

SAVREMENI LAKOVODNI REAKTORI GENERACIJE III+ I SMR: TEHNOLOŠKI RAZVOJ I IMPLIKACIJE ZA VISOKO OBRAZOVANJE

Dorđe Lazarević¹, Selena Samardžić Cvijanović²

¹Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Srbija

²Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

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

Kratak sadržaj: Rad razmatra savremene lakovodne reaktore generacije III+ i male modularne reaktore (SMR) sa aspekta pristupa nuklearnoj sigurnosti i njihovih implikacija za visoko obrazovanje. Ukazuje se na to kako unapređena projektna rešenja, uključujući širu primenu pasivnih sigurnosnih sistema i integraciju sistema, utiču na zahteve u pogledu znanja i kompetencija u nuklearnoj energetici. Razmatra se uloga visokog obrazovanja u razvoju interdisciplinarnih znanja i institucionalnih kapaciteta neophodnih za održavanje visokog nivoa nuklearne sigurnosti.

Ključne reči: nuklearna energetika, reaktori generacije III+, SMR, nuklearna sigurnost, visoko obrazovanje

MODERN LIGHT WATER REACTORS OF GENERATION III+ AND SMR: TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT AND IMPLICATIONS FOR HIGHER EDUCATION

Abstract: This paper examines modern light water reactors of Generation III+ and small modular reactors (SMRs) from the perspective of nuclear safety approaches and their implications for higher education. It highlights how advanced design solutions, including the broader application of passive safety systems and an increased level of system integration, influence the knowledge and competency requirements in nuclear engineering. The role of higher education in developing interdisciplinary expertise and institutional capacities necessary to maintain a high level of nuclear safety is discussed.

Key Words: nuclear energy, Generation III+ reactors, SMRs, nuclear safety, higher education

1. UVOD

Nuklearna energetika predstavlja jedan od tehnološki najzahtevnijih segmenata savremenog energetskog sistema, koji se u međunarodnoj literaturi često opisuje kao knowledge-intensive sector, odnosno sektor sa izrazito visokim zahtevima u pogledu znanja, kompetencija i institucionalne zrelosti. Za razliku od većine drugih energetskih tehnologija, nuklearna energija podrazumeva integraciju velikog broja složenih fizičkih, inženjerskih i organizacionih procesa, čija sigurna i pouzdana primena zahteva dugoročno planiranje, visoko specijalizovanu radnu snagu i stabilne institucije [1].

Posebnost nuklearne energetike ogleda se u činjenici da sigurnost nije isključivo tehničko svojstvo ugrađeno u projektna rešenja reaktora, već rezultat kombinacije tehničkih sistema, regulatornog okvira, organizacione kulture i ljudskog faktora. U tom smislu, znanje i obrazovanje predstavljaju temeljne preduslove za održavanje visokog nivoa nuklearne sigurnosti tokom čitavog životnog ciklusa nuklearnih postrojenja - od projektovanja i izgradnje, preko eksploatacije, do upravljanja radioaktivnim otpadom i dekomisije postrojenja [2].

Međunarodne organizacije, pre svega IAEA, kontinuirano naglašavaju da razvoj nuklearne energetike mora biti praćen razvojem odgovarajućih ljudskih i institucionalnih kapaciteta, pri čemu visoko obrazovanje ima centralnu ulogu u formiranju stručnjaka sposobnih da odgovore na složene tehničke i regulatorne zahteve ovog sektora. Iskustva prethodnih nuklearnih akcidenata, naročito nakon havarije u Fukušimi 2011. godine, dodatno su ukazala na potrebu sistemskog pristupa obrazovanju, kontinuiranoj obuci i jačanju sigurnosne kulture u svim segmentima nuklearne energetike [3].

U savremenom kontekstu energetske tranzicije i dekarbonizacije energetskih sistema, nuklearna energija se sve češće razmatra kao stabilan niskougljenični izvor električne energije, sposoban da obezbedi pouzdanost sistema uz smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte. Međutim, prihvatljivost nuklearne energije u društvu u velikoj meri zavisi od poverenja javnosti u sposobnost institucija da obezbede visok nivo sigurnosti i transparentnosti [4]. To poverenje je neposredno povezano sa kvalitetom obrazovanja, stručnosti kadrova i kredibilitetom regulatornih i akademskih institucija.

U tom smislu, razvoj savremenih lakovodnih reaktora generacije III+ i malih modularnih reaktora (SMR) ne može se posmatrati isključivo kao tehnološki napredak, već i kao izazov i prilika za unapređenje visokog obrazovanja, interdisciplinarnih studijskih programa i institucionalnih kapaciteta u oblasti nuklearne energetike [5]. Razumevanje ove veze između tehnologije, znanja i sigurnosti predstavlja polaznu osnovu za razmatranje uloge visokog obrazovanja u razvoju i održivosti savremenih nuklearnih energetskih sistema.

2. GENERACIJA III+ LAKOVODNIH REAKTORA - POST-FUKUŠIMA PARADIGMA

Razvoj lakovodnih reaktora (LWR) generacije III+ predstavlja evolutivni, ali i suštinski unapređen pristup nuklearnoj sigurnosti u odnosu na prethodne generacije. Iako su ovi reaktori zasnovani na proverenim konceptima LWR tehnologija, iskustva stečena tokom eksploatacije nuklearnih elektrana, kao i pouke proistekle iz velikih akcidenata, dovela su do redefinisavanja projektnih zahteva koji se danas uobičajeno označavaju kao postfukušimski zahtevi [6, 7]. Ovi zahtevi odnose se pre svega na povećanu otpornost postrojenja na ekstremne unutrašnje i spoljne događaje, produženo vreme autonomnog funkcionisanja sigurnosnih sistema i smanjenu zavisnost od spoljnog napajanja i ljudske intervencije u vanrednim uslovima.

U grupu reprezentativnih LWR reaktora generacije III+ spadaju francuski EPR, američki AP1000, ruski VVER-1200, korejski APR1400 i kineski Hualong One (kratak pregled osnovnih karakteristika dat je u Tabeli 1) [6, 7]. Iako se ovi reaktori razlikuju u pogledu pojedinačnih konstruktivnih i sistemskih rešenja, zajednička im je sigurnosna filozofija zasnovana na principima odbrane po dubini, višestrukim fizičkim barijerama i unapređenoj redundantnosti sigurnosnih sistema. Poseban akcenat stavljen je na smanjenje verovatnoće oštećenja reaktorskog jezgra i ograničavanje posledica potencijalnih akcidenata.

Tabela 1 – Kratak pregled LWR reaktora generacije III+ [7]

Reaktorska tehnologija	Tip reaktora	Generacija	Pristup nuklearnoj sigurnosti	Obrazovne implikacije
EPR (Francuska)	PWR	III+	Pretežno aktivni sistemi i visoka redundantnost	Potreba za sistemskim inženjerskim znanjem i razumevanje složenih sigurnosnih arhitektura
AP1000 (SAD)	PWR	III+	Naglašeni pasivni sigurnosni sistemi sa produženom autonomijom	Fokus na pasivnu termohidrodinamiku i integrisane sigurnosne analize
VVER-1200 (Rusija)	PWR	III+	Kombinacija aktivnih i pasivnih sistema	Razumevanje hibridnih sigurnosnih koncepata i sistemskih interakcija
APR1400 (Južna Koreja)	PWR	III+	Evolutivni dizajn sa unapređenim aktivnim sistemima	Naglasak na standardizovanim projektnim pristupima
Hualong One (Kina)	PWR	III+	Redundantni aktivni sistemi uz pasivne elemente za vanredne uslove	Razumevanje licenciranja i primene tehnologije u različitim regulatornim okruženjima

Jedna od ključnih karakteristika savremenih reaktora generacije III+ jeste proširena primena pasivnih sigurnosnih sistema, koji u slučaju vanrednih događaja omogućavaju odvođenje zaostale toplote bez oslanjanja na spoljne izvore napajanja i ljudsku intervenciju tokom produženog vremenskog perioda. Ovakav pristup direktno odgovara na scenarije potpunog gubitka napajanja i degradacije aktivnih sistema, koji su identifikovani kao kritični u okviru postfukušimskih sigurnosnih analiza. Pored toga, reaktori generacije III+ projektovani su sa robusnijim kontejmentima, unapređenim rešenjima za upravljanje istopljenim reaktorskim jezgrom i dodatnim merama za sprečavanje ranog i značajnog ispuštanja radioaktivnih materija u okolinu [6].

Iako se u stručnoj literaturi često naglašavaju razlike između pojedinačnih dizajna, za potrebe ovog rada značajnije je istaći da svi reaktori generacije III+ dele zajednički cilj: povećanje ukupne sigurnosti sistema kroz integraciju tehničkih rešenja, projektne filozofije i organizacionih zahteva. Time se potvrđuje da sigurnost savremenih nuklearnih elektrana ne proističe iz izolovanih komponenti, već iz usklađenog funkcionisanja celokupnog sistema.

Razvoj i eksploatacija reaktora generacije III+ imaju neposredne implikacije na zahteve u pogledu znanja i obrazovanja, što nameće dodatne zahteve pred visoko obrazovanje u oblasti nuklearne energetike. Analiza ovih sistema zahteva duboko razumevanje neutronske-fizičkih procesa, termohidrodinamičkog ponašanja u stacionarnim i prelaznim režimima rada, kao i interakcije između aktivnih i pasivnih sigurnosnih sistema. Poseban značaj imaju integrisane analize koje povezuju ponašanje reaktorskog jezgra, primarnog rashladnog sistema i kontejmenta u različitim vanrednim scenarijima, što zahteva interdisciplinarni pristup i sposobnost sistemskog razmišljanja.

U tom smislu, savremeni lakovodni reaktori generacije III+ jasno ilustruju da znanje predstavlja jedan od ključnih elemenata nuklearne sigurnosti. Visoko obrazovanje u ovoj oblasti ne može se svesti na prenošenje izolovanih tehničkih informacija, već mora obuhvatiti razumevanje sigurnosne filozofije, metodologija sigurnosnih analiza i regulatornih zahteva koji prate postfukušimske standarde projektovanja i eksploatacije nuklearnih elektrana.

3. SMR - TEHNOLOŠKA INOVACIJA I INSTITUCIONALNI IZAZOV

Mali modularni reaktori (Small Modular Reactors – SMRs) predstavljaju jednu od najznačajnijih inovacija u savremenom razvoju nuklearne energetike. Iako se u osnovi oslanjaju na proverene reaktorske koncepte, pre svega

lakovodne tehnologije, SMR uvode kvalitativno nove pristupe u pogledu projektovanja, izgradnje, eksploatacije i sigurnosti [8]. Zbog toga se SMR ne mogu posmatrati isključivo kao reaktori manje snage u odnosu na klasične velike jedinice, već kao tehnološki i organizacioni koncept koji ima potencijal da značajno utiče na način implementacije nuklearne energije u energetske sisteme.

Jedna od ključnih karakteristika SMR jeste visok stepen modularnosti, koji podrazumeva fabričku izradu velikog dela opreme, standardizaciju dizajna i mogućnost postepene izgradnje kapaciteta. Ovakav pristup razlikuje SMR od konvencionalnih nuklearnih elektrana, kod kojih se najveći deo aktivnosti odvija na samoj lokaciji postrojenja. Modularnost i serijska proizvodnja potencijalno omogućavaju smanjenje rizika tokom izgradnje, kraće rokove realizacije i veću fleksibilnost u planiranju energetske kapaciteta, ali istovremeno postavljaju nove zahteve u pogledu kontrole kvaliteta, verifikacije dizajna i nadzora nad procesima koji se odvijaju van lokacije elektrane.

Sa aspekta nuklearne sigurnosti, SMR se u velikoj meri oslanjaju na proširenu primenu pasivnih sigurnosnih sistema i inherentnih sigurnosnih karakteristika. Projektna rešenja kod SMR reaktora često podrazumevaju integraciju primarnog kruga hladioca, parogeneratorskog i reaktorskog suda u jedinstven kompaktni korpus, uz primenu pasivnih sistema nuklearne sigurnosti za odvođenje zaostale toplote korišćenjem prirodnog strujanja hladioca. Za razliku od klasičnih reaktora, kod SMR ovakvi sistemi predstavljaju centralni projektni princip i omogućavaju autonomno hlađenje jezgra tokom produženog vremenskog perioda - od više dana do nekoliko nedelja, u zavisnosti od snage i konkretnog dizajna - čak i u uslovima potpunog gubitka električnog napajanja. Međutim, upravo ovakva integracija sistema zahteva izuzetno precizno razumevanje međusobnih interakcija i ponašanja postrojenja u različitim tranzijentnim i akcidentnim režimima.

U kontekstu tehnološke zrelosti i realne primenljivosti SMR dizajna često se navode tehnologije kao što su NuScale, RITM-200N, ACP100 i BWRX-300 (orijentacioni pregled dat je u Tabeli 2) [8, 9]. Iako su lakovodni reaktori koji se razlikuju po tipu reaktora, snazi i tehničkim rešenjima, zajednička im je težnja ka pojednostavljenju sistema, smanjenju broja aktivnih komponenti i povećanju uloge pasivnih sigurnosnih funkcija. Za potrebe ovog rada, naglasak nije na poređenju pojedinačnih dizajna, već na razumevanju zajedničkih karakteristika koje SMR izdvajaju kao posebnu kategoriju u okviru savremene nuklearne energetike.

Tabela 2 – Orijentacioni pregled odabranih SMR tehnologija [8, 9]

SMR tehnologija	Tip reaktora	Stepen tehnološke zrelosti	Dominantni sigurnosni koncept	Obrazovne implikacije
NuScale (SAD)	PWR (integralni)	Regulatorno odobren, komercijalni projekti u razvoju	Dugotrajno pasivno hlađenje bez spoljnog napajanja	Integralni sistemi i pasivna sigurnost
RITM-200N (Rusija)	PWR (integralni)	Licenciran za izgradnju, projekat u realizaciji	Integralni dizajn sa pasivnim hlađenjem	Analiza dizajna zasnovanog na operativnom iskustvu
ACP100 (Kina)	PWR (integralni)	Završena hladna proba i nenuklearni start-up test	Integralni dizajn sa kombinacijom pasivnih i aktivnih sistema	Licenciranje i inženjerska validacija integralnog dizajna
BWRX-300 (SAD, Japan)	BWR	Licenciran za izgradnju	Pojednostavljen dizajn sa pasivnim elementima	Analiza BWR inovacija

Uvođenje SMR tehnologija otvara i niz novih institucionalnih i regulatornih izazova. Postojeći regulatorni okviri u velikoj meri su razvijeni za klasične nuklearne elektrane velikih snaga, sa jasno definisanom lokacijom, jedinstvenim postrojenjem i velikim brojem osoblja. Nasuprot tome, koncepti SMR podrazumevaju mogućnost više modula na jednoj lokaciji, potencijalnu distribuciju manjih postrojenja i drugačiju organizaciju rada i održavanja. To zahteva prilagođavanje regulatornih pristupa, razvoj novih metodologija licenciranja i jačanje kapaciteta regulatornih tela za ocenu inovativnih projektnih rešenja.

Ovi izazovi imaju direktne implikacije na ulogu visokog obrazovanja i jasno ukazuju na potrebu za prilagođavanjem obrazovnih i institucionalnih kapaciteta. Razvoj, licenciranje i eksploatacija SMR zahtevaju stručnjake koji, pored klasičnih znanja iz nuklearne fizike i termohidraulike, poseduju kompetencije u oblasti sistemskog inženjerstva, analize rizika, digitalnih sistema upravljanja i regulatornih procesa. Poseban značaj ima razumevanje koncepta projektne sigurnosti zasnovane na pasivnim i inherentnim karakteristikama, kao i sposobnost kritičke evaluacije novih tehnologija u uslovima ograničenog operativnog iskustva.

U tom smislu, SMR predstavljaju ne samo tehnološku inovaciju, već i snažan podsticaj za modernizaciju obrazovnih programa i jačanje interdisciplinarnog pristupa u oblasti nuklearne energetike. Njihova potencijalna primena u energetske sisteme dodatno potvrđuje da održavanje visokog nivoa nuklearne sigurnosti zavisi podjednako od kvaliteta projektnih rešenja i od znanja i kompetencija stručnjaka koji te sisteme projektuju, ocenjuju i eksploatišu.

4. ULOGA VISOKOG OBRAZOVANJA U RAZVOJU I ODRŽAVANJU NUKLEARNE SIGURNOSTI

Razvoj savremenih LWR generacije III+ i SMR jasno ukazuje da tehnološki napredak u nuklearnoj energetici mora biti praćen odgovarajućim razvojem znanja, kompetencija i institucionalnih kapaciteta. U tom kontekstu, visoko obrazovanje ima ključnu ulogu ne samo u obuci budućih inženjera i stručnjaka, već i u očuvanju i unapređenju nuklearne sigurnosti kao sistemске vrednosti [1].

Za razliku od drugih energetske tehnologije, nuklearna energetika zahteva duboko razumevanje međuzavisnosti između različitih fizičkih procesa, tehničkih sistema i organizacionih procedura. Savremeni reaktori generacije III+ uvode složene sigurnosne arhitekture zasnovane na kombinaciji aktivnih i pasivnih sistema, dok SMR koncepti pomeraju fokus ka integralnim dizajnima, modularnosti i funkcionalno objedinjenim, pojednostavljenim sistemima. Ovakvi zahtevi prevazilaze okvire tradicionalnih, disciplinarno podeljenih studijskih programa i nameću potrebu za interdisciplinarnim obrazovanjem koje povezuje reaktorsku fiziku i termohidrodinamiku sa metodološkim oblastima sistemskog inženjerstva i sigurnosnih analiza.

Poseban značaj ima sposobnost razumevanja sigurnosne filozofije koja stoji iza savremenih projektnih rešenja. Postfukušimski zahtevi nisu samo skup tehničkih kriterijuma, već reflektuju širi pristup upravljanju rizikom, u kojem se podjednaka pažnja posvećuje projektnoj robusnosti, organizacionim procedurama i ljudskom faktoru [5]. Visoko obrazovanje u oblasti nuklearne energetike stoga mora obuhvatiti ne samo tehničke aspekte projektovanja i eksploatacije, već i metodologije sigurnosnih analiza, kulturu sigurnosti i osnovne principe regulatornog nadzora.

U savremenim uslovima, digitalizacija obrazovnih procesa predstavlja dodatni faktor unapređenja kvaliteta nastave i obuke. Numeričke simulacije i računarske analize neutronske-fizičkih i termohidrodinamičkih procesa u reaktorskom jezgri i sigurnosnim sistemima, uz primenu digitalnih simulatora, omogućavaju studentima i mladim istraživačima da steknu uvid u ponašanje složenih nuklearnih sistema u normalnim i vanrednim režimima rada, čak i u odsustvu fizičkih istraživačkih reaktora. Ovakav pristup je naročito značajan za zemlje koje se nalaze u ranoj fazi razmatranja uvođenja nuklearne energetike, jer omogućava razvoj kompetencija uz relativno ograničene infrastrukturne resurse.

Pored obrazovne funkcije, univerziteti i istraživačke institucije imaju važnu ulogu u jačanju institucionalnih kapaciteta i podršci regulatornim telima. Kroz saradnju sa industrijom, regulatorom i međunarodnim organizacijama, visoko obrazovanje doprinosi razvoju stručnih kadrova sposobnih da učestvuju u procesu licenciranja, sigurnosnih analiza i donošenja odluka zasnovanih na dokazima. Ovakva uloga akademskih institucija posebno je izražena u kontekstu novih tehnologija, kao što su SMR, gde se regulatorna praksa i operativno iskustvo još uvek razvijaju [10].

5. ZAKLJUČAK

Savremena nuklearna energetika ulazi u fazu u kojoj se nivo sigurnosti sve manje određuje isključivo tehničkim karakteristikama pojedinačnih reaktorskih dizajna, a sve više sposobnošću sistema da integriše tehnologiju, organizaciju i znanje. Postfukušimski zahtevi doveli su do značajnog unapređenja projektnih rešenja, posebno u pogledu primene pasivnih sigurnosnih sistema i robusnosti dizajna, ali su istovremeno povećali zahteve za dubokim razumevanjem složenih interakcija unutar nuklearnih postrojenja. U tom kontekstu, stručne kompetencije i sposobnost sistemskog razmišljanja postaju jednako važni elementi ukupne nuklearne sigurnosti kao i sama tehnička rešenja.

Uloga visokog obrazovanja u ovom procesu prevazilazi tradicionalno obrazovanje kadrova i postaje sastavni deo sistema nuklearne sigurnosti. Kroz razvoj interdisciplinarnih studijskih programa, primenu digitalnih alata i jačanje saradnje sa regulatornim i industrijskim akterima, akademske institucije doprinose izgradnji institucionalne otpornosti i društvene prihvatljivosti nuklearne energetike. Time se potvrđuje da dugoročna, sigurna i održiva primena nuklearne energije zavisi podjednako od tehnološke zrelosti reaktorskih sistema i od kvaliteta obrazovanja i znanja na kojima se ti sistemi zasnivaju.

6. LITERATURA

- [1] IAEA, *Knowledge Management for Nuclear Industry Organizations*, IAEA TECDOC-1510, Vienna, 2006.
- [2] IAEA, *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev. 1*, INSAG Series No. 12, Vienna, 1999.
- [3] OECD/NEA, *Nuclear Education and Training: From Concern to Capability*, NEA No. 6979, Paris, 2012.
- [4] IAEA, *Nuclear power and sustainable development*, STI/PUB/1754, Vienna, 2016.
- [5] IAEA, *Human resource development for nuclear power programmes: building and sustaining capacity*, STI/PUB/1739, Vienna, 2018.
- [6] World Nuclear Association, *Advanced Nuclear Power Reactors*, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors>
- [7] IAEA, *Advanced Reactor Information System (ARIS)*, <https://aris.iaea.org/>
- [8] IAEA, *Small Modular Reactor Technology Catalogue*, Vienna, 2024.
- [9] OECD/NEA, *The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Third Edition*, OECD Publishing, Paris, 2025.
- [10] IAEA, *Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power*, IAEA Series No. NG-G-3.1 (Rev. 2), Vienna, 2024.