

OBRAZOVNI EKOSISTEM KAO POKRETAČ RAZVOJA NUKLEARNOG ENERGETSKOG SEKTORA

Ivana Lončarević¹, Boris Dumnić², Miroslav Vesković³

^{1,2,3}Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

¹ivanalon@uns.ac.rs, ²dumnic@uns.ac.rs, ³veskovic@uns.ac.rs

Kratak sadržaj: Razvoj nuklearnog energetskeg sektora direktno zavisi od kvaliteta ljudskih resursa, strukture obrazovanja i kontinuirane izgradnje kompetencija. U radu su analizirani različiti modaliteti obrazovanja: formalno visoko obrazovanje, neformalni oblici obrazovanja, stručno usavršavanje i savremeni digitalni pristupi obrazovanju kao ključni elementi razvoja nuklearne infrastrukture. Analiza je zasnovana na relevantnim dokumentima Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA), Organizacije za ekonomsku saradnju i razvoj (OECD) / Agencije za nuklearnu energiju (NEA), Evropske mreže za nuklearno obrazovanje (ENEN) i drugih renomiranih institucija. Zaključak je da je integrisani i standardizovani sistem obrazovanja neophodan preduslov za bezbedan, održiv i društveno prihvatljiv razvoj nuklearne energetike.

Ključne reči: nuklearna energetika, obrazovanje, ljudski resursi, IAEA

EDUCATIONAL ECOSYSTEM AS A CATALYST FOR THE DEVELOPMENT OF THE NUCLEAR ENERGY SECTOR

Abstract: The advancement of the nuclear energy sector is directly contingent upon the excellence of human resources, the educational framework, and the ongoing enhancement of competencies. The research examined various educational modalities: formal higher education, informal education, professional development, and contemporary digital approaches as essential components of nuclear infrastructure development. The analysis relies on pertinent materials from the International Atomic Energy Agency (IAEA), the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) / Nuclear Energy Agency (NEA), the European Network for Nuclear Education (ENEN), and other esteemed institutions. The conclusion is that a cohesive and unified educational system is essential for the secure, sustainable, and socially acceptable advancement of nuclear energy.

Key Words: nuclear energy, education, human resources, IAEA

1. UVOD

Razvoj nuklearnog energetskeg sektora zahteva pažljivo i dugoročno planiranje ljudskih resursa. Publikacija Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) *Workforce Planning for New Nuclear Power Programmes* [1] naglašava da uspešno pokretanje i održavanje nuklearnog programa zavisi od dostupnosti visoko kvalifikovane, obučene i motivisane radne snage. Dokument se oslanja na tzv. „Milestones“ pristup IAEA [2], koji definiše tri faze razvoja nacionalne nuklearne infrastrukture.

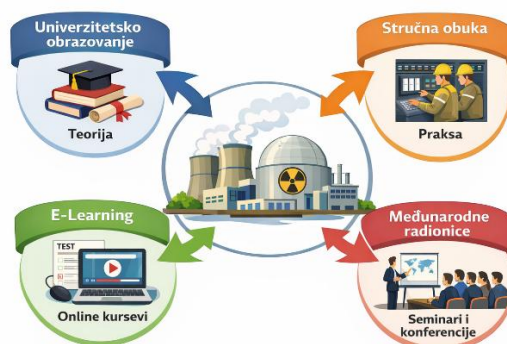


Slika 1. Nuklearna energija: politike i upravljanje [2]

U prvoj fazi, kada država razmatra mogućnost uvođenja nuklearne energije, formira se organizacija za implementaciju programa (NEPIO) i započinje inicijalno obrazovanje kadrova. Druga faza obuhvata pripreme za izgradnju elektrane, jačanje regulatornog tela i razvoj operativne organizacije, uz intenzivnu obuku inženjera i tehničara. Treća faza odnosi se na period kada elektrana počinje sa radom, što zahteva stabilizaciju operativnog osoblja, kontinuirano obrazovanje i održavanje kompetencija tokom celog životnog veka postrojenja.

Publikacija povezuje planiranje radne snage sa devetnaest infrastrukturnih pitanja (Slika 1) koja su ključna za nuklearni sektor, uključujući zakonodavni okvir, ljudske resurse, nuklearnu bezbednost, finansije i komunikaciju sa javnošću. Za svaku od ovih oblasti definišu se potrebni profili kadrova i odgovornosti institucija. U proces su uključeni različiti akteri: obrazovne ustanove, istraživačke institucije, industrija, regulatorna tela i državne organizacije čija koordinacija je od presudnog značaja.

Analiza iskustava zemalja koje su pokretale nuklearne programe [1] pokazuje da je planiranje radne snage strateški alat koji omogućava privlačenje, obuku i zadržavanje stručnjaka, čime se obezbeđuje dugoročna održivost programa. Bez sistematskog pristupa postoji rizik od nedostatka kadrova, što direktno ugrožava bezbednost i uspešnost nuklearnog energetskog sektora. Stoga planiranje kompetentnih ljudskih resursa mora biti integralni deo nacionalne strategije za nuklearnu energiju. Ono zahteva dugoročno razmišljanje, koordinaciju između institucija i kontinuirano ulaganje u obrazovanje i obuku.



Slika 2. Obrazovni ekosistem u sektoru nuklearne energetike

Savremeni pristupi razvoju kadra u ovoj oblasti oslanjaju se na kombinaciju formalnog visokog obrazovanja, neformalnih oblika obrazovanja, stručnog usavršavanja i digitalnih modaliteta obrazovanja (Slika 2). Ovaj rad analizira različite oblike obrazovanja i programa koji doprinose razvoju nuklearnog energetskog sektora, sa posebnim akcentom na ulogu formalnog visokog obrazovanja kao osnovnog stuba kadrovskog razvoja.

2. MODALITETI OBRAZOVANJA KAO OSNOVA RAZVOJA KADRA U NUKLEARNOM ENERGETSKOM SEKTORU

Formalno visoko obrazovanje predstavlja temelj razvoja ljudskih resursa u nuklearnom energetskom sektoru, jer omogućava sistematsko sticanje znanja i veština neophodnih za bezbedno i odgovorno delovanje u ovoj visoko regulisanoj oblasti. Kroz strukturirane studijske programe na osnovnom, master i doktorskom nivou studenti razvijaju duboko teorijsko znanje iz oblasti nuklearne fizike, reaktorske dinamike i termohidraulike, koje čini osnovu za razumevanje složenih fizičkih procesa u nuklearnim sistemima.

Pored teorijske osnove, visoko obrazovanje ima ključnu ulogu u razvoju praktičnih veština kroz numeričke analize, laboratorijske eksperimente i rad u simulacionim softverima. Ove aktivnosti omogućavaju studentima da povežu apstraktne modele sa realnim sistemima, čime se smanjuje jaz između teorije i prakse. Poseban značaj ima i izgradnja bezbednosne kulture, koja se ogleda u razumevanju procedura, profesionalne etike i regulatornih zahteva, što je od presudne važnosti u nuklearnoj industriji.

Nuklearna energetika je po svojoj prirodi interdisciplinarna oblast, te formalno obrazovanje podstiče povezivanje znanja iz inženjerskih struka, fizike, hemije, prava i ekonomije, omogućavajući budućim stručnjacima da sagledaju probleme u širem tehničkom, društvenom i ekonomskom kontekstu. Istovremeno se razvijaju komunikacione veštine i sposobnost timskog rada neophodne za saradnju sa regulatornim telima, međunarodnim organizacijama, industrijom i širom javnošću. Konačno, visoko obrazovanje postavlja temelje za kontinuirano učenje, osposobljavajući kadrove da se neprekidno prilagođavaju novim tehnologijama, sigurnosnim standardima i promenama regulatornih okvira.

Uprkos ovom značaju, sistem formalnog obrazovanja u oblasti nuklearne energetike suočava se sa brojnim izazovima. Među najizraženijima su opadanje broja studenata u nuklearnim studijskim programima, zatvaranje istraživačkih reaktora koji su ključni za praktičnu obuku i istraživanja, kao i fragmentacija obrazovnih i istraživačkih inicijativa na nacionalnom i međunarodnom nivou. Poseban izazov predstavlja potreba za uspostavljanjem ravnoteže između akademskog pristupa zasnovanog na „znaj zašto“ i industrijskih zahteva usmerenih ka „znaj kako“ [3]. U tom

kontekstu, visoko obrazovanje mora da obezbedi ne samo tehničku ekspertizu, već i razvoj kritičkog mišljenja, interdisciplinarnog povezivanja i odgovornog profesionalnog delovanja.

Još jedan od izazova u formalnom visokom obrazovanju jeste potreba za međunarodnom harmonizacijom nastavnih programa. Nuklearna industrija ima izraženu globalnu dimenziju, a mobilnost stručnjaka zahteva uporediv nivo znanja i kompetencija. Inicijative poput European Nuclear Education Network (ENEN) [4] doprinose razvoju zajedničkih master programa, sistema akreditacije i priznavanja kvalifikacija na evropskom i međunarodnom nivou. OECD/NEA ističe da usklađivanje akademskih programa sa potrebama industrije i regulatornih tela značajno doprinosi dugoročnoj održivosti sektora [5].

Neformalni oblici obrazovanja imaju sve značajniju ulogu u razvoju kompetencija u oblasti nuklearne energetike. Neformalno obrazovanje, koje se najčešće realizuje kroz tematske radionice, letnje škole, trening seminare i stručne kurseve, omogućava fleksibilan i brz prenos znanja u skladu sa aktuelnim potrebama industrije, regulatornih tela i istraživačke zajednice.

Stručne radionice predstavljaju posebno efikasan oblik neformalnog obrazovanja, jer su usmerene na konkretne probleme, nove tehnologije ili regulatorne zahteve. One omogućavaju učesnicima da se u relativno kratkom vremenskom periodu upoznaju sa savremenim metodama, softverskim alatima, dobrim praksama i iskustvima iz realnih nuklearnih postrojenja. Za razliku od klasičnih akademskih kurseva, radionice su često interaktivne i zasnovane na studijama slučaja, grupnom radu i diskusiji, čime se podstiče aktivno učenje i razmena znanja među učesnicima. Poseban značaj radionica ogleda se u njihovoj ulozi u jačanju kulture bezbednosti. Kroz simulacije vanrednih situacija, analize incidenata i razmenu iskustava između operatera, inženjera, istraživača i regulatora, radionice doprinose razvoju zajedničkog razumevanja rizika i odgovornosti. Na taj način se neformalno obrazovanje ne svodi samo na prenos tehničkih informacija, već podstiče razvoj profesionalnih stavova, etičkog ponašanja i bezbednosne svesti. Neformalno obrazovanje kroz radionice ima i izraženu interdisciplinarnu dimenziju, jer okuplja stručnjake različitih profila omogućavajući sagledavanje nuklearnih pitanja iz više uglova što direktno doprinosi boljoj saradnji između različitih aktera u nuklearnom sektoru.

Dodatna prednost radionica jeste njihova dostupnost i prilagodljivost različitim ciljnim grupama, uključujući studente, mlade istraživače, zaposlene u industriji i predstavnike regulatornih institucija. Kao takve, radionice predstavljaju važnu kariku u sistemu kontinuiranog učenja i efikasan mehanizam za povezivanje formalnog obrazovanja sa praktičnim zahtevima nuklearne energetike.

Stručno usavršavanje i osposobljavanje za rad u industrijskom okruženju predstavljaju neizostavan segment razvoja kadrova u nuklearnom sektoru. Ovi programi omogućavaju sticanje praktičnih veština i upoznavanje sa realnim radnim procedurama u nuklearnim postrojenjima. IAEA naglašava da integracija teorijskog znanja i industrijske prakse značajno doprinosi bezbednosnoj kulturi i smanjenju operativnih rizika [6]. Međunarodna saradnja predstavlja jedan od ključnih elemenata razvoja obrazovanja u nuklearnoj oblasti. IAEA sprovodi brojne programe kroz *Technical Cooperation Programme*, kao i kroz specijalizovane publikacije iz serija *Nuclear Energy Series* i *TECDOC*.

Savremeni digitalni modaliteti obrazovanja omogućeni razvojem digitalnih tehnologija otvorili su nove mogućnosti za obrazovanje u oblasti nuklearne energetike. Virtuelne laboratorije, simulacije reaktorskih sistema, digitalni blizanci i onlajn kursevi omogućavaju sticanje praktičnih znanja uz znatno manje troškove i bezbednosne rizike. IAEA u publikaciji *E-learning in Nuclear Education and Training* (TECDOC-1792) [7] navodi da digitalni pristupi značajno doprinose dostupnosti obrazovanja i očuvanju nuklearnog znanja, posebno u zemljama koje nemaju razvijenu nuklearnu infrastrukturu.

3. PERSPEKTIVA RAZVOJA OBRAZOVANJA ZA NUKLEARNI ENERGETSKI SEKTOR U REPUBLICI SRBIJI

Razmatranje razvoja nuklearnog energetskog sektora u Republici Srbiji zahteva poseban osvrt na obrazovne kapacitete, institucionalni okvir i strateške dokumente koji oblikuju nacionalnu energetsku i obrazovnu politiku. Iako Srbija trenutno nema aktivne nuklearne elektrane za proizvodnju električne energije, poseduje značajno iskustvo u oblasti nuklearnih tehnologija, istraživačkih reaktora, radiološke zaštite i primene jonizujućeg zračenja u medicini, industriji i nauci.

Ključnu ulogu u razvoju kadrova ima formalno visoko obrazovanje, pre svega kroz univerzitete i istraživačke institute. Državni Univerziteti već obrazuju stručnjake u oblastima nuklearne fizike, energetike, mašinstva, elektrotehnike, koji predstavljaju osnovu potencijalnog nuklearnog energetskog kadra. Istraživački instituti imaju višedecenijsku tradiciju u obrazovanju mladih istraživača i inženjera, kao i u međunarodnoj saradnji u okviru projekata Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA).

Sa strateškog aspekta, dokumenti poput *Strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine* [8] i *Integrisanog nacionalnog energetskog i klimatskog plana Republike Srbije* [9] ukazuju na potrebu dugoročnog razmatranja nuklearne energije kao potencijalnog stabilnog i niskougljeničnog izvora. U tom kontekstu, obrazovni sistem mora biti sposoban i spreman da pravovremeno razvije kadrove čak i pre donošenja konačnih investicionih odluka. Iskustva zemalja koje su kasno započele obrazovanje stručnjaka za nuklearni energetski sektor pokazuju da nedostatak kvalifikovanog kadra predstavlja jedno od glavnih ograničenja za realizaciju takvih projekata [1].

Pored klasičnih studijskih programa, za Srbiju je posebno značajan razvoj specijalizovanih master i doktorskih

studija, kao i programa kontinuirane edukacije u oblasti nuklearne bezbednosti, regulatornih poslova i upravljanja radioaktivnim otpadom. Ove oblasti su neophodne bez obzira na to da li država poseduje nuklearnu elektranu, jer predstavljaju sastavni deo međunarodnih obaveza u oblasti radiološke i nuklearne sigurnosti.

U perspektivi, snažnije uključivanje Srbije u međunarodne obrazovne mreže, poput ENEN (European Nuclear Education Network), može značajno unaprediti kvalitet i međunarodnu prepoznatljivost domaćih studijskih programa. Time bi se omogućila mobilnost studenata i nastavnika, realizacija zajedničkih studijskih programa i priznavanje kvalifikacija, što je od ključnog značaja za razvoj održivog nuklearnog energetskog sektora.

4. ZAKLJUČAK

Obrazovni sistem, kroz jasno definisane ishode učenja, interdisciplinarni pristup i integraciju sa istraživačkom delatnošću, ima ulogu aktivnog kreatora budućih energetskih politika. Iskustva međunarodne prakse pokazuju da države koje su na vreme ulagale u obrazovanje i razvoj ljudskih resursa u nuklearnoj oblasti imaju znatno veću institucionalnu spremnost za donošenje informisanih i odgovorno zasnovanih odluka [10], [11].

Razvoj nuklearnog energetskog sektora nezamisliv je bez sistematskog i dugoročnog ulaganja u obrazovanje i razvoj ljudskih resursa. Različiti modaliteti obrazovanja od formalnog visokog obrazovanja, preko neformalnih oblika i stručnog usavršavanja, uz snažan uticaj digitalnih modaliteta učenja čine integrisani okvir koji omogućava prenos znanja, razvoj kompetencija i očuvanje kulture bezbednosti.

U kontekstu Srbije, obrazovanje predstavlja ključni preduslov za donošenje bilo kakvih strateških odluka u vezi sa nuklearnom energijom. Postojeći akademski i istraživački kapaciteti predstavljaju čvrstu osnovu, ali njihovo dalje jačanje, internacionalizacija i usklađivanje sa evropskim i međunarodnim standardima ostaju prioriteti. Na taj način, obrazovni sistem može postati ne samo podrška energetskom razvoju, već i aktivni činilac u oblikovanju održive, bezbedne i tehnološki napredne energetske budućnosti.

5. LITERATURA

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Workforce Planning for New Nuclear Power Programmes*. IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.10. Vienna: IAEA, 2011.
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*. IAEA Nuclear Energy Series NG-G-3.1 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2020.
- [3] Kuznetsov, V., et al., *Towards strategic agenda for European nuclear education, training, and knowledge management*. Nuclear Engineering and Design, 412, 112278, 2024.
- [4] Internet stranica <https://enen.eu/>
- [5] OECD Nuclear Energy Agency (OECD/NEA), *Measuring Employment Generated by the Nuclear Power Sector*, Paris: OECD Publishing, 2019.
- [6] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Systematic Approach to Training for Nuclear Facility Personnel: Processes, Methodology and Practices*. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-2.8, Vienna, 2021.
- [7] International Atomic Energy Agency (IAEA), *E-learning in nuclear education and training (IAEA-TECDOC-1792)*. Vienna: IAEA, 2016.
- [8] *Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine*. Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije, 2024.
- [9] Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije, *Integrisani nacionalni energetski i klimatski plan Republike Srbije*, 2024.
- [10] OECD Nuclear Energy Agency, *NEA Annual Report 2019*. Paris: OECD/NEA, 2020.
- [11] International Atomic Energy Agency, *Human Resource Development for Nuclear Power Programmes*. Vienna: IAEA, 2019.