

ZNANJE KAO OSNOVA RAZVOJA NUKLEARNE ENERGETIKE U SRBIJI: ULOGA UNIVERZITETA I INSTITUCIONALNOG OKVIRA

Selena Samardžić Cvijanović¹, Đorđe Lazarević²

¹Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

²Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija

¹selena@uns.ac.rs, ²djordje.lazarevic@ieent.org

Kratik sadržaj: Savremeni energetske izazovi, klimatska neutralnost i potreba za stabilnim baznim izvorima električne energije ponovo aktualizuju nuklearnu energiju kao stratešku opciju za države u tranziciji energetskog sistema. Međutim, za zemlje koje grade prvu nuklearnu elektranu, međunarodna iskustva i smernice Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) ukazuju da je razvoj nuklearnog programa pre svega proces izgradnje ljudskih resursa i obrazovne infrastrukture, a tek potom tehnološka realizacija energetskog postrojenja. Rad analizira model razvoja kadrova za nuklearne elektrane kroz istorijski pristup sistemskog planiranja ljudskih resursa i povezuje ga sa savremenim IAEA okvirom razvoja nacionalne nuklearne infrastrukture. Poseban fokus stavljen je na strukturu nuklearne radne snage, vremensku dinamiku formiranja kadrova, ulogu klasičnih inženjerskih profila sa nuklearnim dodatkom znanja, kao i na značaj univerzitetskog sektora kao početne tačke nuklearnog programa. U radu se razmatra i veza između izbora reaktorske tehnologije (Generacija III+ i SMR) i obrazovnih zahteva, kao i model faznog formiranja nastavnog kadra u uslovima kada domaća ekspertiza još ne postoji. Pokazano je da različite faze nuklearnog programa utiču na specijalnost potrebnih kompetencija, ali ne menjaju osnovnu potrebu za dugoročnim razvojem domaće baze znanja. Dugoročna reforma STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) obrazovanja i razvoj industrijsko-istraživačkog ekosistema od suštinske važnosti su za održiv nuklearni program, koji se može razvijati samo kroz plansku izgradnju akademskih, industrijskih i regulatornih kompetencija, u skladu sa međunarodnim standardima i dugoročnom strategijom razvoja znanja.

Ključne reči: Nuklearna energetika, obrazovanje, univerziteti, institucionalni okvir

KNOWLEDGE AS THE BASIS OF NUCLEAR POWER DEVELOPMENT IN SERBIA: THE ROLE OF THE UNIVERSITY AND THE INSTITUTIONAL FRAMEWORK

Abstract: Contemporary energy challenges, climate neutrality and the need for stable baseload electricity sources once again position nuclear energy as a strategic option for countries undergoing the energy transition. However, for countries building the first nuclear power plant, international experience and the International Atomic Energy Agency (IAEA) guidelines indicate that the development of the nuclear program is primarily a process of building human resources and educational infrastructure, and only then the technological realisation of the energy plant. The paper analyses the personnel development model for nuclear power plants through a historical approach to systemic human resources planning and connects it to the contemporary IAEA framework for developing national nuclear infrastructure. A special focus was placed on the structure of the nuclear workforce, the temporal dynamics of personnel formation, the role of traditional engineering profiles augmented by nuclear knowledge, and the importance of the university sector as the starting point of the nuclear program. The paper discusses the relationship between reactor technology selection (Generation III+ and SMR) and educational requirements, and presents a model for the phased development of teaching staff in settings where domestic expertise does not yet exist. It has been shown that the different stages of the nuclear program affect the specificity of required competencies but do not alter the fundamental need for the long-term development of the domestic knowledge base. The long-term reform of STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) education and the development of the industrial-research ecosystem are essential for a sustainable nuclear program, which can be achieved only through the planned development of academic, industrial, and regulatory competencies, in accordance with international standards and a long-term knowledge-development strategy.

Key Words: Nuclear energy, education, universities, institutional framework

1. UVOD

Tehnički aspekt „znanja“ u nuklearnoj energetici obuhvata formiranje specijalizovanih stručnjaka u oblasti nuklearnih tehnologija, čiji je rad direktno povezan sa procesima kao što su fisija, upravljanje reaktorom i nuklearna sigurnost [1]. Istovremeno, većinu potrebnih kadrova čine inženjerski profili klasičnih tehničkih disciplina sa dodatnim nuklearnim kompetencijama, što potvrđuje da je nuklearni program integracija postojećeg tehničkog znanja i specijalizovanih nuklearnih oblasti. Organizacioni aspekt razvoja nuklearnog programa usklađen je sa IAEA modelom faznog razvoja infrastrukture, gde početna faza podrazumeva analizu nacionalnih infrastrukturnih kapaciteta

i koordinaciju institucija pre donošenja političke odluke o uvođenju nuklearne energije [2]. Taj pristup naglašava da obrazovni sistem i ljudski resursi predstavljaju sastavni deo infrastrukture, a ne prateću aktivnost tehničkog projekta.

Srbija se trenutno nalazi u ranoj fazi razmatranja nuklearne opcije, nakon ukidanja dugogodišnjeg moratorijuma, ali sa izraženim izazovima u oblasti ljudskih resursa. Nedostatak stručnjaka sa nuklearnim inženjerskim profilom ukazuje na prekid kontinuiteta u razvoju kadrova i potrebu za sistemskim pristupom obrazovanju i obuci [3]. Dodatni faktor predstavljaju savremene geopolitičke okolnosti i ograničenja u međunarodnoj saradnji, koja povećavaju značaj domaće baze znanja i institucionalne samostalnosti. Implikacije ovakvog stanja su značajne: bez razvijene baze znanja, potencijalni nuklearni program može kasniti više godina u odnosu na tehnički plan realizacije. Nasuprot tome, jačanje uloge univerziteta, uključujući međunarodnu saradnju i razvoj istraživačkih kapaciteta, može doprineti ne samo energetske sigurnosti već i širem tehnološkom i ekonomskom razvoju, kroz stvaranje visokokvalifikovanih radnih mesta i razvoj novih industrijskih sektora.

2. ISTORIJSKI MODEL RAZVOJA KADROVA KAO SISTEMATSKI PRISTUP

Međunarodne inicijative poput GNEP-a (Globalno partnersvo za nuklearnu energiju) i Generation IV International Forum (GIF) usmerene su ka razvoju naprednih nuklearnih sistema koji kombinuju povećanu sigurnost, dugoročnu održivost i smanjenje radioaktivnog otpada. U savremenom tehnološkom okviru izdvajaju se dva ključna pravca razvoja [4, 5]:

- Generacija III+ velikih lakovodnih reaktora, kao tehnološki dokazana rešenja sa unapređenim sigurnosnim sistemima,
- SMR (Small Modular Reactor) reaktori malih i srednjih snaga, sa izraženim pasivnim sigurnosnim karakteristikama i fleksibilnošću u integraciji u elektroenergetski sistem.

Prema IAEA preporukama, država koja uvodi prvu nuklearnu elektranu treba da se opredeli za tehnologiju koja je već implementirana u praksi, što u aktuelnom trenutku daje prednost reaktorima generacije III+, dok SMR tehnologije predstavljaju perspektivno rešenje u narednim decenijama. Međutim, izbor tehnologije ne predstavlja početnu fazu nuklearnog programa. Analiza istorijskog modela razvoja kadrova pokazuje da se nuklearna energija uvodi prvenstveno kroz formiranje kompetentnog sistema znanja. Pristup profesora Dragoslava Popovića definisan u radu iz 1985. godine, polazi od toga da je nuklearni program dugoročni društveni, obrazovni i industrijski projekat, a ne samo izgradnja energetskog objekta [1]. Stručnjaci se dele na uže nuklearne specijaliste i širu grupu „klasičnih“ inženjerskih profila sa dodatnim nuklearnim znanjima, što je u potpunoj saglasnosti sa savremenim međunarodnim konceptom piramide nuklearne radne snage [6]. Takođe, posebnu težinu ima vremenska dimenzija razvoja kadrova prikazana u Tabeli 1. Ovaj raspored jasno pokazuje da nuklearni program započinje u obrazovnom sistemu, a ne u fazi gradnje. Sa druge strane izbor reaktorske tehnologije ne određuje samo tehničke karakteristike elektrane, već i model raspodele odgovornosti između domaćih i stranih aktera, čime direktno utiče na strukturu potrebnih kadrova. Što je veći obim domaćeg učešća u projektovanju i realizaciji, to je veća potreba za sistemskim inženjerima, analitičkim i projektantskim kompetencijama, dok modeli nabavke po principu „ključ u ruke“ pomeraju fokus ka nadzoru regulativi i kontroli kvaliteta. Na taj način izbor tehnologije postaje istovremeno i izbor obrazovnog modela, jer definiše koje discipline i nivoi ekspertize moraju biti razvijeni unutar nacionalnog sistema.

Tabela 1 – Vremenska dimenzija razvoja [1]

Period pre puštanja NE u pogon	Tip kadra
11-15 godina	Projektanti, istraživači, univerzitetski kadar
8-10 godina	Inženjeri projektovanja, kontrola kvaliteta
6-7 godina	Kadrovi za proizvodnju opreme
5 godina	Rukovodioci pogona specijalisti sistema
3-5 godina	Operatori

Tabela 2 – Obrazovna dimenzija IAEA faznog modela nuklearnog programa

Faza	Karakteristike	Uloga obrazovanja
Faza 1	Razmatranje nuklearne opcije i donošenje nacionalne odluke	Formiranje akademske i stručne baze
Faza 2	Priprema za izgradnju	Razvoj specijalizovanog inženjerskog kadra
Faza 3	Izgradnja i puštanje u pogon	Operativna i regulatorna osposobljenost

3. SAVREMENI INSTITUCIONALNI OKVIR

Dakle, IAEA pristup razvoju nuklearnog programa takođe polazi od stava da je nuklearna elektrana samo završna faza procesa, dok se nuklearni program razvija kroz tri infrastrukturne faze. U ovom radu se IAEA fazni model razvoja nuklearnog programa koristi kao osnova za obrazovnu interpretaciju uloge kadrova u fazama (Tabela 2), u kojima se paralelno sa institucionalnim i tehničkim sazrevanjem države razvija i odgovarajuća struktura kompetencija.

U početnoj fazi ključnu ulogu imaju državni akteri – pre svega ministarstvo nadležno za energetiku, ministarstvo nadležno za visoko obrazovanje i nacionalno telo za implementaciju nuklearnog programa (NEPIO) – čija je odgovornost da prepoznaju potrebu za razvojem nuklearnog obrazovnog sistema, definišu koje kompetencije država mora posedovati, obezbede regulatorni okvir, finansiranje razvoja studijskih programa i omogućće međunarodnu obuku kadrova [7]. U tom smislu država ne preuzima obrazovnu funkciju u užem smislu, već definiše potražnju za

kompetencijama i strateški usmerava njihov razvoj. Implementacija prve faze obrazovnog modela sprovodi se na univerzitetima kroz distribuirani interdisciplinarni pristup, pri čemu tehnički i prirodno-matematički fakulteti uvode odgovarajuće nuklearne module u skladu sa sopstvenim disciplinarnim profilom, čime se formira baza znanja neophodna za evaluaciju nuklearnih tehnologija (Tabela 3).

Tabela 3 – Matrica sistema razvoja nuklearnih kompetencija

Naučno-stručne oblasti (ili) Uže naučne oblasti	Ključna kompetencija	Faza progama gde je kritična	Buduća uloga u NP
Nuklearna tehnika Fizika nuklearnih tehnologija Nuklearna fizika	Fizika i tehnika nuklearnih reaktora (ovladavanje programima za poračune povratnih sprega reaktivnosti i izgaranje goriva)	Evaluacija tehnologija	Eksperti za upravljanje nuklearnom elektranom, operatori
Termotehnika Nuklearna tehnika Fizika nuklearnih tehnologija	Termohidrodinamika, i sprega termohidrodinamike i neutronike (ovladavanje programima za spregnute termohidrodinamičke i neutronske proračune)	Procene sa aspekta nuklearne sigurnosti	Eksperti za nuklearnu sigurnost
Nuklearna tehnika Nuklearna fizika Fizika nuklearnih tehnologija	Odlaganje iskorišćenih gorivnih elemenata (ovladavanje programima za poračune izvora zračenja i jačina doze)	Procene sa aspekta radijacione sigurnosti	Eksperti za radijacionu sigurnost, operatori
Termotehnika, termoelektrika, procesna tehnika	Konstrukcija reaktorskog suda, parogeneratorskog, pumpi, turbine i dr. komponenti	Procena sa aspekta održavanja parogeneratorskog, pumpi, turbine i dr. komponenti	Eksperti za održavanje mašinske opreme, operatori
Energetika, električna merenja	Električni sistemi, električna mreža	Procena integracije u električnu mrežu	Eksperti za održavanje električne opreme, operatori
Hemijske nauke, hemijski procesi	Reaktorski materijali, hemija vode.	Procena dugoročne pouzdanosti rada nuklearne elektrane	Eksperti za kontrolu hemije vode, operatori
Nuklearna fizika Nuklearna tehnika	Zaštita od zračenja (ovladavanje tehnikama merenja aktivnosti radionuklida u vazduhu, vodi i zemlji i drugim uzorcima)	Procena sa aspekta zaštite radnika, stanovništva i životne sredine	Eksperti za zaštitu od zračenja, dozimetristi
Fizičko-hemijske nauke Hemijski procesi	Tretman čvrstog i tečnog radioaktivnog otpada (RAO)	Procena sa aspekta stvaranja RAO	Eksperti za RAO, operatori
Inženjerski menadžment, Inženjersvo zaštite životne sredine i zaštite na radu	Upravljanje, rizikom, projekti, pouzdanost sistema	Strateško planiranje	Eksperti za upravljanje projektom
Pravne nauke Javna uprava (podrška)	Nuklearna regulativa, međunarodni režimi	Formiranje regulatornog okvira	Eksperti za rad u Regulatornom telu

Ovaj proces se dopunjuje međunarodnim obukama, uključujući IAEA fellowship programe, stručne posete istraživačkim reaktorima, univerzitetima sa razvijenim nuklearnim programima i regulatornim institucijama. Paralelno se uspostavlja saradnja sa stranim univerzitetima kroz zajedničke kurseve i gostujuće predavače. Rezultat ove faze jeste formiranje manjeg, ali funkcionalnog akademskog tima. Nakon toga, u sledećoj etapi, obrazovni proces bi se mogao nadograditi kroz uvođenje nove naučne oblasti u okviru obrazovnog naučnog polja tehničko-tehnoloških nauka – nuklearna energetika i formiranje *Nacionalnog trening centra* [8], gde bi se realizovali specijalizovani programi vezani za izabranu tehnologiju, operativne sisteme i sigurnosne procedure. Paralelno je potrebno da regulatorna tela i industrijski sektor razvijaju sopstvene stručne kapacitete u domenu licenciranja, nadzora, kvaliteta i tehničke podrške u cilju formiranja zasebnog studijskog programa. Na taj način se uspostavlja višeslojni nacionalni sistem razvoja kadrova koji prati fazni razvoj nuklearnog programa i omogućava postepeni prelazak od opštih evaluacionih ka usko tehnološko-specifičnim kompetencijama [6]. Predložena matrica razvoja nuklearnih kompetencija zasniva se na distributivnom STEM modelu obrazovanja.

Iako Tabela 3 obuhvata širok spektar inženjerskih i regulatornih disciplina, pojedine oblasti koje čine jezgro nuklearne ekspertize nisu eksplicitno izdvojene kao zasebne celine. Njihovo uvođenje, na fakultetima na kojima trenutno nisu zastupljene, ne zahteva u fazi I formiranje novih studijskih programa, već integraciju kroz izborne module, specijalizovane predmete i interdisciplinarne kurseve unutar postojećih akreditovanih studija, čime se poštuje postojeći institucionalni okvir. Uvođenje specijalizovanih oblasti bi ozbedilo lakši ulazak u Fazu II. Na osnovu evropskih PhD programa u Sloveniji, Italiji, Mađarskoj i Češkoj, jezgro nuklearnih oblasti prikazano je u Tabeli 4.

Paralelno sa kurikularnim razvojem, neophodna je priprema nastavnog kadra kroz međunarodne obuke, gostujuće profesore i rad na istraživačkim projektima [3], čime se formira jezgro domaće akademske ekspertize sposobne da dugoročno održava obrazovni sistem, što je u skladu sa pristupom IAEA izgradnji nacionalne infrastrukture znanja. Praktična nastava može se realizovati kroz rad na istraživačkom reaktoru (npr. obnovljenom istraživačkom reaktoru

RB), koji omoućava eksperimentalno upoznavanje sa neutronske poljem, merenjima i osnovama reaktorske fizike. U uslovima kada takva infrastruktura nije dostupna, praktični deo nastave može se nadomestiti pripremom naprednih simulacionih alata, trenažera [9], digitalnih modela i AI-podržanih obrazovnih alata.

Tabela 4 – Nuklearno-specifične obrazovne oblasti

Nuklearne oblasti	Ključno za dugoročnu održivost programa i međunarodne obaveze
Fizika nuklearnih reaktora (potrebni programi za proračune povratnih sprega reaktivnosti i izgaranja goriva)	Ključno za upravljanje nuklearnim reaktorom.
Termohidrodinamika i spregnuta termohidrodinamika i neutronika (potrebni programi za termohidrodinamičke i spregnute termohidrodinamičke i neutronske-fizičke proračune)	Ključno za nuklearnu sigurnost.
Analiza procesa u akcidentima sa oštećenjem goriva (potrebni programi za proračune efekata interakcije istopljenog goriva sa okruženjem i procene ispuštanja radionuklida u okolinu)	Ključno za minimiziranje posledica u zaprojektiranim akcidentima
Analiza prostiranja oslobođenih radionuklida u akcidentima	Osnova za zaštitu stanovništva u slučaju akcidenta
Zaštita od zračenja (ALARA princip, profesionalna izloženost)	Zaštita radnika, stanovništva i životne sredine
Sigurnosna kultura i menadžment	Razvoj menadžment sistema (IAEA NG-T-6.12)
Nuklearna bezbednost	Osnova za međunarodne obaveze

4. SRBIJA TRENUTNO STANJE–IZAZOVI

Srbija se trenutno nalazi u ranoj fazi razvoja nuklearnog programa prema metodologiji IAEA, koja podrazumeva procenu nacionalne infrastrukture, institucionalnih kapaciteta i spremnosti za donošenje informisane političke odluke. U toj fazi univerziteta i istraživačke institucije imaju značajnu ulogu u identifikaciji postojećih resursa, analizi kadrovskih i tehnoloških praznina i koordinaciji pripremnih aktivnosti.

Na Samitu o nuklearnoj energiji održanom u Briselu u martu 2024. godine istaknuto je interesovanje Srbije za razmatranje opcije zasnovane na SMR, uz naglašenu potrebu za međunarodnom tehničkom i institucionalnom podrškom, kao i potencijalnim finansijskim učešćem u razvoju nuklearnog programa. U aprilu 2024. godine potpisan je memorandum o strateškoj saradnji sa Électricité de France (EDF) [3]. Nakon toga, Narodna skupština Republike Srbije usvojila je izmene i dopune Zakona o energetici, kojima je ukinuta zakonska zabrana izgradnje nuklearnih elektrana, a zakon je stupio na snagu 6. decembra 2024. godine. U narednom periodu od ključnog značaja bi bilo donošenje jasne odluke o dugoročnoj energetske strategiji, koja se u savremenom kontekstu neminovno vezuje za dekarbonizaciju. Mogući razvojni pravci uključuju hibridni model zasnovan na kombinaciji obnovljivih izvora energije i nuklearne energije, kao i scenario izraženijeg oslanjanja na nuklearnu opciju. U oba slučaja, akademski sektor suočava se sa potrebom da prilagodi obrazovne strukture zahtevima energetske tranzicije kroz razvoj specijalizovanih modula, interdisciplinarnih kurseva i naprednih studijskih programa. Iako je poslednjih godina došlo do postepenog profesionalnog okupljanja nuklearnih stručnjaka koji intenzivno učestvuju na međunarodnim stručnim skupovima i stvaraju potrebne kompetencije, konstatuje se nedostatak kadrova za pokretanje nuklearnog programa [3]. Bez konsolidovane domaće baze znanja, dugoročna energetska autonomija ostaje teško zamisliva.

5. ZAKLJUČAK

Analiza aktuelnog stanja pokazuje da se Srbija nalazi u ranoj fazi razmatranja razvoja nuklearnog programa, u kojoj se sagledavaju institucionalni kapaciteti, kadrovski potencijali i strateški pravci budućeg energetske razvoja. U takvom kontekstu, težište aktivnosti nije na izboru konkretnih tehnoloških rešenja, već na proceni i postepenom jačanju obrazovnih, institucionalnih i regulatornih kapaciteta. Univerziteta i istraživačke institucije u tom smislu ne predstavljaju samo obrazovne ustanove, već ključne nosioce infrastrukture znanja, bez koje nijedna energetska tranzicija ka niskougljeničnom sistemu ne može biti dugoročno održiva.

6. LITERATURA

- [1] Dragoslav Popović, *Kadrovi za potrebe uvođenja nuklearnih elektrana*, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet BG, 1985.
- [2] IAEA, *Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power*, IAEA Series No. NG-G-3.1 (Rev. 2), Vienna, 2024.
- [3] Predrag Kuzmanović, Jovana Knežević Radić, *Nuclear energy in Serbia as part of the green energy transition: Overview of potential and opportunities*, Akademski privrednik, 1(1):84-100, 2024.
- [4] Miodrag Milošević, *Nove generacije nuklearnih energetskih sistema: Modularni nuklearni reaktori male snage*, Srpska akademija nauka i umetnosti – Akademski odbor za energetiku, Beograd, 2022. (prezentacija).
- [5] Đorđe Lazarević, *Nove generacije nuklearnih energetskih sistema: Nuklearne elektrane velikih snaga*, Srpska akademija nauka i umetnosti – Akademski odbor za energetiku, Beograd, 2022. (prezentacija).
- [6] OECD/NEA, *Nuclear Education and Training: From Concern to Capability*, Paris, 2012.
- [7] Kent Freeland, *NEPIO and Its Role in Launching and Managing a Nuclear Power Project*, International Centre for Theoretical Physics, IAEA 2374-46, 2012. (presentation).
- [8] Internet stranica: <https://rosatomtech.ru/activity/international-training-center-for-nuclear-power-plant-personnel/>
- [9] Internet stranica: www.iaea.org/topics/nuclear-power-reactors/nuclear-reactor-simulators-for-education-and-training