

DOI: [10.46793/CIGRE37.C3.08](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C3.08)**C3.08****NUKLEARNA ENERGIJA - IZAZOVI, MOGUĆNOSTI I RIZICI****NUCLEAR ENERGY - CHALLENGES, OPPORTUNITIES AND RISKS****Vesna Mišić*, Marina Tanasković, Svetlana Erjavec**

Kratak sadržaj: Ukidanjem moratorijuma na izgradnju nuklearnih elektrana u Srbiji, pokrenut je niz aktivnosti koje su otvorile mogućnosti za primenu nuklearne energije u cilju obezbeđivanja dugoročne energetske sigurnosti i stabilnosti ali i opasnosti i rizici koji prate ovu oblast. U radu je dat pregled aktivnosti i mogućih rešenja nuklearnih elektrana, tehnička i regulatorna pitanja povezana sa bezbednom, sigurnom i efikasnom primenom nuklearne energije uz uvažavanje svih aspekata životne sredine, kao i izazovi sa kojim se suočavamo u ovoj oblasti poput nedostatka adekvatne legislative, stručnog kadra, ekonomski i politički pritisak, ograničenost finansijskih resursa.

Ključne reči: nuklearna energija, energetska sigurnost, rizici

Abstract: With the lifting of the moratorium on the construction of nuclear power plants in Serbia, a series of activities were initiated that opened up opportunities for the application of nuclear energy in order to ensure long-term energy security and stability, but also the dangers and risks accompanying this area. The paper provides an overview of the activities and possible solutions of nuclear power plants, technical and regulatory issues related to the safe, secure and efficient application of nuclear energy while respecting all aspects of the environment, as well as the challenges we face in this area, such as the lack of adequate legislation, professional staff, economic and political pressure, limited financial resources.

Keywords: Nuclear Energy, energy stability, risks

1 UVOD

Dominantna tema u poslednjih nekoliko godina je obezbeđenje energetske samoodrživosti, racionalno, ekološki prihvatljivo i održivo snabdevanje potrošača električnom energijom koje je moguće u slučajevima gde najmanje 2/3 proizvodnje dolazi iz upravljivih baznih izvora. Postepeno iscrpljivanje raspoloživih rezervi lignita i pad kvaliteta iskopanog uglja ukazuju na to da će lignit u srpskoj elektroenergetici najverovatnije prestati da se koristi oko 2050. godine.

*Vesna Mišić, EMS AD, vesna.misic@ems.rs

Marina Tanasković, EMS AD, marina.tanaskovic@ems.rs

Svetlana Erjavec, EMS AD, svetlana.erjavec@ems.rs

Istovremeno, Međunarodna agencija za energetiku upozorava na konstantan rast potrošnje i struje i gasa. Svi ovi izazovi na globalnom nivou menjaju energetska tržišta, te i Srbija mora da uskladi svoje energetske investicije i projekte sa novim okolnostima.

Veliki talas smanjenja korišćenja uglja, usled ambicija za smanjenje emisije CO₂ odnosno gasova staklene bašte, je zahvatio ceo svet duži niz godina. Ipak, u 2025.g. Amerika vraća ugalj ponovo na scenu, kao odgovor na sve veću potrebu za električnom energijom koju zahteva veštačka inteligencija. Preispituju se mnoge investicije u obnovljive izvore (vetar i solar). U cilju ostvarivanja stabilne, ekonomski najpovoljnije energetske situacije, plan je da se identifikuju rezerve uglja, ukinu sve prepreke za rudarenje uglja i da prioritet izdavanju koncesija za eksploataciju na tim zemljištima.

Srbija se suočava sa velikim izazovom u donošenju strategije za izbor najbolje odluke u skladu sa dugoročnim interesima države, odnosno stanovništva i privrede, a uz to prateći globalne promene na energetskom tržištu i energetskoj politici. Uz sve navedeno, treba da izdrži razne geopolitičke interese i pritiske. Duži niz godina nameće se pitanje čime će se zameniti ugalj koji obezbeđuje 70% električne energije iz proizvodnje u srpskim termoelektranama. Termoelektrane predstavljaju bazne izvore energije, koji su upravljivi i čija se proizvodnja može planirati i prilagoditi potrebama potrošnje.

S druge strane, Srbija je potpisnik više dokumenata kojim se obavezala da obezbedi 30% energije iz obnovljivih izvora do 2050.g. Za razliku od baznih izvora, varijabilni izvori, među kojima su vetroelektrane i solarne elektrane, nisu upravljivi, već daju energiju u vremenu kada postoje odgovarajući vremenski uslovi, tako da se njihova proizvodnja ne može uskladiti često sa potrebama potrošnje, te bi bili potrebni značajni kapaciteti za skladištenje energije, čija gradnja, održavanje i dekomisija predstavljaju značajne finansijske, ekološke i bezbednosne rizike. Dakle, nije dovoljno samo povećati udeo obnovljivih izvora, nego bi trebalo obezbediti balansnu energiju iz stabilnih izvora. Uz to, imamo prognoze su da će rezerve uglja biti do 2050-2060.g. Projekti koji su u pripremi reverzibilna elektrana Bistrica, VE Kostolac, Biomasa i dr. nisu dovoljni.

Da bi se izbegle finansijske i političke posledice zavisnosti od uvoza energije, neophodno je dobro proučiti sve raspoložive primarne izvore i tehnologije, kao i tehnologije koje će biti uspostavljene i u narednim decenijama, sagledati njihov uticaj na životnu sredinu, tehnička svojstva, investicione troškove i utvrditi njihov uticaj na sigurnost snabdevanja i dostupnost energije.

Energetika predstavlja osnov privrednog i društvenog razvoja, i donošenje odluka obavezuje na vrlo ozbiljne pristupe u kompletnom energetskom sektoru. Posledice strateških odluka u energetici su dugoročne, složene, one moraju stalno da se preispituju sa stanovišta ostvarivanja strateških ciljeva. Opređeljivanje za ulazak u nuklearni program mora biti individualna odluka svake države, a sprovodi se pod nadzorom Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA), gde su jasno definisani mehanizmi za pomoć svakoj državi putem preporuka, smernica, monitoringa, kontrole.

Nakon višedecenijskog moratorijuma na primenu i razvoj nuklearne energije, prvi koraci su učinjeni u decembru 2015.g. kada je Narodna skupština usvojila Strategiju razvoja energetike, u kojoj se ukazivalo na to da bi za intenzivnije smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte bilo neophodno uvođenje nuklearnih postrojenja u energetiku Srbije do 2050.g. Tokom 2019. godine, Narodna skupština je usvojila tekst Zakona o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti

i bezbednosti, koji daje mogućnost vladi Srbije da izda saglasnost za gradnju nuklearnih postrojenja. Konačno, Narodna skupština Srbije usvojila je krajem novembra 2024.g. izmene i dopune Zakona o energetici, uvodeći značajne reforme u nacionalnu energetska politiku.

Ključnu promenu predstavlja ukidanje dugogodišnjeg moratorijuma na izgradnju nuklearnih elektrana, koji je bio na snazi od 1989. godine nakon nesreće u Černobilju. Ovim je otvoren put za primenu nuklearne energije, kao deo strateških planova Srbije. Takođe, usvojena je Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine uz razmatranje mogućnosti da se u energetska sektor Republike Srbije uvede i nuklearna energija. Prema Strategiji, procena je da će se potrebe za ugljem do 2040. godine prepoloviti u odnosu na 2021. godinu. S obzirom na to da proces energetska tranzicije podrazumeva izvesnu nesigurnost i stohastičku raspoloživost pojedinih obnovljivih izvora energije, preostale rezerve uglja bi trebalo da dobiju strateški karakter. Republika Srbija ne raspolaže rezervama nuklearnih sirovina, a postojeći zakonski i regulatorni okvir koji se odnosi na radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost je nedovoljan da bi omogućio izgradnju nuklearnih elektrana i sveobuhvatno regulisao sve faze životnog ciklusa nuklearne elektrane. Postojeći stručni i naučni kadar, iz oblasti nuklearnih nauka i ostalih povezanih naučnih i stručnih disciplina je skroman. Postojeće visokoškolske studijske programe koji se odnose na nuklearnu tehniku treba značajno unaprediti da bi imali kapacitet potreban za razvoj i uspostavljanja nacionalne infrastrukture za potrebe nuklearne energetike. Tehnologija je skoro u potpunosti uvozna, kao i goriva, ali nuklearne elektrane predstavljaju vrlo pouzdan izvor energije, pokrivaju bazno opterećenje, pa bi mogle da preuzmu ulogu postojećih termoenergetskih kapaciteta koji koriste ugalj. Dosadašnja iskustva su pokazala da se rizici javljaju u situacijama kada se ne poštuju sve propisane procedure i postupci za bezbedno funkcionisanje ovakvih postrojenja. Zbog toga su uvedeni strogi standardi nuklearne sigurnosti i nuklearne bezbednosti, kao i zaštite od jonizujućih zračenja, koji obezbeđuju siguran i pouzdan rad nuklearnih elektrana. Posebna pažnja mora biti usmerena ka upravljanju generisanim radioaktivnim otpadom i isluženim nuklearnim gorivom i uticaju ove tehnologije na životnu sredinu. [1]

U Strategiji je razmotren i scenario koji predviđa učešće nuklearne energije u energetska miksu Republike Srbije, sa konzervativnom prognozom puštanja u rad nuklearne elektrane 2045. godine. Srbija je 2024 u Francuskoj potpisala Memorandum o razumevanju, kojim je definisan okvir za dugoročnu saradnju u tranziciji ka niskougljeničnim tehnologijama. U Srbiji su do sada održane radionice o obuci kadrova potrebnih za nuklearnu energiju, kao i o tome kako uključiti energetska sektor Srbije u projekat izgradnje nuklearne elektrane[2] Potpisan je ugovor sa francuskom državnom elektroprivredom EDF i građevinskom projektantskom kompanijom Egis Industries za izradu preliminarne tehničke studije o mogućnosti mirnodopske primene nuklearne energije. Cilj preliminarne tehničke studije jeste predstavljanje raspoloživih tehnologija kao i preporuka dostupnih rešenja. Analiza treba da pokrije konvencionalne nuklearne elektrane generacije 3+, kao i napredne tehnologije poput malih modularnih reaktora (Small Modular Reactor, SMR). Reaktori četvrte generacije se neće obrađivati. Takođe, Javno preduzeće Nuklearni objekti Srbije je potpisalo Memorandum o razumevanju sa Kineskim institutom za atomsku energiju (China Institute of Atomic Energy – CIAE). Memorandum predviđa intenziviranje saradnje dve zemlje u oblasti dekomisije istraživačkog teškovodnog reaktora, upravljanja radioaktivnim otpadom, zaštite od zračenja i razmene stručnog znanja i iskustva.

Kada se država u svojoj Strategiji odluči za primenu nuklearne energije, pripremna faza traje nekoliko godina i u ovoj fazi se razvija regulatorni okvir za nuklearnu energetiku, planiraju se potrebni kadrovi i počinje njihovo obrazovanje, izvode se istražni radovi u vezi sa izborom

potencijalnih lokacija, priprema se prenosna mreža u elektroenergetskom sistemu, informiše se javnost o rezultatima analiza i istraživanja o uticaju nuklearne energije na ekonomski razvoj, energetska sigurnost, bezbednost i životnu sredinu. Po završetku ove faze počinje izbor tehnologije i nuklearnog gorivnog ciklusa, i zatim počinje gradnja nuklearnog postrojenja. [3]

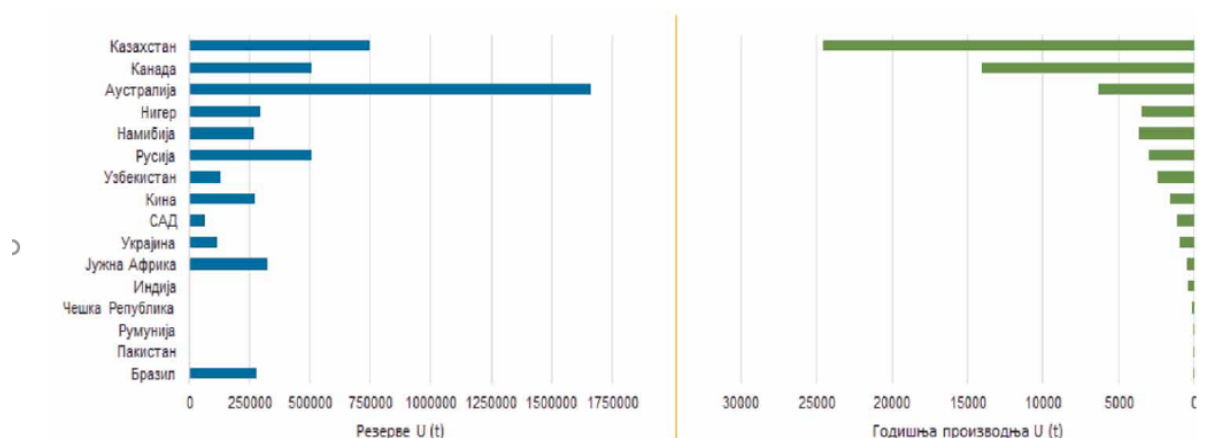
Kada se dođe do faze izbora tehnologije i nuklearnog gorivnog ciklusa, tada bi već trebalo imati odluku o tome da li se gradi tradicionalna nuklearna elektrana, instalisane snage oko 1.000 MW(e) ili nekoliko jedinica malih modularnih reaktora, koji će u zbiru dati sličnu snagu.

Međunarodna agencija za atomsku energiju (International Atomic Energy Agency - IAEA), propisuje preporuke, ukoliko jedna zemlja želi da se posveti izgradnji nuklearne elektrane na svojoj teritoriji, mora: da prepozna da ova odluka donosi dugogodišnje obaveze i posvećenost nuklearnom programu; pripremi celokupnu nacionalnu infrastrukturu za ovaj poduhvat, uključujući i javnu raspravu; da pripremi i razvije neophodne zakonske, kadrovske, finansijske, nadzorne, operativne resurse kao i stručne i naučne kadrove, koji će omogućiti siguran i bezbedan dugogodišnji rad nuklearne elektrane i bezbedno odlaganje istrošenog goriva. Pripremni period traje i do 20 godina, dok sama izgradnja traje od 5 do 10 godina. Razvoj stručnih i naučnih kadrova mora da bude deo dugoročnog strateškog energetskog plana.

Dugoročna podrška mora da dođe od države uz obezbeđenje neophodnih sredstava za fakultete i za studente. Trebalo bi dopuniti postojeće programe na tehničkim i prirodno-matematičkim fakultetima, opremiti laboratorije, obezbediti stipendije za studente na svim nivoima, razviti nove programe i predmete (Nuklearna i radijaciona hemija, nuklearna i reaktorska fizika, detekcija zračenja, zaštita od zračenja, i dr.). Sve ovo se odvija u saradnji sa institutima, kroz letnje prakse, aktivno učestvovanje profesora i naučnih saradnika u vođenju postdiplomaca.[4]

2. NUKLEARNA ENERGIJA

Uranijum je obeležio čitavu nuklearnu eru. To je metal srebrnaste boje, veoma velike gustine (19 g/cm³), slabo radioaktivan. Po radiotoksičnosti spada u IV grupu – niska radiotoksičnost. Najteži je prirodni element na Zemlji (redni broj 92 u Periodnom sistemu), sa značajnim količinama u Zemljinoj kori. Spada u rasejane elemente i bogata nalazišta su retka. U prirodi se javlja u obliku stotinak minerala, ali i kao sastojak niske koncentracije u lignitima, bituminoznim škriljcima i fosfatnim rudama. Uranijum se proizvodi u mnogim krajevima sveta. Na slici 1 su prikazane utvrđene rezerve i svetska proizvodnja Uranijuma



Slika 1: Utvrđene rezerve i svetska proizvodnja Uranijuma

Na uranijumu je 1896. godine otkrivena radioaktivnost, a 1938–1939. godine i nuklearna fisija. Prva nuklearna elektrana na svetu je puštena u pogon 1954.g. u Obninsku u Sovjetskom savezu, a svoj životni vek završila 2002. nakon 70 godina rada. U svetu je trenutno aktivno 440 nuklearnih reaktora, i još 66 je u izgradnji. Najveća nuklearna elektrana u Evropi je Zaporožje u Ukrajini. Od oko 100 nuklearnih reaktora, koliko ih ima u Evropi, najviše, njih 56, nalazi se u Francuskoj, Španiji, Češkoj, Slovačkoj, Belgiji. Takođe, u državama regiona je trenutno aktivno devet reaktora - Mađarska četiri, po dva u Rumuniji i Bugarskoj, a jedan je u Sloveniji.

Fisija je nuklearna reakcija u kojoj se teško atomsko jezgro, bombardovano neutronom, deli na dva fragmenta uz emisiju nekoliko neutrona i ogromne količine energije. Fisija je poznata samo kod teških elemenata. Otkrivena je na uranijumu, koji je i danas ključna sirovina kod njene primene. Nuklearna energija je energija ogromne gustine, u poređenju s onom koju daju konvencionalni izvori kakvi su fosilna goriva. Poređenje je dato u tabeli 1.

Tabela 1: Gustine energije iz pojedinih izvora

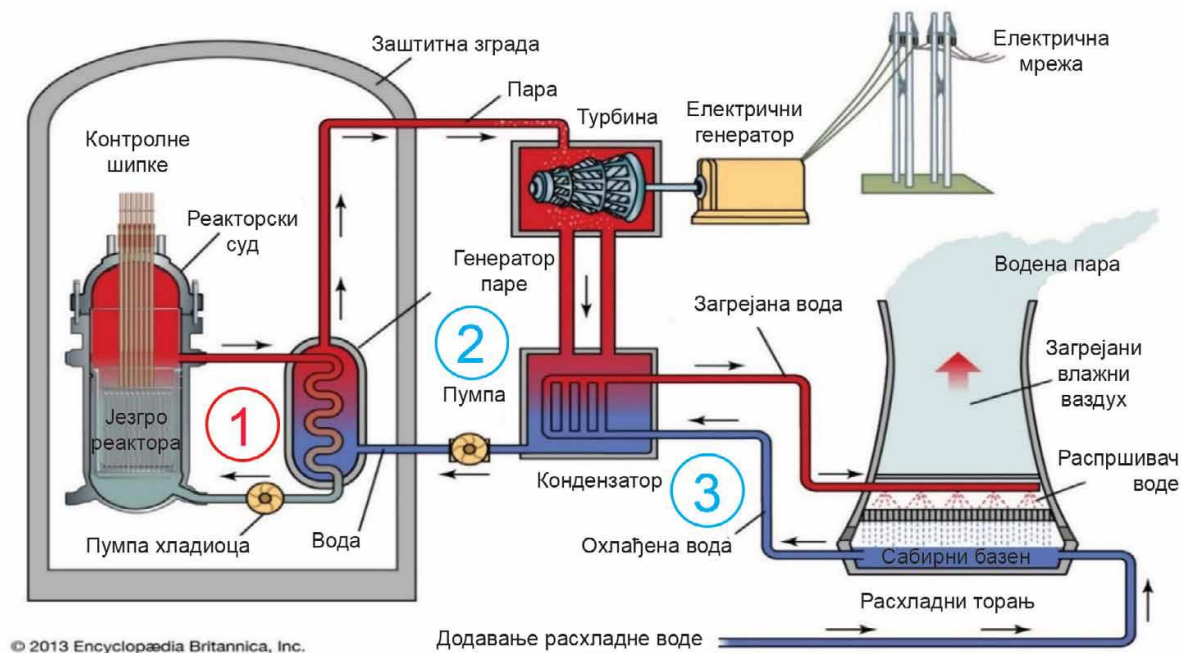
Vrsta energije (gorivo)	Gustina	Poređenje energije
Fisija (235U)	79 400 000 MJ/kg U	EDFIS / ED($C + O_2 \rightarrow CO_2$) $\approx 2\,500\,000$
Ugalj ($C + O_2 \rightarrow CO_2$)	33 MJ/kg	

Fisija jezgara je jedinstvena po tome što se dešava na vrlo malim energijama, i bombardujući neutroni oslobađaju nove neutrone. Ovi se mogu upotrebiti za nove fisije i time se omogućava da se reakcija odvija sama od sebe, tj. kao lančana reakcija. Lančana reakcija fisije se odvija u nuklearnom reaktoru.

Nuklearni reaktor je osnovna komponenta nuklearne elektrane u kojoj se oslobađa ogromna količina toplotne energije kao posledica kontrolisane samoodržive lančane reakcije fisije (raspadanja) teških atoma. Izotop uranijuma U-235 je jedini fisibilni element u prirodnom stanju. Nalazi se u rudi uranijuma koja je mešavina težeg U-238 (99,3%) i lakšeg U-235 (0,7%). I uranijum U-238 može biti upotrebljen kao nuklearno gorivo, ali se prethodno mora bombardovanjem neutronima pretvoriti u plutonijum 239 (Pu-239), koji je podložan raspadu (fisiji). Na isti način i element torijum 232 (Th-232) bombardovanjem neutronima prelazi u fisibilni uranijum-233, koji je takođe veštačko nuklearno gorivo. Energetske rezerve uranijuma i torijuma u svetu su mnogostruko veće od energetskih rezervi fosilnih goriva.

Nuklearna elektrana je vrsta elektrane kojoj je izvor toplote nuklearni reaktor u kome se toplota dobija cepanjem (fisijom) ili spajanjem (fuzijom) jezgara atoma pojedinih elemenata. Toplota dobijena nuklearnom fisijom u reaktoru se koristi da proizvede vodenu paru koja ekspanzijom u parnoj turbini pokreće njen rotor, a ovaj pokreće rotor generatora električne energije.

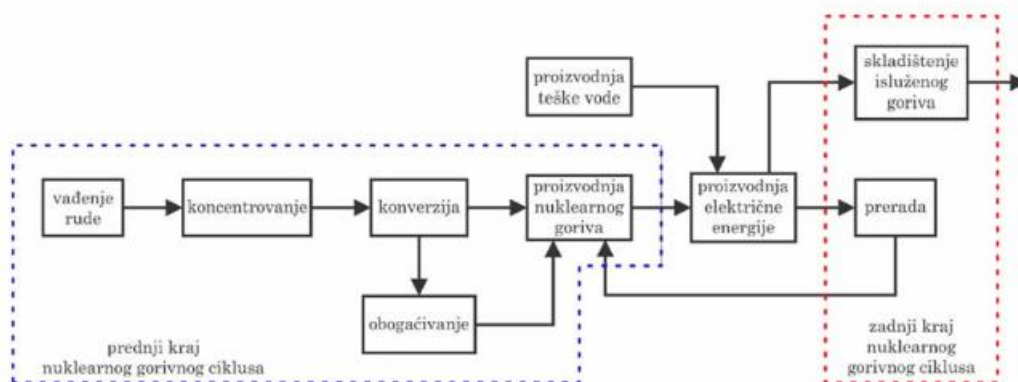
Na slici 2 je prikazan princip rada nuklearne termoelektrane sa najčešće primenjenim reaktorom hlađenim vodom pod pritiskom u zatvorenom ciklusu (1), čija toplota u izmenjivaču toplote (generatoru pare) ispari vodu na nižem pritisku i obavi pretvaranje toplotne energije u mehaničku u posebnom ciklusu (2), a generator ovu u električnu. Višak neiskorišćene toplote kondenzacije u parnom ciklusu odvodi se u okruženje otvorenim (protočnim) ili zatvorenim (3) sistemom hlađenja. Nuklearna termoelektrana u okruženje ispušta veću količinu otpadne toplote nego konvencionalna termoelektrana.



Slika 2: Shema nuklearne elektrane sa reaktorom hlađenim vodom pod pritiskom

Nuklearni gorivni ciklus je složen industrijski proces koji predstavlja skup svih aktivnosti povezanih za primenom nuklearne energije. Aktivnosti u okviru nuklearnog gorivnog ciklusa su: istraživanja ležišta uranijuma, iskopavanje i prerada rude, konverzija rude, obogaćivanje uranijuma, proizvodnja nuklearnog goriva, izgaranje goriva u nuklearnom reaktoru, skladištenje isluženog nuklearnog goriva u nuklearnoj elektrani, prerada isluženog goriva i odlaganje radioaktivnog otpada nastalog u okviru nuklearnog gorivnog ciklusa.

Radioaktivni otpad iz nuklearnog gorivnog ciklusa nastaje prilikom iskopavanja rude uranijuma i njene obrade u procesu dobijanja metalnog uranijuma, uranijum oksida ili uranijum heksafluorida, zatim, otpad nastaje u procesu obogaćivanja izotopske smeše uranijuma, sinteze nuklearnog goriva, izgaranja u nuklearnom reaktoru i na kraju, u procesu uklanjanja isluženog nuklearnog goriva iz nuklearnog reaktora, njegovog skladištenja, obrade i odlaganja koje predstavlja kraj nuklearnog gorivnog ciklusa 1. Shematski prikaz nuklearnog gorivnog ciklusa dat je na Slici 3.

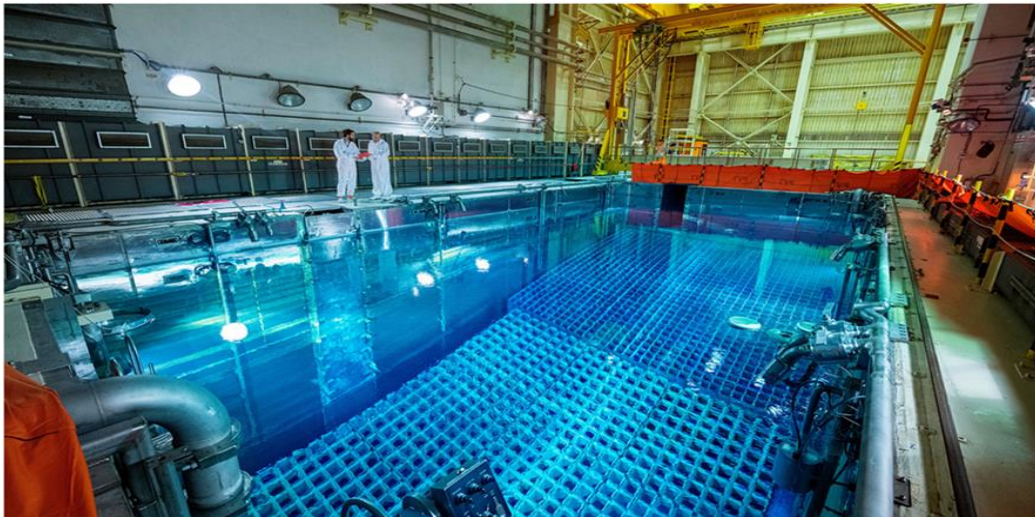


Slika 3: Shematski prikaz nuklearnog gorivnog ciklusa

Kako bi uranijum bio pripremljen za upotrebu u nuklearnom reaktoru, neophodno je da prođe fazu iskopavanja i mlevenja rude, zatim konverziju, obogaćivanje i proizvodnju nuklearnog goriva, tj. spajanja u gorivne elemente i sklopove. Ove faze predstavljaju „prednji kraj“ nuklearnog gorivnog ciklusa. Nakon završetka upotrebe nuklearnog goriva u nuklearnom reaktoru, za proizvodnju električne energije, nuklearno gorivo postaje isluženo, a to je u energetskim reaktorima 1–3 godine, ono postaje neupotrebljivo, jer se u njemu smanjio udeo fisilne komponente ispod određene granice, uz istovremeno nagomilavanje mnoštva fisionih produkata, od kojih neki imaju velike efikasne preseke na apsorpciju sporih neutrona, čime ovi postaju neupotrebljivi za fisiju. Kao takvo može se smatrati resursom iz kog se preradom izdvajaju uranijum i plutonijum koji se mogu ponovo koristiti u nuklearnom gorivnom ciklusu ili se može proglasiti radioaktivnim otpadom i sa njime kasnije postupati kao i sa drugim radioaktivnim otpadom. Isluženo nuklearno gorivo može se, po uklanjanju iz reaktora, skladištiti a potom ili prerađivati i ponovno vraćati u nuklearni gorivni ciklus ili odložiti kao radioaktivni otpad. Vremenski period skladištenja radioaktivnog otpada kreće se od veoma kratkog, reda nekoliko dana, dok se ne sakupi dovoljna količina za njegov tretman ili odlaganje, pa do veoma dugog perioda, od nekoliko decenija, obično u slučajevima kada pitanje odlaganja radioaktivnog otpada nije rešeno.

Skladištenje podrazumeva privremenost postupka i odnosi se na kraćezivučće radioizotope. Odlaganje je trajno odlaganje, odnosi se na dugoživučće radioizotope nuklearnog otpada. Poseban problem je skladištenje aktinoida koji se stvaraju tokom rada reaktora. Za njihov raspad na bezbedan nivo trebalo bi sačekati bar 100.000 godina. Po isteku skladištenja otpad se trajno odlaže. Trebalo bi da odlaganje bude toliko pouzdano da onemogući značajnije prodiranje radioaktivnosti u biosferu u narednih 100.000 – 1.000.000 godina. Problem se uglavnom svodi na odabir terena. Ima više koncepata. Po jednom, kontejneri se prenose u posebna „grobља“, tj. duboke iskope u formacijama od granita ili gnajsa, u geološki stabilnim stenama daleko od podzemnih tokova, u napuštenim rudnicima. Pogodnost mu je što je otpad dobro izolovan, a mane nemogućnost praćenja stanja kontejnera kao i eventualna mogućnost popuštanja betonskih blokova i migracije izotopa. Po drugom, solidifikovani otpad se odlaže u plitke iskopine sa debelim betonskim zidovima, prekrivenim s nekoliko slojeva zemlje.

Isluženo gorivo sadrži preko 40 elemenata, od kojih su većina radioaktivni. Preradi se ne pristupa odmah po vađenju gorivnih elemenata. Prvo se sačeka da se raspadne najveći deo kratkoživučćih fisionih proizvoda („hlađenje“). Zračenje dovodi i do zagrevanja, koje opada po sličnom zakonu, pa se gorivo mora hladiti, što se obično izvodi potapanjem u bazene s vodom u rejonu reaktora (oko 10 godina). Isluženo gorivo je ekološki kritična tačka, što uključuje i vađenje i odležavanje i kasnije preradu. Glavni izotopi koji ostaju nakon deset godina hlađenja su Aktinoidi, teški elementi u koje spadaju i Th i U. Svi su radioaktivni, sa vremenima poluraspada od 30 godina do preko 23 miliona godina (U236). [5]



Bazen za istrošeno gorivo
Izvor: NEK

Slika 4: Skladištenje izluženog goriva u bazenu-hlađenje

Nacionalne politike i strategije država koje koriste nuklearne elektrane za proizvodnju električne energije definišu na koji način će se postupati sa isluženim nuklearnim gorivom po njegovom uklanjanju iz nuklearnih reaktora. Dok se neke države odlučuju za njegovu preradu, značajna količina isluženog nuklearnog goriva je trenutno uskladištena na lokacijama nuklearnih elektrana u kojima je korištena čekajući puštanje u rad odgovarajućih skladišta ili odlagališta. Zajedno, navedene aktivnosti formiraju „zadnji kraj“ nuklearnog gorivnog ciklusa. Radioaktivni otpad koji nastaje u tzv. „prednjem kraju“ nuklearnog gorivnog ciklusa je uglavnom niske i srednje aktivnosti. Radioaktivni otpad koji nastaje tokom rada nuklearne elektrane spada u veoma nisko, nisko, srednje i visoko aktivni radioaktivni otpad. Na kraju nuklearnog gorivnog ciklusa, po uklanjanju isluženog nuklearnog goriva iz nuklearnog reaktora, nastaje srednje ili visoko aktivni radioaktivni otpad kao i značajne količine isluženog nuklearnog goriva. Posebno značajne količine visoko aktivnog otpada nastaju tokom prerade i obrade isluženog nuklearnog goriva-[6].

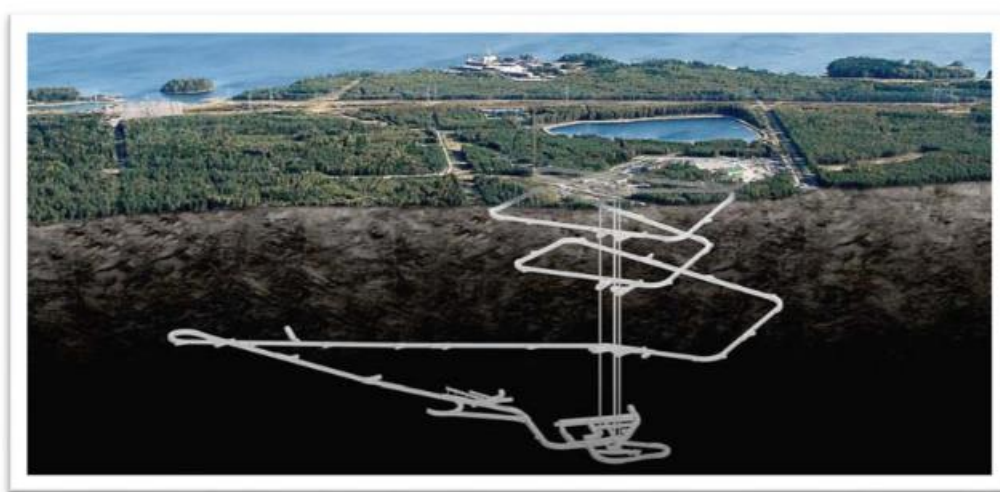
Otpad iz nuklearne dekomisije nastaje u završnoj fazi nuklearnog gorivnog ciklusa. Određeni delovi nuklearnog reaktora postaju radioaktivni tokom rada reaktora usled neutronske aktivacije. U fazi dekomisije nastaju velike zapremine radioaktivnog otpada različitih klasa.

Zapremina otpada koja nastaje u dekomisiji jednog energetskeg reaktora kreće se od 10.000 t do 15.000 t. Samo jedna desetina ove zapremine odnosi se na otpad srednje i visoke aktivnosti, dok je ostatak radioaktivni otpad niske aktivnosti.

U ranim danima razvoja i korišćenja nuklearne energije, nije posvećena dovoljna pažnja problematici radioaktivnog otpada i kao posledica ovoga danas imamo značajne količine istorijskog radioaktivnog otpada koji često nije čuvan u adekvatnim uslovima. Skladištenje otpada predstavlja najozbiljniji problem nuklearne energetike. IAEA procenjuje da je oko 260.000 tona istrošenog nuklearnog goriva u privremenom skladištu širom sveta od 2016. godine, većina na lokacijama reaktora. Oko 70 odsto istrošenog goriva u svetu nalazi se u rezervoarima za skladištenje, a ostatak u kontejnerima od betona i čelika [7].

Finska je prva zemlja koja će dugoročno zakopati istrošeno nuklearno gorivo duboko pod zemljom odnosno koja je našla rešenje za 100.000 godina unapred. Nedavno je završen probni

rad prvog u svetu Geološkog odlagališta za istrošeno nuklearno gorivo, postrojenje za inkapsulaciju nuklearnog otpada, čime je otvorena mogućnost sigurnijem i dugotrajnijem odlaganju visoko radioaktivnog materijala, dok se sama radioaktivnost ne spusti na bezbedan nivo tokom niza decenija. Inkapsulacija je tehnološki proces kojim se visoko radioaktivni otpad, poput istrošenih gorivnih šipki iz nuklearnih reaktora, hermetički zatvara u specijalno dizajnirane kontejnere otporne na koroziju i mehanička oštećenja. Potom se kontejneri transportuju i odlažu u duboka geološka skladišta, smeštena u stabilnim stenovitim formacijama (specijalne rupe obložene bentonitnom glinom, koja pruža dodatnu zaštitu od potencijalnog curenja radioaktivnih materijala) na velikim dubinama između 400 i 450 metara. Izgradnja odlagališta je koštala milijardu evra. Druge zemlje, uključujući Veliku Britaniju, SAD, Švedsku, Francusku i Kanadu, već traže slično rešenje.[8]



Slika 5: Primer rešenja za geološko odlagalište radioaktivnog otpada (Onkalo, Finska)

Nuklearnih elektrana ima više od 400 na globalnom nivou, ali nisu još osigurana mesta skladištenja. Nemačka, u odnosu na druge države, zna sa koliko otpada raspolaže, ali još uvek nema trajno rešenje njegovog uklanjanja. Kao i gotovo sve druge zemlje koje su koristile ili nastavljaju da koriste nuklearne elektrane, Nemačka još nije pronašla mesto gde bi takav otpad, posebno istrošeni štapovi za sagorevanje, mogli bezbedno da se skladište. Trenutno se nuklearni otpad drži u privremenim skladištima na lokacijama napuštenih elektrana, ali zakon nalaže da nuklearni otpad mora da se odlaže i hiljadama godina čuva u bezbednim podzemnim skladištima. A i demontaža dvadesetak nuklearnih elektrana takođe će potrajati. Demontaža elektrana koje su povučene iz upotrebe je odgovornost operatera. Trenutno se računa da demontaža ne može da se završi ni 10 do 15 godina nakon izdavanja dozvole. SAD trenutno nemaju nikakav program razvoja takvih mesta, nakon što su decenijama trošile milijarde dolara na lokaciju na planini Juka u Nevadi.[9]

Što se tiče SMR, jako malo studija je pokrilo upravljanje tokovima nuklearnog otpada i njegovo zbrinjavanje. Jednostavne mere poput procena mase potrošenog goriva ne daju dovoljan uvid u potrebu za resursima za skladištenje, pakovanje i deponovanje potrošenog goriva i drugog radioaktivnog otpada. Postoje studije sa indikacijom odn. zaključcima da, zbog svoje manje veličine, mali modularni reaktori trpe veće propuštanje neutrona nego konvencionalni. Studija je takođe otkrila da će SMR-ovi generisati više potrošenog nuklearnog otpada po jedinici

energije i da će biti daleko komplikovaniji za upravljanje. Konstrukcije nekih malih modularnih reaktora podrazumevaju upotrebu hemijski egzotičnih goriva i rashlađivača, od kojih mogu nastati vrste otpada koje je teško deponovati. Međutim, određeni proizvođači osporavaju studiju i tvrde da se njihovom tehnologijom generiše manje otpada po jedinici energije nego u velikim reaktorima.

Trajno i bezbedno skladištenje radioaktivnog otpada je nerešen zadatak u čitavom svetu. Procenjeni troškovi izgradnje konačnog skladišta iznose 3,5 milijardi evra.[10]

4. RAZVOJ NUKLEARNIH REAKTORA

Nuklearni reaktori II generacije bili su prva serija reaktora projektovanih i namenjenih širokoj komercijalnoj upotrebi. Razvijeni su na iskustvima stečenim korišćenjem reaktora I generacije uz značajna usavršavanja, uključuju reaktore sa obogaćenim uranijumom kao gorivom i lakom vodom kao moderatorom i hladiocem. U II generaciju spadaju i specifični reaktori sa grafitom kao moderatorom i sa obogaćenim uranijumom kao gorivom. Reaktori II generacije su projektovani sa ciljem da budu ekonomični i pouzdani sa tipičnim radnim vekom oko 40 godina. Oni su pušteni u rad od kraja 1960-ih godina i danas su izvori toplotne energije u većini nuklearnih elektrana koje su u pogonu u svetu. Na iskustvu stečenom tokom njihovog rada, nađena su rešenja za produženje radnog veka za 20 i više godina u velikom broju reaktora II generacije. To iskustvo je iskorišćeno i za otklanjanje uočenih nedostataka za razvoj nove generacije reaktora, posebno sa stanovišta obezbeđenja sigurnosti pogona, jer su sva tri velika udesa na nuklearnim elektranama (Černobilj, Ostrvo tri milje i Fukušima) nastala upravo na reaktorima II generacije. Unapređene verzije koje pripadaju trećoj generaciji reaktora raspoložive su na tržištu od sredine 1990-ih i najnovije verzije (Generacija „3+“), usavršenih i poboljšanih sa stanovišta ekonomije i sigurnosti pogona koje su trenutno u žiži interesovanja tržišta za nove nuklearne elektrane. Trenutno većina reaktora u pogonu pripada drugoj generaciji, pošto je veliki broj reaktora prve generacije već odslužio svoj radni vek i povučen je iz pogona, dok reaktori četvrte generacije tek treba da dostignu tehnološku zrelost krajem ove decenije. Stoga će one zemlje koje nisu bile u prilici da grade nuklearne elektrane sa reaktorima prethodnih generacija moći da računaju na sve savršeniju, sigurniju i ekonomičniju tehnologiju novih koncepcija nuklearnih reaktora.

Mali modularni reaktori (SMR) su posebna tehnološka koncepcija reaktora III generacije. Dok je uobičajena jedinična snaga reaktora za nuklearne elektrane sve veća (reda 3000 MWt i više), poslednjih godina su imali modularni reaktori (SMR) i mikroreaktori stekli značajnu pažnju. Ovi reaktori su malih dimenzija, i, za razliku od velikih reaktora na elektranama, mogu biti kompletirani u fabrici, lako dopremani na lokacije i dodavani kao moduli u slučaju rasta potrebe za većom instalisanom snagom nuklearne elektrane. Samim tim je moguća ušteda u početnim investicijama. Takođe, pošto je njihova koncepcija jednostavnija, imaju manje komponentata, te manje održavanja i manje radnika. Zbog tih karakteristika modularni reaktori su u brzom razvoju širom sveta, ali su tek dva u pogonu i koriste se za snabdevanje električnom energijom sa plovećih barži u Rusiji (Lomonosov 35 mW), za proizvodnju toplote u Kini (210 MW).

U IV generaciju spadaju koncepcije nuklearnih reaktora koje su trenutno u fazi intenzivnog istraživanja usmerenog na dostizanje maksimalne sigurnosti, što veće efikasnosti, nižih troškova i posebno na razvoj održivog zatvorenog gorivnog ciklusa. U njih će biti ugrađena sva najnovija naučna i tehnološka iskustva, posebno u pogledu sigurnosti, tako da se očekuje da će to biti apsolutno bezbedan sistem.

Koncepcija ima raznih, uključujući reaktore i sa termalnim neutronima (termalni reaktori) i reaktore sa brzim neutronima (brzi reaktori). Reaktori sa brzim neutronima ne mogu koristiti vodu za hlađenje, jer bi, u sudarima neutrona sa jezgrom vodonika u vodi bili usporavani i gubili kinetičku energiju, a fisioni materijal u jezgri reaktora bi morao biti koncentrisaniji da bi bila održana lančana reakcija. Za brzi reaktor je karakteristično da, uz proizvodnju toplotne energije, može da proizvede više fisionog materijala nego što ga potroši, pa se stoga naziva i oplodnim. Naime, pošto brzi reaktor brze neutrone koji nastaju fisijom koristi direktno (bez usporavanja), može biti konfigurisan tako da troši i fisibilne produkte iz isluženog nuklearnog goriva izvađenog iz reaktora sa termalnim neutronima. To znači da bi gorivo u jezgri reaktora konfigurisanom na odgovarajući način moglo biti samoodrživo i ne bi zahtevalo novi materijal sve dok se oplodni materijal potpuno ne utroši. Upotreba tečnog metala umesto vode kao hladioca omogućava da reaktor radi pod atmosferskim pritiskom, smanjujući time rizik od ispuštanja fisionih produkata u atmosferu.

Kina je postigla značajnu prekretnicu u tehnologiji nuklearnih reaktora uspešnim puštanjem u rad prvog u svetu komercijalnog nuklearnog reaktora IV generacije.[11]

5. NUKLEARNA ALIJANSA EU

Članice tzv. Nuklearne alijanse Evropske unije (Belgija, Bugarska, Hrvatska, Češka, Francuska, Mađarska, Holandija, Rumunija, Slovačka, Slovenija i Švedska) su februara ove godine (2025) apelovale na Evropsku komisiju da nužno uvrsti nuklearnu energiju u paket mera, ukazujući su na to da nuklearni reaktori obezbeđuju stabilnost mreže i omogućavaju pouzdano snabdevanje niskougljeničnom energijom i van granica država koje ih poseduju. U tom kontekstu, ocenile su da će bez nuklearne energije biti teško, ako ne i nemoguće, ostvariti klimatske ciljeve i dostići neto nultu emisiju ugljenika do 2050. godine, a da pri tome energija ostane cenovno pristupačna za građane[12]. Nuklearna energija je bazna energija, stabilna, i ne zavisi od vremenskih prilika, zbog čega i jeste postalo jasno da je potrebno obezbediti energiju koja će biti kontinuirana. Predlog alijanse je da Evropska komisija uspostavi okvir za olakšanu izgradnju novih nuklearnih postrojenja. Poseban akcenat stavljen je na ubrzani razvoj i uvođenje malih modularnih reaktora (SMR), za koje se veruje da mogu biti ključna karika u balansiranju proizvodnje i potražnje energije na kontinentu.

Bugarska i SAD proširuju saradnju na izgradnji nove nuklearne elektrane u Kozloduju. Kazahstan, kao jedan od najvećih svetskih proizvođača urana, čini oko 40 odsto globalne proizvodnje, već godinama planira uvođenje nuklearne energije u svoj energetske portfolio. Poljska, u kojoj je veći deo proizvodnje električne energije iz uglja, planira kroz strateško partnerstvo sa Japanom i Holandijom da ulaže u razvoj nuklearne energije. Slovenija razmatra proširenje NE Krško. Mnoge zemlje se opredeljuju za SMR.

6. ZAKLJUČAK

Srbija ne može izbeći promene, pa blagovremeno mora tražiti odgovore na važna pitanja o tome kako održati prihvatljivu energetske zavisnost i rizike vezane za sigurnost snabdevanja, kako obezbediti finansijsku podršku, šta očekivati od EU i njenog Zelenog plana.

Idealni energetske izvori ne postoje: svaki nosi neki rizik po stanovništvo, upitnu efikasnost, proizvodnu cenu, štetne emisije kao i količinu i tretman proizvedenog otpada. Sve je više zemalja, koje se u nameri da obezbede energetske stabilnost, okreću nuklearnoj energetici. Srbija trenutno nema potrebnu infrastrukturu za izgradnju nuklearnih elektrana, ali mora da ih

uključi u dugoročno planiranje. Država mora da se direktno uključi u dugoročno investiranje u stručne i naučne kadrove, kao i da poveća ulaganja u istraživački rad.

Nuklearna energija je dugoročna aktivnost, i kada se otpočne, svako odustajanje i prekidanje neke faze snosi velike rizike i troškove. Katastrofe u Černobilju i Fukušimi pokazale su u kojoj meri nuklearne elektrane mogu biti opasne za okruženje i to je dovelo do zatvaranja manjeg broja nuklearnih elektrana pre isteka njihovog radnog veka.

Ukoliko bi se Srbija opredelila za korišćenje nuklearne energije, treba imati u vidu da od donošenja odluke do priključenja nuklearne elektrane na mrežu najčešće prođe i po nekoliko decenija. U međuvremenu, odmah treba da se počne sa pripremnim aktivnostima, jer za njih je potrebno duže vreme.

Dostignuća u polju nuklearne energetike i dosadašnja iskustva u eksploataciji omogućuju da se utvrde rizici kojima nuklearne elektrane izlažu životnu sredinu i živote ljudi. Treba imati u vidu da pokretanje nuklearnog programa u zemljama koje nemaju dovoljnu podršku domaće struke i gde donosioci odluka sagledavaju kratak rok i uže interese, može predstavljati značajan rizik. Ovi rizici se umanjuju obnavljanjem stručnih znanja i dostizanjem kadrovskih potencijala kakvim se raspolagalo nekada.

Oslanjanje na nuklearne elektrane podrazumeva dugoročno i neraskidivo povezivanje sa isporučiocima i tehnologijama, i time se stvara finansijska i tehnička zavisnost, koja neposredno utiče na celo društvo. Zbog toga je od izuzetnog značaja od starta obezbediti značajno učešće domaće nauke i struke u svim fazama odlučivanja, izgradnje, rada i dekomisije.

Najveći problem savremene nuklearne energetike je skladištenje nuklearnog otpada i dekomisija, koji se iskazuje u ceni nuklearne energije. U tom smislu planiranje novih kapaciteta trebalo bi da započne razmatranjem problema odlaganja otpada i dekomisije. Investicije u nuklearne elektrane su daleko veće od investicija u termoelektrane i obnovljive izvore. Najveći uticaj na cene električne energije iz nuklearnih elektrana ima cena kapitala i finansijski rizici. Investicioni troškovi su kompenzovani niskom cenom nuklearnog goriva, visokim stepenom godišnjeg korišćenja, radom bez emisije CO₂. Na odluke o nuklearnim elektranama veliki uticaj ima okolnost da su troškovi proizvodnje u prvom periodu rada opterećeni otplatom kredita.

Takođe, negativan stav javnosti prema nuklearnim elektranama i njena informisanost su faktori koje treba imati u vidu kada se razmatra uvođenje ovih elektrana.

Na tržištu se nude elektrane značajno usavršene u odnosu na prethodnu generaciju NE, u pogledu sigurnosnih sistema, poboljšanih pogonskih osobina, efikasnijeg termodinamičkog ciklusa, boljeg iskorišćenja goriva, produženog perioda eksploatacije između dva remonta, značajno produženje životnog veka na 60 i više godina i niz drugih poboljšanja. Moguć je i širok izbor dijapazona snaga, od modularnih „mini“, pa do jedinica snage 1600 MW. Sadašnja realnost ipak nalaže da se pažnja usredsredi na elektrane III i III+ generacije koje će dominirati kao kandidati za gradnju do 2050. godine.

Ovakve veće jedinične snage predstavljaju krupan investicioni zalogaj za zemlju poput naše, pa treba razmotriti i mogućnost privredne saradnje balkanskih zemalja sa idejom zajedničkog planiranja i učešća u gradnji nuklearnih energetskih postrojenja.

Razvoj stručnog kadra trebalo bi da omogućí da se do energetskih strateških opredeljenja dolazi na osnovu objektivnih analiza i konstruktivne saradnje domaće nauke i struke sa svim zainteresovanim stranama unutar srpskog društva. Odluke ne smeju da budu ishitrene, pod pritiskom i treba da se donose u najboljem interesu srpskog društva.

Krajnji cilj je obezbediti pouzdano, održivo snabdevanje električnom energijom uz najviše standarde u očuvanju životne sredine i zdravlja stanovništva.

LITERATURA

- [1] STRATEGIJA razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine, "Službeni glasnik RS", broj 94 od 28. novembra 2024
- [2] Institut za nuklearne nauke Vinča-<https://www.vin.bg.ac.rs/o-institutu/novosti/ucesce-predstavnikainstituta-vinca-na-radionici-o-malim-modularnim-reaktorima>
- [3] Zakon o izmenama i dopunama Zakona o energetici ("Sl. glasnik RS", br. 94/2024)
- [4] International Atomic Energy Agency -<https://www.iaea.org/>
- [5] Naučni skup „Uloga nuklearne energetike u energetske tranziciji
- [6] Upravljanje radioaktivnim otpadom, Olivera Ciraj-Bjelac i Milan Vujović, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet i Institut za nuklearne nauke „Vinča“
- [7] Energetski portal-<https://energetskiportal.rs/nuklearni-otpad-prva-zemlja-koja-je-nasla-resenje-za-100-000-godina-unapred>
- [8] <http://news.vattenfall.com/en/article/positive-decision-finnishspent-nuclear-fuel-repository>
- [9] Washington State Office of the Attorney General- <https://www.atg.wa.gov/yucca-mountain-nuclear-waste-repository>
- [10] Deutsche welle -[https://www.dw.com/sr/nuklearke-ugašene, šta je sa radioaktivnim-otpadom](https://www.dw.com/sr/nuklearke-ugašene,šta-je-sa-radioaktivnim-otpadom)
- [11] World-nuclear -<https://world-nuclear.org/our-association/publications/world-nuclear-performance-report/china-mainland-world-nuclear-performance-report>
- [12] Energetski portal -<https://energetskiportal.rs/nuklearna-alijansa-eu-i-srbija-paralelni-putevi-ka-nuklearnoj-buducnosti>