

## Metoda za kvantitativnu procenu mikrobiološkog rizika (QMRA) sa primenom u hidrotehnici

Dušan Jovanović<sup>1</sup>

**APSTRAKT:** Osiguravanje adekvatnog mikrobiološkog kvaliteta vode, je jedan od osnovnih ciljeva upravljanja vodnim resursima, naročito u oblastima hidrotehnike gde se ostvaruje direktan kontakt čoveka i vode, kao što je vodosnabdevanje i vodena rekreacija. Postizanje adekvatnog mikrobiološkog kvaliteta vode je još važnije ako se voda obezbeđuje iz alternativnih resursa kao što su kišnica, urbani površinski oticaj ili čak reciklirana otpadna voda. U svim ovim slučajevima, postavlja se pitanje koliki je rizik po javno zdravlje usled mogućeg prisustva patogenih mikroorganizama u vodi? Da li je rizik iznad određene granice prihvatljivosti? Ako jeste, koji je nivo prečišćavanja potreban (u slučaju vodosnabdevanja) ili koje nivo smanjenja zagađenja treba postići (u slučaju vodne rekreacije) da bi rizik po javno zdravlje postao prihvatljiv? Odgovori na ova pitanja se mogu dobiti primenom metode za kvantitativnu procenu mikrobiološkog rizika (QMRA) koja je namenski prilagođena predviđanju zdravstvenih rizika usled izloženosti patogenim mikroorganizmima. QMRA metoda sadrži sledeće korake: 1) formulacija problema; 2) procenu izloženosti; 3) procenu uticaja na zdravlje; i 4) karakterizaciju rizika. Metoda dozvoljava integraciju sa modelima transporta i dinamike fekalnih mikroorganizama kroz različite sredine, uključujući površinske i podzemne vode. Ovakav integrisani model rizika, predstavlja moćan alat za analizu i komuniciranje rizika kao i za pronalaženje optimalne strategije poboljšanja mikrobiološkog kvaliteta vode/smanjenja rizika. U radu se daje pregled QMRA metode, svaki od koraka se posebno obrazlaže i daje se pregled ulaznih podataka potrebnih za proračun. Potom se daje primer primene metode pri analizi mikrobiološkog standarda za vode za rekreaciju.

Ključne reči: QMRA, kvalitet vode, patogeni, rizik, javno zdravlje.

## Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) framework with application in water engineering

**ABSTRACT:** Ensuring adequate microbial water quality is one of the main goals in water resources management, especially in areas of water engineering where direct contact between humans and water exist, such as water supply and aquatic recreation. This is even more important when considering alternative water resources, such as rainwater, stormwater or even recycled wastewater. In all of the mentioned cases, a question may be asked about the level of health risk involved due to a potential presence of waterborne pathogens. Is a magnitude of the risk involved above a defined threshold of tolerable risk? If so, what treatment level needs to be applied (in case of water supply), or what level of pollution reduction needs to be achieved (in case of water-based recreation) so that the public health risk is below defined threshold? Answers to these questions can be obtained through a Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) framework, which is specifically adapted to detail potential human-health risks from exposure to pathogens. The QMRA consists of the following steps: 1) Problem formulation; 2) Exposure assessment; 3) Health effects assessment; and 4) Risk characterisation. The framework allows integration with pathogen fate and transport models for various media, including surface water and groundwater. Such an integrated risk model is a powerful tool for analysing and communicating risk as well as finding the optimal water quality improvement/risk management strategy. This paper gives an overview of the QMRA framework, individual explanation of each of the calculation steps as well as the required input data. An example of application of the QMRA framework for analysis of recreational water quality standards is presented.

Keywords: QMRA, water quality, pathogens, risk, public health.

---

<sup>1</sup>Dr Dušan Jovanović, Građevinski fakultet Subotica, docent, [dusan.jovanovic@gf.uns.ac.rs](mailto:dusan.jovanovic@gf.uns.ac.rs)

## 1 Uvod

Gazdovanje vodnim resursima podrazumeva osiguravanje odgovarajućih količina i adekvatnog kvaliteta vode za planirane namene. Kvalitet vodnih resursa je naročito bitan u slučajevima direktnog izlaganja vodnom resursu. U slučaju neadekvatnog kvaliteta može doći do negativnih posledica po čoveka, najčešće u pogledu narušavanja zdravlja i komplikacija koje mogu proizaći iz toga (Pond, 2005).

Direktan kontakt čoveka i vode se primarno odvija pri korišćenju vode za piće ili pri kontaktu sa vodom tokom rekreacionih aktivnosti. Pri ovim aktivnostima dolazi do namernog (gutanje vode za piće) ili nenamernog (gutanje vode ili udisanje i gutanje aerosola pri rekreaciji) unosa određene količine vode koja potencijalno može sadržati patogene mikroorganizme. Najveći broj patogenih mikroorganizama od interesa potiču iz fekalnih izvora, mada postoji i određeni manji broj koji autohtono živi u akvatičnoj sredini porekla (Pond, 2005). Stoga je focus pri analizi mikrobiološkog kvaliteta vode na izvorima fekalnog zagađenja voda. Prema procenama Svetske Zdravstvene Organizacije (SZO), skoro 850 000 smrtnih slučajeva godišnje su direktno povezani sa neadekvatnim kvalitetom vode za piće u zemljama sa srednjim i niskim prihodima (WHO, 2014). Izbijanje zaraza povezanih sa vodosnabdevanjem nastavlja da se događa kako u zemljama u razvoju tako i u razvijenim zemljama koje rezultira u gubljenju života, značajnom opterećenju bolešću i ekonomskim gubicima za pojedince i za društvo u celini (Craun i sar., 2010). U pogledu akvatične rekreacije, na globalnom nivou je zabeležen rast rekreacionog korišćenja vodnih resursa, što nije iznenađujuće obzirom da akvatična rekreacija donosi mnogobrojne zdravstvene dobrobiti, kao što su odmor, relaksacija i fizička vežba (Shuval, 2003). Shodno, postoji tendencija porasta populacije izložene mikrobiološkim hazardima tokom rekreacionih aktivnosti. Procena i monitoring oboljevanja usled rekreacionih aktivnosti je komplikovan jer su bolesti koje nastaju usled izlaganja patogenim mikroorganizmima često blage i samoograničavajuće (na primer dijareja) (Pond, 2005). Ipak, procenjuje se da ekonomski gubitak na globalnom novou od bolesti izazvanih akvatičnom rekreacijom iznosi oko 12 milijardi USD (Shuval, 2003).

Pri upotrebi vodnih resursa za namene gde ima direktnog kontakta čoveka i vode potrebno je proceniti koliki je rizik po zdravlje usled prisustva patogenih mikroorganizama. Ako je ovaj rizik ispod granice podnošljivosti voda se smatra ispravnom za upotrebu. Procena rizika podrazumeva merenje koncentracije patogenih mikroorganizama, koje otežano faktorima kao što su veliki broj različitih patogenih mikroorganizama, niske koncentracije i povremena prisutnost ovih organizama u akvatičnoj sredini (Moe, 2002; Savichtcheva i Okabe, 2006). Dodatno, postoje problemi sa laboratorijskim procedurama za utvrđivanje koncentracije koje su najčešće vrlo skupe, radno-naporne, zahtevaju visokoobučeno osoblje i aparaturu. Treba napomenuti da neke patogene mikroorganizme još nije moguće uzgajati u laboratoriji. Zbog navedenih razloga, mikrobiološki kvalitet vode se najčešće utvrđuje merenjem fekalnih indikatorskih mikroorganizama (CWP, 2000). Najčešće su korišćeni mikroorganizmi iz grupe koliformnih bakterija, kao što su ukupni koliformi, fekalni koliformi ili u današnje vreme *Escherichia coli* (*E. coli*). Ovi organizmi su uvek prisutni u digestivnom traktu čoveka i životinja, nisu patogeni za čoveka i mere se pomoću relativno jednostavnih i jeftinih metoda (Yan i Sadowsky, 2007). Razvoj mikrobiološkog standarda kvaliteta vode za fekalne idikatorske organizme zahteva obimne epidemiološke studije koje bi dovele u vezu koncentracije FIO sa stopama oboljevanja. Ove studije su sprovedene u prošlosti (npr. (Dorevitch i sar., 2012; Kay i sar., 1994; Prüss, 1998)) i mnogi mikrobiološki standardi kvaliteta su bazirani na njima (npr. (NHMCR, 2008)). Ipak, treba napomenuti da u zavisnosti od izvora zagađenja, odnos koncentracije FIO i patogena varira, što može uticati na primenljivost izvedenog standarda na lokacijama gde su izvori zagađenja drugačiji (Soller i sar., 2010). Takođe, pri merenju idikatora pretpostavlja se da patogeni mikroorganizmi imaju sličan režim preživljavanja u spoljnoj sredini ili sličanu efikasnost odstranjivanja nekim od tretmana za prečišćavanje vode, što ne mora biti slučaj (Helmer i Finch, 1993). Iz toga sledi da odsustvo ili smanjena koncentracija indikatora ne mora da znači i odsustvo patogena, odnosno da uprkos koncentraciji indikatora koja zadovoljava standard, rizik po ljudsko zdravlje i dalje postoji.

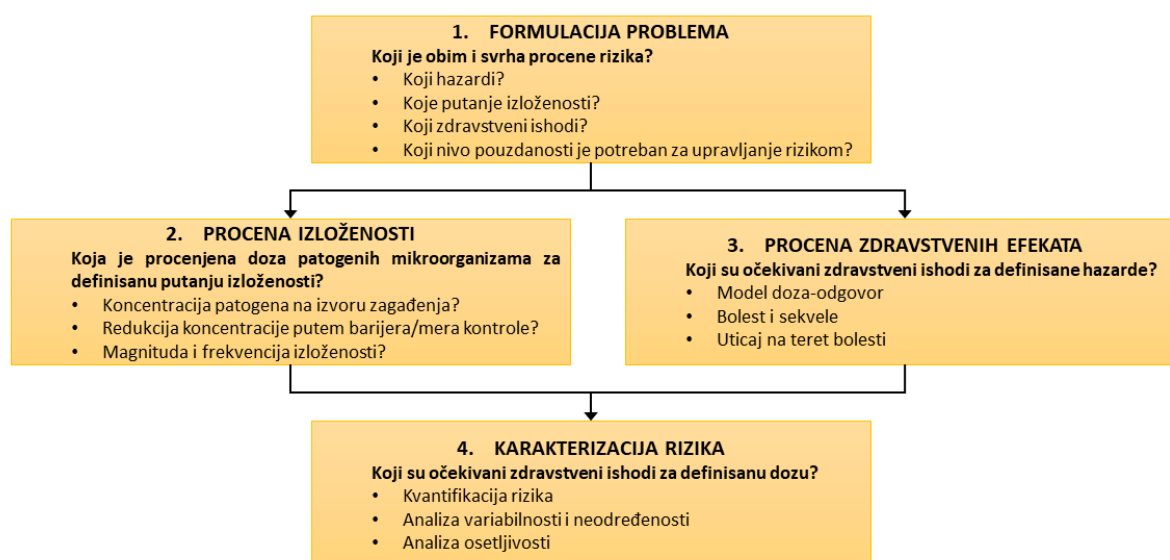
Sa pomacima u razvoju metoda za detekciju i kvantifikaciju patogena, kako kulturabilnih tako i molekularnih (npr. PRC metoda) ili njihovoj kombinaciji, merenje koncentracije patogenih mikroorganizama postaje sve lakše i dostupnije (Haas i sar., 2014). Način za korišćenje ovih podataka

za procenu stvarnog mikrobiološkog rizika po ljudsko zdravlje u zavisnosti od načina korišćenja vodnog resursa predstavlja metoda za kvantitativnu procenu mikrobiološkog rizika - Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) (Haas i sar., 2014). QMRA procenjuje rizik po ljudsko zdravlje preko predviđanja stope infekcije ili oboljevanja pri određenim koncentracijama patogena i pretpostavljenim stopama unosa preko gutanja ili udisanja. U odnosu na epidemiološke studije koje razmatraju pojavu bolesti koristeći opservacije i merenja stvarnog oboljevanja subjekata u studiji, QMRA metoda predstavlja više teorijski/računski pristup određivanju rizika od bolesti. Metoda zahteva unošenje mnogi pretpostavki naročito u domenu izloženosti patogenima ali je sa njom moguća analiza sistema i uticaja različitih komponenti na ishod procene rizika. U radu se daje pregled QMRA metode, svaki od koraka se posebno obrazlaže i daje se pregled ulaznih podataka potrebnih za proračun. Potom se daje primer primene metode za analizu mikrobiološkog standarda za rekreacione vode u SAD.

## 2 QMRA metoda

QMRA metoda predstavlja sistematski način korišćenja informacija u svrhu podrške donošenja odluka vezanih za upravljanje mikrobiološkim kvalitetom vode, prioriterizaciji akcija popravljanja kvaliteta ili organizovanja istraživačkih poduhvata (WHO, 2016). Drugim rečima, QMRA metoda je okvir koji dopušta da se kvantitativni naučni podaci interpretiraju u kontekstu procene zdravstvenih ishoda radi podrške upravljanju mikrobiološkim kvalitetom vode.

Najranije studije u oblasti procene mikrobiološkog rizika su se oslanjale na strukturu metoda za procenu hemijskog rizika, a potom je razvijena metoda posebno namenjena proceni mikrobiološkog rizika (Haas i sar., 2014). QMRA metoda formalno sadrži četiri koraka u procesu procene rizika: 1) formulacija problema, 2) procena izloženosti, 3) procena zdravstvenih efekata i 4) karakterizacija rizika (Slika 1).



Slika 1. Shematski prikaz QMRA metode pri primeni u hidrotehnici.

Figure 1. Scheme of water-related QMRA method.

## 2.1 Formulacija problema (Hazard ID)

Pri formulaciji problema definišu se obim i svrha kvantitativne mikrobiološke procene rizika. U ovom koraku se formuliše problem kroz odgovore na pitanja koja uključuju: Kakve odluke treba da se donose na bazi procene rizika? Koji nivo detaljnosti i koji podaci su adekvatni za podršku donošenja odluke? Koji hazardi i koji zdravstveni ishodi treba da se uključe u razmatranje? Koje putanje izloženosti hazardu treba razmotriti i do koje detaljnosti?

Nije moguće razmatrati sve vodne patogene pri sprovođenju procene rizika. Zbog toga se uvode referentni patogeni mikroorganizmi. Izbor referentnih patogenih mikroorganizama treba sprovesti tako da ukoliko se osigura kontrola rizika od izabranih referentnih patogena postoji i kontrola ostalih patogena koji su od značaja u datom slučaju. Faktori koji utiču na izbor referentnih patogena su izvori fekalnog zagađenja na razmatranoj lokaciji, relevantnost patogena u odnosu na putanju izloženosti, lokalni uslovi i učestalost i ozbiljnost pojave bolesti koje se prenose vodnim putem.

Definisanje putanja izloženosti od izvora patogena do mesta izlaganja će utvrditi obim studije procene rizika. Ovde se definišu specifični hazardni događaji ili različiti scenariji izlaganja koje je potrebno razmotriti da bi se postigli ciljevi analize rizika.

Potrebno je i definisati koji zdravstveni ishodi će se razmatrati u konkretnoj studiji. Zdravstveni ishodi mogu uključivati pojavu infekcije, bolesti ili sekvele ili možda neku od mera opterećenja bolesti koja može useti u obzir sve prethodno nabrojane ishode.

U zavisnosti od odgovora na pitanja iznad, QMRA može biti različitog obima i kompleksnosti od takozvanih „screening“ procena rizika do opširnih detaljnih procena rizika. Povećanje obima i detaljnosti procene rizika sa sobom nosi i povećanje cene koštanja i angažovanosti resursa. Međutim, suštinske razlike u samom postupku procene rizika nema, već je razlika na nivou kvantifikacije podataka i matematičke sofisticiranosti pri proračunu rizika kao i u vremenu, ekspertizi i ulaznim podacima potrebnim za proračun. Shodno tome, QMRA se može primenjivati u slojevima. Na primer, pri proceni rizika za izvorišta vodosnabdevanja, „screening“ QMRA se može uraditi na svim izvorištima, a prema dobijenim rezultatima detaljnija procena rizika se može raditi samo na onim lokacijama za koje je prva procena ukazala na postojanje značajnijeg rizika.

## 2.2 Procena izloženosti

Cilj procene izloženosti je da utvrdi frekvenciju i magnitudu izloženosti patogenima pri putanjama izloženosti i hazardnim događajima identifikovanim pri formulaciji problema. Dostupnost podataka i svrha procene rizika će određivati kako se definiše putanja izloženosti. Uopšteno, putanja izloženosti se definiše u pogledu izvora zagađenja (patogena), kontrolnih mera (barijera) i mehanizma izloženosti (unos).

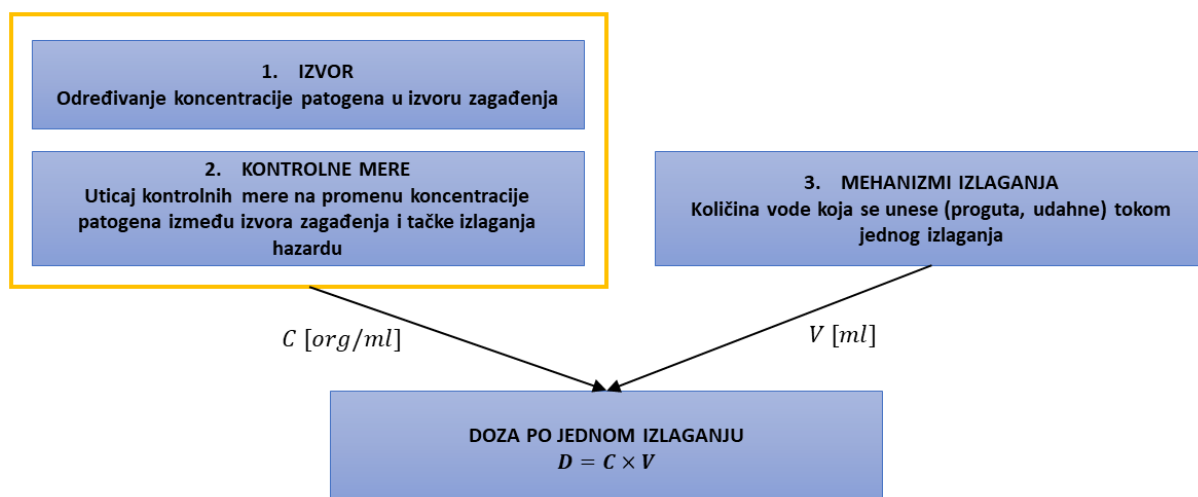
Izvori zagađenja predstavljaju inicijalnu tačku kvantifikacije patogena, odnosno njihove koncentracije u izvoru zagađenja. Neki od najčešće analiziranih izvora zagađenja su: prečišćenja/neprečišćenja voda za piće, prečišćenja/neprečišćenja otpadna voda, recikliranja otpadna voda koja se koristi za navodnjavanje, oticaj sa urbanih površina, ili čak izvori patogenih mikroorganizama na slivu - ekskreti domaćih ili divljih životinja koji putem površinskog oticaja dospevaju u vodna tela.

Kontrolne mere (barijere) su bilo koji faktori sredine (vreme zadržavanja, insolacija, transport po površini sliva), inženjerske mere (bilo kakvi tretmani vode) ili regulatorne (zakonske) mere koje mogu uticati na smanjivanje koncentracije ili inaktivaciju patogena od izvora zagađenja do mesta izlaganja hazardu. U okviru procene izloženosti potrebno je razmotriti sve kontrolne mere na putanji izloženosti i kvantifikovati njihov uticaj na koncentracije izabranih referentnih patogena.

Mehanizmi izlaganja hazardu (unos) predstavljaju način kako dolazi do izlaganja patogenim mikroorganizmima u akvatičnoj sredini. U zavisnosti od konteksta to može biti namerni unos vode (npr. pijenje vode za piće), nenamerno gutanje vode (npr. tokom rekreacionih aktivnosti na vodi), gutanje ili udisanje aerosola.

Na Slici 2 su konceptualno prikazani koraci u proceni izloženosti. Cilj procene izloženosti je određivanje doze patogena pri jednom izlaganju (D – Slika 2). Doza patogena se dobija kombinovanje

koncentracije referentnog patogena na mestu izlaganja sa utvrđenom zapreminom vode za konkretni mehanizam izlaganja hazardu. Ukoliko je moguće merenje koncentracije referentnih patogena na mestu izlaganja doza patogena se može direktno odrediti. Međutim, direktno merenje patogenih mikroorganizama na mestu izlaganja može biti otežano zbog ograničenja resursa (finansijskih ili ljudskih), ili zbog samih teškoća u uzorkovanju vode. Takođe, merene koncentracije patogenih mikroorganizama mogu često biti ispod granice detekcije za određenu metodu, ali da ipak predstavljaju rizik po javno zdravlje (kao što je često slučaj u analizama kvaliteta pijaće vode). U tom slučaju, potrebno je primeniti neke od načina predviđanja koncentracije na mestu izloženosti. Modeliranje koncentracije patogenih mikroorganizama na mestu izlaganja se može iskoristiti za prevazilaženje nedostataka u merenje (kao što su velike fluktuacije merenih koncentracija patogenih mikroorganizama i mali broj merenih koncentracija) a istovremeno dati mogućnost za analizu sistema kroz modeliranje izvora zagađenja i kontrolnih mera na putanji izloženosti hazardu. To je naročito važno ako je cilj procene rizika da se dobije uvid u procese koji diktiraju krajnju magnitudu rizika. Zbog izraženih neodređenosti u određivanju parametara modela QMRA, najveća vrednost ove metode možda i nije u krajnoj kvantifikaciji rizika, već pre u mogućnosti istraživanja sistema i određivanja glavnih komponenti sa najvećim uticajem na rezultat proračuna, odnosno kao alat za podršku upravljanjem mikrobiološkim kvalitetom vode.



Slika 2. Konceptualno diskretizacija komponentata pri proceni izloženosti vodnim patogenim mikroorganizmima.

Figure 2. Conceptual components for assessing exposure to waterborne pathogens.

### 2.3 Procena zdravstvenih efekata

Pri proceni zdravstvenih uticaja, vrši se prikupljanje podataka o zdravstvenim efektima izloženosti definisanim hazardima (odnosno patogenim mikroorganizmima). U ovom koraku se procenjuju uticaj na zdravlje ljudi određenog hazarda. Moguće je posvetiti pažnju specijalnim podgrupama populacije (npr. deca, stari, imunokompromitovani) ako za ove grupe postoje odgovarajući podaci. Glavne komponente procene zdravstvenih efekata su: model doza-odgovor, verovatnoća oboljevanja, verovatnoća pojave sekvela, i analiza opterećenja bolesti.

Model doza-odgovor. Primena ovog modela je ključna veza između procenjene doze patogenih mikroorganizama koja se unosi i zdravstvenih efekata koje ta doza izaziva. Ovi modeli su napravljeni na osnovu epidemioloških studija i najčešće se preuzimaju iz objavljene literature. Svaki od dostupnih modela doza-odgovor sadrži različite izvore neodređenosti u zavisnosti od podataka koji su korišćeni za njihov razvoj (različite doze, različite jedinice mere za doze, različita populacija kojoj je doza administrirana kao i veličina uzorka populacije u studiji) i razne pretpostavke uvedene tokom razvoja

modela da bi se dobilo adekvatno slaganje sa podacima. Zbog toga treba posvetiti pažnju pri izboru modela doza-odgovor za konkretnu QMRA studiju.

Verovatnoća oboljevanja. Neće svi inficirani pojedinci razviti simptome bolesti, odnosno oboleti. Prema tome, ukoliko je krajnji ishod procene rizika rizik od bolesti, onda je potrebno pronaći odgovarajuće odnose morbidnosti, odnosno verovatnoću pojave bolesti zavisno od inficiranosti.

Verovatnoća pojave sekvela. Većina referentnih patogenih mikroorganizama koji se razmatraju pri bezbednosti upotrebe vodnih resursa izazivaju primarno gastrointestinalne zdravstvene probleme (npr. dijareju, mučninu/povraćanje, abdominalne bolove). Kao posledica primerne bolesti mogu se javiti teška, sekundarna i/ili hronična zdravstvena stanja koja se nazivaju sekvele (*sequelae*). Na primer, *Salmonella* spp. *Shigella* i *Giardia* mogu izazvati različite podvrste artritisa, dok se Gilan-Bareov sindrom može javiti kao posledica infekcije *Campylobacter* spp. a hemolitično-uremični sindrom kao posledica infekcije *E. coli* O157:H7 (Pond, 2005). Ukoliko razmatranje zdravstvenih efekata uključuje i određivanje opterećenja bolesti, potrebno je razmotriti i uticaj sekvela na ukupno opterećenje bolesti u populaciji.

Opterećenje bolesti. Disability adjusted life years (DALY) je mera koja se koristi za sveukupno opterećenje zajednice bolešću i ima jedinice vremena (godine). DALY predstavlja zbir dve komponente. Prvo, izgubljene godina života usled prerane smrti (years of life lost – YLL) u odnosu na očekivano trajanje života, koje su posledica određene bolesti. Drugo, godine života koje će osoba provesti živeći sa nekom vrstom invaliditeta koji je posledica istog oboljenja (years lost due to disability – YLD). Prednost DALY je u tome što u jednoj veličini kombinuje efekte i mortaliteta (kvantiteta) i morbiditeta (kvaliteta) života. Nedostatak merenja opterećenja bolesti preko DALY je u tome što proračun zavisi od uslova pomoći koja se može pružiti obolelom u konkretnom sistemu. Obično razvijeni zemlje imaju manje koeficijente za procenu uticaja bolesti na DALY i suprotno.

## 2.4 Karakterizacija rizika

Pri karakterizaciji rizika, vrše se proračuni koji kombinuju informacije procene izloženosti i procene zdravstvenih efekata tako da se izvrši kvantifikacija rizika za definisani scenario (Slika 2). Sadržaj ovog koraka će zavisiti od više faktora.

Cilj i svrha procene rizika koji su definisani pri formulaciji problema će određivati koji uslovi modela rizika će se razmatrati kao i na koji način će se vršiti proračuni. Pri jednostavnim procenama rizika, model može biti deterministički i konceptualno jednostavan. Kod kompleksnijih situacija moguće je vršiti proračune rizika za određene scenarije i uslove koji treba da su ispunjeni da bi postigli ciljeve i svrhu procene rizika.

Rizik se može kvantifikovati na više načina, u zavisnosti od prikupljenih podataka pri proceni izloženosti i proceni zdravstvenih efekata, a mogu uključivati verovatnoću pojave infekcije, verovatnoću pojave bolesti, očekivan broj slučajeva bolesti ili DALY. Vremenska skala za procenu rizika može biti za pojedinačno izlaganje hazardu, za seriju nezavisnih izlaganja ili za izlaganja za jednu godinu. U pogledu populacije rizik se može proračunati za ukupnu populaciju ili za deo populacije koji je izložen riziku.

Način na koji se proračun vrši zavisi će od obima i ciljeva procene rizika, ali uopšteno rizik se može okarakterisati deterministički kao jedna vrednost (na primer, srednja vrednost, minimum ili najgori slučaj) ili stohastički kao raspodela verovatnoće. Kada eksplicitno kvantifikujemo neodređenosti i varijabilnosti parametara modela, karakterizacija rizika će obuhvatiti i određivanje raspodele rizika za definisani slučaj.

Treba pomenuti da je vrlo korisno sprovesti i analizu osetljivosti, odnosno ispitati kako varijabilnost i neodređenost parametara modela rizika utiču na varijabilnost i neodređenost ishoda proračuna. Analiza osetljivosti se može iskoristiti za utvrđivanje interakcije komponenta modela, tj. koncentracije patogenih mikroorganizama, efikasnost mera kontrole, parametara model doza-odgovor, odnos morbidnosti, itd., kao i za utvrđivanje komponente modela sa najvećim uticajem na ishod proračuna. Određivanje najvećeg izvora varijabilnosti i neodređenosti se može iskoristiti za fokusiranje kontrolnih mera pri upravljanju rizikom kao i fokusiranje dodatnih napora pri prikupljanju podataka.

### 3 Primer primene QMRA metode u slučaju kvaliteta vode za rekreaciju

Kao primer proračuna navodimo studiju koji su objavili (Soller i sar., 2010). Motiv za ovu studiju je bila analiza rizika po ljudsko zdravlje pri rekreativnom korišćenju plaža za kupanje koje su imale koncentracije fekalnih idikatorskih mikroorganizama na propisanim granicama za zabranu korišćenja plaža za kupanje.

#### 3.1 Formulacija problema

Već je napomenuto da se rutinski monitoring mikrobiološkog kvaliteta vode kao i upravljanje bezbednošću korišćenja vode za rekreaciju sprovodi merenjem FIO. Za merenje mikrobiološkog kvaliteta obalnih voda se najčešće koriste fekalne bakterije *E. coli* i enterococci, koje se nalaze u digestivnom traktu svih toplokrvnih životinja i ljudi. 97% koliformnih bakterija u digestivnom traktu kod čoveka i 94% kod životinja su zapravo *E. coli*, pa je stoga njihova koncentracija u fecesu jako velika -  $10^9$  org/g. Koncentracije enterococci su 10 to 1000 puta manje u poređenju sa *E. coli*, ali su enterococci znatno rezistentniji na salinitet i alkalne pH vrednosti što ih čini posebno zgodnim za monitoring mikrobiološkog kvaliteta morske vode.

Granične vrednosti koncentracije ovih bakterija propisane u SAD su 126 cfu/100ml za *E. coli* i 35 cfu/100ml enterococci. Ove vrednosti su određene na bazi epidemioloških studija koje su tražile vezu između koncentracije fekalnih idikatora i oboljevanja u populaciji plivača na određenim plažama. Ove lokacije su bile pod uticajem ljudskog fekalnog zagađenja. Glavno istraživačko pitanje je bilo da li se ove granične vrednosti treba primenjivati i na lokacijama koje nisu pod uticajem ljudskog fekalnog zagađenja? Odgovor na ovo pitanje dat je primenom metode za kvantitativnu procenu mikrobiološkog rizika tako što je proračunat rizik od infekcije i bolesti usled gutanja vode koja je bila zagađena izmetom iz niza primarnih izvora zagađenja: netretirana otpadna voda, sekundarni efluent, krupna stoka, svinje, kokoške i galebovi. Iako se neprečišćena otpadna voda retko ispušta u recipijente u SAD, analiza rizika ovog izvora može se koristiti za procenu uticaja slabo tretiranih efluenata, procurivanja iz mreže fekalne kanalizacije ili neispravnih septičkih sistema.

Pomenuto je da izbor referentnih patogena treba izvršiti tako da izabrani patogeni predstavljaju najveći rizik po zdravlje u svakom od razmatranih izvora zagađenja. Takođe, ovi patogeni treba da adekvatno predstavljaju sudbinu i transport ostalih članova svoje mikrobiološke grupe (bakteriju, virusi i protozoe) u razmatranoj sredini. U svojoj studiji, (Soller i sar., 2010) su analizirali bakterijske patogene *Campylobacter jejuni*, *Salmonella enterica* i *E. coli* O157:H7, patogene protozoe *Cryptosporidium* spp. i *Giardia lamblia* i *Norovirus* od virusnih patogena.

Individualni rizik je računat za pojedinačnog plivača iz opšte populacije. Rizik za decu bi moguće bio drugačiji zbog različitog vremena kontakta, količine progutane vode i različite podložnosti infekciji. Takođe, rizik bi bio drugačiji i za imunokompromitovane osobe. Međutim, diferenciranje za navede grupe nije bilo moguće zbog nedostatka podataka koji bi omogućili karakteriziranje opisanih razlika izloženosti i podložnosti infekciji ovih podgrupa.

#### 3.2 Procena izloženosti

Primarni cilj procene izloženosti je određivanje doze referentnih patogena kojoj je osoba izložena. U konkretnoj studiji procena izloženosti svakom od referentnih patogena je obavljena na sledeći način. Proračun doze kojoj je izložen plivač ( $\mu_{rp}^S$ ) je izvršen kao u jednačini 1:

$$\mu_{rp}^S = \frac{C_{FIB}}{F_{FIB}^S \times 100} \times R_{rp}^S \times p_{rp}^S \times I_{rp}^S \times V \quad (1)$$

gde je:  $S$  – izvor fekalnog zagađenja;  $C_{FIB}$  – koncentracija *E. coli* ili enterococci u vodnom telu (cfu/100ml);  $F_{FIB}^S$  – koncentracija fekalnih idikatora u izmetu (cfu/g) ili efluentu (cfu/l);  $R_{rp}^S$  – koncentracija referentnog patogena u izmetu (org/g) ili efluentu (org/l);  $p_{rp}^S$  – frakcija infektivnih sojeva referentnog patogena u izvoru fekalnog zagađenja;  $I_{rp}^S$  – rasprostranjenost infekcije u životinjskim

izvorima zagađenja (proporcija životinja koji izbacuju patogen u svom izmetu); i  $V$ - zapremina progutane vode tokom plivanja (ml).

Opseg vrednosti za svaki od parametara je dobijen pregledom objavljene naučne literature.

### 3.3 Procena zdravstvenih efekata

Primarni zdravstveni ishod je bila infekcija razmatranim patogenom posle gutanja određene količine vode. Takođe, razmatrana je i gastrointestinalna bolest kao posledica infekcije. Ostali zdravstveni ishodi usled inhalacije ili dermalnih abrazija nisu razmatrani, kao ni sekvele koje mogu nastati usled infekcije referentnim patogenima.

Verovatnoća infekcije i posledične gastrointestinalne bolesti za plivača je izračunata korišćenjem objavljenih veza doza-odgovor i podataka o morbidnosti za svaki od analiziranih patogenih mikroorganizama za doze dobijene proračunom pri analizi izloženosti.

### 3.4 Karakterizacija rizika

Kako mnogi od parametara u razvijenom modelu rizika imaju prorodnu variabilnost, proces proračuna rizika je obavljen korišćenjem Monte Carlo pristupa, pri čemu je svaki proračun imao 10 000 iteracija. Za svaki od parametara modela je primenjena log-normalna raspodela na definisanom opsegu vrednosti. Krajnji rezultat proračuna je distribucija rizika od bolesti za svaki od razmatranih patogenih mikroorganizama za svaki od izvora zagađenja. Ukupni rizik od bolesti za svaki izvor zagađenja je sračunat kao:

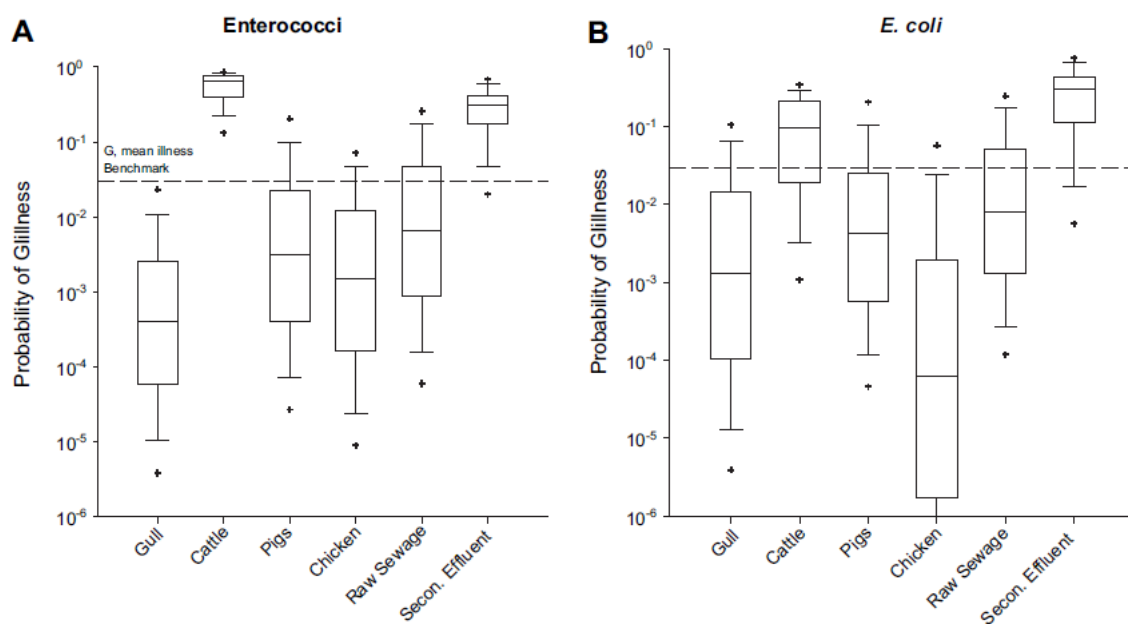
$$P^S = 1 - \prod_{rp}(1 - P_{rp}^S) \quad (2)$$

gde je:  $P^S$  – rizik od bolesti za određeni izvor zagađenja a  $P_{rp}^S$  – rizik od bolesti usled infekcije referentnim patogenom iz određenog izvora zagađenja.

### 3.5 Rezultati

Proračunata verovatnoća od gastrointestinalne bolesti pri graničnim vrednostima koncentracija fekalnih idikatora, 35 cfu/100ml enterococci i 126 cfu/100ml *E. coli*, pri pretpostavci da su svi sojevi referentnih patogena infektivni za ljude, prikazana je na Slici 3. (Soller i sar., 2010) su pokazali da sekundarni efluent iz postrojenja za prečišćavanje otpadne vode predstavlja daleko veći rizik nego ne tretirana otpadna voda pri definisanim koncentracijama fekalnih indikatora. Ovaj rezultat je posledica odnosa fekalnih indikatora i patogenih mikroorganizama u ova dva izvora zagađenja. Naime, pri tretmanu otpadnih voda, odstranjivanje fekalnih indikatora je znatno efikasnije od ostranjivanja patogena, naročito protozoa koje formiraju spore i virusa. Is toga sledi da je koncentracija patogena pri definisanim graničnim vrednostima fekalnih indikatora za sekundarni efluent znatno viša nego za netretiranu otpadnu vodu. Zanimljivo je primetiti da se rizik proračunat usled zagađenja fekalnim materijalom od krupne stoke ne razlikuje puno od zagađenja otpadnom vodom. Sa druge strane, zagađenje fekalnim materijalom od živine, svinja i galebova predstavlja mnogo manji rizik pri datim graničnim vrednostima. Glavni zaključak ove studije je bio da je potrebno razmotriti pristup upravljanu mikrobiološkim kvalitetom vode za vodna tela koja se koriste za rekreaciju a nisu pod uticajem komunalnih otpadnih voda.





Slika 3. Verovatnoća pojave gastrointestinalne bolesti usled gutanja vode zagađene svežim fekalnim zagađenjem pri koncentraciji od 35 cfu/100ml enterococci (A) i 126 cfu/100ml *E. coli* (B). Proračunati rizik za sveži feces od galebova, kupne stoke, svinja i kokoški, kao i netretirane otpadne komunalne vode i sekundarno dezinfikovanog efluenta sa PPOV. Prag rizika bolesti predstavlja geometrijsku srednju vrednost verovatnoće pojave bolesti od 0.03. Preuzeto od (Soller i sar., 2010).

Figure 3. Probability of GI illness from ingestion of water containing fresh faecal pollution at densities of 35 cfu/100ml enterococci (A) and 126 cfu/100ml *E. coli* (B). Predicted risk for fresh gull, cattle and pig faeces, and chicken litter and raw sewage and secondary disinfected effluent. The illness benchmark represents a geometric mean probability of illness of 0.03. Adopted from (Soller i sar., 2010)

## 4 Zaključak

U radu je opisana metoda za kvantitativnu procenu mikrobiološkog rizika (QMRA). QMRA metoda je alat kojim se može obezbediti razumevanje rizika za ljudsko zdravlje od mikrobioloških hazarda i time obezbediti važan uvid neophodan za efikasno upravljanje rizikom. Prednost ove metode je što se može koristiti ne samo za procenu rizika po zdravlje, već i za analizu kontrole/upravljanja rizikom u hidrotehničkim sistemima. Fleksibilna je u pogledu detaljnosti opisa sistema, tako da pristup može biti holistički, odnosno analizirati sistem od izvora zagađenja do korisnika vodnog resursa. Ovakav pristup pruža vredan uvid u uticaj pojedinačnih komponenti na ishod procene rizika po ljudsko zdravlje usled izlaganja patogenima u vodenoj sredini. Rezultati proračuna predstavljaju naučni osnov donošenja odluka pri upravljanju mikrobiološkim kvalitetom vode i povezanim rizikom kao i primenjivanjem mera za kontrolu rizika. QMRA metoda se može koristiti i za razvijanje mikrobioloških standarda za vodne resurse ili zahtevanih performansi nekog tehnološkog postupka za tretman voda, koji se mogu koristiti pri kontroli kvaliteta.

Glavno ograničenje QMRA metode je ograničena dostupnost podataka o koncentraciji patogena, njihovoj sudbini i transportu u spoljnoj sredini kao i odstranjivanju pri različitim tehnološkim tretmanima vode. Iako metode za detekciju i kvantifikaciju patogena postaju sve više dostupne, još uvek zahtevaju značajan nivo ekspertize da bi se pouzdano odredile koncentracije patogena. U odsustvu podataka, QMRA metoda se može primeniti pod određenim pretpostavkama. Ovo povećava nivo neodređenosti proračuna što može uticati na korisnost samog ishoda proračuna za praktične primene. U ovakvim slučajevima se može pristupiti analizi „najgoreg slučaja“ tako da su proračunati rizici u stvarnosti verovatno manji.

## Literatura

1. Craun, G.F., Brunkard, J.M., Yoder, J.S., Roberts, V.A., Carpenter, J., Wade, T., Calderon, R.L., Roberts, J.M., Beach, M.J., Roy, S.L., 2010. Causes of outbreaks associated with drinking water in the United States from 1971 to 2006. *Clinical Microbiology Reviews* 23, 507–528.
2. CWP, 2000. Microbes and Urban Watersheds: Concentrations, Sources and Pathways, in: Schueler, T.R., Holland, H.K. (Eds.), *The Practice of Watershed Protection*. Center for Watershed Protection, Ellicott City, MD, pp. 74–84.
3. Dorevitch, S., Pratap, P., Wroblewski, M., Hryhorczuk, D.O., Li, H., Liu, L.C., Scheff, P.A., 2012. Health Risks of Limited-Contact Water Recreation. *Environmental Health Perspectives* 120, 193.
4. Haas, C.N., Rose, J.B., Gerba, C.P., 2014. *Quantitative Microbial Risk Assessment: Second Edition*, Quant. Microb. Risk Assess.: Second Ed., *Quantitative Microbial Risk Assessment: Second Edition*. Wiley Blackwell.
5. Helmer, R.D., Finch, G.R., 1993. Use of MS2 Coliphage as a Surrogate for Enteric Viruses in Surface Waters Disinfected with Ozone. *Ozone: Science & Engineering* 15, 279–293.
6. Kay, D., Jones, F., Wyer, M.D., Fleisher, J.M., Salmon, R.L., Godfree, A.F., Zelenauch-Jacquotte, A., Shore, R., 1994. Predicting likelihood of gastroenteritis from sea bathing: results from randomised exposure. *The Lancet* 344, 905–909.
7. Moe, C.L., 2002. Waterborne Transmission of Infectious Agents, in: Hurst, C.J. (Ed.), *Manual of Environmental Microbiology*. ASM Press, Washington, D.C.
8. NHMCR, 2008. *Guidelines for Managing Risks in Recreational Water*. National Health and Medical Research Council, Australia.
9. Pond, K., 2005. Water recreation and disease. Plausibility of Associated Infections: Acute Effects, Sequelae and Mortality. World Health Organization, Padstow, Cornwall, UK.
10. Prüss, A., 1998. Review of epidemiological studies on health effects from exposure to recreational water. *International journal of epidemiology* 27, 1–9.
11. Savichtcheva, O., Okabe, S., 2006. Alternative indicators of fecal pollution: Relations with pathogens and conventional indicators, current methodologies for direct pathogen monitoring and future application perspectives. *Water Research* 40, 2463–2476.
12. Shuval, H., 2003. Estimating the global burden of thalassogenic diseases: Human infectious diseases caused by wastewater pollution of the marine environment. *Journal of Water and Health* 1, 53–64.
13. Soller, J.A., Schoen, M.E., Bartrand, T., Ravenscroft, J.E., Ashbolt, N.J., 2010. Estimated human health risks from exposure to recreational waters impacted by human and non-human sources of faecal contamination. *Water Res.* 44, 4674–4691.
14. WHO, 2016. *Quantitative Microbial Risk Assessment: Application for Water Safety Management*. World Health Organisation, Geneva, Switzerland.
15. WHO, 2014. *Preventing diarrhoea through better water, sanitation and hygiene. Exposures and impacts in low- and middle-income countries*. World Health Organisation, Geneva, Switzerland.
16. Yan, T., Sadowsky, M.J., 2007. Determining sources of fecal bacteria in waterways. *Environmental Monitoring and Assessment* 129, 97–106.