

# Energetska tranzicija: Prednosti nuklearne energije u kontekstu životne sredine

Maja Rajković, Ivana Jelić, Slavko Dimović, Marija Janković, Milica Ćurčić i Marija Šljivić-Ivanović

**Apstrakt**—Preovlađujući diskurs o energetici u savremenoj eri naglašava klimatske promene i energetska bezbednost kao najvažnije zabrinutosti. Dok su obnovljivi izvori energije (OIE) zavisni od geografskih i klimatskih uslova, postavljajući izazove kao što su diskontinuirana dostupnost i zahtevi za okupiranjem velikih površina zemljišta, nuklearna energija predstavlja obećavajuću alternativu. Međutim, pitanja ka nuklearnoj energiji kao vidu čiste energije je zamagljena strahovima javnosti i državnim propisima i politikama, iako sa sve većim prepoznavanjem njenog potencijala kao pouzdanog i niskougljeničnog izvora energije. Optimalan put ka niskougljeničnom razvoju energetike, pored upotrebe OIE, podrazumeva i korišćenje nuklearne energije. Napredna nuklearna tehnologija obezbeđuje poboljšane mere bezbednosti, minimiziranje proizvodnje otpada i dobru alternativu za tranziciju postojećeg energetskog sistema baziranog na konvencionalnim izvorima energije.

**Gljučne reči**—nuklearna tehnologija; mali modularni reaktori; obnovljivi izvori energije.

## I. UVOD

Ubrzani razvoj ljudskog društva naročito nakon prve industrijske revolucije, sredinom XVIII veka, izumom parne mašine dovodi do povećane upotrebe neobnovljivih izvora energije uglja, nafte i njenih derivata, kao i prirodnog gasa, i narušavanja prirodne ravnoteže sistema voda-vazduh-zemljište. Značaj uglja kao energenta iako i dalje ne jenjava, počinje polako da opada tek poslednjih nekoliko decenija

Maja Rajković – Institut za nuklearne nauke "Vinča"- Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11001 Beograd, Srbija (e-mail: maja.rajkovic@vin.bg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0009-0008-7701-7819>)

Ivana Jelić – Institut za nuklearne nauke "Vinča"- Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11001 Beograd, Srbija (e-mail: ivana.jelic@vin.bg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0003-1406-2416>)

Slavko Dimović – Institut za nuklearne nauke "Vinča"- Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11001 Beograd, Srbija (e-mail: sdimovic@vin.bg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0003-2666-5417>)

Marija Janković – Institut za nuklearne nauke "Vinča"- Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11001 Beograd, Srbija (e-mail: marijam@vin.bg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-2255-7163>)

Milica Ćurčić – Institut za nuklearne nauke "Vinča"- Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11001 Beograd, Srbija (e-mail: milica.curcic@vin.bg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0002-4326-4036>)

Marija Šljivić-Ivanović – Institut za nuklearne nauke "Vinča"- Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11001 Beograd, Srbija (e-mail: marijasljivic@vin.bg.ac.rs), ORCID ID (<https://orcid.org/0000-0001-5897-0083>)

usled sve veće potrebe za ekološki prihvatljivim tehnologijama i procesima što je uslovljeno i sve strožijim propisima i zakonima u oblasti zaštite životne sredine i zdravlja ljudi. Iako se na globalnom nivou teži prelasku na obnovljive izvore energije, do sada uloženi naponi na tom polju nisu dali željene rezultate, najpre zbog velike rasprostranjenosti rezervi uglja širom sveta, ali i zbog problema interinentnosti obnovljivih izvora energije (OIE). Procenjuje se da je u 2022. godini ugalj ostao dominantan energent za proizvodnju električne energije sa stabilnim udelom od oko 35.4%, što je neznatno manje u odnosu na prethodnu godinu 35.8% [1]. Eksploatacija fosilnih goriva prouzrokovala je emisiju štetnih gasova u atmosferu, dovodeći do stvaranja efekta staklene bašte uzrokujući globalne klimatske promene, uništavanje biodiverziteta, zagađenje vazduha, površinskih i podzemnih voda i zemljišta, generisanje velikih količina čvrstog i potencijalno opasnog otpada, sveobuhvatno utičući na život i zdravlje ljudi. Danas je izvesno da se upotreba neobnovljivih izvora energije ne može prekinuti, jer energetika predstavlja sektor ekonomije čija je zasnovanost dominantno na konvencionalnim izvorima energije (ugalj, nafta i gas), a koji predstavljaju najdostupnije energente današnjeg sveta. Ipak, emisija štetnih gasova staklene bašte može se značajno smanjiti racionalnijom potrošnjom, povećanjem energetske efikasnosti i povećanim korišćenjem tehnologija OIE i nuklearne energije, čime se može uticati na održivu budućnost, odnosno mogućnost sadašnjih generacija da neometano ostvare ekonomski rast i razvoj, ali ne uskraćujući time tu mogućnost budućim generacijama.

Ova studija ima za cilj da istraži potencijal i osnovne principe povezane sa prelaskom na karbon-neutralne izvore energije, posebno fokusirajući se na naprednu nuklearnu tehnologiju i upoređivanje sa OIE. Poređenje podrazumeva procenu izazova pretvaranja i skladištenja energije iz dostupnih izvora, u kontekstu raspoloživih resursa u Republici Srbiji.

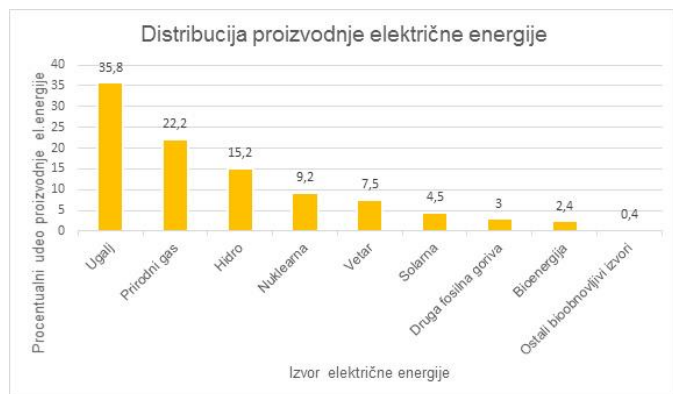
## II. OSNOVNI IZVORI ENERGIJE U SAVREMENOM DRUŠTVU

Postojanje modernog društva u velikoj meri zavisi od potrošnje značajnih količina različitih vidova energije. Usled jednostavne transformacije u druge oblike energije i mogućeg transporta na veće udaljenosti distributivnom mrežom, električna energija je strateški značajna za privredni razvoj svake zemlje. Konvencionalni načini dobijanja energije pretežno se oslanjaju na neobnovljive izvore. Ipak, s obzirom na njihovu ograničenu prirodu i ekološke posledice, sve veći

broj istraživanja je usmeren ka pronalaženju izvora energije koji bi bili održiva zamena.

U oblasti savremene proizvodnje električne energije, termoelektrane, hidroelektrane i nuklearne elektrane služe kao osnovna postrojenja. Na globalnom nivou za proizvodnju električne energije najčešće su u upotrebi termoelektrane, sa najvećom proizvodnjom megavata (MW).

Prema podacima za 2022. godinu sagorevanjem uglja globalno se obezbeđuje 35.8% električne energije, na drugom mestu je prirodni gas sa 22.2%, zatim slede hidroelektrane sa 15.20% i nuklearne elektrane sa 9.20%, dok su OIE zastupljeni u znatno manjoj meri kao što je i prikazano na Slici 1 [2].



Sl. 1. Globalna distribucija proizvodnje električne energije prema izvoru [2]

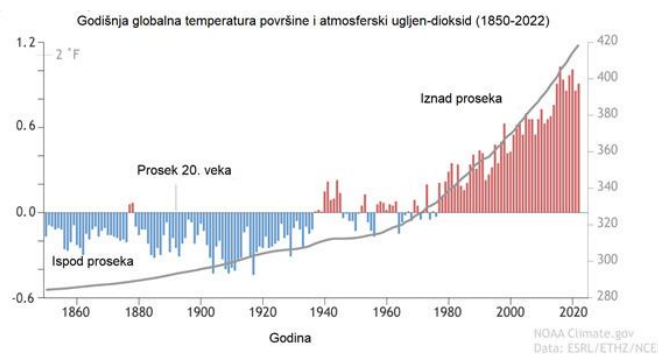
U savremenom međusobno povezanom svetu, države, nacije i kompanije nastavljaju da se strateški pozicioniraju kako bi osigurale pristup preostalim prirodnim resursima, posebno u svetlu nedavnih geopolitičkih sukoba i turbulencija na tržištu energije. Posebno zanimljiva je nedavna rezolucija Evropskog parlamenta koja kategorizuje nuklearnu energiju i gas kao „zelene izvore”, što izaziva rasprave o tome da li je ova odluka bazirana na političkim motivima ili na stručnim analizama, posebno u kontekstu aktuelnih energetske izazova.

Preovlađujuće korišćenje fosilnih goriva može se pripisati njihovoj opsežnoj istoriji upotrebe, proverenom dizajnu i radu, kao i niskim cenama ulazne sirovine. Međutim, pojava i napredak obnovljivih i nuklearnih izvora energije doveli su do pada njihovog učešća u proizvodnji električne energije, ali se tehnološka utrka nastavlja u korak sa visoko postavljenim ekološkim standardima koji favorizuju tzv. „čiste tehnologije“ spram izdvajanja velikih količina otpadnih gasova, šljake i otpadne vode, kao i velikih količina letećeg pepela za čiju sanaciju se moraju izdvajati ogromna finansijska sredstva.

Da bi neka tehnologija preuzela dominantnu ulogu, neophodno je uzeti u obzir tehnološki napredak, regulatorne okvire, kao i javno prihvatanje. U tom kontekstu gledano, svet bi se mogao u velikoj meri osloniti na nuklearnu energiju, OIE, hvatanje i skladištenje ugljenika ili neku njihovu kombinaciju. Kako će izgledati distribucija globalnih primarnih izvora energije i proizvodnja električne energije, zavisi od adekvatnih predviđanja troškova svih tehnologija, kao i klimatskog odgovora u smislu praćenja promena srednje

godišnje temperature (uslovljeno porastom koncentracije gasova staklene bašte, prevasodno CO<sub>2</sub>).

Pojava negativnih posledica efekta staklene bašte uzrokovana je povećanjem koncentracije ugljen dioksida do koje dolazi usled sagorevanja fosilnih goriva. Ovaj gas u kombinaciji sa drugim gasovima (vodena para, metan, azot suboksid, gasovi koji sadrže fluor) apsorbuje infracrveno zračenje emitovano sa površine Zemlje koje se zadržava u atmosferi i odbija o površinu Zemlje što dovodi do njenog zagrevanja, odnosno do porasta prosečne godišnje temperature na Zemlji, Slika 2 [3].



Sl. 2. Promena godišnje koncentracije ugljen dioksida u atmosferi, prosečna godišnja temperatura na Zemlji [3]

Rezultat su klimatske promene, poput dugoročnog trenda porasta globalnih temperatura, koje će svakako ostaviti posledice i na živi svet na Zemlji.

Prema podacima Strategije niskougljeničnog razvoja Republike Srbije za period od 2023. do 2030. godine sa projekcijama do 2050. godine [4] i odgovarajuće komplementarne legilsative EU [5], najnoviji podaci pokazuju da prosečni porast temperature od 0.36 °C po deceniji u periodu od 1961. do 2017. godine, ne nastavlja svoj trend, već usled scenarija klimatskih promena taj porast iznosi između 2 °C i 4.3 °C do 2100. godine.

Protekla decenija obeležena je kao najtopliji period u zabeleženoj istoriji temperatura. Ovaj trend rezultirao je smanjenjem glečera na polovima i snežnog pokrivača na Himalajima, što bi moglo ozbiljno ugroziti snabdevanje vodom za stotine hiljada, pa čak i milijarde ljudi. Procenjuje se da ukoliko se ne preduzmu hitni koraci za ublažavanje klimatskih promena, svet bi za 50 godina mogao biti suočen sa ekonomskim i socijalnim poremećajima sličnim onima koji su karakterisali XX vek, poput dva Svetska rata ili Velike depresije.

Pod ovim pretpostavkama, nuklearna energija bi mogla postati dominantan izvor električne energije širom sveta.

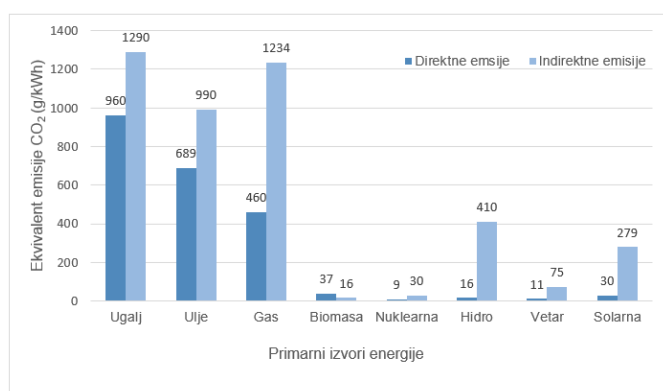
### III. ENERGETIKA BAZIRANA NA UGLJU NISKOG KVALITETA U REPUBLICI SRBIJI

Procenjeno je da Republika Srbija raspolaže sa 21 milijardom tona geoloških rezervi uglja [6-7]. Premda je količina rezervi uglja velika, ono što je nepovoljno jeste struktura energetske rezervi. Više od 97% od ukupnih rezervi svih vrsta uglja čine ligniti niskog ranga koji imaju visok

sadržaj mineralnih materija i vlage, a čija donja toplota moć varira u opsegu 5000 – 9000 kJ/kg [7]. Zbog ove činjenice, Srbija je svrstana u zemlje sa najvećim geološkim nalazištima lignita u Evropi. Ovo dalje vodi ka uslovljenosti energetskog sistema baziranog na termoenergetskim kapacitetima koji pokrivaju između 45% i 49% ukupnih državnih potreba za energijom [8-9]. S obzirom na činjenicu da lignit u strukturi domaćih ugljeva učestvuje sa najvećim procentom (99%), on predstavlja i dominantan izvor električne energije u Srbiji. Procenjuje se da je realna tendencija da lignit ostane glavni izvor sve do 2050. godine [10].

Republika Srbija kao zemlja kandidat za članstvo u Evropskoj uniji (EU), ulaže napore da se uskladi sa politikama, propisima i akcijama u okviru EU. Sa tim u vezi, usvojena je najnovija Strategija niskougljeničnog razvoja Republike Srbije za period od 2023. do 2030. godine sa projekcijama do 2050. godine [4]. Okvir za klimu i energetiku EU do 2030. godine postavlja tri ključna cilja: najmanje 40% smanjenja emisija gasova sa efektom staklene bašte (u odnosu na nivo iz 1990.), najmanje 32% učešća energije iz obnovljivih izvora i unapređenje energetske efikasnosti. Drugi zahtev predstavlja poseban izazov za zemlje u razvoju, s obzirom na visoke cene i ulaganja u tehnologiju i infrastrukturu koja su neophodna u energetskom sektoru. Srbija takođe razmatra nuklearne elektrane, uključujući i male modularne reaktore [4,8].

Nuklearna energija se navodi kao imperativ u trajnom smanjenju u globalnoj energetskoj emisiji CO<sub>2</sub> u proseku od 5.5 % po godini između 2030. i 2050. Kao primer dobre prakse navodi se da je ovaj ambiciozni zahtev bio postignut u prošlosti u državama članicama EU (Francuska i Švedska) zahvaljujući razvoju i implementaciji programa nuklearne tehnologije [5]. Na Slici 3 prikazana je preračunata ekvivalentna količina potencijalnih emisija CO<sub>2</sub> u slučaju različitih izvora energije [11].



Sl. 3. Količina emisije CO<sub>2</sub> u slučaju različitih izvora energije [11]

#### IV. ENERGETSKI POTENCIJALI OIE U REPUBLICI SRBIJI

Kada je reč o OIE, Republika Srbija raspolaže energijom Sunca, vode, vetra, geotermalnom i energije iz biomase. U slučaju hidroenergetskog sektora važno je proceniti uticaj klimatskih promena na dostupnost vodotokova za proizvodnju

električne energije. Ova procena je ključna za predviđanje proizvodnje električne energije iz postojećih hidroelektrana, ali i za procenu potencijala za izgradnju novih hidroelektrana. Ukupan hidroelektrični potencijal u Republici Srbiji iznosi oko 27 teravat-časova (TWh) godišnje. Trenutno, prosečna godišnja proizvodnja u poslednjih pet godina iznosi oko 10.7 TWh, dok je tehnički iskoristiv potencijal procenjen na 18 TWh (ekvivalentno 4.736 MW) [12].

Iskorišćavanje potencijala vode pokazalo se ekonomski konkurentnim u poređenju sa proizvodnjom električne energije iz fosilnih i nuklearnih goriva. Međutim, značajno ograničenje leži u neophodnosti neprekidnog izvora vode, čak i u slučaju reverzibilnih hidroelektrana koje mogu skladištiti višak generisane električne energije, a posebno imajući u vidu da je skladištenje električne energije skupo i štetno po životnu sredinu. Shodno tome, izgradnja brana i akumulacija je često neophodna, što dovodi do povećanih troškova i posledica po životnu sredinu. Male hidroelektrane (mini i mikro elektrane) se pojavljuju kao alternativno rešenje, s obzirom na njihov manji uticaj na životnu sredinu i povećanu profitabilnost, ali uz nužan rizik po biodiverzitet i narušavanje prirodne ravnoteže vodnog tela.

Republika Srbija ima oko 0.19 miliona tena (tona ekvivalentne nafte – ten – energija koja se oslobađa sagorevanjem jedne tone nafte ~11.63 MWh električne energije) godišnje u energiji vetra, što čini oko 5% ukupnog potencijala obnovljivih izvora. Istočni delovi Srbije, planinske oblasti poput Zlatibora, Bjelasice, Kopaonika i Divčibara, kao i Panonska nizija severno od Dunava, predstavljaju pogodne lokacije za izgradnju vetrogeneratora. U perspektivi, ovi regioni mogu podržati instalaciju vetrogeneratora kapaciteta od 1500 do 2000 MW, što bi rezultiralo godišnjom proizvodnjom električne energije od 2 do 2.5 TWh [13].

Sa udelom od 5.2% od ukupnog potencijala OIE, generiše se oko 0.2 miliona tena energije godišnje iz postojećih geotermalnih izvora. Izvori su pozicionirani u Vojvodini, Posavini, Mačvi, Podunavlju, centralnoj Srbiji i banjama [13].

Međutim, nedostatak sistematike u istraživanjima, kao i neorganizovano korišćenje ovih izvora, u mnogome ograničavaju njihovo korišćenje. Oko 0.64 miliona tena godišnje energije se koristi iz sunčevog zračenja, što čini oko 16.7% ukupnog potencijala OIE Republike Srbije. To bi podrazumevalo instalaciju oko 11 miliona m<sup>2</sup> fotovoltaznih panela [13].

Ubedljivo najveći procenat od oko 62.7% ukupnog obnovljivog potencijala potiče od biomase. Od tog iznosa, oko 1.0 miliona tenova potiče od drvene biomase, dok preko 1.4 miliona tenova dolazi od poljoprivredne biomase, uključujući ostatke poljoprivrednih i ratarskih kultura, kao i tečni stajnjak iz stočarske proizvodnje [13]. S obzirom na to da potencijalna energija obnovljivih izvora često nije u obliku koji se može direktno koristiti, neophodno je prevesti tu energiju u drugi oblik koji je upotrebljiv putem procesa konverzije.

Iako Republika Srbija poseduje značajne resurse obnovljive energije, njihova primena često nosi sa sobom različite izazove koji se odnose na ugroženost biodiverziteta, poremećaj lanca ishrane i pojavu štetočina, zagađenje bukom,

vizuelno zagađenje, emisiju potencijalno opasnih supstanci, ograničen radni vek i visoke trošve reciklaže i odlaganja otpada (npr. reciklaža fotonaponskih panela), ekspanzivne prostorne zahteve, mogućnost izazivanja zemljotresa u slučaju bušenja geotermalnih izvora i visokih troškova instalacije opreme. Uporedne procene otkrivaju prostorne, ekonomske i ekološke nedostatke obnovljive energije u poređenju sa nuklearnom energijom [11,13].

#### V. INTERMITENTNOST OBNOVLJIVIH IZVORA

Potencijalna energija koja se koristi iz alternativnih, posebno obnovljivih izvora, često je dostupna u oblicima koji nisu pogodni za direktnu upotrebu, što zahteva konverziju u drugi vid energije. Sa obzirom na varijabilnu prirodu proizvođača energije kao što su turbine na vetar i fotonaponske ćelije, na koje utiču faktori kao što su vremenski uslovi i doba dana ili godine, skladištenje energije postaje od suštinskog značaja za olakšavanje potrošnje tokom nepovoljnih uslova [13]. Obnovljivi izvori energije moraju prevazići svoj problem intermitentnosti. Proširenje kapaciteta skladištenja, obezbeđivanje bezbednog i pouzdanog skladištenja energije kako bi se ponudilo rezervno napajanje u slučaju povremene proizvodnje obnovljive energije, stoga je identifikovano kao kritični izazov u pokretanju energetske tranzicije. Sve je veći broj istraživanja u cilju pronalazjenja rešenja za poboljšanje životnog ciklusa baterija, pronalazjenje alternativnih materijala za proizvodnju baterija i stvaranje inovativnih, dugoročnijih oblika skladištenja energije većeg obima [14]. Nuklearna energija nije zavisna od navedenih spoljašnjih faktora, dok podjednako teži ka karbon-neutralnoj budućnosti energetike.

#### VI. NUKLEARNA ENERGIJA, PREDNOST NUKLEARNIH REAKTORA NOVE GENERACIJE, MALI MODULARNI REAKTORI

Nuklearne elektrane trenutno čine oko 9.20% globalne proizvodnje električne energije (Slika 1) [2]. Za razliku od postrojenja na bazi fosilnih goriva, nuklearna postrojenja ne emituju štetne gasove i ostale produkte nastale tokom proizvodnje energije, nudeći prednost u upravljanju životnom sredinom. Takođe, alternative kao što su hidroelektrični i drugi obnovljivi izvori energije predstavljaju sopstvene ekološke izazove, uključujući narušavanje staništa, zauzimanje velikih površina, gubitak biodiverziteta i zagađenje bukom. Uprkos smanjenom uticaju nuklearnih elektrana na životnu sredinu, i dalje postoji zabrinutost u vezi sa potencijalnim curenjem radioaktivnog materijala u slučaju akcidenata i upravljanjem nuklearnim otpadom. Podsticaj u usvajanju nuklearne energije dodatno je otežan strahovanjem za bezbednost i regulatornim preprekama.

Napredna nuklearna tehnologija (tzv. nuklearni reaktori IV generacije) predstavlja znatno sigurniju alternativu zastarelim nuklearnim sistemima. Glavna zabrinutost u vezi sa nuklearnom energijom, koja u velikoj meri proističe iz prošlih akcidenata koji uključuju nasleđene nuklearne tehnologije, uglavnom je neosnovana. Stari reaktori rade pri visokim pritiscima (reda veličine MPa) dok napredni reaktori

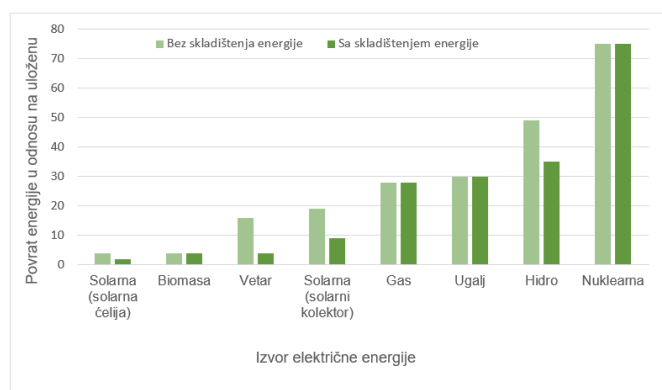
funkcionišu pri pritisku koji je blizu ambijentalnog zbog visokih tačaka ključanja njihovih medijuma za prenos toplote. Takođe, napredni reaktori rade na višim temperaturama čime se omogućavaju efikasniji pasivni sistemi za uklanjanje toplote raspadanja. Kod naprednih reaktora pomoću nove tehnologije omogućna je upotreba U-238 i Th-232 što rezultuje smanjenjem količine nastalog otpada, kao i perioda poluraspada. Sve ove prednosti utiču na povećanje bezbednosti [15].

Mali modularni reaktori su nuklearna postrojenja sa kapacitetom od 300 MWe (megavati električne energije) ili manje, koja imaju nekoliko prednosti u odnosu na velike nuklearne elektrane. Oni su fabrički napravljeni i transportovani na gradilište, čime se smanjuje vreme izgradnje, kao i troškovi. Ono što je obećavajuće jeste činjenica da su napredni mali modularni reaktori već u upotrebi, sa primerima u Rusiji i Kini, a njihova široka primena u narednoj deceniji mogla bi imati ključnu ulogu u ostvarivanju ciljeva nultih emisija do 2050. godine [15].

#### VII. SPECIFIČNI ENERGETSKI SADRŽAJ RAZLIČITIH IZVORA ENERGIJE

Mere koje mogu da se koriste pri poređenju prednosti i mana različitih izvora energije su gustina energije, gustina snage i povrat energije u odnosu na uloženu energiju. Ove mere su od suštinskog značaja za sticanje dubljeg uvida u performanse i karakteristike svakog izvora energije [11]. Gustina energije je najjednostavnija i predstavlja količinu energije po jedinici mase ili po jedinici zapremine i može se koristiti za poređenje goriva. Goriva zasnovana na nuklearnim reakcijama su daleko više koncentrisana nego goriva na bazi hemijskih reakcija. Gustina energije, izražena u milionima kWh/kg, za ugalj, olovne baterije i uranijum-235 iznosi 8, 40 i  $24 \times 10^6$  redom [11]. Razlika je impresivna i teško uporediva. Gustina snage je kompleksnija mera koja predstavlja snagu izvora po horizontalnoj površini zemljišta ili vodenoj površini ( $W/m^2$ ). Svi OIE imaju nižu gustinu snage od nuklearnih ili fosilnih goriva, iako u praksi mnogo zavisi od lokacijskih faktora, npr. srednja brzina vetra ili nivo direktne ili indirektno insolacije za solarne farme. Vrednosti se kreću od oko 0.5 za biomasu, u intervalu od 0.5 – 1.5 za vetar i 4 – 10 za fotovoltazne panele do  $4000 W/m^2$  kod nuklearnih goriva [11].

Još jedan parametar koji pokazuje dominantnost nuklearnih izvora energije svakako je mera povrata energije u zavisnosti od uložene energije pri investiciji, *EROI* (prema eng. *Energy Return on Investment*) prikazan na Slici 4 [11,16]. Osnovu inferiornosti tehnologije OIE vetra i solarne energije predstavlja upotreba materijala baziranih na retkim elementima zemljine kore, odnosno elementima kao što su neodimijum, disprozijum, terbijum, evropijum i itrijum zbog prostorne pozicioniranosti ruda iz kojih se eksploatišu (monopol u proizvodnji – Kina) i/ili dostupnih tehnologija i procene isplativosti za ekstrakciju ovih materijala iz alternativnih sirovina (npr. leteći pepeo) [17].



Sl. 4. Povrat energije u zavisnosti od uložene energije pri investiciji [16]

Reevaluacijom troškova i bezbednostih implikacija uz specifični energetska sadržaj nuklearne energije u poređenju sa OIE, može se zaključiti da se nuklearna energija pozicionira daleko bolje nego ostali izvori energije. Zabrinutost u vezi sa uvozom uranijuma i upravljanjem nuklearnim otpadom može se uravnotežiti i sa prednostima nuklearne energije i sa nedostacima obnovljivih alternativa. Štaviše, nuklearna energija igra ključnu ulogu u jačanju energetske bezbednosti nudeći relativno niske i stabilne troškove goriva i operativnih troškova, kontinuiranu proizvodnju električne energije u dužem vremenskom periodu i pozitivan doprinos stabilnom radu elektroenergetskih sistema, uključujući održavanje frekvencije mreže [5].

### VIII. ZAKLJUČAK

Prelazak na karbon-neutralni energetska sistem je od najveće važnosti za rešavanje rastuće potražnje za energijom uz istovremenu borbu protiv klimatskih promena. Dok OIE poput sunčevog zračenja i energije vetra igraju ključnu ulogu, njihova ograničenja zahtevaju uključivanje napredne nuklearne tehnologije u strategiju tranzicije energije. Napredna nuklearna tehnologija, posebno reaktori generacije IV, nude održivo rešenje koje može da obezbedi čistu energiju za generacije koje dolaze. Prevazilaženje neosnovanih strahova od nuklearnih nesreća je od suštinskog značaja za realizaciju punog potencijala nuklearne energije u postizanju ciljeva održive energetike. Prihvatanjem uravnoteženog pristupa koji uključuje nuklearnu energiju uz druge obnovljive izvore energije, može se efikasno uskladiti odnos između čovečanstva, prirode, tehnologije i ekonomije, obezbeđujući održivu budućnost za sve. Dalja istraživanja i razvoj u ovoj oblasti su od ključne važnosti za maksimiziranje prednosti nuklearne energije u procesu tranzicije trenutnog energetska sistema ka niskougleničnom energetska razvoju.

### ZAHVALNICA

Istraživanje predstavljeno u ovom radu realizovano je uz finansijsku podršku Ministarstva za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije, uz finansiranje naučnoistraživačkog rada na Univerzitetu u Beogradu, Institutu za nuklearne nauke Vinča (Ugovor br. 451-03-

66/2024-03/200017).

### LITERATURA

- [1] Energy Institute, Statistical Review of World Energy, <https://www.energyinst.org/statistical-review> (pristupljeno 27.02.2024.)
- [2] Statista, World electricity generation by source 2022, <https://www.statista.com/statistics/269811/world-electricity-production-by-energy-source> (pristupljeno 27.02.2024.)
- [3] NOAA Climate Program, The Climate.gov project, <https://www.climate.gov/media> (pristupljeno 28.02.2024.)
- [4] Strategija niskougleničnog razvoja Republike Srbije za period od 2023. do 2030. godine sa projekcijama do 2050. godine, Sl. glasnik RS, br. 46/2023.
- [5] ECR Group and Renew Europe, European Parliament, Road to EU Climate Neutrality by 2050, Brussels, Belgium, January 2021.
- [6] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, Sl. glasnik RS, br. 101/2015.
- [7] World Energy Council, World energy resources 2016, London, UK, Rep., 2016.
- [8] European Association for Coal and Lignite (EURACOAL), Serbia (6th ed.), <https://euracoal.eu/info/country-profiles/serbia/> (pristupljeno 27.02.2024.)
- [9] D. Životić, K. Stojanović, I. Gržetić, B. Jovančičević, O. Cvetković, A. Šajnović, V. Simić, R. Stojaković, G. Scheeder, "Petrological and geochemical composition of lignite from the D field, Kolubara basin (Serbia)," *Int. J. Coal Geol.*, vol. 111, pp. 5-22, May, 2013.
- [10] Energy Mining Watch South & East Europe, "SEE, energy scenarios 2050 and coal fired power plants - Environment Energy Mining Watch Balkans," Rep., 2015.
- [11] C. McCombie, M. Jefferson, "Renewable and nuclear electricity: Comparison of environmental impacts," *Energy Policy*, vol. 96, pp. 758-769, Sept., 2016.
- [12] Ministarstvo rudarstva i energetike RS, Polazne osnove plana razvoja energetska infrastrukture i mera energetska efikasnosti za period od 2028. godine sa projekcijama do 2030. godine <https://www.mre.gov.rs/tekst/1166/-polazne-osnove-plana-razvoja-energetska-infrastrukture-do-2028-godine-sa-projekcijama-do-2030-godine.php> (pristupljeno 27.02.2024.)
- [13] B.N. Grgur, *Alternativni izvori energije - principi konverzije i skladištenja*, Beograd, Srbija: Inženjersko društvo za koroziju, 2015.
- [14] R. Shohet, *Unveiling Europe's 7 Game-Changing Energy Storage Innovators*, Sustainable energy storage solutions taking the CleanTech world by storm, 2024.
- [15] T.E. Rehm, "Advanced nuclear energy: the safest and most renewable clean energy," *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 39, 100878, March 2023.
- [16] J. Conca, EROI – A Tool to Predict the Best Energy Mix, Jersey City, NJ, Forbes, , 2015.
- [17] Statista, Distribution of rare earth element production worldwide in 2021, <https://www.statista.com/statistics/604345/distribution-of-rare-earth-element-production-worldwide-by-country/> (pristupljeno 27.02.2024.)

### ABSTRACT

The prevailing discourse on energy in the contemporary era emphasizes climate change and energy security as primary concerns. While renewable energy sources (RES) depend on geographic and climatic conditions, posing challenges such as intermittent availability and the requirement for large land areas, nuclear energy presents a promising alternative. However, the path towards nuclear energy as a form of clean energy is obscured by public fears and governmental regulations and policies, despite increasing recognition of its potential as a reliable and low-carbon energy source. The optimal path to low-carbon energy development, in addition to the use of RES, also implies the utilization of nuclear energy. Advanced nuclear technology provides improved safety measures, minimizes waste production, and offers a viable alternative for transitioning from the existing energy system based on conventional energy

sources.

**Energy transition: Advantages of nuclear energy in an environmental context**

Maja Rajković, Ivana Jelić, Slavko Dimović, Marija Janković,  
Milica Ćurčić i Marija Šljivić-Ivanović