

Trendovi u upravljanju tokovima radioaktivnog otpada: Izazovi i perspektive

1. Maja Rajković

Laboratorija za zaštitu od zračenja i
zaštitu životne sredine
*Institut za nuklearne nauke "Vinča"-
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu*
Beograd, Srbija
maja.rajkovic@vin.bg.ac.rs i ORCID
0009-0008-77017819

2. Ivana Jelić

Laboratorija za zaštitu od zračenja i
zaštitu životne sredine
*Institut za nuklearne nauke "Vinča"-
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu*
Beograd, Srbija
ivana.jelic@vin.bg.ac.rs i ORCID 0000-
0003-1406-2416

3. Kristina Pavićević

Laboratorija za zaštitu od zračenja i
zaštitu životne sredine
*Institut za nuklearne nauke "Vinča"-
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu*
Beograd, Srbija
kristina.pavicevic@vinca.rs i ORCID
0009-0003-3743-2894

4. Danica Jovašević

Laboratorija za zaštitu od zračenja i
zaštitu životne sredine
*Institut za nuklearne nauke "Vinča"-
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu*
Beograd, Srbija
danica.jovasevic@vin.bg.ac.rs i ORCID
0009-0006-6722-4588

5. Marija Janković

Laboratorija za zaštitu od zračenja i
zaštitu životne sredine
*Institut za nuklearne nauke "Vinča"-
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu*
Beograd, Srbija
marijam@vin.bg.ac.rs i ORCID 0000-
0002-2255-7163

6. Marija Šljivić-Ivanović

Laboratorija za zaštitu od zračenja i
zaštitu životne sredine
*Institut za nuklearne nauke "Vinča"-
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu*
Beograd, Srbija
marijasljivic@vin.bg.ac.rs i ORCID
0000-0001-5897-0083

Abstract—Porast proizvodnje električne energije u nuklearnim elektranama, primene radioaktivnih materijala u industriji, medicini, naučnoistraživačkom radu, dovodi do povećanja količina radioaktivnog otpada, što dalje zahteva poboljšanje metoda njegovog upravljanja. Dosadašnja istraživanja bila su fokusirana na obradu i zbrinjavanje otpada, dok se savremeni pristupi sve više oslanjaju na kombinaciju tradicionalnih metoda sa naprednim tehnologijama koje omogućavaju smanjenje zapremine i efikasno uklanjanje radionuklida. U okviru ovog rada analizirani su aktuelni trendovi u upravljanju tokovima radioaktivnog otpada, pri čemu je poseban akcenat stavljen na integraciju digitalizacije i modelovanja u cilju optimizacije procesa. Razmatrane su i regionalne prakse, globalni tehnološki pravci i regulatorni okviri, uz kritički osvrt na mogućnosti primene principa cirkularne ekonomije u ovoj specifičnoj oblasti. Cilj rada je da doprinese razvoju sinergijskog pristupa koji kombinuje savremene digitalne alate sa postojećim metodama, uz njihovo osavremenjivanje, u cilju postizanja optimalnog upravljanja tokovima radioaktivnog otpada.

Ključne reči—radioaktivni materijal, upravljanje otpadom, nuklearna bezbednost, cirkularna ekonomija, digitalizacija

I. UVOD

Radioaktivni otpad (RAO) koji se generiše u različitim delatnostima uključujući energetiku, industriju, medicinu i naučnoistraživački rad, predstavlja radioaktivni materijal koji se ne predviđa za dalju upotrebu, a koji se može pojaviti u širokom opsegu koncentracija radionuklida. Definicija radioaktivnog otpada podrazumeva da aktivnost ovog materijala bude veća od graničnih vrednosti propisanih regulativom svake države [1]. Iako ovom definicijom RAO nije predviđen za dalju upotrebu, trebalo bi je ipak primenjivati sa oprezom, sa obzirom na to da postoji mogućnost reciklaže i/ili reupotrebe određene količine radioaktivnog otpada. Potencijalna primena predviđa ponovnu

upotrebu kontaminiranog metalnog otpada, prenamenu zatvorenih radioaktivnih izvora i dalju upotrebu uranijuma i plutonijuma iz isluženog nuklearnog goriva, čime se smanjuje količina visoko radioaktivnog otpada.

Upravljanje radioaktivnim otpadom pre dispozicije, predstavlja izazovan zadatak koji zahteva karakterizaciju i klasifikaciju (u skladu sa odobrenjima odgovarajućeg regulatornog tela), a koje ima za cilj da obezbedi podobne mere sigurnosti. U tabelama 1. i 2. prikazane su važeće klasifikacije [2], kao i kategorizacija radioaktivnog otpada u Republici Srbiji [3].

RAO postoji u čvrstom, tečnom i gasovitom agregatnom stanju, a rasponi koncentracije aktivnosti variraju od nivoa ispod zadatih graničnih vrednosti specifične aktivnosti koja može da se oslobodi regulatorne kontrole (tzv. nivo oslobađanja), a koji se kao takav može ispustiti/odložiti u životnu sredinu, pa sve do visokih aktivnosti za koje je neophodno osigurati efikasnu zaštitu od zračenja i sprovesti adekvatne mere. Prilikom skladištenja i odlaganja RAO, osim o aktivnosti i agregatnom stanju, treba voditi računa i o obliku otpada, vrsti prisutnih radionuklida, njihovoj koncentraciji i toksičnosti.

Na osnovu razlika u fizičko-hemijskim i radiološkim svojstvima, tokom godina razvili su se različiti obrasci za klasifikaciju radioaktivnog otpada, što je uslovalo upotrebu različite terminologije čak i na nacionalnom nivou. Ovakve neusaglašenosti dovode do izazova u formiranju doslednih i povezanih nacionalnih politika za upravljanje otpadom što dalje dovodi do smanjenja bezbednosti u pogledu očuvanja ljudskog zdravlja i životne sredine. Osim toga, ima za posledicu otežanu komunikaciju u praksama upravljanja otpadom na nacionalnom

i međunarodnom nivou. Iz tih razloga je i u Republici Srbiji 2017. godine usvojena Zajednička konvencija o sigurnosti upravljanja istrošenim gorivom i o sigurnosti upravljanja radioaktivnim otpadom [4].

Nedostak prethodnih klasifikacija i kategorizacija je u neobuhvatnosti vrsta RAO kao i nedostatku direktne povezanosti sa izvedbama dispozicije svih vrsta radioaktivnog otpada. Da bi se napravila spona između različitih vrsta otpada i načina odlaganja u određenom postrojenju, neophodno je da se u okviru istih kategorija RAO, sigurnost pokaže odgovarajućom bezbednosnom studijom slučaja i pratećom procenom bezbednosti za postrojenje.

TABELA I. KLASIFIKACIJA RADIOAKTIVNOG OTPADA

Prema specifičnoj aktivnosti radioizotopa koje sadrži	Prema vremenu poluraspada dominantnog radioizotopa	Prema agregatnom stanju	
Niskoaktivni otpad (<i>low level waste (LLW)</i>)	Veoma kratkoživeći otpad (<i>very short lived waste (VSLW)</i>) - vreme poluraspada < 100 dana	Čvrsti otpad	Presibilan
			Nepresibilan
Srednjeaktivni otpad (<i>intermediate level waste (ILW)</i>)	Kratkoživeći otpad (<i>short lived waste (SLW)</i>) - vreme poluraspada < 30 godina	Tečni otpad	Vodeni rastvor
			Organski rastvor
Visokoaktivni otpad (<i>high level waste (HLW)</i>)	Dugoživeći otpad (<i>long lived waste (LLW)</i>) - vreme poluraspada > 30 godina	Gasoviti otpad	

TABELA II. KATEGORIJE RADIOAKTIVNOG OTPADA U REPUBLICI SRBIJI

Kategorija	Tipične osobne i način dispozicije
Izuzeti RAO (<i>exempt waste (EW)</i>)	Specifična aktivnost otpada (ili ukupna aktivnost) je $\leq$ zadatih graničnih vrednosti za izuzeće od regulatornog nadzora.
Veoma kratkoživeći RAO (<i>VSLW</i>)	Otpad koji sadrži radioizotope sa veoma kratkim vremenom poluraspada (istraživačke svrhe, medicina) koji se može adekvatno čuvati nakon čega se posle raspada može osloboditi regulatorne kontrole, radi bezbednog odlaganja i/ili ispuštanja u životnu sredinu.
Veoma niskoaktivni RAO (<i>very low level waste (VLLW)</i>)	Otpad koji ne ispunjava uslove za izuzeti RAO, ali ne zahteva visok stepen izolacije i zaštite. Može biti skladišten zajedno sa drugim vrstama opasnog otpada u plitko ukopana odlagališta. Najčešće podrazumeva zemlju/šut niske specifične aktivnosti.
Niskoaktivni RAO (<i>LLW</i>)	Otpad iznad zadatih graničnih vrednosti specifične aktivnosti koja može da se oslobodi regulatorne kontrole koji zahteva izolaciju u periodu dužem od nekoliko stotina godina. Obuhvata širok spektar otpada

	(kratkoživeće radioizotope sa visokom specifičnom aktivnošću ili dugoživeće radioizotope sa niskom specifičnom aktivnošću). Smešta se u plitko ukopana odlagališta.
Srednjeaktivni RAO (<i>ILW</i>)	Otpad koji može sadržati dugoživeće radioizotope (alfa-emitere) koji se neće raspasti do nivoa oslobađanja tokom perioda institucionalne kontrole i iz tih razloga odlaže se na dubinama od nekoliko desetina do nekoliko stotina metara.
Visokoaktivni RAO (<i>HLW</i>)	Otpad koji sadrži značajne količine dugoživećih radioizotopa i zahteva odlaganje u stabilna geološka skladišta na dubinama većim od nekoliko stotina metara.

Upravljanje RAO je složen proces koji obuhvata poštovanje načela zasnovanih na preporukama Međunarodne agencije za atomsku energiju [1], i zakonodavstva svake države ponaosob. Imajući u vidu rizike koje nosi po ljudsko zdravlje i životnu sredinu, upravljanje RAO predstavlja složen multidisciplinarni odnos između različitih oblasti od politike, prostornog planiranja, geografije, ekonomije, do zdravstva, sociologije, demografije, inženjerstva, nauke o materijalima i dr. Ovaj rad analizira primenu najadekvatnijih principa u upravljanju različitim vrstama RAO kako u regionu tako i na globalnom nivou, pri čemu na osnovu uporedne analize zbrinjavanja RAO omogućava uvid u korišćenje najboljih praksi u ovoj oblasti. Takođe, rad prati implementaciju međunarodnih regulativa u nacionalne zakonodavne okvire i međunarodnu saradnju, kroz pregled naučne i stručne literature, kao i analizu postojećih tehnoloških rešenja i procenu njihovog uticaja na životnu sredinu.

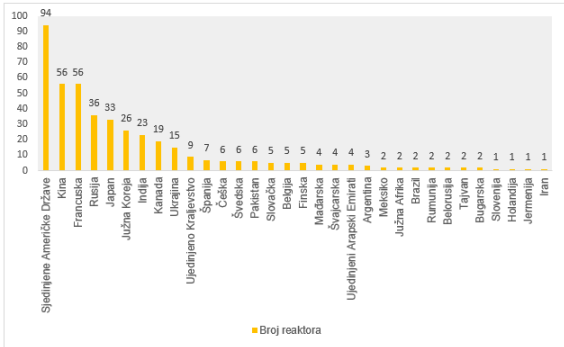
S obzirom na to da poređenje podataka objavljenih u literaturi nije jednostavno i mogu se pojaviti poteškoće u razumevanju programa i praksi upravljanja otpadom kako unutar tako i između država, plan za buduće metodologije bi trebalo da sadrži i sistem za podršku odlučivanju (prema eng. *Decision support system*), poput prilagođene baze znanja (baza podataka) kao pomoćnog softverskog alata u praćenju i definisanju tokova i adekvatnog zbrinjavanja radioaktivnog otpada. Ovakvim modelima je omogućeno da se pomoću simulacije iz stvarnog sveta razumeju i prate tokovi otpada koji su previše komplikovani, skupi ili opasni da bi se u potpunosti istražili u stvarnom životu. Takođe, mogu se koristiti za istraživanje sistema koji još ne postoje (npr. prilikom implementacije novih tehnologija), zatim za predviđanje ishoda različitih promena u sistemu (politike i propisi koji bi pomogli u donošenju pravovremenih i adekvatnih odluka).

II. ANALIZA REGIONALNIH PRAKSI I GLOBALNIH TRENDOVA U ZBRINJAVANJU RADIOAKTIVNOG OTPADA

Politike i propisi u oblasti upravljanja radioaktivnim otpadom određene su osnovnim principima na kojima počiva Međunarodna agencija za atomsku energiju [1], a koji podrazumevaju poštovanje principa opravdanosti, nenametanja nepotrebnih tereta budućim generacijama i minimiziranje otpada. Svaka država je u obavezi da precizira sigurnost prilikom upravljanja istrošenim gorivom i radioaktivnim otpadom, što podrazumeva održavanje adekvatnih bezbednosnih mera definisanih odgovarajućim zakonskim odredbama, preduzimanje istraživanja baziranih na aktuelnim podacima o

količini i tipu generisanog otpada sakupljenog za dalje procesiranje i/ili odlaganje i razvoju kompetencija.

S obzirom na to da je nuklearna energija jedna od primarnih karbon-neutralnih izvora električne energije, očekuje se njen dalji globalni rast u narednim godinama. Prema podacima za 2024. godinu, tri evropske države – Francuska, Slovačka i Mađarska – imaju najveći udeo nuklearne energije u ukupnoj domaćoj proizvodnji električne energije, sa 64,8%, 61,3% i 48,8%, redom. Nasuprot tome, iako Sjedinjene Američke Države i Kina imaju najveći nuklearni kapacitet na svetu, udeo nuklearne energije u njihovoj ukupnoj proizvodnji električne energije iznosi manje od 20% i 5%, respektivno, Sl. 1 [5].

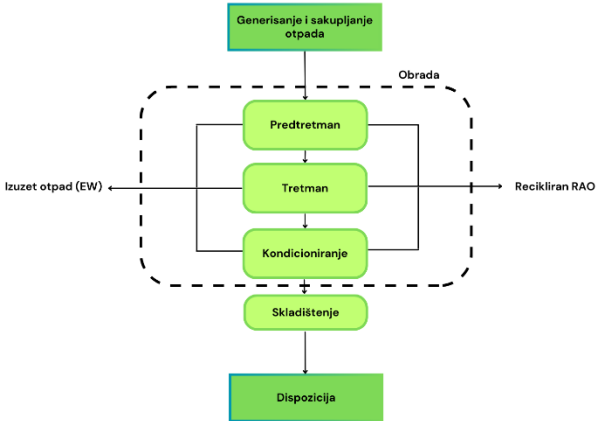


Sl. 1. Broj operativnih nuklearnih reaktora širom sveta po zemljama (podaci za maj 2024.)

Da bi bezbednost tokom i nakon igradnje nuklearnih objekata bila na najvišem nivou, neophodno je dosledno poštovati hijerarhijski utvrđene korake implementacije koji obuhvataju: određivanje lokacije, izgradnju, puštanje u rad, rad, modifikaciju, održavanje i prestanak aktivnosti. Pored toga važno je poštovati odgovarajuće propise koji se odnose na transport radioaktivnih i nuklearnih materijala, zaštitu, sigurnost i bezbednost prilikom rukovanja, modifikacije i zatvaranja odlagališta radioaktivnog otpada. Upravljanje RAO predstavlja integrisani sistem koji obuhvata niz aktivnosti od obrade (predtretman, tretman i kondicioniranje), skladištenja, transporta, i odlaganja do dekontaminacije i dekomisije. Uz eventualni dodatni korak u vidu odvajanja, odnosno procesiranja RAO u cilju buduće ponovne upotrebe. Takođe, pod upravljanjem RAO, podrazumeva se i karakterizacija, kao i pripremni radovi za transport, prijem radioaktivnog otpada, uvođenje u bazu podataka i izdavanje potvrde o prijemu/uskladištenju radioaktivnog otpada. Na Sl. 2. prikazane su faze upravljanja RAO koje predhode poslednjem hijerarhijskom koraku – dispoziciji [6]. Prilikom obavljanja ovih aktivnosti, odgovornost za iste zavisi od vrste otpada koji je uključen. Prema hijerarhiji upravljanja RAO, dispozicija predstavlja poslednji korak koji podrazumeva trajno odlaganje otpada ili ispuštanje efluenta u životnu sredinu. U cilju minimiziranja nastale količine RAO, neophodno je primeniti aktivnosti i procedure kojima se smanjuje količina otpada do maksimalno ostvarive granice. U svim fazama radnog ciklusa nuklearnog ili radijacionog objekta, kao i tokom svih aktivnosti iz kojih proizilaze radioaktivni materijali može se primeniti minimizacija.

Ona podrazumeva kontrolu i smanjenje nastajanja RAO, obuhvatajući i tretman radi smanjenja aktivnosti, reciklažu,

dekontaminaciju i ponovnu upotrebu materijala, pri čemu se uzima u obzir količina sekundarnog RAO nastalog tokom procesa dekontaminacije. Međutim, treba praviti razliku između postupaka za smanjenje zapremine i minimizacije u smislu smanjenja generisanja RAO.



Sl. 2. Osnovne faze upravljanja RAO [6]

U tabeli 3. prikazana je uporedna analiza zbrinjavanja RAO u zemljama sa najvećim udelom nuklearne energije u ukupnoj domaćoj proizvodnji električne energije, a od kojih su dve (Mađarska i Slovačka) u neposrednoj blizini Republike Srbije.

TABELA III. KATEGORIJE RADIOAKTIVNOG OTPADA U REPUBLICI SRBIJI

Kategorija		Mađarska	Slovačka	Francuska
Tip otpada/način odlaganja	LLW/ILW	Nisko i srednjeaktivni RAO → podzemna odlagališta (rudnici soli, stabilne geološke formacije – glineni slojevi)	Nisko i srednjeaktivni RAO → podzemna odlagališta (rudnici, horizontalni tuneli, kamene padine)	Nisko i srednjeaktivni RAO → površinska odlagališta (betonski kontejneri prekriveni zaštitnim slojem)
	HLW	Visokoaktivni RAO → privremeno skladištenje u namenskim objektima (planirano dugoročno rešenje u vidu trajnog odlaganja u dubokim geološkim formacijama)	Visokoaktivni RAO → privremeno skladištenje u specijalizovanim postrojenjima (planirano dugoročno rešenje u vidu trajnog odlaganja u dubokim geološkim formacijama)	Visokoaktivni RAO → razvijanje projekta Cigéo (podrazumeva primenu inženjerskih i prirodnih barijera u dubokom geološkom odlagalištu)
Regulativa		Nacionalna uprava za atomsku energiju (HAEA) [7] → reguliše upravljanje RAO i primenu zakona u skladu sa EU regulativom	Nuklearna regulatorna uprava Upravljanje (ÚJD SR) [8] → reguliše upravljanje RAO skladu sa međunarodnim smernicama	Francuska uprava za nuklearnu sigurnost i zaštitu od zračenja (ASNR) [9] → nadgleda civilne nuklearne aktivnosti u

			Francuskoj u ime države
Bezbednost	Podrazumeva sprečavanje kontakta otpada sa okruženjem → fokus je na dugoročnoj izolaciji otpada	Podrazumeva dugoročni monitoring u cilju zaštite → fokus je na geološkoj stabilnosti i zaštitnim barijerama	Kombinacijom inženjerskih i prirodnih barijera → sprečavanje curenja radionuklida u životnu sredinu
Reciklaža/Reupotreba	Ograničena mogućnost reciklaže. Većina potrošenog nuklearnog goriva se skladišti kao otpad, uz planove za buduću preradu.	Delimična prerada i skladištenje korišćenog nuklearnog goriva. Postoji interes za razvoj naprednijih metoda reciklaže.	Napredna reciklaža i ponovna upotreba nuklearnog goriva u La Hague postrojenju. Do 96% potrošenog goriva se može tehnički oporaviti i ponovo koristiti u reaktorima.

Sve tri države imaju aktivnu međunarodnu saradnju u oblasti upravljanja RAO. Ono što ih razlikuje jesu nacionalne mogućnosti za implementiranje nadovezujućih strategija kao i tehnološki razvoj. Mađarska uprava za atomsku energiju (*Hungarian Atomic Energy Authority - HAEA*) [7] kroz saradnju sa IAEA [1] i formiranje programa u okviru kojih se sprovode aktivnosti za odgovorno i bezbedno upravljanje istrošenim gorivom i radioaktivnim otpadom kontinuirano vrši poboljšanje metoda za upravljanje RAO i poboljšanje metoda za regeneraciju i ponovno korišćenje materijala za nove proizvode (ograničena mogućnost primene), ali i metoda trajnog odlaganja visokoaktivnog RAO u dubokim geološkim formacijama. Slovačka, s druge strane kroz aktivnosti nuklearne regulatorne uprave (*Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky - ÚJD SR*) [8] koje obuhvataju nadzor nuklearne bezbednosti države, upravljanje RAO, upravljanje istrošenim nuklearnim gorivom, nadzor nad nuklearnim materijalima, inspekciju, evidenciju i zaštitu i aktivno učešće u međunarodnim istraživačkim projektima, kontinuirano sprovodi akcije i planove za poboljšanje kapaciteta i načina skladištenja radioaktivnog materijala. U okviru mreže regionalne saradnje, kako sa ekspertima iz regulatornih tela, tako i sa naučnim institucijama u ovoj oblasti, Slovačka doprinosi razmeni stručnog znanja i iskustava, ali i najnovijim trendovima u oblasti sigurnosti skladištenja nuklearnog otpada i mogućnostima njegovog trajnog odlaganja u dubokim geološkim slojevima. Stručnjaci iz Francuske uprave za nuklearnu sigurnost i zaštitu od zračenja (*Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection – ASN*) [9] u ime države, vrše nadzor nad civilnim nuklearnim aktivnostima, ali i predstavljaju lidere u istraživanjima i razvoju tehnologija u oblastima nuklearne sigurnosti i zaštite od zračenja. ASN, kroz svoje delatnosti, sprovodi procenu bezbednosti nuklearnih postrojenja – uključujući reaktore, postrojenja za preradu nuklearnog goriva, laboratorije, istraživačke objekte i skladišta radioaktivnog otpada – u svim fazama njihovog životnog ciklusa, počev od faze projektovanja pa do konačne demontaže. Ono što posebno izdvaja Francusku u

pogledu liderstva u oblasti razvoja novih tehnologija u odnosu na Mađarsku i Slovačku koje se temelje na međunarodnim iskustvima i znanju u pogledu poboljšanja svojih metoda upravljanja odnoseći se prevashodno na načine skladištenja RAO jeste i sprovođenje naučnih i stručnih studija koje se koriste i odgovarajućim validiranim alatima za naučna računarska modelovanja u skladu sa zakonskim odredbama, a koje omogućavaju sprovođenje pouzdanih i preciznih analiza. Time se stvaraju temelji za implementaciju naprednih tehnoloških rešenja i mogućnost transfera tehnologija na međunarodnom nivou u oblasti upravljanja RAO. Korelacija između ovih zemalja ogleda se u njihovom doprinosu zajedničkim ciljevima globalnoj mreži znanja i bezbednosti u oblasti upravljanja RAO.

U Republici Srbiji regulatorna institucija koja je donosilac propisa, izdavalac dozvola i vršilac inspeksijskog nadzora u radu sa radioaktivnim materijalom jeste Direktor za radijaciju i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije (SRBATOM) [10].

SRBATOM, institucija zasnovana Zakonom o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti ("Sl. glasnik RS", br. 95/2018 i 10/2019), obavlja funkciju regulatornog tela, odgovornog za sprovođenje mera radijacione i nuklearne sigurnosti i bezbednosti, uključujući upravljanje radioaktivnim otpadom i istrošenim nuklearnim gorivom. Ove mere podrazumevaju, po hijerarhiji upravljanja RAO, – smanjenje nastajanja otpada, sigurno skladištenje i odlaganje, kao i vršenje sanacije usled procenjenog rizičnog izlaganja pojedinca i stanovništva negativnom efektu jonizujućeg zračenja. Sa aspekta upravljanja RAO, Srbija je uskladila svoje zakonodavstvo sa odredbama Zajedničke konvencije o sigurnosti upravljanja istrošenim gorivom i radioaktivnim otpadom, čime se obavezala na primenu međunarodno priznatih principa bezbednosti i odgovornog upravljanja ovim materijalima.

Iako nema nuklearni reaktor, u pogledu geopolitičke bezbednosti, Srbija je potencijalno izložena prekograničnim uticajima u slučaju akcidenata kroz kontaminaciju vazduhom, atmosferskim strujama, zagađenjem voda, naročito tokom reke Dunav, ekonomskim, ali i energetske poremećajima u regionu. Na Sl. 3. prikazane su nuklearne elektrane koje se nalaze u neposrednoj blizini teritorije Republike Srbije.

Zemlje sa dugom nuklearnom tradicijom u pređenju sa zemljama u razvoju nuklearnog sektora imaju već ustaljene metode tretmana i načine skladištenja RAO koje samo tehnološki osavremenjuju dugogodišnju praksu, dok kod zemalja u razvoju nuklearnog sektora postoje brojni izazovi kako u implementaciji zakonom propisanih praksi, tako i u samim načinima izvedbe. Pored toga brojni su izazovi kada je reč o javnoj percepciji. Iz tih razloga nameće se potreba za regionalnom saradnjom i razmenom najboljih praksi.



Sl. 3. Nuklearne elektrane u neposrednom okruženju Republike Srbije

III. TRENDVI U TRETMANU RAO

Obrada RAO predstavlja jednu od glavnih aktivnosti u upravljanju ovim tokom otpada, a obuhvata sakupljanje, minimizaciju i razvrstavanje, hemijsko prilagođavanje i dekontaminaciju (predtretman), izmenu fizičkih i hemijskih svojstava: smanjenje zapremine, promenu sastava i uklanjanje radionuklida (tretman) i imobilizaciju i pakovanje (kondicioniranje). Kondicioniranje RAO podrazumeva imobilizaciju pretvaranjem u čvrsto stanje - cementiranjem, bitumenizacijom i vitifikacijom i nakon toga pakovanje u odgovarajuće kontejnere [11].

U ovoj oblasti pokazalo se da je sigurnije koristiti proverene metode, sa već ustaljenim načinom izvedbe, naročito kada je reč o korišćenju opreme prilikom manipulacije otpadom, međutim nauka se kontinuirano razvija u smeru kontruisanja inovativnih tehnika, kako matrica za imobilizaciju, tako i tehnika manipulacije prilikom rukovanja, ali i skladištenja i trajnog odlaganja RAO, što je praćeno kontinuiranim usaglašavanjem sa nacionalnim i međunarodnim propisima.

Načini obrade RAO razlikuju se u odnosu na agregatno stanje. Prilikom obrade tečnog RAO, koriste se različite metode, a u zavisnosti od sastava otpada, nivoa radioaktivnosti i konačnog cilja obrade (npr. smanjenje zapremine, uklanjanje radionuklida, stabilizacija otpada). Tretman tečnog RAO oslanja na kombinaciju proveniranih metoda i novih tehnoloških rešenja. Sve više se istražuju ekološki prihvatljive i efikasne metode, što ukazuje na pravac budućeg razvoja. Najčešće korišćene metode za tretman tečnog radioaktivnog otpada su uparavanje, hemijska precipitacija, sorpcija i jonska izmena i membranske metode kao što su elektrodijaliza, mikro-filtracija, ultra-filtracija, nanofiltracija i reverzna osmoza. Usled složenosti membranskih procesa, pronalazjenja adekvatnog odnosa cene i kvaliteta u smislu realne primene, važno je izvršiti pregled literature koji omogućava da se komparativnom analizom više membranskih tehnika dođe do adekvatnih odluka prilikom izbora odgovarajućeg tretmana. U praksi se obično koristi kombinacija nekoliko navedenih metoda, kako bi se postigao najbolji ukupni faktor dekontaminacije za ukupnu alfa i/ili ukupnu beta/gama aktivnost radioaktivnog otpada koji se tretira, na primer uparavanje, iza kog sledi jonska izmena kako bi se postigao što veći koeficijent dekontaminacije [6, 12-16]. Kada je reč o tretmanu čvrstog RAO, cilj je minimizirati zapreminu. Tehnike koje su opšte prihvaćene i u upotrebi su kompaktiranje i superkompaktiranje, insinercija (termički tretman), topljenje,

hemijske i termohemijske metode koje podrazumevaju hemijsko razlaganje vlažnom oksidacijom, oksidacijom rastopljenim solima i termohemijsko razlaganje. Disperzija radioaktivnih čestica u vazduhu određena je složenim atmosferskim kretanjima, stanjem atmosfere i površinom Zemlje, lokacije sa koje su čestice emitovane. Usled nemogućnosti zadržavanja zapremine, gasoviti RAO se veoma razlikuje od tečnog i čvrstog i njegovo širenje u okruženje je naročito brzo i nekontrolisano. Stoga se delovima procesne opreme sa izlaznim tokovima gasa i značajno uvećanim koncentracijama radionuklida obezbeđuje adekvatna ventilacija odgovarajućim sistemom za ventilaciju koji podrazumeva filtre za uklanjanje aerosola čime se kontroliše njihovo prisustvo u ambijentalnom vazduhu i omogućava zaštita [6].

Inventivnost u tretmanu i kondicioniranju, odnosno transformaciji RAO tako da bude pogodan za dalju manipulaciju, transport, skladištenje i dispoziciju obuhvata i korišćenje naprednih metoda kondicioniranja i imobilizacije otpada, ali i upotrebu novih materijala za zaštitu i skladištenje.

IV. DIGITALIZACIJA I MODELOVANJE U PRAĆENJU TOKOVA RAO

Primenom metoda modelovanja doprinosi se efikasnijem praćenju tokova RAO, ali i konstruktivnijoj optimizaciji logistike, kao i smanjenju potencijalnih rizika po stanovništvo i životnu sredinu. U cilju unapređenja bezbednosti, ali i efikasnosti manipulacije i transporta RAO, razvijeni su različiti modeli koji omogućavaju adekvatne procene uz osvrt na procenu ekonomskih rizika u upravljanju ovim tokovima otpada:

- IAEA kroz svoja istraživanja u okviru upravljanja istrošenim gorivom iz istraživačkih reaktora koji su u širokoj upotrebi u pogledu obrazovanja, obuke i vršenja naprednih ispitivanja goriva i radioaktivnog materijala, uključuje alate za modelovanje i proračune. Kombinujući neekonomske i ekonomske faktore, alatke *BRIDE* (*Back end Research Reactor Integrated Decision making Evaluation*) i *FERREX* (*Fuel Cycle Cost Estimation for Research Reactors in Excel*) mogu se primenjivati na različite scenarije i mogu uključivati tokove upravljanja otpadom kao što su procesiranje, kondicioniranje, skladištenje i dispozicija birajući najrelevantnije i najizvodljivije predviđene ishode za dalju evaluaciju. Sam proces validacije modela koji se koriste u upravljanju RAO se dodatno zaokružuje primenom modela kroz studije slučaja na terenu, koje omogućavaju ocenu njihove praktične primenljivosti u realnim uslovima i daju povratne informacije za njihovo unapređenje [17].

- Kancelarija za integrisano upravljanje otpadom Ministarstva energetike SAD razvila je za potrebe procene transporta radioaktivnog materijala *START* (*Stakeholder Tool for Assessing Radioactive Transportation*), alatku koja planira budući transport, skladištenje i odlaganje istrošenog nuklearnog goriva i visoko radioaktivnog otpada. *START* omogućava vizuelni prikaz i analizu geoprostornih podataka relevantnih za planiranje tokova RAO uz korišćenje geografskih informacionih sistema (*GIS*) za prikazivanje ruta transporta i analizu različitih scenarija, uz fokus na vrednosti populacije u zonama oko trasa [18].

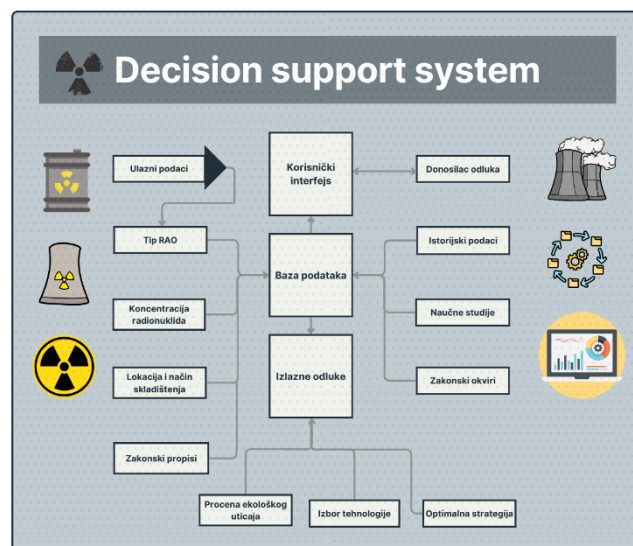
- Sistem za podršku odlučivanju koji je razvila Belgijska agencija za upravljanje radioaktivnim otpadom, koristi pristup zasnovan na neizvesnim ekspertskim procenama (*fuzzy logic*) za

procenu ekonomskih rizika u projektima odlaganja visoko radioaktivnog otpada. Ovaj pristup omogućava realističniju procenu troškova i neizvesnosti povezanih sa tehničkom zrelošću i napretkom projekta [19].

• *Ecolego* predstavlja softversku alatku za simulaciju i procenu rizika koja se koristi za kreiranje dinamičkih modela i izvođenje determinističkih i probabilističkih simulacija, razvijenu od strane AFRY AB, švedske inženjerske i konsultantske kompanije specijalizovana za održivi razvoj, energetiku i infrastrukturu. Nalazi primenu u radioekologiji, zaštiti životne sredine i fiziološki zasnovanom farmakokinetičkom modelovanju. *Ecolego* omogućava modelovanje migracije radionuklida i njihovih produkata raspada, kao i procenu dugoročnih performansi odlagališta [20].

Kako Direktor (SRBATOM) funkcioniše kao direktna spona između nacionalnog regulatornog okvira i međunarodnih normi koje propisuje Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA), prirodno je da postoji težnja ka implementaciji sistema za podršku odlučivanju u sektoru upravljanja RAO. Kroz programe tehničke pomoći i saradnje, u cilju unapređenja regulatorne i nadzorne funkcije, Direktor ima pristup postojećim softverskim alatima koje je IAEA razvila kako bi pomogla državama članicama u upravljanju regulatornim programima kontrole, evidenciji radioaktivnih izvora, inspekcijama aktivnostima, planiranju potreba za kompetencijama regulatornog osoblja, razvoju infrastrukture bezbednosti kroz samoprocenu sopstvenih procesa i dr. Međutim, u pogledu razvoja i implementiranja modela za praćenje tokova otpada, SRBATOM se i dalje suočava sa brojnim izazovima naročito u domenu sprovođenja digitalizacije sa obzirom na nepotpunost odgovarajućih baza podataka, ali i ograničenu informaciono-tehnološku infrastrukturu, što otežava pouzdano praćenje, upravljanje i dugoročnu analizu u ovoj oblasti. Kontinuiranom edukacijom i međunarodnom saradnjom ne samo radi tehničkih već i institucionalnih unapređenja kroz jačanje kapaciteta za procenu rizika, unapređenje transparentnosti i komunikacije sa javnošću, postaviće se baza za dalji razvoj i primenu softverskih alata.

Za razliku od alata koji se ograničavaju samo na prikupljanje podataka, sistemi za podršku odlučivanju, takođe obrađuju te podatke kako bi proizveli detaljne uvide i projekcije. Na Sl. 4. dat je vizuelni prikaz elemenata i međuzavisnosti u okviru sistema za podršku odlučivanju. Ovakav sistem integriše podatke o vrsti RAO, koncentraciji radionuklida, lokaciji i načinu skladištenja, kao i zakonskim okvirima, u cilju generisanja optimalnih izlaznih odluka kao što su izbor tehnologije, procena ekološkog uticaja i definisanje strategije tretmana.



Sl. 4. Struktura sistema za podršku odlučivanju u upravljanju RAO

V. ZAKLJUČAK

Da bi se obezbedilo optimalno upravljanje tokovima RAO, a usled rastuće upotrebe radioaktivnih materijala u energetici, medicini i industriji, važno je unaprediti dosadašnje proverene prakse, kako bi se prilagodile savremenim izazovima, posebno u pogledu smanjenja zapremine otpada i postizanja visokog stepena dekontaminacije. Važno je ostvariti adekvatnu međunarodnu saradnju kroz ostvarenje zajedničkih ciljeva, ali i omogućiti formiranje globalne mreže znanja u u ovoj oblasti. Multidisciplinarnim pristupom, utemeljenim na naučnim dokazima, ali i javnom dijalogu i međunarodnoj saradnji, kroz integraciju digitalnih alata, modelovanja i inovativnih tehnologija sa tradicionalnim metodama tretmana i kondicioniranja, moguće je značajno poboljšati bezbednost, efikasnost i ekonomičnost celokupnog procesa. Takođe, kombiovanom primenom principa cirkularne ekonomije i kontinuiranim ulaganjem u razvoj metoda, validaciju modela i primenu integrisanih rešenja može se postići značajan napredak u cilju obezbeđenja sigurne nuklearne budućnosti. Sistemi za podršku odlučivanju za zemlje u razvoju nuklearnog sektora, poput Republike Srbije, mogu služiti kao oslonac na međunarodnu praksu, radi razvoja dugoročno održivog modela za upravljanje tokovima RAO.

ZAHVALNICA

Istraživanje predstavljeno u ovom radu realizovano je uz finansijsku podršku Ministarstva za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije, uz finansiranje naučnoistraživačkog rada na Univerzitetu u Beogradu, Institutu za nuklearne nauke „Vinča“ (Ugovor br. 451-03-136/2025-03/ 200017).

REFERENCE/LITERATURA

- [1] International Atomic Energy Agency, *IAEA Safety Glossary: 2018 Edition*, Non-serial Publications. Vienna, Austria: IAEA, 2019. [Online]. Available: <https://www.iaea.org/publications/11098/iaea-safety-glossary-2018-edition>. [Accessed: Mar. 6, 2025].
- [2] International Atomic Energy Agency, *Predisposal Management of Radioactive Waste*, General Safety Requirements, no. GSR Part 5. Vienna, Austria: IAEA, 2009. [Online]. Available: <https://www.iaea.org/publications/8004/predisposal-management-of-radioactive-waste>. [Accessed: Mar. 6, 2025].

- [3] *Pravilnik o upravljanju radioaktivnim otpadom i istrošenim nuklearnim gorivom: 127/2021-84*. [Online]. Available: <https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/drugidrzavnioorganizacije/pravilnik/2021/127/3>. [Accessed: Mar. 6, 2025].
- [4] *Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti*. [Online]. Available: http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2017_11/t11_0141.htm. [Accessed: Mar. 11, 2025].
- [5] Statista, "Nuclear power plants in the world 2024." [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/267158/number-of-nuclear-reactors-in-operation-by-country/>. [Accessed: Feb. 25, 2025].
- [6] O. Ciraj-Bjelac and M. Vujović, *Upravljanje radioaktivnim otpadom*. Beograd, Srbija: Akademski misao, 2017.
- [7] Hungarian Atomic Energy Authority, *Hungarian Atomic Energy Authority*. [Online]. Available: <https://www.haea.gov.hu>. [Accessed: May 20, 2025].
- [8] Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky (ÚJD SR), *Activities of the Nuclear Regulatory Authority of the Slovak Republic*. [Online]. Available: <https://www.ujd.gov.sk>. [Accessed: May 20, 2025].
- [9] Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASN), *Activities and Responsibilities*. [Online]. Available: <https://www.asn.fr>. [Accessed: May 20, 2025].
- [10] Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije (SRBATOM), *Izveštaj o radu za 2023. godinu*. Beograd, Srbija, 2024. [Online]. Available: <https://www.srbatom.gov.rs>. [Accessed: May 20, 2025].
- [11] I. Plečaš, S. Pavlović, M. Rajčević, and N. Nešković, *Radioaktivni otpad u Srbiji: kako i gde s njim?* Beograd, Srbija: Srpska podružnica Rimskog kluba, 2017.
- [12] A. K. Pabby, S. S. H. Rizvi, and A. M. Sastre, *Handbook of Membrane Separations: Chemical, Pharmaceutical, Food, and Biotechnological Applications*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.
- [13] M. A. A. Asim and H. M. Al-Mutaz, "Removal of radionuclides from groundwater using reverse osmosis," *Desalination*, vol. 131, no. 1–3, pp. 179–187, 2000.
- [14] N. H. M. Saeed *et al.*, "Evaluation of polyamide reverse osmosis membranes for removal of radioactive Cs and Sr from nuclear wastewater," *J. Hazard. Mater.*, vol. 227–228, pp. 58–64, 2012.
- [15] P. D. Jain and K. S. Rane, "Removal of cesium from radioactive waste by electrodeionization technique," *J. Membr. Sci.*, vol. 360, no. 1–2, pp. 58–63, 2010.
- [16] A. K. Pabby, J. V. Sonawane, S. K. Gupta, S. R. Sawant, N. S. Rathore, and Y. Kulkarni, "Overview and the current status of membrane-based processing of radioactive nuclear plant waste: Evaluation of some case studies," in *Handbook of Membrane Separations: Chemical, Pharmaceutical, and Biotechnological Applications*, S. Pabby and S. Rizvi, Eds., 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015, pp. 857–893.
- [17] International Atomic Energy Agency, *Research Reactor Spent Fuel Management: Options and Support to Decision Making*. Vienna, Austria: IAEA, 2022. [Online]. Available: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1954_web.pdf. [Accessed: May 20, 2025].
- [18] C. Condon, K. McGee, H. Gadey, and P. Royer, "Stakeholder Tool for Assessing Radioactive Transportation (START) Verification and Validation Efforts," *arXiv preprint arXiv:2306.11938*, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2306.11938>. [Accessed: May 20, 2025].
- [19] C. Cornélis, B. De Baets, M. Heyndrickx, and P. Vankerberghen, "A decision aid system based on fuzzy logic for radioactive waste management under uncertainty," *arXiv preprint arXiv:2306.11938*, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2306.11938>. [Accessed: May 20, 2025].
- [20] R. Avila, R. Broed, and A. Pereira, "Ecolego – a toolbox for radioecological risk assessment," Swedish Radiation Protection Authority, Stockholm, Sweden, Report SSI-2003–11, 2003. [Online]. Available: <https://inis.iaea.org/records/537x8-0ty48>. [Accessed: May 20, 2025].

The increase in electricity production from nuclear power plants and the use of radioactive materials in industry, medicine, and scientific research has led to a rise in the amount of radioactive waste, necessitating improvements in waste management methods. Previous research has primarily focused on waste treatment and disposal. In contrast, modern approaches increasingly rely on a combination of traditional methods and advanced technologies that enable volume reduction and efficient radionuclide removal. This paper analyzes current trends in radioactive waste stream management, with special emphasis on the integration of digitalization and modeling to optimize processes. Regional practices, global technological directions, and regulatory frameworks are also examined, accompanied by a critical overview of the potential application of circular economy principles in this specific field. This paper aims to contribute to the development of a synergistic approach that combines modern digital tools with existing methods, enhancing them to achieve optimal management of radioactive waste streams.

TRENDS IN RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT: CHALLENGES AND PERSPECTIVES

Maja Rajković, Ivana Jelić, Kristina Pavićević, Danica Jovašević, Marija Janković, Marija Šljivić-Ivanović

ABSTRACT