ Н (уредници) Заштита животне средине и ремедијација. Академија наука и умјетности Републике Српске, Бања Лука, Монографија LXIII: 65–99

Cite as: Marić N, Grgas D, Landeka Dragičević T (2025) Microplastics in Water: Sources, Determination, Removal and Remediation. In: Ilić P, Pržulj N (eds) Environmental Protection and Remediation. Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Banja Luka, Monograph LXIII: 65–99

3.1. Увод

Пластика представља материјал који се производи од полимерних једињења, која могу да буду природна, вјештачки модификована или синтетички добијена. Углавном се користила као замјена за стакло.

Почетком 19. вијека користили су се природни материјали који су претече пластике – колофониј, шелак и друге природне смоле. Почетком 20. вијека појавила се прва синтетичка пластика – фенолна пластика, аминопластика (пластика анилин-формалдехида), која се користила за развој електроиндустрије и у производњи инструмената. Тридесетих и четрдесетих година 20. вијека настале су алкидне смоле, акрилати, полистирен, полиетилен терефталата, флуорпластике, епоксидних смола, полиформалдехида, поликарбоната, полиамида употребом нафтних деривата. Прекомјерна употреба производа који садрже полимере у свакодневном животу, у виду амбалаже, предмета опште употребе, козметике и других разних предмета, и њихово одбацавање у виду отпада, доводи до тога да полимери завршавају у човјековој околини.

Микропластика је постала један од најистакнутијих и најтрајнијих облика загађења водених екосистема, и присутна је у готово свим сегментима животне средине – од површинских вода и морских дубина до питке воде. Ове ситне честице мање од 5 милиметара доспијевају у водене системе путем различитих извора – индустријских отпадних вода, кућних отпадних вода, атмосферским преносом и деградацијом већих пластичних предмета. Због своје хемијске постојаности, њено присуство изазива озбиљне еколошке и здравствене посљедице, јер микропластика може да адсорбује тешке метале, пестициде и друге токсичне спојеве, који се затим могу пренијети кроз ланац исхране, те представљају пријетњу по живи свијет ширећи токсичне материје, као што су, на примјер, ксенобиотици (Landeka Dragičević 2021).

Утврђивање микропластике у води је комплексан процес, који захтијева примјену софистицираних метода анализе због њених малих димензија и разноврсног састава. Савремене методе анализа пружају могућност за прецизно утврђивање присутности и концентрације микропластике у различитим врстама воде. Технолошки напредак омогућава да се развију ефикасне технологије за уклањање микропластике како би се спријечиле даље посљедице по екосистеме и здравље људи. Ремедијација водених екосистема загађених микропластиком све је значајнија у циљу заштите биодиверзитета и осигурања залиха воде за будућност.

Dr. Sherri Mason: „Микропластика није само проблем за морски живот; то је еколошка криза која утиче на сваки екосистем на Земљи“ (*"Microplastics are not just a problem for marine life; they are an environmental crisis that impacts every ecosystem on Earth."* (www.sherrimason.com))

3.2. Микропластика

Производња и употреба пластике узрок је загађења у цијелом свијету. Производња пластике на свјетском нивоу порасла је на више од 300 милиона тона годишње. У 2022. години производња је пала за 2%, док је 2023. године расла 1,2% и у 2024. години имају у плану производњу у складу са новим захтјевима и прописима који се односе на производњу, збрињавање и рециклажу пластичног отпада (Plastics Europe 2023).

Основна градивна јединица пластичних маса су органски полимери. У зависности који од полимера је заступљен, разликујмо пластичне масе и то:

- Полиетилен – PE,
- Полиетилен-терефталат – PET,
- Полипропилен – PP,
- Полистирен – PS,
- Поливинилхлорид – PVC,
- Поликарбонат – PC,
- Полиетилени високе густине – PE-HD, HDPE, HDPE.

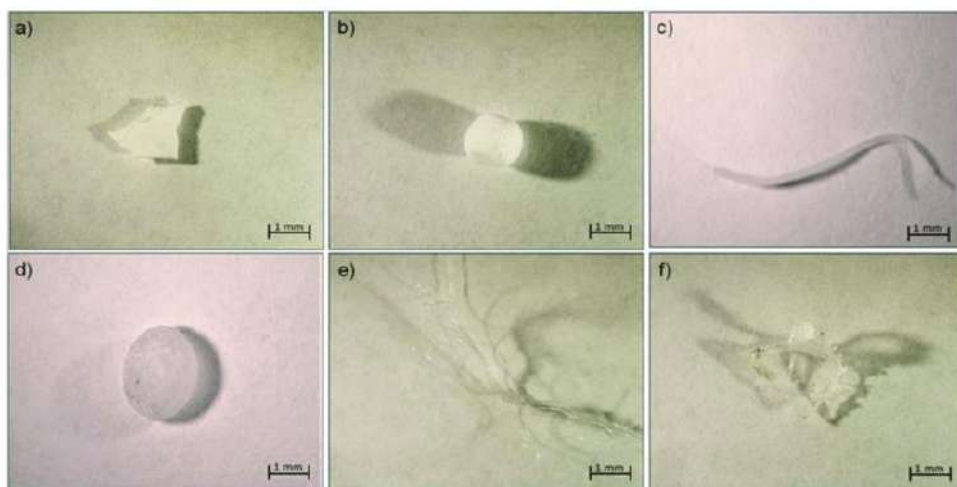
Микропластика су честице пречника од 1 микрометра до 5 милиметара (Cole 2011). Европска агенција за сигурност хране (EFSA) дефинисала је микропластику као хетерогену смјесу полимерних материјала који могу бити (Сл. 3.1) различитих облика, величина, фрагмената, влакана, пелета, филма, куглица и пахуљица у распону од 0,1 до 5 милиметара (EFSA 2016).

У зависности од начина настанка, микропластика може бити примарна и секундарна.

Примарна микропластика настала је од малих честица произведених за комерцијалну употребу (микровлакана, козметике, полиетилена и полистирена). Већина пластичних производа је направљена од индустријских пластичних пелета који су типично 5 милиметара у пречнику, а инциденти током производње, транспорта и рециклаже могу изазвати случајно испуштање пелета у отпадну воду или животну средину.

Примјери извора секундарне микропластике:

- Абразија гума возила током вожње ослобађа гумене честице које се састоје од мјешавине природне и синтетичке гуме стирен-бутадиен каучука, који обично чини око 60 посто гума возила. Ове честице се могу испрати са путева вјетром или кишом, завршавају у земљишту поред пута и одлазе у отпадне воде или директно у површинске воде.
- Ознаке на путу – боја, термопласт, полимерна трака и епоксид могу ослободити микропластику као резултат атмосферских утицаја или абразије од стране возила.
- Градска прашина је генерички назив за губитак микропластике у урбаним срединама услед кориштења и одржавања објеката и инфраструктуре, укључујући хабање ђона ципела, вјештачких спортских терена, трошење зграда.
- Прањем синтетичког текстила ослобађају се микропластична влакна која завршавају у отпадним водама. Ова влакна се обично састоје од полиестера, полиетилена, акрила или еластина.
- Поморски премази су заштитни премази и боје, који су направљени од полиуретана, епоксида или винила, и они ослобађају честице микропластике током изградње чамаца, чишћења, поправке, употребе, било директно у површинску воду или кроз отицање (Марић и Гргас 2024).



Сл. 3.1. Примјери микропластике различитих величина и облика:

а) фрагмента, б) пјена, ц) линија, д) пелет, е) влакна, ф) филм
(Marrone 2021)

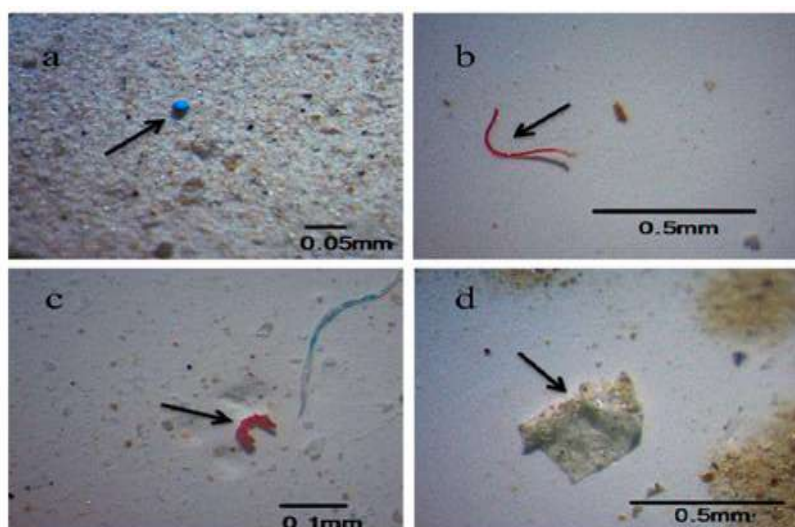
Fig. 3.1. Examples of microplastics with different sizes and shapes: (a) fragment, (b) foam, (c) line, (d) pellet, (e) fiber, (f) film (Marrone 2021)

У примарну микропластику убрајају се пластичне честице које се намјерно додају у различите производе као што су козметика, хигијенска средства, средства за чишћење и пластичне компоненте у индустрији. Ове честице се испуштају у околину током производње, употребе и одлагања, и већина заврши и животној средини, укључујући океане и мора. Према процјенама, 15–31 посто свих микропластичних честица у морима потиче од примарне микропластике. Трошење синтетичке одјеће чини 35% примарне микропластике, трошење ауто гума 28%, производи за његу лица и тијела (микрогранулице које се употребљавају за пилинг) 2% (Parga 2023).

Секундарна микропластика настаје распадањем, односно разградњом већих комада пластике као што су кесе, флаше, рибарске мреже и чини 69–81% микропластике у мору. Настаје разлагањем већих комада пластике који се фрагментису услед физичких, хемијских или биолошких процеса (ултраљубичасто зрачење, вјетар, таласи итд.).

Један од значајних проблема везан за микропластику је чињеница да се не разграђује лако. За неке од ових честица потребне су стотине или хиљаде година да се разграде, због чега се сматрају значајним загађивачима животне средине (Akdogan 2019).

Поред различитих облика, микропластика се појављује и у различитим бојама (Сл. 3.2): црвена, бијела, плава, зелена, црна, љубичаста, жута, смеђа и провидна (безбојна) (Zhang 2018).



Сл. 3.2. Боја микропластике (Zhang 2018)

Fig. 3.2. Microplastic color (Zhang 2018)

Један од примарних проблема везаних за микропластику је њен негативни утицај на организме који су јој изложени. Утицај микропластике на животну средину може бити:

1. Хемијског карактера, услед штетних хемикалија везаних за пластику.

Хемијске особине микропластике се могу сврстати у двије категорије:

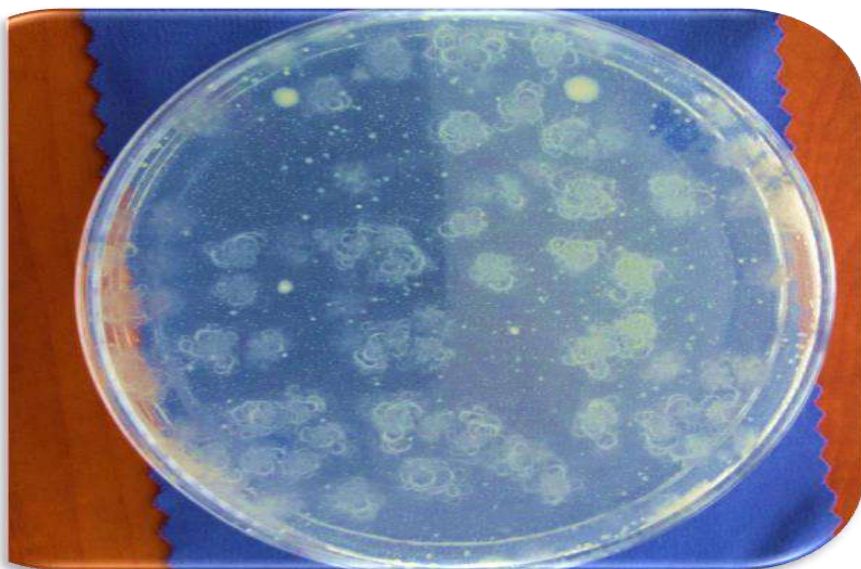
- прва категорија обухвата адитиве који се користе у процесу производње,
- друга категорија обухвата материје које се апсорбују на честице микропластике.

У групу изузетно штетних адитива спадају бисфенол А, фталати, бромирани ретарданти (успоривачи) пламена и други (Campanale 2020).

2. Физичког карактера (облика и величине)

Научници су утврдили присуство микропластике у нашем окружењу, укључујући мора, ријеке, ријечне делте, језера, тло и атмосферу. Истраживања су потврдила да се микропластика може наћи у разним морима и океанима, као што је Средоземно море, Тихи океан, воде Арктика, Кинеско море итд. Један од главних проблема везаних за овај тип загађења је да микроорганизми који живе у овим водама уносе у свој организам микропластику која потом има негативни ефекат на њих (Zhang 2018). У ријекама, ријечним делтама и воденим организмима, укључујући рибе, утврђено је присуство микропластике, што указује на распрострањеност и утицај овог загађивача у воденим екосистемима (Akdogan 2019). Друга истраживања тврде да изложеност живог свијета овом типу загађења доводи до сметњи у развоју, репродукцији и повишеном степену смртности (Марић и Гргас 2024). Редукцијом полимерног материјала са макро на микро величину, насталу као резултат различитих физичких (абразија, ерозија, рад таласа), хемијских (фотооксидација, оксидоредукцијски процеси), ултраљубичасто зрачење, корозија, изложеност високим температурама, настаје секундарна микропластика у животној средини (Othman 2021). Детерџенти и хемикалије на бази натријум-хипохлорида се не препоручују због каталитичког дјеловања на издвајање бисфенола који су потенцијална опасност за здравље (Olsson 2004).

Услед утицаја фактора који утичу на старење и деградацију полимерне амбалаже, она постаје погодна подлога за развој различитих врста микроорганизама (Сл. 3.3) и формирање биофилма (Сл. 3.4). Формирањем биофилма у повољним условима (Сл. 3.5), када има довољно храњивих материја, на површини се врши брза колонизација који се одвија на сувој, чврстој површини код које је микроморфолошки образац организован (Kwiatkowska 2024).



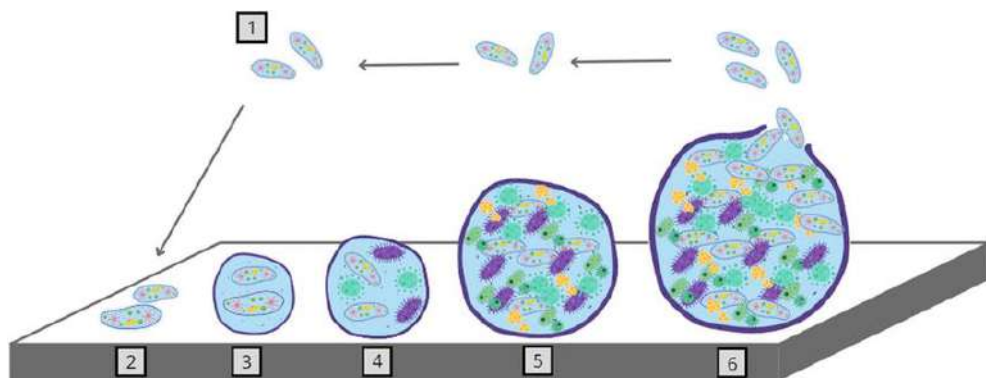
Сл. 3.3. Анализа биофилма из поликарбонатног галона АВ 30 °C (UBB/30) на подлози за укупан број инкубација 48 сати на 30 °C (Марић и Гргас 2024)

Fig. 3.3. Analysis of biofilm from Polycarbont gallon AB 30 °C (UBB/30) on substrates for total incubation 48 hours at 30 °C (Марић и Гргас 2024)



Сл. 3.4. Формирање биофилма на дну РС галона (фотографија: Марић Н)

Fig. 3.4. Biofilm formation at the bottom of the PC gallon (photo: Marić N)



Сл. 3.5. Фазе формирања биофилма: (1) слободно-живеће бактерије, (2) реверзибилна адхезија, (3) иреверзибилна адхезија, (4) формирање микроколонија, (5) зрела форма биофилма, (6) дисперзија и миграција ћелија из биофилма (Kwiatkowska 2024)

Fig. 3.5. Stages of biofilm formation: (1) free-living bacteria, (2) reversible adhesion, (3) irreversible adhesion, (4) formation of microcolonies, (5) mature biofilm form, (6) dispersion and migration of cells from the biofilm (Kwiatkowska 2024)

Према истраживањима Уједињених нација, у морима се налази 52 трилиона честица микропластике, што је 500 пута више него што има звијезда у галаксији. Микропластику могу појести неке од морских животиња и тако она доспијева у прехранбени ланац и храну за људе. Микропластика је пронађена у храни, пићу, укључујући пиво, мед и воду. Још се не зна тачно какве посљедице може да има по здравље људи, с обзиром на то да пластика садржи додатке, адитиве који могу бити штетни за животиње и људе (Marić 2024).

У зависности од узорка деградације, тј. разградње, разликује се (Cole 2011):

- биоразградња која се одвија помоћу микроорганизама,
- фоторазградња која се одвија уз помоћ свјетлости, укључујући инфрацрвено и ултраљубичасто зрачење,
- термално разлагање које се одвија при високим температурама,
- хидролитичка разградња кроз реакцију микропластике са водом,
- термооксидативна разградња, која представља спору оксидативну разградњу.

Хемијске особине микропластике потичу од особина пластике. Изложеност живог свијета овом типу загађења доводе до сметњи у развоју, репродукцији и повишеном степену смртности. Кретање пластичних честица у животној средини је сложено и вођено многим факторима, укључујући вјетар, морске

струје, густину честица, величину и облик (Сл. 3.1). Гушћа микропластика се може акумулирати у седиментима на дну океана, што може довести до њихове акумулације у ланцу исхране (Boucher 2017).

Аеробни гранулирани муљ (АГС) представља обећавајућу технологију у обради отпадних вода из домаћинства и индустрије. АГС технологија има потенцијал да смањи инфраструктуру и оперативне трошкове третмана отпадних вода (Grgas 2021a, 2021b). Ефикасност задржавања микровлакана у процесу пречишћавања отпадних вода у просјеку је 72 процента на примарни третман, 88 процената за секундарни третман и 94 процента за терцијарни третман (Marić 2024).

У регионима гдје је удио домаћинства прикључених на третман отпадних вода низак, значајно је ослобађање микропластике, док је у регионима гдје је третман отпадних вода чешћи, већи је удио микропластике заробљене у муљу после третмана отпадних вода (Boucher 2017). Одлагање муља представља велики изазов за постројење за пречишћавање отпадних вода. Европска унија улаже напоре у циљу смањења количине органских материја (Grgas 2023a). Аеробни гранулирани муљ (АГС) представља обећавајућу технологију у третману отпадних вода из домаћинства и индустрије (Grgas 2021).

Компостирање муља и органског отпада (зеленила и отпада од хране), утицај компоста на животну средину као органске промјене земљишта кроз повећање органске материје у земљишту, витална је стратегија усклађености са политиком за рјешавање отпада у Европи (Grgas 2023).

Микропластика је присутна и у Јадранском мору и оно је једно од загађенијих мора у Европи по садржају микропластике. Присуство велике количине микропластике у Јадранском мору потиче из индустријских приобалних фабрика, од становништва, туризма. Велика количина доспијева морским струјама од држава које су Албанија и Италија. Утврђена је велика количина у тршћанском заливу, чија просјечна концентрација износи 406.000 честица/km², а узрок су ријеке оптерећене микропластиком (Кућић 2020).

3.3. Микропластика у воденом екосистему

Вода се у природи појављује у хемијски чистом облику, а на свом путу раствара и апсорбује различите супстанце. Од врсте и количине растворених супстанци зависе и карактеристике воде. По својој природи вода се може подијелити на: атмосферску, површинску и подземну, што се види на илустрацији кружења воде у природи (Сл. 3.6). Вода је један од основних ресурса за људску цивилизацију и за одржавање живота на земљи. Према неким

истраживањима, процијењено је да се на планети Земљи налази око 1.386 милиона кубних километара воде, у различитим облицима и агрегатним стањима. Највећим дијелом распрострањена је у хидросфери (98,31 посто), а највећи удио чини слана вода (69,9 посто). На планети Земљи процјењује се да има свега 2,52% слатке воде која је највећим дијелом заробљена у облику вјечног снијега и леда (око 69,9%), а преостали дио од укупне количине слатке воде су подземне воде (око 30 посто) и атмосферска вода (Marić 2024).



Сл. 3.6. Илустрација кружења воде у природи (www.istockphoto.com)

Fig. 3.6. Illustration of the water cycle in nature (www.istockphoto.com)

Да би се утврдила микропластика, потребно је урадити узорковање воде, издвојити микропластику из узорка воде и, ако је потребно, одстранити органске и неорганске материје. Методе узорковања сличне су за све водене екосистеме. Због разлике у густини слатке и слане воде, микропластика се може очекивати у воденим ступцима на дубинама.

3.3.1. Микропластика у води за пиће

Поред присуства микропластике у морима, ријекама, језерима, све више се скреће пажња на присуство микропластике у води за пиће. Методологију за утврђивање присуства микропластике у води за пиће проводи ЈРЦ (JRC – Joint Research Centre), који пружа независно знање и научна сазнања заснована на доказима, подржавајући политике Европске уније да позитивно утичу на друштво. Методологија коју је развио ЈРЦ подржава Директиву о води за пиће у важном домену праћења микропластике у води из славине у ЕУ. Иако је уопштено прихваћено да микропластика може бити присутна у води за пиће, утицаји на здравље људи и даље остају неизвјесни, првенствено због недовољног разумијевања њеног присуства и дистрибуције. У оваквим случајевима европско законодавство води записе и пружа нам правне алате за увођење мјерења нових загађивача. Да би се дефинисала методологија, научници из ЈРЦ-а користе базу научних сазнања о природи, дистрибуцији и количинама микропластике. Показало се да је количина микропластике у води за пиће генерално нижа од неколико десетина честица по литри воде, а новије студије спроведене у Европи показују ниже или више нивое (0–0,6 честица по литри) (EFSA). Праћење микропластике у води за пиће је кључан корак у заштити здравља људи и животне средине.

Мјерење микропластике представља велики изазов, јер се она у великој мјери разликује по величини, облику, саставу и хемијском идентитету, што отежава напоре да се прецизно процијени њихово присуство. Графикон 3.1 (ЈРЦ 2024) приказује концентрацију микропластике по земљама и регионима, са укљученим тракама грешке, као што је изнесено у студијама које се фокусирају на једну земљу (Marić 2024).

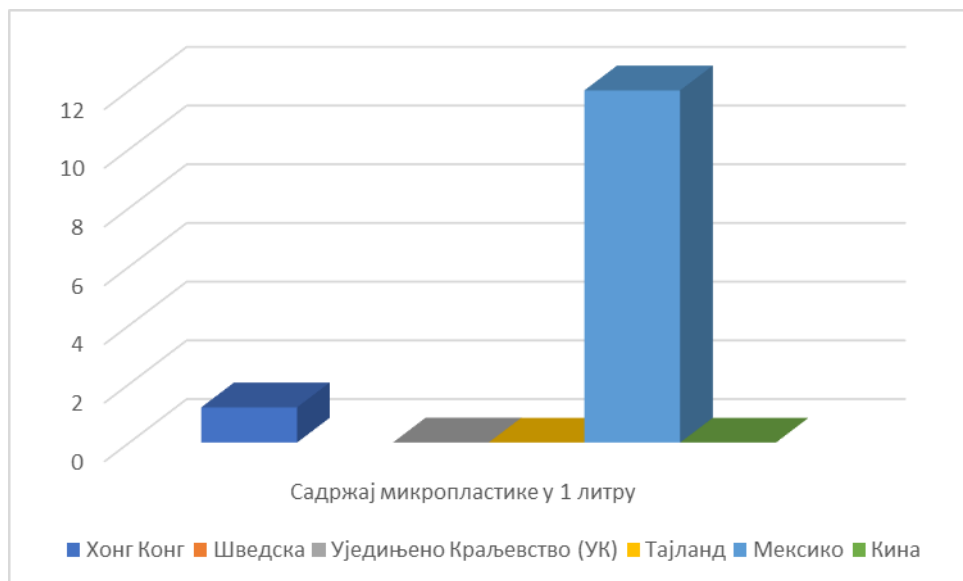
Кључни индикатор за одабир аналитичке методе је потребна количина воде која ће се користити приликом узорковања (> 50 литара) (JRC/BAM 2021).

Најчешћи полимери у води за пиће су: полиетилен, полиетилен-терефталат, полиестер који није PET и полипропилен. За узимање узорака потребно је најмање 1.000 литара за квантификацију микропластике. Узорци се скупљају кориштењем филтера различитих микронских величина (од 100 μ и 20 μ), да би се прикупиле чврсте материје у двије величине.

Узорци се затим анализирају једном од двије могуће методе: инфрацрвеном или раманском микроскопијом (Сл. 3.7) (Kleut 2015).

Раманска спектроскопија добила је име по индијском физичару Ч. В. Раману, који је за своје откриће 1930. године добио Нобелову награду. Раманов ефекат јесте нееластично расијавање свјетлости на неком материјалу. Ако на испитивани материјал падне снап монохроматске свјетлости веома мали дио

(од 1 до 10^8 фотона) свјетлости ће имати већу или мању таласну дужину у односу на упадни сноп свјетлости. Раманском спектроскопијом се анализирају вибрациони прелази молекула (Jones 2019).



Граф. 3.1. Измјерена микропластика у Европи и шире (JRC 2024)

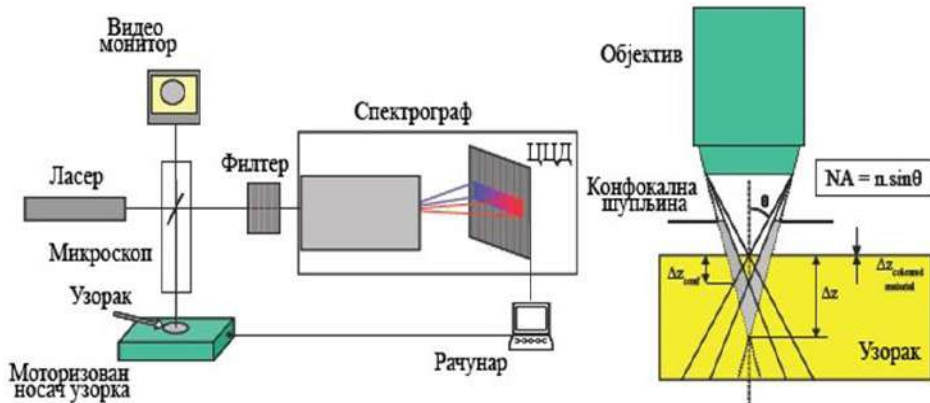
Graph. 3.1. Microplastic measured in Europe and beyond (JRC 2024)

Рамански помјерај не зависи од таласне дужине упадног снопа свјетлости, већ искључиво зависи од структуре молекуле у којој се дешава расијавање. Инфрацрвени спектар настаје апсорпцијом инфрацрвеног зрачења од стране узорка. Рамански спектар настаје расијавањем свјетлости по видљивом дијелу и ултравиолентној области на молекулама узорка (Граф. 3.2). Расијавање се јавља уколико вибрација мијења поларизованост молекула. Инфрацрвеном спектроскопијом се детектују асиметричне вибрације, а раманском спектроскопијом симетричне вибрације у молекулама и због тога су ове двије методе комплементарне (Vöke 2022).

Ове технике омогућавају идентификацију типа полимера, његове величине и да ли је у питању честица или влакно – све ове информације могу у будућности бити релевантне за разумијевање природе и наше изложености микропластици.

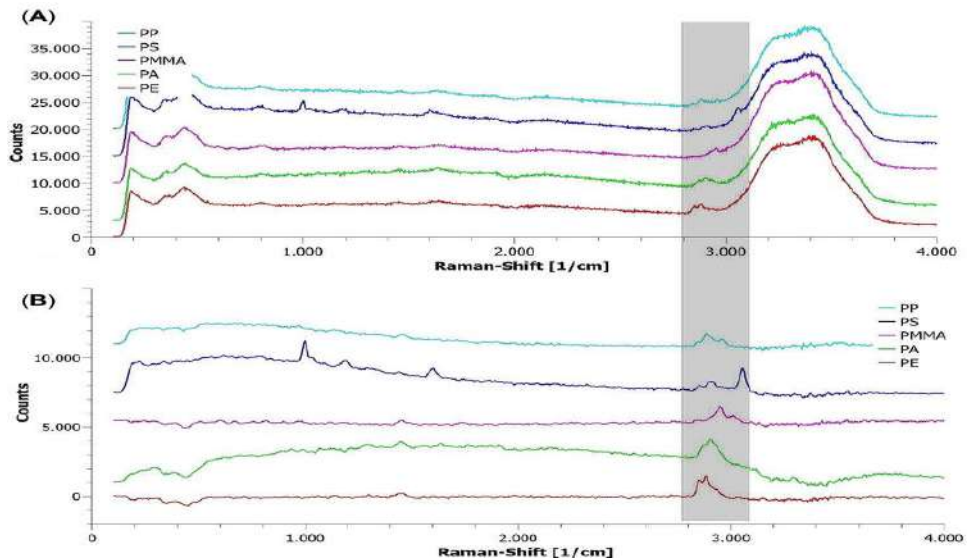
Европска комисија покренула је развој законодавства потребног да се ухвати у коштац са потенцијалном пријетњом микропластике по здравље људи и животну средину. Међу иницијативама преиначена је Директива о води за

пиће. Главни закон ЕУ о води за пиће покрива и приступ и квалитет воде намијењене за људску употребу ради заштите здравља људи (Marić 2024).



Сл. 3.7. Раманска спектроскопија (Kleut 2015)

Fig. 3.7. Raman spectroscopy (Kleut 2015)



Граф. 3.2. Раманов спектар индивидуалних микропластичних честица снимљених у води (Kniggendorf et al. 2019)

Graph 3.2. Raman-spectra-of-individual-microplastic-particles-recorded-in-tap-water-streaming (Kniggendorf et al 2019)

Према допуњеној Директиви о води за пиће, Комисија је овлаштена да успостави методологију за мјерење микропластике у води за пиће. Методологија коју је развио ЈПЦ уграђена је у Делегирану одлуку Европске комисије, усвојену 11. марта 2024. године. Овом одлуком успостављена је прва листа супстанци и једињења за које је забрањено да се налазе у води намијењеној за људску употребу. Листа за праћење указује на оријентациону вриједност за сваку супстанцу и једињење и гдје је потребна могућа метода анализе.

3.3.2. Микропластика у ријекама

Узорковање микропластике у ријечном систему се разликује од узорковања у морском систему (Сл. 3.8). Неколико фактора, укључујући хидролошке услове водног тијела (нпр. густина воде, струје, вјетар, таласи), временски и географски фактори одређени обликом ријеке, морфологијом и метеоролошком ситуацијом, утицаће на пут микросмећа у сливу. Ове природне елементе треба узети у обзир приликом израде стратегије узорковања и праћења микропластике (Marić 2024).

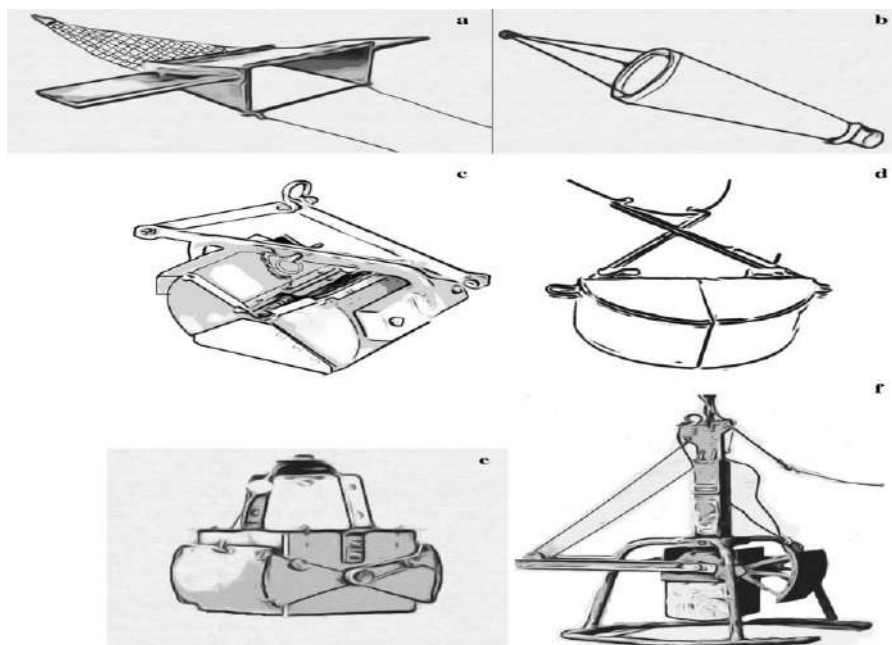
На дистрибуцију, бројност, тип микропластике у воденом систему утичу њихова физичко-хемијска својства (облик, величина, густина), различите варијабилности ријеке, као што су дужина ријеке, величина слива, густина насељености. Сви ови фактори утичу на транспорт и понашање микропластике (Campanale 2020).

Услед минималне величине, тежине и релативне густине (густина микропластике се обично креће 0,9 и 1,5 g/cm³), микропластика плута по површини. Узорковање је пожељно вршити по површини и гдје је могуће у воденом стубу.

Процеси као што су вјетрови, хидродинамичке промијене, деградација, седиментација, апсорпција, ресуспензија, гутање и излучивање микропластике од стране биоте, играју кључну улогу у транспорту микропластике и њеној акумулацији, што резултира комплексном и динамичком равнотежом која доноси хоризонтално и вертикално кретање честица, као и таложење у подручјима таложења. Узорковање треба разликовати између сакупљања водене фазе (површинске воде, водени стуб), седимената и биота, што је значајно за постизање потпуне слике присуства и дистрибуције микропластике у цијелом воденом систему и утицају на животну средину (Campanale 2020).

Методологија за мјерење микропластике у ријекама средње и велике величине – поступак се заснива на мјерном уређају са мрежама за узорковање, које су распоређене на три различите дубине воденог стуба да би се

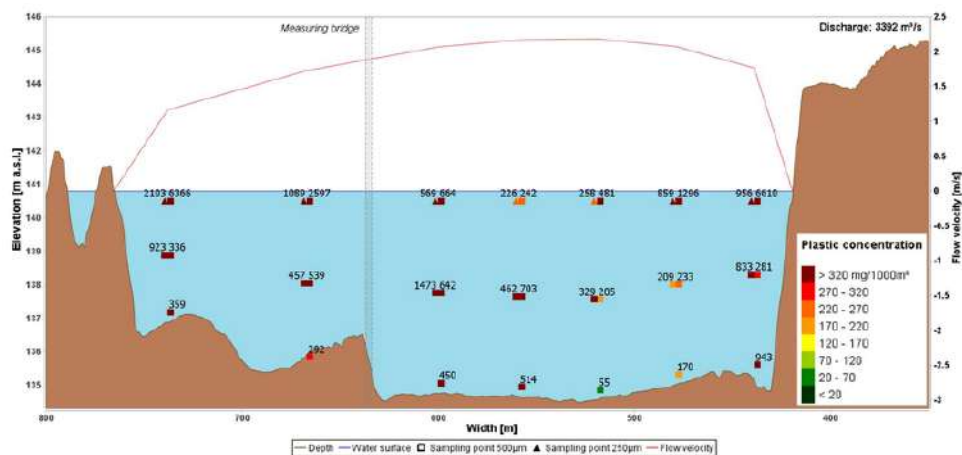
симултано обезбиједили узорци са три различите дубине: на површини воде, на средини воденог стуба и близу дна уређај. Ова методологија тестирана је на Дунаву (Сл. 3.9) у Аустрији (Liedermann 2018).



Сл. 3.8. Алати за узорковање микропластике у студијама слатководних екосистема: а) манта мрежа, б) планктонска мрежа, ц) мали понар узоркивач, д) Ван Вин узоркивач, е) Екманов узоркивач, ф) узоркивач (корер) у облику кутије, г) узоркивач (корер) за седименте (Razeghi 2021)

Fig. 3.8. Microplastics sampling tools in freshwater studies; a) manta trawl, b) plankton net, c) Petite ponar grab d) Van Veen garb, e) Ekman grab sampler, f) box corer, g) sediment corer (Razeghi 2021)

На основу релативно ниских концентрација микропластике, њено узорковање на површини воде генерално захтијева филтрацију воде или прикупљање велике количине узорака користећи Неутсона (Манта), Бонго, планктонску мрежу користећи различите величине отвора, узорковања у којима се смањује запремина воде док не остану само честице од интереса за даљу обраду у лабораторији.



Сл. 3.9. Резултати мјерења микропластике у Дунаву (Аустрија) (Liedermann 2018)
 Fig. 3.9. Measured microplastics in Danub river (Austria) (Liedermann 2018)

Након спроведеног испитивања са мрежама различите финоће, закључено је да мреже са малим отворима нису погодне за ријеке гдје брзина струјања воде износи 2–3 m/s. Прикупљени узорци су сушени на 50 °C (Сл. 3.11), након чега су разврстани. Као микропластика посматране су честице мање од 5 mm. Мрежа отвора 250 микрометара је накупила мању количину у односу на мрежу од 500 микрометара. Узрок за то био је отпор приликом протока воде кроз мрежу (Liedermann 2018). У ријечним срединама прикупљање микроластике може се вршити динамички и стационарном методом узорковања (Сл. 3.10).



Сл. 3.10. Узорковање микропластике: а) динамичко узорковање микропластике, б) стационарно узорковање микропластике (Liedermann 2018)

Fig. 3.10. On the right, an example of stationary and levodynamic sampling of microplastics with three plankton nets carried out in the middle of river (Liedermann 2018)

3.3.3. Микропластика у језерима

У језерима су присутне велике количине органских материја. Језера су подложна еутрофикацији, услед чега долази до накупљања органских материја, тј. формирања биофилма на честицама микропластике. Приликом утврђивања микропластике на мреже се хвата велика колчина органских материја (алги и сл.). Да би се добио мјеродаван податак, потребно је елиминисати органске материје из узорка. Методологија за анализу присуства микропластике у морима може се примијенити и на језера. Узорци материјала који остају на каскадним ситима, величине отвора 5,6 mm и 0,3 mm, испирају се водом под притиском, затим суше се у сушионику на 90 °C 24 сата. Након сушења, узорцима, који се подвргавају оксидацији, додаје се 20 ml FeSO_4 , 0,05 M и 20 ml 0,05 M H_2O_2 30%. Припремљени узорак се полако загријава до температуре од 75 °C и на овој температуре грије се 30 минута, док се визуелно не констатује да нема органске материје. Уколико је и након 30 минута присутна органска материја, поступак се понавља док се не раствори сва органска материја. Затим се додаје око 6 g NaCl на 20 ml раствора, да би се повећала густина и створили услови да пластичне честице плутају. Онда се врши микроскопирање плутајуће честице микроскопским увећањем 40x, при чему се раздваја микропластика. Наведени поступак анализе може се примијенити и на узорке из ријека гдје је присутна већа количина органске материје.



Сл. 3.11. Пробна обрада (а) и (б) каскаде за раздвајање материјала, (ц) ручно сортирање помоћу воде и NaCl, (д) узорци у сушионику, (е) примјер честица микропластике из узорка (Liedermann 2018)

Fig. 3.11. Pictures showing the sample processing: (a) and (b) examples of the sieving cascade for splitting the material, (c) manual sorting using water and NaCl, (d) samples in the drying stove, and (e) example showing plastic particles of one sample (Liedermann 2018)

3.3.4. Микропластика у седиментима (наносима)

Пластични остаци у седиментима корита ријека могу се прикупљати грабљењем или гребањем са дна и бочних наноса. Они се могу појављивати у различитим облицима, укључујући пјене, филмове, траке, влакна, листове и друге сличне структуре. С обзиром на то да се микропластика може наћи у било којем дијелу воденог стуба у слаткој води, може доћи и од таложења у седиментима на дну ријека и језера. У ријекама микропластика која се налази у седиментима временом може поново доспјети у воду услед струјања (протицања), када долази до ерозије ријечног дна. Када је брзина струјања ријека веома мала, може доћи до таложења честица микропластике, посебно у случају када су на њима органска или нека друга једињења. Прикупљени узорак укључује почетну дезагрегацију осушених седимената, затим се седименти просијавају кроз систем сита од 5 до 0,3 mm. Микропластика сакупљена на сити од 0,3 mm се подвргава влажној пероксидној оксидацији (VPO) у присуству FeSO_4 , као катализатора, да би се уклонила лабилна органска материја, при чему пластични остаци остају непромијењени. Смјеса се подвргава раздвајању по густини, додавањем NaCl, да би се пластични остаци изоловали флотацијом (плутањем). Плутајући пластични остаци се одвајају у сепараторима пропуштајући кроз филтер од 0,3 mm, осуше се на ваздуху, а добијени материјал мјери се да би се одредила концентрација микропластике.

Метода је примјењива за одређивање масе PE (0,91–0,97 g/ml), PP (0,94 g/ml), PVC (1,4 g/ml) и PS (1,05 g/ml). Пластични остаци анализирани овом методом сматрају се микропластиком и имају величину од 5 mm до 0,3 mm. Овом методом микропластични остаци се дефинишу као чврсти материјали одређених величина који не реагују и не разграђују се током хемијског процеса влажне оксидације кориштењем водоник-пероксида, показују флотацију у 5 M NaCl раствора и пролазе позитивну инспекцију под микроскопским увећањем 40x (Masura 2015).

3.4. Уклањање и ремедијација микропластике из животне средине

Од настанка микропластике, преко мјера редуковања, значајно је њено уклањање и ремедијација из животне средине. Разградња пластике у животној средини је изузетно спор процес због њене полимерне структуре, хидрофобности. За поједине врсте пластике потребно је и до хиљаду година да се разгради (Pramila 2011). Зависно од типа (врсте) технике, ремедијације се

могу подијелити на: физичке, хемијске и биолошке. Отпадне воде се обрађују различитим поступцима и технологијама у складу са смјерницама и прописима који се односе на заштиту воде и животне средине. Одабрана технологија обраде отпадних вода треба да је у складу економске, социјалне одрживости и животне средине. Разликују се технологије примјењиве за третман воде и земљишта. Приступи се додатно разликују и у погледу коришћеног механизма, ефикасности и врсти микропластике коју је могуће уклонити, и као такви имају своје предности и недостатке. Постоји и подјела на конвенционалне и иновативне методе (Anik 2021).

За ремедијацију водених екосистема примјењују се коагулација, филтрација, мембрански процеси и адсорпција и могу се сврстати у конвенционалне методе. У иновативне метода убрајају се електрокоагулација, фотокаталитичка деградација, магнетна сепарација (екстракција) и електрохемијска оксидација.

Пиролиза и фотокаталитичка деградација се сматрају ефикасним за третман микропластике у површинском слоју земљишта. Фиторемедијација и дјеловање микроорганизама показали су се као одржива метода за земљиште на дубини коријена биљака.

3.4.1. Физичке методе

Физичке методе омогућавају уклањање микропластике из отпадних вода са ефикасношћу већом од 95%, док се технологија мембранских биореактора тренутно сматра најефикаснијом (Vitalla 2018). Подразумијева комбинацију мембранске филтрације, укључујући микро и ултра филтрацију, биолошке процесе којима се омогућава уклањање загађивача различитих концентрација ефлуент високог квалитета. Негативни аспекти су неекономичност, додавање храњивих састојака за микроорганлизме и хабање мембрана (Osman 2023).

Адсорпција је широко примјењива метода за уклањање полутаната из отпадних вода. Кориштени адсорбенти за уклањање микропластике су хитин и графен-оксид, док је комбинација оксида цинка и алуминијума достигла значајну ефикасност за уклањање микро и нано пластике чак и до 100% на pH 4 (Tiwarī 2020). Селективност материјала адсорбента према микропластици је ограничавајући фактор. Процес адсорпције се базира на Van der Waalsovim силама и измјени јона. За уклањање микропластике адсорпцијом користе се морске алге, као што је смеђа алга *Fucus Vesiculosus* (мјехурасти брачић) и спужве (Lim 2020).

3.4.2. Хемијске методе

У хемијске методе ремедијације спадају: електрокоагулација, пиролиза и фотодеградација.

Електрокоагулација се сматра најефикаснијом методом, са степеном уклањања око 90% (Perren 2018). Овом методом могу се третирати различите врсте отпадних вода, при чему се ствара мања количина отпада, смањује се вријеме извођења методе и неопходни трошкови, и обезбјеђује се енергетска ефикасност. Недостаци су честа замјена аноде и пасивизација катоде (Kim 2021).

Пиролиза је термохемијски процес којим се дуги ланци полимера цијепају у мање, једноставније молекуле под утицајем температуре и притиска. Ова метода показала се као еколошки прикладнија метода (Yansaneh 2022). Недостатак пиролизе је генерисање гасова са ефектом стаклене баште и аромата, који захтијевају даљи третман у циљу смањења штетних ефеката. Према неким истраживањима гасови се могу искористити за добијање топлоте или електричне енергије (Venturelli 2022).

Фотодеградација се врши под утицајем ултраљубичастог зрачења и доводи до кидања веза између ланаца полимера и настајања дугих (не)полимерних молекулских формација. Ова метода је неинвазивна и економична у већим размјерама. Недостатак ове методе је секундарно загађење.

3.4.3. Биолошке методе

Физичке и хемијске методе ремедијације могу имати негативан утицај на природу и пореметити функционисање екосистема, а захтијевају и већа финансијска улагања за извођење. Методе биоразградње немају штетних ефеката и представљају еколошки приступ у управљању пластиком.

У биолошке методе ремедијације спадају: разградња микропластике бактеријама, гљивама, алгама, фиторемедијација (биљкама, дрвећем).

3.4.3.1. Биоремедијација

Биоремедијација користи микроорганизме (бактерије, гљиве) за разграђивање органских и неких неорганских загађивача. Микроорганизми се природно јављају у загађеним подручјима или се додају. Употреба мјешовите микробне културе у гранулисаном облику одређених сојева аутотрофних и

хетеротрофних бактерија, које формирају микроколоније приликом третмана отпадних вода, тј. биоразградње, показала се ефикасна у зависности од параметара животне средине (Landeka Dragičević 2004). Уклањање азо фарбе биоразградњом из отпадних вода текстилне индустрије показало се ефикасним (Landeka Dragičević 2011). Примјењује се на загађења нафтом, пестицидима, тешким металима, органским растварачима и у новијим истраживањима на микропластици (*Aspergillus niger*, *Pseudomonas*). Експеримент је изведен са скупом шест различитих врста бактерија које заједно чине конзорцијум, односно организовану групу бактерија које заједнички дјелују у одређеном процесу – родова *Pseudomonas* (два соја), *Flavobacterium* (два соја), *Corynebacterium* (један сој) и *Bacillus* (један сој) изолованих из отпадних вода хемијске индустрије који пречишћавају активни муљ (Zapoški 2010). Примјена квасаца *Trichosporon cutaneum* и *Geotrichum candidum* показала се ефикасна за детоксификацију, уклањање фенолних једињења и обезбојења отпадних вода која настају при производњи маслиновог уља (Landeka Dragičević 2011). Истражен је и потенцијал мљечних отпадних вода за процес денитрификације помоћу микробне културе нитрификаната и денитрификаната (Landeka Dragičević 2018). *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, *Mycobacterium sp.* и *Nocardia sp.* јесу бактерије које разграђују PE (Carmen 2021). Биоремедијација подразумијева скуп различитих метода у којим се користе одређени микроорганизми у циљу разградње и уклањања загађења, као што су *Ideonella*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Mycobacterium*, *Delfia*, *Gordonia*, *Bacillus*, *Ralstoni*, *Stenotrophomonas*, *Rhodococcus*, *Staphylococcus*, *Streptomyces* (Cai 2023). Методе биоремедијације могу бити:

- *In situ* биоремедијација – ремедијација се одвија директно на загађеној локацији;
- *Ex situ* биоремедијација – загађени материјал се уклања са локације, ради третмана у контролисаним условима.

Предности биоремедијације су што је еколошки прихватљива, не нарушава животну средину и смањује употребу хемикалија.

Бактерије које разграђују пластику су:

- *Ideonella sakaiensis* – разграђује PET;
- *Pseudomonas putida* – разграђује PS;
- *Rhodococcus ruber* – разграђује PE;
- *Stenotrophomonas maltophilia* – показује потенцијал за разградњу микропластике (da Silva 2024).

Механизам разградње бактеријама и гљивама, које за разградњу микропластике користе ензиме који прекидају полимерне ланце пластике, обично укључује сљедеће кораке:

- Колонизација пластике – вежу се за површину и почну производити ензиме;
- Ензимска разградња – ензими разбијају молекуларне везе унутар пластике, долази до фрагментације;
- Метаболизам фрагмената – микроорганизми користе фрагменте пластике као извор угљеника и енергије, претварајући их у једноставне молекуле угљен-диоксид, воду или биомасу.

Предности ове методе су бројне: микроорганизми су еколошки прихватљиво рјешење, нема употребе хемикалија нити великих улагања, процес може бити природан и може се користити *in situ* у загађеним водама или земљишту.

Ограничења су што је процес разградње микропластике спор и зависи од врсте пластике и специфичних микроорганизама. Утврђено је преко 400 врста микроба који су способни да врше деградацију пластике (Lear 2021).

3.4.3.2. Микоремедијација

Микоремедијација је облик биоремедијације у којој се користе гљиве за ремедијацију. Оне производе ензиме који могу разградити сложене органске молекуле, попут хербицида, пестицида, нафте. Рађена су истраживања и на микропластици.

Гљиве припаднице десет родова *Ascomycota* и *Mucor* разграђују РЕ брже од бактерија. Оне се својим хидрофобним површинама могу залијепити за полимерне површине. За разградњу PP и PE, као једини извор угљеника, могу се користити културе *Aspergillus*, *Fusarium oxysporum*, *Penicillium*, током три мјесеца, да би се тестирао њихов капацитет за разградњу. Анализе показују присуство биофилма и открива се промјене на PP и PE. Инкубирана гљива се такође испитује и може да преживи три мјесеца без додатних извора угљеника (Khurengsai 2021). *Fusarium oxysporum* (Сл. 3.16) лучи кератиназу која може да деполимеризује PET (Cai 2023).

Гљиве које се могу користити за микоремедијацију пластике су:

- Уобичајене јестиве гљиве *Pleurotus ostreatus* (гљива острига), код нас позната под називом буковача, *Pleurotus abalones* и *Agaricus bisporus* (печурке) – студије су показале да могу разграђивати полиетилен (PE) и полистирен (PS). Између ове три врсте гљива, *Agaricus bisporus* се показала као најбоља за деградацију PE и PS (Hock 2019);
- *Fusarium spp* – истраживања су показала да неке врсте имају способност да разграђују полиетилен и полипропилен (Temporiti 2022);

- *Phanerochaete chrysosporium* (гљивице бијеле трулежи) – студије су показале да могу разградити више врста пластике и пластичних мјешавина (Bautista-Zamudio 2023).

3.4.3.3. Фиторемедијација

Фиторемедијација је метода која за уклањање, стабилизацију или деградацију загађивача из вода и тла користи биљке. Врсте фиторемедијације су:

- Фитоекстракција – биљке апсорбују загађиваче, углавном тешке метале из тла и воде, складиштећи их у свом ткиву;
- Фитостабилизација – биљке стабилизују загађиваче у тлу, спречавајући њихово ширење;
- Фиторазградња – биљке разграђују органска једињења попут пестицида и нафте;
- Фитофилтрација – коријење биљака уклања загађиваче из воде.

Различите врсте биљака истраживане су због својих потенцијала за фиторемедијацију пластике (Jia 2023):

- Кукуруз (*Zea mays*),
- Трава (*Phragmites australis*),
- Морска трава (*Zostera marina*),
- Бамбус (*Bambus vulgaris*).

Рађено је истраживање уклањања микропластике из воде у коме су коришћене двије врсте водених биљака: *Iris pseudarocus* (барска перуника) и *Lithrum anseps* (поточњак). Оне су показале добре резултате уклањања двије врсте РЕ из воде (Kim 2024) (Сл. 3.12).

Фиторемедијацијом се сматра и кориштење аквакултура, тј. макроалги и микроалги за уклањање загађења. Фиторемедијација алга се назива фикоремедијација.

У фикоремедијацији користе се:

- Микроалге, као што су нпр. врсте *Chorella* и *Spirulina*, за тешке метале и органске контаминанте (Bellido-Pedraza 2024). Вршена су и истраживања за двије врсте слатководних микроалги *Microcystis panniformis*, *Scenedesmus sp.* и двије морске *Tetraselmis sp.*, *Gleocapsa sp.* Резултати истичу потенцијал микроалги као биокомпатибилних рјешења за третман микропластике у води (Cunha 2019). Kumar (2019) је у свом раду истраживао микроалге попут зелених алги, плавозелених алги и дијатомеја за биолошки третман велике

(HD) и мале густине (LD) РЕ листова. Најдоминантније алге биле су *Scenedesmus dimorphus* (зелена микроалга), *Anabaena spiroides* (плавозелена алга) и *Navicula pupula* (дијатомеја). Између три групе алги третираних преко LDPE листова очигледна деградација је била код *Anabaena spiroides* (плавозелена алга), а код других алги је није било.

- Макроалге – цвјетање алги је проблем на глобалном нивоу. Оне заробљавају и транспортују „заробљену“ пластику до обалних подручја, повећавајући загађење у разним екосистемима (истраживање рађено на обалама Кариба и Мексика), као што су врсте *Sargassum sp.* (Aldana 2024) и *Fucus vesiculosus* (Råberg 2005). *Fucus vesiculosus* се користи у исхрани, тј. користи се прах као додаток исхрани због својих нутритивних својстава (Circuncisão 2024).



Сл. 3.12. Двије врсте хидрофита – *Iris pseudacorus* (лијево) и *Lithrum anceps* (десно) (Kim 2024)

Fig. 3.12. The two kinds of hydrophyte used in this experiment: *Iris pseudacorus* (left) and *Lythrum anceps* (right) (Kim 2024)

Предност коришћења алги су одрживост и побољшање квалитета воде. Након накупљања могу се користити у индустрији (прехранбеној, фармацеутској, грађевинској).

Предност фиторемедијације пластике јесте то што не захтијева кориштење хемикалија и што омогућава обнављања станишта.



Сл. 3.13. Смеђа алга *Fucus vesiculosus* (а) свежа и (б) прах (Circuncisão 2024)
Fig. 3.13. Brown alga *Fucus vesiculosus* (a) Fresh and (b) powder (Circuncisão 2024)

Фиторемедијација пластике представља обећавајући приступ за смањење пластичног загађења. Истраживања о врстама биљака које могу ефикасно разградити или апсорбовати пластику настављају се, а резултати могу помоћи у развоју одрживих стратегија за заштиту животне средине. Резултати истраживања о ефектима микропластике на фиторемедијацију *Phragmites australis* (обична трска) указују на то да микропластика РЕ и Cu или Cd и РЕ микропластика нису ометали способност биљке да уклони Cu и Cd (Manjate 2020). Код *Solanum photeinocarpuma* (амерички црни ноћурак – жбунаста биљка са бобичастим плодовима) излагање микропластици смањило је фитоекстракцију Cd, ниске концентрације микропластике РЕ (0,1 %) утицале су на смањење фитоекстракције Pb и Zn (Yu 2023). Улазак микропластике преко коријена показали су Аустен и сарадници када су проучавали узимање полиамидних микропластичних перли од стране *Betule pendule* (сребрне брезе) (Austen 2022). На акумулацију микропластике у младом коријену утицала је величина честица микропластике и утврђено је да су мањи од 10 микрона обилнији. Ова студија указује да је величина честица микропластике важан фактор који утиче на њихову апсорпцију.

3.4.3.4. Зооремедијација

Неке животиње имају способност да апсорбују, разграђују или чак конзумирају микропластику, чиме се смањује њена количина у екосистему.

Бубе и инсекти – неки инсекти попут црва могу разградити пластику у свом пробавном тракту.

Одређена врста црва, попут црва из рода *Eisenia*, показале су способност разградње микропластике. Неки истраживачи испитују могућност коришћења ових организама за биоразградњу микропластике у тлу.

Неке врсте инсеката, као што су ларве мува *Hermetia ilucens*, показују способност да разграђују органске загађиваче и микропластику (Li 2020). На примјер, истраживања су показала да ларве инсеката и црви могу конзумирати микропластику у свом станишту (Kong 2022), чиме се смањује присуство микропластике у тлу и води.

Код неких животиња у пробавном тракту могу се наћи микроорганизми који могу помоћи у разградњи микропластике.

Ово се јавља код:

- спужви *Porifera*, *Petrosia magna*, *Paraleucilla manga*;
- шкољке *Mytilus galloprovinialis* (црна шкољка, дагња);
- црва *Sabella Spallanzanii*;
- морског јастучића, ацидијана (*Phallusia mammilata*), ваздушастих бијелих организама.

Ови организми чине део успостављене заједнице која расте на еколошки прихватљивим ужадима и у оквиру интегрисане мултитрофичке аквакултуре (IMTA), система који омогућава узгој различитих врста организама у заливу Mar Grande у Таранту (Freissient 2024) (Сл. 3.19).

Дагње су препознате као потенцијално средство за биоремедијацију микропластике због њихове способности филтрације воде. Честице микропластике накупљају се у органима дагње, што може имати негативан ефекат на људско здравље приликом конзумације, као и на саму дагњу. Европска агенција за безбједност хране (EFSA 2016) процијенила је изложеност од 0,2 посто токсичним хемикалијама, као што су бисфенол А, полихлоровани бифенили, (PCB) полициклични ароматични угљоводоници (PAHs) (Марић и Гргас 2024). Присуство наведених токсичних хемикалија у земљишту утврђено је и у Бањалуци на подручју некадашње фабрике „Инцел“ (Ilić 2024). Пер и полифлуоракрилне супстанце (PFAS) „загађивачи који трају заувјек“ представљају изазов за истраживање и научнике у циљу бољег разумијевања и примјена метода ремедијације и биоразградње (PFAS) супстанци (Grgas 2023b).

Црвено море је познато по гребенским организмима и по џиновским шкољкама *Tridacna maxima*, које су заступљене цијелом дужином коралног гребена (Lim 2020).

Шкољке *Tridacna maxima* у испитивањима показале су да активно и пасивно уклањају микропластику (Arossa 2019).



Сл. 3. 14. Интегрисана ИМТА (А) слика марикултурне инсталације која приказује кавезе за узгој и дугу линију са које су суспендована експериментална ужад, (В) уже од кокосових влакана потпуно прекривено заједницом обрастајућих организама с доминацијом неколико циљних врста: *Mytilus galloprovincialis* (дагња), *Phallusia mammillata* (ацидијан), *Paraleucilla magna* (спужва), *Sabella spallanzanii* (црв), (С) дијаграм који приказује две узастопне коморе са експерименталним конопцима, указујући на присутност циљних врста у бијелом оквиру са стране (Freissinet 2024)

Fig. 3.14. Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA)(A) Image of the mariculture installation showing farming cages and the long line from which the experimental ropes are suspended, (B) Coconut fiber rope completely covered by a fouling community, dominated by a few target species: *Mytilus galloprovincialis* (mussel), *Phallusia mammillata* (ascidian), *Paraleucilla magna* (sponge), *Sabella spallanzanii* (worm), (C) Diagram depicting two consecutive chambers with experimental ropes, indicating the presence of target species in the white box on the side (Fraissinet 2024)



Сл. 3.15. Црвено море – *Tridacna maxima* са изложеним плаштом (Lim 2020)
Fig. 3.15. Red Sea – *Tridacna maxima* with its mantle exposed (Lim 2020)

3.5. Закључак

Микропластика представља озбиљан и комплексан проблем који утиче на очување водених екосистема и људског здравља. Иако су извори овог загађења разнолики, ефекти су далекосежни, што наглашава хитну потребу за имплементацијом ефикасних стратегија детекције, уклањања и ремедијације микропластике у води. Истраживања показују да комбинација иновативних технолошких рјешења и природних метода може значајно смањити присуство микропластике у воденим срединама. Важно је фокусирати се на едукацију и подизање свијести о проблему микропластике, као и на развој политика које подстичу одрживо управљање отпадом. Кроз интегрисани приступ можемо се борити против овог глобалног изазова и обезбиједити чисте водне ресурсе.

Литература

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Cai Z, Li M, Zhu Z, Wang X, Huang Y, Li T, Gong H, Yan M (2023) Biological Degradation of Plastics and Microplastics: A Recent Perspective on Associated Mechanisms and Influencing Factors. 11(7):1661. doi:10.3390/microorganisms11071661.
- Campanale C, Marssarelli C, Savino I, Locupato V, Uricchio F (2020) Detailed Review Study on Potential Effectks 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
- Circuncisão AR, Ferreira SS, Silva AMS, Coimbra MA, Cardoso SM (2024) Fucus vesiculosus-Rich Extracts as Potential Functional Food Ingredients: A Holis. Extract. Appro. Foods. 13(4):540.doi:10.3390/foods13040540.
- 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.
- 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.
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Доступно на: www.eur-lex.europa.eu. Приступљено 1.6.2024.
- Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioratio. Document 32006L0118. Доступно на: www.eur-lex.europa.eu. Приступљено: 1.6.2024.
- Directive 2019/904 of the European parliament and of the council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment. Доступно на: <https://eur-lex.europa.eu/>. Приступљено: 1.7.2024.
- 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.
- Fraissinet S, Arduini D, Martines 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. Poll. Bull.* 207:116811. doi:10.1016/j.marpolbul.2024.116811.
- Gangalakshmi D, Anantharaman P (2020) Review on plastic wastes in marine environment—Biodegradation and biotechnological solutions. *Mari. Poll. Bull.* 150:110733. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.110733.
- 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 (2023) 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 (2023) The bacterial degradation of lignin – A review. *Water* 15:1272. doi:10.3390/w15071272.
- Grgas D, Štefanac T, Barešić M, Toromanović M, Ibrahimpašić J, Vukušić Pavičić T, Habuda-Stanić M, Herceg Z, Landeka Dragičević T (2023a) Co-composting of Sewage Sludge, Green Waste, and Food Waste. *J. Sustain. Dev. Energy Water Environ.* 11:1100415. doi:10.13044/j.sdewes.d10.0415.
- 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.
- Hock OG, Lum HW, De Qin D, Kee WK, Shing, WL (2019) The growth and laccase activity of edible mushrooms involved in plastics degradation. *Toxicology* 15:57–62.
- 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).
- Jia L, Liu L, Zhang Y, Fu W, Liu X, Wang Q, Tanveer M, Huang L (2023) Microplastic stress in plants: effects on plant growth and their remediations. *Front. Plant Sci.* 4:1226484. doi:10.3389/fpls.2023.1226484.
- Jones RR, Hooper DC, Zhang L, Wolverson D, Valev VK (2019) Raman Techniques: Fundamentals and Frontiers. *Nano. Res. Lett.* 14:231. doi:10.1186/s11671-019-3039-2.
- Kim K, Park S (2021) Enhancing Microplastics Removal from Wastewater Using Electro-Coagulation and Granule-Activated Carbon with Thermal Regeneration. *Processes.* 9:617. doi:10.3390/pr9040617.
- Kim Y, Park K, Bak J, Choi S (2024) *Iris pseudacorus* and *Lythrum anceps* as Plants Supporting the Process of Removing Microplastics from Aquatic Environments—Preliminary Research. *Horticulturae* 10(6):631. doi:10.3390/horticulturae10060631.
- Kleut D (2015) RAMAN spectroscopy of defective carbon nanomaterial. *Doc. Dis. Belgrade.* Доступно на: www.etf.bg.ac.rs. Приступљено 26.8.2024.
- Kniggendorf A-K, Wetzel C, Roth B (2019) Microplastics Detection in Streaming Tap Water with Raman Spectroscopy. *Sensors.* 19(8):1839 doi:10.3390/s19081839
- Kong X, Jiang M, Dai J, Yan Q (2022) Plastic biodegradation by insect larvae: A comprehensive review. *Scien. Tot. Environ.* 813:152530. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.152530.
- Kučić D, Bulatovic V, Miloloža M, Radin E, Tolić A, Zadro K, Bule K (2020) Mikroplastika u morskom okolišu Jadrana. *Kemija u industriji* 69:303–310. doi:10.15255/KUI.2019.063.

- 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.
- Kwiatkowska K, Ormaniec P (2024) Microbial Succession on Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Exploring the Complexities of Microplastic-Microbiome Interactions. *Microb. Ecol.* 87:105. doi:10.1007/s00248-024-02422-y.
- Landeka Dragičević T, Gudelj I, Hrenović J, Delaš F, Šoljan V, Gudelj H (2011) Azo-boje, njihov utjecaj na okoliš i potencijal biotehnoške strategije za njihovu biorazgradnju i detoksifikaciju. *Arh. Hig. Rada Toksikol.* 62(1):91–101 doi:10.2478/10004-1254-62-2011-2063.
- Landeka Dragičević T, Štefanac T, Grgas D (2021) Xenobiotics—division and methods of detection: a review. *J. Xenobiotics* 11(4):130–141. doi:10.3390/jox11040009.
- Landeka Dragičević T, Zanoški Hren M, Frece J, Markov K, Krivohlavek A, Šmit Z (2010) Degradation of 6-aminonaphthalene-2-sulfonic acid by means of a selected mixed bacterial culture under microaerophilic conditions. *Fresenius Environ. Bull.* 19(2):232–237.
- Landeka Dragičević T, Zanoški Hren M, Gmajnić M, Pelko S (2011) Biodegradation of olive mill wastewater by *Trichosporon cutaneum* and *Geotrichum candidum*. *Arh. Hig. Rada Toksikol.* 61(4):399–404. doi:10.2478/10004-1254-61-2010-2079.
- Landeka Dragičević T, Zanoški Hren M, Grgas D, Buzdum I, Čurlin M (2010) The potential of dairy wastewater for denitrification. *Mljekarstvo.* 60(3):191-197. Доступно на: <https://hrcak.srce.hr/59016>. Приступљено: 2.12.2024
- Landeka Dragičević T, Zanoški M, Glancer-Šoljan M, Šoljan Vice, Matić V, Krajina J (2004) Activity of the granulated biomass of the mixed microbial culture for highly efficient carbon and nitrogen removal in the process wastewaters. In *European Symposium on Environmental Biotechnology* (pp. 645–648).
- Lear G, Kingsbury JM, Franchini S, Gambarini V, Maday SDM, Wallbank JA, Weaver L, Pantos O (2021) Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environ. Microbiome.* 16(1):2. doi:10.1186/s40793-020-00371-w.
- 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.
- Manjate E, Ramos S, Almeida CMR (2020) Potential interferences of microplastics in the phytoremediation of Cd and Cu by the salt marsh plant *Phragmites australis*. *J. Environ. Chem. Engin.* 8:103658. doi:10.1016/j.jece.2020.103658.
- Марић Н, Гргас Н (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.
- Marrone A, La Russa M, Randazzo L, La Russa D, Cellini Emilio, Pellegrino D (2021) Microplastics in the Center of Mediterranean: Comparison of the Two Calabrian Coasts and Distribution from Coastal Areas to the Open Sea. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. Heal. doi:18.10712. 10.3390/ijerph182010712.
- Masura J, Baker E, Duan G, Courtney A, Carlie H (2015) Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. Доступно на: www.repository.library.noaa.gov/view/noaa/10296. Приступљено: 20.6.2024.
- New methodology to measure microplastics in EU's drinking water, JRC. Доступно на: www.joint-research-centre.ec.europa.eu. Приступљено 21.3.2024.
- Olsson A, Petterson M, Jönson G (2004) Packaging demands in the food service industry. *Food Serv. Technol.* 4:97–105. doi:10.1111/j.1471-5740.2004.00095.x.
- Osman AI, Hosny M, Eltaweil A, Omar S, Elgarahy A, Farghali M, Yap PS, Wu YS, Nagandran S, Batumalaie K, John O, Sekar M, Saikia T, Karunanithi P, Mohd H, Kolajo A (2023) Microplastic sources, formation, toxicity and remediation: a review. *Environ. Chem. Lett.* 21(4):2129–2169. doi:10.1007/s10311-023-01593-3.
- Othman A, Hasan A, Muhamad M, Ismail N, Abdullah S, Hasan H (2021) Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review. *Environ. Chem. Lett.* 19:3057–3073. doi:10.1007/s10311-021-01197-9
- Parga K, Silva V, Andersen T, Posth N, Strand J (2023) Improved separation and quantification method for microplastic analysis in sediment: A fine-grained matrix from Arctic Greenland. *Mar. Poll. Bull.* 196:115574. doi:10.1016/j.marpolbul.2023.115574.
- Perren W, Wojtasik A, Cai Q (2018) Removal of Microbeads from Wastewater Using Electrocoagulation. *ACS Omega*. doi:3.10.1021/acsomega.7b02037.
- Plastics Europe (2023) Plastics - the facts (2023) An analysis of European plastics production, demand and waste data. Доступно на: www.plasticseurope.org. Приступљено 24.7.2024.
- Pramila R, Ramesh KV (2011) Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by fungi isolated from municipal landfill area. *J. Microbiol. Biotech. Res.* 1:131–136
- 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. Progr. Ser.* 289:131–139. doi:10.3354/meps289131.
- Temporiti MEE, Nicola L, Nielsen E, Tosi S (2022) Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. *Microorganisms* 10(6):1180. doi:10.3390/microorganisms10061180.
- Tiwari E, Singh N, Khandelwal N, Abdolahpur 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.
- Venturelli M, Falletta E, Pirola C, Ferrari F, Milani M, Montorsi L (2022) Experimental evaluation of the pyrolysis of plastic residues and waste tires. *Appl. Energy.* 323:119583. doi:10.1016/j.apenergy.2022.119583.
- Vitalla M, Ncibi M, Sillanpää M, Sillanpää M (2018) Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology. *Water research.* 133:236–246. doi:10.1016/j.watres.2018.01.049.
- Yansaneh O, Zein S (2022) Latest Advances in Waste Plastic Pyrolytic Catalysis. *Processes.* 10:683. doi:10.3390/pr10040683.
- Yu Q, Gao B, Wu P, Chen M, He C, Zhang, X (2023) Effects of microplastics on the phytoremediation of Cd, Pb, and Zn contaminated soils by *Solanum photeinocarpum* and *Lantana camara*. *Environ.Res.* 231(3):116312. doi:10.1016/j.envres.2023.116312.
- 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.
- Khurengsai S, Sripahco T, Pripdeevech P (2021) Low-Density Polyethylene Film Biodegradation Potential by Fungal Species from Thailand. *J. Fungi (Basel).* 7(8):594. doi:10.3390/jof7080594.

Microplastics in Water: Sources, Detection, Removal and Remediation

Nataša Marić, Dijana Grgas, Tibela Landeka Dragičević

Summary

Microplastics, tiny plastic particles smaller than 5 millimeters, have become a significant pollutant in water systems worldwide. Sources of microplastics in water include industrial processes, the production and use of polymeric materials, as well as the degradation of larger plastic objects. These particles are highly stable due to their resistance to degradation and their ability to adsorb toxic substances. Microplastics can transport pollutants through the food chain, threatening ecosystems and human health. The presence of microplastics has been detected in drinking water, rivers, lakes, seas, oceans, and biota. By analyzing the sources of microplastics in water, the technology for their detection and removal, as well as remediation techniques aimed at reducing their negative impact on the environment, it is possible to reduce the presence of microplastics in aquatic ecosystems, contributing to the sustainable management of water resources.

Keywords: Microplastics in Water, Detection, Removal, Remediation

