

# Utjecaj COVID-19 obrazaca ponašanja na ekosustave

P. Bubaš, D. Hećimović, F. Mikuličić, I. Terzić i M. Miloloža\*

Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije,  
Trg Marka Marulića 19, 10 000 Zagreb

Ovo djelo je dano na korištenje pod  
Creative Commons Attribution 4.0  
International License



## Sažetak

Pandemija COVID-19 prouzročila je promjenu globalnoga razmišljanja i donijela svijetu neke nove i specifične obrasce ponašanja. Pandemijsko je razdoblje gotovo u potpunosti usmjerilo fokus na globalnu zdravstvenu krizu te su neke pretpandemijske cirkularne vrijednosti bivale zanemarivane. Stavljajući zdravlje svojih građana kao prioritetno, mnoge su se države i vlade ponovno okrenule linearnome gospodarstvu. Također, svjetska je populacija počela rapidnom brzinom konzumirati određene farmaceutike, pojavilo se (pre)naglašeno potenciranje osobne higijene i upotrebe dezinfekcijskih sredstava te se smanjenjem ljudskog kontakta ubrzano povećala potražnja i upotreba jednokratne plastike. Pojedini dijelovi industrije privremeno su se ugasili, no pojedini su sektori radili pojačanim intenzitetom, a prenapučenost zdravstvenih ustanova i neadekvatno zbrinjavanje medicinskog otpada i bolničkih otpadnih voda zadalo je specifičan udarac svjetskim ekosustavima. Tako se u okolišu odjednom našla neočekivano velika količina raznih farmaceutika, proizvoda za osobnu higijenu, jednokratne plastike, proizvoda za osobnu zaštitu, kao i medicinskog opasnog i neopasnog otpada. Stoga je iznimno važno sagledati širu sliku pandemijskih posljedica po okoliš te shodno tome donijeti adekvatna rješenja glede sprječavanja i smanjenja onečišćenja okoliša uzrokovanog pandemijom. Pojedina pandemijska ponašanja treba promijeniti, nastalu štetu sanirati i usmjeriti globalnu proizvodnju ka nekim novijim i održivijim tehnologijama. U ovome će se radu dati sažet pregled posljedica globalne zdravstvene krize na biosferu te perspektiva za potencijalno rješavanje nastalih problema i suzbijanje budućih katastrofa.

## Ključne riječi

COVID-19 pandemija, onečišćenje, održivost, okoliš, farmaceutici

## 1. Uvod

Nedavna pandemija uzrokovana SARS-CoV-2 virusom mimo samih simptoma i smrtnosti bolesti sa sobom je donijela mnoge dodatne probleme. Pandemija je uzrokovala ne samo globalnu zdravstvenu krizu već i ekstremnu socijalnu, ekonomsku i političku uzurpiranost na svjetskoj razini.<sup>1</sup> Poštujući naputke svojih vlada i provodeći vlastita uvjerenja i stavove, globalna je populacija promijenila svoj uobičajeni stil života i prihvatila neke nove obrasce ponašanja. S obzirom na to da su te promjene neposredno povezane uz pandemiju COVID-19, na njih će se u ovom radu referirati kao na "pandemijski obrazac ponašanja" te "COVID-19 obrazac ponašanja". Ovaj rad pokušat će pružiti koncizan i cjelovit pregled utjecaja specifičnih ponašanja iz pandemijskog obrasca na svjetske ekosustave te dati neke prijedloge sanacije i prosperiteta za budućnost.

U prosincu 2019. godine kineski grad Wuhan prijavio je prvi dokumentirani slučaj dotad nepoznate respiratorne bolesti. Kasnije je otkriveno da je tu bolest uzrokovao novonastali SARS-CoV-2 virus te je bolesti kojoj je on uzročnik dodijeljeno ime COVID-19. Nažalost, 9. siječnja 2020. potvrđen je i prvi smrtni slučaj zbog spomenutoga virusa u Kini, a 1. veljače 2020. on je odnio i prvi život izvan Kine na Filipinima, dok je već 14. veljače 2020. i Europa zabilježila prvu smrt u Francuskoj.<sup>2</sup> Tako je do 15. listopada 2022. u svijetu bilo zabilježeno čak 624 288 971 slučaj oboljelih,<sup>3</sup> a ta je brojka u jednom razdoblju rasla stopom od preko 4 milijuna tjedno.<sup>4</sup> Vlade širom svijeta pribjele su raznim mjerama i preporukama zaštite te ograničenjima

uobičajenim ljudskih aktivnosti, čime je nastupio kratkotrajni učinak nazvan "antropauzom".<sup>5</sup> Pandemija SARS-CoV-2 od samih je početaka imala znatan utjecaj na zdravlje, ekonomiju i društveni život većine ljudi širom svijeta. Tijekom globalne kampanje cijepljenja provedene tijekom 2022. godine, broj žrtava se smanjio, no kao posljedica ostala su pitanja povezana s utjecajem različitih lijekova na okoliš koja su se gotovo tri godine upotrebljavala za liječenje bolesti COVID-19. Neki od lijekova koji su upotrebljavani su lopinavir, ritonavir, hidroksiklorokin, ksanin i azitromicin.<sup>3</sup> Uz navedenu hitnu sanitarnu situaciju nije se moglo voditi računa o mogućim neizravnim štetnim utjecajima na okoliš, kao što je, primjerice, ispuštanje velikih količina lijekova iz uređaja za obradu otpadnih voda. Takva široka uporaba lijekova, na početku, ali i tijekom vrhunca pandemije, gdje većina nije dotad bila upotrebljavana u takvoj količini, dovela je do novih rizika za vodeni okoliš zbog njihova naglog porasta u površinskim vodama. Uz lijekove, zabilježen je i porast koncentracija sredstava za čišćenje ruku i kvarternih amina, što potencijalno dovodi do mikrobne otpornosti.<sup>6</sup>

Jedno od najranijih specifičnih pandemijskih obrazaca ponašanja uzrokovala je globalna preporuka pojačanja osobne higijene proizašla iz dokaza da pravilno i često pranje ruku smanjuje transmisiju virusa i to za čak 45 – 55 %.<sup>7</sup> U pandemijskom vremenu vladala je i smanjena ekonomska aktivnost zajedno sa smanjenom frekvencijom putovanja i transporta općenito. Pandemija je donijela i enormno povećanje uporabe raznih preskriptivnih lijekova i farmaceutika iz slobodne prodaje, kao i povećanu uporabu antidepresiva.<sup>8</sup> U pandemijski obrazac ponašanja ulazi i povećana stopa uporabe plastike, što u svrhu medicinske zaštite (zaštitne rukavice, odijela)<sup>9</sup> što zbog povećane

\* Autor za dopisivanje: dr. sc. Martina Miloloža  
e-pošta: [miloloza@fkit.unizg.hr](mailto:miloloza@fkit.unizg.hr)

stope naručivanja proizvoda putem Interneta<sup>10</sup> te stvorene navike naručivanja hrane putem dostave.<sup>11</sup> Kako se zbog brzog širenja zaraze povećavao broj oboljelih, ljudi su se nastojali zaštititi te su tijekom svojeg svakodnevnog života počeli nositi maske i redovito nanositi sredstva za čišćenje ruku. Zbog toga je porasla globalna potražnja i proizvodnja osobnih zaštitnih potrepština. Potrošnja sredstava za čišćenje ruku prije pandemije iznosila je 14,6 %, a nakon pandemije porasla je na 89,8 %, dok je potrošnja prijenosnih sredstava za čišćenje ruku porasla s 4,1 % na 39,3 %.<sup>12</sup> Također, kako je rastao i broj hospitalizacija, došlo je do masovne proizvodnje medicinskog otpada zbog povećane uporabe osobne zaštitne opreme na bazi plastike. Pojačana je i uporaba plastičnih materijala za jednokratnu upotrebu, kao što su intravenske kapalice, boce s fiziološkom otopinom i slično. Tijekom COVID-19 dnevna proizvodnja plastike iznosila je 1,6 milijuna tona, što je kao posljedicu imalo dnevno odbacivanje 3,4 milijarde komada medicinske plastike za jednokratnu uporabu.<sup>13</sup>

## 2. COVID 19 pandemija – utjecaj na okoliš

Pandemija je na okoliš utjecala i na pozitivne i na negativne načine. Nažalost, negativan utjecaj je dugotrajniji i veći, no ne treba zaboraviti niti pozitivan utjecaj na okoliš. Svi su ti utjecaji neposredno povezani s “antropauzom” i smanjenjem transportne i industrijske aktivnosti kao i učestalijim boravkom populacije u vlastitim domovima. Tako je primjerice u prvome tromjesečju pandemije poboljšana kvaliteta zraka u atmosferi, no smanjena je kvaliteta zraka u unutarnjim prostorima. Dodatno, kako je smanjen broj turista, posljedično tome smanjena je i količina nastalog otpada, što se pozitivno odrazilo na tlo, no povećana je dezinfekcija otvorenih prostora. Primijećeno je i smanjeno ispuštanje industrijskih otpadnih voda, no i povećano ispuštanje kućanskih otpadnih voda. Dogodio se i izravan utjecaj na živi svijet, prilikom čega je smanjena deforestacija (posljedica smanjenja aktivnosti drvne i papirne industrije) i trgovina divljim životinjama. No povećano je pojavljiva-

Tablica 1 – Pregled pandemijskih utjecaja na okoliš<sup>14</sup>

Table 1 – Overview of pandemic impacts on the environment<sup>14</sup>

Sastavnica okoliša		Utjecaj
zrak	pozitivni	poboljšanje kvalitete zraka u prvom tromjesečju pandemije; smanjenje buke; smanjenje primarnih onečišćujućih tvari i organskih hlapljivih spojeva; smanjenje potrošnje fosilnih goriva u prvom tromjesečju pandemije; smanjenje emisije stakleničkih plinova; smanjenje pješćanih oluja
	negativni	smanjenje kvalitete zraka u prostorijama; povratak na pretpandemijsku količinu onečišćenja zraka već u drugom tromjesečju pandemije; povećan akustični otisak; povećanje emisija stakleničkih plinova i štetnih kemijskih komponenata u dugoročnom kontekstu zbog povećanja globalnih aktivnosti spaljivanja otpada
tlo	pozitivni	smanjenje biorazgradivog miješanog komunalnog otpada u prvom tromjesečju; smanjen turistički pritisak na okoliš; smanjenje potrošnje ugljena u Kini, smanjenje ekstrakcije nafte, rudarenja i aktivnosti u kamenolomima; smanjenje požara antropogenog podrijetla
	negativni	povećanje odlaganja otpada; povećanje potencijalnog utjecaja na geomorfologiju i povećanje ispuštanja toksičnih procjednih voda; povećanje dezinfekcijskih aktivnosti štetnim kemijskim supstancama na otvorenim prostorima; potencijalno kašnjenje sadnje povrća radi ograničenog uvoza gnojiva; rasprostranjenost SARS-CoV-2 virusa u zemlji; rasprostranjenost SARS-CoV-2 virusa u mulju; potencijalno povećanje intenzivne kulture ranjivih područja zbog pritiska <i>lockdown</i> -a na lokalnu proizvodnju hrane; povećanje onečišćenja plastičnim otpadom povezanog uz zdravstveni sustav i sektore pakiranja hrane
voda	pozitivni	smanjenje ispuštanja komercijalnih i industrijskih otpadnih voda; poboljšanje kvalitete površinskih voda u prvom tromjesečju; čišći vodeni putovi; smanjenje acidifikacije oceana zbog smanjenja ugljikova dioksida; smanjenje onečišćenja bukom
	negativni	povećano ispuštanje komunalnih otpadnih voda; učestalije poplave; povećana potražnja za vodom; povećano onečišćenje plastikom (pogotovo opremom za osobnu zaštitu); detektirane su značajne razine SARS-CoV-2 virusa u komunalnim tokovima; povećane koncentracije farmaceutika i proizvoda za osobnu njegu u jezerima i postrojenjima za obradu otpadnih voda te riječnim i estuarijskim sustavima u Kini; potencijalno povećanje kloridnih dezinficijensa vodenih ekosustava; povećani doprinosi mikrovlakana i štetnih kemijskih komponenata otpuštenih iz jednokratnih maski za lice
živi svijet	pozitivni	smanjenje deforestacije; smanjenje trgovine divljim životinjama; smanjenje naleta vozila na divlje životinje; smanjenje promatranja divljih životinja u Sjevernoj Africi; smanjenje pritiska na ribe i druga vodena bića; obnova vegetacije uslijed smanjenja pojave požara; smanjenje kretanja životinja; obnavljanje ugroženih vrsta (poput sedmopruge usminjače i koraljnih riba)
	negativni	povećanje agresivnih sinantropskih predatora (npr. vrane) u prirodnim staništima, a time i utjecaja na strukturu hranidbenih mreža ili strukturu životinjskih zajednica (npr. mali sisavci, gmazovi, rakovi); interakcija divljih životinja s proizvodima za osobnu zaštitu (ingestija, zapetljavanje i mnoge druge); povećanje oportunističkih vrsta poput glodavaca; promjena ponašanja oportunističkih vrsta; povećana osjetljivost divljeg svijeta (npr. sisavaca) na virusne infekcije (uključujući SARS-CoV-2); povećana osjetljivost divljeg svijeta na COVID-19 upalu pluća; veći ekotoksikološki rizici povezani s antivirusnim farmaceuticima (poput favipiravira, lopinavira, umifenovira i ritonavira) i dezinficijensima; prijenos SARS-CoC-2 virusa putem hrane kroz životinjske proizvode; mikrovlakna iz maski za lice inducirale su ekotoksičnost na beskrležnjacima iz tla (skokuni i gujavice); povećana nesigurnost o pružanju opskrbe hranom za uzgoj domaćih životinja (npr. ograničenja putovanja smanjile su pristup esencijalnim sirovinama za uzgojne aktivnosti) u prvom tromjesečju

nje agresivnih sinantropskih predatora (nepripitomljenih vrsta koje žive blisko uz ljude i imaju koristi od njih poput vrana) u prirodnim staništima, čime se poremetila struktura hranidbenih mreža ili struktura zajednica. Sistematičan i kratak pregled glavnih pandemijskih utjecaja dan je u tablici 1.<sup>14</sup>

Zahvaljujući pandemijskom obrascu ponašanja, tijekom pandemije javila se pojačana emisija pojedinih onečišćujućih tvari. Neke od onečišćujućih tvari koje su se počele prekomjerno gomilati u okolišu su plastični otpad, farmaceutici poput fluoksetina, sertralina, ribavirina, ivermectina, hidroksiklorokina, klorokina, azitromicina, zatim dezinficijensi poput onih na bazi klora i kvaternih amonijevih spojeva te sredstva za osobnu higijenu. Farmaceutici, dezinficijensi i sredstva za osobnu higijenu su ksenobiotici izrazito varijabilnog kemijskog sastava te svaki proizvođač tih proizvoda ima pravo dizajnirati ih na sebi svojstven način i plasirati krajnjim potrošačima, dokle god je njihov sastav propisno deklariran. S plastikom postoji dodatni problem jer, osim kombinacija njezina sastava, tijekom njezine proizvodnje dodaju se i razni aditivi prikazani u tablici 2.<sup>15</sup> Ti aditivi dodaju se u razne vrste plastike te uzrokuju brojne zdravstvene rizike i probleme. Primjerice, bisfenol A i ftalati koji se dodaju u polikarbonate i polivinil-klorid) uzrokuju poremećaje jajnika imitirajući estrogen te interferiraju s testosteronom uzrokujući probleme sa smrtnošću spermija.

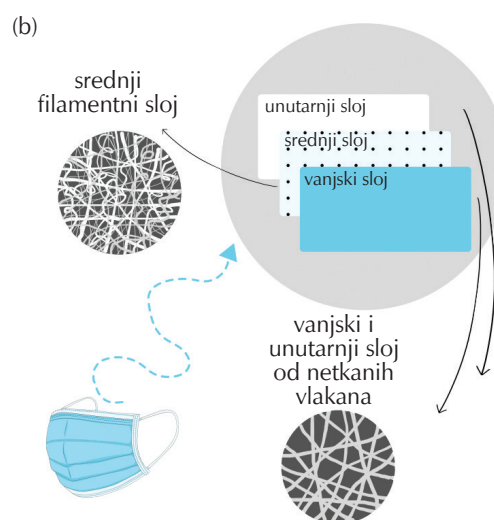
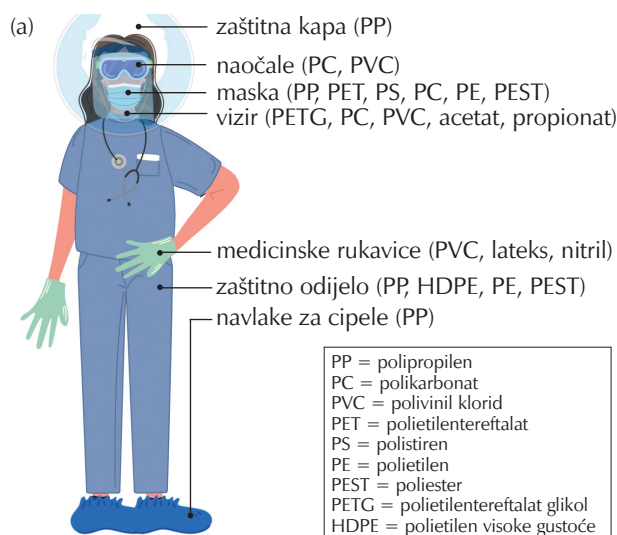
Kao jedna od mjera predostrožnosti za usporavanje prijenosa COVID-19 infekcije uvedena je obvezatna upotreba zaštitne opreme u bolnicama, kao i maski za lice na svim javnim površinama. Zaštitna se oprema proizvodi od raznih materijala, kako je vidljivo na slici 1(a) te je kao takva važan izvor plastičnog otpada u okolišu. Zaštitne maske za lice za jednokratnu uporabu, koje je široj populaciji bilo obvezatno upotrebljavati, proizvode se od polimera. Zaštitne maske građene su od tri sloja: unutarnji sloj (netkana meka vlakna), srednji filamentni sloj kao otapajući glavni

Tablica 2 – Aditivi u plastičnim masama koje su se upotrebljavale tijekom pandemije

Table 2 – Additives in plastics used during the pandemic

Aditiv/komponenta	Tip plastike u koji se dodaje	Učinak na ljudsku populaciju
Bisfenol A	PC, PVC	Imitira estrogen, poremećaji jajnika.
Ftalati	PC, PVC	Interferiraju s testosteronom uzrokujući probleme sa smrtnošću spermija.
Postojane organske onečišćujuće tvari (engl. <i>persistent organic pollutants</i> )	Svi tipovi	Moguća neurološka i reproduktivna oštećenja.
Dioksini	Svi tipovi	Karcinogeno interferiraju s testosteronom.
Policiklički aromatski ugljikovodici	Svi tipovi	Razvojna i reproduktivna toksičnost.
Poliklorirani bifenili	Svi tipovi	Interferira s tiroidnim hormonima.
Monomer stirena	PC	Karcinogen koji može stvarati DNA adukte.
Nonilfenol	PVC, HDPE, LDPE	Imitira estrogen.
Vinil klorid	PVC	Karcinogen, utječe na središnji živčani sustav, jetru i slezenu. Iritira oči, kožu i respiratorni sustav.
Acetaldehid	PVC, PP	Oštećuje živčani sustav i stvara lezije.
Furani	Svi tipovi	Iritira oči i respiratorni sustav te uzrokuje astmu.

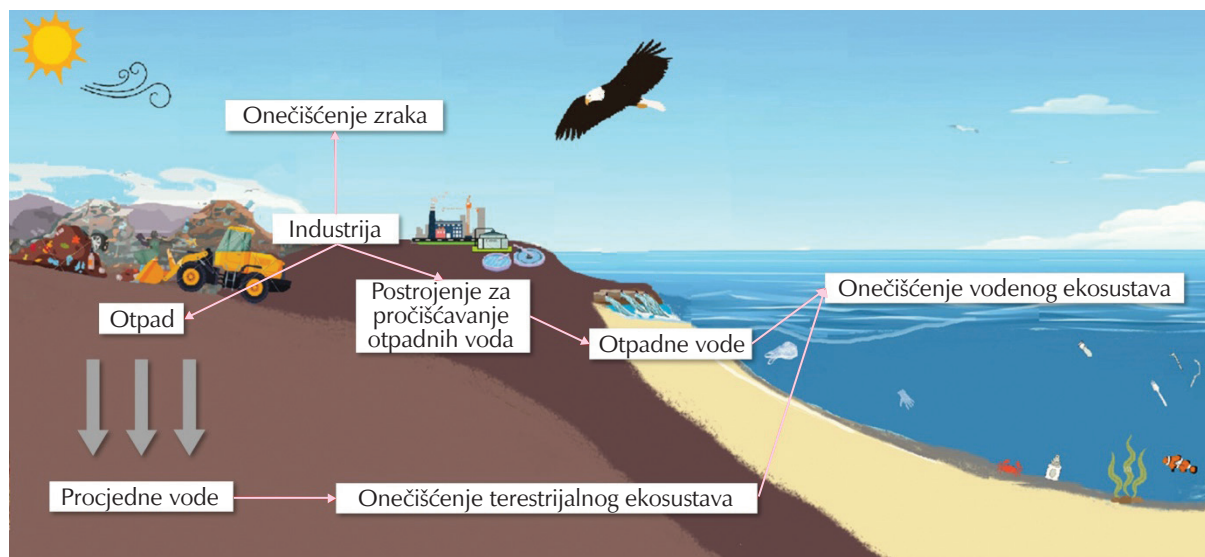
\*PC = polikarbonat, PVC = polivinil -klorid, HDPE = polietilen visoke gustoće, LDPE = polietilen niske gustoće, PP = polipropilen



Slika 1 – (a) Vrste plastike u proizvodima za zaštitu od SARS-CoV-2 virusa; (b) shematski prikaz slojeva zaštitne maske za lice

Fig. 1 – (a) Types of plastics in products for protection against the SARS-CoV-2 virus; (b) schematic representation of the layers of a protective face mask





Slika 2 – Karakteristični putevi nastanka onečišćenja tijekom COVID-19 pandemije  
Fig. 2 – Characteristic pollution-pathways during the COVID-19 pandemic

filtracijski sloj (engl. *middle filtering melt-blown layer*) i vanjski sloj (netkana vlakna, koja su hidrofobna i obično obojena), što je prikazano na slici 1(b). Jednokratne maske za lice u okolišnim uvjetima mogu se razgraditi ili fragmentirati na čestice veličina manjih od 5 mm, poznate kao mikroplastika. Dakle, pri odlaganju jednokratnih maski javljaju se dva glavna problema, pojava mikroplastike u ljudskoj prehrani putem vodenih tokova te vrlo očit problem transmisije raznih bolesti.<sup>16</sup>

### 3. Pregledni dio

#### 3.1. Utjecaj na okoliš

Kako je prije spomenuto u tablici 1, pandemijski je obrazac ponašanja imao vrlo široke i raznolike utjecaje na okoliš, što uključuje i karakteristične puteve nastajanja onečišćenja zraka te vodenih i kopnenih ekosustava, kako je prikazano na slici 2.

U svrhu boljšeg poznavanja djelovanja pojedinih ksenobiotika koji su u vrijeme pandemije okolišu zadali povećano opterećenje, provedena su mnoga ekotoksikološka istraživanja, čiji je sažet pregled dan u tablici 3. U sklopu navedenih istraživanja pratili su se odgovori određenih organizama na pojedine ksenobiotike te su ti podatci kasnije povezani uz pojedine učinke na sastavnice okoliša.

#### 3.2. *In silico* procjena rizika

*In silico* modeliranje u ekotoksikologiji igra ključnu ulogu u predviđanju potencijalnih rizika i utjecaja kemikalija na okoliš.<sup>27</sup> Ta metoda primjenjuje računalne simulacije da bi

se modelirali učinci kemikalija na živi svijet, čime se smanjuje potreba za testiranjem na stvarnim organizmima te smanjuju troškovi istraživanja. *In silico* modeliranje odigralo je ključnu ulogu u procjeni rizika tijekom i nakon pandemije COVID-19, omogućujući predviđanje širenja bolesti, analizu učinkovitosti intervencija, predviđanje i simulaciju širenja kemikalija i onečišćujućih tvari u okolišu te procjenu njihovih potencijalnih ekotoksičnih učinaka. Primjenom matematičkih modela moguće je simulirati scenarije širenja virusa, procijeniti broj zaraženih, predvidjeti potrebe za zdravstvenom zaštitom te pružiti smjernice za prilagodbu i optimizaciju javnozdravstvenih mjera. Matematički modeli također su korisni za procjenu dugoročnih učinaka pandemije na gospodarstvo, socijalne sfere i javno zdravlje, što pomaže u planiranju strategija oporavka i prevencije budućih pandemija.<sup>28,29</sup> Važno je napomenuti da preciznost matematičkih modela ovisi o kvaliteti dostupnih podataka i pretpostavkama modela, stoga ih je potrebno rabiti kao alate uz druge relevantne informacije i stručno znanje za cjelovitu procjenu rizika kemikalija na okoliš nakon pandemije. ECHA i US EPA nadziru otpuštanje onečišćujućih tvari diljem Europe i Sjedinjenih Američkih Država te preporučuju primjenu alternativnih strategija ispitivanja (engl. *alternative testing strategies*, ATS) da bi se izbjegla testiranja *in vivo* i promovirala upotreba *in silico* alata, uglavnom QSAR metode, za regulatorna ispitivanja. QSAR modeli koji se primjenjuju u procjeni ekotoksičnosti trebaju pružati dovoljnu robusnost u smislu izračunatih metrika. Štoviše, QSAR modele razvijene pomoću jednostavnijih i opisnih deskriptora prihvatili su i preporučili razni podatkovni znanstvenici (engl. *data scientists*), uključujući toksikologe i ekoinženjere.<sup>22</sup> *In silico* modeliranje ima veliku vrijednost u ekotoksikologiji, jer omogućuje brže i preciznije procjene rizika kemikalija za okoliš i organizme te pomaže u razvoju sigurnijih proizvoda i održivijeg upravljanja kemikalijama.<sup>30</sup>

Tablica 3 – Utjecaj ksenobiotika upotrebljivanih tijekom pandemije na sastavnice okoliša  
 Table 3 – Impact of xenobiotics used during the pandemic on the environmental components

Sastavnica okoliša	Onečišćujuće tvari	Organizmi	Glavni rezultat i utjecaj na okoliš	Lit.
Terestijalni ekosustav – tlo	Medicinske maske od polipropilena za jednokratnu upotrebu	Kopneni jednakožnac <i>Porcellio scaber</i> , ličinke brašnara <i>Tenebrio molitor</i> i enhitreje <i>Enchytraeus crypticus</i>	Učinci mikroplastike na stopu preživljavanja, metabolizam, reproduktivni i imunološki sustav organizama procijenjeni su nakon 21 dana izlaganja u tlu. Niti jedna vrsta mikroplastike nije utjecala na preživljavanje ispitivanih organizama. Mikroplastika iz medicinskih maski nije utjecala na razmnožavanje <i>E. crypticus</i> , no uzrokovala je privremeni imunološki odgovor <i>P. scaber</i> te promijenila energetske biomarkere u ličinkama brašnara <i>T. molitor</i> . Vidljivo je da testirani kopneni beskralježnjaci reagiraju na mikroplastiku iz jednokratnih medicinskih maski, ali ostaje nejasno što te promjene znače za dugoročni <i>fitness</i> tj. razinu reproduktivne uspješnosti organizma.	17
	Dezinfekcijski kvaterni amonijevi spojevi (engl. <i>quaternary ammonium compounds</i> , Quats)	Slatkovodni vodeni organizmi, uključujući alge, beskralježnjake, ribe i vodene biljke	Upotrebom Quats-a u skladu s preporukama, osobito u proizvodima koji će biti obrađeni u sustavima za pročišćavanje otpadnih voda, moguće je umanjiti njihov potencijalno negativan utjecaj na okoliš. Većina tih spojeva uklanja se iz otpadnih voda biološkim procesima, a preostale količine koje dospiju u okoliš brzo će se vezati za sedimente i tlo, čime se smanjuje toksičnost dezinficijensa. Stoga su mnoge regulatorne agencije potvrdile sigurnost Quats-a u trenutnim primjenama, uključujući njihovu primjenu kao aktivnih antimikrobnih sastojaka u proizvodima za čišćenje.	18
	Kombinirana kratka izloženost peptida izvedenih iz SARS-CoV-2 s višestrukim novonastalim onečišćenjima u okolišnim koncentracijama	Ličinke vodencvjetokriša ( <i>Cloeon dipterum</i> , Ephemeroptera: Baetidae)	Izlaganje ličinke <i>C. dipterum</i> peptidima izvedenim iz SARS-CoV-2 (sami ili u kombinaciji s mješavinom onečišćenja) uzrokuje promjene u tjelesnom stanju, promjene koje ukazuju na neravnotežu oksidacijsko-redukcijskih procesa i negativan utjecaj na kolinesterazni sustav tih životinja. Iako viralni peptidi nisu pojačali učinke mješavine onečišćenja, ovo istraživanje ukazuje na potencijalni ekotoksični rizik povezan sa širenjem koronavirusa u vodenim okolišima, stoga se preporučuje istraživanje te teme na drugim organizmima i u drugim eksperimentalnim kontekstima.	19
Vodeni ekosustav	Farmaceutici – Selektivni inhibitori ponovne pohrane serotonina (engl. <i>Selective serotonin reuptake inhibitors</i> , SSRIs) SSRI – fluoksetin i sertralin	<i>Daphnia magna</i>	Izloženost SSRI-jima ima transgeneracijske posljedice na generaciju koja nije bila izložena, a potencijalno i dalje, čak i pri niskim koncentracijama (10 – 100 puta nižim nego što se može pronaći u prirodnim ekosustavima). Identificirani su izravni učinci SSRI-ja na brzinu otkucaja srca i plivanje u prvoj generaciji. Zbog svojih fizikalno-kemijskih karakteristika i ponašanja u složenim smjesama u okolišu, SSRI još nisu uklonjeni, pokazujući postojanost u tlu, podzemnim i površinskim vodama cijelog planeta, što može predstavljati budući rizik za kopnene i vodene ekosustave.	8,20
	Farmaceutik – antivirusni lijek ribavirin (RBV)	Embriji zebreice	Testiranje embrija zebreice otkrilo je da se ekotoksičnost tretiranih otopina RBV-a povećavala u nekim fazama i smanjivala kako se produžavalo vrijeme reakcije, što se može pripisati stvaranju i razgradnji različitih proizvoda transformacije (TP). Toksikološke krajnje točke uključivale su smetnje izlijeganja, fenotipske abnormalnosti i smrtnost (nekroza embrija). Dodatno, predviđanja QSAR-a (engl. <i>Quantitative structure-activity relationships</i> ) sugeriraju da je većina TP-a pokazala veću toksičnost od matičnog spoja, dodatno naglašavajući da je povećanje toksičnosti tretiranog RBV-a uzrokovano stvaranjem i nakupljanjem više toksičnih TP-a.	21
	Farmaceutici koji se upotrebljavaju za COVID-19 diljem svijeta	Alge ( <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> ), rakovi ( <i>Daphnia magna</i> ), te ribe ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> , <i>Pimephales promelas</i> i <i>Danio rerio</i> )	25 lijekova pokazalo je alarmantno povećanu predviđenu toksičnost, jer su sve njihove vrijednosti veće od kontrolnih. Na temelju skalirane prosječne predviđene toksičnosti, ECOSAR (engl. <i>Ecological Structure Activity Relationships</i> ) i proučavanih QSAR modela, identificirana su tri najčešća lijeka koji su potencijalno toksični za proučavane vrste u vodenom okolišu.	22

Tablica 3 – (nastavak)  
Table 3 – (continued)

Sastavnica okoliša	Onečišćujuće tvari	Organizmi	Glavni rezultat i utjecaj na okoliš	Lit.
Vodeni ekosustav	Antivirusni lijekovi povezani sa SARS-CoV-2	Alge, bakterije, rakovi, ribe	Znanstvenici su pokazali da antivirusni lijekovi poput ivermectina, hidroksiklorokina i klorokina, koji se smatraju potencijalnim terapijama za liječenje infekcije SARS-CoV-2, imaju karcinogeni, toksični i teratogeni karakter. Antivirusni lijekovi predstavljaju opasnu prijetnju za vodene ekosustave, a njihova toksičnost i stvarni učinci na okoliš trebaju se detaljno proučiti.	2
	Farmaceutici i proizvodi za osobnu njegu (engl. <i>Pharmaceuticals and personal care products</i> , PPCPs)	Ribe (tilapija [ <i>Oreochromis</i> spp.], cipal bataš [ <i>Mugil cephalus</i> ], šaran [ <i>Cyprinidae</i> ], i somovi [ <i>Clarias</i> spp.])	Parabeni, koji su učinkovito uklonjeni u uređajima za pročišćavanje otpadnih voda, bili su prisutni u visokim koncentracijama ( $> 1000 \text{ ng l}^{-1}$ ) u gradskim rijekama, što ukazuje na neučinkovitost kanalizacijskih sustava i/ili izravnih ispuštanja nepročišćenih komunalnih otpadnih voda u riječne slivove. Rezultati procjene potencijalnog rizika na temelju koncentracije PPCP-a izmjerene u plazmi ribe sugerirali su da klorfeniramin, triklosan, haloperidol, triklokarban, diklofenak i difenhidramin mogu predstavljati moguće štetne učinke na divlje vrste riba.	23
	Dezinficijensi na bazi klor	Fitoplanktoni, zooplanktoni, bentoski makrobekralježnjaci i bakterije	Na raznolikost bentoskih makrobekralježnjaka izravno je utjecao preostali klor, a neizravno su utjecali bakterioplanktoni i zooplanktoni. Iako nije bilo znatne inhibicije gustoće fitoplanktona i zooplanktona, dugoročni učinci na vodene organizme još uvijek su vrijedni daljnjeg istraživanja.	24
Vodeni ekosustav – more	Azitromicin	Bentoski morski oblici (Nematoda)	Brojnost i taksonomska raznolikost zajednica oblića značajno se smanjila nakon izlaganja azitromicinu, što je potvrđeno toksikokinetičkim podacima. Pokazano je da azitromicin ima štetne učinke na oblice, značajno smanjujući njihovu ukupnu gustoću i dovodeći do nestanka najosjetljivijih svojiti.	3
	Hidroksiklorokin (engl. <i>Hydroxychloroquine</i> , HCQ)	22 vrste morskih oblića, koje pripadaju 22 roda, 12 obitelji i 5 redova	Rezultati su utvrdili da je u usporedbi s kontrolama, tijekom kratkotrajne izloženosti došlo do znatnog smanjenja brojnosti i raznolikosti bogatstva vrsta. Svoje koje pripadaju toj funkcionalnoj skupini tolerantne su na toksičnost i trebale bi bioakumulirati HCQ koji se oslobađa u obalnim područjima u zemljama epicentra COVID-19. Na tim lokacijama, plodovi mora koji uključuju meiofaunu u svojoj prehrani, u različitim fazama svoje ontogeneze, mogu biti povezani s visokim zdravstvenim rizicima za potrošače.	25
Terestrijalni i vodeni ekosustav	Mikroplastika (MP) i nanoplastika (NP)	Ribe, dagnje, miš, štakor, ljudske stanice	Naglašeno je da su gutanje, udisanje i kontakt preko kože glavni načini izloženosti MP/NP česticama. Nadalje, oksidativni stres, citotoksičnost, oštećenje DNA, imunološki odgovor, neurotoksičnost i, konačno, oštećenje probavnog, respiratornog, reproduktivnog i živčanog sustava predstavljaju ozbiljne zdravstvene posljedice. Fizički i kemijski sastav MP-a uvelike određuje njezin ekotoksični rizik. Sveobuhvatno znanje o putevima izloženosti i toksičnim učincima MP-a i NP-a na životinje i zdravlje ljudi još nije potpuno poznato.	26

### 3.3. Strategije za smanjenje onečišćenja – perspektiva za budućnost

Kako bismo se učinkovito suočili s nizom izazova koje je donijela pandemija COVID-19 (od ekološkog utjecaja do sigurnosti i zaštite na radu i energetske stabilnosti), nužna je implementacija sveobuhvatnih intersektorskih strategija.<sup>31</sup> Takav pristup ima potencijal znatno smanjiti negativne ekološke i socio-ekonomske posljedice pandemije. Konkretno, unaprjeđenje sustava za upravljanje medicinskim otpadom može povećati otpornost na buduće krize ili epidemije. Mobilni, decentralizirani, pametni i prilagod-

ljivi pristupi koji uključuju IoT tehnologije (engl. *Internet of Things*, IoT) predstavljaju važne inovacije.<sup>32</sup> Vrijedno je primijeniti analizu životnog ciklusa (engl. *Life Cycle Assessment*, LCA) za kvantitativnu ocjenu ekološkog utjecaja.<sup>11,33</sup> U području bioplastike LCA istraživanja ukazuju na potencijalne ekološke izazove.<sup>34</sup> Dodatne inovacije u genetskim tehnologijama i pristupima biorafiniranja su nužne.<sup>34,35</sup> Tehnologije kao što su depolimerizacija i piroliza, zajedno s tehnološkim inovacijama u *upcycling* procesima, mogu omogućiti transformaciju plastičnog otpada u visokovrijedne proizvode.<sup>4,36</sup> Hibridno strojno učenje i *pinch* analiza nude dodatne strategije za maksimizaciju reciklira-



nja plastičnog otpada i promociju cirkularne ekonomije u uvjetima COVID-19 pandemije.<sup>37</sup>

Za holistički pristup upravljanju otpadom ključno je integrirati održive metode i za uklanjanje farmaceutika, proizvoda za osobnu njegu i dezinficijensa, kao i za obradu mulja koji ostaje nakon pročišćavanja otpadnih voda. Iako tradicionalna postrojenja za pročišćavanje ne pružaju adekvatno uklanjanje novonastalih onečišćujućih tvari, napredne metode kao što su termokemijski procesi (piroliza, plinifikacija i hidrotermalna razgradnja) obećavaju bolje rezultate u degradaciji i stabilizaciji tih tvari. Dodatno, nusproizvodi kao što je mikroplastika mogu se rabiti kao prekursori za proizvodnju adsorbensa, a generirani hlapljivi spojevi i plinovi mogu se transformirati u održive energetske resurse.<sup>38,39</sup>

S obzirom na to da se farmaceutici i proizvodi za osobnu njegu sve češće detektiraju u otpadnim vodama, nužno je uspostaviti međunarodni zakonodavni okvir koji će definirati smjernice za njihovu regulaciju prije ispuštanja u vodne ekosustave.<sup>40</sup> Međutim, postojeći zakonodavni prijedlozi često su nespecifični i ne uspijevaju adresirati lokalne izazove i različite kapacitete zemalja za implementaciju takvih regulativa. Za optimizaciju upravljanja medicinskim otpadom preporučuje se implementacija termičkih degradacijskih procesa, kao što je piroliza, s ciljem minimizacije emisije stakleničkih plinova. Osim smanjenja ekološkog utjecaja, taj pristup omogućava energetske rekuperacije iz iskorištene zaštitne opreme, čime se dodatno sprječava problem onečišćenja. Da bi se potvrdila održivost i sigurnost tih metoda, imperativ su daljnje epidemiološke i ekotoksikološke analize za identifikaciju potencijalnih rizika dezinficijensa za ekosustave.<sup>41–44</sup>

Za rješavanje postojećih ekoloških problema uzrokovanih neizravnim štetnim učincima pandemije COVID-19 nužna je prekogranična suradnja i strategija. Integracija intersektorskih pristupa, opsežne LCA analize i inovativnih tehnologija može dovesti do održivih upravljačkih strategija. U tom kontekstu, socio-ekonomske dimenzije moraju biti strogo integrirane u LCA i strateške planove upravljanja otpadom za multidimenzionalnu analizu i optimizaciju utjecaja na održivost.

## 4. Zaključak

Kako su ponašanja pojedinaca i populacije općenito tijekom pandemije rapidno uzrokovale promjene u okolišu, tako je te promjene potrebno rapidno i anulirati. Za to je potrebno temeljito razumijevanje štete koja je nanosena okolišu te postupaka njezine sanacije. Ovaj je rad jedan od pokušaja sistematizacije zasad stečenih znanja i spoznaja vezanih uz posljedice pandemije na svjetske ekosustave te dostupnih aktualnih rješenja za njih. Dodatno, iako se nadamo da se katastrofe tih razmjera više nikad neće ponoviti, potrebno je temeljem dosadašnjih iskustava stvoriti strategiju održivog upravljanja zdravstvenim krizama i karakterističnim izvanrednim ponašanjima pojedinaca i populacije. Stoga se nadamo da će ovaj rad dati dobre temelje za navedene probleme.

## ZAHVALA

Ovaj rad izrađen je u sklopu projekta “Okolišni aspekti SARS-CoV-2 antivirusika” (EnA-SARS, IP-2022-10-2822) koji je financirala Hrvatska zaklada za znanost.

## Popis kratica List of abbreviations

PP	– polipropilen – polypropylene
PC	– polikarbonati – polycarbonates
PVC	– polivinil klorid – poly(vinyl-chloride)
HDPE	– polietilen visoke gustoće – high-density polyethylene
LDPE	– polietilen niske gustoće – low-density polyethylene
ECHA	– Europska agencija za kemikalije – European Chemicals Agency
US EPA	– Agencija za zaštitu okoliša Sjedinjenih Američkih Država – United States Environmental Protection Agency
ATS	– alternativne strategije ispitivanja – alternative testing strategies
QSAR	– kvantitativni odnosi strukture i aktivnosti – quantitative structure-activity relationships
WHO	– Svjetska zdravstvena organizacija – World Health Organization
IoT	– Internet stvari – Internet of Things
LCA	– procjena životnog ciklusa – Life Cycle Assessment

## Literatura References

1. M. A. Zambrano-Monserrate, M. A. Ruano, L. Sanchez-Alcalde, Indirect effects of COVID-19 on the environment, *Sci. Total Environ.* **728** (2020) 138813, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138813>.
2. M. Kumar, P. Mazumder, S. Mohapatra, A. K. Thakur, K. Dhangar, K. Taki, S. Mukherjee, A. K. Patel, P. Bhattacharya, P. Mohapatra, J. Rinklebe, M. Kitajima, F. I. Hai, A. Khurshed, H. Furumai, C. Sonne, K. Kuroda, A chronicle of SARS-CoV-2: Seasonality, environmental fate, transport, inactivation, and antiviral drug resistance, *J. Hazard. Mater.* **405** (2021) 124043, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124043>.
3. R. Badraoui, G. Mannai, A. J. Siddiqui, O. Pacioglu, H. A. Rudayni, F. Boufahja, N. Essid, How toxic is the COVID-19 drug azithromycin in the presence of *Posidonia oceanica*? Toxicokinetics and experimental approach of meiobenthic nematodes from a metallically pristine area, *Environ. Pollut.* **319** (2023) 121007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121007>.
4. H. Zhao, H. Liu, G. Wei, H. Wang, Y. Zhu, R. Zhang, Y. Yang, Comparative life cycle assessment of emergency disposal

- scenarios for medical waste during the COVID-19 pandemic in China, *J. Waste Manag.* **126** (2021) 388–399, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.034>.
5. C. Rutz, M. C. Loretto, A. E. Bates, S. C. Davidson, C. M. Duarte, W. Jetz, M. Johnson, A. Kato, R. Kays, T. Mueller, R. B. Primack, Y. Ropert-Coudert, M. A. Tucker, M. Wikelski, F. Cagnacci, COVID-19 lockdown allows researchers to quantify the effects of human activity on wildlife, *Nat. Ecol. Evol.* **4** (9) (2020) 1156–1159, doi: <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1237-z>.
  6. F. Cappelli, O. Longoni, J. Rigato, M. Rusconi, A. Sala, I. Fochi, M. T. Palumbo, C. Roscioli, F. Salerno, F. Stefani, R. Bettinetti, S. Valsecchi, Suspect screening of wastewaters to trace anti-COVID-19 drugs: Potential adverse effects on aquatic environment, *Sci. Total Environ.* **824** (2022) 153756, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153756>.
  7. T. Jefferson, C. Del Mar, L. Dooley, E. Ferroni, L. A. Al-Ansary, S. A. S. Bahamdan, G. A. Bawazeer, M. L. van Driel, R. Foxlee, A. Rivetti, Physical interventions to interrupt or reduce the spread of respiratory viruses: systematic review, *BMJ* **339** (2009) b3675, doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.b3675>.
  8. N. Diaz-Camal, J. D. Cardoso-Vera, H. Islas-Flores, L. M. Gómez-Oliván, A. Mejía-García, Consumption and occurrence of antidepressants (SSRIs) in pre- and post-COVID-19 pandemic, their environmental impact and innovative removal methods: A review, *Sci. Total Environ.* **829** (2022) 154656, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154656>.
  9. K. R. Vanapalli, H. B. Sharma, V. P. Ranjan, B. Samal, J. Bhattacharya, B. Kumar Dubey, S. Goel, Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic, *Sci. Total Environ.* **750** (2021) 141514, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141514>.
  10. A. L. Patrício Silva, J. C. Prata, A. C. Duarte, D. Barcelò, T. Rocha-Santos, An urgent call to think globally and act locally on landfill disposable plastics under and after covid-19 pandemic: Pollution prevention and technological (Bio) remediation solutions, *J. Chem. Eng.* **426** (2021) 131201, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131201>.
  11. J. J. Klemeš, Y. V. Fan, P. Jiang, The energy and environmental footprints of COVID-19 fighting measures – PPE, disinfection, supply chains, *Energy* **211** (2020) 118701, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118701>.
  12. M. Wang, B. Hu, W. Zhou, K. Huang, J. Fu, A. Zhang, G. B. Jiang, Enhanced hand-to-mouth exposure from hand sanitizers during the COVID-19 pandemic: a case study of triclosan, *Sci. Bull.* **67** (10) (2022) 995–998, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.03.016>.
  13. W. A. Wan Mahari, S. H. Kee, S. Y. Foong, T. S. M. Amelia, K. Bhubalan, M. Man, Y. Yang, H. C. Ong, M. Vithanage, S. S. Lam, C. Sonne, Generating alternative fuel and bioplastics from medical plastic waste and waste frying oil using microwave co-pyrolysis combined with microbial fermentation, *Renew. Sustain. Energ. Rev.* **153** (2022) 111790, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111790>.
  14. P. K. Rai, C. Sonne, H. Song, K. H. Kim, Plastic wastes in the time of COVID-19: Their environmental hazards and implications for sustainable energy resilience and circular bio-economies, *Sci. Total Environ.* **858** (2023) 159880, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159880>.
  15. Abhilash, I. Inamdar, Recycling of plastic wastes generated from COVID-19: A comprehensive illustration of type and properties of plastics with remedial options, *Sci. Total Environ.* **838** (2022) 155895, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155895>.
  16. O. O. Fadare, E. D. Okoffo, Covid-19 face masks: A potential source of microplastic fibers in the environment, *Sci. Total Environ.* **737** (2020) 140279, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140279>.
  17. A. Jemec Kokalj, A. Dolar, D. Drobne, L. Škrlep, A. Sever Škapin, G. Marolt, A. Nagode, C. A.M. van Gestel, Effects of microplastics from disposable medical masks on terrestrial invertebrates, *J. Hazard. Mater.* **438** (2022) 129440, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129440>.
  18. P. C. DeLeo, C. Huynh, M. Pattanayek, K. C. Schmid, N. Pechacek, Assessment of ecological hazards and environmental fate of disinfectant quaternary ammonium compounds, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **206** (2020) 111116, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111116>.
  19. Í. N. Freitas, A. V. Dourado, S. G. da Silva Matos, S. Silva de Souza, T. Marinho da Luz, A. Sueli de Lima Rodrigues, A. T. B. Guimarães, N. M. Mubarak, Md. M. Rahman, A. H. Arias, G. Malafáia, Short-term exposure of the mayfly larvae (*Cloeon dipterum*, Ephemeroptera: Baetidae) to SARS-CoV-2-derived peptides and other emerging pollutants: A new threat for the aquatic environments, *Sci. Total Environ.* **849** (2022) 157813, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157813>.
  20. A. Heyland, T. Bastien, K. Halliwushka, Transgenerational reproductive effects of two serotonin reuptake inhibitors after acute exposure in *Daphnia magna* embryos, *Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol.* **238** (2020) 108875, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2020.108875>.
  21. X. Wu, J. Zhang, S. Hu, G. Zhang, H. Lan, J. Peng, H. Liu, Evaluation of degradation performance toward antiviral drug ribavirin using advanced oxidation process and its relations to ecotoxicity evolution, *Sci. Total Environ.* **850** (2022) 157851, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157851>.
  22. K. Khan, S. Kar, K. Roy, Are we ready to combat the ecotoxicity of COVID-19 pharmaceuticals? An in silico aquatic risk assessment, *Aquat. Toxicol.* **256** (2023) 106416, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2023.106416>.
  23. K. Nozaki, R. Tanoue, T. Kunisue, N. M. Tue, S. Fujii, N. Sudo, T. Isobe, K. Nakayama, A. Sudaryanto, A. Subramanian, K. A. Bulbule, P. Parthasarathy, L. H. Tuyen, P. H. Viet, M. Kondo, S. Tanabe, K. Nomiyama, Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in surface water and fish from three Asian countries: Species-specific bioaccumulation and potential ecological risks, *Sci. Total Environ.* **866** (2023) 161258, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161258>.
  24. C. Wang, Q. Li, F. Ge, Z. Hu, P. He, D. Chen, D. Xu, P. Wang, Y. Zhang, L. Zhang, Z. Wu, Q. Zhou, Responses of aquatic organisms downstream from WWTPs to disinfectants and their by-products during the COVID-19 pandemic, Wuhan, *Sci. Total Environ.* **818** (2022) 151711, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151711>.
  25. M. Ben Ali, A. Hedfi, M. Almalki, P. K. Karachle, F. Boufahja, Toxicity of hydroxychloroquine, a potential treatment for COVID-19, on free-living marine nematodes, *Mar. Pollut. Bull.* **167** (2021) 112361, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112361>.
  26. S. Sangkham, O. Faikhaw, N. Munkong, P. Sakunkoo, C. Arunlertaree, M. Chavali, M. Mousazadeh, A. Tiwari, A review on microplastics and nanoplastics in the environment: Their occurrence, exposure routes, toxic studies, and potential effects on human health, *Mar. Pollut. Bull.* **181** (2022) 113832, doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113832>.
  27. Y. Oh Lee, B. Sung, *In Silico* Platforms for Predictive Ecotoxicology: From Machine Learning to Deep Learning, u: K. Roy (ur.), *Chemometrics and Cheminformatics in Aquatic Toxicology*, Wiley, 2021, str. 453–471, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140279>.



- org/10.1002/9781119681397.ch23.
28. Y. Mohamadou, A. Halidou, P. T. Kapen, A review of mathematical modeling, artificial intelligence and datasets used in the study, prediction and management of COVID-19, *Appl. Intell.* **50** (11) (2020) 3913–3925, doi: <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01770-9>.
  29. S. Ciannella, C. González-Fernández, J. Gomez-Pastora, Recent progress on wastewater-based epidemiology for COVID-19 surveillance: A systematic review of analytical procedures and epidemiological modeling, *Sci. Total Environ.* **878** (2023) 162953, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162953>.
  30. K. Roy, *Ecotoxicological QSARs*, Humana Press, New York, 2020.
  31. J. Zarocostas, WHO concerned over COVID-19 health-care waste, *Lancet* **399** (2022) 507, doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)00225-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)00225-2).
  32. Y. V. Fan, P. Jiang, M. Hemzal, J. J. Klemeš, An update of COVID-19 influence on waste management, *Sci. Total Environ.* **754** (2021) 142014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142014>.
  33. J. J. Klemeš, Y. V. Fan, R. R. Tan, P. Jiang, Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19, *Renew Sustain Energy Rev.* **127** (2020) 109883, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109883>.
  34. J. G. Rosenboom, R. Langer, G. Traverso, Bioplastics for a circular economy, *Nat. Rev. Mater.* **7** (2) (2022) 117–137, doi: <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>.
  35. R. Hossain, M. T. Islam, A. Chose, V. Sahajwalla, Full circle: Challenges and prospects for plastic waste management in Australia to achieve circular economy, *J. Clean Prod.* **368** (2022) 133127, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133127>.
  36. X. Zhao, M. Korey, K. Li, K. Copenhaver, H. Tekinalp, S. Celik, K. Kalaitzidou, R. Ruan, A. J. Ragauskas, S. Ozcan, Plastic waste upcycling toward a circular economy, *Chem. Eng. J.* **428** (2022) 131928, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131928>.
  37. H. H. Chin, P. S. Varbanov, F. You, F. Sher, J. J. Klemeš, Plastic Circular Economy Framework using Hybrid Machine Learning and Pinch Analysis, *Resour. Conserv. Recycl.* **184** (2022) 106387, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106387>.
  38. O. M. Rodríguez-Narvaez, A. Goonetilleke, L. Perez, E. R. Bandala, Engineered technologies for the separation and degradation of microplastics in water: A review, *J. Chem. Eng.* **414** (2021) 128692, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128692>.
  39. B. A. Mohamed, N. Ellis, C. S. Kim, X. Bi, Understanding catalytic effects of bentonite/clinoptilolite on biomass pyrolysis, *Renew. Energ.* **142** (2019) 304–315, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.117>.
  40. M. Lindroos, D. Hörnström, G. Larsson, M. Gustavsson, A. J. A. van Maris, Continuous removal of the model pharmaceutical chloroquine from water using melanin-covered *Escherichia coli* in a membrane bioreactor, *J. Hazard. Mater.* **365** (2019) 74–80, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.081>.
  41. S. Dharmaraj, V. Ashokkumar, R. Pandiyan, H. S. H. Munawaroh, K. W. Chew, W. H. Chen, C. Ngamcharussrivichai, Pyrolysis: An effective technique for degradation of COVID-19 medical wastes, *Chemosphere* **275** (2021) 130092, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130092>.
  42. M. Somani, A. N. Srivastava, S. K. Gummadivalli, A. Sharma, Indirect implications of COVID-19 towards sustainable environment: An investigation in Indian context, *Bioresour. Technol. Rep.* **11** (2020) 100491, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100491>.
  43. G. la Rosa, L. Bonadonna, L. Lucentini, S. Kenmoe, E. Suffredini, Coronavirus in water environments: Occurrence, persistence and concentration methods – A scoping review, *Water Res.* **179** (2020) 115899, doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115899>.
  44. A. K. Das, Md. N. Islam, Md. M. Billah, A. Sarker, COVID-19 pandemic and healthcare solid waste management strategy – A mini-review, *Sci. Total Environ.* **778** (2021) 146220, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146220>.

## SUMMARY

### The Impact of COVID-19 Behaviour Patterns on Ecosystems

*Pamela Bubaš, Dora Hečimović, Filip Mikuličić, Ivana Terzić, and Martina Miloloža\**

The COVID-19 pandemic has triggered a shift in global thinking and brought about new and specific behavioural patterns worldwide. The pandemic period was largely focused on the global health crisis, leading to the neglect of certain pre-pandemic circular values. In prioritizing the health of their citizens, many countries and governments reverted to linear economies. Furthermore, the world population witnessed a rapid increase in the consumption of certain pharmaceuticals, an (over)emphasis on personal hygiene and the use of disinfectants, and a surge in the demand for disposable plastics due to reduced human contact. While some industries experienced temporary shutdowns, others operated with increased intensity. Overcrowding in healthcare facilities coupled with inadequate disposal of medical waste and hospital wastewater, has inflicted a specific blow to global ecosystems. Consequently, an unexpectedly large quantity of various pharmaceuticals, personal care products, single-use plastics, personal protective equipment, and hazardous and non-hazardous medical waste has found its way into the environment. Therefore, it is crucial to consider the broader environmental consequences of pandemic-related behaviour and devise suitable solutions to prevent and reduce pandemic-induced environmental pollution. Certain pandemic-related behaviours need changing, existing damage requires remediation, and global production should be directed toward newer and more sustainable technologies. This paper provides a brief overview of the consequences of the global health crisis on the biosphere, and outlines perspectives for addressing encountered problems and mitigating future disasters.

#### Keywords

*COVID-19 pandemic, pollution, sustainability, environment, pharmaceuticals*

*University of Zagreb Faculty of Chemical  
Engineering and Technology, Trg Marka  
Marulića 19, 10 000 Zagreb, Croatia*

*Review  
Received July 4, 2023  
Accepted December 29, 2023*