

Sektorski pristup u analizi bezbednosnih rizika upravljanja nuklearnim otpadom

Slavko Dimović, Milica Ćurčić, Nikola Zdolšek

Apstrakt—U ovom radu izvršen je uporedni prikaz političkih, ekonomskih, društvenih i ekoloških aspekata u analizi bezbednosnih rizika koji potiču od različitih oblika ugrožavanja poput terorizma, krađa, pronevera, sabotaza i prevara u upravljanju nuklearnim otpadom. Na taj način, primenom sektorskog pristupa bezbednosti, formulisano u okviru Kopenhaške škole studija bezbednosti, na celovit i sveobuhvatan način pristupa se predmetu ovog istraživanja primenom u teoriji proverenog analitičkog okvira. Nuklearni otpad je nusproizvod aktivnosti nuklearnih reaktora, postrojenja za preradu goriva, bolnica i istraživačkih objekata, a stvara se i prilikom zatvaranja i dekomisije nuklearnih postrojenja. U međunarodnoj politici upravljanje nuklearnim otpadom je kompleksno i osetljivo pitanje koje uključuje veliki broj državnih i komercijalnih aktera i posebno je regulisano kao deo nuklearne industrije, a usaglašeno sa uslovima tretiranja opasnog otpada.

U odnosu na druge vrste otpada, prilikom upravljanja nuklearnim otpadom izraženije su društveni aspekti bezbednosti, pre svega kompleksni bezbednosni rizici ali i briga, neizvesnost i perspektive za buduće generacije. Takođe, sa političkog i ekološkog aspekta, upravljanje i odlaganje nuklearnog otpada predstavlja najveći razlog mimoilaženja između nuklearnih pristalica i protivnika. Troškovi upravljanja i odlaganja otpada iz nuklearnih elektrana obično čini oko 5% ukupnih troškova generisane električne energije, a najveći udeo čine troškovi njegovog privremenog i trajnog odlaganja. Nuklearni otpad bi trebalo skladištiti u dubokim geološkim formacijama, jer rizici protokom vremena postaju niži od rizika skladištenja na površini.

Upravljanje nuklearnim otpadom karakteriše visok nivo složenosti i interkompatibilnosti značajnih faktora: pitanja transporta, finansiranja prerade otpada i raspolaganja, kao i vođenja administrativnih evidencija. Određene tendencije u regulisanje industrije, za koje se tvrdi da su opravdane na bezbednosnim osnovama, smanjuju transparentnost i istinitost izveštavanja i tako otvaraju mogućnost za korupciju i druge oblike tzv. „kriminaliteta belog okovratnika“. Stvaranjem kulture nekažnjivosti ovih, uslovno rečeno blažih kriminalnih akata, ostvaraju se preduslovi za nastanak i ispoljavanje ozbiljnijih krivičnih dela, uključujući terorizam.

Ključne reči—upravljanje nuklearnim otpadom, bezbednost, bezbednosni rizici, sektorski pristup, Kopenhaška škola studija bezbednosti

Slavko Dimović, Institut za nuklearne nauke “Vinča” – Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine (sdimovic@vin.bg.ac.rs).

Milica Ćurčić, Institut za nuklearne nauke “Vinča” – Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Laboratorija za fizičku hemiju (milica.curcic@vin.bg.ac.rs).

Nikola Zdolšek, Institut za nuklearne nauke “Vinča” – Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Laboratorija za fizičku hemiju (zdolsek@vin.bg.ac.rs).

I. UVOD

U okviru diskursa aktuelizacije neobnovljivih izvora energije, nuklearna energija je dugo bila kritikovana tema i kontroverzan izvor energije. Kao metod proizvodnje električne energije sa niskim emisijama ugljen-dioksida predstavlja jedan od sigurnih izvora energije u budućnosti, pa je njene pristalice razmatraju kao prelazno ili trajno rešenje za dekarbonizaciju, ali i kao hitan odgovor na klimatske promene. S druge strane, protivnici nuklearne energije smatraju je reč o veoma složenoj tehnologiji koju prate bezbednosni, ekološki i zdravstveni rizici. Neizostavni deo diskusije o nuklearnoj energiji jeste nuklearni otpad kao nusproizvod aktivnosti nuklearnih reaktora, postrojenja za preradu goriva, bolnica i istraživačkih centara. On se takođe generiše prilikom zatvaranja i dekomisije nuklearnih reaktora i drugih nuklearnih postrojenja. Nuklearni otpad čine jalovina nastala pri eksploataciji rude urana, transuranski (TRU) otpad, nisko, srednje i visoko radioaktivni otpad, kao i istrošeno nuklearno gorivo [1].

Upravljanje nuklearnim otpadom predstavlja jednu od najkompleksnijih postupaka u odnosu na sve druge vrste otpada obzirom da uključuje brojne državne i ne-državne aktere i praćeno je složenijim bezbednosnim rizicima sa potencijalno većim posledicama, ali manjom verovatnoćom ispoljavanja štetnog događaja. Predmet ovog istraživanja jeste multidimenziona analiza upravljanja nuklearnim otpadom primenom sektorske analize formulisane u okviru Kopenhaške škole studija bezbednosti [2]. Sektorski pristup bezbednosti prepoznaje pet sektora - vojni, politički, ekonomski, društveni i ekološki sektor i predstavlja relevantan analitički okvir za objašnjavanje preliivanja bezbednosnih rizika iz jednog sektora u drugi. U konkretnoj studiji slučaja – upravljanju nuklearnim otpadom, analizirano je četiri sektora, a obzirom da je istraživanje koncipirano u redovnom, mirnodopskom stanju iz analize je izostavljen vojni sektor. S druge strane, u ovom radu razmatrana je ideja o proširenom sektorskom pristupu obzirom da je posebna pažnja posvećena tehničkim aspektima bezbednosti. U analizi upravljanja nuklearnim otpadom posebna pažnja posvećena je procesu zatvaranja nuklearnih elektrana nakon završetka njihovog radnog veka, problemi skladištenja, reciklaže i odlaganja visokog, srednjeg i niskog nivoa otpada, kao i bezbednosni rizici nuklearnog gorivnog ciklusa.

Kada je reč o oblicima ugrožavanja procesa upravljanja nuklearnim otpadom, kao najsloženiji oblik izdvaja se terorizam. Transformacija terorizma, koja uključuje saradnju i

koordinaciju aktivnosti većeg broja međunarodnih nedržavnih aktera, imala je reprekusije na objektivnost, pouzdanost i validnost nalaza stručnjaka i regulatora u postupku procene rizika. Preispitivanje ove pretpostavke može da se izvrši na različite načine, a za ovu analizu je najpogodniji pristup koji uključuje osvrt na objektivne i subjektivne aspekte. Kada je reč o subjektivnim aspektima, obzirom da javnost uobičajeno nije stručna, svoju zabrinutost po pitanju štetnosti nuklearnog otpada iskazuje na način koji nije uvek potpuno podesan za prikupljanje i procenu dokaza od strane regulatora i stručnjaka. Dizanjem panike i vršenjem pritiska na donosiocima odluka ne pruža se adekvatan materijal koji bi regulatori mogli kasnije da koriste u poboljšavanju legislativne i radnih procesa u ovoj oblasti, a značajno se otežava njihov rad. S druge strane, usled objektivnih aspekata može doći do enormno povećanih rashoda usled prevelike pesimističke procene, odnosno najgore moguće procene koja iziskuje najviše finansijskih ulaganja [3]. Zabrinutost javnosti zbog nuklearnog otpada u Evropi uglavnom je usmerena prema pitanju skladištenja nuklearnog otpada i potencijalnih negativnih efekata uskladištenog otpada po životnu sredinu i zdravlje ljudi [4]. Evropska komisija navodi da je stav o opasnostima koje proističu iz ovog procesa postalo najzastupljenije mišljenje među građanima, bez obzira na njegovu neutemeljenost. Pogubnost ove retorike kreirane od različitih anti-nuklearnih pokreta iskazuje se kroz činjenicu da je bez oslonca u nauci oblikovano mišljenje budućih generacija evropskog javnog mnjenja o dugoročnim opasnostima po životnu sredinu i zdravlje ljudi. U ovom radu poseban akcenat stavljen je na analizu bezbednosti transporta nuklearnog otpada kao odličnoj studiji koja se oslanja na prošireni sektorski pristup za sveobuhvatno sagledavanje i upravljanje bezbednosnim rizicima [5].

II. POLITIČKI SEKTOR BEZBEDNOSTI

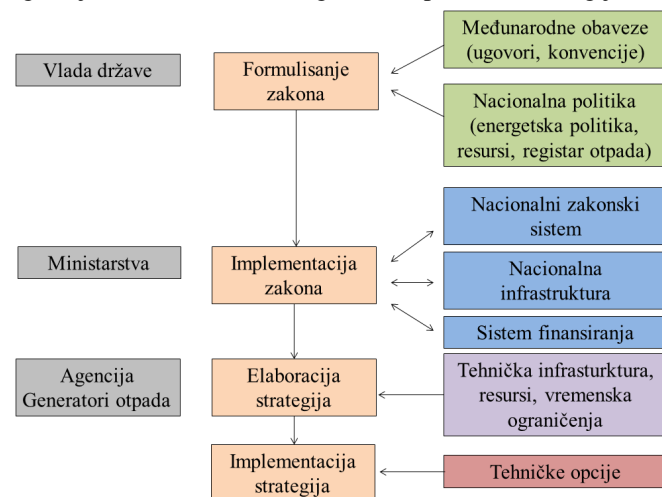
Politički aspekt bezbednosti u sferi upravljanja nuklearnim otpadom istražuje se kroz tri nivoa bezbednosti: nacionalnog nivoa kao osnovnog nivoa bezbednosti iz koje se deriviraju regionalna i međunarodna. S tim u vezi, politike bezbednosti država u ovoj oblasti složene su i sačinjene od čitavog niza politika kojima se doprinosi dostizanju i očuvanju sekuritizovanih vrednosti države, društva i pojedinaca, prevashodno kroz analizu međunarodne, politike EU kao regionalne politike i nacionalne politike.

A. Nacionalna politika

Iako svaka država određuje svoje modele upravljanja nuklearnim otpadom, moguće je identifikovati određene zajedničke karakteristike. Pre svega, zakonodavni organ, najčešće skupština ili parlament, zaduženi su za usvajanje zakona koji se odnose na upravljanje ovog tipa otpada. Ovaj zakon zatim treba da predvidi uspostavljanje regulatornog tela i, u brojnim slučajevima, zasebno telo za upravljanje istrošenim gorivom i radioaktivnim otpadom, kao i bitne elemente nacionalne politike u vezi upravljanja ovim otpadom. Moguće je da se nacionalna politika u ovoj oblasti uredi posebnim vladinim dekretom ili ministarskim

direktivama. Nacionalna politika treba da odredi: odgovornosti unutar zemlje za upravljanje istrošenim gorivom i radioaktivnim otpadom; aranžmane za finansiranje upravljanja otpadom (uključujući odlaganje i dekomisiju); poželjne opcije upravljanja istrošenim gorivom, politike za odlaganje otpada, uvoz i izvoz istrošenog otpada; dekomisija nuklearnih postrojenja; informisanje i učešće javnosti u donošenju odluka.

Za sprovođenje nacionalne politike upravljanja ovim vrstama otpada potrebno je razviti jednu ili više strategija, što je odgovornost nosioca prakse upravljanja otpadom. Na Slici 1 prikazan je primer koji je dala Međunarodna atomska agencija (IAEA) kako se mogu razviti politika i strategija [6].



Slika 1.

Teorijski i praktično posmatrano, uočljiva je korist od koncentrisanja veoma skupih, potencijalno opasnih i tehnički zahtevnih aspekata nuklearnih elektrana uključujući i otpad, u samo nekoliko zemalja [7]. S druge strane, u promenljivim geopolitičkim okolnostima, mnoge države imaju stah od nuklearne energetske zavisnosti, obzirom da bi prijateljska država u jednom momentu mogla da postane ambivalentna, nekooperativna ili neprijateljski raspoložena i uskrati dalje snabdevanje ovom vrstom energije.

B. Regionalna i politika Evropske komisije

Kada je reč o regionalnom pristupu, odnosno opštoj strategiji upravljanja otpadom evropske zajednice, proklamovan je cilj koji podrazumeva pomirenje dva globalna procesa: nastavka ekonomskog rasta i prosperiteta uz istovremeno smanjivanje uticaja otpada svih vrsta na okolinu. U ovoj viziji, sa povećanjem ekonomskog rasta, korišćenje resursa bilo bi efikasnije što bi uticalo na njegovu manju i racionalniju potrošnju i opadanje negativnog uticaja na životnu sredinu. Težnja za politikom objektivnosti i transparentnosti ogleda se kroz intenciju da najveće troškove snose generatori najveće količine nuklearnog otpada.

Direktiva EU o radioaktivnom otpadu i istrošenom nuklearnom gorivu zahteva da:

- Zemlje EU imaju nacionalnu politiku za upravljanje istrošenim gorivom i radioaktivnim otpadom;
- Zemlje EU sprovode nacionalne programe za

upravljanje, uključujući odlaganje, svog istrošenog nuklearnog goriva i radioaktivnog otpada generisanog na njihovoj teritoriji;

- Zemlje EU treba da imaju sveobuhvatan i snažan okvir, kompetentno i nezavisno regulatorno telo, kao i mehanizme finansiranja kako bi se obezbedila adekvatna sredstva;
- Dostupne su javne informacije o radioaktivnom otpadu i istrošenom gorivu i daje se mogućnost za učešće javnosti;
- Zemlje EU podnose Komisiji na svake tri godine (počev od avgusta 2015. godine) nacionalne izveštaje o primeni direktive, na osnovu kojih će Komisija izraditi izveštaj o ukupnoj primeni direktive i inventaru radioaktivnog otpada i istrošenog goriva prisutnog na teritoriji Zajednice i budućim perspektivama;
- Zemlje EU sprovode samoprocene i omogućuju međunarodni uvid svog nacionalnog okvira, nadležnih organa i/ili nacionalnog programa najmanje svakih deset godina;
- Izvoz radioaktivnog otpada za odlaganje u zemljama van EU dozvoljen je samo pod strogim uslovima [8].

C. Međunarodna politika i odgovornost

Na međunarodnom nivou zastupljen je jasan i nedvosmislen stav da je svaka zemlja etički i pravno odgovorna za sopstveni nuklearni otpad. Najveća količina nuklearnog otpada stvara se u nuklearnim reaktorima koji proizvode električnu energiju u 31 državi. Pored toga, ne postoji ni pravna ni moralna obaveza snabdevača uranijuma u pogledu otpada, osim onog koji je uključen u mere zaštite.

S druge strane, Međunarodna atomska agencije (IAEA) istakla je težnju ka multinacionalnom pristupu upravljanju i odlaganju istrošenog nuklearnog istrošenog goriva i radioaktivnog otpada. Svako međunarodno skladište otpada ima implikacije u skladu sa Sporazumom o neširenju nuklearnog oružja (NPT), a pouzdanost i položaj zemlje domaćina od fundamentalnog su značaja za prihvatljivost projekta prema državama potpisnicama NPT- a [6].

IAEA je 2004. godine iznela tri razvojna principa za multinacionalna skladišta nuklearnog otpada:

- postepeno priključenje velikim nacionalnim programima;
- formiranje nadnacionalnih objekata sa međunarodnim menadžmentom i kontrolom i
- zajedničko partnerstvo između država vlasnica skladišta nuklearnog otpada.

Međunarodni ugovori obuhvataju upravljanje nuklearnim otpadom posredstvom dva pristupa. Prvi pristup se odnosi na sav opasan otpad, kroz Bazelsku Konvenciju [9], uključujući ne samo radioaktivne materijale već i komprimovane gasove, zapaljive čvrste, korozivne materijale i eksplozive. Drugi pristup odnosi se na nuklearnu energiju, gorivni ciklus i pitanja otpada, posredstvom Sporazuma o Neširenju nuklearnog naoružanja i drugih relevantnih međunarodnih sporazuma, kao i sporazuma unutar EU kao što su Sporazum

o Euroatomu, Sporazuma Evropske komisije, u zavisnosti od posmatranog problema [10]. U odnosu na upravljanje opasnim otpadom uopšte, u Bazelskoj konvenciji navedeno je da do nelegalnog transporta opasnog otpada dolazi ako se prekogranično kretanje opasnog otpada odvija pod sledećim uslovima: bez obaveštenja u skladu sa odredbama Konvencije svih zainteresovanih država, bez saglasnosti zainteresovanih država, kroz saglasnost dobijenu falsifikovanjem, lažnim predstavljanjem ili prevarom, kada transport materijalno nije usaglašen sa dokumentima, ili prilikom transporta koji rezultira namernim odlaganjem opasnog otpada u suprotnosti Konvencije i opštih principa međunarodnog prava. Uobičajene metode nelegalnog transporta uključuje izradu lažnih izjava ili izveštaja, prikrivanje, skrivanje u pošiljci ispod materijala koji može regularno da se transportuje i pogrešnom označavanju pojedinačnih kontejnera. S obzirom da opasni otpad predstavlja veliku potencijalnu pretnju po ljudsko zdravlje i životnu sredinu, jedan od vodećih principa Bazelske konvencije jeste da opasni otpad treba da se tretira što je više moguće bliže lokaciji gde se generiše.

III. EKONOMSKI SEKTOR BEZBEDNOSTI

Razvoj nuklearne energije ponekad se posmatra kao jedno od glavnih rešenja za energetsom potrebom uz alternativne izvore energije poput hidroenergije i snage vetra. Strukturu troškova nuklearne energije čine:

- Kapitalni troškovi koji uključuju troškove pripreme, izgradnje, proizvodnje, narudžbine i finansiranja nuklearne elektrane.
- Operativni troškovi koji uključuju troškove nuklearnog goriva, rada i održavanja nuklearne elektrane, troškova dekomisije elektrana, tretiranje i odlaganje isluženog goriva i radioaktivnog otpada.
- Eksterni troškovi za koje se obično pretpostavlja da su nula, ali bi potencijano mogli da uključuju troškove sanacije akcidenata koje ne pokriva polisa osiguranja i u praksi je potrebno da ih podmiri Vlada.
- Drugi troškovi kao što porezi specifični za nuklearnu energiju.

U zemljama u kojima se koristi nuklearna energija pokazalo se da postoje četiri glavna krajnja nosioca troškova: buduće generacije, poreski obaveznici koji preuzimaju deo računa, potrošači električne energije (domaćinstva i/ili industrija) i u nekim zemljama oni koji direktno proizvode ili koriste električnu energiju [11].

Prilikom proizvodnje električne energije nastaju najveće količine nuklearnog otpada, ali nemerljivo manje u poređenju kada se koriste fosilna goriva. Iako nuklearni otpad nema veliku zapreminu, svi aspekti njegovog tretiranja iziskuju značajna finansijska ulaganja. Nuklearna energija je jedina složena tehnologija za proizvodnju električne struje koja preuzima punu odgovornost za sav generisan otpad i u potpunosti ga zaračunava u cenu. Troškovi upravljanja i odlaganja otpada nuklearne elektrane obično čini oko 5% ukupnih troškova generisane električne energije. U okviru ovih troškova, najveći udeo čine troškovi njegovog

privremenog i trajnog odlaganja, zatim slede ulaganja u prevenciju i kontrolu izluživanja nuklearnog otpada u životnu sredinu. Dodatni otpad se generiše kad nuklearna postrojenja dođu do kraja svog ekonomskog/sigurnog života i moraju da budu ugašena. Tada cela postrojenja nakon procesa dekomisije postaju radioaktivni otpad.

Angažovanje podizvođača u ograničenom sektoru nuklearne industrije značajno podiže ulazne troškove [12]. S druge strane, istrošeno nuklearno gorivo se može skladištiti u blizini reaktora ili se nakon određenog perioda hlađenja delimično prerađuje stvarajući novi radioaktivni otpad. Proces prerade nuklearnog goriva je veoma skup i delimično efikasan, ali donosi veliki profit ograničenom broju kompanija čija je to delatnost. Pored toga, s obzirom da ima relativno mali broj centara za preradu u svetu, slanje otpada iz zemlje pored toga dovodi do pozitivne reakcije domaćeg javnog mnjenja. Nasuprot tome, velike količine nuklearnog otpada zauvek ostaju u zemljama koje ga prerađuju, kao što su Francuska, Velika Britanija i Rusija. Bez obzira na lokaciju nuklearnih postrojenja i mesta za preradu i odlaganje otpada, finansijski troškovi su značajni.

Upravljanje nuklearnim otpadom karakteriše visok nivo složenosti i interkompatibilnosti značajnih faktora: pitanja transporta, finansiranja prerade otpada i raspolaganje, kao i vođenje administrativnih evidencija [13].

A. Transport i bezbednost nuklearnog otpada

Oko 20 miliona transporta radioaktivnog materijala odvija se širom sveta svake godine javnim putevima, železnicama i brodovima, ali on čini veoma mali udeo u ukupnom transportu svih opasnih materijala. Obzirom na njegovu široku primenu, radioaktivni materijal ne nastaje samo tokom ciklusa nuklearnog goriva, te značajna većina transporta (95%) nije povezana sa nuklearnom energijom. Transport je, međutim, sastavni deo ciklusa nuklearnog goriva, jer većina zemalja koje eksploatiše rudu urana ne proizvodi nuklearnu energiju [14].

Nuklearni otpad se retko skladišti ili prerađuje na lokaciji gde je proizveden. Ovo nameće posebne bezbednosne rizike vezane za transport takvih materijala. Veća je verovatnoća dešavanja terorističkog napada (za stvaranje lokalne kontaminacije) ili kriminalne pronevere (u svrhu prodaje na nedozvoljenom tržištu ili kao kao predmet ucene) u transportu u poređenju sa statičnim lokacijama u kojima je jednostavnije implementirati sigurnosne i bezbednosne procedure. U svrhu uvećanja bezbednosti transporta i smanjenja verovatnoće ispoljavanja rizika potrebno je primeniti različite mere prevencije poput fizičke bezbednosti prevoznih sredstava, procene bezbednosti rute, bezbednosne procene svih učesnika u transportu i sl. U ovom procesu ključnu ulogu imaju obaveštajne službe država i njihova koordinacija sa inostranim službama radi sprovođenja nadzora, infiltracije i drugih specijalnih mera u borbi protiv terorističkih ili radikalnih antinuklearnih organizacija koje bi, potencijalno, mogle da izazivaju akcidenta poput iskanjanja vagona koji prevozi nuklearni otpad, stvore političku nestabilnost s ciljem izazivanja političkih promena. Nasuprot tome, skladištenje

otpada na statičnim lokacijama i kontrola pristupa je relativno rutinski postupak zahvaljujući postojanju i poštovanju procedura. Ipak, zajedničko iskustvo sugerise da, čak i u takvim okolnostima, selektivna pažnja i nemarnost može povećati bezbednosni rizik. Ovo rezultira da se bezbednost u fazi transporta nuklearnim otpadom može održati na visokom nivou, dok se bezbednost u statičnoj lokaciji može smanjiti do te mere da se mogu pojaviti samo krađe.

S druge strane, većina proizvedenog nuklearnog otpada nalazi se u čvrstom i stabilnom keramičkom ili vitrifikovanom (staklenom) obliku, te disperzija radionuklida izazvana terorističkim aktom i opasnost od tzv. prljave bombe nije velika. Istrošeno nuklearno gorivo pruža atraktivnu metu za nuklearne teroriste. Testiranjem probalističkih scenarija razornih eksplozivnih sredstava na kontejnere sa isluženim gorivom koji se transportuju u urbanoj oblasti ustanovljeno je da broj žrtava nije veliki, ali da postoji rizik od intezivne kontaminacije [15]. Nasuprot tome, Međunarodna atomska agencija (IAEA) identifikovala je medicinske i industrijske radioaktivne izvore kao izvor potencijalnih terorističkih pretnji zbog njihove upotrebe u prljavim bombama [14].

Impelementacija kompleksnih sigurnosnih i bezbednosnih aktivnosti tokom transporta zahtevaju velika finansijska ulaganja. Ograničeno tržište proizvodnje uranijuma, restrukturiranje nuklearne industrije širom sveta i smanjenje ekonomske marže posle deregulacije i liberalizacije tržišta električne energije izvršile su dodatni snažan pritisak na industriju nuklearnog transporta [16].

B. Vođenje evidencije

Jedna od najznačajnijih mera zaštite od zračenja jeste vođenje evidencije radioaktivnih materijala, koje prate monitoring, nadzor i inspekcija. U nekim zemljama vođenje evidencija može biti komplikovano usled težnje da se ne evidentira neki visoko radioaktivni otpad kako ne bi postao meta eventualnog terorističkog akta. Do praznina i nedoslednosti u nacionalnom planiranju skladištenja i odlaganja otpada može dovesti nepostojanje evidencije o materijalima kao što su plutonijum, osiromašeni uranijum i istrošeno gorivo za koje ne postoje definitivni planovi za preradu [17].

IV. DRUŠTVENI SEKTOR BEZBEDNOSTI

Društveni aspekti poput prihvatanja ili otpora društva prema korišćenju nuklearne energije, permanentno obrazovanje građana i ulaganje u nauku u ovoj oblasti, tačno medijsko izveštavanje i percepcija rizika građana su posebno važni u procesu odlaganja nuklearnog otpada [18], te je neophodno obezbediti dostupnost informacija od javnog značaja. Edukacija stanovništva i promocija znanja iz nuklearne energije trebalo bi da ukaže na značaj upotrebe ovog vida energije u smanjenju emisije gasova staklene bašte, ali i emisiju drugih zagađivača kao što su sumpor dioksid, azot oksid, male čestice i isparljiva organska jedinjenja. Takođe, na taj način bi se doprinelo ograničenju zavisnosti od fosilnih goriva što bi dalje uticalo na smanjenje zabrinutosti u

vezi sigurnosti snabdevanja energentima i pružilo bi zaštitu od eskalacije cena fosilnih goriva. Postoje najmanje dva univerzalna očekivanja od nuklearnih reaktora najnovije generacije. Prvi zahtev je garancija da neće biti značajnog oslobađanja radioaktivnosti u životnu sredinu pod bilo kojim uslovima. Drugo očekivanje se odnosi na količinu radioaktivnog otpada kroz težnju da se generiše što manje ovog otpada je moguće.

Prema Turkenburgu upravljanje i odlaganje nuklearnog otpada predstavlja najveću tačku sporenja između nuklearnih pristalica i protivnika. Pored radiotoksičnosti, izražava se i otpor usled gubitka vrednosti nekretnina u blizini odlagališta. Debate o prednostima i manama korišćenja nuklearne energije pokazuju da je otpor javnosti povezan sa sledećim problemima: javno prihvatanje ciklusa nuklearnog goriva; bezbednosni rizici nuklearnih elektrana i drugih komponenti ciklusa nuklearnog goriva; životni vek i upravljanje nuklearnim otpadom, naročito visoko aktivnog otpada; širenje fisionih materijala i nuklearnog naoružanja; akumulacija radionuklida u biosferi do neprihvatljivo visokog nivoa; nedostatak nuklearnih resursa; troškovi nuklearne energije; razvoj nuklearne industrije; uticaj na razvoj nenuklearne opcije [19].

Kao i u svim osetljivim sferama bezbednosti, i u upravljanju otpadom javlja se suprotstavljena potreba da javnost bude uključena u sve aktivnosti, kao i da informacije ostanu poverljive. S jedne strane, javnost, posebno stručna, ima kritičnu ulogu u obezbeđivanju nadzora nad nuklearnim elektranama. Nasuprot tome, ograničavaju se informacije o bezbednosti u nuklearnim elektranama iz straha od identifikovanja velikih slabosti, koje bi mogle da pomognu teroristima i drugim zlonamernim akterima. Takva tajnovitost stvara kulturu nekažnjivosti koja može da obezbedi sivu zonu u kojoj menadžerske greške i tehnički propusti mogu da se prikriju, kao i da dođe do povećanja broja drugih zlonamernih aktivnosti zaposlenih. Svaka procena rizika u ovoj sferi je kompleksna, delimično zbog preplitanja političkih, ekonomskih, društvenih, ekoloških i tehnoloških aspekata, a delom i zbog definisanja male verovatnoće zlonamernih i drugih nepovoljnih događaja.

V. EKOLOŠKI SEKTOR BEZBEDNOSTI

U kontekstu uticaja nuklearnog otpada na životnu sredinu, razlikuje se indirektan i direktan uticaj. Indirektan uticaj odnosi se na benefite smanjenja upotrebe drugih vidova energenata u proizvodnji energije, a koji imaju negativan uticaj na životnu sredinu. Direktan uticaj podrazumeva analizu pitanja skladištenja, reciklaže i odlaganje nuklearnog otpada, kao i procene uticaja akcidenata u vezi sa nuklearnim otpadom po životnu sredinu.

Preporuka je da bi nuklearni otpad trebalo skladištiti u dubokim geološkim formacijama, na osnovu toga da bi rizici tokom vremena postali niži od rizika skladištenja na površini [20]. Velika poteškoća se javlja u pogledu predviđanja mogućeg izlučivanja ili ventilacije i njihove implikacije u periodu od više hiljada godina. Rešavanje problema

nuklearnog otpada skladištenjem pod zemljom može uticati na psihološku relaksiranost kod ljudi, jer skladištenje na površini iako lakše za upravljanje, omogućava potencionalno zlonamerno ekološko ili drugo delovanje. Površinsko skladištenje kondicioniranog, upakovanog otpada u savremenim objektima na period od nekoliko decenija je izvodljivo i bezbedno. Izvan ovog vremenskog perioda biće neophodno da se skladište opsežno renovira ili zameni, dok se otpad morati prepakovati. S druge strane, površinsko skladištenje u dužim periodima od navedenog, zahteva dodatne ljudske angažmane i infrastrukturna ulaganja. U tako dugom vremenskom periodu može doći do hazarda nezvanih za ovaj tip otpada ili čak klimatskih promena (naročito podizanja nivoa mora), što bi zahtevalo da se otpad premesti u novo skladište na drugoj lokaciji, podrazumevajući nove rizike po zaposlene. Pored toga, tokom dugih vremenskih perioda temelji i ojačanje u skladištima mogli bi da oslabe, čineći ih podložnim posledicama zemljotresa.

U zemljama članicama EU varira aktuelna praksa upravljanja isluženim nuklearnim gorivom. Najjednostavnija opcija, koja takođe minimizira zapreminu takvog otpada, jeste da država ovaj otpad zadrži na mestu nastanka, u bazenima ili u velikim kontejnerima, umesto da ga prerađuje. Posle produženog vremena hlađenja od najmanje 20 godina isluženo gorivo je spremno da se direktno odlaže u konačno odlagalište u dubokim geološkim formacijama, ako je u tom trenutku na raspolaganju takav objekat. U poređenju sa prerađivanjem nuklearnog goriva, neophodni tehnički koraci su manje složeni, dovode do manjih zapremina otpada i mnogo manjeg broja različitih oblika otpada koje treba uskladištiti i konačno odložiti.

Praksa prerađivanja nuklearnog goriva takođe varira među evropskim zemljama. Glavne karakteristike inovativnog gorivnog ciklusa su dodatne tehnologije upravljanja otpadom, kao što su segregacija i transformacija. One imaju za cilj smanjenje mase i radioaktivnosti otpada koji ide na konačno odlagalište. Glavni zadatak je da se zatvori ciklus goriva ne samo za plutonijum već i za manje značajne aktinide. U poređenju sa rezultatima konvencionalnog ciklusa goriva, inovativni ciklusi goriva imaju mnogo više prednosti u smislu upotrebe prirodnog uranijuma i smanjenja količine isluženog goriva. Nažalost, procesi reciklaže nuklearnog goriva, dizajnirani da smanje dugoročnu radioaktivnost otpada i/ili potencijalnu dostupnost materijala za proliferaciju, mogu i sami imati nepovoljne ekološke efekte, kao što je emisija radionuklida u biosferu [12].

VI. ZAKLJUČAK

Upravljanje nuklearnim otpadom kompleksno je pitanje čijoj analizi je neophodno pristupiti sa različitih aspekata, pa je sektorski pristup u istraživanju bezbednosti ove pojave jedan od najadekvatnijih. Sektorski pristup omogućava razumevanje i analizu faktora preplitanja političkog, ekonomskog, društvenog, ekološkog i tehnološkog aspekta, obzirom da dolazi do fenomena preliivanja karakteristika ove pojave iz jednog sektora u drugi. Pitanje upravljanja nuklearnim

otpadom jedno je od najznačajnijih pitanja politike jedne države, a regulisano je kao deo nuklearnog industrije i kao deo regulative vezane za opasan otpad. Upravljanje otpadom uključuje prikupljanje, separaciju, skladištenje, transport, obradu, reciklažu i trajno odlaganje nuklearnog otpada.

Trenutna svetska politička situacija po pitanju energenata aktuelizovala je pitanje nuklearnih elektrana, obzirom da države pretenduju da smanje zavisnost od energenata koji potiču sa neuralgičnih područja. Pritom, pored benefita koji se javljaju po životnu sredinu, troškovi upravljanja i odlaganja otpada nuklearne elektrane obično čini oko 5% ukupnih troškova generisane električne energije, a najveći udeo čine troškovi njegovog privremenog i trajnog odlaganja. Upravljanje nuklearnim otpadom karakteriše zavisnost od pitanja transporta, finansiranja prerade otpada, kao i vođenja administrativnih evidencija. Veća je verovatnoća potencijalnog terorističkog napada i drugih kriminalnih dela u transportu u poređenju sa statičnim lokacijama u kojima je jednostavnije implementirati sigurnosne i bezbednosne procedure. S druge strane, potencijalno najrazorniji radiološki napad, ali sa najmanjom verovatnoćom realizacije, bilo bi sabotiranje nuklearne elektrane ili bazena sa istrošenim gorivom S tim u vezi, regulator smatra neverovatnim scenarije terorističkih napada i sabotaze na bazene isluženog nuklearnog goriva. Može se tvrditi, s obzirom na potencijalnu ozbiljnost i posledice ovog štetnog događaja, kao i mogućnost multipliciranja rizika, da je samo nulta verovatnoća prihvatljiva.

Činjenica da pitanje upravljanja i odlaganja nuklearnog otpada prožima različite sektore utiče da ovo pitanje predstavlja najveći razlog mimoilaženja između nuklearnih pristalica i protivnika. Ovu sferu prati ozbiljna i kontinuirana javna i naučna debata, permanentno preispitivanje postojanja podrške donosioca odluka, industrijsko lobiranje kao i provera, analiza i nalaženje novih tehničkih i organizacionih rešenja za smanjenje mogućih bezbednosnih rizika. U istom periodu, klimatske promene su postale važno kako političko, tako i naučno pitanje. Globalni rizik od klimatskih promena je, na zaprepašćenje anti-nuklearnih kampanja i oduševljenje nuklearne industrije, delovao afirmativno na pitanje upotrebe nuklearne energije, pa je realno da u budućnosti još veća pažnja bude posvećena pitanjima upravljanja nuklearnim otpadom. S tim u vezi, u budućnosti će zasigurno biti posvećena veća pažnja analizi potencijala skladištenja nuklearnog otpada u dubokim geološkim formacijama, ka modelu koji doprinosi umanjenju bezbednosnih rizika.

S obzirom da određeni produkti nuklearnog gorivnog ciklusa mogu biti iskorišćeni kao naoružanje, pokreću se politička pitanja o proliferaciji od strane međunarodne zajednice. Takođe, posebnu pažnju potrebno je posvetiti organizacionim merama unutar procesa upravljanja nuklearnim otpadom, kako bi se sprečila kultura nekažnjavanja uslovno rečeno blažih kriminalnih dela koja bi mogla da stvore klimu za izvršenje težih i društveno opasnijih dela. Iz tog razloga, ali i radi disperzije stručnih znanja, javnost treba da bude adekvatno informisana o čitavom procesu upravljanja nuklearnim otpadom, bez narušavanja

radnih procesa i ugrožavanja bezbednosnih procedura.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (broj ugovora 451-03-68/2022-14/200017).

LITERATURA

- [1] *Radioactive Waste Management, Status and Trends - Issue #4*, International Atomic Energy Agency, Vienna 2005
- [2] B. Buzan, O. Waever & J. D.Wilde, *Security: A New Framework for Analysis*, Boulder, Lynne Rienner Publishers, 1998
- [3] T. Vander Beken, N. Dorn, & S. Van Daele, (2010). "Security risks in nuclear waste management: Exceptionalism, opaqueness and vulnerability". *Journal of Environmental Management*, Vol. 91, No. 4, pp. 940-948. 2010.
- [4] B. Ulhoa, B. Aleixo, R. Mourão & V. Ferreira, "Radioactive waste disposal and public acceptance aspects", 2011 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011, Belo Horizonte, MG, Brazil, October 24-28, 2011.
- [5] M. Essera, A. Borremansb, A. Dubgornb, Anton Shabanb, "Nuclear Waste Transportation: Quality Assurance and Control", *Transportation Research Procedia* Vol. 54, pp. 871-882. 2021.
- [6] *Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management*, International Atomic Energy Agency, Series No. NW-T-1.14 (Rev. 1), Vienna. 2022.
- [7] *Nuclear Fuel Cycle Objectives*, International Atomic Energy Agency Series No. NF-0. Vienna. 2013.
- [8] Report from the Commission to the Council and the European parliament on progress of implementation of Council Directive 2011/70/EURATOM and an inventory of radioactive waste and spent fuel present in the Community's territory and the future prospects, European Commission. Brussels. 2019.
- [9] A code of practice on the international trans boundary movement of radioactive waste. Bulletin 4. International Atomic Energy Agency. Vienna. 1990.
- [10] *International law and nuclear energy: Overview of the legal framework*. International Atomic Energy Agency, Bulletin 3, Vienna. 1995.
- [11] *Cost Considerations and Financing Mechanisms for the Disposal of Low and Intermediate Level Radioactive Waste*, International Atomic Energy Agency TECDOC-1552. Vienna. 2007.
- [12] A. Kakodkar. "Perspective of a developing country with expanding nuclear power programme." International Conference Innovative Technologies for Nuclear Fuel Cycles and Nuclear Power. pp. 21-28 Vienna, 23-26 June 2003.
- [13] M. J Ojovan, W.E. Lee. "Principles of Nuclear Waste Management" in *An Introduction to Nuclear Waste Immobilization*. Elsevier. 2005, pp. 71-79.
- [14] *Managing the Interface between Safety and Security for Normal Commercial Shipments of Radioactive Material*. Technical reports series No. 1001. International Atomic Energy Agency, Vienna. 2021.
- [15] A.J. González. "Security of radioactive sources: threats and answers". Proceedings of an international conference Security of Radioactive Sources. pp. 33-58. International Atomic Energy Agency. Vienna. 10-13 March 2003.
- [16] *Security in the Transport of Radioactive Material*. International Atomic Energy Agency Nuclear Security Series. No. 9. Vienna, 2008.
- [17] K. Dungan, R.W.H. Gregg K. Morris F.R. Liven G. Butle "Assessment of the disposability of radioactive waste inventories for a range of nuclear fuel cycles: Inventory and evolution over time", *Energy*. Vol 221, 2021.
- [18] P., Voganov, M.-S. Yim. "Societal risk communication and nuclear waste disposal". *International Journal of Risk Assessment and Management*. Vol. 1, No. 1/2, pp. 20-41. 2000.
- [19] W. Turkenburg, "Nuclear energy and sustainable development". In: *Innovative Technologies for Nuclear Fuel Cycles and Nuclear Power*. IAEA, Vienna, pp. 45-56. 2004.
- [20] Geological disposal of radioactive waste: technological implications for retrievability, International Atomic Energy Agency SERIES No. NW-T-1.19, Vienna. 2009.

