

KULTURA NUKLEARNE BEZBEDNOSTI, RIZICI U ZAŠTITI OD ZRAČENJA I ULOGA UNIVERZITETA

Vesna Spasić Jokić

Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

svesna@uns.ac.rs

Kratak sadržaj: Zaštita od zračenja podrazumeva minimiziranje izloženosti štetnom dejstvu jonizujućih zračenja korišćenjem tri osnovna principa: vreme-distanca-fizička zaštita uz osnovni tzv. ALARA koncept održavanja što je moguće niže doze. IAEA prepoznaje nove trendove u zaštiti od zračenja pre svega u koncepciji zaštite fuzionih reaktora i malih modularnih reaktora, kao i u primeni veštačke inteligencije, a pre svega u upravljanju nuklearnim znanjem. Kultura nuklearne sigurnosti i bezbednosti su neformalno definisani kao netehnički termin koji predstavlja skup karakteristika i stavova u organizacijama i kod pojedinaca koji pitanje zaštite i bezbednosti smatraju za prioritet.

Cljučne reči: zaštita od zračenja, nuklearna sigurnost, veštačka inteligencija, upravljanje nuklearnim znanjem

NUCLEAR SAFETY CULTURE AND RISKS IN RADIATION PROTECTION AND THE ROLE OF THE UNIVERSITY

Abstract: Radiation protection implies minimizing exposure to the harmful effects of ionizing radiation using three basic principles: time-distance-physical protection with the basic so-called ALARA concept of keeping doses as low as possible. The IAEA recognizes new trends in radiation protection, primarily in the concept of protection of fusion reactors and small modular reactors, as well as in the application of artificial intelligence, and above all in the management of nuclear knowledge. The culture of nuclear safety and security is informally defined as a non-technical term that represents a set of characteristics and attitudes in organizations and individuals who consider the issue of safety and security as priority.

Key Words: radiation protection, nuclear safety, artificial intelligence, nuclear knowledge management

1. UVOD

Zaštita od zračenja podrazumeva minimiziranje izloženosti štetnom dejstvu jonizujućih zračenja korišćenjem tri osnovna principa: vreme, rastojanje i fizička zaštita. Osnovni princip u zaštiti od zračenja je tzv. ALARA koncept održavanja što je moguće niže doze. [1]

Prema zaključku Generalne konferencije Međunarodne agencije za atomsku energiju (International Atomic Energy Agency, IAEA) iz 2008. godine „Svaka zemlja ima pravo da uvede nuklearnu energiju, ali ima i odgovornost da to uradi kako treba”, poštujući radijacionu bezbednost i nuklearnu sigurnost i uz jasnu ulogu države. IAEA je prepoznala osnovne izazove nuklearne energije koji se prevashodno odnose na radijacionu sigurnost kao i na finansijske efekte i regulativu. U izazove primene nuklearne energije spadaju: siguran rad postojećih elektrana; odlaganje visokoaktivnog otpada; konsenzus o efektima malih doza zračenja (Petkau efekat); definisanje potencijala nuklearne energije u održivom razvoju; ekonomska konkurentnost nuklearne energije vs. fosilne alternative; razvoj malih i srednjih reaktora pogodnih za zemlje sa manjim električnim mrežama i očuvanje intelektualne svojine. Prepoznati su i novi trendovi u zaštiti od zračenja pre svega u koncepciji zaštite fuzionih reaktora i malih modularnih reaktora, kao i u primeni veštačke inteligencije u zaštiti od zračenja, a pre svega u upravljanju nuklearnim znanjem.

Novi pristup u razvijanju kulture zaštite stavlja akcenat na integrisani pristup bezbednosti uspostavljanjem bezbednosnih standarda, uz procenu povratnih informacija i umrežavanje, primenu veštačke inteligencije, podsticanje razmene informacija izmedju svih zainteresovanih entiteta naučno istraživačkih organizacije, industrije, regulatorskih tela i univerziteta, edukacije generalno [1]

2. KULTURA BEZBEDNOSTI I RIZICI

Stavovi javnosti su važni u oblikovanju nuklearne politike u zemlji. U zemljama gde nuklearna energija već čini deo energetske miksa, javnost pokazuje veću podršku nuklearnim programima. Primećena je veća zabrinutost zbog skladištenja nuklearnog otpada, terorizma i širenja oružja nego zbog bezbednosti rada same nuklearne elektrane ili njenog impakta na klimatske promene.

Na stavove javnosti, u svim zemljama, značajno utiču akcidenti, posebno Černobilj (1986.) i Fukušima (2011.) koji su svrstani u VII kategoriju INES-a. Izgradnja poverenja je moguća uključivanjem svih zainteresovanih strana od vladinih infrastruktura preko naučnoistraživačkih organizacija i univerziteta do profesionalnih društva, medija i javnosti u celini. [1,2]

Rizik primene nuklearne energije je predvidiv, svaka odluka ima finansijske, ekološke i sociološke elemente rizika u cilju postizanja dugoročne bezbednosti. [3,4]

Bezbednost nuklearne elektrane podrazumeva samo one sisteme koji su projektovani i instalirani za obavljanje bezbednosnih funkcija, čija primena počinje nakon početka neželjenog događaja, a njihova svrha je održavanje i obnavljanje bezbednosti i ublažavanje posledica neželjenih procesa. Tri glavne bezbednosne funkcije koje čine moderatorske šipke, sistem za hlađenje i zaštitna zgrada moraju da garantuju bezbednost postrojenja i okoline. Važan element bezbednosnog protokola je *Odbrana po dubini*, koja je podeljena na 5 nivoa sa osnovnim ciljem sprečavanja nepravilnog rada, otkrivanjem kvarova i aktivacijom i kontrolom neželjenog događaja i njegovih posledica. Nuklearni rizik znači potpunu zaštitu životne sredine. Nijedan radioaktivni materijal ne sme biti ispušten u okolinu reaktora, a koji bi mogao da ugrozi životnu sredinu ili živote ljudi u blizini. Godišnja učestalost rizika od velikog poremećaja radnog stanja, koje bi moglo dovesti do kontaminacije životne sredine ili katastrofe ne sme preći 10^{-7} /godisnje. [3,4]

Kultura bezbednosti se često javlja u diskusijama nakon incidenata u nuklearnim elektranama, obično se odnosi na stavove, ponašanja i uslove koji utiču na bezbednosne performanse i predstavlja ozbiljan izazov za donosiocje regulative. Kultura bezbednosti je netehnički termin. IAEA je, neformalno, navodi kao „Skup karakteristika i stavova u organizacijama i pojedinaca koji utvrđuje da najvažniji prioritet bude pitanja zaštite i bezbednosti“, Uveden je u analizi akcidenta u Černobilju (IAEA INSAG-1, 1986. International Nuclear Safety Advisory Group). INSAG-3 je naveo kulturu bezbednosti kao osnovni princip upravljanja, zajedno sa odgovornostima operativne organizacije i obezbeđivanjem regulatorne kontrole i verifikacije aktivnosti vezanih za bezbednost. Izraz “kultura bezbednosti” odnosi se na veoma opštu stvar, ličnu posvećenost i odgovornost svih pojedinaca koji se bave bilo kojom aktivnošću koja ima uticaja na bezbednost nuklearnih elektrana. Međutim, formalna definicija nije razvijena sve do INSAG-4 koji definiše da je “kultura bezbednosti skup karakteristika i stavova u organizacijama i kod pojedinaca koji utvrđuje da je najvažniji prioritet pitanja bezbednosti nuklearnih elektrana”. [1,5,6,7]

Kada je shvaćen značaj kulture bezbednosti, pažnja unutar istraživačke zajednice usmerila se na proučavanje gradivnih blokova, ili atributa, kulture bezbednosti u nastojanju da se sazna kako kultura bezbednosti utiče na ljudske performanse. (Tabela 1) [1,8,9]

Tabela 1 – Poredjenje organizacionih faktora i glavnih atributa „safety culture“

Organizacioni faktori	Atributi kulture bezbednosti
Komunikacija	Komunikacija
Formalizacija	Kultura učenja
Prioritetizacija ciljeva	Rukovodstvo posvećeno bezbednosti
Identifikacija problema	Identifikacija problema
Uloge i odgovornosti	Uloge i odgovornosti
Tehničko znanje	Tehničko znanje

Na kulturu zaštite od zračenja se može uticati na različite načine u cilju podizanja organizacionog i individualnog ponašanja što će rezultovati smanjenjem izlaganja zračenju i broja akcidenata i incidenata. Pre svega tu je rukovodstvo fokusirano na operativnu kulturu zaštite od zračenja i modelovanje, jačanje i obuku bezbednosnog ponašanja, a posebnu ulogu imaju obrazovanje i obuka ljudi uključenih u primene zaštite od zračenja i učenje iz akcidenata i incidenata. [1,7, 8,9,10]

Medjunarodna asocijacija za zaštitu od zračenja (International Radiation Protection Association, IRPA) prepoznaje tri faze razvoja kulture bezbednosti. Faza 1 je “Pasivna usaglašenost” gde su programi obuke o bezbednosti, uslovi rada, procedure i procesi u skladu sa propisima i korišćenom opremom. Faza 2 je “Aktivna usaglašenost” koja insistira na ličnoj odgovornosti za obuku i druge regulatorne odredbe kao i za upravljanje kompetencijama, analizu rizika i procenu bezbednosti. Faza 3 je “Sistem bihevioralne bezbednosti” gde se insistira na podučavanju pojedinaca da skeniraju opasnosti, da se fokusiraju na potencijalne povrede i bezbedno ponašanje uz ličnu odgovornost i odgovornost rukovodstva. [9]

3. VEŠTAČKA INTELIGENCIJA U ZAŠTITI OD ZRAČENJA

Algoritmi mašinskog učenja i alati virtuelne stvarnosti mogu se iskoristiti za rešavanje specifičnih izazova u zaštiti od zračenja, kao što su: (i) simulacije i planiranje posla na bazi proračunate doze radnika, (ii) optimizacija doza tokom projektovanja nuklearnih objekata u skladu sa regulativom, (iii) algoritmi i softveri koji emuliraju ljudsku kogniciju u analizi, tumačenju i razumevanju radnih procesa, uključujući izloženost zračenju i (iv) prikupljanje i analiza radioloških podataka na različitim mašinama u cilju uspostavljanja programa zaštite od zračenja koji su brži, efikasniji i fleksibilniji od dosadašnjih. Trenutno je u IAEA u toku određivanje obima postojećih aplikacija veštačke inteligencije i njihova integracija u bezbednosne standarde. Potencijalni rizik za primenu AI su etički aspekti. Upotreba veštačke inteligencije u sistemima nuklearne bezbednosti može uvesti potencijalne ranjivosti koje ljudski operater ili sam sistem veštačke inteligencije neće odmah prepoznati. [11, 12]

Očekuje se da će primena veštačke inteligencije povećati efikasnost procesa zaštitnih mera, posebno onih koji

uključuju klasifikaciju podataka, pronalaženje obrazaca i identifikovanje odstupanja u podacima. Relevantna je primena u detekciji zračenja, sajber i fizičkoj zaštiti, verifikaciji istrošenog goriva, povezivanju AI i robotike i povećanja produktivnosti. Detekcija zračenja, analiza i podrška odlučivanju (gamaspektrometrija) koristi metode mašinskog učenja (ML) u analizi spektra gama zračenja, dobijenih iz Monte Karlo modela, za tzv. nuklearnu forenziku, otkrivanje i identifikaciju anomalnih izvora nuklearnih materijala ili za kvantifikaciju količine fisione mase. Tehnike veštačke inteligencije pružaju različite načine učenja iz podataka i operacija, uključujući identifikovanje obrazaca i anomalija u velikim količinama informacija vezanih za senzore i kontrolu nuklearnih procesa čime utiču na računarsku bezbednost nuklearne elektrane, otkrivajući i reagujući na trenutne napade i buduće nepoznate napade. Verifikacija istrošenog goriva iz podataka gama, neutronske i Čerenkovljeve zračenja korišćenjem numeričkih simulacija i algoritama AI i ML može dati podatke o zalihama istrošenog nuklearnog goriva kako bi se proverilo sagorevanje, vreme hlađenja i početno obogaćenje. Povećanje efikasnosti je moguće kombinovanjem tehnika veštačke inteligencije sa robotskom tehnologijom za zadatke, kao što su prikupljanje podataka ili kalibracija. Korišćenjem robotike za pomoć u zadacima zaštitnih mera, efikasnost operacija može se povećati, posebno u teškim oblastima, gde je teško prikupiti podatke zbog bezbednosti inspektora. Veštačka inteligencija se može koristiti sa robotikom za identifikaciju objekata i anomalija, obezbeđivanje robota autonomnom fuzijom senzora i poboljšanje interfejsa čovek/mašina [11, 12]

Potencijalni rizik primene AI postoji. Tačnost predviđanja zasnovanih na mašinskom učenju je, zasada, nedovoljna da bi se omogućile autonomne odluke i stoga je potreban kontinuirani ljudski doprinos da lažno negativni rezultati ne bi propustili važne događaje sa značajnim posledicama po zaštitne mere. [11, 12]

4. UPRAVLJANJE NUKLEARNIM ZNANJEM U ZAŠTITI OD ZRAČENJA

Upravljanje nuklearnim znanjem postalo je sve važniji element upravljanja nuklearnim sektorom poslednjih godina. Zemlje sa postojećim nuklearnim programima moraju da obezbede kapacitete i ljudske resurse neophodne za održavanje bezbednog rada postojećih instalacija, uključujući njihovu dekomisiju i programe za istrošeno gorivo i smeštaj radioaktivnog otpada. Ključni izazovi su zamena osoblja koje odlazi u penziju i privlačenje mlade generacije. Izgradnja kapaciteta kroz obrazovanje, obuku i prenos znanja je neophodna. Prepoznajući važnost upravljanja nuklearnim znanjem, IAEA razvija metodologije i smernice za planiranje, projektovanje i sprovođenje programa upravljanja nuklearnim znanjem i olakšava nuklearno obrazovanje, pružajući podršku, mogućnosti umrežavanja i razmenu iskustava. [13]

Kao rezultat strateškog plana za očuvanje znanja tokom 2005. godine je lansirana projekat RER/0/030 IAEA Knowledge Management for Nuclear Engineering Courses i potprogram *Implementation of Knowledge Management Curricula in Universities* [14,15,16]

Izgradnja, prikupljanje, prenos, deljenje, očuvanje, održavanje i korišćenje znanja je neophodno za razvoj i održavanje neophodne tehničke stručnosti i kompetencija potrebnih za programe nuklearne energije. Specijalizovano znanje iz nuklearnog inženjerstva i nauke je neophodno za bezbedno i efikasno projektovanje, izgradnju, licenciranje, puštanje u rad, održavanje i dekomisiju sistema zasnovanih na nuklearnoj tehnologiji. Bezbedna upotreba nuklearnih postrojenja i tehnologija zavisi od kontinuirane dostupnosti i održavanja odgovarajućeg znanja i stručnosti, uključujući adekvatno razumevanje povezanih bezbednosnih pitanja. Potrebne su odgovarajuće metode upravljanja znanjem i prateća tehnologija kako bi se uspostavilo i upravljalo nuklearnim znanjem, kompetencijama, informacijama i evidencijom, radnim procesima, tumačenjem podataka i tehnikama analize i verifikacije. [14,15,16,17]

IAEA je definisala osnovne specifičnosti nuklearnog znanja koje se odnose na dugoročnu akumulaciju, značajne investicije javnog novca, brigu za bezbednost proizašlu iz međunarodnih obaveza imaoa nuklearnih postrojenja i potrebu za velikom kritičnom masom osnovnih nuklearnih znanja. [14, 16,17]

Posebno je istaknuta uloga univerziteta u upravljanju nuklearnim znanjem. Strategija uključivanja univerziteta bazira se na njihovoj misiji, strukturi i otvorenosti ka nacionalnom i međunarodnom povezivanju. Univerzitet ima jasnu misiju budući da predstavlja društveni akademski servis zadužen za kreiranje i diseminaciju znanja. Po svojoj strukturi univerzitet ima interdisciplinarni pristup. Otvorenost ka stranim univerzitetima se ogleda u razmeni nastavnika, istraživača i studenata, u standardizovanim transparentnim kurikulumima, učešću u međunarodnim projektima i promociji akademske izvrsnosti, integracije i kooperacije. IAEA posebno insistira na uvodjenju upravljanja nuklearnim znanjem kao akademske discipline U tu svrhu je 2023. objavljen dokument koji je sažeo rezultate projekta lansirano 2005. [14, 15]

Tokom 2016. IAEA i ENEN (European Nuclear Education Network) su obnovili sporazum o upravljanju nuklearnim znanjem sa ciljem: promovisanja visokokvalitetnog nuklearnog obrazovanja i akademskih i naučnih istraživanja; promovisanja upravljanja nuklearnim znanjem, razvoja ljudskih resursa i izgradnje kapaciteta putem regionalnog umrežavanja, promovisanja razmene nastavnika i studenata, istraživanja mogućnosti za razvoj i deljenje zajedničkih publikacija i materijala, uključujući sadržaje e-učenja [13, 14]

Svojevremeno je IAEA predlagala model koji nije institucionalizovan, ali je mogao da pomogne posebno u zemljama u razvoju i koji je obuhvatao 4 nivoa nuklearnog znanja: (i) *Osnovni nivo*: Nuklearno znanje kao deo opšteg ljudskog obrazovanja i kulture (Srednja škola ~20 časova); (ii) *Srednji nivo*: Nuklearno znanje kao deo generalnog tehničkog obrazovanja i kulture. (Univerzitet ~30-40 časova); (iii) *Univerzitetski nivo*: Kompetencije formirane na

univerzitetu na Msc i PhD nivou za inženjere koji će raditi u energetske primene nuklearne energije i (iv) *Ekspertski nivo*: Najviši nivo nuklearne kompetencije namenjen sadašnjem i budućem rektorskom osoblju (Univerzitet + eksterni trening)

5. ZAKLJUČAK

Fokus zaštite od zračenja je integracija bezbednosnih zahteva i standarda na radnim mestima koja su izložena jonizujućem zračenju. Očekuje se da će primena veštačke inteligencije povećati efikasnost procesa zaštitnih mera, posebno onih koji uključuju klasifikaciju podataka, pronalaženje obrazaca i identifikovanje odstupanja u podacima.

U vreme značajnog razvoja upotrebe jonizujućeg zračenja, struka zaštite od zračenja suočava se sa izazovom unapređenja kulture zaštite od zračenja širom sveta. Ugradnja zaštite od zračenja na nivou kulture unutar organizacije je daleko najefikasniji način za postizanje rezultata koji obezbeđuju vidljivost značaja zaštite od zračenja, promovisanje svesti o riziku kao i odgovornosti od nivoa regulatora preko rukovodstva do operatera. Opšte pravilo je da uspostavljanje i poboljšanje nivoa kulture uključuju kontinuirane obrazovne procese, pristup multimedijama (e-učenje, primenjene igre, itd.) i efikasnu komunikaciju među svim subjektima uključujući i blagovremeno i korektno obaveštavanje medija dostupnih široj javnosti.

6. LITERATURA

- [1] Matjaž Koželj, Vesna Slapar Borišek, *Safety Culture In Radiation Protection*, , 27th International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portorož, Slovenija , 10-13.09. 2018,
- [2] *Public Attitudes to Nuclear Power*, OECD, NEA No6859, ISBN 978-92-64-99111-8, 2010
- [3] Judith I. M. de Groot and Linda Steg, *Morality and Nuclear Energy: Perceptions of Risks and Benefits Personal Norms, and Willingness to Take Action Related to Nuclear Energy, Risk Analysis*, Vol. 30, No. 9, 2010, 1363-1373
- [4] Eszter Horváth-Kálmán, Bakhtyar Saleh Ahmmad, *Review of Construction Risks in Nuclear Power Plant Environment* , *Journal of Built Environment*, Volume 9. Issue 1, 2024, 40- 52
- [5] Natalia Golnik, Piotr Tulik, *IRPA initiative on radiation protection culture*, *Pol J Med Phys Eng* Volume 17, No 1, 2011, 1-12
- [6] Acuña, S. G.; Giménez a,b, M. O.; Grinberg a,b, M.; Orikepetec, O. F.; Farrd, W, *Understanding and enhancing nuclear safety culture in nuclear power plants through a quantitative system dynamics model*, *BJRS Brazilian Journal of Radiation Science*, Volume 13, No1, 2025, 1-21
- [7] *Safety culture in nuclear installations-Guidance for use in the enhancement of safety culture*, IAEA-TECDOC-1329, 2002
- [8] K. Bachner, *Fundamentals of Nuclear Security Culture*, Brookhaven National Laboratory, BNL-212321, 2019
- [9] *IRPA Guiding Principles for Establishing a Radiation Protection Culture*, International Radiation Protection Associations, 2014
- [10] Geoff Gill, *The development of safety culture in the nuclear industry*, *Loss Prevention Bulletin* , No288, 2022, 1-6
- [11] *United Nations Activities on Artificial Intelligence (AI)*, International Telecommunication Union, ITU Pub. ISBN 978-92-61-39001-3, 2024
- [12] *Artificial Intelligence for Accelerating Nuclear Applications, Science and Technology*, International Atomic Energy Agency, ISBN 978-92-0-131422-2 , 2022
- [13] *Education and Training Appraisal in Radiation Protection, and Safety*, IAEA Services Series 51, IAEA, Vienna, May 2025
- [14] *A Nuclear Knowledge Management Course for University Master's Level Programmes*, IAEA Training Courses Series 82, IAEA, Vienna 2023
- [15] *Performance Indicators to Monitor, Assess and Improve Knowledge Management Programmes in Nuclear Organizations*, IAEA 2080, IAEA, Vienna, 2025
- [16] *Maintaining Knowledge, Training and Infrastructure for Research and Development in Nuclear Safety*, IAEA INSAG-16, IAEA, Vienna, 2003
- [17] *Risk Management of Knowledge Loss in Nuclear Industry Organizations*, IAEA, Vienna, 2006