

RAZVOJ INŽENJERSKIH PROFILA ZA NUKLEARNU ENERGETIKU U REPUBLICI SRBIJI: IZAZOVI I INSTRUMENTI

Miroslav Kljajić¹, Boris Dumnić²

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

¹kljajicm@uns.ac.rs, ²ftndean@uns.ac.rs

Kratak sadržaj: Sektor nuklearne energetike doživljava obnovljeno globalno interesovanje zbog ciljeva dekarbonizacije, zabrinutosti za energetska bezbednost i napretka u tehnologijama reaktora. Međutim, održivi razvoj ovog sektora u velikoj meri zavisi od dostupnosti visokokvalifikovanih stručnjaka. Obrazovni sistemi se suočavaju sa značajnim izazovima u pripremi inženjera koji mogu da zadovolje stalne tehničke, regulatorne i društvene zahteve nuklearne energije. Ovaj rad ispituje glavne obrazovne izazove i akademske instrumente u razvoju modernih inženjerskih profila u nuklearnoj energetici, ističući tranziciju radne snage, razvoj nastavnih programa, interdisciplinarnu zahtevu i usklađenost između akademske zajednice i industrije. Rad takođe prikazuje i potrebne inženjerske profile u fazama planiranja, izgradnje i eksploatacije nuklearnih postrojenja.

U Republici Srbiji javlja se rastuća potreba za kvalifikovanim stručnjacima u oblasti nuklearne energetike, usled nastojanja da se unapredi energetska bezbednost, obezbedi aktivnije učešće u evropskim i globalnim naporima za ublažavanje klimatskih promena, kao i prati razvoj savremenih tehnoloških inovacija. Shodno tome, otvara se prostor za razvoj odgovarajućih inženjerskih profila, ali ovaj proces mora biti pažljivo oblikovan u skladu sa složenim izazovima i savremenim trendovima u ovoj oblasti. Razumevanje ovih faktora od ključnog je značaja za obrazovne institucije, industrijske aktere i kreatore javnih politika, koji imaju za cilj obrazovanje buduće generacije stručnjaka u oblasti nuklearne energije.

Ključne reči: Obrazovanje; Inženjerski profil; Nuklearna energetika

DEVELOPMENT OF ENGINEERING PROFILES FOR NUCLEAR ENERGY IN THE REPUBLIC OF SERBIA: CHALLENGES AND INSTRUMENTS

Abstract: The nuclear energy sector is experiencing renewed global interest driven by decarbonization goals, concerns about energy security, and advances in reactor technologies. However, the sustainable development of this sector largely depends on the availability of highly qualified professionals. Educational systems face significant challenges in preparing engineers capable of meeting the evolving technical, regulatory, and societal demands of nuclear energy. This paper examines the main educational challenges and academic instruments in the development of modern engineering profiles in nuclear energy, highlighting workforce transition, curriculum development, interdisciplinary requirements and alignment between academia and industry. The paper also shows the necessary engineering profiles in the phases of planning, construction and operation of nuclear plants.

In the Republic of Serbia, there is a growing need for qualified professionals in the field of nuclear energy, driven by efforts to enhance energy security, ensure more active participation in European and global climate change mitigation initiatives, and keep pace with contemporary technological innovations. Accordingly, there is an emerging opportunity to develop appropriate engineering profiles; however, this process must be carefully shaped in accordance with the complex challenges and current trends in the field. Understanding these factors is essential for educational institutions, industry stakeholders, and policymakers aiming to educate the next generation of professionals in nuclear energy.

Key Words: Education; Engineering profile; Nuclear energy

1. UVOD

Uz nastavak rada postojećih nuklearnih kapaciteta i realizaciju novih projekata, uključujući male modularne reaktore, očekuje se izražen porast potrebe za visoko kvalifikovanim inženjerskim kadrom. Iako se nuklearni sektor na globalnom nivou suočava sa nizom tehničkih i političkih izazova, jedan od ključnih predstavlja obezbeđivanje adekvatno obučanih stručnjaka u potrebnom vremenskom okviru. Ovo pitanje ima poseban značaj s obzirom na to da nuklearna energetika u velikoj meri počiva na specijalizovanom i visoko kompetentnom kadru, neophodnom za očuvanje bezbednosti, sigurnosti i dugoročne održivosti sistema. Kako bi se odgovorilo na zahteve koji proizilaze iz produženja životnog veka postojećih nuklearnih elektrana, izgradnje novih postrojenja, kao i pojačanih aktivnosti dekomisije, procenjuje se da će do 2035. godine u nuklearnoj industriji Evropske unije biti potrebno između 70.000 i 80.000 novih direktnih radnih mesta, uz dodatnih oko 100.000 indirektnih radnih mesta [1]. Ove procene deluju utemeljeno, čak i kada se uzmu u obzir podaci o zaposlenosti iz izveštaja IAEA (2022), prema kojima su za nuklearne

elektrane sa jednim i dva bloka potrebna 732, odnosno 506 zaposlenih, raspoređenih u 43 specifične kategorije. Pored toga, očekuje se da će sektor nuklearnog istraživanja i razvoja zabeležiti rast ljudskih resursa od približno 30% [2], dok se za medicinske primene nuklearne tehnologije predviđa dodatno povećanje od oko 10% [3].

U cilju prevazilaženja nedostataka specifičnih kompetencija, industrija planira sprovođenje ciljanih obuka. Ipak, od suštinskog značaja je obezbediti snažnu institucionalnu podršku organizacijama koje pružaju akademsko obrazovanje i stručnu obuku u oblasti nuklearne energetike, u okviru specijalizovanih obrazovnih i trening programa usklađenih sa potrebnim znanjima i veštinama. Nalazi projekta EU ENEN2plus [4] dodatno potvrđuju da se dugoročna održivost obrazovanja u oblasti nuklearne energije može postići isključivo kroz intenzivniju saradnju između akademskog sektora, pružalaca stručnih obuka i industrije. Ova saradnja treba da obuhvati razvoj multidisciplinarnih studijskih programa i stručnih obuka koje podstiču razvoj kako stručnih (tehničkih), tako i opštih (mekih) veština.

2. OBRAZOVNI IZAZOVI I AKADEMSKI INSTRUMENTI U RAZVOJA INŽENJERSKIH PROFILA ZA NUKLEARNU ENERGETIKU

Nuklearna energija je složena i znanjem intenzivna oblast koja zahteva visoko specijalizovani inženjerski profil. Za razliku od mnogih drugih inženjerskih sektora, nuklearna energetika kombinuje naprednu fiziku, nauku termičkih procesa, inženjerstvo materijala, proizvodnju i prenos energije, automatsko upravljanje, analizu bezbednosti, usklađenost sa propisima i dr., a sve u okviru visoko kontrolisanog operativnog okruženja. Kako raste globalno interesovanje za napredne reaktore, male modularne reaktore i dekarbonizaciju pokrenutu nuklearnom energijom, raste i potreba za novom generacijom inženjera sa ažuriranim i diverzifikovanim kompetencijama. Razvoj inženjerskih profila u nuklearnoj energiji je pod uticajem demografskih trendova, tehnološke evolucije, promenljivih energetske paradigmi i percepcije javnosti. Ovi faktori stvaraju skup međusobno povezanih obrazovnih izazova razvoja veština kojima se mora posvetiti pažnja kako bi se osigurala dugoročna održivost sektora.

2.1 Transzicije inženjera i stručnjaka

Jedno od najkritičnijih pitanja u nuklearnom inženjerstvu je nedostatak mladih kvalifikovanih nuklearnih inženjera i starosno doba postojećih inženjera i stručnjaka. Mnogi stručnjaci koji su doprineli širenju znanja nuklearne energije u prethodnim decenijama se približavaju penziji. Njihov odlazak dovodi ne samo do brojčanog deficita, već i do gubitka dragocenog znanja i iskustva vezanog za rad postrojenja, kulturu bezbednosti i regulatornu interakciju, što je sve veoma teško preneti samo kroz formalno obrazovanje. Obrazovni sistemi su pod pritiskom da ubrzaju pripremu novih inženjera, a istovremeno stvore mehanizme za prenos znanja, kao što su mentorski programi, prakse u industriji i dokumentovanje operativnog iskustva.

Jedna od mogućnosti da se premosti ovaj izazov je da se iskoristi razvijena globalna mobilnost i standardizacija. Nuklearna industrija je globalno međusobno povezana. Inženjerski profili moraju biti prilagodljivi međunarodnim standardima i prenosivi preko granica. Zajednički programi studija, međunarodne prakse i standardizovani okviri za sertifikaciju podržavaju ovu globalnu mobilnost mladih inženjera.

2.2 Interesovanje za programe u oblastima termo i elektro-energetike

Nedovoljan upis (interesovanje) na programe u oblastima termo i elektro-energetike može se reflektovati i na upis na programe nuklearne energetike. Razlozi za to na prvom mestu mogu biti ograničena svest i potencijalni izazovi pri zapošljavanju. Tome doprinose i drugi faktori, kao što su fluktuirajuća nacionalna energetska politika, smanjena vidljivosti u poređenju sa drugim disciplinama poput softverskog, mašinskog ili inženjerstva obnovljivih izvora energije, dugotrajne zabrinutosti javnosti za bezbednost i uticaj nuklearne tehnologije na životnu sredinu, i dr. Kao rezultat toga, univerziteti se mogu suočiti sa poteškoćama u razvoju i održavanju energetske odeljenja, ulaganju u obrazovnu i laboratorijsku infrastrukturu i održavanju specijalizovane stručnosti zaposlenih.

Poboljšanje upisa zahteva kombinaciju strateškog pozicioniranja, ciljane promocije, usklađivanja sa industrijom i izgradnje poverenja. Ovo je posebno važno u oblastima u razvoju ili specijalizovanim oblastima (kao što su nuklearno inženjerstvo, energetska tranzicija, napredne tehnologije), gde je svest nerazvijena, ali potražnja može biti velika. Mogućnosti promocije su brojne, npr. snažno brendiranje programa, naglašavanje karijernog ishoda, smanjenje percepirane neizvesnosti, partnerstva sa kompanijama i međunarodnim organizacijama / univerzitetima, povezivanje programa sa nacionalnim prioritetima, zatim omogućiti prakse, stipendije, mobilnost, gostujuća predavanja i dr.

2.3 Modernizacije kurikuluma

Neophodno je usklađivanje fundamentalnih oblasti i novih tema u nastajanju. Tradicionalno obrazovanje u nuklearnom inženjerstvu oslanjalo se na jake temelje iz fizike, matematike, termodinamike, nauke o materijalima i drugog bazičnog inženjerstva. Iako ovi fundamentalne osnove ostaju neophodne, moderni nuklearni inženjeri takođe moraju razumeti i napredne digitalne alate, automatizaciju, primenu veštačke inteligencije, integrisane energetske sisteme i sl. Uključivanje novih tema bez preopterećenja kurikuluma predstavlja značajan izazov. Univerziteti moraju uravnotežiti dubinu osnovnih nuklearnih nauka sa širinom novih interdisciplinarnih oblasti. Ovo često zahteva restrukturiranje programa, uvođenje modularnog učenja i promociju celoživotnog učenja nakon osnovnih studija.

U sadašnjim uslovima, evidentan je ograničen pristup objektima za praktičnu obuku. Praktično iskustvo je ključno u obrazovanju u nuklearnom inženjerstvu. Međutim, pristup istraživačkim reaktorima, „vrućim“

laboratorijama i specijalizovanim objektima za testiranje je ograničen i skup. Mnogim institucijama nedostaje infrastruktura potrebna da studentima pruži direktno izlaganje nuklearnim sistemima, što dovodi do prekomernog oslanjanja na teorijsku nastavu. Iako digitalni simulatori i virtualne laboratorije pomažu u ublažavanju ovog jaza, oni ne mogu u potpunosti zameniti iskustveno učenja povezano sa sistemima iz stvarnog sveta. Razvijanje međunarodnih partnerstava i zajedničkih istraživačkih objekata je sve neophodnije, ali zahteva snažnu institucionalnu podršku.

2.4 Razvoj novih interdisciplinarnih veština

Pristup interdisciplinarnim veštinama mora obuhvatiti sistemske razmišljanje i energetske integracije. Savremene energetske sisteme karakteriše sve veća integracija između nuklearne energije, obnovljivih izvora, tehnologija skladištenja i pametnih mreža. Nuklearni inženjeri stoga moraju da razumeju širu dinamiku energetskog sistema, stabilnost mreže i hibridne energetske konfiguracije. Međutim, mnogi tradicionalni programi i dalje tretiraju nuklearnu energiju kao izolovanu disciplinu. Ovo ograničava sposobnost diplomaca da efikasno doprinesu integrisanom planiranju i međusektorskoj saradnji.

Neophodan je iskorak ka digitalnim kompetencijama i sajber bezbednosti. Digitalizacija transformiše nuklearna postrojenja kroz napredne sisteme za nadzor, algoritme prediktivnog održavanja, simulatore, automatizovane sisteme upravljanja i dr. Shodno tome, inženjeri moraju posedovati veštine u analitici podataka, modelovanju, softverskim alatima i sajber bezbednosti. Moderno obrazovanje u oblasti nuklearne energetike koristi digitalne alate kao što su napredni softveri za simulaciju, digitalni blizanci i virtualne laboratorije. Ovi alati omogućavaju studentima da steknu praktično iskustvo sa složenim sistemima čak i kada je pristup fizičkim reaktorima ili testnim postrojenjima ograničen. Današnji obrazovni programi često zaostaju u ovim oblastima, jer bazna ekspertiza fakulteta, zahtevi za akreditaciju i inercija kurikuluma usporavaju integraciju digitalnih kompetencija i to je izazov za programe nuklearne energetike.

Inženjerski profil u oblasti nuklearne energetike mora biti obogaćen savremenim veštinama komunikacije i društvenog angažovanja. Nuklearna energija funkcioniše u veoma osetljivom društvenom i političkom kontekstu. Od inženjera se sve više zahteva da komuniciraju tehničke informacije regulatorima, kreatorima politike i javnosti. Veštine u komunikaciji rizika, etici i angažovanju zainteresovanih strana stoga postaju jednako važne kao i tehnička stručnost. Od savremenih nuklearnih inženjera se očekuje da doprinesu ciljevima održivosti i efikasno se bave javnim problemima. Obuka za analizu uticaja na životnu sredinu, komunikaciju u zajednici i etičko donošenje odluka pomaže u negovanju inženjera koji mogu da se zalažu za bezbedna i održiva nuklearna rešenja.

Ipak, navedene kompetencije se retko naglašavaju u tradicionalnim inženjerskim kurikulumima, koji teže da daju prioritet tehničkoj dubini u odnosu na društvenu interakciju.

2.5 Usklađenost akademske zajednice i industrije

Stalni izazov je neusklađenost između akademskog obrazovanja i evoluirajućih potreba energetske industrije. Poslodavci često ističu da diplomcima nedostaju praktične veštine, poznavanje regulatornih okruženja ili iskustvo sa industrijskim standardima i procedurama. Jačanje saradnje između akademije i industrije je neophodno. Potrebna su partnerstva između univerziteta, istraživačkih institucija i industrije. Programi saradnje, kao što su kooperativne prakse, zajedničke istraživačke laboratorije / projekti, savetodavni odbori iz industrije, i dr., pomažu u usklađivanju akademskih programa sa praktičnim potrebama i osiguravaju da diplomci budu bolje pripremljeni za radno mesto.

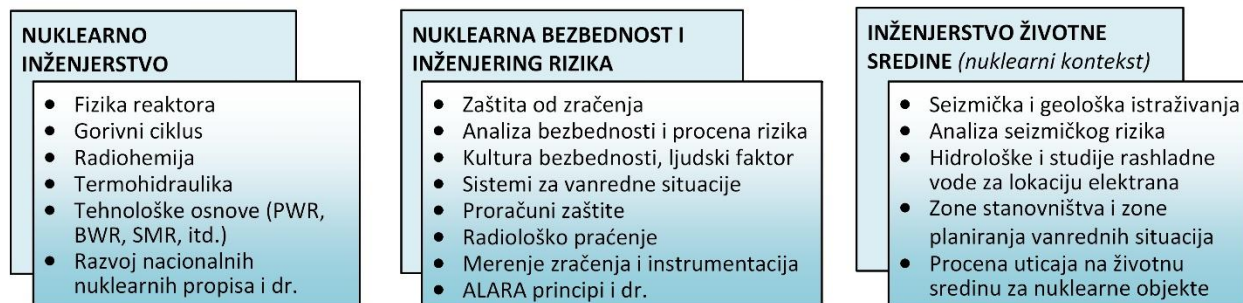
Posebnu pažnju treba posvetiti kontinuiranom profesionalnom razvoju. S obzirom na dug operativni vek nuklearnih postrojenja i brzi tempo tehnoloških promena, početno univerzitetsko obrazovanje nije dovoljno za celu karijeru. Inženjeri moraju da se uključe u kontinuirani profesionalni razvoj, programe sertifikacije i specijalizovanu obuku tokom cele karijere. Obrazovni sistemi se stoga moraju proširiti izvan tradicionalnih programa studija kako bi uključili fleksibilne, modularne i industrijski orijentisane mogućnosti celoživotnog učenja.

3. RAZVOJ POTREBNIH INŽENJERSKIH PROFILA U FAZAMA PLANIRANJA, IZGRADNJE I EKSPLOATACIJE NUKLEARNIH POSTROJENJA

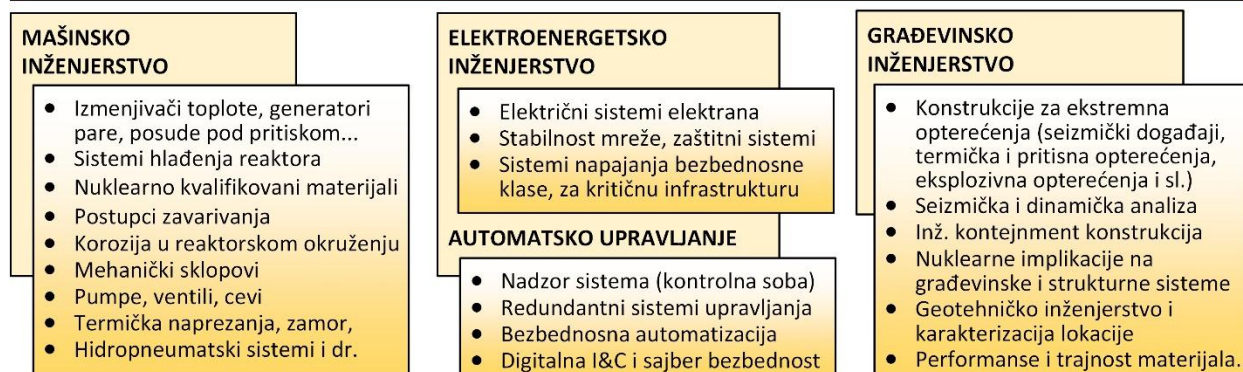
Univerziteti su zapravo mesto gde razvoj nuklearne energetike počinje. Pri tome, akademski nuklearni programi moraju biti podjednako usmereni kako na razvoj ljudskog kapitala tako i na tehnologiju. Zemlje koje su uspešno implementirale nuklearnu tehnologiju nisu počinjale razvoj kadrova od nivoa operatera reaktora, već sa jakim bazom znanja. S tim u vezi, obrazovna strategija mora biti pažljivo strukturirana, postepena i skalabilna. Umesto brzog stvaranja velikog broja usko obučanih stručnjaka, programi treba da se fokusiraju na stvaranje jake ali fleksibilne baze znanja, koja može da raste zajedno sa nacionalnom nuklearnom infrastrukturuom. To podrazumeva integraciju specijalizacije orijentisane na nuklearnu energiju u postojeće inženjerske programe. Univerziteti mogu efikasno prilagoditi trenutne programe kako bi podržali razvoj nuklearne energije. Drugi aspekt obrazovne strategije je snažno međunarodno partnerstvo, posebno sa iskusnim nuklearnim zemljama. Partnerstva omogućavaju pristup razvijenoj obrazovnoj infrastrukturi, zajedničkim studijskim programima, gostujućim predavačima, zajedničkim istraživačkim projektima i stručnim praksama. Ako su u pitanju Instituti, partnerstvo bi omogućilo pristup istraživačkim reaktorima što je dragoceno za praktično iskustvo, obuku i eksperimentalno obrazovanje. Ova iskustva takođe pomažu u izgradnji profesionalnih mreža i negovanju kulture bezbednosti utemeljene u stvarnim operativnim okruženjima.

Slika 1. prikazuje ovaj fazni razvoj, odnosno pristup kako se može graditi akademski i profesionalni kapacitet, redosledom kojim se to obično i dešava, u fazama planiranja, izgradnje i eksploatacije nuklearnih postrojenja.

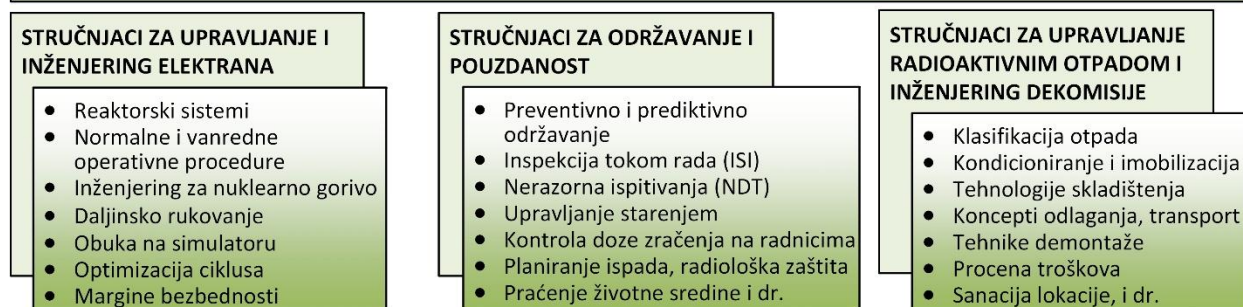
FAZA 1 — Izgradnja baze znanja i bezbednosti (Faza pre izgradnje, fokusirana na teoriju i analizu. Gradi se znanje i kapacitet. Cilj je obrazovati inženjere da razumeju tehnologiju i rizike, da razgovaraju sa regulatorima, dobavljačima, operaterima, ...)



FAZA 2 — Izgradnja postrojenja (Faza izgradnje. Cilj je obrazovati inženjere da projektuju i grade nuklearne energetske sisteme i procese, da obezbede dugoročni vek trajanja i bezbednost postrojenja, da instaliraju kritične komponente, ...)



FAZA 3 — Eksploatacija postrojenja (Najduža faza. Fokus se pomera na upravljanje, pouzdanost, nadzor i kulturu bezbednosti. Ovde se radi o profesionalnoj specijalizaciji u partnerstvu sa dobavljačima postrojenja i međunarodnim centrima za obuku)



Slika 1. Potrebne inženjerske kvalifikacije kroz faze razvoja nuklearne energetike

4. ZAKLJUČAK

Izazovi obrazovanja i razvoja veština za nuklearnu energetiku su višedimenzionalni i duboko međusobno povezani. Ograničen broj studenata, neprilagođeni nastavni programi, infrastrukturna ograničenja, interdisciplinarnе praznine i nedovoljna usklađenost sa industrijom, doprinose usporenom razvoju novih inženjerskih kvalifikacija. Rešavanje ovih izazova zahteva koordinisane napore univerziteta, industrije, i regulatornih tela. Modernizacija nastavnog programa, mogućnosti praktične obuke, jača interdisciplinarna integracija i unapređeno celoživotno učenje su neophodni koraci. Samo kroz takav sveobuhvatni pristup univerziteti mogu razviti prilagodljive inženjerske profile potrebne za podršku bezbednim, inovativnim i održivim sistemima nuklearne energije. Preduslovi za prevazilaženje pomenutih izazova postoje u obrazovnim institucijama Republike Srbije, ali realizacija zahteva osmišljen razvoj inženjerskih profila koji su tehnički jaki, prilagodljivi promenama, etički utemeljeni i vešti u interdisciplinarnoj saradnji. Da bi se ostvarili ovi ciljevi, akademske institucije, industrija i regulatorna tela moraju sarađivati i stvoriti puteve koji privlače, obrazuju i zadržavaju mlade talente u nuklearnoj energetici i širem energetskom sektoru.

5. LITERATURA

- [1] Dayraut et al., Report on human resources needs in the nuclear industry until 2035, ENEN, Brussels, 2023.
- [2] Deja et al., Report on human resources needs in research, safety, and waste management, ENEN, Brussels, 2023.
- [3] Visvikis et al., Report on human resources needs in non-power nuclear sector applications, ENEN, Brussels, 2023.
- [4] Cerbá et al., Gap analysis of VET offer for the European nuclear domain, ENEN, Brussels, 2023.