ISSN 2566-2899

Bilten

Udruženja genetičara u Bosni i Hercegovini

Br. 29 | Septembar, 2026.

Izdavač

Udruženje genetičara u Bosni i Hercegovini (GENuBiH)

Urednik

Prof. dr. ***Sanin Haverić***, naučni savjetnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Urednički odbor

Akademik ***Rifat Hadžiselimović,*** naučni savjetnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Stojko Vidović,*** Medicinski fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci

Prof. dr. ***Kasim Bajrović,*** naučni savjetnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Naris Pojskić,*** naučni savjetnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Lejla Pojskić,*** naučni savjetnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Jasmina Čakar,*** naučni savjetnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Adaleta Durmić Pašić,*** naučni savjetnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Anja Haverić,*** naučni savjetnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Naida Lojo Kadrić,*** naučni savjetnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Dr. ***Maida Hadžić Omanović***, viši naučni saradnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Dr. ***Amela Pilav,*** viši naučni saradnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Dr. ***Anesa Ahatović Hajro***, naučni saradnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Semina Hadžiabulić***, Agromediteranski fakultet, Univerzitet Džemal Bijedić

Prof. dr. ***Lada Lukić Bilela***, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Izet Eminović,*** Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Emina Kiseljaković,*** Medicinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Mirela Mačkić Đurović,*** Medicinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu

Doc. dr. ***Lejla Alić***, Medicinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Dunja Rukavina,*** Veterinarski fakultet, Univerzitet u Sarajevu

Prof. dr. ***Azra Skender***, Biotehnički fakultet, Univerzitet u Bihaću

Doc. dr. ***Marija Vuković***, Univerzitetski klinički centar Republike Srpske, Banja Luka

Dr. **Jasna Hanjalić Kurtović**, naučni saradnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Dr. **Abdurahim Kalajdžić**, viši stručni saradnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Dr. **Mujo Hasanović**, viši stručni saradnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Dr. **Tamara Ćetković Pećar**, viši stručni saradnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Dr. **Nikolina Tomić**, viši stručni saradnik, Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Univerzitet u Sarajevu

Naslovna stranica: GENALERT - Promotivni plakat, ***Mujo Hasanović, Naida Lojo Kadrić***

URL: http://www.genubih.ba/bilten/

ISSN 2566-2899

SADRŽAJ

Predstavljanje projekta GENALERT - Upoznaj svoje gene i misli na budućnost 4

Od naučne ideje do publike - komunikacije nauke široj javnosti 6

10 ključnih savjeta za izradu dobrog naučnog postera.....9

Populacijsko-genetički podaci za mikrosatelitni marker SE33 u bosanskohercegovačkoj populaciji: unapređenje platforme za humanu forenzičku individualizaciju 10

NAUKA U FOKUSU: „Tajni svijet krpelja u pećinama: Genetička raznolikost u odabranim staništima šišmiša “ – UNSA-INGEB i GENuBIH na Evropskoj i mediteranskoj noći istraživača 2026.....15

Bezbjednost nanomaterijala – od istraživanja do primjene 17

Prediktivna toksikologija u procjeni sigurnosti novih supstanci.....21

Predstavljanje projekta GENALERT - Upoznaj svoje gene i misli na budućnost

Naida Lojo-Kadrić

Univerzitet u Sarajevu – Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Sarajevo, BiH

Istraživanje GENALERT – „Prevencija teških nasljednih bolesti kroz genetički probir i analizu frekvencija alela“, koje će se provoditi na Univerzitetu u Sarajevu – Institutu za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, podržano od strane Ministarstva nauke, visokog obrazovanja i mladih Kantona Sarajevo, usmjereno je na identifikaciju genetičkih varijanti povezanih s nasljednim bolestima u našoj populaciji.

Jedan od ključnih izazova u prevenciji nasljednih bolesti u Kantonu Sarajevo jeste odsustvo sistematskog genetičkog probira nosilaca. Stoga je osnovni cilj projekta utvrditi frekvencije alela povezanih s nasljednim bolestima i uspostaviti početnu bazu genetičkih podataka za populaciju Kantona Sarajevo. Naučni fokus istraživanja je na određivanju učestalosti ispitivanih varijanti u općoj populaciji, dok je njegov širi društveni značaj usmjeren na unapređenje prevencije, reproduktivnog zdravlja i informisanog planiranja porodice.

Poseban značaj projekta ogleda se u podizanju svijesti o tome da mnoge zdrave osobe mogu biti nosioci genetičkih varijanti koje kod njih ne uzrokuju bolest, ali u određenim kombinacijama mogu predstavljati rizik za potomstvo. Zbog toga GENALERT želi podstaći mlade da pravovremeno razmišljaju o vlastitom zdravlju, upoznaju zdravstvenu historiju svoje porodice i informišu se o mogućim nasljednim rizicima prije planiranja porodice. Pravovremena i pouzdana informacija može pomoći pojedincima i parovima da donose informisane odluke o vlastitom reproduktivnom zdravlju i zdravlju buduće djece.

Glavna poruka istraživanja jeste da briga o zdravlju buduće porodice može početi i prije trudnoće. Poznavanje vlastitog genetičkog statusa i porodične zdravstvene historije može predstavljati važan korak ka prevenciji, odgovornom planiranju porodice i očuvanju zdravlja budućih generacija.

Istraživanje će uključivati prikupljanje uzoraka bukalne sluznice putem brisa usne šupljine, prikupljanje podataka o porodičnoj zdravstvenoj historiji i izradu rodoslova, kao i genetičku analizu približno 1,8 miliona varijanti primjenom DNK čipova (microarray analiza). Nakon završetka istraživanja, volonteri će imati mogućnost dobiti izvještaj o svom genetičkom statusu za ispitivane varijante povezane s velikim brojem nasljednih bolesti i stanja, uključujući cističnu fibrozu (CFTR), spinalnu mišićnu

atrofiju (SMA), Duchenneovu mišićnu distrofiju (DMD), alfa i beta talasemiju, fragilni X sindrom i druge.

Očekuje se da će rezultati istraživanja omogućiti razvoj lokalno prilagođenog panela za probir nosilaca te doprinijeti uspostavljanju prve baze podataka o frekvencijama alela povezanih s nasljednim bolestima u Bosni i Hercegovini. Dugoročno, ovakvi podaci mogu unaprijediti procjenu genetičkog rizika, podržati informisano planiranje porodice i doprinijeti razvoju budućih programa genetičkog probira i savjetovanja, a time i unapređenju javnog zdravlja u Kantonu Sarajevo i Bosni i Hercegovini.

Na Evropskoj noći istraživača 25. 9. 2026. godine istraživanje je predstavljeno javnosti (slike 1-2), uz objašnjenje cilja, načina provođenja i značaja za pojedinca, porodicu i društvo. Zainteresovani posjetioci su slušali više o istraživanju, postavljali pitanja i dobrovoljno ostavili svoje kontakt podatke ukoliko su željeli saznati više ili razmatrali učešće u istraživanju.

Zainteresovani u sudjelovanju u projektu mogu se prijaviti putem QR koda ili e-mail-a: naida.lojo@ingeb.unsa.ba

Slika 1. Promotivni plakat projekta

Slika 2. Prezentacija projekta na Evropskoj noći istraživača

Od naučne ideje do publike - komunikacije nauke široj javnosti

Irma Durmišević[1,2], Jasmina Čakar[1,2], Anja Haverić[1,2]

[1] Univerzitet u Sarajevu – Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Sarajevo, BiH
[2] Udruženje genetičara u Bosni i Hercegovini, Sarajevo, BiH

U vremenu preplavljenosti informacijama, širenja dezinformacija i sve izraženijeg nepovjerenja u naučne činjenice, javnost često teško razlikuje naučno utemeljene informacije od senzacionalističkih i netačnih sadržaja. Jedan od ključnih razloga za to jeste nedovoljno razvijena komunikacija između naučne zajednice i šire javnosti. Rezultati istraživanja najčešće se predstavljaju u stručnim i akademskim krugovima, jezikom koji građanima nije dovoljno pristupačan i razumljiv. Takav jaz ostavlja prostor za pogrešne interpretacije i smanjuje društvenu relevantnost naučnih istraživanja a naučnici su druge strane ostaju distancirani od šire javnosti ili smatraju da ista nema interes za nauku.

Iz navedenog je proizašla ideja za projekat „***Od naučne ideje do publike – komunikacije nauke široj javnosti***“ koji nastaje kao odgovor na potrebu jačanja kapaciteta mladih naučnika i istraživača za kvalitetnu, jasnu i pristupačnu komunikaciju naučnih sadržaja. Projektni prijedlog je rezultat djelovanja Sekcija za podršku mladim naučnicima i istraživačima, koja je posvećena razvoju različitih kompetencija kod mladih istraživača i naučnika koje tokom formalnog obrazovanja često nemaju priliku steći.

Cilj projekta je osnažiti mlade istraživače da prevaziđu strah od javnog nastupa, razviju komunikacijske i prezentacijske vještine te nauče kako kompleksne naučne teme približiti široj publici na razumljiv, zanimljiv i društveno relevantan način. Projekat je prijavljen na Javni poziv za dodjelu transfera neprofitnim organizacijama za finansiranje / sufinansiranje aktivnosti / programa / projekata iz Budžeta Kantona Sarajevo za 2026. godinu sa razdjela Kabineta predsjedavajućeg, zamjenika predsjedavajućeg Skupštine Kantona Sarajevo te odobren za sufinansiranje i realizaciju u 2026. godini.

U okviru projekta je inicijalno zamišljena saradnja sa glumcima kroz praktične radionice koje bi doprinjele jačanju prezentacijskih vještina, vježbanju držanja i govora tijela tokom javnih nastupa te u konačnici prezentacija individualnih istraživačkih projekata mladih naučnika. Zbog reduciranih sredstava za realizaciju, projektne aktivnosti će uključiti:

- Laboratorijski rad na odabranoj naučnoj temi,

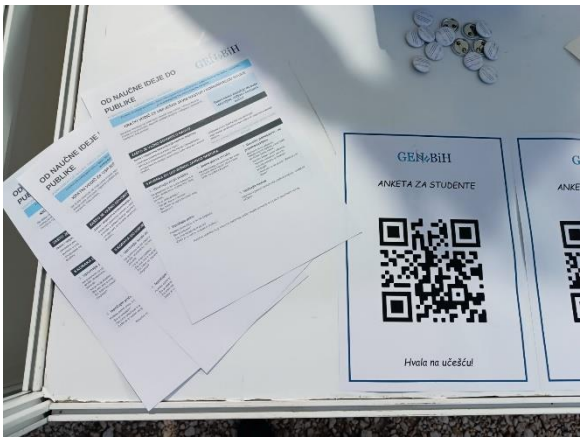
- Javnu promociju i prezentaciju projekta „Od naučne ideje do publike – komunikacije nauke široj javnosti“ ,
- Izradu i distribuciju kratkog vodića za javni nastup,
- Anketiranje javnosti (stariji školski uzrast, student, ostali) – izazovi javnog nastupa, nepoznanice ili dileme iz oblasti genetike, važnost komuniciranja naučnih ideja i otkriće
- Anketiranje o doprinosu projekta,
- Izrada poster prezentacije – “tips and tricks” za dobar naučni poster,
- S koljena na koljeno – iskusniji naučnici prenose prezentacijska iskustva na studente, mlade istraživače i naučnike.

Očekujemo da će projekt doprinijeti razvoju kulture dijaloga između nauke i društva, jačanju povjerenja građana u naučne procese i promovisanju kritičkog mišljenja. Dugoročno, projekat ima potencijal da stvori novu generaciju mladih naučnika koji neće biti samo istraživači, nego i aktivni komunikatori nauke sposobni da znanje učine dostupnim i korisnim društvu u cjelini.

Učešće u Evropskoj noć istraživača 2026.

Evropska noći istraživača je događaj koji promoviše nauku a održava se od 2005. godine posljednjeg petka u septembru, istovremeo u više gradova Evrope. Ovogodišnja Evropska noć istraživača je održana 25. septembra 2026. u 13 gradova Bosne i Hercegovine te više od 400 gradova iz 25 zemalja Evrope.

Prezentacija projekta „Od naučne ideje do publike – komunikacije nauke široj javnosti“ je uključivala distribuciju informacija o važnosti komuniciranja naučnih ideja i naučnih spoznaja ne samo u naučnim krugovima nego i među širom javnosti. Zainteresovani posjetitelji su imali mogućnost da učestvuju u anonimnom anketiranju koje je prilagođeno za školski uzrast, studente i širu javnost.



Slika 1. Promotivni materijal i anketa za projekat

Slika 2. GENuBiH štand – Evropska noć istraživača

Iako su loše vremenske prilike i niske temperature za mjesec septembar doprinjele slabijoj posjećenosti, u anketi je učestvovalo ukupno 27 osoba: 23 školskog uzrasta, 2 studenta i 2 osobe. Osobe školskog uzrasta smatraju komuniciranje naučnih informacija izuzetno važnim (56,5%) ili veoma važnim (39,1%) i 82% anketiranih je visoko zainteresovano za informacije o novim naučnim istraživanjima i otkrićima? Zanimljivo je da YouTube (39,1%) i društvene mreže (26,1%) smatraju važnim izvorom informacija o nauci, ali ipak najveće povjerenje je u univerzitetske i naučne institucije (47,8%). Učenici vrlo rijetko u formalnom obrazovanju stiču znanja i iskustva iz takozvanih "mekih" vještina kao što je prezentiranje dok se veliki broj njih (preko 69%) suočava sa tremom tokom prezentiranja.

Rezultati za studente i širu javnost će biti prezentirani nakon dodatnog anketiranja zainteresovanih. Uspostavljanje dobre i dvosmjerne komunikacije između naučnika i šire javnosti je svakako velika potreba ali i obaveza naučnika.

10 ključnih savjeta za izradu dobrog naučnog postera

Anja Haverić[1], Irma Durmišević[1], Lamija Duraković[2], Milica Kovačević[2]

[1] Univerzitet u Sarajevu – Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Sarajevo, BiH
[2] Univerzitet u Sarajevu – Prirodno-matematički fakultet, Sarajevo, BiH

Prezentiranje naučnih ideja i rezultata u vidu poster prezentacija je vrlo uobičajeno na velikim naučnim konferencijama. Vrlo često su programi takvih konferencija vrlo intenzivni a broj učesnika i njihov interes ne ostavljaju prostor da baš svi u kongresu učestvuju sa usmenim izlaganjem. Putem poster prezentacija, učešće u konferencijama ostvaruju i manje iskusni naučnici ili manje aktuelne naučne teme. Ipak, broj takvih poster prezentacija može biti jako veliki, pa je tako na posljednjem EUROTOX kongresu u Beču od 13. do 16. septembra 2026. Predstavljeno više od 800 postera. Čak i kada njihov broj nije tako veliki, izložbeni prostor za postere je često zona intenzivnih interakcija između autora postera, učesnika kongresa, drugih izlagača na kongresu a prosječno vrijeme koliko preostaje za posmatranje pojedinačnog postera je obično 2-3 minute. U okviru projekta *„**Od naučne ideje do publike – komunikacije nauke široj javnosti**“* donosimo vam nekoliko savjeta za pripremu atraktivnog postera koji prenosi jasnu poruku. Ove savjete je moguće pratiti bez obzira da li pripremate poster za naučnu konferenciju ili želite da informišete javnost o nekoj naučnoj temi:

1. Nemojte pretjerivati sa porukama koje želite prenijeti. **Manje je više!**
2. Važan je naslov. **Prenesite ključnu poruku ili zainteresujte publiku!**
3. Izbjegavajte dugačke pasuse, nepotrebne detalje i preopširne opise metodologije. Koristite grafikone, sheme, fotografije i dijagrame. **Manje teksta – više vizuelnih informacija!**
4. Trudi se da informacija ima svoj logičan tok. **Od uvoda do cilja bez slijepih ulica!**
5. **Rezultati su zauzimaju najveći dio postera!**
6. Grafikoni i tabele na posteru trebaju biti razumljivi sami za sebe! **Samoobjašnjivi grafikoni i tabele su ključni!**
7. **Važan je i prazan prostor!**
8. **Budite kreativni ali birajte čitak font i uskladite boje!**
9. **Zaključak – konkretan i proizilazi iz ostalog na posteru!**
10. Što tvoj poster brže i bolje prenese ključnu informaciju to ćeš imati **više vremena za razgovor sa kolegama i umrežavanje**.

Populacijsko-genetički podaci za mikrosatelitni marker SE33 u bosanskohercegovačkoj populaciji: unapređenje platforme za humanu forenzičku individualizaciju

Belma Jusić[1,2], Jasmina Čakar[1,2], Mirela Džehverović[1,2], Amela Pilav[1,2]

[1]Univerzitet u Sarajevu – Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Sarajevo, Bosna i Hercegovina
[2]Udruženje genetičara u Bosni i Hercegovini, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

Od kraja osamdesetih godina prošlog vijeka analiza DNK postala je nezamjenjiv alat u humanoj identifikaciji i individualizaciji. Prelazak sa konvencionalnih forenzičkih metoda koje nisu uvijek pružale traženi rezultat na aktivnu primjenu molekularno-genetičkih metoda omogućio je pouzdano povezivanje biološkog traga s osobom od koje potiče u okviru kriminalističkih istraga, identifikaciju žrtava te utvrđivanje spornog roditeljstva i drugih tipova biološkog srodstva. U tom kontekstu, kratki tandemski ponovci (engl. Short Tandem Repeat, STR) postali su centralni genetički markeri u forenzičkoj praksi, pa se STR profiliranje se već decenijama smatra „zlatnim standardom“ forenzičke DNK analize (Butler, 2005; Nayyar i Gupta, 2024). STR markeri su neravnomjerno raspoređeni, odnosno raspršeni u humanom genomu te su organizirani kao nizovi kratkih ponavljajućih sekvenci dužine od jednog do šest baznih parova. Prednost upotrebe ovih markera u odnosu na druge leži u mogućnosti simultane analize većeg broja lokusa i generisanja DNK profila u relativno kratkom vremenu. U savremenoj forenzičkoj genetici, rutinski se analiziraju autosomalni STR markeri, kao i markeri smješteni na spolnim hromosomima, odnosno X-STR i Y-STR markeri. Svakako, izbor markera zavisi prvenstveno od svrhe u koju se DNK analiza provodi (Fan i Chu, 2007; Primorac i Schanfield, 2014). Sama detekcija alela nije dovoljna za potpunu interpretaciju DNK nalaza. Statistička težina podudarnosti i procjena vrijednosti određenog genetičkog profila zavise od pouzdanih populacijskih podataka, odnosno od poznavanja frekvencija alela i relevantnih populacijsko-genetičkih i forenzičko-genetičkih parametara u populaciji iz koje potiče analizirani uzorak. Zbog toga razvoj i kontinuirano dopunjavanje referentnih STR baza predstavlja važan segment forenzičke genetike i jedan od preduslova za validno tumačenje rezultata DNK analize.

SE33 lokus kao forenzički relevantan marker

SE33 je kompleksni tetranukleotidni STR marker čiji je osnovni ponavljajući motiv [CTTT]n (Slika 1). Kako većina literaturnih izvora navodi, SE33 marker je smješten na poziciji 6q15 šestog hromosoma, a često se spominje i kao humani pseudogen povezan s beta-aktinom (engl. *human beta-actin related pseudogene*, HUMACTBP2). SE33 je pridružen Evropskom standardnom setu STR lokusa (engl. European Standard Set, ESS) i uključen je u više komercijalno dostupnih multipleks sistema za forenzičko genotipiziranje (Snyder i sar., 2006; Green i sar., 2013).

Poseban interes za ovaj marker proizlazi iz njegove visoke varijabilnosti i polimorfnosti. Veliki broj alelnih varijanti i izražena heterozigotnost doprinose visokoj diskriminacijskoj moći SE33 lokusa, zbog čega ima značajnu vrijednost u humanoj individualizaciji i može biti naročito koristan u složenijim forenzičkim slučajevima, uključujući analizu miješanih bioloških tragova (Davis i sar., 2012; Dixit i sar., 2021). Upravo zbog takvih karakteristika, pouzdani populacijski podaci za SE33 imaju neposrednu praktičnu vrijednost pri statističkoj interpretaciji forenzičkih DNK profila. Standardizacija forenzičkih DNK analiza tokom posljednjih decenija dovela je do definisanja skupova lokusa koji omogućavaju pouzdanu razmjenu podataka između laboratorija i uporedivost rezultata. Uz pomenuti ESS, među najpoznatijim sistemima su kombinovani sistem indeksiranja DNK (engl. Combined DNA Index System, CODIS) i INTERPOL (skraćenica za International Criminal Police Organization) standardni set lokusa. U tom okviru, uključivanje SE33 u evropski standard dodatno naglašava potrebu za uspostavljanjem kvalitetne referentne baze i za populacije za koje takvi podaci još uvijek nisu dostupni.

Dosadašnja istraživanja genetičke strukture populacije Bosne i Hercegovine

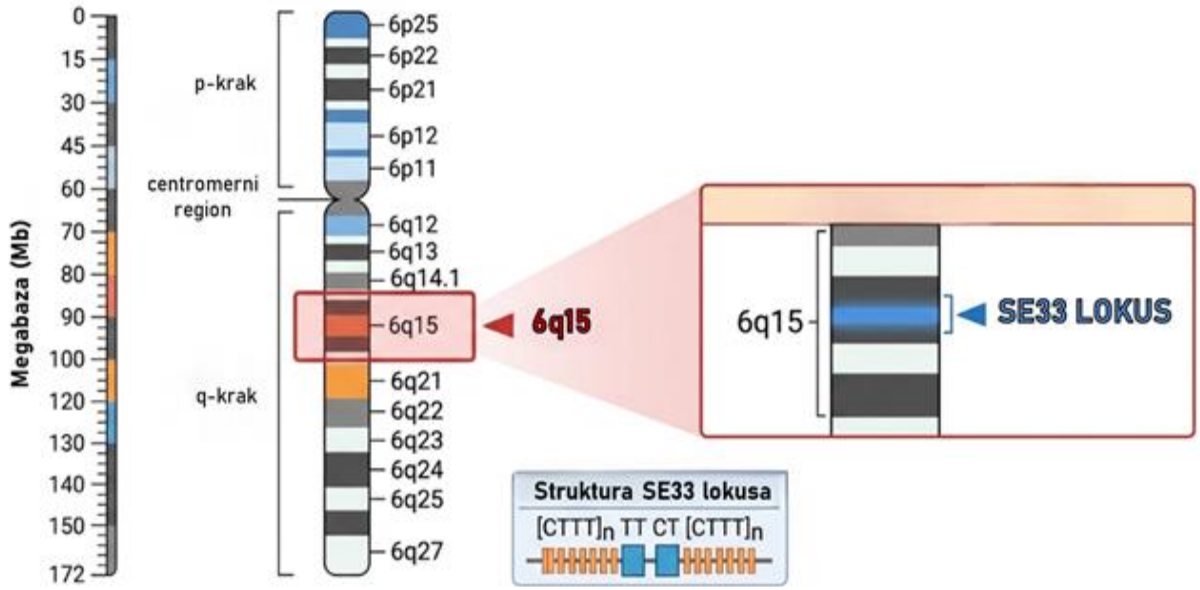
U Bosni i Hercegovini je, kroz realizaciju ranijih populacijsko-genetičkih projekata formirana značajna osnova za interpretaciju autosomalnih STR profila. Istraživanja provedena na uzorcima bosanskohercegovačke populacije omogućila su određivanje alelnih frekvencija za 15 autosomalnih STR lokusa, a potom i analizu 22 autosomalna STR markera korištenjem PowerPlex® Fusion System (Promega) multipleksnog sistema (Pilav i sar., 2017; Pilav i sar., 2020). Time je kreirana referentna baza koja se može koristiti u populacijsko-genetičkim i forenzičko-genetičkim analizama.

Pored autosomalnih markera, istraživanja su proširena i na spolno vezane STR sisteme. Za X-STR markere dostupni su podaci o alelnoj i haplotipskoj raznolikosti u populaciji Bosne i Hercegovine (Pilav i sar., 2025), dok su za Y-hromosomske STR lokuse provedena istraživanja molekularne raznolikosti u populacijskom uzorku iz Tuzlanskog kantona (Babić i sar., 2017). Rezultati ovih istraživanja postavili su

stabilne temelje za unapređenje platforme za humanu DNK identifikaciju. Svakako, u skladu sa ranije opisanim prednostima analize SE33 markera, dopuna postojećih podataka za bosanskohercegovačku populaciju podacima o SE33 markeru je od neprocijenjivog značaja. Uključivanjem podataka za SE33 u postojeću bazu može se proširiti spektar statističkih analiza dostupnih pri individualizaciji bioloških tragova, procjeni srodstva i drugim forenzičkim zadacima, uz istovremeno stvaranje osnove za poređenje bosanskohercegovačke populacije sa geografski bliskim i drugim svjetskim populacijama.

Aktuelni naučnoistraživački projekat fokusiran na SE33 lokus

U okviru projekta „Populacijsko-genetički podaci za mikrosatelitni marker SE33 u bosanskohercegovačkoj populaciji – unapređenje platforme za humanu forenzičku individualizaciju“, koji se trenutno realizira u Laboratoriji za forenzičku genetiku Univerzitet u Sarajevu – Instituta za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju uz finansijsku podršku Federalnog ministarstva obrazovanja i nauke iz Budžeta za 2025. godinu (br. 05-35-3621-1/25), planirano je sistematsko prikupljanje i analiza podataka za ovaj lokus



Slika 1. Pozicija SE33 lokusa na šestom hromosomu

u današnjoj populaciji Bosne i Hercegovine. Osnovni cilj je utvrditi alelne frekvencije te druge populacijsko-genetičke i forenzičko-genetičke parametre neophodne za pouzdanu interpretaciju SE33 lokusa, ali i DNK profila u cjelosti u forenzičkoj praksi.

Osnovna hipoteza istraživanja podrazumijeva da SE33 lokus u današnjoj bosanskohercegovačkoj populaciji pokazuje visoke vrijednosti forenzički relevantnih parametara te da će u poređenju sa drugim populacijama pokazati veću genetičku sličnost sa geografski bliskim populacijama. Pored proširenja postojeće referentne baze kao glavnog cilja istraživanja, planiran je i razvoj softverskog alata sa inkorporiranim frekvencijama autosomalnih STR markera, koji će primjenu naći u provođenju šireg spektra statističkih proračuna u DNK individualizaciji i procjeni biološkog srodstva.

Očekivani naučni i praktični doprinos projekta

Najvažniji očekivani rezultat projekta je dobijanje prvih sistematskih populacijsko-genetičkih podataka za lokus SE33 u bosanskohercegovačkoj populaciji i njihovo uključivanje u postojeću referentnu STR bazu. Takva dopuna će omogućiti potpuniju statističku interpretaciju DNK profila u kojima je SE33 dio analiziranog multipleks sistema i dati osnovu za pouzdanije poređenje sa podacima dostupnim za druge evropske i svjetske populacije.

U praktičnom smislu, ovakvi populacijsko-genetički rezultati mogu imati značaj za forenzičke laboratorije, pravosudne organe i policijske agencije, naročito u postupcima individualizacije bioloških tragova, utvrđivanja spornog roditeljstva i drugih tipova biološkog srodstva. Alelne frekvencije i forenzički parametri za bh. populaciju doprinose statistički utemeljenijoj interpretaciji nalaza i smanjuju potrebu za oslanjanjem na referentne podatke iz drugih (okolnih) populacija. Pored neposredne forenzičke primjene, rezultati će predstavljati osnovu za dalja istraživanja u populacijskoj genetici, humanoj genetici, antropologiji i bioinformatici te doprinijeti boljem pozicioniranju bosanskohercegovačke populacije u međunarodnim bazama genetičkih podataka. Važno ograničenje ovakvog tipa istraživanja predstavlja veličina i reprezentativnost uzorka. Zbog toga interpretacija rezultata morati uzeti u obzir način prikupljanja uzoraka, regionalnu zastupljenost ispitanika i broj analiziranih osoba. Ipak, planirani uzorak od najmanje 200 nesrodnih punoljetnih ispitanika predstavlja osnovu za formiranje početnog referentnog skupa podataka za SE33 i daljnje proširenje baze u budućim istraživanjima.

U konačnici, razvoj i održavanje pouzdane platforme za humanu forenzičku individualizaciju zahtijeva kontinuirano usklađivanje laboratorijskih metoda, statističkih pristupa i populacijskih referentnih podataka.

Dosadašnjim istraživanjima u Bosni i Hercegovini izgrađena je značajna osnova za autosomalne, X-STR i Y-STR markere, dok populacijski podaci za SE33 predstavljaju važnu nedostajuću kariku u postojećoj bazi. Planirano istraživanje usmjereno je na određivanje alelnih frekvencija i ključnih populacijsko-genetičkih i forenzičko-genetičkih pokazatelja za SE33, ali i njihovo poređenje sa podacima drugih populacija i uključivanje u bh. referentnu bazu. Time će se proširiti mogućnosti statističke interpretacije forenzičkih DNK nalaza i stvoriti dodatna osnova za razvoj ekspertnih i istraživačkih kapaciteta u oblasti forenzičke i populacijske genetike u Bosni i Hercegovini.

Kako naučnoistraživački rad i svakodnevni izazovi s kojima se naučnici susreću na putu do rezultata često ostaju iza zatvorenih vrata laboratorije, vrijedi spomenuti učešće Univerziteta u Sarajevu – Instituta za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju na ovogodišnjoj Evropskoj noći istraživača, što je bila jedinstvena prilika da zainteresovani posjetioci nauku dožive iz prve ruke. Praktični rad s osnovnim laboratorijskim rekvizitima upriličen je kroz kratku radionicu – demonstraciju laboratorijskog rada uz podršku Federalnog ministarstva obrazovanja i nauke iz Budžeta za 2026. godinu kroz projekat GENuBIH-a "Budi naučnik na jedan dan: most između srednjoškolskog obrazovanja i savremene nauke". Na štandu Instituta, dr. sci. Amela Pilav i mr. Belma Jusić (u svojstvu mladog istraživača) posjetiocima su detaljno približile put koji jedan uzorak prođe od prikupljanja, a potom i ekstrakcije DNK, pa sve do konačnog generisanja DNK profila (Slika 2, Slika 3). Kroz pitanja koja su postavljali, imali su priliku dobiti odgovore iz prve ruke o tome koliko se mogućnosti forenzičke genetike u realnosti razlikuju od onih na malim ekranima te da li su dostignuća forenzike s televizijskih programa ipak samo plod holivudske mašte.

Slika 2. Štand UNSA-INGEB i GENuBIH

Slika 3. Demonstracija laboratorijskog rada

NAUKA U FOKUSU: „Tajni svijet krpelja u pećinama: Genetička raznolikost u odabranim staništima šišmiša " – UNSA-INGEB i GENuBIH na Evropskoj i mediteranskoj noći istraživača 2026

Amina Agić[1], Lejla Lasić[2], Lejla Ušanović[2], Jasna Hanjalić Kurtović[2], Merima Miralem[2], Belma Kalamujić Stroil[2]

[1] Univerzitet u Sarajevu – Prirodno-matematički fakultet, Sarajevo, BiH
[2] Univerzitet u Sarajevu – Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Sarajevo, BiH

Posljednji petak u mjesecu septembru tradicionalno je posvećen popularizaciji nauke, istraživanjima, inovativnim idejama i eksperimentima. Tako su 25. septembra 2026. godine istraživači sa Univerziteta u Sarajevu – Instituta za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju i članovi Udruženja genetičara u Bosni i Hercegovini (GENuBIH) predstavili najaktuelnije projekte i rezultate svojih istraživanja široj publici, zaljubljenicima u nauku svih starosnih skupina te drugim istraživačima u okviru Evropske noći istraživača (ENI) 2026 i Mediteranske noći istraživača (MEDNIGHT) 2026, podržanih kroz program Evropske unije (EU) za istraživanje i inovacije *Horizon Europe*.

Također, tokom ovogodišnje Noći istraživača, na štandu Instituta posjetioci su kroz interaktivne sadržaje i razgovor sa prof. dr. Lejlom Lasić i mr. Aminom Agić upoznali tajanstveni svijet šišmiša, jedinih sisara sposobnih za aktivni let, te stekli uvid u pojedinosti o njihovom životu gdje žive, čime se hrane i zašto ih s pravom možemo nazvati našim „dobrim komšijama". Posebna pažnja posvećena je i krpeljima koji parazitiraju na šišmišima i drugim sisarima. Iako su krpelji često gotovo neprimjetni dio prirodnih ekosistema, njihov značaj je višestruk: kao paraziti sisara utiču na zdravlje svojih domaćina, dok pojedine vrste mogu imati važnu ulogu u održavanju i prenošenju uzročnika različitih zaraznih bolesti. Zbog toga proučavanje krpelja, njihovih domaćina i međusobnih odnosa predstavlja važan dio razumijevanja biodiverziteta, ekologije i javnog zdravlja.

Umjesto klasičnih predavanja, posjetioci su uz zanimljive vizuelne prikaze saznali kako izgleda put od terenskog istraživanja do naučnog otkrića, ali i šta nam proučavanje šišmiša i njihovih parazita, uključujući krpelje, govori o prirodi, biodiverzitetu i zdravlju. Ovaj sadržaj predstavljen je u okviru projekta „Tajni svijet krpelja u pećinama: Genetička raznolikost u odabranim staništima šišmiša", voditeljice prof. dr. Belme Kalamujić-Stroil, podržan je sredstvima Federalnog ministarstva obrazovanja i nauke iz Budžeta za 2025. godinu, na

osnovu Granta broj: 0101_12274-39/25 od 11. 12. 2025. godine.

U konačnici, ovakvi događaji uvijek su važni podsjetnici da nauka svoju punu vrijednost ostvaruje tek kada izađe iz laboratorija i postane jasno ispričana priča, bliska i razumljiva čitavoj zajednici. Isto tako, naučna otkrića ispunjavaju svoju svrhu tek onda kada postanu dostupna svima i primjenjiva u praksi, u vidu znanja koje šira javnost može razumjeti i aktivno koristiti.

Slika 1. Šta se krije iza istraživanja INGEB-a?

Slika 2. Nauka izbliza

Bezbjednost nanomaterijala – od istraživanja do primjene

Maida Hadžić Omanović

Univerzitet u Sarajevu – Institut za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju, Sarajevo, BiH

Razvoj nanonauke i nanotehnologije posljednjih decenija doveo je do intenzivnog razvoja i široke primjene različitih nanomaterijala, među kojima posebno mjesto zauzimaju materijali na bazi ugljika. Ugljik predstavlja jedan od ključnih elemenata živih sistema i odlikuje se sposobnošću formiranja različitih strukturnih oblika sa specifičnim fizičkim i hemijskim svojstvima. Upravo zbog toga, ugljični nanomaterijali, kao što su grafen, grafenske kvantne tačke, grafen-oksid i reducirani grafen-oksid, privlače veliku pažnju savremene nauke i tehnologije. Njihova primjena zasniva se na jedinstvenoj kombinaciji svojstava, uključujući veliku specifičnu površinu, izraženu mehaničku čvrstoću, toplotnu i električnu provodljivost, kao i specifična optička svojstva. Razvoj ovakvih materijala otvorio je mogućnosti za značajan napredak u različitim oblastima i doprinio formiranju posebnog područja istraživanja – nanonauke i nanotehnologije. Nanonauka obuhvata proučavanje materijala, struktura i molekula na nanometarskoj skali, dok nanotehnologija podrazumijeva primjenu saznanja i principa nanonauke u razvoju novih materijala, uređaja i tehnologija.

Za razumijevanje ponašanja nanomaterijala neophodna je njihova detaljna fizičko-hemijska karakterizacija. Primjenom različitih analitičkih tehnika, uključujući mikroskopiju i spektroskopiju, moguće je odrediti veličinu i oblik čestica, stepen agregacije, površinska svojstva, hemijski sastav, rastvorljivost i reaktivnost. Ovi parametri imaju značajnu ulogu u određivanju načina na koji nanomaterijali stupaju u interakciju sa ćelijama i biološkim molekulama, te su od posebne važnosti za razumijevanje njihovog biološkog odgovora. Jedan od ključnih aspekata interakcije nanomaterijala sa živim sistemima jeste njihova interakcija sa ćelijskom membranom i drugim ćelijskim strukturama. Zbog velike specifične površine i mogućnosti modifikacije površinskih svojstava, nanočestice mogu pokazivati drugačije biološko ponašanje u odnosu na materijale istog hemijskog sastava u većim dimenzijama. Stoga veličina čestica, njihova morfologija, površina, masa, broj čestica i agregacijsko stanje predstavljaju važne parametre prilikom procjene potencijalnih toksičnih efekata nanomaterijala.

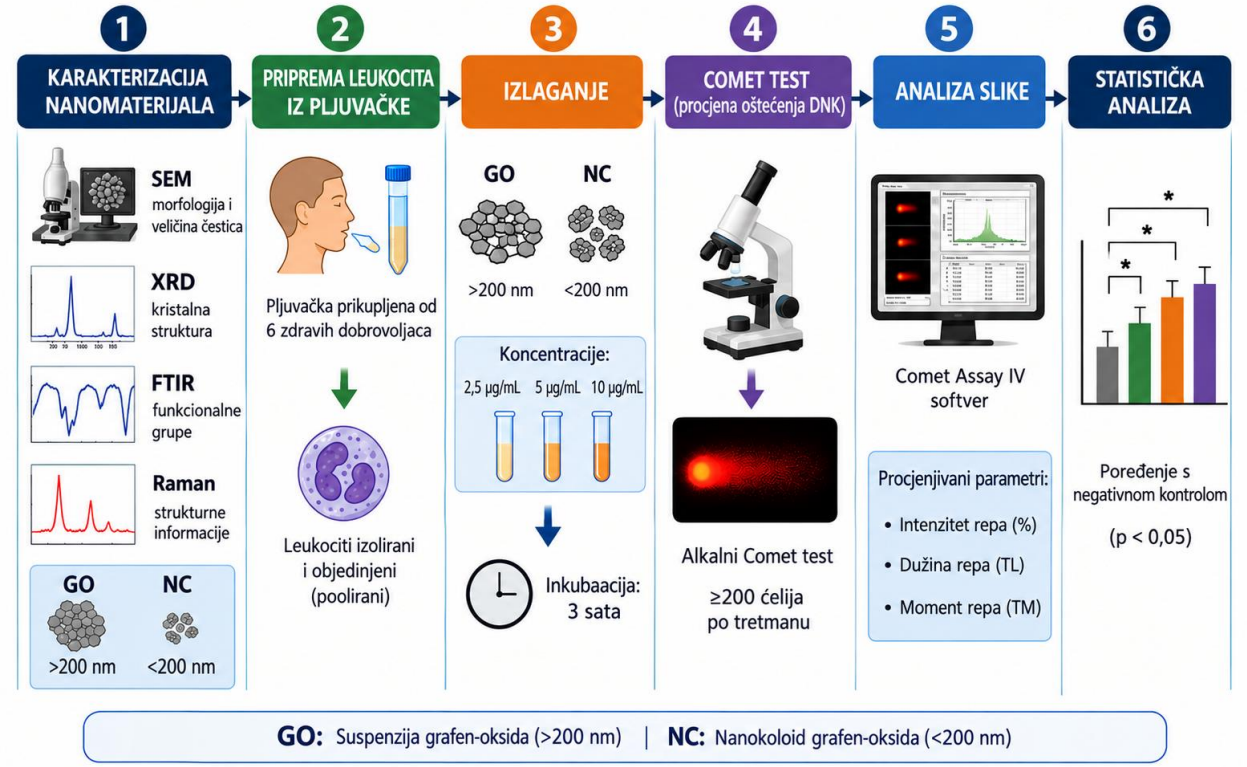
Sa intenzivnim povećanjem primjene nanomaterijala u savremenoj industriji, medicini, farmaciji, prehrambenoj industriji i drugim oblastima, raste i potreba za sistematskom procjenom njihove biološke

sigurnosti. Nanomaterijali se, između ostalog, istražuju kao nosači lijekova i gena, koriste se u dijagnostičkim i terapijskim postupcima, uključujući primjene u liječenju malignih oboljenja, dok u prehrambenoj industriji mogu imati ulogu u razvoju biosenzora i drugih naprednih sistema. Međutim, njihova sve šira primjena zahtijeva istovremeno sagledavanje potencijalnih rizika koji mogu proisteći iz njihove interakcije sa ćelijama, ljudskim organizmom i životnom sredinom.

U tom kontekstu, procjena genotoksičnosti predstavlja jedan od ključnih elemenata savremene procjene sigurnosti nanomaterijala. Za razliku od ispitivanja koja se usmjeravaju prvenstveno na ćelijsku održivost ili neposredne citotoksične efekte, genotoksična ispitivanja omogućavaju procjenu mogućeg oštećenja genetičkog materijala. Oštećenje DNK može predstavljati važan rani pokazatelj neželjenih bioloških efekata, zbog čega njegovo pravovremeno detektovanje ima poseban značaj u procjeni potencijalnog rizika novih nanomaterijala.

U Univerzitet u Sarajevu – Institutu za genetičko inženjerstvo i biotehnologiju u toku je realizacija projekta pod nazivom ***Put ka bezbjednoj nanonauci: istraživanje genotoksičnih efekata grafenskih nanočestica u kulturama humanih ćelija*** koji je podržan od strane Federalnog ministarstva obrazovanja i nauke (**05-35-3620-1/25**). Istraživanje se bazira na pretpostavci da fizičko-hemijske karakteristike grafenskih nanočestica - posebno njihova veličina, oblik i površinska funkcionalizacija - mogu imati presudan uticaj na stepen ćelijske toksičnosti. Cilj je identifikovati vrste i koncentracije grafenskih materijala koje ne izazivaju štetne efekte po DNK strukturu i ćelijsku vijabilnost, čime bi se podržala njihova sigurna i kontrolisana primjena u biotehnološkim i medicinskim sistemima. Konkretni ciljevi istraživanja su analizirati genotoksične efekte odabranih grafenskih nanomaterijala te evaluirati njihov biološki potencijal u zdravim humanim ćelijama primijenom serije adekvatnih testova.

Kao primjer pristupa procjeni biološke sigurnosti nanomaterijala u okviru ovog projekta, na slici 1 je prikazan eksperimentalni tok kojim se mogu upoređivati nanomaterijali različitih dimenzija i fizičko-hemijskih karakteristika u biološkom sistemu. U prikazanom modelu, grafen-oksid se ispituje u obliku suspenzije čestica većih od 200 nm i nanokoloida manjih od 200 nm, čime se omogućava procjena uticaja veličine i oblika čestica na njihov biološki odgovor. Nakon detaljne karakterizacije nanomaterijala, leukociti izolovani iz pljuvačke donora izlažu se različitim koncentracijama ispitivanih materijala, nakon čega se procjenjuje potencijalno oštećenje genetičkog materijala primjenom alkalnog Comet testa. Analizom parametara kao što su intenzitet i dužina repa kometa te moment repa moguće je kvantifikovati stepen oštećenja DNK i uporediti genotoksični efekat između različitih oblika i dimenzija nanomaterijala.



Slika 1. Tok eksperimentalnog postupka u okviru projekta, koji obuhvata karakterizaciju nanomaterijala, pripremu leukocita iz pljuvačke, izlaganje različitim oblicima i koncentracijama grafen-oksida, procjenu oštećenja DNK primjenom alkalnog Comet testa, analizu dobijenih rezultata i statističku obradu podataka

Sveobuhvatna procjena sigurnosti nanomaterijala zahtijeva integrisano sagledavanje njihovih fizičko-hemijskih karakteristika i bioloških efekata. Povezivanjem svojstava nanomaterijala sa njihovim uticajem na biološke sisteme omogućava se bolje razumijevanje mehanizama djelovanja i pravovremeno prepoznavanje potencijalnih neželjenih efekata, uključujući oštećenje genetičkog materijala. U tom kontekstu, procjena genotoksičnosti predstavlja važan segment razvoja i karakterizacije sigurnijih nanomaterijala, pružajući osnovu za njihovu pouzdaniju i odgovorniju primjenu u medicini, farmaciji, industriji i drugim oblastima. Konačni cilj ovakvog pristupa jeste razvoj nanomaterijala koji će, uz zadržavanje željenih funkcionalnih svojstava, istovremeno imati prihvatljiv profil biološke sigurnosti.

Literatura

Alagarasi, A. (2011). *Introduction to Nanomaterials in Nanomaterials*, Edition 1, Volume 7.

Azqueta, A., Collins, A.R. (2013). The essential comet assay: a comprehensive guide to measuring DNA damage and repair. *Arch Toxicol*, 87(6): 949-68.

Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., Rizzolio, F. (2019). The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chemical–Physical Applications to Nanomedicine. *Molecules*, 25(1): 112.

Bhardwaj, H., Singh, C., Kotnala, R.K., Sumana, G. (2018). Graphene quantum dots-based nano-biointerface platform for food toxin detection. *Anal Bioanal Chem*, 410(28): 7313-7323.

Ghanbarzadeh, S., Hamishehkar, H. (2017). Application of Graphene and its Derivatives in Cancer Diagnosis and Treatment. *Drug Res*, 67(12): 681-687.

Higashisaka, K., Nagano, K., Yoshioka, Y., Tsutsumi, Y. (2017). Nano-safety Research: Examining the Associations among the Biological Effects of Nanoparticles and Their Physicochemical Properties and Kinetics. *Biol Pharm Bull*, 40(3): 243-248.

Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y.S., Dufresne, A., Danquah, M.K. (2018). Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 9: 1050-1074.

Jia, G., Wang, H., Yan, L., Wang, X., Pei, R., Yan, T., Zhao, Y., Guo, X. (2005). Cytotoxicity of carbon nanomaterials: single-wall nanotube, multi-wall nanotube, and fullerene. *Environ Sci Technol*, 39(5): 1378-1383.

Johnston, H.J., Hutchison, G.R., Christensen, F.M., Peters, S., Hankin, S., Aschberger, K., Stone, V. (2010). A critical review of the biological mechanisms underlying the in vivo and in vitro toxicity of carbon nanotubes: The contribution of physico-chemical characteristics. *Nanotoxicology*, 4(2): 207-246.

Mageswari, A., Srinivasan, R., Subramanian, P., Ramesh, N., Gothandam, K.M. (2016). *Nanomaterials: Classification, Biological Synthesis and Characterization*. In: Ranjan S., Dasgupta N., Lichtfouse E. (eds) *Nanoscience in Food and Agriculture* 3. Sustainable Agriculture Reviews, vol 23. Springer, Cham.

Magrez, A., Kasas, S., Salicio, V., Pasquier, N., Seo, J.W., Celio, M., Catsicas, S., Schwaller, B., Forró, L. (2006). Cellular toxicity of carbon-based nanomaterials. *Nano Lett*, 6(6): 1121-1125.

Sayes, C.M., Warheit, D.B. (2009). *Characterization of nanomaterials for toxicity assessment*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Nanomedicine and Nanobiotechnology, 1(6): 660-670.

Yang, K., Feng, L., Liu, Z. (2015).The advancing uses of nano-graphene in drug delivery. *Expert Opin Drug Deliv*, 12(4): 601-612.

Prediktivna toksikologija u procjeni sigurnosti novih supstanci

***Selma Ćurovac*[1,2]**

[1]*Univerzitet u Sarajevu – Farmaceutski fakultet, Sarajevo, BiH*
[2]*Udruženje genetičara u Bosni i Hercegovini, Sarajevo, BiH*

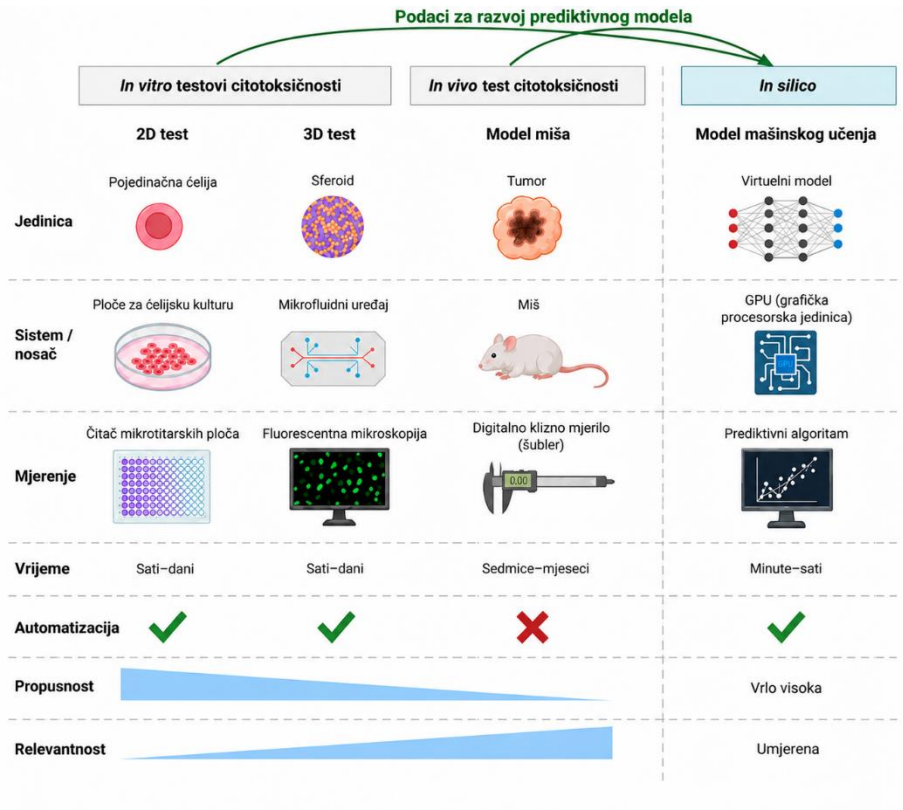
Uvod

Razvoj i procjena sigurnosti novih hemijskih supstanci tradicionalno su se u velikoj mjeri oslanjali na *in vivo* ispitivanja na eksperimentalnim životinjama. Iako su takvi modeli dugo predstavljali važan dio toksikoloških istraživanja, njihova primjena povezana je s brojnim ograničenjima, uključujući razlike između vrsta koje mogu otežati predviđanje toksičnih efekata kod ljudi, značajnu potrošnju vremena i resursa, kao i etička pitanja vezana za upotrebu eksperimentalnih životinja. Ova ograničenja, zajedno s razvojem principa 3R (eng. *Replacement, Reduction, Refinement*), potaknula su potrebu za razvojem alternativnih pristupa u toksikološkim istraživanjima. Razvoj *in vitro* sistema i računarske toksikologije, koji je intenziviran tokom 1980-ih godina, postavio je temelje savremene prediktivne toksikologije (Zhang *et al.*, 2025).

Prediktivna toksikologija zasniva se na primjeni različitih eksperimentalnih i računarskih pristupa s ciljem predviđanja potencijalnih toksičnih efekata hemijskih spojeva. Razvoj molekularne biologije, nauke o podacima i umjetne inteligencije dodatno je proširio mogućnosti ovog područja, omogućavajući korištenje postojećih toksikoloških podataka za prepoznavanje odnosa između hemijske strukture i toksičnosti te razvoj modela za procjenu potencijalnih štetnih efekata novih spojeva (Zhang *et al.*, 2025).

Pristupi u prediktivnoj toksikologiji

Prediktivna toksikologija ne zasniva se na jednoj metodi, već obuhvata različite eksperimentalne i računarske pristupe koji omogućavaju procjenu potencijalnih štetnih efekata ispitivanih supstanci. Savremeni pristupi uključuju *in vitro* metode i visokopropusna ispitivanja, *in silico* modele te primjenu metoda umjetne inteligencije i mašinskog učenja (Slika 1). Njihovom primjenom moguće je koristiti različite vrste podataka za procjenu toksičnog potencijala spojeva, pri čemu svaki od ovih pristupa ima vlastite mogućnosti i ograničenja (Zhang *et al.*, 2025; Gianquinto *et al.*, 2026).



Slika 1. Poređenje *in vitro*, *in vivo* i *in silico* pristupa u procjeni citotoksičnosti u okviru prediktivne toksikologije.

Prikazane su osnovne karakteristike u pogledu modela i načina ispitivanja, vremena, automatizacije, propusnosti i relevantnosti, kao i uloga eksperimentalnih podataka u treniranju *in silico* prediktivnih modela (prilagođeno Masarone *et al.*, 2025).

In vitro pristupi

In vitro metode predstavljaju značajnu komponentu savremenih toksikoloških istraživanja i omogućavaju ispitivanje djelovanja različitih supstanci u kontrolisanim laboratorijskim uslovima. Primjenom ćelijskih i tkivnih modela moguće je pratiti različite biološke odgovore nakon izlaganja ispitivanoj supstanci, uključujući promjene u vijabilnosti ćelija, oksidativnom stresu, funkciji mitohondrija i drugim pokazateljima potencijalne toksičnosti. Razvoj naprednijih *in vitro* sistema omogućio je i proučavanje složenijih bioloških odgovora koji se ne mogu u potpunosti sagledati korištenjem jednostavnih ćelijskih modela (Gianquinto *et al.*, 2026).

U kontekstu prediktivne toksikologije, *in vitro* ispitivanja mogu pružiti podatke koji se koriste za rano prepoznavanje potencijalno štetnih efekata i daljnju procjenu ispitivanih spojeva. Posebno su značajni visokopropusni (eng. *high-throughput*) pristupi, koji omogućavaju istovremeno ili brzo ispitivanje velikog broja supstanci i

različitih koncentracija, čime se generiše velika količina podataka pogodnih za daljnju analizu i razvoj prediktivnih modela (Zhang *et al.*, 2025).

***In silico* pristupi**

Pored eksperimentalnih metoda, značajnu ulogu u prediktivnoj toksikologiji imaju *in silico* pristupi, koji koriste računarske metode za procjenu potencijalnih toksičnih svojstava hemijskih spojeva. Ovi pristupi omogućavaju korištenje već dostupnih podataka o hemijskoj strukturi i poznatim biološkim ili toksikološkim efektima određenih supstanci kako bi se procijenila svojstva novih ili nedovoljno ispitanih spojeva (Gianquinto *et al.*, 2026).

Među poznatijim *in silico* pristupima nalaze se modeli kvantitativnog odnosa strukture i aktivnosti, odnosno QSAR (eng. *Quantitative Structure–Activity Relationship*), koji povezuju karakteristike molekularne strukture sa određenim biološkim ili toksikološkim efektima. Na osnovu obrazaca utvrđenih kod spojeva za koje već postoje eksperimentalni podaci, ovi modeli mogu se koristiti za procjenu potencijalnih efekata drugih hemijski srodnih spojeva. Pored QSAR pristupa, u procjeni sigurnosti koristi se i procjena na osnovu analognih supstanci (eng. *read-across*), pri kojoj se dostupni podaci o jednoj ili više sličnih supstanci koriste kao osnova za procjenu svojstava druge supstance za koju podaci nisu dostupni ili su ograničeni (Gianquinto *et al.*, 2026).

Umjetna inteligencija i mašinsko učenje u prediktivnoj toksikologiji

Razvoj umjetne inteligencije (eng. *Artificial Intelligence*, AI) i mašinskog učenja (eng. *Machine Learning*, ML), uz sve veću dostupnost toksikoloških podataka i računarskih resursa, proširio je mogućnosti predviđanja toksičnosti. Metode mašinskog učenja omogućavaju analizu složenih odnosa između molekularnih karakteristika i toksikoloških efekata te korištenje postojećih podataka o poznatim spojevima za razvoj modela kojima se može procjenjivati potencijalna toksičnost novih supstanci (Gianquinto *et al.*, 2026).

Ovi pristupi primjenjuju se u predviđanju različitih toksikoloških ishoda, uključujući akutnu toksičnost, hepatotoksičnost, kardiotoksičnost, neurotoksičnost, karcinogeni i mutageni potencijal. Ipak, njihova prediktivna sposobnost nije jednaka za sve toksikološke ishode i zavisi od dostupnosti i kvaliteta podataka, složenosti biološkog efekta i mogućnosti validacije modela. Zbog toga se umjetna inteligencija i mašinsko učenje razmatraju kao dio šireg pristupa u kojem se računarski modeli povezuju s eksperimentalnim podacima radi pouzdanije procjene potencijalnih toksičnih efekata (Zhang *et al.*, 2025; Gianquinto *et al.*, 2026).

Prediktivna genotoksikologija

Procjena genotoksičnosti predstavlja važan dio procjene sigurnosti novih supstanci, s obzirom na to da izloženost

genotoksičnim agensima može dovesti do oštećenja DNK, genskih mutacija i hromosomskih promjena. Budući da nijedan pojedinačni test ne može obuhvatiti sve relevantne genotoksične efekte, u ispitivanjima se tradicionalno primjenjuje kombinacija različitih metoda. Među najčešće korištenim *in vitro* metodama nalaze se Ames test, mikronukleus test, test hromosomskih aberacija i Komet test, kojima se mogu procjenjivati različiti oblici oštećenja genetičkog materijala. Međutim, zbog složenosti genotoksičnih efekata, savremena procjena sve se više oslanja na povezivanje rezultata različitih eksperimentalnih metoda s računarskim podacima, čime se omogućava sveobuhvatnija procjena genotoksičnog potencijala ispitivanih supstanci (Alnasser, 2025).

Prediktivna toksikologija u razvoju novih lijekova

Razvoj novih lijekova predstavlja dugotrajan i složen proces tokom kojeg se veliki broj potencijalnih spojeva postepeno procjenjuje i selektira kako bi se izdvojili kandidati pogodni za daljnja ispitivanja. Kako razvoj napreduje, ispitivanja postaju sve složenija i zahtjevnija, zbog čega kasno otkrivanje neželjenih toksičnih efekata može predstavljati značajan problem. Prediktivna toksikologija nastoji omogućiti ranije prepoznavanje potencijalnih sigurnosnih rizika i time doprinijeti donošenju odluka o tome koje spojeve treba dalje razvijati (Zhang *et al.*, 2025; Masarone *et al.*, 2025).

U različitim fazama razvoja lijeka mogu se kombinovati podaci dobijeni *in silico*, *in vitro* i *in vivo* pristupima. Eksperimentalni podaci o poznatim spojevima mogu poslužiti za razvoj i unapređenje prediktivnih modela, dok rezultati računarskih procjena mogu pomoći u usmjeravanju daljnjih eksperimentalnih ispitivanja. Na taj način prediktivni pristupi ne djeluju odvojeno od tradicionalnih toksikoloških ispitivanja, već omogućavaju povezivanje različitih izvora podataka radi ranijeg prepoznavanja potencijalno problematičnih spojeva (Masarone *et al.*, 2025).

Mogućnosti i ograničenja prediktivne toksikologije

Primjena prediktivnih pristupa omogućava raniju procjenu potencijalnih toksičnih efekata i određivanje prioriteta među velikim brojem spojeva, čime se daljnja ispitivanja mogu usmjeriti prema kandidatima ili toksikološkim ishodima koji zahtijevaju detaljniju procjenu (Zhang *et al.*, 2025; Masarone *et al.*, 2025).

Ipak, pouzdanost prediktivnih pristupa zavisi od kvaliteta i dostupnosti podataka, karakteristika korištenog modela i toksikološkog ishoda koji se predviđa. Modeli razvijeni na određenom skupu spojeva mogu imati ograničenu primjenjivost na hemijski ili biološki različite supstance, dok pojednostavljeni eksperimentalni sistemi ne mogu u potpunosti reprodukovati složene interakcije prisutne u ljudskom organizmu. Zbog toga je pri interpretaciji predviđanja

potrebno uzeti u obzir domenu primjenjivosti i ograničenja pojedinačnih modela, kao i potrebu za njihovom odgovarajućom validacijom (Gianquinto *et al.*, 2026).

Zaključno, prediktivna toksikologija predstavlja značajan pristup savremenoj procjeni sigurnosti novih supstanci, posebno u ranom prepoznavanju potencijalnih toksičnih efekata i usmjeravanju daljnjih ispitivanja. Ipak, prediktivni modeli ne predstavljaju potpunu zamjenu za eksperimentalna ispitivanja, već se njihova najveća vrijednost ostvaruje povezivanjem sa *in vitro* i, kada je potrebno, *in vivo* podacima. Očekuje se da će daljnji razvoj i validacija eksperimentalnih i računarskih pristupa, zajedno s napretkom umjetne inteligencije, dodatno proširiti mogućnosti prediktivne toksikologije i doprinijeti pouzdanijoj procjeni sigurnosti novih supstanci.

Literatura

Alnasser, S.M. (2025). Revisiting the approaches to DNA damage detection in genetic toxicology: Insights and regulatory implications. *BioData Mining, 18*, Article 33. https://doi.org/10.1186/s13040-025-00447-8

Gianquinto, E., Bersani, M., Armando, L., Davani, L., Cena, C., De Simone, A., Spyrakis, F. (2026). Toward integrative predictive toxicology: Advanced methods for drug toxicity and safety prediction. *WIREs Computational Molecular Science, 16*(1): e70065. https://doi.org/10.1002/wcms.70065

Masarone, S., Beckwith, K.V., Wilkinson, M.R., Tuli, S., Lane, A., Windsor, S., Lane, J., Hosseini-Gerami, L. (2025). Advancing predictive toxicology: Overcoming hurdles and shaping the future. *Digital Discovery, 4*: 303-315. https://doi.org/10.1039/D4DD00257A

Zhang, F., Li, F., Tan, J., Zhang, N., Han, Y., Liao, J., Zhai, H. (2025). Editorial: Advances and applications of predictive toxicology in knowledge discovery, risk assessment, and drug development. *Frontiers in Pharmacology, 16*: 1721364. https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1721364