

## BIOSIGURNOST U ERI NOVIH TEHNOLOGIJA U MIKROBIOLOGIJI: MORALNI I ETIČKI IZAZOVI

*Mirsada Hukić\*, Jasminka Hasić Telalović\*\**

**Sažetak:** Velika postignuća u oblasti prirodnih nauka omogućila su izuzetno brz razvoj tehnologija i metoda za proučavanje mikroorganizama, njihovih genoma, fiziologije, ekologije, međusobne interakcije i interakcije sa drugim jednoćelijskim i višecelijskim živim bićima. Nove metode iz oblasti molekularne biologije, genetike, genetskog inženjeringa, genomike i metagenomike postale su neizostavne u istraživačkim laboratorijama.

Ove tehnologije omogućile su upotrebu mikroorganizama kao značajnog resursa u različitim sektorima, uključujući: medicinu, biotehnologiju, farmaciju, prehrambenu industriju, poljoprivredu, ekologiju i energetiku. Zahvaljujući inovacijama u mikrobiologiji došlo je do razvoja novih tipova vakcina i lijekova; u poljoprivredi je povećana otpornost biljaka na štetočine i niske temperature; u proizvodnji energije smanjuje se ovisnost o fosilnim gorivima; u ekologiji se kreiraju mikroorganizmi za razgradnju teško razgradivog otpada itd.

S druge strane korištenje novih genetičkih metoda za uređivanje genoma mikroorganizma može dovesti do neželjenih i neočekivanih rezultata te postati biološka prijetnja za ljude i ekosistem. Neke od opasnosti uključuju nastanak: neselektivnih genetskih promjena među patogenim mikroorganizmima, što predstavlja rizik za ljudsko zdravlje i okolinu; neželjenih promjena u ekosistemu; gubitak bioraznolikosti; rizik od zloupotrebe genetski modifikovanih mikroorganizama u bioterorizmu itd.

Postojeće prijetnje od posljedica uređivanja gena naglašavaju potrebu za etičkim i sigurnim smjernicama u korištenju genetskih metoda kako bi se minimizirali rizici i osiguralo odgovorno raspolaganje mikroorganizmima. Etičke i moralne dileme su vezane kako za posljedice genske manipulacije tako i za sigurnost podataka, ali i pravednu distribuciju i raspodjelu koristi proizašle iz primjene inovacija, kako lokalno, tako i globalno.

U cilju rješavanja ovih izazova, ali i što efektivnije primjene naučnih postignuća u društvu, Evropska unija (EU) je kreirala okvir sa smjernicama koji se naziva Odgovorna istraživanja i inovacije (*Responsible Research and Innovation – RRI*). Smjernice iz ovog okvira su razrađene kroz niz inicijativa i projekata Evropske unije i postoji mnoštvo resursa koji se mogu koristiti kako za uspješnu inicijaciju i provođenje naučnih istraživanja tako i za njihovu odgovornu primjenu i integraciju u cjelokupno društvo.

**Ključne riječi:** biosigurnost, biobezbjednost, nove tehnologije, mikrobiologija, etički izazovi, sintetička biologija, vještačka inteligencija, dvostruka upotreba tehnologije, odgovorno istraživanje

\* Akademkinja Mirsada Hukić, Odjeljenje medicinskih nauka ANUBiH, Zavod za biomedicinsku dijagnostiku i ispitivanje "Nalaz", mirsadahukic@yahoo.com

\*\* Prof. dr. Jasminka Hasić Telalović, vanredna profesorica, Odsjek za kompjuterske nauke, Univerzitet Sarajevska škola za nauku i tehnologiju

## Uvod

Razvoj mikrobiologije uvijek je bio tijesno vezan za razvoju tehnologija. Počevši od otkrića prvog mikroskopa i prvih zapažanja mikroskopskih organizama u 17. vijeku, alati i metode za proučavanje mikrosvijeta su se neprestano razvijali i usavršavali. U početku je ovaj progres bio postepen, a sada se odvija zapanjujućom brzinom. Naučnici razvijaju sve kompleksnije alate i tehnologije za analizu građe, genetike, funkcija i interakcija mikroorganizama. Revoluciju u mikrobiologiji je omogućila primjena genomske tehnologije, koja pruža mogućnost razumijevanja prirode mikrobnih zajednica i procesa koji ih oblikuju i održavaju.

## Nove tehnologije u mikrobiologiji

Tehnološki razvoj, digitalizacija i nove tehnologije u mikrobiologiji donose neizvjesnost i potencijal za značajnu korist i štetu. Neke od novih tehnologija imaju snažan utjecaj na različite segmente društva poput genomike i genskog uređivanja, sintetičke biologije, metagenomike, mikrobiomske manipulacije i nanotehnologije u mikrobiologiji (MacDiarmid et al., 2013; Millett et al., 2019).

Primjenom tehnologija sekvenciranja genoma i tehnike CRISPR-Cas9 omogućeno je precizno uređivanje gena u mikroorganizmima i mijenjanje njihovih osobina. Dizajniranje i konstruisanje novih bioloških sistema ili funkcija mikroba je oblast djelovanja sintetičke biologije. Mogućnost stvaranja dizajnerskih genoma pruža nove prilike za ispitivanje i promjenu bioloških funkcija, što može imati ogroman ekonomski i društveni uticaj u biomedicini, bioproizvodnji, bioenergiji, poljoprivredi, biokonzervaciji i drugim oblastima. Ove tehnologije su moćni alati koji mogu biti korišteni za razvoj novih terapija, proizvoda ili procesa u različitim industrijama, kao i za rješavanje ekoloških problema. S druge strane, genetske manipulacije na genomu mogu dovesti do neželjenih ishoda u vidu novih, otpornih, lako prenosivih, patogenih mikroorganizama koji predstavljaju rizik za ljudsko zdravlje i okolinu. U konačnici, genetski modifikovani mikroorganizmi mogu dovesti do epidemija i pandemija, neželjenih promjena u ekosistemu, gubitka bioraznolikosti te rizika od zloupotrebe u bioterorizmu.

Razumijevanju mikrobnih zajednica doprinosi metagenomika koja se bavi proučavanjem genetskog materijala iz kompleksnih mikrobnih zajednica, poput crijevne mikrobiote ili zemljišnih mikroorganizama. Metagenomika omogućava razumijevanje mikrobnih ekosistema, otkrivanje poremećaja u njima

i otvara mogućnosti za korekcije i manipulacije. Manipulacija mikrobiomima postiže se primjenom probiotika ili prebiotika, najčešće za poboljšanje digestivnog zdravlja, kontrolu patogenih infekcija, poboljšanje kvaliteta zemljišta i povećanje prinosa usjeva.

Integracija nanotehnologije i mikrobiologije omogućava razvoj novih alata i tehnika za dijagnostiku, terapiju i kontrolu mikrobnih infekcija.

## Okvir RRI

Koncepti RRI za odgovorna istraživanja i inovacije postali su aktuelni ranih 2010-ih godina, a formalizirani u okviru okvirnog programa Horizont 2020 (2014–2020) i od tada su dio politike Evropske unije za istraživanja i inovacije. Owen et al. (2012) opisuju evoluciju ovih koncepata, kao i njihov značaj za harmonizaciju naučnog progressa sa potrebama društva. RRI uključuje niz koncepata, ali i aktivnosti i preporuka, sa krajnjim ciljem pospješivanja inkluzivnih, održivih i etničkih istraživanja i inovacija u Evropskoj uniji.

Sljedeći potciljevi su potcrtani kao način postizanja ovog krajnjeg cilja (Von Schomberg, 2013; Stilgoe et al., 2020):

- poboljšanje kvaliteta i relevantnosti rezultata istraživanja i inovacija,
- usklađivanje istraživanja i inovacija sa potrebama, očekivanjima i vrijednostima društva,
- uspostavljanje inkluzivnije i više demokratske sredine za istraživanja i inovacije,
- rješavanje društvenih izazova kroz odgovornu i održivu politiku.

Glavne komponente ovog okvira su sljedeće (Owen et al., 2013):

### 1. Javni angažman

RRI promovira angažman svih društvenih aktera (istraživača, industrije, kreatora politike, kao i šire javnosti) u proces istraživanja i inovacija. Na ovaj način istraživanja i inovacije postaju ne samo inkluzivnije nego i usklađene s očekivanjima i potrebama društva.

### 2. Rodna ravnopravnost

Cilj ove komponente je da promiče rodnu ravnopravnost u istraživanjima i inovacijama tako što će pospješiti učešće žena, ali i rješavati rodni disbalans u procesima odlučivanja.

### 3. Naučno obrazovanje

Da bi građani mogli informirano učestvovati i doprinosti procesu naučnih istraživanja i inovacija, potrebno je poboljšati njihovo naučno obrazovanje i pismenost.

#### 4. Otvoreni pristup

Onaj princip promovira otvoren pristup naučnom znanju i rezultatima istraživanja s ciljem poboljšanja pristupa, transparentnosti i ponovnog korištenja rezultata istraživanja.

#### 5. Etika

Neophodno je da se istraživanja i inovacije izvode na etičan način, da poštuju osnovna prava i podržavaju visoke etičke standarde.

#### 6. Upravljanje

Potrebno je implementirati efektne mehanizme upravljanja i nadgledanja procesa istraživanja i inovacija kako bi oni bili odgovorni, transparentni i s mogućnošću praćenja.

## Izazovi u mikrobiologiji

Napredak tehnologije u oblasti mikrobiologije donosi ne samo nove mogućnosti za liječenje bolesti i unapređenje ljudskog života i zdravlja već i moralne i etičke izazove koji zahtijevaju pažljivo razmatranje. Posljedice primjene novih tehnologija mogu značajno utjecati na pojedince, ali i na društvo u cjelini. Ključno je razmotriti potencijalne biosigurnosne i etičke implikacije, osigurati da razvoj tehnologije bude u skladu s društvenim vrijednostima i ciljevima, te da njihova primjena ne uzrokuje štetu, ne nanosi nepravdu ili negativno utječe na ljudska prava. Prema Mooru (2005), prije uvođenja bilo koje nove tehnologije, iz predostrožnosti treba uvijek postaviti četiri pitanja: 1) ima li tehnologija “neprihvatljive rizike”, 2) donosi li značajne koristi, 3) da li te prednosti “rješavaju važne probleme” i 4) mogu li se ovi problemi “riješiti na neki drugi, manje rizičan način”? Prema ovom pristupu, osim ako su odgovori na pitanja 1) i 4) odrični, a na 2) i 3) potvrdni, ne bi trebalo dozvoliti da se nastavi taj tehnološki razvoj.

Da bi se dali odgovori na postavljena pitanja, neophodno je identificirati potencijalne rizike. Analiza potencijalnih rizika povezanih s novim tehnologijama u mikrobiologiji uključuje genetsko inženjerstvo, sintetičku biologiju i tehnologije uređivanja gena. Rizici za biosigurnost mogu biti uzrokovani nenamjernim i namjernim širenjem bioloških agenasa sa potencijalom negativnog djelovanja na ljudsko zdravlje, poljoprivredu i ekologiju. Poseban

rizik predstavlja korištenje modifikovanih organizama u okruženju koje nije zatvoreno kao što su medicinske ustanove ili poljoprivredna dobra. U tim slučajevima potrebno je osigurati da se genetski modificirani mikroorganizmi ili modificirani geni ne razmnožavaju nekontrolirano. Poseban rizik predstavlja relativno lak pristup novim tehnologijama zlonamjernim državnim ili nedržavnim akterima, koji mogu sintetizirati i isporučivati opasne patogene s potencijalno katastrofalnim posljedicama. Stoga je imperativ da se uspostave zaštitni okviri i tehnologije kojim bi se regulirala primjena novih tehnologija te omogućilo iskorištavanje dobrobiti koje one obećavaju.

## Moralni i etički aspekti

Moralni i etički aspekt biosigurnosti u eri novih tehnologija u mikrobiologiji odnose se na odgovorno upravljanje potencijalnim rizicima. Okvir RRI EU može poslužiti da se ovi aspekti iscrpno promišljaju, a zatim rješavanju na sistematičan način. Poštovanje ljudskog života i dobrobiti, kao osnovnih moralnih principa, mora biti u centru istraživanja i primjene novih tehnologija. To podrazumijeva sigurnost, dobrobit i autonomiju pojedinaca te pravednu distribuciju koristi i rizika u procesu istraživanja i primjene novih tehnologija (Richardson et al., 2022). Etička obaveza je osigurati da primjena novih tehnologija ne nanosi štetu prirodi, životnoj sredini i pojedincu. To podrazumijeva procjenu ekoloških posljedica istraživanja i primjene biotehnologija, kao i preduzimanje mjera zaštite kako bi se minimizirao negativni utjecaj na prirodni svijet (Llorca Albareda et al., 2023). Moralna i etička obaveza je obezbijediti transparentnost u vezi s istraživanjem i primjenom novih tehnologija, kao i preuzeti odgovornost za posljedice koje mogu proizaći iz ovih aktivnosti. To podrazumijeva jasno informisanje javnosti o svrsi, metodama i potencijalnim rizicima istraživanja, kao i preuzimanje odgovornosti za bilo kakve neželjene posljedice. Pravovremenim i jasnim informiranjem javnosti smanjuje se mogućnost širenja lažnih informacija i neželjenih posljedica (Desikan et al., 2011).

Velika moralna i etička odgovornost leži na istraživačima i laboratorijskim radnicima. Kao odgovorni za povjerljivost podataka i integritet istraživanja u kontekstu novih tehnologija koje omogućavaju veliku količinu bioloških informacija, obavezni su da se strogo pridržavaju laboratorijskih i biosigurnosnih protokola kako bi se spriječilo otpuštanje opasnih agenasa u prirodu.

Za rješavanje etičkih izazova koje postavljaju nove tehnologije, kao što su umjetna inteligencija, uređivanje gena i kvantno računanje, ključna je uloga

države. Postoji više pristupa ovom problemu na nivou država. Jedan od pristupa je da vlade donose zakone kojima će regulirati razvoj, korištenje i primjenu novih tehnologija. Drugi način je da podrže i povjere razvoj etičkih kodeksa, standarda i najboljih praksi za korištenje novih tehnologija zainteresiranim stranama kao što su naučnici, inženjeri i programeri u etičkom dizajniranju. Konačno, vlade mogu uspostaviti etička tijela ili druge institucije koje se bave etičkim izazovima i daju smjernice. Njihova uloga bila bi ispitivanje etičkih implikacija novih tehnologija i davanje preporuka o tome kako ih treba koristiti. Osim toga pružali bi pomoć u poticanju dijaloga s javnošću o ovim tehnologijama i njihovim potencijalnim utjecajima. Specijalizirane institucije mogu obezbijediti regulatorni nadzor i pratiti usklađenost s postojećom regulativom.

S obzirom na to da nove tehnologije imaju globalne implikacije, u proces regulisanja njihovog razvoja i primjene uključuju se brojne svjetske države, organizacije i asocijacije poput Svjetske zdravstvene organizacije, Parlamenta EU, Ministarstva domovinske sigurnosti Sjedinjenih Američkih Država, Organizacije za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih nacija, predsjednika Sjedinjenih Američkih Država itd. (The White House, 2023; European Parliament, 2023).

Standardiziranje i reguliranje primjene novih tehnologija na etičkim načelima u mikrobiologiji je hitno i neophodno, premda je još uvijek opterećeno brojnim nepoznicama i dilemama. Među njima su nemogućnost predviđanja budućnosti modificiranih mikroorganizama u prirodi i njihov utjecaj na živi svijet, nemogućnost korektno analize troškova i koristi u slučajevima kada postoji visok stepen naučne nesigurnosti u pogledu ozbiljnosti i vjerovatnoće različitih rizika, te upitnost etičnosti zahtjeva informiranog pristanka za korištenje novih tehnologija čiji su efekti nepoznati. Primjena tradicionalnih etičkih načela nije u potpunosti prikladna u današnje doba (Beauchamp, Childress, 2001). Kako bi se izbjegao moralni, politički i pravni vakuum, potrebno je što prije uspostaviti etička načela vezana za razvoj i primjenu novih tehnologija (Moor, 2005).

## Bezbjednost podataka

Upotreba novih tehnologija u mikrobiologiji rezultira brojnim biološkim podacima od kojih su mnogi povjerljivi, osjetljivi i zahtijevaju posebnu pažnju i zaštitu. To uključuje sigurno skladištenje podataka, enkripciju i ograničavanje

pristupa kako bi se spriječilo neovlašteno otkrivanje ili zloupotreba podataka (Bouchaut, Asveld, 2021).

## Biosigurnost

Biosigurnost u eri novih tehnologija u mikrobiologiji predstavlja kompleksan izazov koji zahtijeva pažljivo balansiranje između napretka u naučnim istraživanjima i poštovanja moralnih i etičkih principa (Hoffmann et al., 2023).

Ključno je da istraživačice i istraživači, regulatorna tijela i društvo kao cjelina rade zajedno kako bi osigurali da primjena novih tehnologija bude odgovorna, bezbjedna i u skladu sa najvišim moralnim i etičkim standardima.

Biosigurnost u vezi s novim tehnologijama u mikrobiologiji ne utječe samo na medicinu već i na širu društvenu zajednicu. Neke od značajnih oblasti na koje neposredno utječu velike promjene u mikrobiologiji su bezbjednost hrane, zaštita životne sredine, industrija i tehnološki sektor u kojem nastaju novi proizvodi, procesi ili usluge, te nacionalna biosigurnost. Nacionalna bezbjednost i biosigurnost su od posebnog značaja za svaku državu. Razvoj novih tehnologija u mikrobiologiji može imati implikacije i na nacionalnu bezbjednost, posebno u kontekstu bioterorizma ili nekontrolisanog širenja patogena u toku epidemija i pandemija. Stoga je važno da se preduzmu odgovarajuće mjere biosigurnosti kako bi se zaštitila bezbjednost društva. Ključni aspekti biosigurnosti uključuju identifikaciju rizika, strogo pridržavanje protokola bezbjednosti te efikasnu regulaciju i edukaciju radi zaštite ljudi, životinja i životne sredine od potencijalnih bioloških prijetnji. S obzirom na globalnu prirodu mnogih bioloških prijetnji, međunarodna saradnja je ključna za efikasno upravljanje biosigurnosnim izazovima. Dijeljenje informacija, razmjena najboljih praksi i zajedničke inicijative mogu poboljšati sposobnost svijeta da se suoči sa biosigurnosnim prijetnjama.

Mikrobiološke laboratorije koje koriste nove tehnologije moraju strogo poštovati protokole bezbjednosti kako bi spriječile slučajno ili namjerno oslobađanje opasnih agenata (Buchan, Ledebor, 2014). Laboratorijsko osoblje mora biti dobro obučeno za rad s biološkim agensima i snabdjeveno odgovarajućom zaštitnom opremom. Laboratorija mora imati pisane biosigurnosne protokole te protokole o prijemu, transportu, skladištenju i manipulaciji biološkim materijalom. Ovlaštene institucije trebaju sprovesti efikasan nadzor nad radom ovih laboratorija, kako bi osigurale da istraživanje i primjena novih tehnologija budu u skladu sa bezbjednosnim standardima.

Za biosigurnost je izuzetno važna edukacija ne samo zdravstvenih profesionalaca već i cijele javnosti o potencijalnim rizicima novih tehnologija i mjerama koje se preduzimaju radi smanjenja tih rizika. Povećana svijest o biosigurnosnim pitanjima može doprinijeti boljem upravljanju potencijalnim prijetnjama (Kendal, 2022; Novossiolova et al., 2021).

## Zaključak

Inovacije u mikrobiologiji donose veliku korist i moguće prijetnje čovječanstvu. Nove tehnologije u mikrobiologiji i rezultati manipulacija mikrobnim genom imaju širok spektar implikacija na društvo, uključujući bezbjednost hrane, zaštitu životne sredine, ekonomski razvoj, etičke dileme, javnu percepciju i nacionalnu bezbjednost. Za smanjenje rizika od neželjenih posljedica, imperativ je postaviti visoke naučne, stručne i biosigurnosne standarde i protokole. Biosigurnost je direktno povezana s uspostavljanjem jasnih etičkih načela u primjeni svih tehnoloških dostignuća i osiguravanjem mehanizama kontrole pridržavanja usvojenih etičkih principa na svim nivoima. Svi relevantni akteri u procesu odlučivanja o razvoju i primjeni novih tehnologija trebaju biti uključeni, kako bi se osigurala raznolikost perspektiva i poštovanje različitih vrijednosti. Pored toga, važno je kontinuirano praćenje i evaluacija tehnološkog napretka kako bi se osigurala adekvatna prilagodba regulativnih okvira i protokola. Edukacija šire javnosti o ovim pitanjima je važna kako bi se potakla informirana rasprava i podrška za odgovornu primjenu novih tehnologija.

Biosigurnost u eri novih tehnologija zahtijeva kompleksan pristup koji obuhvata identifikaciju rizika, primjenu stroge laboratorijske bezbjednosti, efikasnu regulaciju, edukaciju i međunarodnu saradnju.

## Literatura

- Beauchamp TL, Childress JF. Principles of biomedical ethics. 5. Oxford: Oxford University Press; 2001. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Principles+of+biomedical+ethics&author=TL+Beauchamp&author=JF+Childress&publication\\_year=2001&](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Principles+of+biomedical+ethics&author=TL+Beauchamp&author=JF+Childress&publication_year=2001&)
- Bouchaut B, Asveld L. Responsible learning about risks arising from emerging biotechnologies. *Science and Engineering Ethics* 2021;27(2):22. doi: 10.1007/s11948-021-00300-1.
- Buchan BW, Ledebor NA. Emerging Technologies for the Clinical Microbiology Laboratory. *Clin Microbiol Rev* 2014;27. <https://doi.org/10.1128/cmr.00003-14>.
- Desikan P, Chakrabarti A, Muthuswamy V. Ethical issues in microbiology. *Indian J Med Microbiol* 2011;29:327-30.



- European Parliament. Artificial Intelligence Act: deal on comprehensive rules for trustworthy AI, 2023. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20231206IPR15699/artificial-intelligence-act-deal-on-comprehensive-rules-for-trustworthy-ai> (12. 4. 2024).
- Hoffmann SA, Diggans J, Densmore D, Dai J, Knight T, Leproust E, Boeke JD, Wheeler N, Cai Y. Safety by design: Biosafety and biosecurity in the age of synthetic genomics. *iScience*. 2023 Feb 10;26(3):106165. doi: 10.1016/j.isci.2023.106165.
- Kendal E. Ethical, Legal and Social Implications of Emerging Technology (ELSIET) Symposium. *J Bioeth Inq*. 2022 Sep;19(3):363-370. doi: 10.1007/s11673-022-10197-5.
- Llorca Albareda J, Rueda J. Divide and Rule? Why Ethical Proliferation is not so Wrong for Technology Ethics. *Philos. Technol*. 2023;36:10. <https://doi.org/10.1007/s13347-023-00609-8>
- MacDiarmid R, Rodoni B, Melcher U, Ochoa-Corona F, Roossinck M. Biosecurity implications of new technology and discovery in plant virus research. *PLoS Pathog*. 2013;9(8):e1003337. doi: 10.1371/journal.ppat.1003337.
- Millett P, Binz T, Evans SW, Kuiken T, Oye K, Palmer MJ, van der Vlugt C, Yambao K, Yu S. Developing a Comprehensive, Adaptive, and International Biosafety and Biosecurity Program for Advanced Biotechnology: The iGEM Experience. *Appl Biosaf*. 2019 Jun 1;24(2):64-71. doi: 10.1177/1535676019838075.
- Moor JH. Why we need better ethics for emerging technologies. *Ethics and Information Technology* 2005;7(3):111-9. doi: 10.1007/s10676-006-0008-0.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Division on Earth and Life Studies; Board on Life Sciences; Board on Chemical Sciences and Technology; Committee on Strategies for Identifying and Addressing Potential Biodefense Vulnerabilities Posed by Synthetic Biology. *Biodefense in the Age of Synthetic Biology*. Washington (DC): National Academies Press (US); 2018 Jun 19. DOI: 10.17226/24890.
- Novossiolova T, Kuiken T, DeCoste J, Henry L, Malsch I, Merad M, Newman C, Patterson W, Waskow A. Addressing Emerging Synthetic Biology Threats: The Role of Education and Outreach in Fostering Effective Bottom-Up Grassroots Governance. In: Trump BD, Florin MV, Perkins E, Linkov I, editors. *Emerging Threats of Synthetic Biology and Biotechnology: Addressing Security and Resilience Issues*. Dordrecht (DE): Springer; 2021. Chapter 6.
- Owen R, Macnaghten P, Stilgoe J. Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society. *Science and Public Policy* 2012;39(6):751-60. <https://doi.org/10.1093/scipol/scs093>.
- Owen RJ, Bessant JR, Heintz M, editors. *Responsible innovation*. Chichester: Wiley; 2013.
- Richardson CL, Wright MS, Pinto CN. Covid-19 vaccine dissemination: A public health ethical evaluation of Pennsylvania's plan during Phase 1A. *Ethics Med Public Health* 2022 Oct;24:100815. doi: 10.1016/j.jemep.2022.100815.
- Stilgoe J, Owen R, Macnaghten P. Developing a framework for responsible innovation. In: *The Ethics of Nanotechnology, Geoengineering, and Clean Energy*. Routledge; 2020:347-59.
- Von Schomberg R. A vision of responsible research and innovation. In: Owen R, Bessant J, Heintz M. editors. *Responsible innovation: Managing the responsible emergence of science and innovation in society*. J. Wiley; 2013:51-74.
- The White House. Executive Order on the Safe, Secure, and Trustworthy Development and Use of Artificial Intelligence. Washington, USA; 2023. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2023/10/30/executive-order-on-the-safe-secure-and-trustworthy-development-and-use-of-artificial-intelligence/> (12. 4. 2024)

## BIOSAFETY IN THE ERA OF NEW TECHNOLOGIES IN MICROBIOLOGY: MORAL AND ETHICAL CHALLENGES

**Abstract:** Great achievements in the field of natural sciences have enabled extremely rapid development of technologies and methods for the study of microorganisms, their genomes, physiology, ecology, mutual interactions and interactions with other unicellular and multicellular organisms. New methods from the fields of molecular biology, genetics, genetic engineering, genomics and metagenomics have become indispensable in research laboratories.

These technologies have enabled the use of microorganisms as a significant resource in various sectors, including: medicine, biotechnology, pharmaceuticals, food industry, agriculture, ecology and energy. Thanks to innovations in microbiology, new types of vaccines and drugs have been developed; in agriculture, the resistance of plants to pests and low temperatures has increased; in energy production, dependence on fossil fuels is reduced; in ecology, microorganisms are created to break down hard-to-degrade waste, etc.

On the other hand, the use of new genetic methods for editing the genome of a microorganism can lead to unwanted and unexpected results and become a biological threat to humans and the ecosystem. Some of the dangers include the emergence of: non-selective genetic changes among pathogenic microorganisms, which poses a risk to human health and the environment; unwanted changes in the ecosystem; loss of biodiversity; the risk of misuse of genetically modified microorganisms in bioterrorism, etc.

Existing threats from the consequences of gene editing emphasize the need for ethical and safety guidelines in the use of genetic methods to minimize risks and ensure responsible use and disposal of microorganisms. Ethical and moral dilemmas are related to both the consequences of genetic manipulation and data security, but also the fair distribution and division of benefits resulting from the application of innovations, both locally and globally.

In order to solve these challenges, but also to apply scientific achievements in society as effectively as possible, the European Union (EU) created a guideline framework called Responsible Research and Innovation (RRI). Guidelines from this framework have been elaborated through a series of initiatives and projects of the European Union and there are many resources that can be used both for the successful initiation and implementation of scientific research and for their responsible application and integration into the entire society.

**Keywords:** biosafety, biosecurity, new technologies, microbiology, ethical challenges, synthetic biology, artificial intelligence, dual-use technology, responsible research