

Trendovi i izazovi fisionih nuklearnih tehnologija

Marija Šljivić-Ivanović

Laboratorija za zaštitu od zračenja I
zaštitu životne sredine

:Institut za nuklearne nauke
"Vinča", Institut od nacionalnog
značaja za Republiku Srbiju,
Univerzitet u Beogradu

Beograd, Srbija:

marijasljivic@vin.bg.ac.rs

ORCID [0000-0001-5897-0083](https://orcid.org/0000-0001-5897-0083)

4. Danica Jovašević

Laboratorija za zaštitu od zračenja I
zaštitu životne sredine

Institut za nuklearne nauke "Vinča",
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija

danica.jovasevic@vin.bg.ac.rs

ORCID [0009-0006-6722-4588](https://orcid.org/0009-0006-6722-4588)

2. Maja Rajković

Laboratorija za zaštitu od zračenja I
zaštitu životne sredine

Institut za nuklearne nauke "Vinča",
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija

maja.rajkovic@vin.bg.ac.rs

ORCID [0009-0008-7701-7819](https://orcid.org/0009-0008-7701-7819)

5. Ivana Jelić

Laboratorija za zaštitu od zračenja I
zaštitu životne sredine

Institut za nuklearne nauke "Vinča",
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija

ivana.jelic@vin.bg.ac.rs

ORCID [0000-0003-1406-2416](https://orcid.org/0000-0003-1406-2416)

3. Kristina Pavićević

Laboratorija za zaštitu od zračenja I
zaštitu životne sredine

Institut za nuklearne nauke "Vinča",
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija

kristina.pavicevic@vin.bg.ac.rs

ORCID [0009-0003-3743-2894](https://orcid.org/0009-0003-3743-2894)

6. Marija Janković

Laboratorija za zaštitu od zračenja I
zaštitu životne sredine

Institut za nuklearne nauke "Vinča",
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija

marijam@vin.bg.ac.rs

ORCID [0000-0002-2255-7163](https://orcid.org/0000-0002-2255-7163)

Abstract— Oko 75% emisije gasova sa efektom staklene bašte potiče od sagorevanja fosilnih goriva u procesu proizvodnje energije. Smanjenje karbonskog otiska i imperativ održivog razvoja kao ciljevi „Zelene agende“ se mogu postići samo promenom udela pojedinih izvora energije u energetsom miksu. U skladu sa tim, nuklearna energija zajedno sa hidroenergijom je ključni izvor niskougljične energije za mnoge zemlje širom sveta. Međutim, primena nuklearne energije u proizvodnji električne izuzetno varira jer su brojne one države koje se u velikoj mjeri oslanjaju na nju, ali nasuprot tome brojne su i one koje je uopšte ne upotrebljavaju. Ključno pitanje je održivost velikih reaktora, koji su se pokazali kao najefikasniji način za proizvodnju energije. Iako su koristi primene nuklearne energije za čovečanstvo neosporne, brojne izazove donose i tržišni trendovi i političke strategije, koje je teško predvideti ili kontrolisati. U ovom radu su sumirani rezultati i dostignuća u razvoju nuklearnih fisionih tehnologija širom sveta.

Ključne reči— fisija, nuklearne tehnologije, nuklearni reaktori

I. UVOD

Primena nuklearne energije je dovela do izuzetnog tehnološkog razvoja čovečanstva kao i fizike kao nauke. Uprkos višedecenijskoj praksi u proizvodnji električne energije iz fisionih reaktora, značajno su suprotstavljeni stavovi za i protiv njihove upotrebe. Protivnici nuklearne energije prvenstveno navode nuklearne akcidente i nuklearno naoružanje kao argumente. Posledice velikih nuklearnih akcidenata poput onog u Fukušimi (2011), a naročito u Černobilju (1986) su kontaminacija životne sredine i stvaranje uslova u kojima je nemoguć život ljudi. Nuklearno naoružanje, poput atomskih bombi bačenih na Hirošimu i Nagasaki (1945) su osim kontaminacije dovele i do brojnih ljudskih žrtava. Navedeni događaji su doveli i do razvoja straha od radijacije i negativnog stava javnosti po pitanju upotrebe nuklearnih reaktora. Nasuprot

tome, u okviru naučne i stručne javnosti, navedeni događaji su inicirali preispitivanje postojećih tehnologija i sigurnosnih sistema, razvoj novih materijala, unapređenje tehnologija i procedura. Dodatno, osim proizvodnje električne energije, fisioni reaktori mogu naći primenu i za potrebe proizvodnje vodonika, desalinaciju, pomorski transport i centralno grejanje.

II. PITANJA OD ZNAČAJA

Tokom 2024. godine međunarodni časopis Nuclear Engineering and Design je objavio specijalno izdanje pod nazivom "Ishodi i dostignuća istraživanja koji orijentišu budućnost u tehnologiji nuklearne fisije" objavljeno u sveskama koje se odnose na različite geografske regione. Navedeno izdanje predstavlja kolekciju 32 sveske sa više od 470 članaka i sa više od 1000 koautora na temu stanja i perspective razvoja nuklearne fisije u svetu [1].

Ova stručna i naučna zajednica je zauzela stav o pitanjima i terminima koji se često mogu čuti u sredstvima javnog informisanja:

- Reaktori 1. generacije su bili retko korišćeni, dok reaktori generacija 2, 3 i 3+ su i dalje u upotrebi i njihov razvoj je standardni proces razvoja tehnologije. Nasuprot tome, reaktori generacije 4 predstavljaju diskontinuitet u razvoju s obzirom na to da podrazumevaju upotrebu novih materijala i tehnologija, sa ciljem zatvaranja gorivnog ciklusa i smanjenje količine nastalog radioaktivnog otpada. U skladu sa tim, ovi reaktori imaju mogućnost upotrebe u narednim decenijama, ali trenutno nisu u upotrebi, što implicira i nemogućnost definisanja bezbedonosnih rizika.
- Mogućnost korišćenja malih modularnih reaktora (eng. *Small Modular Reactors*, -SMR) umesto konvencionalnih nuklearnih elektrana (u daljem tekstu NE) (eng. *Large Reactor Units*, LRU) zavisi i od činjenice da li se

Istraživanja prezentovana u ovom radu su finansirana od Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija u skladu sa ugovorom broj. 451-03-136/2025-03/200017.



razmatra njihova primena za proizvodnju električne energije ili za druge namene, kao i za koje namene se proizvodi data električna energija (u smislu da li električna mreža snabdeva udaljene pojedinačne objekte ili energetska zahtevna postrojenja i brojne potrošače). U skladu sa tim, mikroreaktori nisu pogodni za snabdevanje električnom energijom višemilionskih gradova niti značajnih industrijskih postrojenja.

- Iako primena u nuklearnim podmornicama ukazuje na mogućnost korišćenja olova za hlađenje, navedena tehnologija nije trenutno izvodljiva u nuklearnim industrijskim postrojenjima. Slični zaključci se mogu izvesti i za hlađenje rastopljenom soli.
- Reaktori sa hlađenjem gasom su bili korišćeni, a nedavno je pušten u rad u Kini reaktor ovog tipa. Nema značajnih nerešenih tehnoloških problema ovih reaktora, te se radi na njihovom razvoju i prihvatanju tržišta
- Poput onih sa gasnim hlađenjem, i brzi reaktori sa natrijumom su korišćeni u prošlosti, a koriste se i danas, uz detaljno definisane tehnološke izazove koji ih karakterišu.
- Reaktori sa vodom kao hladiocem trenutno predstavljaju održivu nuklearnu tehnologiju koja omogućava snabdevanje električnom energijom.

III. TRENUTNO STANJE U SVETU I OSNOVNA ZAPAZANJA

A. EVROPA

Krajem 2024. godine, u Evropi je bilo 166 operativnih reaktora. Španija poseduje značajna znanja i kapacitete za rad i razvoj NE s obzirom na to da ima 5 nuklearnih reaktora koji obezbeđuju oko 10% potrebne električne energije. Međutim, strah od nuklearnih akcidenata, su doveli do političke odluke da se odustane od nuklearnih tehnologija, uprkos postojanju znanja i infrastrukture u ovoj oblasti.

Luksemburg ima problem oko autonomnosti u odlučivanju o primeni nuklearne energije s obzirom na to da je pozicioniran između Francuske, Nemačke i Belgije kao predstavnika sa izrazitim stavom za i protiv nuklearne energije. Belgija proizvodi nuklearnu energiju ali je još 2003. god. donešen zakon o zabrani izgradnje novih i ograničen radni vek postojećih na 2022.-2024. god. Međutim, razmatra se naknadni produžetak radnog veka reaktora u radu do 2035.god., a sklopljen je i sporazum o razvoju prvih modela malih modularnih reaktora, a takođe se revidira zakon iz 2003.

Austrija ima negativan stav prema primeni nuklearne energije već decenijama.

Švajcarska, poput Španije, ima u funkciji reaktore koji će nastaviti da proizvode električnu energiju, a istraživanje i razvoj se bazira i na konvencionalnim i na malim modularnim reaktorima.

Nemačka je imala razvijenu nuklearnu industriju, a fisiona tehnologija je bila bazna za proizvodnju nuklearne energije. Međutim, nuklearni akcident u Fukušimi je doveo do toga da političari ali i nemačka populacija zauzmu izričito negativan stav prema nuklearnoj energiji. Posledica je gašenje nuklearnih reaktora i napuštanje ovog vida tehnologije uz preorijentaciju na obnovljive izvore energije što je rezultiralo značajnim problemima u oblasti energetske bezbednosti, nestabilnosti električne mreže i ekonomska pitanja u vezi dekomisije postojećih nuklearnih sistema.

Češka i Slovačka koriste nuklearnu energiju i postoji decenijama pozitivan stav ka njoj. Posledično, obe države poseduju izuzetne naučne kapacitete, a planira se povećanje broja reaktora u NE, kao i uvođenje malih modularnih reaktora koji bi dopunjavali potrebe za nuklearnom energijom. Interesantno je da reaktori u upotrebi su dizajnirani i proizvedeni u Čehoslovačkoj, kao i sve nuklearne komponente osim goriva i glavnih pumpi.

Početak rata u Ukrajini je značajno ubrzao razvoj nuklearnih tehnologija u Poljskoj. Potpisani su ugovori o izgradnji i započeti radovi na izgradnji nuklearnog postrojenja u Poljskoj koja do sada nije koristila ovaj vid energije. Uporedo se radi i na razvoju SMR-a.

Poput Čehoslovačke, Ukrajina ima višedecenijsko iskustvo ali i nove planove u proizvodnji nuklearne energije uprkos činjenici da se akcident u Černobilju odigrao unutar granica ove države. Planirano je proširenje kapaciteta u NE, razvoj mreže malih modularnih reaktora, izgradnja postrojenja za proizvodnju nuklearnog goriva, kao i razvoj kapaciteta za proizvodnju komponenta za SMR i druge.

Razvoj nuklearne energetike u Italiji je bio intenzivan do černobiljskog akcidenta. Nakon njega su nastavljena istraživanja i postoje i dalje kadrovi i ekspertiza u ovoj oblasti u industriji i istraživačkim centrima, mada je broj lica u datoj oblasti 100 puta manji nego pre 1986. Naročito su značajna istraživanja sigurnosti reaktora treće generacije i novih četvrte generacije koji koriste pasivne sisteme. Razmatraju se strategije primene SMRa ali i eventualni razvoj reaktora četvrte generacije.

Od država nastalih raspadom Jugoslavije, jedino Slovenija i Hrvatska koriste nuklearnu energiju iz NE Krško, u jednakim iznosima. Slovenija planira samostalno da izgradi novu NE, a takođe analizira i uvođenje SMR. Suprotno tome, Hrvatska ne planira nova nuklearna postrojenja i fokusira se na razvoj alternativnih izvora energije.

Srbija je bila centar razvoja nuklearne energetike u Jugoslaviji, međutim pre Černobilja nije imala izgrađenu NE već samo dva istraživačka reaktora u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“. Akcident je doveo do usvajanja zakona o moratorijumu na izgradnju NE koji je ukinut tek 2024. god. Naročito značajan događaj u naučnoj zajednici jeste formiranje Srpskog nuklearnog društva 2023. god [2].

Mađarska, Bugarska i Rumunija, poput Češke i Slovačke, imaju u energetskom miksu nuklearnu energiju, planiraju proširenje kapaciteta kako konvencionalnim tako i SMR i imaju razvijenu nauku i istraživanje u ovoj oblasti.

Holandija, Finska i Švedska poseduju nuklearne reaktore decenijama, te i potreban potencijal u ovoj oblasti. Švedska trenutno podržava primenu nuklearne energije i planira da je implementira kako bi dostigla do 2045.god. da potpuno izbaci fosilna goriva iz energetskog miksa. Trenutna izgradnja PALLAS reaktora u Holandiji za potrebe nuklearne medicine, istraživanja materijala i goriva održava ovu zemlju u nuklearnim tehnologijama. Takođe, Švedska i Finska prednjače u planiranju trajnog odlaganja istrošenog nuklearnog goriva u dubokim geološkim spremištima.

Litvanija, Letonija i Estonija planiraju korišćenje nuklearne energije najverovatnije iz SMR. Litvanija je imala dva reaktora u funkciji čija izgradnja je započeta 1978.god. za potrebe izvoza

električne energije. Međutim, u prvoj dekadi XXI veka, urađena je dekomisija oba reaktora.

Velika Britanija je 1990-tih donela odluku o napuštanju nuklearne energije te je posledično izgubila eksperte u ovoj oblasti koja je sad u najvećoj meri usredsređena na obradu otpada i dekomisiju. Trenutno, veće šanse za instaliranje i upotrebu imaju SMR nego klasične NE. Značajan potencijal leži u postrojenju za proizvodnju goriva Westinghouse Springfields.

B. SEVERNA I JUŽNA AMERIKA

Kanada je pinir u razvoju nuklearnih reaktora koji su kasnije instalirani u brojnim zemljama (Argentina, Kina, Indija, Koreja, Pakistan, Rumunija). Osamnaest od 19 reaktora se nalazi u državi Ontario koji predstavlja jednu od država sa najčistijom proizvodnjom energije u svetu. Pozitivno raspoloženje postoji i prema upotrebi SMR ali i konvencionalnih reaktora.

SAD poseduje značajne industrijske i kadrovske kapacitete usled činjenice da decenijama ima ključnu ulogu u razvoju nuklearnih tehnologija u svetu. Početkom XXI veka, akademska zajednica ali i investitori se vrlo angažuju u razvoju malih, mikro fisionih ali i fuzionih reaktora.

Meksiko poseduje višedecenijsko iskustvo u radu dva reaktora, te poseduje kapacitete za razmatranje daljeg razvoja nuklearne energije u zemlji, a posebno malih modularnih reaktora. Akademska zajednica je aktivna u praćenju razvoja nuklearnih tehnologija.

Kuba je imala iskustvo u izgradnji nuklearne jedinice koja je prekinuta nakon raspada SSSR-a.

Uprkos interesovanju, Peru i Bolivija bi imali poteškoće u izgradnji i korišćenju NE s obzirom na brojne vulkane i potencijalne zemljotrese, te su za njih mali modularni reaktori svakako bolja opcija.

Brazil dominira fazama nuklearnog goriva jer ima drugu po redu zalihu torijuma u svetu i osmu uranijuma. Razvoj znanja u nuklearnim tehnologijama je započeo još sredinom XX veka, pri čemu sada poseduje 4 istraživačka i dva konvencionalna reaktora. Poput Brazila, i Argentina poseduje višedecenijsko iskustvo u upravljanju NE s obzirom da poseduje 3 reaktora. Takođe, pionir je u dizajnu malog modularnog reaktora sa vodenim hlađenjem čija je izgradnja u toku.

C. AZIJA

Kina je ušla u nuklearni program decenijama kasnije u odnosu na ostale svetske sile poput SAD i SSSR. Međutim, krajem 2023.god. ova zemlja je imala 55 operativnih i 26 reaktora u izgradnji, što je najveći broj reaktora u izgradnji u svetu. Kina poseduje izuzetne naučne i industrijske kapacitete u ovoj oblasti sa značajnom orijentacijom ka razvoju reaktora IV generacije i novim tehnološkim rešenjima poput razvoja SMR hlađenih gasom. Takođe, prva komercijalna operacija visokotemperaturnog reaktora sa sljunačnim slojem je sprovedena krajem 2023.god. Slična situacija je i u Indiji koja planira da razvija nuklearne tehnologije sa ciljem da do 2047.god udeo nuklearne energije u miksu bude oko 9%.

Taivan iako ima značajno višedecenijsko iskustvo, trenutna zabrinutost javnosti zbog nuklearne sigurnosti i državna strategija ne ukazuju na trenutnu raspoloženosť ka proširenju kapaciteta za proizvodnju električne energije.

Japan je bio lider u Aziji u ovoj oblasti do akcidenta u Fukušimi 2011.god. sa 65 operativnih reaktora. Međutim, 2024. god je bilo operativno 12 od 44 dok je 21 bio u procesu dekomisije.

Južna Koreja početkom XXI veka postaje lider u projektovanju reaktora, ali i pokazuje izuzetan razvoj u oblasti novih tehnologija poput SMR.

Indija planira da do 2037. godine ima udeo od 9% nuklearne energije u svom energetsom miksu.

Bivše zemlje SSSR-a poput Kazahstana, Tadžikistana, Uzbekistana, Turkmenistana i sli. Imaju pristup nuklearnom gorivu ali ograničeno interesovanje prema fisionim tehnologijama. Rusija je nakon drugog svetskog rata vodeći lider u nuklearnim tehnologijama. Brojni nuklearni reaktori u zemlji ali i u drugim su izgrađena prema ruskoj tehnologiji. Trenutno, ova tehnologija se gradi na području Egipta, Belorusije, Bangladeša i Turske. Turska ima 8 reaktora u radu i u izgradnji, dok Jermenija poseduje 2 reaktora.

UAE su donele odluku da investiraju u NE sa reaktorima 3+generacije. Kao država sa 4 reaktora u radu i još 4 u planu, Ujedinjeni Arapski Emirati su prva arapska država i druga na Bliskom istoku koja ima potpuno funkcionalne NE. Takođe, prva je zemlja u svetu po proizvedenoj količini nuklearne energije po glavi stanovnika.

Iran i Pakistan poseduju višedecenijsku tradiciju razvoja, planiranja i korišćenja nuklearne energije. Trenutno je u Pakistanu instalirana NE kapaciteta 3,500 Mwe. Iran je zainteresovan i za nuklearnu desalinizaciju. Generalno, obe zemlje poseduju značajne naučne i stručne kapacitete u ovoj oblasti.

D. AFRIKA

Nivo obrazovanja u oblasti nuklearnih tehnologija u Africi je nisko. Prema korišćenju nuklearne energije, afričke države se mogu klasifikovati na [3]:

- one koje imaju višedecenijsko iskustvo u primeni nuklearne energije kao i sa adekvatnom istraživačkom strukturom poput Egipta i Južnoafričke Republike
- Mnogoljudne države sa stabilnom finansijskom situacijom poput Nigerije, Kenije, Alžira i Maroka koje bi imale interes za razvojem i primenom nuklearne energije, ali trenutno ne planiraju
- Države sa relativno malom populacijom i bez robusne električne mreže poput Gane koja je izrazila interesovanje za upotrebu SMR
- Zemlje koje nisu razmatrale nuklearnu energiju kao deo svog energetskog miksa.

IV. UMESTO ZAKLJUČKA

Ono što se može izvesti kao zaključak jeste da će primena konvencionalnih nuklearnih reaktora sa vodom kao hladiocem živeti jako dugo. Međutim, očekivan je pad ekspertize i znanja u ovoj oblasti. Naučna zajednica je stava da SMR sa vodenim hlađenjem ne mogu zameniti NE, već ove dve tehnologije mogu biti samo komplementarne. Pri tome, znanja potrebna za rad, dizajn i sprovođenje mera sigurnosti nisu iste za ove dve vrste reaktora.

Razvoj malih i mikroreaktora je poželjan ali ne i presudan za snabdevanje električnom energijom. Adekvatna pažnja mora biti usmerena na troškove, uključujući bezbedonosne aspekte. Naročito je značajno što zaštita mikroreaktora od krađe nuklearnog materijala može značajno da uveća troškove. Takođe, nemoguće je demonstrirati sigurnost malih reaktora bez eksperimentalnih potvrda. Dodatno, postavlja se i pitanje ekonomske prirode poput da li mali proizvođači koji bi mogli proizvesti mali ili mikro reaktor mogu investirati u značajna poboljšanja reaktora. Naravno, mali proizvođači mogu na tržištu nestati te se postavlja pitanje ko bi za dalji rad i izazove u radu takvog reaktora bio odgovoran. Jedno od rešenja jeste da veliki industrijski proizvođači konvencionalnih reaktora budu vlasnici i malih i mikro reaktora.

Takođe, tehnologije iskorišćenja torijuma iz prirode ili plutonijuma i uranijuma iz nuklearnog otpada nisu teme na kojima radi industrijski sektor, već uglavnom je reč o naučnim istraživanjima. Svakako, tehnologije koje koriste navedene vrste goriva bi trebale biti deo strateškog plana razvoja nuklearnih postrojenja.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] F. DAuria et al, "What is the future for nuclear fission technology? A technical opinion from the Guest Editors of VSI NFT series and the Editor of the Journal Nuclear Engineering and Design," Nucl. Eng. Design, vol 425, 113332, August 2024
- [2] I. Vrbanić, R. Simović, M. Sljivić-Ivanović, "Preface for special issue "NFT-06": Nuclear fission technology in Slovenia, Croatia and Serbia", Nucl. Eng. Design, Vol 428, November 2024, 113496
- [3] M. H. Hassan, "Preface for special issue NFT-31: Africa", Nucl. Eng. Design, Vol 428, November 2024, 113498

ABSTRACT

Approximately 75% of greenhouse gas emissions are attributed to the burning of fossil fuels for energy production. Achieving a reduced carbon footprint and advancing sustainable development—key goals of the "Green Agenda"—requires a shift in the energy mix towards certain sources. Nuclear power, alongside hydropower, is a vital source of low-carbon energy for many countries around the world. However, the reliance on nuclear energy for electricity generation varies significantly across nations; some countries depend heavily on it, while others do not utilize it at all.

A major concern is the sustainability of large-scale reactors, which have proven to be the most efficient means of energy generation. While the benefits of nuclear energy for humanity are undeniable, numerous challenges arise from market trends and political strategies, which can be difficult to predict or manage. This paper summarizes the outcomes and advancements in the development of nuclear fission.

TRENDS AND CHALLENGES OF FISSION NUCLEAR TECHNOLOGIES

Marija Šljivić-Ivanović, Maja Rajković, Kristina Pavićević,
Danica Jovašević, Ivana Jelić, Marija Janković