

САВЕЗ ИНЖЕЊЕРА И ТЕХНИЧАРА СРБИЈЕ



Научна конференција са
међународним учешћем

ИНДУСТРИЈА 4.0 У ЦИРКУЛАРНОЈ ЕКОНОМИЈИ И ЗАШТИТИ И ОПОРАВКУ ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ

Зборник радова



Научна конференција са
међународним учешћем
"ИНДУСТРИЈА 4.0
У ЦИРКУЛАРНОЈ
ЕКОНОМИЈИ
И ЗАШТИТИ И
ОПОРАВКУ
ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ"

Београд
15. децембар 2023.



САВЕЗ ИНЖЕЊЕРА И ТЕХНИЧАРА СРБИЈЕ

**Научна конференција са међународним
учешћем**

**ИНДУСТРИЈА 4.0 У ЦИРКУЛАРНОЈ
ЕКОНОМИЈИ И ЗАШТИТИ И ОПОРАВКУ
ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ**

Зборник радова

Београд, 15. децембар 2023.

Издавач:

Савез инжењера и техничара Србије, Београд

За издавача:

Мр Богдан Влаховић, генерални секретар

Главни и одговорни уредник:

Емеритус проф. др Илија Ћосић

Организациони одбор:

Мр Богдан Влаховић (председник), проф. др Бојан Лалић, проф. др Марко Царић, проф. др Мијодраг Милошевић, др Мирко Бућан, др Марија Симић, др Марија Марковић, Оливера Ћосовић, MSc, Маријана Михајловић, есс, Оља Јовичић, дипл. прав.

Програмски одбор:

Емеритус проф. др Илија Ћосић (председник), проф. др Срђан Колаковић, проф. др Исак Карабеговић, проф. др Бранко Каталинић, др Мирослав Сокић, проф. др Горан Путник, проф. др Снежана Урошевић, емеритус проф. др Лариса Јовановић, др Драгана Ранђеловић

Лектура и коректура:

Оливера Ћосовић, маг. филол.

Технички уредник:

Оља Јовичић, дипл. прав.

Штампа:

Академска издања, Земун

Година издавања: 2023.

ИСБН: 978-86-82563-26-6

Тираж: 200 примерака

ОРГАНИЗАТОР

Савез инжењера и техничара Србије



СУОРГАНИЗАТОРИ

Инжењерска академија Србије

Универзитет у Новом Саду

Факултет техничких наука

**Институт за технологију нуклеарних
и других минералних сировина**

ПОД ПОКРОВИТЕЉСТВОМ

**Министарства науке, технолошког развоја
и иновација Републике Србије**

УЗ ПОДРШКУ

Инжењерске коморе Србије

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

330.341.1(082)
338.1:502.131.1(082)
658.567.3(082)

**НАУЧНА конференција са међународним учешћем
Индустрија 4.0 у циркуларној економији и заштити и
опоравку животне средине (2023 ; Београд)**

Зборник радова / Научна конференција са међународним учешћем Индустрија 4.0 у циркуларној економији и заштити и опоравку животне средине, Београд, 15. децембар 2023. ; [организатор] Савез инжењера и техничара Србије ... [и др.] ; [главни и одговорни уредник Илија Ћосић]. - Београд : Савез инжењера и техничара Србије, 2023 (Земун : Академска издања). - 118 стр. : илустр. ; 24 cm

Тираж 200. - Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-86-82563-26-6

1. Ћосић, Илија, 1948- [главни и одговорни уредник]
а) Привредни развој -- Одрживи развој -- Зборници б)
Циркуларна економија -- Зборници в) Економија --
Технолошки развој -- 21в -- Зборници

COBISS.SR-ID 131923977

ЗАГАЂЕЊЕ МИКРОПЛАСТИКОМ: ИЗВОРИ, РЕДУКЦИЈА И РЕМЕДИЈАЦИЈА

MICROPLASTICS POLLUTION: SOURCES, REDUCTION AND REMEDIATION

ИВАНА МИКАВИЦА¹, ДРАГАНА РАНЂЕЛОВИЋ²,
ЈЕЛЕНА МУТИЋ³

Резиме: Пластични отпад и загађење микропластиком је главни еколошки изазов и стога привлачи све већу пажњу друштва. Експоненцијални пораст присуства пластике и њених најмањих честица у животној средини и врстама који је настају је последица примене линеарне економије. Транзит с линеарне на циркулану економију у систему управљања пластиком је потребан у циљу редуковања ослобађања микропластике. Како се микропластика емитује у свим фазама животног циклуса пластике, неопходно је деловање на свим нивоима ланца вредности. Развој нових технологија производње синтетичких полимера и иновације ремедијационих технологија чине кључне компоненте за успостављање модела циркуларне економије.

Кључне речи: загађење, циркуларна економија, полимери, третман

Abstract: Plastic waste and microplastic pollution are the main ecological challenge and thus attracts society's increasing attention. The exponential growth of plastics' presence and its smallest particles in the environment and inhabiting species is a consequence of linear economy employment. The transition from a linear to a circular economy in the plastic management system is needed to reduce microplastics release. As microplastics are emitted in all phases of the plastics life cycle, actions at all levels of the value chain are necessary. New technologies development for synthetic polymer production and remediation technologies innovations are key components of the circular economy model.

Key Words: pollution, circular economy, polymers, treatment

1. Увод

Пластика је важан и интегрални део глобалне економије. С друге стране, загађење пластиком је глобални проблем данашњице. Производња пластике

¹ Ивана Микавица, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Булевар Франше Д'Епера 86, Београд

² Драгана Ранђеловић, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Булевар Франше Д'Епера 86, Београд

³ Јелена Мутић, Институт за технологију нуклеарних и других минералних сировина, Булевар Франше Д'Епера 86, Београд

расте експоненцијално, а само у 2017. години је достигла 350 милиона тона [1]. Овај брзо растући тренд представља озбиљну препреку која угрожава Циљ одрживог развоја број 14 и број 12 Уједињених нација, и као таква захтева неодложно решавање [2].

Настанак пластике датира још из 1920. године, када је синтетисан први пластични полимер [3]. Захваљујући малој тежини, издрживости, прилагодљивости и релативној хемијској инертности, пластика је нашла примену у готово свим гранама индустрије. Савремени живот је немогуће замислити без предмета од пластике. Упркос отпорности која је одликује, под утицајем различитих физичких, хемијских и биолошких процеса који се одвијају у околини, пластика се може дефрагментисати до честица величине испод 5 mm, тзв. микропластике. Микропластика је пронађена је у најудаљенијим деловима света, у биљним и животињским врстама, па чак и хуманом ткиву и већ се сматра свеprisутним загађивачем животне средине [4]. Термин микропластика у употреби је током последњих 19 година [5]. Зависно од начина настанка, микропластика се може поделити на примарну и секундарну. Примарна микропластика подразумева пластику иницијално произведену у облику честица, а која налази примену у козметици, грађевинској и аутомобилској индустрији, индустрији боја и лакова, итд. [6], док секундарна микропластика настаје као резултат фрагментисања предмета од пластике под различитим утицајима [6].

Имајући у виду да се настајање микропластике одиграва у свим фазама ланца вредности пластике, почев од њене производње, преко употребе, до одлагања, ефикасан приступ решавању загађања микропластиком захтева свеобухватан приступ. Актуелно стање је последица модела линеарне економије, базиране на једнократној употреби производа. Пролонгирање животног века пластике у систему, задржавање њене вредности, очување необновљивих извора сировина, повећан степен рециклаже, принципи су циркуларне економије који могу омогућити смањење настанка микропластике. Транзит с линеарне на циркуларну економију захтева и иновације и дизајн нових дуготрајнијих, биоразградивих типова полимера, с мање штетних супстанци, уз примену карбон-неутралних технологија, тј. без емисије гасова стаклене баште. Важан чинилац у транзицији је регулатива усмерена на смањење загађења пластиком, која је у раној фази била посвећена углавном забрани специфичних производа. Данас је фокус на целокупном ланцу вредности пластике [8]. Развој ремедијационих технологија за уклањање постојећег загађења је од једнаке важности колико и мере редуковања његовог настанка. Додатна истраживања су неопходна у циљу развоја еколошких, економичних и опште примењивих третмана различитих типова узорака.

Циљеви овог рада су да 1) пружи преглед актуелног стања у систему управљања пластиком и последичног загађења животне средине микропластиком, 2) да додатно укаже на значај примене концепта циркуларне економије ради ублажења ослобађања микропластике у животну средину, и 3) да истакне неопходност проналазка нових метода за санацију тренутног загађења.

2. Извори микропластике

Извори микропластике се могу поделити на примарне и секундарне, зависно до производног процеса, а исти се даље диференцирају сходно средини у којој се микропластика налази - извори у копненој, воденој и ваздушној средини се такође могу разликовати (слика 1).

Примарна микропластика се односи на честице иницијално дизајниране и произведене у том облику, с циљем употребе у козметици и производима за личну хигијену - микроперле за пилинге и средства за чишћење коже, гелови, пасте за зубе, и сл, у детерџентима, инсектицидима, и индустрији – микрочестице пластике се користе као абразивно средство у аутомобилској и авио индустрији, као индустријске сировине, као међупроизвод у производњи предмета од пластике, микровлакна за производњу синтетичког текстила, у индустрији боја, итд. [6].

Број честица примарне микропластике различитих величина, облика и боје, пронађен у пилингу за лице је између 1000 и 19.000 по милилитру [9]. До ослобађања примарне микропластике може доћи услед неправилног одлагања или индустријског изливања, али је свакако најзначајнији пут доспећа у животну средину употреба производа који примарну микропластику садрже у својим формулацијама. Примарна микропластика се ослобађа приликом сваког циклуса прања синтетичке тканине, која је данас у широкој употреби.

Фрагментисање, тј. редукција материјала с макро на микро величину, настало као резултат различитих физичких (абразија, ерозија, рад таласа), хемијских (фотооксидација оксидореактивним врстама и UV зрачењем, корозија, изложеност високим температурама) и биолошких процеса (микробна активност), категорише се као секундарни извор микропластике у животној средини [7]. Секундарна микропластика се потенцијално може формирати од сваког комада пластичног отпада, те сваки одбачени предмет пластике који заврши у животној средини представља потенцијални извор микропластике.

Густина, величина и облик честица одређују даљи транспорт кроз атмосферске, водене и копнене екосистеме, тако формирајући комплексан и динамичан циклус микропластике у животној средини [10].

Синтетичка влакна, индустријске сировине и производи за личну хигијену, и неодговарајуће одлагање пластичног отпада чине један од главних извора микропластике у слатководним системима [11]. Супротно од река, стајаће водене површине, као што су језера, могу акумулирати веће количине микропластике [12]. Примарна микропластика у слатководне површине може доспети кроз индустријске дренажне системе и системе домаћинства, док су извори секундарне микропластике разноврсни, а у највећој мери воде порекло од неправилног управљања отпадом. Загађење мора и океана микропластиком је најчешће последица приморског туризма и индустрије, и риболова. Процењује се да је доминантан извор микропластике у океанима секундарна

микропластика, док између 15 и 31% микропластике потиче из примарних извора [13].

Иако је садржај микропластике у земљиштима до сада мање испитиван у односу на водене средине, сматра се да су копнени извори загађења одговорни за 80-90% микропластике која заврши у воденим површинама [4]. Под утицајем ветра и кише, микропластика настала на земљишту може лако dospети до река, а потом се даље транспортовати до мора и океана. Пластичне кесе и боце, материјали за конструкције, одећу, пластична паковања за храну и пиће, производе за личну хигијену и сл. представљају најзначајнији секундарни извор. Инсинератори пластике генеришу пепео који садржи микропластику, и тиме значано доприносе загађењу земљишта [14]. Градска прашина се сматра знатним носиоцем микропластике у урбаним површинама будући да знатан допринос даје пластика из материјала на бази полимера, као што су гуме, боје и грађевински материјали [15]. Грађевински сектор обухвата 20% годишње производње пластике у Европи [1]. Микропластика у пољопривредним земљиштима потиче од наводњавања отпадним водама, употребе компоста и муља заосталог после третмана отпадних вода, и употребе пластичних производа за пољопривредну производњу - систему за наводњавање, кутије, фолије, амбалажа, пластични резервоари, фолије за малчирање, пластеници, итд. [16]. Иако уклањају 99% микропластике садржане у води, постројења за третман отпадних вода ослобађају значајне количине микропластике [17].



Слика 1. Подела извора микропластике у животној средини

Загађење ваздуха микропластиком јавља се као последица широке распрострањености извора. Извори примарне микропластике укључују аерозагађење градском прашином, хабање синтетичких гума, лоше управљање депонијама, индустријске емисије, процес рециклаже пластике и инсинерација отпада [18].

3. Редукција загађења микропластиком

Иако је пластика одавно постала саставни део економије и свакодневног живота, загађење које овај материјал проузрокује, један је од кључних еколошких изазова данашњице који привлачи све веће интересовање друштва. Упркос бројним иницијативама насталих током последњих година у потрази за решењем за овај глобални проблем, количина пластике која заврши небринута у животној средини је у константном порасту [19]. The New Plastic Economy иницијатива посвећена је фундаменталним променама у области управљања пластичним амбалажним отпадом и пластиком уопште, нуди нови приступ за трансформисање тока пластичних материјала уз примену концепта циркуларне економије. Будући да микропластика настаје у свим фазама животног циклуса пластике, чак и током производње, смањење настанка пластичног отпада уопште може смањити ризик од контаминације микропластиком. Стога ефикасна редукција подразумева свеобухватно деловање у свим фазама циклуса и фокус на целокупан ланац вредности пластичних производа. Транзит с модела линеарне економије, базираног на једнократној употреби производа и ре-дизајнирање система који ће функционисати на принципима циркуларне економије, представља приступ који би омогућио пролонгирање животног века производа и ресурса, повећао степен рециклаже и умањење загађења микропластиком [20].

Циљ је остварити утицај не само на смањење испуштања пластичног отпада, већ и редуковање употребе фосилних горива као полазне сировине и очување природног капитала, имајући у виду прогнозе да би се у будућности 20% укупне производње нафте могло користити за производњу пластике [8]. Једно од решења је синтеза полимера на бази гасова стаклене баште (GHG-green house gasses) као што су угљен-диоксид и метан, или употреба биомасе [21]. Компанија Newlight Technologies INC. је патентирала технологију Air-Carbon за производњу полихидроксиалканоата (PHAs), потенцијалне замене за полимере петрохемијског порекла, синтезом из метана, док се угљен-диоксид може конвертовати до полиуретана (PUR).

Будуће иновације, развој и дизајн производа би у том смислу требало да теже употреби нових дуготрајнијих полимера од постојећих једнократних, с могућношћу поновне употребе и рециклаже. Пример примене технологије циркуларне економије је домаћа компанија White Lemur co (<https://www.soma.eco/>), која је развила Биоспорин, зелену и биоразградиву алтернативу за експандирани полистирен (PS, стиропор). Овај материјал поседује све техничке и термичке карактеристике стирпора, а потпуно је разградив и ватроотпоран. Производни процес је карбонски неутралан - не емитује гасове стаклене баште, и омогућава конверзију различитих облика пољопривредног отпада у одрживе материјале.

Од недавно у току је и припрема предлога забране циљане производње микропластике (примарна микропластика) и додавања исте у формулације различитих категорија производа као што су средства за заштиту биља,

ђубрива, козметика, детерџенти, итд. [22]. Важан иницијатор промена у дизајну производа је регулатива која има за циљ смањење утицаја пластике на животну средину кроз низ захтева које производ мора испунити пре доспевања на тржиште. Један од таквих прописа је ЕУ Директива 2019/904 из јуна 2019, која имплементира и продужену одговорност произвођача, или тзв. дужну пажњу (тзв. „Due Diligence“) која предвиђа одговорност свих учесника у ланцу снабдевања одређеног производа. Уредба Европске комисије 10/2011 из јануара 2011. посебан акценат ставља на пластичне материјале који су у директном контакту са храном и пићем (пластична амбалажа), при чему само одобрене супстанце наведене у документу могу бити коришћене у процесу производње. Употреба једнократних производа, као што је амбалажа може довести до абразије и ослобађања микро- и нанопластике. Пример су чаше и посуде за храну на бази полистирена [23]. Садржај (опасних) адитива је такође један од параметара за одржање вредности пластике унутар циркуларног ланца вредности. Европска REACH уредба регулише употребу индустријских хемикалија и тиме има за циљ за обезбеди производњу пластичних производа сходно начелима циркуларности.

Централна компонента транзиције ка циркуларној економији кад је реч о пластици је повећање степена рециклаже (Европска комисија, 2018). Крајњи исход пораста удела рециклаже, у идеалном сценарију обезбеђује дуже остајање материјала унутар ланца вредности, смањење употребе ресурса за производњу и елиминисање загађења. Стварни, актуелни систем рециклаже често резултује у губитку вредности материјала услед неефикасног сортирања, а неки видови рециклаже воде чак до повећаног ослобађања микро- и нанопластике [8]. Пластика која се уопште рециклира, бива рециклирана у производње ниже вредности и примене, што уједно и представља њену коначну употребу, будући да настали производ није могуће (економично) рециклирати поново. С друге стране, иако употреба рециклираног ПЕТа (полиетилентерефталата) за производњу тканине снижава експлоатацију основних сировина, и тиме обезбеђује очување ресурса, што је једна од кључних тачака транзита ка циркуларној економији, тканина произведена на овај начин има тенденцију повећаног ослобађања микровлакна.

4. Технике ремедијације микропластике у животној средини

Ремедијација постојећег загађења околине микропластиком је од круцијалног значаја, колико и мере редуковања њеног настанка. Постојеће технике ремедијације се зависно од типа третмана могу поделити на физичке, хемијске и биолошке, а сходно медијуму који се третира, разликују се технологије примене за третман вода и земљишта. Такође, постоји и подела на конвенционалне и иновативне стратегије. Поменути приступи се додатно разликују и у погледу коришћеног механизма, ефикасности и типа микропластике који је могуће уклонити, и као такве све имају своје предности и недостатке [13].

Технологије погодне за ремедијацију водених екосистема обухватају коагулацију, технологију мембранских реактора и адсорпцију, које се могу сврстати у конвенционалне приступе, док је од иновативних важно поменути електрокоагулацију, фотокаталитичку деградацију, магнетну сепарацију и електрохемијску оксидацију. Пиролиза и фотокаталитичка деградација се сматрају ефикасним за третман микропластике у површинском слоју земљишта. С друге стране, фиторемедијација се показала као одржива опција за земљиште до дубине корена биљака. Такође, деградација помоћу микроба је препоручена стратегија за дубље слојеве земљишта [24].

4.1. Физички третман

Већина приступа који се могу сврстати у физичке омогућава уклањање микропластике из отпадних вода с високом ефикасношћу (>95%) док се технологија мембранских биореактора тренутно сматра најефикаснијом [25, 26]. Овај приступ подразумева комбинацију мембранске филтрације, укључујући микро и ултрафилтрацију, и биолошких процеса, и тиме омогућава уклањање загађивача различитих концентрација уз ефлуент високог квалитета. Негативни аспекти су неекономичност, додавање хранљивих састојака за микроорганизме, и хабање мембрана [4].

Друга широко коришћена технологија за уклањање полутаната из отпадних вода је адсорпција. До сада коришћени адсорбенти за уклањање микропластике су хитин и графен-оксид, а комбинација оксида цинка и алуминијума достигла је значајну ефикасност за микро- и нанопластику – чак 100 % на рН 4 [27]. Ограничивајући фактор је селективност материјала адсорбента ка микропластици.

4.2. Хемијски третман

Хемијски третмани одликују се нижом ефикасношћу. Електрокоагулација се сматра најефикаснијом методом (са достигнутих око 90% уклањања) [28]. Овај метод омогућава третман вода различитог квалитета, продукује мању количину отпада, смањује време трајања операција и неопходне трошкове и обезбеђује енергетску ефикасност, док су недостаци честа замена аноде и пасивизација катоде [29].

Пиролиза је термохемијски процес којим се дуги ланци полимера деградирају у мање, једноставније молекуле под утицајем температуре и притиска, а показао се као еколошки прикладна опција за третман отпадне пластике [30]. Највећи недостатак пиролизе је генерисање гасова са ефектом стаклене баште и аромата, који захтевају даљи третман у циљу смањења штетних ефеката. Према недавним истраживањима, поменути гасови се могу употребити за добијање топлоте или струје, те се пиролиза потенцијално може сматрати приступом који је у складу с начелима циркуларне економије [31].

Фотодеградација се одвија под утицајем UV радијације и доводи до раскидања веза између ланца полимера и формирања других (не)полимерних молекулских врста. Недостатак ове методе је утицај на карактеристике

земљишта, и настанак секундарног загађења. Економичност и неивазивност су кључне предности примене фотодеградиције. у већим размерама услед неинвазивности и исплативост

4.3. Биолошки третман

Биолошки третман подразумева деградацију уз помоћ микроорганизама, или усвајање од стране водених или копнених организама; још увек је у фази развоја и тренутно нуди делимичну ефикасност [32, 33].

Примена фиторемедијације у циљу уклањања микропластике из земљишта је тренутно у зачетку. Бреза (*Betula sp.*) је врста која је у разматрању за примену у фиторемедијацији микропластике [34]. До сада је забележена смањена концентрација фталата у земљишту уз примену ове технологије [35]. У питању је еколошки прихватљив приступ, чији потенцијал у уклањању микропластике тек треба да буде истражен.

Иако је микропластика дуготрајан загађивач, установљено да поједини организми, као што су гљиве и бактерије могу утицати на деградацију микропластике. Микробна деградација је економична и еколошких прикладна технологија за ремедијацију микропластике, и као таква је привукла пажњу као потенцијално ефикасна опција. Механизам деградације пластике и ензими укључени у дати процес су и даље недовољно истражени, што захтева даља опсежна испитивања пре комерцијалне примене.

4. Закључак

Загађење пластиком представља сложен проблем који захтева усклађено деловање влада, приватног сектора, потрошача и цивилног друштва. Велико интересовање научних истраживача, регулаторних тела и јавности уопште последњих година посвећено је загађењу пластичним отпадом и микропластиком, као и продукцима разлагања истог. Како утицај микропластике на животну средину расте, све је већа потреба за проналажењем и развојем одрживих решења за спречавање штетних утицаја и редуковање присуства овог загађивача. Транзиција с линеарне на циркуларну економију би обезбедила деловање у свим фазама ланца вредности пластике, почев од производње до збрињавања искоришћених производа. Приоритети су прелазак на обновљиве изворе сировина, развој нових неопасних, биоразградивих формулација полимера као зелених алтернатива, као и повећање рециклабилности материјала. Унапређење постојећих, и развој нових, економичних и ефикасних технологија за ремедијацију микропластике из различитих медијума, неопходно је у циљу санације већ присутног загађења

6. Литература

- [1] World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company, *The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics* (2016).

- [2] Walker T. R, (Micro)plastics and the UN Sustainable Development Goals, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 30, 100497, 2021
- [3] Chia, R. W, Lee J, Jang J, (i sar.): Soil health and microplastics: a review of the impacts of microplastic contamination on soil properties, *Journal of Soils and Sediments*, 22, 2690-2705, 2022.
- [4] Osman, A. I, Hosny M, Eltaweil A .S. (i sar.): Microplastic sources, formation, toxicity and remediation: a review, *Environmental Chemistry Letters*, 21, 2129-2169, 2023.
- [5] Thomson, R. C, Olsen Y, Mitchell R. P, (i sar.): Lost at Sea: Where Is All the Plastic?, *Science*, 304, 5672, 2004.
- [6] Gong J, Xie P, Research progress in sources, analytical methods, eco-environmental effects, and control measures of microplastics, *Chemosphere*, 254, 126790, 2020.
- [7] Othman A. R, Hasan H. A, Muhamad M. H, (i sar.): Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review, *Environmental Chemistry Letters*, 19, 3057-3073, 2021.
- [8] Symberg K, Neilsen M. B, Clausen, L. P. W. (i sar.): *Regulation of plastic from a circular economy perspective*, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 29, 100462, 2021.
- [9] Napper, I. E, Bakir A, Rowland, S. J. (i sar.): Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics, *Marine Pollution Bulletin*, 99, 178-185, 2015
- [10] Chen G. Feng, Q. Wang, J, Mini-review of microplastics in the atmosphere and their risks to humans, *Science of The Total Environment*, 703, 135504, 2020.
- [11] Li C, Busquests R, Campos L. C, Assessment of microplastics in freshwater systems: A review, *Science of The Total Environment*, 707, 135578, 2020.
- [12] Free C. M, Jensen O, Mason S. A. (i sar.): High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake, *Marine Pollution Bulletin*, 85, 156-163, 2014.
- [13] Anik A, H. Hossain, S. Alam, M. (i sar.): Microplastics pollution: A comprehensive review on the sources, fates, effects, and potential remediation, *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100530, 2021.
- [14] Yang Z, Lu F, Zhang H. (i sar.): Is incineration the terminator of plastics and microplastics? *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123429, 2021.
- [15] Campanale C, Galafassi S, Savino I. (i sar.): Microplastics pollution in the terrestrial environments: Poorly known diffuse sources and implications for plants, *Science of The Total Environment*, 805, 150431, 2022.
- [16] Rodríguez-Seijo A, Pereira R, *Microplastics in Agricultural Soils, Bioremediation of Agricultural Soils*, CRC Press, 2019.
- [17] Galafassi S, Nizzetto L, Volta P, Plastic sources: A survey across scientific and grey literature for their inventory and relative contribution to microplastics pollution in natural environments, with an emphasis on surface water, *Science of The Total Environment*, 693, 133499, 2019.

- [18] Manyaneza J, Jia Q, Qaraah F.A. (i sar.): A review of atmospheric microplastics pollution: In-depth sighting of sources, analytical methods, physiognomies, transport and risks, *Science of The Total Environment*, 822, 153339, 2022.
- [19] Symberg K, Nielsen M. B, Oturai N. B, (i sar.): Circular economy and reduction of micro(nano)plastics contamination, *Journal of Hazardous Materials Advances*, 5, 100044, 2022.
- [20] Filho W. L, Saari U, Fedoruk M, (i sar.): An overview of the problems posed by plastic products and the role of extended producer responsibility in Europe, *Journal of Cleaner Production*, 214, 550-558, 2019.
- [21] Bachman M, Kätelhön A, Winter B. (i sar.): Renewable carbon feedstock for polymers: environmental benefits from synergistic use of biomass and CO₂, *Faraday Discussions*, 230, 227-246, 2021.
- [22] Clausen L. P. W, Hansen O. F. H, Oturai N. B. (i sar.): *Stakeholder analysis with regard to a recent European restriction proposal on microplastics*, PloS One, 15, e0235062, 2020
- [23] Lambert S, Wagner M, Characterisation of nanoplastics during the degradation of polystyrene, *Chemosphere*, 145, 265-268, 2016.
- [24] Zhao S, Zhang J, Microplastics in soils during the COVID-19 pandemic: Sources, migration and transformations, and remediation technologies, *Science of The Total Environment*, 883, 163700, 2023.
- [25] Nolte, T. M, Hartmann N. B, Kleijn J. M, (i sar.): The toxicity of plastic nanoparticles to green algae as influenced by surface modification, medium hardness and cellular adsorption, *Aquatic Toxicology*, 183, 11-20, 2017.
- [26] Lares M, Ncibi M. C, Sillanpää M. (i sar.): Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology, *Water Research*, 133, 236-246, 2018.
- [27] Tiwari E, Singh N, Khandelwal N. (i sar.): Application of Zn/Al layered double hydroxides for the removal of nano-scale plastic debris from aqueous systems, *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122769, 2020.
- [28] Perren W, Wojtasik A, Cai Q, *Removal of Microbeads from Wastewater Using Electrocoagulation*, ACS Omega, 3, 3, 3357-3364, 2018.
- [29] Kim K. T, Park S, Enhancing Microplastics Removal from Wastewater Using Electro-Coagulation and Granule-Activated Carbon with Thermal Regeneration, *Processes*, 9, 4, 617, 2021
- [30] Yansaneh O. Y, Zein S. H, Latest Advances in Waste Plastic Pyrolytic Catalysis, *Processes*, 10, 4, 683, 2022
- [31] Venturelli M, Falletta E, Pirola C. (i sar.): Experimental evaluation of the pyrolysis of plastic residues and waste tires, *Applied Energy*, 323, 119583, 2022.
- [32] Kumari A, Rajput V, Mandzhieva S. S, (i sar.): Microplastic Pollution: An Emerging Threat to Terrestrial Plants and Insights into Its Remediation Strategies, *Plants*, 11, 3, 340, 2022.

- [33] Dawson A. L, Kawaguchi S, King C. K, (i sar.): Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill, *Nature Communications*, 9, 1001, 2018.
- [34] Austen K, MacLean J, Balanzategui D. (i sar.): Microplastic inclusion in birch tree roots, *Science of The Total Environment*, 808, 152085, 2022.
- [35] Ma T, Luo Y, Christie P. (i sar.): Removal of phthalic esters from contaminated soil using different cropping systems: A field study, *European Journal of Soil Biology*, 50, 76-82, 2012.