

Nuklearna energija - povijesni razvoj, stanje i perspektiva

Kelčec-Pester, Tomislav

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Economics and Business / Sveučilište u Zagrebu, Ekonomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:148:673825>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-30**



Repository / Repozitorij:

[REPEFZG - Digital Repository - Faculty of Economics & Business Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu

Ekonomski fakultet

Specijalistički diplomski stručni studij Ekonomika energije i okoliša

**"NUKLEARNA ENERGIJA – POVIJESNI RAZVOJ, STANJE I
PERSPEKTIVA“**

Diplomski rad

Tomislav Kelčec-Pester

Zagreb, rujan, 2019.

Sveučilište u Zagrebu

Ekonomski fakultet

Specijalistički diplomski stručni studij Ekonomika energije i okoliša

**"NUKLEARNA ENERGIJA – POVIJESNI RAZVOJ, STANJE I
PERSPEKTIVA“**

**„NUCLEAR ENERGY - HISTORICAL DEVELOPMENT,
SITUATION AND PERSPECTIVES“**

Diplomski rad

Tomislav Kelčec-Pester, JMBAG: 006423043

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Tomislav Gelo

Zagreb, rujan, 2019.

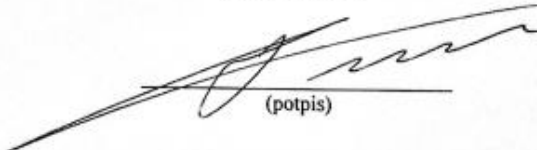
TOMISLAV KECIĆ - PEŠTER
Ime i prezime studenta/ice

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je DIPLOMSKI RAD
(vrsta rada)
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada, te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Student/ica:

U Zagrebu, 13.9.2019.


(potpis)

SAŽETAK

Proizvodnja električne energije iz nuklearnih elektrana važan je i nezaobilazan izvor električne energije u svijetu. Nuklearna energija imala je svojih uspona i padova kroz povijest. Postavlja se pitanje koja je danas uloga nuklearne energije u energetskej tranziciji. Vjerojatno bi proizvodnja električne energije iz nuklearnih elektrana do danas bila dominantan izvor energije da nije bilo nuklearnih katastrofa (npr. Černobil i Fukushima) koje su imale utjecaja na negativnu javnu percepciju o sigurnosti nuklearnih elektrana. Mnogo je razloga koji potvrđuju navedenu tezu. Nuklearne elektrane ne proizvode stakleničke plinove, u usporedbi s ostalim ne-ugljičnim i ugljik-neutralnim energetskej opcijama zahtijevaju mnogo manje površine za rad, mjere sigurnosti dovedene su na maksimum i dr. Cilj rada je opisati postojeće stanje u proizvodnji električne energije iz nuklearnih kapaciteta, poziciju RH u odnosu na nuklearnu energiju s analizom NE Krško te njezin pozitivan odnosno negativan utjecaj na okoliš, ali i njezine komparativne prednosti u proizvodnji električne energije u budućnosti. U radu će se analizirati ima li nuklearna energija budućnost s obzirom na postupnu zamjenu fosilnih obnovljivim izvorima energije.

Ključne riječi: nuklearna energija, nuklearna elektrana, električna energija, sigurnost, cijene

ABSTRACT

The production of electricity by nuclear power plants is an important and essential source of electricity in the world. Nuclear energy has had its ups and downs throughout history. The question emerges: what is the role of nuclear energy in today's energy transition? The production of electricity by nuclear power plants would have likely been a dominant source of energy had it not been for nuclear catastrophes (such as Chernobyl and Fukushima), which have had an impact on the public's negative perception regarding the safety of nuclear power plants. There are many reasons which confirm this thesis. Nuclear power plants do not produce greenhouse gases, require less space to operate in comparison with other non-carbon and carbon-neutral energy options, safety measures have been perfected etc. The aim of this thesis is to describe the current situation in the production of electricity from nuclear capacities, the position of the Croatia with regard to nuclear energy, with an analysis of the nuclear power plant Krško, its positive and negative influence on the environment, but also

its comparative advantages in the production of electricity in the future. This thesis analyses whether nuclear energy has a future with regard to a gradual replacement of fossil fuels with renewable energy sources.

Keywords: Nuclear Energy, Nuclear power plant, Electricity, Safety, Prices

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	1
1. UVOD.....	3
1.1 Definiranje obuhvata istraživanja.....	3
1.2 Izvori podataka, korištene metode i ciljevi istraživanja.....	3
1.3 Struktura rada	4
2 NUKLEARNA ENERGIJA I NJEZIN RAZVOJ	5
2.1 Povijesni razvoj nuklearne energije	5
2.2 Tehnologija proizvodnje električne energije u nuklearnim elektranama	9
2.3 Uloga i upotreba nuklearne energije	13
2.4 Nuklearna energija u odnosu na ostale oblike primarne energije	17
3 PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ NUKLEARNIH ELEKTRANA	22
3.1 Kapaciteti nuklearnih elektrana u svijetu	22
3.2 Proizvodnja električne energije.....	25
3.3 Utjecaj nuklearnih elektrana na okoliš.....	28
4 NUKLEARNA ELEKTRANA KRŠKO I NJEZINA VAŽNOST ZA REPUBLIKU HRVATSKU.....	37
4.1 Gradnja nuklearne elektrane Krško i vlasnički odnosi.....	37
4.2 Kapacitet i proizvodnja nuklearne elektrane Krško	39
4.3 Utjecaj nuklearne elektrane Krško na bilancu električne energije u Republici Hrvatskoj.....	44
5 BUDUĆNOST NUKLEARNE ENERGIJE I NUKLEARNIH ELEKTRANA	49
5.1 Sigurnost rada nuklearnih elektrana kao njihov ograničavajući faktor.....	49
5.2 Budućnost nuklearnih elektrana u Europskoj uniji i Hrvatskoj	51
5.3 Održivi razvoj i nuklearne elektrane	60

6 ZAKLJUČAK.....	65
LITERATURA	68
POPIS SLIKA.....	69
POPIS TABLICA	69
POPIS GRAFOVA	70
KORIŠTENE INTERNET STRANICE	71

1. UVOD

Pristup električnoj energiji nema gotovo dvije milijarde ljudi širom svijeta i taj će se problem pogoršavati rastom populacije. Globalno oslanjanje na fosilna goriva i velike hidroelektrane ostati će trend do kraja još zasigurno dugi niz godina, ali to neće biti dovoljno za zadovoljavanje rastućih potreba čovječanstva. Nuklearna energija se zasigurno nameće kao jedno od mogućih rješenja tog problema. U zadnja tri desetljeća nuklearna energija ima značajnu ulogu u proizvodnji električne energije. Trenutno pomoću nuklearne energije proizvodimo oko 16 posto ukupno proizvedene električne energije u svijetu. Prihvatljivost nuklearne energije može se zahvaliti njezinoj čistoći i gotovo nultom stopom kod ispuštanja stakleničkih plinova. Dobro konstruirane nuklearne elektrane pokazale su se pouzdanima, sigurnima, ekonomski isplativima i ekološki prihvatljivim. U svijetu je do danas više od 9.000 reaktor – godina rada pa postoji i određeno iskustvo u iskorištavanju nuklearne energije.

1.1 Definiranje obuhvata istraživanja.

Predmet istraživanja ovog rada je nuklearna energija s osvrtom na povijesni razvoj, sadašnje stanje i budućnost proizvodnje električne energije iz nuklearnih kapaciteta. Nuklearnu energiju u Republici Hrvatskoj nije moguće promatrati bez Nuklearne elektrane Krško, čiji suvlasnik je RH. Poznato da je da proizvodnja električne energije iz nuklearnih elektrani uz pozitivne učinke nosi i mnoge rizike. Pozitivni učinci za Republiku Hrvatsku mjere se količinom isporučene električne energije. Rizik odnosno negativni efekti mogu biti razni, kao što su sigurnost isporuke električne energije, zbrinjavanje nuklearnog otpada, zbrinjavanje svih komponenti elektrane nakon njezinog zatvaranja. Kao najveći rizik spominje se sigurnost same elektrane. Najgori scenariji uključuju katastrofalne posljedice za čovječanstvo koje nazivamo nuklearne katastrofe. U tom smislu potrebno se je osvrnuti se na ne tako davne katastrofe u Černobilu i Fukushimi te analizirati problem negativne javne percepcije o sigurnosti nuklearnih elektrana i postaviti pitanje daljnje sudbine nuklearne energije.

1.2 Izvori podataka, korištene metode i ciljevi istraživanja

U teorijskom dijelu primjenjivati će se različite metode istraživanja na temelju sekundarnih izvora informacija. Koristit će se odgovarajuća stručna literatura u vidu relevantnih znanstvenih knjiga i stručnih novinskih i internetskih članaka, a namjera je da se iskoriste primjeri i dokumentacija ostalih istraživanja i stručnjaka ovoga područja.

U empirijskom dijelu primjenjivati će se različite znanstvene metode kao što su:

- 1) Metoda deskripcije,
- 2) Metoda klasifikacije,
- 3) Metoda komparacije,
- 4) Metoda analize,
- 5) Metoda specijalizacije,
- 6) Metoda dokazivanja i
- 7) Povijesna metoda.

Cilj izrade ovog rada je razumijevanje pojmova nuklearne energije, nuklearne elektrane, nuklearnog reaktora, kapaciteta nuklearnih elektrana u svijetu, proizvodnje električne energije te utjecaja nuklearnih elektrana na okoliš. Kao cilj rada nameće se i potreba analiziranja kapaciteta i proizvodnje nuklearne energije u globalu te elektrane Krško i njezinog utjecaja na bilancu električne energije u Republici Hrvatskoj. Postavlja se svakako i pitanje budućnosti nuklearnih elektrana u Europskoj uniji, ali i Hrvatskoj pa će se i u tom kontekstu napraviti osvrt na navedenu problematiku.

1.3 Struktura rada

Diplomski rad o nuklearnoj energiji podijeljen je u šest osnovnih dijelova.

U uvodnom dijelu rada definirati će se predmet i svrha istraživanja te osnovni ciljevi koji se nastoje postići, a objasniti će se i primijenjena metodologija istraživanja te sama struktura i sadržaj rada. Drugi dio rada odnosi se na nuklearnu energiju kao općeniti pojam, povijesni razvoj, tehnologiju proizvodnje električne energije u nuklearnim elektranama, ulogu i upotrebu nuklearne energije te nuklearnu energiju u odnosu na ostale oblike primarne energije. Treći dio rada posvećen je kapacitetima nuklearnih elektrana u svijetu, proizvodnji električne energije te utjecaju nuklearnih elektrana na okoliš. Četvrti dio rada stavlja naglasak na Nuklearnu elektranu Krško i njezinu važnost za Republiku Hrvatsku. Peti dio rada odnosi se na budućnost nuklearnih elektrana u Europskoj uniji i Hrvatskoj te njihov održivi razvoj i sigurnost u cijelom svijetu. Posljednji dio rada donosi kratki osvrt na cjelokupan rad i zaključak o svemu prethodno navedenom u prijašnjim poglavljima, o samoj nuklearnoj energiji, nuklearnim elektranama, Nuklearnoj elektrani Krško te budućnosti nuklearnih elektrana u Europskoj uniji i Hrvatskoj i njihovom održivom razvoju i sigurnosti.

2 NUKLEARNA ENERGIJA I NJEZIN RAZVOJ

Nuklearna energija (atomska energija) energija je koja se oslobađa ili troši u spontanim ili izazvanim nuklearnim pretvorbama (nuklearne reakcije).¹Nuklearna reakcija nastaje sudarom dviju atomskih jezgara ili sudarom atomske jezgre s nekom česticom, npr. s neutronom, a proizvodi takve reakcije mogu biti nove jezgre i čestice.²U elektranama sa klasičnim gorivom kemijska energija goriva pretvara se u toplinsku energiju tijekom procesa sagorijevanja koji predstavlja spajanje atoma ugljika i kisika. Toplinska energija se pojavljuje uslijed promjene u vezama između atoma, a u nuklearnim elektranama energija se oslobađa uslijed promjena u unutrašnjosti samih atoma.³

2.1 Povijesni razvoj nuklearne energije

Povijesni razvoj nuklearne energije i njezine primjene moguće je podijeliti u četiri osnovna perioda:

- Razdoblje od 1895. do 1938. godine obilježeno je nizom znanstvenih otkrića vezanih uz radioaktivno zračenje, atomsku strukturu i promjene atomske strukture te nuklearne reakcije,
- Razdoblje od 1939. do 1945. godine, koje je obilježeno intenzivnim istraživanjima vezanima uz razvoj atomske bombe,
- Razdoblje od 1945. do 1956. godine, u kojem su istraživanja vezana uz nuklearnu energiju prvenstveno usmjerena na iskorištavanje nuklearne energije iz kontrolirane fisijske reakcije za pogon plovila i proizvodnju električne energije i
- Razdoblje od 1956. godine u kojem je primarni cilj nuklearnih istraživanja tehnološki razvoj pouzdanih nuklearnih reaktora.⁴

Uran je 1789. otkrio njemački kemičar Martin Klaproth i nazvan je po planetu Uranu. Ionizirajuće zračenje otkrio je Wilhelm Rontgen 1895. godine, propuštajući električnu struju kroz evakuiranu staklenu cijev i stvarajući kontinuirane rendgenske zrake. Onda je 1896. godine Henri Becquerel otkrio da je smola (ruda koja sadrži radij i uran) uzrokovala potamnjene fotografske ploče. U nastavku je pokazao da je to posljedica ispuštanja beta zračenja (elektrona) i alfa čestica (jezgre helija). Villard je pronašao treći tip zračenja iz

¹ On-line izdanje Hrvatske enciklopedije, enciklopedijski članak, Nuklearna energija, dostupno na: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=44375> (pristupljeno: 15. svibnja 2019.)

² Ibid.

³ Josipović, I. (2017) Nove tehnologije nuklearnih termoelektrana. Osijek: Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku, str. 2.

⁴ Nuklearna energija - Mistika i stvarnost, dostupno na: <http://www.nemis.hr/index.php/struktura-tvari/povijest-nuklearne-energije.html> (pristupljeno: 20. svibnja 2019.)

pjega: gama zrake, koje su bile jednake rendgenskim zrakama. Potom su 1896. godine Pierre i Marie Curie ovom fenomenu dali ime „radioaktivnost“, a 1898. godine izolirali su polonij i radij iz pješčanog vala. Radij je kasnije korišten u liječenju. Godine 1898. Samuel Prescott je pokazao da zračenje uništava bakterije u hrani. Godine 1902. Ernest Rutherford je pokazao da je radioaktivnost, kao spontani događaj koji emitira alfa ili beta čestice iz jezgre, stvorila drugačiji element. On je nastavio razvijati potpunije razumijevanje atoma, a 1919. godine ispalio je alfa čestice iz izvora radija u dušik i ustanovio da se događa nuklearno pregrađivanje, uz stvaranje kisika. Niels Bohr bio je još jedan znanstvenik koji je unaprijedio naše razumijevanje atoma i načina na koji su elektroni bili raspoređeni oko nukleusa do 1940-ih.⁵ Preostali dio koncepta fuzije atomske bombe dao je 1939. godine Francis Perrin, koji je uveo koncept kritične mase urana potrebnog za samoodrživo oslobađanje energije. Njegove je teorije proširio Rudolf Peierls s Birminghamskog sveučilišta, a dobiveni izračuni bili su od velike važnosti u razvoju atomske bombe. Perrinova grupa u Parizu nastavila je studije i pokazala da se lančana reakcija može održati u smjesi uran-voda (voda koja se koristi za usporavanje neutrona) uz uvjet da su vanjski neutroni ubrizgani u sustav. Također su pokazali ideju o uvođenju materijala koji apsorbira neutrone kako bi se ograničilo umnožavanje neutrona i time kontroliralo nuklearnu reakciju (koja je osnova za rad nuklearne elektrane). Peierls je bio učenik Wenera Heisenberga, koji je od travnja 1939. predsjedao njemačkim projektom nuklearne energije. U početku su njihova istraživanja bila usmjerena na vojne primjene, a do kraja 1939. Heisenberg je izračunao da bi lančane reakcije nuklearne fisije mogle biti moguće. Kada se uspore i kontroliraju u 'stroju za uranij' (nuklearni reaktor), ove lančane reakcije mogu generirati energiju; kad bi to bilo nekontrolirano, oni bi doveli do nuklearne eksplozije mnogo puta snažnije od konvencionalne eksplozije. Predloženo je da se prirodni uran može koristiti u stroju za uranij, s moderatorom teške vode (iz Norveške), ali čini se da istraživači nisu bili svjesni odloženih neutrona koji bi omogućili kontrolu nuklearnog reaktora. Heisenberg je primijetio da bi kao eksploziv mogao koristiti čisti uran-235, rijedak izotop, ali je očito vjerovao da je potrebna kritična masa veća od praktične. U ljeto 1940. godine, Carl Friedrich von Weizsäcker, Heisenbergov mlađi kolega i prijatelj, oslanjao se na publikacije znanstvenika koji su radili u Velikoj Britaniji, Danskoj, Francuskoj i SAD-u i zaključio da ako stroj uranija može održati lančanu reakciju, onda bi se uobičajeni uran-238 preobrazio u „element 94“, koji se sada naziva plutonij. Kao i uran-235, element 94 bio bi nevjerovatno snažan eksploziv. Godine 1941. von Weizsäcker je otišao toliko daleko da

⁵ Josipović, I. (2017) Nove tehnologije nuklearnih termoelektrana. Osijek: Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku, str. 2.

je podnio prijavu patenta za uporabu stroja za proizvodnju urana za proizvodnju ovog novog radioaktivnog elementa. Do 1942. vojni je cilj bio povučen kao nepraktičan, zahtijevajući više sredstava nego što je bilo dostupno. Prioritet je postala izgradnja raketa, međutim, postojanje njemačkog projekta Uranverein predstavljao je glavni poticaj za ratni razvoj atomske bombe u Britaniji i SAD-u.⁶ Ruska nuklearna fizika prethodila je boljševičkoj revoluciji više od desetljeća. Rad na radioaktivnim mineralima koji se nalaze u središnjoj Aziji počeo je 1900. godine, a Akademija znanosti u St. Petersburgu započela je opsežnu istragu 1909. godine. Revolucija iz 1917. godine dala je poticaj znanstvenim istraživanjima i uspostavljeno je više od 10 instituta fizike u većim ruskim gradovima, posebno u St. Petersburgu, u godinama koje su uslijedile. Dvadesetih i ranih 1930-ih mnogi ugledni ruski fizičari radili su u inozemstvu, potaknuti novim režimom da na najbolji način podignu razinu stručnosti, a među njima su bili Kirill Sinelnikov, Petar Kapitsa i Vladimir Vernadski. Početkom 1930-ih postojalo je nekoliko istraživačkih centara specijaliziranih za nuklearnu fiziku. Kirill Sinelnikov se vratio iz Cambridgea 1931. godine kako bi organizirao odjel na ukrajinskom Institutu za fiziku i tehnologiju (kasnije preimenovan u Kharkov institut za fiziku i tehnologiju, KIPT).⁷ Godine 1940. postignut je veliki napredak u razumijevanju nuklearne fuzije. Na poticaj Kurchatova i njegovih kolega, Akademija znanosti osnovala je "Odbor za problem urana", u lipnju 1940. godine, kojim je predsjedao Vitalij Khlopin, a osnovan je i fond za istraživanje uranijskih nalazišta u Srednjoj Aziji. Institut za radijum imao je tvornicu u Tartarstanu koju je Khlopin koristio za proizvodnju prvog radija visoke čistoće u Rusiji, a njemačka invazija na Rusiju 1941. godine pretvorila je velik dio ovog temeljnog istraživanja u potencijalne vojne primjene.⁸ Demonstracija strašne razornosti atomskih bombi njihovim aktiviranjem nad Japanom u kolovozu 1945. godine rezultirala je najprije Washingtonskom deklaracijom (1945) predsjednika SAD-a, Velike Britanije i Kanade o primjeni nuklearne energije samo u miroljubive svrhe, a zatim i Baruchovim planom o osnivanju međunarodne organizacije velikih ovlasti za miroljubivo iskorištavanje nuklearne energije u okviru UN-a. Međutim, SSSR nije plan prihvatio, tada već intenzivno razvijajući vlastitu atomsku bombu, koju je prvi put demonstrirao 1949. godine. Počeo je hladni rat i utrka u nuklearnom naoružanju koja se razvila do iracionalnih razmjera, stavljajući miroljubivu upotrebu nuklearne energije u drugi plan. Zbog općeg nedostatka

⁶ World Nuclear Association, Outline History of Nuclear Energy, dostupno na: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx> (pristupljeno: 25. svibnja 2019.)

⁷ Ibid.

⁸ Ibid.

„konvencionalne” energije 1950-ih godina šest država osnivačica okrenulo se nuklearnoj energiji kao mogućnosti nezavisne opskrbe energijom. S obzirom na to da pojedinačno ne bi mogle snositi troškove investiranja u nuklearnu energiju, države osnivačice udružile su se i utemeljile Europsku zajednicu za atomsku energiju, a opći su ciljevi Ugovora o Euratomu doprinos oblikovanju i razvoju nuklearne industrije u Europi kako bi sve države članice mogle imati koristi od razvoja atomske energije te jamstvo sigurnosti opskrbe.⁹ Zato je 1955. godine u Ženevi održana Konferencija o miroljubivoj upotrebi atomske energije, kada su SAD i druge zemlje obznanili do tada nedostupna znanja iz nuklearne znanosti i tehnologije, a već 1956. godine UN je osnovao Međunarodnu agenciju za atomsku energiju (*International Atomic Energy Agency*, IAEA) sa zadaćom da potiče i pomaže mirnodopsku upotrebu nuklearne energije, dok su se nuklearni reaktori za proizvodnju energije intenzivnije počeli razvijati 1960-ih i 1970-ih godina.¹⁰ Prva nuklearna elektrana izgrađena je u Engleskoj 1954. godine, a bila je to poznata nuklearka Sellafield koja i danas, usprkos relativno staroj tehnologiji i instalacijama te mnogobrojnim incidentima i zagađenju okoliša radijacijom, još uvijek radi i proizvodi električnu struju - ali i plutonij¹¹, koji spada među najgore fisijske nusproizvode zbog visoke radioaktivnosti i dugog perioda razgradnje (preko 24.000 godina). Tijekom šezdesetih i sedamdesetih godina prošlog stoljeća gotovo sve razvijene zemlje Zapada počele su ubrzano graditi nuklearne elektrane, bio je to pravi *boom* nuklearki. Dugoročne posljedice njihove eksploatacije nisu se uzimale u obzir, a u utrci za profitom posljedice su ostavljene na brigu budućim naraštajima. Iste su dobro radile i proizvodile jeftinu električnu energiju bez emisija. Godine 1974. Francuska je odlučila napraviti veliki poticaj za nuklearnu energiju i završila je s 75 posto električne energije iz nuklearnih reaktora. SAD su izgradile 104 reaktora i dobile su oko 20 posto svoje električne energije. Na kraju, nedostaci radne snage i kašnjenja u izgradnji počeli su povećavati troškove nuklearnih reaktora, usporavajući njihov rast. Ipak, nezgoda na Three Mile Islandu 1979. i nesreća u Černobilu 1986. godine dodatno su usporile postavljanje nuklearnih reaktora, a stroži propisi povećali su troškove. Godine 1994. potpisan je sporazum Megatons to Megawatts s Rusijom kojim se nuklearne bojeve glave pretvaraju u gorivo reaktora. Na kraju, 10 posto američke

⁹Europski parlament, Nuklearna energija, dostupno na:

<http://www.europarl.europa.eu/factsheets/hr/sheet/62/kernenergie> (pristupljeno: 26. svibnja 2019)

¹⁰ On-line izdanje Hrvatske enciklopedije, enciklopedijski članak Nuklearna energija, dostupno na: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=44375> (pristupljeno: 26. svibnja 2019.)

¹¹ Knapp, V., Krejči, M., Lebegner, J. (2006) Prvih pola stoljeća komercijalnih nuklearnih elektrana, *Journal of Energy: Energija*, 55 (6), str. 658-689.

struje dolazi iz rastavljenog nuklearnog oružja.¹² Krajem 20. i početkom 21. stoljeća fenomenalna sigurnosna evidencija američke komercijalne flote reaktora i nesmetano funkcioniranje reaktora u kombinaciji s tadašnjim zabrinutostima u vezi globalnih klimatskih promjena zbog emisija ugljičnog dioksida dovodi do značajnog razgovora o "nuklearnoj renesansi", gdje se nove gradnje mogu ponovno pokrenuti.¹³ U ožujku 2011. godine veliki potres i tsunami potopili su reaktore u Fukushimi u Japanu, a takva nuklearna katastrofa je potaknula promišljanje nuklearne politike u mnogim državama. Njemačka je odlučila zatvoriti sve svoje reaktore do 2022. godine, a Italija se odrekla nuklearne energije. Nakon Fukushime, Međunarodna agencija za energiju prepolovila je svoju procjenu dodatnih nuklearnih kapaciteta koji bi se izgradili do 2035. godine.¹⁴

2.2 Tehnologija proizvodnje električne energije u nuklearnim elektranama

Iako su sićušni, atomi sadrže veliku količinu energije koja drži njihove jezgre na okupu. Određeni izotopi nekih elemenata mogu se podijeliti i osloboditi dio svoje energije kao toplinu. Ovo cijepanje naziva se fisija (Slika 1). Toplina koja se oslobađa u fisiji može se koristiti za pomoć u proizvodnji električne energije u pogonskim postrojenjima. Uranij-235 (U-235) je jedan od izotopa koji se lako izlučuje. Tijekom fuzije, U-235 atomi apsorbiraju labave neutrone. To uzrokuje da U-235 postane nestabilan i podijeljen na dva laka atoma koji se nazivaju proizvodi fisije. Kombinirana masa produkata fisije je manja od mase izvornih U-235. Smanjenje se događa zato što se dio materije mijenja u energiju. Energija se oslobađa kao toplina. Dva ili tri neutrona se oslobađaju zajedno s toplinom. Ovi neutroni mogu pogoditi druge atome, uzrokujući više fisija.¹⁵ Ako se pod pravim uvjetima dovede dovoljno urana, dolazi do kontinuirane lančane reakcije. To se naziva samo-održiva lančana reakcija. Samoodrživa lančana reakcija stvara veliku količinu topline koja se može iskoristiti za proizvodnju električne energije. Nuklearne elektrane proizvode električnu energiju kao i svaka druga električna elektrana na paru. Voda se zagrijava, a para iz vrele vode pretvara turbine i generira električnu energiju. Glavna razlika u različitim vrstama parno-električnih postrojenja je izvor topline. Vrućina iz samoodržive lančane reakcije zagrijava vodu do vrenja u nuklearnoj elektrani. Ugljen, ulje ili plin se spaljuju u drugim pogonskim

¹² Knapp, V., Krejči, M., Lebegner, J. (2006) Prvih pola stoljeća komercijalnih nuklearnih elektrana, *Journal of Energy: Energija*, 55 (6), str. 658-689.

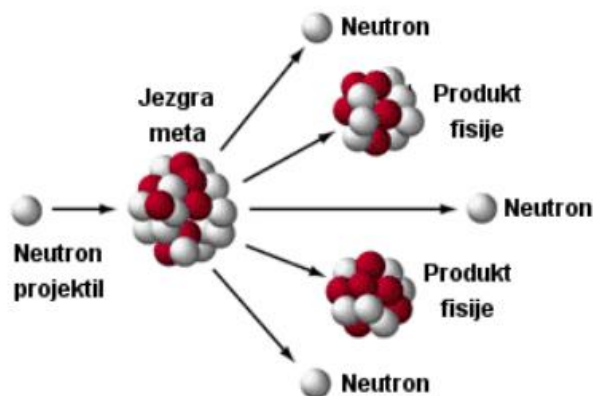
¹³ What is nuclear, *History of Nuclear Energy*, dostupno na: <https://whatisnuclear.com/history.html> (pristupljeno: 5. lipnja 2019.)

¹⁴ *The Economist* (2011) Gauging the pressure, dostupno na: https://www.economist.com/business/2011/04/28/gauging-the-pressure?story_id=18621367 (pristupljeno: 6. lipnja 2019.)

¹⁵ *Ibid.*

postrojenjima radi zagrijavanja vode. Nuklearna fuzija odvija se na temperaturama od više milijuna kelvina i osnovni je proces stvaranja energije u zvijezdama; u zemaljskim uvjetima ostvarena je nekontrolirana fuzija eksplozijom atomske bombe. Kontrolirana fuzija znatno je teži znanstveni problem; fuzija vodikova izotopa ostvarena je tek nakon desetljeća istraživanja u nekoliko istraživačkih uređaja, ali je komercijalno korištenje fuzijske energije za sada udaljeno više desetljeća, pa i upitno, barem u današnjim fuzijskim uređajima.¹⁶

Slika 1 Nuklearna reakcija fisije



Izvor: <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A112/datastream/PDF/view> (preuzeto: 6. lipnja 2019.)

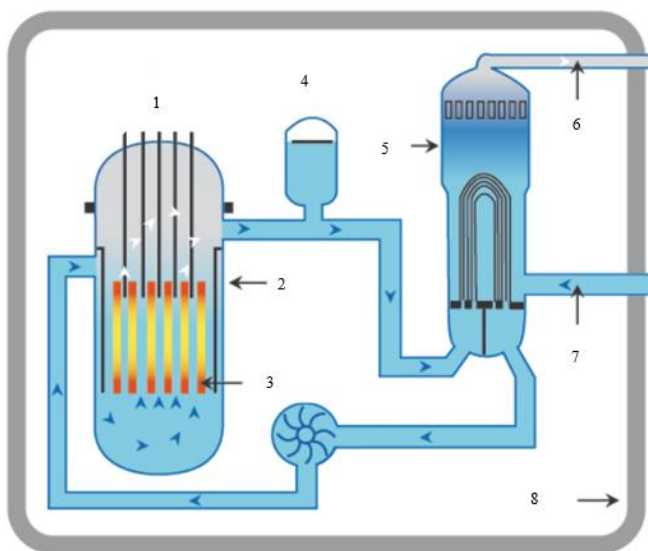
Nuklearne elektrane su postrojenja u kojima se toplinska energija koja se oslobađa u nuklearnim reaktorima prilikom raspada atoma nuklearnih goriva iskorištava za proizvodnju električne energije, a na taj način dobivena toplinska energija upotrebljava se, pri današnjem stanju razvoja tehnike, samo za stvaranje vodene pare kojom se tjeraju turboagregati.¹⁷ Pretvorba energije iz nuklearne u električnu u nuklearnoj se elektrani obavlja posredno, u nekoliko koraka pa je tako prvi korak izvlačenje nuklearne energije, pohranjene u jezgrama atoma nuklearnog goriva. Nuklearna se energija pretvara u toplinsku u nuklearnom reaktoru, pomoću lančane reakcije nuklearne fisije, a dobivena toplinska energija zatim se odvodi iz reaktora. Mehanizam odvođenja topline ovisi o vrsti nuklearnog reaktora. Parogenerator je izmjenjivač topline koji odvaja primarni krug od sekundarnog, a voda iz reaktora, voda primarnog kruga, ulazi u parogenerator i grije vodu sekundarnog kruga, a zatim se pomoću primarnih pumpi vraća u reaktor. Voda sekundarnog kruga, koja se s primarnom vodom ne miješa, preuzima njenu toplinu kroz stijenke cijevi parogeneratora i vrije, a nastala para se

¹⁶ On-line izdanje Hrvatske enciklopedije, enciklopedijski članak Nuklearna energija, dostupno na: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=44375> (pristupljeno: 6. lipnja 2019.)

¹⁷ Josipović, I. (2017) Nove tehnologije nuklearnih termoelektrana. Osijek: Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku, str. 11.

privodi parnoj turbini, gdje predaje svoju energiju rotoru turbine, tj. toplinska energija se pretvara u mehaničku energiju. Rotor turbine je na istoj osovini kao i rotor električnog generatora, čime se ostvaruje konačna pretvorba energije u električnu, a para izašla iz turbine odvodi se u kondenzator, gdje se hladi i kondenzira te se pomoću sekundarnih pumpi vraća u parogenerator, zatvarajući tako sekundarni krug.¹⁸ Treba istaknuti kako je nuklearni reaktor zapravo uređaj koji se koristi za pokretanje i kontrolu neprekidne nuklearne lančane reakcije, dok se kod nuklearne bombe dešava eksplozivna i nekontrolirana lančana reakcija. Nuklearni reaktori koriste se u nuklearnim elektranama za proizvodnju električne energije i za pogon brodova. Nuklearni reaktor se sastoji od reaktorske posude, gdje se nalazi reaktorska jezgra, čiji su glavni dijelovi: gorivo, moderator, rashladno sredstvo i apsorpcijski materijali, a Slika 2 uz glavne dijelove prikazuje jednostavnu shemu vodenog reaktora pod pritiskom (PWR), koji je ujedno i reaktor s najširoom uporabom (Tablica 1).

Slika 2 Dijelovi nuklearnog reaktora



1-Upravljačke šipke, 2-Gorivo, 3-Posuda pod tlakom ili tlačna cijev, 4-Potisnik, 5-Generator pare, 6-Para, 7-Voda, 8-Obloga od armiranog betona i štit

Izvor: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx> (preuzeto: 2. rujna 2019.)

Nuklearni se reaktori klasificiraju na različite načine. Tako se prema energiji neutrona razlikuju: termički (sa sporim neutronima), intermedijarni (s neutronima srednjih energija) i brzi reaktori (s brzim neutronima); prema rashladnom sredstvu: lakovodni (s običnom vodom), teškovodni (s teškom vodom) i plinom hlađeni reaktori; prema namjeni: energetske

¹⁸ Feretić, D., Čavlina, N., Debrecin, N., Govedarica, V. (1995) Nuklearne elektrane. Zagreb: Školska knjiga

reaktori (proizvodnja topline), istraživački reaktori (dobivanje neutrona za istraživanja) i konvertori, u kojima se od nefisibilnoga materijala konverzijom dobiva fisibilni materijal (^{239}Pu i ^{241}Pu od ^{238}U , a ^{233}U od ^{232}Th). Konvertori koji proizvode više fisibilnoga materijala nego što ga svojim radom troše nazivaju se oplodni reaktori (FBR: Fast Breeder reactor).¹⁹ U Tablici 1 su navedene vrste i opisni naziv reaktora te njihov broj u svijetu na dan 31. prosinca 2018. godine. Iz iste je vidljivo da su najrašireniji tlačni reaktori (PWR: Pressurized Water Reactor), koji kao gorivo koristi obogaćeni uran. Između ostalih i NEK ima tlačni reaktor.

Tablica 1: Operativni i dugotrajni zaustavni reaktori prema vrsti na dan 31. prosinca 2018. godine

VRSTA REAKTORA	OPISNI NAZIV REAKTORA	BROJ REAKTORA	UKUPNA SNAGA [MW]
BWR	Reaktor hlađen i moderiran običnom kipućom vodom	70	69.713
FBR	Brzi oplodni reaktor	3	1.400
GCR	Reaktor hlađen plinom i moderiran grafitom	14	7.725
LWGR	Reaktor hlađen običnom kipućom vodom i moderiran grafitom	13	9.283
PHWR	Reaktor hlađen i moderiran teškom vodom pod tlakom	49	24.557
PWR	Reaktor hlađen i moderiran običnom vodom pod tlakom	301	287.028
UKUPNO		450	399.706

Izvor: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx> (preuzeto 27. kolovoza 2019.)

Radom nuklearnoga reaktora nastaju radioaktivni fizijski produkti, čije ispuštanje bi ugrozilo stanovništvo i okoliš. Zato se pri projektiranju, izgradnji i pogonu nuklearnih reaktora velika pozornost posvećuje njihovoj sigurnosti. Nakon nesreća na reaktorima nuklearnih elektrana Otok tri milje u SAD-u i Černobil u Ukrajini poboljšana je sigurnost današnje generacije nuklearnih reaktora. Daljnje poboljšanje očekuje se kod novih generacija, kod kojih će sigurnost biti zasnovana na fizikalnim principima, a ne na aktivnom djelovanju inženjerskih sustava (inherentna sigurnost). Dobre su strane nuklearnih reaktora što oni ne onečišćuju okoliš ispuštanjem dima i plinova, a nedostaci su povećano toplinsko opterećenje okoliša i

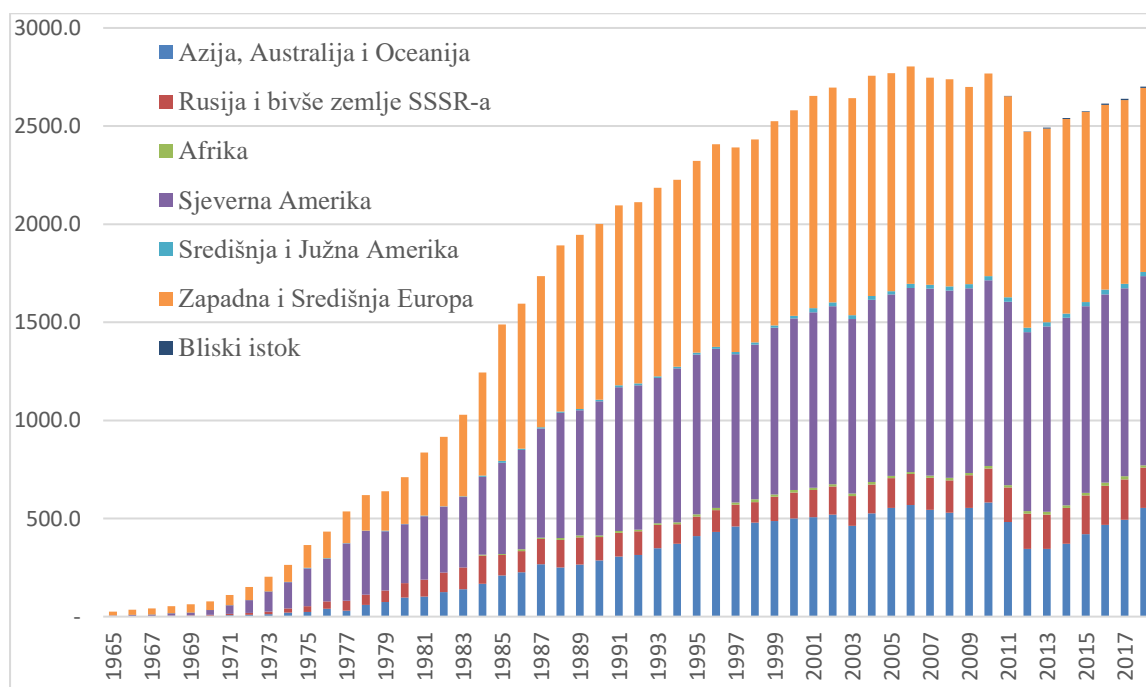
¹⁹ On-line izdanje Hrvatske enciklopedije, enciklopedijski članak Nuklearni reaktori, dostupno na: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=44384> (pristupljeno 28. kolovoza 2019.)

stvaranje radioaktivnoga materijala. Najveći je sigurnosni problem zbrinjavanje istrošenoga nuklearnoga goriva, koje treba izolirati od okoliša desetak tisuća godina.²⁰

2.3 Uloga i upotreba nuklearne energije

Danas je nuklearna energija značajna komponenta svjetske opskrbe električnom energijom. Preko četiristo reaktora priključeno je na mreže u 30-ak zemalja koje osiguravaju oko 16 posto potrošene električne energije širom svijeta i gotovo jednu četvrtinu u zemljama OECD-a. Globalni, tehnički, ekološki i ekonomski učinci nuklearnih elektrana u pogonu vrlo su zadovoljavajući. Poboljšanja sigurnosti i pouzdanosti nuklearnih sustava trenutne generacije pokazuju manje neplaniranih zatvaranja, nižu kolektivnu dozu za radnike i smanjenu vjerojatnost teških nesreća. Iz Grafa 1 se vidi kretanje proizvodnje električne energije u svjetskim regijama iz nuklearnih izvora od 1965. do 2018. godine, gdje je vidljivo kako zapadnoeuropske zemlje i zemlje Sjeverna Amerike od samih početaka proizvodnje električne energije iz nuklearnih izvora prednjače u proizvodnji, a vrhunac je bio dosegnut 2006. godine s proizvodnjom od preko 2.500 TWh.

Graf 1: Proizvodnja električne energije iz nuklearnih izvora u svijetu po regijama u razdoblju od 1965. do 2018. godine



Izvor: izračun autora na temelju podataka BP-a, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html> (preuzeto: 25. kolovoza 2019.)

²⁰ On-line izdanje Hrvatske enciklopedije, enciklopedijski članak Nuklearni reaktori, dostupno na: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=44384> (pristupljeno: 21. svibnja 2019.)

Oko 60 posto nuklearnih elektrana u pogonu ima manje od 25 godina i nastavit će s radom još nekoliko desetljeća. To znači da će nuklearne elektrane još dugi niz godina biti dio energetske ponude. Uloga nuklearne energije u dugoročnom razdoblju mora se ispitati u cjelokupnom kontekstu ravnoteže ponude i potražnje na svjetskoj razini. Potreba za dodatnom energijom široko je prepoznata od strane analitičara i kreatora politike. Prema referentnom scenariju Međunarodne agencije za energiju (IEA), svjetska potražnja za primarnom energijom povećat će se za 50 posto od sada do 2030. godine, a potrošnja električne energije gotovo će se udvostručiti.²¹ Vlade razmatraju i mogu poduzeti mjere politike za usporavanje rasta potražnje, ali su neizbježna značajna povećanja, posebno u zemljama u razvoju. Sigurnost opskrbe energijom goruće je pitanje za zemlje OECD-a i od vitalnog je značaja za zemlje u razvoju u kojima nedostatak energije može značiti ekonomsku stagnaciju, kontinuirano siromaštvo i kraće očekivano trajanje života. U tom kontekstu, izazov za kreatore energetske politike nije odabir između fosilnih, nuklearnih i obnovljivih izvora, ili između mjera opskrbe i očuvanja energije, već kako bi se osiguralo da se svi izvori i sva sredstva za uštedu energije učinkovito koriste uzimajući u obzir njihove ekološke, socijalne i ekonomske karakteristike. Prema tome, uloga nuklearne energije u budućim strukturama opskrbe uvelike će ovisiti o njezinoj sposobnosti da na oba načina odgovori na isplativ način. Što se tiče ekonomije, nestabilnost i eskalacija cijena fosilnih goriva pridonose povećanju atraktivnosti nuklearne energije. Sa svojim vrlo niskim tekućim troškovima, nuklearne elektrane postaju najjeftiniji izvor energije kada se njihovi kapitalni troškovi amortiziraju. Nadalje, u pogledu kapitalnih ulaganja, projekti novih postrojenja koja se danas grade imaju koristi od desetljeća industrijskog iskustva koje je pridonijelo smanjenju troškova.

U većini zemalja koje se oslanjaju na nuklearnu opciju, troškovi proizvodnje nuklearne energije, koji internaliziraju sigurnost, zaštitu od zračenja i gospodarenje otpadom i njihovo odlaganje, konkurentni su alternativama. Prema studiji objavljenoj 2015. godine u OECD-u, analizom više od 180 postrojenja, na temelju podataka koji pokrivaju 22 zemlje, otkriva nekoliko ključnih trendova, ukazujući, na primjer, na značajan pad troškova obnovljivih izvora u posljednjih nekoliko godina. Izvješće također otkriva da troškovi nuklearne energije ostaju u skladu s troškovima drugih tehnologija osnovnog opterećenja, posebno na tržištima koja cijene dekarbonizaciju. Sveukupno, pokretački troškovi različitih tehnologija generiranja

²¹ International Energy Agency (2006) World Energy Outlook 2006. Paris: OECD

ostaju i tržišno i tehnološki specifični.²² Klasični izvori energije, koji uključuju snagu vode i goriva organskog podrijetla (ugljen, nafta, drvo), ne mogu zadovoljiti sve veću potrošnju električne energije. Vodene snage koje se mogu ekonomično iskoristiti vrlo su ograničene, a zalihe goriva organskog podrijetla neprekidno se smanjuju pa se zbog toga sve više prelazi na korištenje nuklearne energije koja može zadovoljiti sve veće energetske potrebe.²³ Nuklearna energija je izvor bez ugljika, a sekundarne emisije ugljičnog dioksida proizlaze iz nekih koraka i procesa gorivnog ciklusa uključenih u životni ciklus nuklearnih postrojenja. Po KWh proizvedene električne energije, lanac nuklearne energije emitira 2,5 do 5,7 grama ekvivalenta ugljika u usporedbi sa 100 do 350 za lance fosilnih goriva i 2,5 do 75 za različite lance obnovljive energije.²⁴ Stoga, zamjenom fosilnih jedinica nuklearnim elektranama može se značajno smanjiti intenzitet ugljika u elektroenergetskom sektoru. Sadašnja uporaba nuklearne energije ograničena je isključivo na proizvodnju električne energije. Održavanjem ili povećanjem udjela u ukupnoj opskrbi električnom energijom, nuklearna energija mogla bi pomoći u ublažavanju napetosti na tržištu prirodnog plina i rizika od globalnih klimatskih promjena. Stopa izgradnje nuklearnih elektrana u ranim 1980-im pokazuje da je udvostručavanje svjetskog instaliranog nuklearnog kapaciteta u roku od 30 godina tehnički izvedivo, pod uvjetom da vlade provode odgovarajuće politike koje se žele osloniti na nuklearnu opciju. Međutim, unatoč prepoznatim prednostima nuklearne opcije i obnovljenom interesu vladinih i industrijskih kreatora politike za nuklearnu energiju, odluke o izgradnji novih nuklearnih elektrana ostaju ograničene, osim u zemljama s dugom tradicijom oslanjanja na nuklearnu energiju. Nevoljkost investitora da se upuste u kapitalno intenzivne projekte s dugim periodima amortizacije nije jedinstvena samo za nuklearnu energiju, ali izaziva posebne zabrinutosti zbog kojih se treba pozabaviti uključivanjem vlade. Projekti nuklearne energije povećavaju financijske, regulatorne i društveno-političke rizike. Vladino vodstvo, koje je ključno u izradi energetske politike, posebno je važno za ublažavanje rizika specifičnih za nuklearnu energiju, a stabilni nacionalni regulatorni i politički okviri preduvjet su za privlačenje ulagača u nuklearne projekte. Uloga međunarodne suradnje također je važna kako bi se olakšala prilagodba i prijenos tehnologije te sigurnost opskrbe gorivnim ciklusom.²⁵

²² OECD Nuclear Energy Agency and International Energy Agency (2015) Projected Costs of Generating Electricity: 2015 Update. Paris: OECD

²³ Ibid.

²⁴ Spadaro, J.V. i sur. (2000) Greenhouse gas emissions of electricity generation chains: Assessing the difference, IAEA Bulletin, 42 (2), str. 1-10.

²⁵ Ibid.

Dugoročno, nacionalni i međunarodni programi istraživanja i razvoja namijenjeni razvoju četvrte generacije nuklearnih sustava usmjereni su na postizanje još ambicioznijih ciljeva u pogledu sigurnosti, ekonomije, upravljanja resursima, otpora proliferacije i fizičke zaštite, a očekuje se da će biti dostupni na tržištu u razdoblju od 2020. do 2030. godine te da će biti spremni na vrijeme zamijeniti zastarjele nuklearne jedinice i suočiti se s povećanom potražnjom električne energije. Rješavanje pitanja sigurnosti opskrbe energijom, globalne prijetnje klimatskim promjenama i društveno-ekonomskih ciljeva 21. stoljeća veliki su izazov za kreatore politike širom svijeta. Bez učinkovite kombinacije tehnologija i mjera politike, postizanje cilja održivog razvoja neće biti moguće. Nuklearna energija jedna je od mogućnosti koja može odigrati značajnu ulogu u sigurnoj, konkurentnoj opskrbi energijom bez ugljika u velikom opsegu. Vlade zainteresirane za nuklearnu opciju trebale bi osigurati da su okviri politike u njihovim zemljama prikladni za pravovremenu provedbu nuklearnih sustava. Međunarodne organizacije poput OECD-ove Agencije za nuklearnu energiju imaju glavnu ulogu u olakšavanju razmjene informacija između zemalja, jačanju multinacionalne suradnje, pomaganju u razvoju konsenzusa o ključnim pitanjima i podupiranju zajedničkih napora kao što je Međunarodni forum IV. generacije s ciljem razvijanja nuklearnih sustava buduće generacije, ili Multinacionalni program evaluacije dizajna, koji je inicijativa glavnih regulatora za promicanje razmjene informacija i usklađivanje pristupa sigurnosnim pregledima naprednih sustava.

Nuklearna tehnologija ne koristi se samo za opskrbu električne energije nego se koristi i u drugim područjima kao što su medicina, grijanje pa i putovanje u svemir, a poznato je da vojna industrija koristi nuklearnu tehnologiju za pogon podmornica. Nuklearna fizika našla je vrlo široku primjenu u raznim područjima ljudske djelatnosti. Najranija a i najčešća primjena nuklearne fizike je u medicini što je rezultiralo formiranjem nove grane u medicini, tzv. nuklearne medicine. Nuklearne tehnike koriste se u medicini za otkrivanje bolesti (dijagnostika) i liječenje raka. Dijagnostičke tehnike u nuklearnoj medicini su: Glossary Link radiografija korištenjem X zraka, gama kamera, kompjuterska tomografija (CT), tomografija emisijom pozitrona (PET), te nuklearna magnetska rezonancija (NMR). Terapijske tehnike u nuklearnoj medicini uključuju: ozračivanje fotonima i elektronima, korištenje radionuklida, ozračivanje neutronima i ozračivanje teškim nabijenim česticama. Različite vrste zračenja koriste se za uništavanje tkiva tumora ili vanjskim ozračivanjem (teleterapija) ili unutarnjim ozračivanjem stavljanjem izvora zračenja u tumorsko tkivo (brahiterapija). Sljedeća značajna primjena nuklearne fizike je u industriji. Primjena nuklearne fizike u industriji može se kategorizirati prema ulozi i načinu korištenja nuklearnog zračenja i to: a) zračenje se koristi

kao obilježavač procesa, b) karakteristike zračenja mijenjaju se prolazom kroz materijal, c) karakteristike materijala mijenjaju se prolazom zračenja i d) zračenje se koristi kao izvor energije. Primjene u kojima se zračenje koristi kao obilježavač uključuju: otkrivanje mjesta curenja cijevi, mjerenje načina i brzine protoka fluida, praćenje različitih materijala, istraživanje metabolizma, ispitivanje mehanizama kemijskih reakcija, ispitivanju istrošenosti i korozije, određivanje starosti predmeta i određivanje visokih temperatura metalnih površina. Primjene u kojima se koristi da se karakteristike zračenja mijenjaju prolazom kroz materijal uključuju: mjerenje gustoće, mjerenje debljine sloja, mjerenje razine tekućine u zatvorenim spremnicima, ispitivanje kvalitete varova, otkrivanje plastičnih eksploziva, istraživanje nalazišta nafte, detektiranje šupljina u materijalu, utvrđivanje nečistoća i elemenata u tragovima, ispitivanje kvalitete odljeva, otkrivanje defekata u materijalu te detektore dima. Primjene u kojima se karakteristike materijala mijenjaju prolazom zračenja uključuju: konzerviranje hrane, bakterijska sterilizacija, modifikacija polimera, kontrola insekata, istraživanje bioloških mutacija i katalitičko djelovanje zračenja na kemijske reakcije. Raspadom radioaktivnog nuklida oslobađa se energija koja se apsorpcijom emitiranog zračenja u okolnom mediju pretvara u toplinu tako da se spremnik koji sadrži odgovarajući radioaktivni Glossary Link nuklid može koristiti kao izvor toplinske energije. Ugradnjom uređaja koji direktno pretvara toplinsku energiju u električnu spremnik postaje generator električne energije. Takvi toplinski i električni generatori na bazi radioaktivnih izotopa koriste se u istraživanjima svemira. Mnogobrojne nuklearne tehnike koriste se u znanstvenim i tehnološkim istraživanjima. Valja napomenuti da se zračenje proizvedeno u akceleratorima može jednako upotrijebiti kao i zračenje iz raspada radioizotopa. Dapače, zbog većeg raspona u energijama zračenja, kao i većem izboru čestica zračenja omogućene su primjene koje s radioizotopima nisu bile moguće (npr. radiografija vrlo masivnih komada materijala betatronske zračenjem, zračenje tumora i druge).²⁶ Nadalje, tehnologija koja se temelji na nuklearnoj fisiji, dopuštajući povrat energije iz urana, doprinosi raznolikosti i sigurnosti opskrbe, dodajući novi resurs fosilnim i obnovljivim energijama.

2.4 Nuklearna energija u odnosu na ostale oblike primarne energije

Primarna energija je oblik energije koji se nalazi u prirodi i koji nije bio podvrgnut bilo kojem procesu konverzije ljudi. To je energija sadržana u sirovim gorivima i drugi oblici energije primljeni su kao ulazni sustav. Primarna energija može biti obnovljiva ili

²⁶ Nuklearna energija – Mistika i stvarnost, dostupno na: <http://www.nemis.hr/index.php/primjena-u-neenergetske-svrhe/primjena-u-neenergetske-svrhe.html> (pristupljeno: 23. svibnja 2019.)

obnovljiva. Kada se primarna energija koristi za opisivanje fosilnih goriva, utjelovljena energija goriva dostupna je kao toplinska energija, a oko 70 posto se obično gubi u pretvorbi u električnu ili mehaničku energiju. Postoji sličan gubitak konverzije 60-80 posto kada se solarna energija i energija vjetra pretvaraju u električnu energiju, ali današnje konvencije UN-a o energetskej statistici broje električnu energiju proizvedenu od vjetra i sunca kao samu primarnu energiju za te izvore. Jedna od posljedica ove metode brojanja je da je doprinos vjetra i sunčeve energije prijavljen u usporedbi s fosilnim izvorima energije te je stoga pokrenuta međunarodna rasprava o tome kako računati primarnu energiju iz vjetra i sunca. Mnoge zemlje preispituju ulogu nuklearne energije u njihovom energetskej miksu, kao sredstvo za ublažavanje zabrinutosti zbog klimatskih promjena, sigurnosti opskrbe energijom i nestabilnosti cijena fosilnih goriva. Međutim, nuklearna energija ostaje sporna tehnologija u nekim političkej krugovima i u svijesti mnogih građana.²⁷ Jedno od pitanja koje izaziva zabrinutost je sigurnost nuklearnih elektran. Međutim, racionalan izbor energetskej izvora trebao bi uključivati čak i usporednu usporedbu rizika koje predstavljaju različiti dostupni energetskej lanci, jer malo je stvarne vrijednosti u odbacivanju jednog izvora ako ono što ga zamjenjuje predstavlja još veće opasnosti.²⁸ Nuklearna sigurnost nastoji osigurati zaštitu ljudi i okoliša od rizika zračenja postizanjem najviših praktičnih razina sigurnosti u nuklearnim elektranama. Nuklearna sigurnost nije predmet pregovora; sigurnost je i ostat će glavni prioritet nuklearne industrije. Nuklearna energija u zemljama OECD-a ima impresivne rezultate u pogledu sigurnosti u usporedbi s drugim energetskej lancima, jer je proizvodnja nuklearne energije je visoko regulirana aktivnost obzirom da regulatori imaju ključnu ulogu u osiguravanju kontinuirane nuklearne sigurnosti. Reaktori koji su u današnje vrijeme u pogonu reaktori su takozvane II. generacije. Danas se rade reaktori III. i III.+ generacije, a razvijaju se reaktori IV. generacije. Prednosti reaktora IV. generacije jesu učinkovitije iskorištavanje nuklearnoga goriva (a time i bolje upravljanje zalihama), poboljšana nuklearna sigurnost i manji volumen nastaloga radioaktivnog otpada.²⁹ Ekonomski rast i razvoj temeljen na fosilnim energentima kao primarnom izvoru energije polako, ali neupitno dolazi svome kraju, prvenstveno zbog emisije stakleničkih plinova i klimatskih promjena koje se očituju u porastu, kako prosječne temperature zraka, tako i maksimalnih temperaturnih amplituda. Udio fosilnih energenata u ukupnoj potrošnji energije u svijetu je 2017. godine iznosio oko

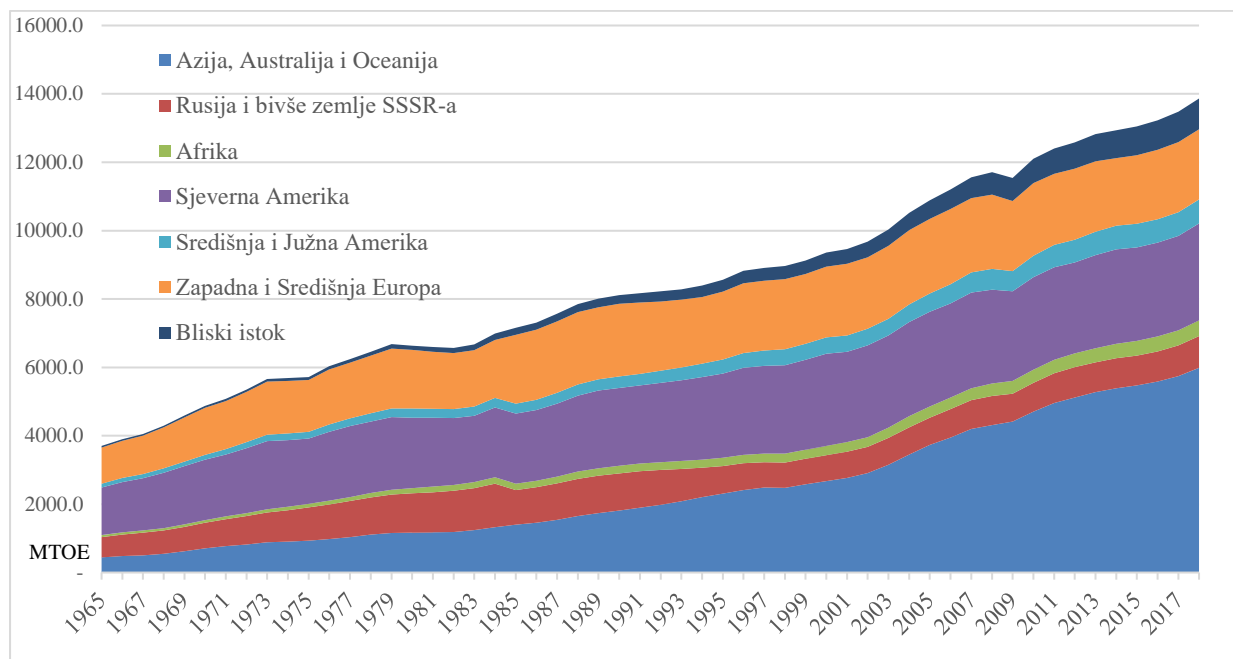
²⁷ Nuclear Energy Agency (2010) Comparing Nuclear Accident Risks with Those from Other Energy Sources, dostupno na: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2010/nea6861.pdf> (pristupljeno: 15. lipnja 2019.)

²⁸ Ibid.

²⁹ Mreža mlade generacije Hrvatskoga nuklearnoga društva (2013) Proizvodnja električne energije: Prednosti i nedostaci postojećih tehnologija. Zagreb: Tehnički muzej, str. 7.

85 posto, od čega je nafta činila 34 posto, ugljen 28 posto i prirodni plin 23 posto. S obzirom na rast potražnje za energijom zemalja u razvoju, prije svega Kine i Indije (Kina, Indija i Japan činili su 3/4 ukupnoga svjetskog rasta proizvodnje električne energije i 1/2 svjetskog rasta ukupne energije u 2017. godini traže se novi modeli ekonomskog rasta i razvoja temeljeni na obnovljivim izvorima energije i električnom energijom kao dominantnim oblikom u finalnoj potrošnji energije, proizvedenoj iz obnovljivih, a ne fosilnih izvora. Tako se 2018. godine 66 posto električne energije proizvodilo iz fosilnih izvora, prije svega ugljena (39 posto) i prirodnog plina (23 posto)³⁰ Na Grafu 2 je također vidljivo kao je opskrba primarnom energijom u konstantnom rastu od 1965. do 2018. godine. Veliki doprinos u rastu potrošnje primarne energije su dale Kina, SAD i Indija. Zajedno su činile više od dvije trećine globalnog porasta potražnje za energijom, pri čemu se potrošnja u SAD-u najbrže povećavala tijekom 30 godina.

Graf 2: Ukupna opskrba primarnom energijom u svijetu po regijama u razdoblju od 1965. do 2018. godine



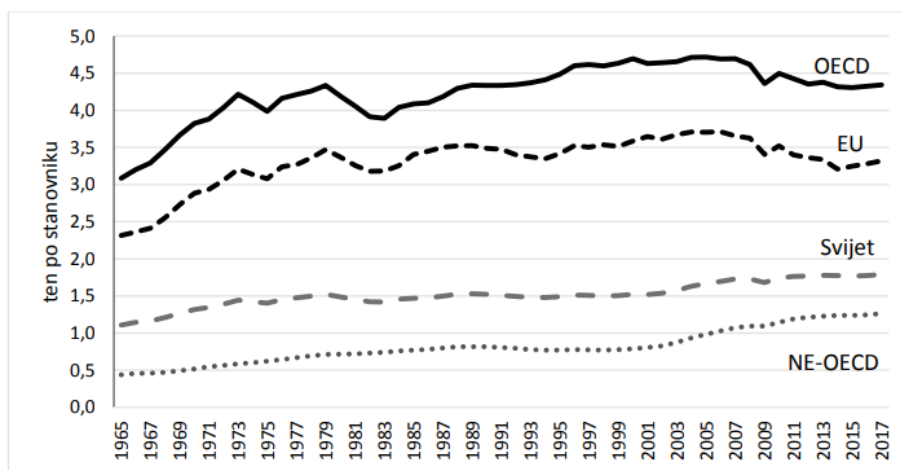
Izvor: izračun autora na temelju podataka BP-a, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/downloads.html> (preuzeto: 25. kolovoza 2019.)

OECD ima najveću potrošnju energije po stanovniku koja je porasla s oko 3 na preko 4 tone po stanovniku u analiziranom razdoblju, odnosno oko 40 posto (Grafikon 3). Ta potrošnja je

³⁰ Gelo, T, (2018), Energetska tranzicija i novi model energetskog tržišta, Modeli razvoja hrvatskog gospodarstva, Družić, G ; Družić, I, (ur.), Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti i Ekonomski fakultet, Zagreb, str. 395-425.

za oko 30 posto viša u odnosu na EU tijekom cijelog razdoblja. Porast potrošnje energije po stanovniku EU-a istovremeno je iznosio preko 40 posto, s 2,3 tone na 3,3, tone. Najmanju potrošnju energije po stanovniku ima Ne-OECD. Iako je imao najveći rast od 1965. do 2017. godine, oko 200 posto, potrošnja energije po stanovniku značajno je manja u odnosu na razvijene zemlje i iznosi oko 1,3 tone po stanovniku.³¹

Graf 3: Potrošnja energije po stanovniku po regijama u razdoblju od 1965. do 2017. godine

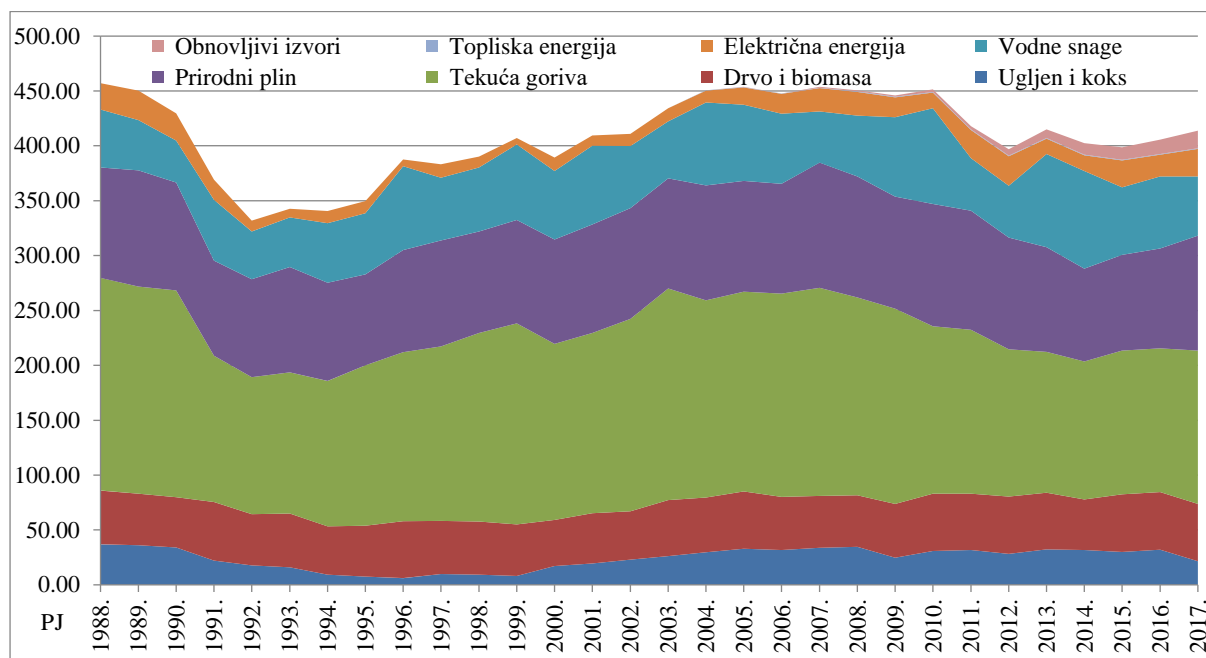


Izvor: <http://web.efzg.hr/repec/Chapters/chapter18-17.pdf> (preuzeto 20. lipnja 2019.)

Što se pak tiče potrošnje energije u Republici Hrvatskoj u razdoblju od 1988. do 2017. godine, vidljivo je da je vrhunac ostvaren davne 1988. godine s potrošnjom od 457,10 PJ (Graf 4), nakon čega zbog političkih i negativnih ekonomskih zbivanja slijedi pad koji u ratnim godinama iznosi preko 25 posto. Trend oporavka je pokrenut nakon ratnih zbivanja i svoj vrhunac je iznova dosegnuo 2005. godine s potrošnjom od 453,66 PJ, a kao najzastupljeniji energenti se izdvajaju tekuća goriva s udjelom od 181,88 PJ. Vidljivo je također da se od 2004. godine u strukturi s udjelom manjim od 0,01 posto pojavljuje potrošnja iz obnovljivih izvora energije (energija vjetra, biodizel, energija sunca, geotermalna energija i bio plin), da bi se u 2017 godini taj udio povećao na gotovo 4 posto. Na strukturu potrošnje energije su također utjecale i recesijske godine pa se iz grafa također može zaključiti kako su padovi uzrokovani upravo tom pojavom. Ukupna potrošnja u 2017. godini je iznosila 413,86 PJ, a najveći udio u potrošnji od 34 posto imaju tekuća goriva.

³¹ Izvor: Gelo, T, (2018), Energetska tranzicija i novi model energetskog tržišta, Modeli razvoja hrvatskog gospodarstva, Družić, G ; Družić, I, (ur.), Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti i Ekonomski fakultet, Zagreb, str. 395-425.

Graf 4: Potrošnja energije u RH u razdoblju od 1988. do 2017. godine



Izvor: izračun autora na temelju podataka Energetskog instituta Hrvoje Požar

3 PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ NUKLEARNIH ELEKTRANA

3.1 Kapaciteti nuklearnih elektrana u svijetu

Prema podacima Međunarodne agencije za atomsku energiju, trenutno u 30 država radi 450 nuklearnih reaktora, a njihova ukupna snaga iznosi 399.706,00 MWh (Tablica 2). Prema istom izvoru u izgradnji su 52 nove nuklearne elektrane (reaktora), ukupnog kapaciteta 52.704 MWh.³² Vidljivo je kako SAD pojedinačno raspolažu s najvećim brojem nuklearnih reaktora, dok odmah iza njih slijede Francuska, Kina, Japan i Rusija. Međutim, kada se u omjer stavi broj operativnih reaktora i ukupna neto električna snaga, dolazimo do zaključka kako je najbolja iskoristivost instaliranih kapaciteta u Njemačkoj, koju prate Francuska, SAD, Švedska i Španjolska, dok su Pakistan, Indija i Armenija na samom začelju.

Tablica 2: Broj operativnih reaktora, ukupna neto električna snaga i iskoristivost kapaciteta (u MW) na dan 31. prosinca 2019. godine

Zemlja	Broj reaktora	Ukupna neto električna snaga [MW]	Prosječna neto električna snaga po reaktoru [MW]
ARGENTINA	3	1.633	544,33
ARMENIJA	1	375	375,00
BELGIJA	7	5.918	845,43
BRAZIL	2	1.884	942,00
BUGARSKA	2	1.966	983,00
KANADA	19	13.554	713,37
KINA	48	45.518	948,29
ČEŠKA REPUBLIKA	6	3.932	655,33
FINSKA	4	2.784	696,00
FRANCUSKA	58	63.130	1.088,45
NJEMAČKA	7	9.515	1.359,29
MAĐARSKA	4	1.902	475,50
INDIJA	22	6.255	284,32
IRAN, ISLAMSKA REPUBLIKA	1	915	915,00
JAPAN	37	35.947	971,54
REPUBLIKA KOREJA	25	23.784	971,54

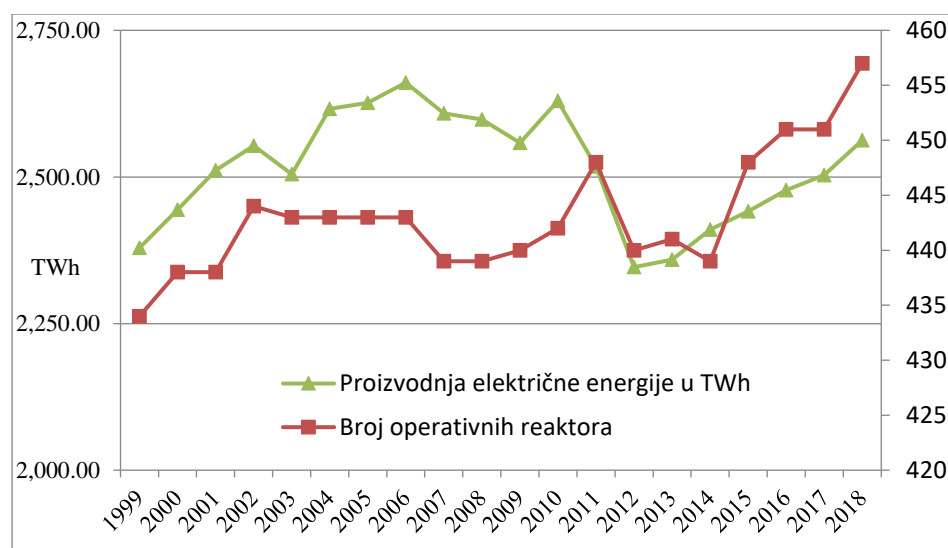
³² Međunarodna agencija za nuklearnu energiju, Power Reactor Information System, dostupno na: <https://pris.iaea.org/pris/> (pristupljeno: 25. lipnja 2019.)

MEKSIKO	2	1.552	776,00
NIZOZEMSKA	1	482	482,00
PAKISTAN	5	1.318	263,60
RUMUNJSKA	2	1.300	650,00
RUSIJA	36	28.355	787,64
SLOVAČKA	4	1.814	453,50
SLOVENIJA	1	688	688,00
JUŽNA AFRIKA	2	1.860	930,00
ŠPANJOLSKA	7	7.121	1.017,29
ŠVEDSKA	8	8.613	1.076,63
ŠVICARSKA	5	3.333	666,60
UKRAJINA	15	13.107,00	873,80
UJEDINJENO KRALJEVSTVO	15	8.923,00	594,87
SJEDINJENE AMERIČKE DRŽAVE	97	98.384,00	1.014,27
UKUPNO	450	399.706,00	888,24

Izvor: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx> (preuzeto 27. lipnja 2019.)

Na Grafu 5 je vidljivo kako je trend isporuke električne energije iz nuklearnih izvora u prosjeku oko 2.500 TWh odnosno da se periodično radi o uzlaznom trendu, međutim svaki nuklearni incident uzrokuje poremećaj u količini isporučene električne energije, što se zaključuje po godinama koje su uslijedile nakon nesreće u Fukushima 2011. godine.

Graf 5: Trend isporuke električne energije iz nuklearnih izvora u TWh i broj operativnih reaktora u razdoblju od 1999. do 2018. godine



Izvor: izračun autora na temelju podataka IAEA PRIS, <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/WorldTrendNuclearPowerCapacity.aspx> (preuzeto 17. lipnja 2019.)

Prema podacima navedenima u Tablici 3 se također može uočiti da se od 2014. godine broj operativnih reaktora povećava i kako je na kraju 2018. globalni nuklearni kapacitet 450 reaktora iznosio 396,41 GWe, što je u odnosu na 2017. godinu za 5 GWe više te nam navedeni podatak uz ostale sugerira da se nuklearni kapaciteti iz godine u godinu povećavaju. U 2018. godini svjetski su nuklearni reaktori isporučili gotovo 2.563 TWh električne energije što predstavlja oko 10 posto globalne potrošnje električne energije³³. Broj reaktora u izgradnji na kraju 2017. bio je 58, a prosječno vrijeme izgradnje za četiri reaktorske mreže je u istoj godini bilo 58 mjeseci (Graf 6).

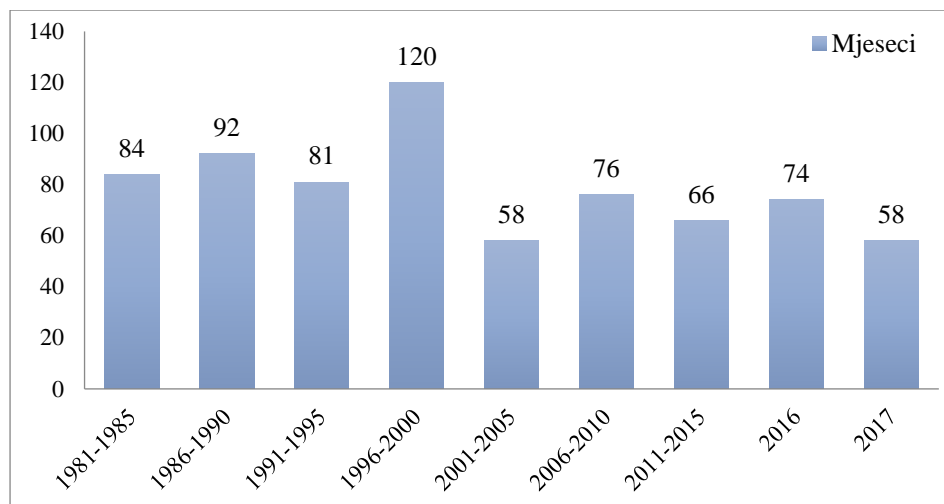
Tablica 3: Trend isporuke električne energije u svijetu u razdoblju od 1999. do 2018. godine

Godina	Broj operativnih reaktora*	Proizvodnja električne energije u TWh	Ukupni neto električni kapacitet na kraju godine [GW]
1999	434	2.378,93	347,35
2000	438	2.443,85	349,98
2001	438	2.511,09	352,72
2002	444	2.553,18	357,48
2003	443	2.504,78	359,83
2004	443	2.616,24	364,67
2005	443	2.626,34	368,12
2006	443	2.660,85	369,58
2007	439	2.608,18	371,71
2008	439	2.597,81	371,56
2009	440	2.558,06	370,7
2010	442	2.629,82	375,28
2011	448	2.517,98	368,92
2012	440	2.346,19	373,24
2013	441	2.358,86	371,78
2014	439	2.410,37	376,26
2015	448	2.441,34	382,81
2016	451	2.477,30	390,49
2017	451	2.502,82	391,72
2018	457	2.562,76	396,41

³³World Nuclear Association, dostupno na: <https://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/electricity-supplied-by-nuclear-energy.aspx> (pristupljeno 17. lipnja 2019.)

Izvor: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/WorldTrendinElectricalProduction.aspx> (preuzeto 17. lipnja 2019.)

Graf 6: Prosječno trajanje izgradnje nuklearnog reaktora u razdoblju od 1981. do 2017. godine



Izvor: izračun autora na temelju podataka World Nuclear association, <https://www.world-nuclear.org/gallery/world-nuclear-performance-report-gallery/median-construction-times-for-reactors-since-1981.aspx> (preuzeto 30. lipnja 2019.)

3.2 Proizvodnja električne energije

U većini elektrana potrebno je zavrtjeti turbinu za proizvodnju električne energije. Ugljen, prirodni plin, nafta i nuklearna energija koriste svoje gorivo da pretvore vodu u paru i koriste tu paru za okretanje turbine. Nuklearne elektrane su drugačije jer ne izgaraju ništa da bi stvorile paru. Umjesto toga, razdvajaju atome urana procesom koji se zove fisija. Kao rezultat toga, za razliku od drugih izvora energije, nuklearne elektrane ne oslobađaju ugljik ili onečišćujuće tvari poput dušika i sumpornih oksida u zrak. Nuklearni reaktori su dizajnirani da održe kontinuiranu lančanu reakciju fisije; napunjeni su posebno dizajniranim, čvrstim uranovim gorivom i okruženi vodom, što olakšava proces. Kada reaktor počne djelovati, atomi urana će se razdvojiti, oslobađajući neutrone i toplinu. Ti neutroni će pogoditi druge atome urana uzrokujući da se razdvoje i nastave proces, stvarajući više neutrona i više topline. Ova toplina se koristi za stvaranje pare koja će okretati turbinu, koja pokreće generator da proizvodi električnu energiju. Kad se dogodi sudar slobodnog neutrona i atom urana U-235 dolazi do cijepanja atoma U-235 na dva manja atoma i nekoliko slobodnih čestica uz oslobađanje ogromne količine energije. Teška voda koja se nalazi unutar reaktora skuplja tu energiju u obliku topline i prenosi je do rezervoara koji sadrži običnu vodu. Obična voda tom se prilikom pretvara u paru koja pokreće turbine rotora generatora električne

energije.³⁴ Nuklearna energija s uranijskom energijom čist je i učinkovit način prokuhavanja vode za proizvodnju pare koja pokreće generatore turbina. Osim za sam reaktor, nuklearna elektrana radi kao većina elektrana na ugljen ili plin. Nekoliko stotina gorivnih sklopova koji sadrže tisuće malih kuglica goriva od keramičkog uranovog oksida čine jezgru reaktora. Za reaktor snage 1.000 megavata (MWe) jezgra bi sadržavala oko 75 tona obogaćenog urana. U reaktorskoj jezgri izotop izotopa uranij-235 djeluje ili se razdvaja, stvarajući mnogo topline u kontinuiranom procesu koji se naziva lančana reakcija. Postupak ovisi o prisutnosti moderatora kao što je voda ili grafit i potpuno je kontroliran. Moderator usporava neutrone proizvedene fisijom uranijevih jezgri tako da oni nastavljaju proizvoditi više fisija. Današnji nuklearni reaktori uglavnom su reaktori takozvane Generacije II. i III. dok su svi reaktori prve generacije umirovljeni. Glavni dijelovi sustava za proizvodnju pare u nuklearnim elektranama su nuklearni reaktor, primarni rashladni krugovi koji sadrže pripadajuće primarne pumpe koje služe za protok rashladnog sredstva kroz reaktor, izmjenjivači topline ili parogeneratori, a njihova uloga je pretvorba rashladnog sredstva iz vodenog stanja u vodenu paru.

U Tablici 3 prikazane su države (proizvođači električne energije iz nuklearnih kapaciteta) s udjelom proizvodnje električne energije iz nuklearnih elektrana, iz koje je vidljivo da je u razdoblju od 2007. do 2017. godini je Francuska apsolutni rekorder s gotovo 72 posto posto proizvedene električne energije i taj primat drži već dugi niz godina. Slijede je Ukrajina s 55 posto, Slovačka s 54 posto, Mađarska i Belgija s 50 posto, Švedska i Slovenija s gotovo 40 posto te Armenija, Bugarska, Finska, Češku i Švicarska s preko 30 posto. Vrijedi istaknuti kako razvijenije države smanjuju udio proizvodnje električne energije iz nuklearnih kapaciteta, dok su novije europske članice i zemlje u razvoju svoju proizvodnju značajno podigle u razdoblju od 2007. do 2017. godine. Vidljivo je također kako je Japan od 2011. godine proizvodnju smanjio sedmerostruko, a posljedica takve odluke je nesreća u Fukushima.

³⁴ Unicef, Nuklearna energija, dostupno na: https://www.izvorienergije.com/nuklearna_energija.html (pristupljeno: 17. lipnja 2019.)

Tablica 4: Udio proizvedene električne energije iz nuklearnih elektrana po zemljama (%) u razdoblju od 2007. do 2017. i proizvodnja u milijunima kWh (2016. i 2107. godina)

Zemlja	Nuklearni udio električne energije (%)											Nuklearna energija proizvodnja u (mil. kWh)	
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2016	2017
Argentina	6,2	6,2	7	5,9	5	4,7	4,4	4	4,8	5,6	4,5	7,7	6,2
Armenija	43,5	39,4	45	39,4	33,2	26,6	29,2	30,7	34,5	31,4	32,5	2,2	2,4
Belgija	54,1	53,8	51,7	51,1	54	51	52,1	47,5	37,5	51,7	49,9	41,3	40
Brazil	2,8	3,1	3	3,1	3,2	3,1	2,8	2,9	2,8	2,9	2,7	15,9	15,7
Bugarska	32,1	32,9	35,9	33,1	32,6	31,6	30,7	31,8	31,3	35	34,3	15,8	15,5
Kanada	14,7	14,8	14,8	15,1	15,3	15,3	16	16,8	16,6	15,6	14,6	97,4	96
Kina	19,3	17,1	20,7	19,3	19	18,4	19,1	18,9	16,3	13,7	9,3	210,5	247,5
Tajvan	1,9	2,2	1,9	1,8	1,9	2	2,1	2,4	3	3,6	3,9	30,5	21,6
Češka	30,3	32,5	33,8	33,3	33	35,3	35,9	35,8	32,5	29,4	33,1	22,7	26,8
Finska	28,9	29,7	32,9	28,4	31,6	32,6	33,3	34,6	33,7	33,7	33,2	22,3	21,6
Francuska	76,9	76,2	75,2	74,1	77,7	74,8	73,3	76,9	76,3	72,3	71,6	384	379,1
Njemačka	25,9	28,3	26,1	28,4	17,8	16,1	15,5	15,8	14,1	13,1	11,6	80,1	72,2
Mađarska	36,8	37,2	43	42,1	43,2	45,9	50,7	53,6	52,7	51,3	50	15,2	15,2
Indija	2,5	2	2,2	2,9	3,7	3,6	3,5	3,5	3,5	3,4	3,2	35	34,9
Iran	0	0	0	0	0	0,6	1,5	1,5	1,3	2,1	2,2	5,9	6,4
Japan	27,5	24,9	28,9	29,2	18,1	2,1	1,7	0	0,5	2,2	3,6	17,5	29,1
Koreja, J.	35,3	35,6	34,8	32,2	34,6	30,4	27,6	30,4	31,7	30,3	27,1	154,2	141,1
Litva	64,4	72,9	76,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Meksiko	4,6	4	4,8	3,6	3,6	4,7	4,6	5,6	6,8	6,2	6	10,3	10,6
Nizozemska	4,1	3,8	3,7	3,4	3,6	4,4	2,8	4	3,7	3,4	2,9	3,8	3,3
Pakistan	2,3	1,9	2,7	2,6	3,8	5,3	4,4	4,3	4,4	4,4	6,2	5,1	7,9
Rumunjska	13	17,5	20,6	19,5	19	19,4	19,8	18,5	17,3	17,1	17,7	10,4	10,6
Rusija	16	16,9	17,8	17,1	17,6	17,8	17,5	18,6	18,6	17,1	17,8	179,7	187,5
Slovačka	54,3	56,4	53,5	51,8	54	53,8	51,7	56,8	55,9	54,1	54	13,7	14
Slovenija	41,6	41,7	37,9	37,3	41,7	36	33,6	37,2	38	35,2	39,1	5,4	6
Južna Afrika	5,5	5,3	4,8	5,2	5,2	5,1	5,7	6,2	4,7	6,6	6,7	15,2	15,1
Španija	17,4	18,3	17,5	20,1	19,5	20,5	19,7	20,4	20,3	21,4	21,2	56,1	55,6
Švedska	46,1	42	34,7	38,1	39,6	38,1	42,7	41,5	34,3	40	39,6	60,6	63,1
Švicarska	40	39,2	39,5	38	40,8	35,9	36,4	37,9	33,5	34,4	33,4	20,3	19,5
V. Britanija	15,1	13,5	17,9	15,7	17,8	18,1	18,3	17,2	18,9	21,2	19,3	65,1	63,9
Ukrajina	48,1	47,4	48,6	48,1	47,2	46,2	43,6	49,4	56,5	52,3	55	81	85,6
SAD	19,4	19,7	20,2	19,6	19,2	19	19,4	19,5	19,5	19,7	20	805,3	805
UKUPNO												2490	2519

Izvor: <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/nuclear-generation-by-country.aspx> (preuzeto 18. lipnja 2019.)

3.3 Utjecaj nuklearnih elektrana na okoliš

Najveća opasnost za okoliš iz nuklearne elektrane dolazi od radioaktivnog materijala koji se nuklearnim reakcijama stvara u nuklearnom reaktoru. Ipak, utjecaji nuklearnih elektrana na okoliš u odnosu na utjecaje, primjerice, termoelektrana iznimno su maleni. Naime, nuklearne elektrane ne ispuštaju u atmosferu CO₂ i time ne pridonose globalnom učinku staklenika, a izračuni pokazuju da upotreba nuklearne energije u Europi godišnje uštedi ispust oko 800 milijuna tona CO₂.³⁵ Za jednaku bi se uštedu, primjerice, s ceste moralo ukloniti čak 200 milijuna automobila. Procesi rudarstva i rafiniranja uranijeve rude i izrade reaktorskog goriva zahtijevaju velike količine energije. Nuklearne elektrane također imaju velike količine metala i betona koje zahtijevaju velike količine energije za proizvodnju. Ako se fosilna goriva koriste za rudarstvo i preradu uranovih ruda ili ako se fosilna goriva koriste za izgradnju nuklearne elektrane, emisije izgaranja tih goriva mogu biti povezane s električnom energijom koju proizvode nuklearne elektrane. Međutim, odlaganje nuklearnog otpada i dalje je najveći izazov kod korištenja nuklearne energije. Radioaktivni otpad klasificira se kao otpad niske razine ili otpad visoke razine. Radioaktivnost tih otpada može biti u rasponu od malo viših do prirodnih pozadinskih razina, kao što je to za jalovinu uranovog mlina, do mnogo veće radioaktivnosti korištenog (potrošenog) goriva reaktora i dijelova nuklearnih reaktora. Radioaktivnost nuklearnog otpada s vremenom se smanjuje kroz proces koji se zove radioaktivni raspad. Vrijeme potrebno za smanjenje radioaktivnosti radioaktivnog materijala na polovicu svoje izvorne razine naziva se radioaktivni poluživot. Radioaktivni otpad s kratkim vremenom poluraspada često se privremeno pohranjuje prije odlaganja kako bi se smanjile potencijalne doze zračenja za radnike koji rukuju i prevoze otpad. Ovaj sustav skladištenja također smanjuje razinu zračenja na odlagalištima. Budući da nuklearne elektrane moraju zadovoljavati najviše sigurnosne standarde – incidenti su iznimno rijetki. Ali nuklearni otpad je potpuno druga stvar jer otpad ostaje radioaktivan više stotina, pa i tisuća godina. U tom periodu potrebno je osigurati sigurno mjesto za čuvanje od istjecanja radijacije i od mogućih krađa. Samo nuklearne elektrane u SAD-u proizvedu oko 2.000 tona nuklearnog otpada godišnje, što je velika količina otpada koja se mora spremati na siguran način i SAD trenutno aktivno radi na tome da nađe dugotrajno i sigurno rješenje ovog problema, pa je tako Američko ministarstvo energije (DOE) organiziralo odbor stručnjaka sastavljen od bivših kongresnika, akademika i poslovnih ljudi u nadi da će naći rješenje za

³⁵ Nuklearna elektrana Krško (2017) Okoliš, dostupno na: <https://www.nek.si/hr/okolis> (pristupljeno: 1. lipnja 2019.)

odlaganje nuklearnog otpada.³⁶ Nekontrolirana nuklearna reakcija u nuklearnom reaktoru mogla bi rezultirati rasprostranjenom kontaminacijom zraka i vode. Rizik da se to dogodi u nuklearnim elektranama u Sjedinjenim Državama je mali zbog raznolikih i redundantnih barijera i sigurnosnih sustava na nuklearnim elektranama, obuke i vještina operatera reaktora, aktivnosti testiranja i održavanja, te regulatornih zahtjeva i nadzora nad nuklearnom regulatornom komisijom SAD-a. Oružani sigurnosni timovi ograničavaju i čuvaju velike površine oko nuklearne elektrane. Američki reaktori također imaju spremnike koji su konstruirani tako da izdrže ekstremne vremenske prilike i potrese. Gorivi sklopovi istrošenog reaktora su visoko radioaktivni i moraju se u početku skladištiti u posebno oblikovanim bazenima vode. Voda hladi gorivo i djeluje kao štit od zračenja. Gorivi sklopovi istrošenog reaktora mogu se skladištiti i u posebno dizajniranim suhim spremnicima. Sve veći broj operatera reaktora sada skladišti svoje staro istrošeno gorivo u suhim skladištima koristeći posebne vanjske betonske ili čelične spremnike s hlađenjem zraka. Sjedinjene Države trenutno nemaju trajno odlagalište za nuklearni otpad visoke razine. Kada nuklearni reaktor prestane s radom, on mora biti stavljen izvan pogona. Stavljanje izvan pogona podrazumijeva sigurno uklanjanje reaktora iz postrojenja i sve opreme koja je postala radioaktivna i smanjenje radioaktivnosti na razinu koja dopušta drugu upotrebu tog postrojenja. Komisija za nuklearnu regulativu SAD-a ima stroga pravila kojima se regulira razgradnja nuklearnih elektrana koja uključuje čišćenje radioaktivno kontaminiranih sustava i strukturu elektrana kao i uklanjanje radioaktivnog goriva. Istrošeno nuklearno gorivo iz nuklearne fisije uran-235 i plutonij-239 sadrži širok raspon kancerogenih radionuklidnih izotopa kao što su stroncij-90, jod-131 i cezij-137 i uključuje neke od najdugovječnijih transuranskih elemenata kao što su americijum i izotopi plutonija. Najviše dugovječnih radioaktivnih otpada, uključujući i istrošeno nuklearno gorivo, obično se dugo zadržava i izolira iz okoliša. Odlaganje potrošenog nuklearnog goriva uglavnom je problem u Sjedinjenim Državama, nakon što je predsjednik Jimmy Carter 1977. godine zabranio recikliranje nuklearnog goriva. Francuska, Velika Britanija i Japan su neke od zemalja koje su odbacile rješenje spremišta. Istrošeno nuklearno gorivo je vrijedna imovina, a ne samo otpad, a odlaganje tih otpada u inženjerskim objektima ili spremištima, smještenim duboko pod zemljom u odgovarajućim geološkim formacijama, smatra se referentnom otopinom.³⁷

³⁶Unicef, Nuklearna energija, dostupno na: https://www.izvorienergije.com/nuklearna_energija.html (pristupljeno: 1. lipnja 2019.)

³⁷ Agencija za nuklearnu energiju (2018) Moving forward with geological disposal of radioactive waste, dostupno na: <http://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2008/nea6433-statement.pdf> (pristupljeno: 17. lipnja 2019.)

Dekomisijski otpad nuklearnih elektrana problematičan je za odlaganje zbog velike količine. Dekomisija ili razgradnja nuklearne elektrane je skup mjera, postupaka i aktivnosti koje se provode nakon trajne obustave rada reaktora s ciljem da se zaostala radioaktivnost smanji na najmanju moguću mjeru te da se lokacija nuklearne elektrane osposobi za ponovno korištenje u istu ili drugu svrhu. Tri su glavna segmenta dekomisije nuklearnih elektrana: postupak dekontaminacije, čuvanja i postupak imobilizacije na lokaciji, pa tako prvi postupak, postupak dekontaminacije i brze razgradnje (engl. *decontamination*) traje do 15 godina, dok postupak čuvanja i odgođene razgradnje (engl. *safe storage*) traje 30 do 100 godina, a posljednji postupak, imobilizacija na lokaciji (engl. *entombment*) traje više od 100 godina.³⁸ Postupak dekomisije nuklearne elektrane ovisi o količini dekomisijskog otpada, odnosno o sadržaju pojedinih radioaktivnih izotopa, i njihovom vremenu poluraspada, a u Tablici 5 prikazana su vremena poluraspada glavnih zaostalih izotopa dekomisijskog otpada.

Tablica 5: Vrijeme poluraspada glavnih zaostalih radioaktivnih izotopa (radionuklida)

Tip radionuklida	Vrijeme poluraspada
Fe-55	2,7 godina
Co-60	5,3 godina
Ni-63	100 godina
Ni-59	75.000 godina
Nb-94	20.000 godina

Izvor:http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/katedra4/Inzenjerstvo_zastite_okolisa/11.pdf (preuzeto 20. lipnja 2019.)

Unatoč dugogodišnjem dogovoru među mnogim stručnjacima da geološko odlaganje može biti sigurno, tehnološki izvedivo i ekološki prihvatljivo, velik dio opće javnosti u mnogim zemljama ostaje skeptičan. Jedan od izazova s kojim se suočavaju pristaše ovih nastojanja jest da se pouzdano dokaže da će spremište sadržavati otpad toliko dugo da bilo kakva ispuštanja koja bi se mogla dogoditi u budućnosti neće predstavljati značajan rizik za zdravlje ili okoliš. Nuklearna prerada ne eliminira potrebu za skladištem, ali smanjuje količinu, smanjuje dugotrajnu opasnost od zračenja i potreban je dugoročni kapacitet rasipanja topline. Ponovna obrada ne eliminira političke i društvene izazove u smještaju spremišta. Zemlje koje su ostvarile najveći napredak prema odlagalištu radioaktivnog otpada na visokoj razini obično su započele s javnim savjetovanjima i učinile dobrovoljno postavljanje nužnog uvjeta. U predsjedničkom memorandumu iz 2010. američki predsjednik Obama osnovao je "Povjerenstvo za plavu vrpču o američkoj nuklearnoj budućnosti". Komisija, sastavljena od

³⁸ Jakšić, F. (2015) Nuklearne elektrane danas. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, str. 7.

petnaest članova, provela je opsežnu dvogodišnju studiju o zbrinjavanju nuklearnog otpada. Tijekom svog istraživanja Komisija je posjetila Finsku, Francusku, Japan, Rusiju, Švedsku i Veliku Britaniju, a 2012. godine Komisija je dostavila svoje završno izvješće.³⁹ Komisija nije izdala preporuke za određeno mjesto, nego je predstavila sveobuhvatnu preporuku za strategije raspolaganja, a u svom završnom izvješću iznijela je sedam preporuka za razvoj sveobuhvatne strategije. Glavna preporuka bila je da Sjedinjene Države trebaju poduzeti integrirani program upravljanja nuklearnim otpadom koji vodi pravodobnom razvoju jednog ili više trajnih dubokih geoloških objekata za sigurno odlaganje istrošenog goriva i nuklearnog otpada visoke razine.⁴⁰ Učinjene su brojne studije o mogućem učinku nuklearne energije u uzrokovanju raka. Takve su studije tražile potencijalne karcinome kod radnika u nuklearnim elektranama i okolnim populacijama zbog ispuštanja tijekom normalnog rada nuklearnih elektrana i drugih dijelova nuklearne industrije, kao i potencijalne karcinome kod radnika i javnosti zbog slučajnih ispuštanja. Postoji suglasnost među znanstvenicima da su prekomjerni karcinomi kod radnika u nuklearnom pogonu i okolini uzrokovani slučajnim ispuštanjima, kao što je černobilska nesreća.⁴¹ Također postoji suglasnost među znanstvenicima i da su neki radnici u drugim dijelovima nuklearnog gorivnog ciklusa, ponajviše u rudarstvu urana - barem u posljednjih nekoliko desetljeća - imali povišene stope nastanka raka.⁴² Bilo je nekoliko epidemioloških studija koje kažu da postoji povećan rizik od različitih bolesti, osobito raka, među ljudima koji žive u blizini nuklearnih postrojenja. Široko citirana meta-analiza iz 2007. Baker et al. od 17 znanstvenih radova objavljena je u *European Journal of Cancer Care* dokazuje kako postoji povišena stopa leukemije među djecom koja žive u blizini 136 nuklearnih postrojenja u Velikoj Britaniji, Kanadi, Francuskoj, SAD-u, Njemačkoj, Japanu i Španjolskoj.⁴³ Međutim, ova je studija kritizirana na nekoliko osnova - kao na primjer zbog kombiniranja heterogenih podataka (različite dobne skupine, mjesta koja nisu bila nuklearna elektrana, različite definicije zona opasnosti). Povišene stope leukemije među djecom također su pronađene u istraživanju Kaatsch i sur. koji je ispitivao stanovnike koji žive u blizini 16 glavnih nuklearnih elektrana u Njemačkoj. Britanski odbor za

³⁹ Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, Disposal Subcommittee Report to the Full Commission, dostupno na: http://www.brc.gov/sites/default/files/documents/disposal_report_updated_final.pdf (pristupljeno: 18. lipnja 2019.)

⁴⁰ Ibid.

⁴¹ National Cancer Institute, Accidents at Nuclear Power Plants and Cancer Risk, dostupno na: <https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/radiation/nuclear-accidents-fact-sheet?redirect=true> (pristupljeno: 19. lipnja 2019.)

⁴² The National Institute for Occupational Safety and Health, Worker Health Study Summaries, dostupno na: <https://www.cdc.gov/niosh/pgms/worknotify/uranium.html> (pristupljeno: 19. lipnja 2019.)

⁴³ Baker, P. J., Hoel, D. G. (2007) Meta-analysis of standardized incidence and mortality rates of childhood leukaemia in proximity to nuclear facilities. *European Journal of Cancer Care*, 16 (4), str. 355–363.

medicinske aspekte zračenja u okolišu objavio je 2011. godine istraživanje djece mlađe od pet godina koja žive u blizini 13 nuklearnih elektrana u Velikoj Britaniji u razdoblju od 1969. do 2004. godine. Odbor je utvrdio da djeca koja žive u blizini elektrana u Velikoj Britaniji nemaju veću vjerojatnost da će razviti leukemiju od onih koji žive negdje drugdje.⁴⁴ No s obzirom na kontroverze, američka Komisija za nuklearnu regulativu zatražila je od Nacionalne akademije znanosti da nadgleda najsuvremenije istraživanje rizika od raka u populacijama u blizini postrojenja koja imaju dozvolu NRC-a. Nesreće nuklearnih reaktora mogu dovesti do ispuštanja raznih radioizotopa u okoliš. Utjecaj svakog radioizotopa na zdravlje ovisi o nizu čimbenika. Jod-131 je potencijalno važan izvor morbiditeta u slučajnim ispuštanjima zbog svoje prevalencije i zbog toga što se taloži na tlu. Kada se jod-131 ispusti, može se udahnuti ili konzumirati nakon što uđe u prehrambeni lanac, prvenstveno preko kontaminiranog voća, povrća, mlijeka i podzemnih voda. Jod-131 u tijelu se brzo nakuplja u štitnoj žlijezdi i postaje izvor beta zračenja. Nuklearna katastrofa Fukushima Daiichi 2011. godine, najgora nuklearna nesreća na svijetu od 1986. godine, raselila je 50.000 kućanstava nakon što je zračenje procurilo u zrak, tlo i more, a provjera zračenja dovela je do zabrane nekih pošiljki povrća i ribe.⁴⁵ Nuklearna razgradnja je proces kojim se ruši nuklearna elektrana tako da više neće zahtijevati mjere zaštite od zračenja. Prisutnost radioaktivnog materijala zahtijeva procese koji su opasni za prirodni okoliš, skupi i vremenski zahtjevni. Većina nuklearnih elektrana koje trenutno djeluju u SAD-u izvorno su dizajnirane za život od oko 30-40 godina i licencirane su za rad 40 godina od strane SAD-a. Prosječna starost tih reaktora je 32 godine. Stoga, mnogi reaktori dolaze na kraj razdoblja licenciranja, a ako se njihove dozvole ne obnove, nuklearne elektrane moraju proći postupak dekontaminacije i stavljanja izvan pogona.⁴⁶ Mnogi stručnjaci i inženjeri primijetili su da u ovim starim objektima ne postoji opasnost, a trenutni planovi su omogućiti da nuklearni reaktori rade mnogo duže. Dekomisija je administrativni i tehnički proces. To uključuje čišćenje radioaktivnosti i progresivno rušenje postrojenja. Jednom kad se postrojenje potpuno stavi van pogona, ne smije postojati opasnost radiološke prirode. Troškovi razgradnje trebaju se rasporediti tijekom cijelog vijeka trajanja postrojenja i uštedjeti u fondu za razgradnju. Nakon

⁴⁴ Little, J., McLaughlin, J., Miller, A. (2008) Leukaemia in young children living in the vicinity of nuclear power plants, *International Journal of Cancer*, 122 (4), str. 10-11.

⁴⁵ Saito, M. (2011) Japan anti-nuclear protesters rally after PM call to close plant, dostupno na: <https://www.reuters.com/article/us-japan-nuclear/japan-anti-nuclear-protesters-rally-after-pm-call-to-close-plant-idUSTRE74610J20110507> (pristupljeno: 20. lipnja 2019.)

⁴⁶ World Nuclear Assotiation, Decommissioning Nuclear Facilities, dostupno na: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities.aspx> (pristupljeno: 20. lipnja 2019.)

što je postrojenje potpuno stavljeno izvan pogona, ono se oslobađa regulatorne kontrole, a vlasnik licence postrojenja više neće biti odgovoran za nuklearnu sigurnost. U Tablici 6 je prikazan primjer troškova dekomisije nuklearne elektrane, a za primjer je uzeta nuklearna elektrana José Cabrera u Španjolskoj čiji su troškovi 2014. godine bili 258.500.000 eura.

Tablica 6: Primjer troškova dekomisije nuklearne elektrane

PODACI ELEKTRANE		CIJENA DEKOMISIJE	
Tip	Westinghouse -1 loop PWR	Stavka	Trošak €2014
Električna snaga	160 MWe	Priprema dekomisije	13 000 000
Toplinska snaga	510 MWth	Gašenje objekta	4 000 000
Elementi goriva	69 - 14x14	Demontaža pod posebnim nadzorom	42 000 000
Tip goriva	UO2 - obogaćenje 3,6% (U-235)	Obrada otpada, skladištenje i odlaganje	10 000 000
Masa jezgre	20,76 t	Infrastruktura gradilišta i operacije	66 000 000
Kontrolni prut	17	Konvencionalna demontaža, rušenje i obnova	15 000 000
Promjer reaktora	2,82 m	Upravljanje projektima i inženjering	52 500 000
Visina reaktora	5,87 m	Gorivo i nuklearni materijal	42 000 000
Promjer sistema opskrbe parom	70 cm	Razni troškovi	14 000 000
Zatvoreni spremnik	pojačani beton; glava od nehrđajućeg čelika		
Bazen potrošenog goriva	u zatvorenom spremniku	Ukupno:	258 500 000 €
Završno hlađenje	rieka Tažo		

Izvor: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:131671>, str. 49 (preuzeto 22. lipnja 2019.)

Katastrofa u Černobilu u Ukrajini bila je i ostaje najgora katastrofa nuklearnih elektrana na svijetu. Procjene broja poginulih su kontroverzne i kreću se u rasponu od 62 do 25.000, s visokim projekcijama uključujući i smrtne slučajeve koji se tek trebaju dogoditi, radi posljedica opasne radijacije. Velike količine radioaktivnog onečišćenja proširile su se diljem Europe zbog katastrofe u Černobilu, a cezij i stroncij kontaminirali su mnoge poljoprivredne proizvode, stoku i tlo. Nesreća je zahtijevala evakuaciju cijelog grada Pripyata i 300.000 ljudi iz Kijeva, čime je područje zemlje bilo neupotrebljivo za ljude na neodređeno vrijeme. Kako radioaktivni materijali propadaju, oni oslobađaju čestice koje mogu oštetiti tijelo i dovesti do raka, osobito cezija-137 i joda-131. U katastrofi u Černobilu, ispuštanja cezija-137 zagadile su tlo. Neke zajednice, uključujući i cijeli grad Pripyat, trajno su napuštene. Jedan izvor vijesti izvijestio je da su tisuće ljudi koji su pili mlijeko kontaminirano radioaktivnim jodom razvili rak štitnjače. Zona isključenja (oko 30 km radijusa oko Černobila) može imati značajno povišene razine zračenja, koje je sada uglavnom zbog raspadanja cezija-137, za oko 10 poluvremena tog izotopa, što je otprilike 300 godina. Godine 2007. ukrajinska vlada proglasila je veći dio zone isključenja iz Černobila, gotovo 490 četvornih kilometara.

Pitanje dugoročnih učinaka černobilske katastrofe na civile vrlo je kontroveržno. Broj ljudi čiji su životi pogođeni katastrofom je ogroman. Preko 300.000 ljudi bilo je preseljeno zbog katastrofe; milijuni su živjeli i nastavljaju živjeti u kontaminiranom području. S druge strane, većina pogođenih primala je relativno male doze zračenja; postoji malo dokaza o povećanoj

smrtnosti, raku ili defektima pri rođenju među njima; a kada su takvi dokazi prisutni, postojanje uzročne veze s radioaktivnim onečišćenjem je neizvjesno. Modeliranje na više razina ukazuje na to da je dugoročno psihološko stanje među Bjelorusima pogođenim katastrofom u Černobilu bolje predviđeno psihosocijalnim čimbenicima koji ublažavaju stres prisutni u svakodnevnom životu nego razinom kontaminacije radioaktivnog zračenja.

Epidemiološke studije su u Ukrajini, Ruskoj Federaciji i Bjelorusiji ometane nedostatkom sredstava, infrastrukturom s malim ili nikakvim iskustvom u epidemiologiji kroničnih bolesti, slabim komunikacijskim mogućnostima i neposrednom javnom zdravstvenom problemu s mnogo dimenzija. Naglasak je stavljen na probiranje, a ne na dobro osmišljene epidemiološke studije. Međunarodni naponi u organizaciji epidemioloških studija usporili su neki od istih čimbenika, posebice nedostatak odgovarajuće znanstvene infrastrukture. Nadalje, politička priroda nuklearne energije mogla je utjecati na znanstvene studije. U Bjelorusiji, Yury Bandazhevsky, znanstvenik koji je ispitivao službene procjene posljedica Černobila bio je zatvoren od 2001. do 2005. godine. Bandazhevsky i neke skupine za ljudska prava tvrde da je njegova zatvorska kazna bila odmazda za objavljivanje izvješća kritičnih za službena istraživanja provedena u černobilskom incidentu. Aktivnosti koje poduzimaju Bjelorusija i Ukrajina kao odgovor na katastrofu - sanacija okoliša, evakuacija i preseljenje, razvoj nekontaminiranih izvora hrane i kanala za distribuciju hrane, te mjere javnog zdravstva - preopteretili su vlade tih zemalja. Međunarodne agencije i strane vlade pružile su opsežnu logističku i humanitarnu pomoć. Osim toga, rad Europske komisije i Svjetske zdravstvene organizacije u jačanju epidemiološke istraživačke infrastrukture u Rusiji, Ukrajini i Bjelorusiji postavlja osnovu za veliki napredak u sposobnosti tih zemalja za provođenje svih vrsta epidemioloških istraživanja.

Povećana učestalost karcinoma štitnjače zabilježena je oko 4 godine nakon nesreće i usporena 2005. godine. Veliki porast incidencije raka štitnjače dogodio se među adolescentima i malom djecom koja su živjela u vrijeme nesreće, a boravili su u najzagađenijim područjima Bjelorusije, Ruske Federacije i Ukrajine. Nakon nesreće, iz černobilskog reaktora puštene su visoke razine radioaktivnog joda i akumulirane su na pašnjacima na kojima su pasle krave, a mlijeko od tih krava su kasnije konzumirale djeca koja su već imala dijetu s nedostatkom joda, što je uzrokovalo nakupljanje više radioaktivnog joda. Radioaktivni jod ima kratak poluživot, 8,02 dana, ako bi se kontaminirano mlijeko izbjeglo ili zaustavilo, vjerojatno je da se većina porasta raka štitnjače izazvanog zračenjem ne bi dogodila. Unutar visoko kontaminiranih područja: Bjelorusije, Ruske Federacije i Ukrajine, bilo je oko 5000 slučajeva

raka štitnjače koji su dijagnosticirani od nesreće. Ti su slučajevi pronađeni kod osoba koje su bile u dobi od 18 godina i mlađe u vrijeme nesreće.

Dvadeset i pet godina nakon incidenta u Černobilu, zabrane su ostale na snazi u proizvodnji, prijevozu i potrošnji hrane zagađene černobilskim otpadom. U Velikoj Britaniji je tek 2012. godine ukinuto obavezno testiranje radioaktivnosti ovaca u kontaminiranim dijelovima Velike Britanije koje pasu na zemljištu. Obuhvatili su 369 farmi na 750 km² i 200.000 ovaca. U dijelovima Švedske i Finske postoje ograničenja na životinjama u skladištu, uključujući i sobove, u prirodnom i gotovo prirodnom okruženju. Prema izvješćima sovjetskih znanstvenika na Prvoj međunarodnoj konferenciji o biološkim i radiološkim aspektima černobilske nesreće (rujan 1990.godine), razina padavina u zoni od 10 km oko elektrane iznosila je 4,81 GBq/m². Takozvana "Crvena šuma" borovih stabala, koja je ranije bila poznata kao šuma pelina i smještena neposredno iza kompleksa reaktora, ležala je u zoni od 10 km i uništena teškim radioaktivnim padavinama. Šuma je tako nazvana jer su u danima nakon katastrofe stabla imala duboko crvenu nijansu zbog izuzetno teških radioaktivnih padavina. U operacijama čišćenja nakon katastrofe, većina od 4 km² šume bila je buldožirana i pokopana, a mjesto Crvenih šuma ostaje jedno od najzagađenijih područja na svijetu. Nije poznato hoće li kontaminacija padavinama imati dugoročne štetne učinke na floru i faunu regije, budući da biljke i životinje imaju značajno različitu i različitu radiološku toleranciju u usporedbi s ljudima. Postoje izvještaji o mutacijama u biljkama na tom području. Koristeći robote, istraživači su uzeli uzorke visoko melanizirane crne gljive iz zidova same reaktorske jezgre. Pokazalo se da određene vrste gljiva, kao što su *Cryptococcus neoformans* i *Cladosporium*, zapravo mogu napredovati u radioaktivnom okruženju, rastući bolje od nemelaniziranih varijanti, što znači da koriste melanin za iskorištavanje energije ionizirajućeg zračenja iz reaktora.⁴⁷

Ovdje je važno spomenuti i Fukushima Daiichi nuklearnu katastrofu koja se dogodila nakon zemljotresa Tōhoku od 9,0 stupnjeva i kasnijim tsunamijem 11. ožujka 2011. godine, samo 14 dana prije zatvaranja reaktora. Ovaj potres na moru, u blizini otoka Honshu, proizveo je veliki tsunami u Japanu i upozorenje tsunamija za više od 20 zemalja unutar i oko Pacifičkog područja. Potres je izazvao gašenje triju aktivnih reaktora u nuklearnoj elektrani Fukushima I (Fukushima Dai-Ichi). Uslijedio je tsunami koji je obuhvatio gradilište, zaustavio rezervne dizelske generatore iz Fukushime i izazvao zamračenje stanice. Naknadni nedostatak hlađenja doveo je do eksplozija i topljenja u postrojenju u Fukushimi I, s problemima u tri od

⁴⁷ Vember, V.V., Zhdanova, N.N. (2001) Peculiarities of linear growth of the melanin-containing fungi *Cladosporium sphaerospermum* Penz, And *Alternaria alternate*, *Mikrobiologichnyi Zhurnal*, 63 (3), str. 3–12.

šest reaktora i u jednom od šest bazena za potrošeno gorivo. Oslobođanje radioaktivnih izotopa iz reaktorskih spremnika posljedica je odzračivanja kako bi se smanjio tlak plina i ispuštanje rashladne vode u more. To je dovelo do toga da japanske vlasti provode 30 km udaljenu zonu isključenja oko elektrane i nastavak raseljavanja oko 156.000 ljudi od početka 2013. godine. Broj evakuiranih osoba smanjen je na 49.492 od ožujka 2018. godine. Velike količine radioaktivnih čestica iz incidenta, uključujući jod-131 i cezij-134/137, otkrivene su širom svijeta. Značajne razine zabilježene su u Kaliforniji i Tihom oceanu. Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) objavila je izvješće koje procjenjuje povećanje rizika za određene vrste raka za određene podskupine populacije u prefekturi Fukushima. Izvješće WHO-a iz 2013. predviđa da je za populacije koje žive u najugroženijim područjima 70 posto veći rizik od razvoja raka štitnjače za djevojčice koje su bile izložene kao dojenčad (rizik se povećao s doživotnog rizika od 0,75 posto na 1,25 posto), 7 posto veći rizik od leukemije kod muške djece koja su bila izložena kao dojenčad, 6 posto veći rizik od raka dojke kod djevojčica izloženih kao dojenčad i 4 posto veći rizik raka za žene. Preliminarna izvješća WHO o procjeni doze i Znanstveni odbor Ujedinjenih naroda o učincima atomske radijacije (UNSCEAR) pokazuju da, izvan geografskih područja koja su najviše pogođena zračenjem, čak i na lokacijama unutar prefekture Fukushima, predviđeni rizici ostaju niski i nema vidljivog povećanja nastanka raka. Ujedinjeni narodi su predvidjeli da će početna struja radioaktivnosti pogođenih japanskih reaktora stići do SAD-a do 18. ožujka. Stručnjaci za zdravlje i nuklearne elektrane naglasili su da će se radioaktivnost u oblaku razblaživati dok putuje i da će, u najgorem slučaju, imati vrlo male zdravstvene posljedice u Sjedinjenim Državama. Simulacija belgijskog Instituta za svemirsku aeronomiju pokazala je da će tragovi radioaktivnosti doseći Kaliforniju i Meksiko oko 19. ožujka 2011. godine. Ova predviđanja testirana su u svjetskoj mreži visoko osjetljive opreme za mjerenje izotopa zračenja, a dobiveni podaci korišteni su za procjenu potencijalnih utjecaja na ljudsko zdravlje kao i na stanje reaktora u Japanu. Prema tome, do 18. ožujka 2011. godine u zračnim filtrima na Sveučilištu Washington u Seattleu, u SAD-u, otkriveni su radioaktivni padovi uključujući izotope joda-131, joda-132, telurija-132, joda-133, cezija-134 i cezija-137.] Zbog anticiklona južno od Japana, povoljni zapadni vjetrovi bili su dominantni tijekom većeg dijela prvog tjedna nesreće, odlaganje većine radioaktivnog materijala u more i udaljeni od populacijskih središta, s nekim nepovoljnim smjerovima vjetra koji odlažu radioaktivni materijal preko Tokija. Područje niskog tlaka iznad istočnog Japana dalo je manje povoljne smjerove vjetra od 21. do 22. ožujka 2011. godine. Norveški institut za istraživanje zraka kontinuirano je predviđao radioaktivni oblak i njegovo kretanje, koji se temelji na modelu FLEXPART,

izvorno osmišljenom za predviđanje širenja radioaktivnosti iz černobilske katastrofe. Od 28. travnja, Ministarstvo zdravstva države Washington, koje se nalazi u američkoj državi najbliže Japanu, izvijestilo je da su se razine radioaktivnog materijala iz pogona u Fukushimai značajno smanjile i da su često ispod razine koja se može otkriti standardnim testovima.

4 NUKLEARNA ELEKTRANA KRŠKO I NJEZINA VAŽNOST ZA REPUBLIKU HRVATSKU

4.1 Gradnja nuklearne elektrane Krško i vlasnički odnosi

U Hrvatskoj nema nuklearnih elektrana, ali Hrvatska elektroprivreda ima u 50 postotnom vlasništvu Nuklearnu elektranu Krško, smještenu na lijevoj obali Save, nizvodno od Krškoga, Slovenija. Prva istraživanja na Krškome polju, kad je to područje postalo moguća lokacija za nuklearnu elektranu, obavila je radna skupina Poslovne udruge energetike Slovenije u razdoblju od 1964. do 1969. godine. Investitori nuklearne elektrane bile su Savske elektrane Ljubljana i Elektroprivreda Zagreb, koje su s investicijskom skupinom obavile pripremne radove, raspisale natječaj i odabrale najpovoljnijega ponuđača.⁴⁸ Gradnja elektrane Krško započela je 1974. godine, a glavni projektant bila je američka tvrtka Gilbert Associates, dok je glavni izvođač i dobavljač opreme američka tvrtka Westinghouse. Slika 3 prikazuje montažu reaktorske zgrade u rujnu 1975. godine.

Slika 3: Montaža reaktorske zgrade Nuklearne elektrane Krško 1975. godine



Izvor: <https://www.nek.si/hr/o-nek-u/povijest-nek-a> (preuzeto 21. lipnja 2019.)

Reaktor elektrane tlakovodnoga je tipa. Građevinske radove izvela su poduzeća Gradis i Hidroelektra, a montažu Hidromontaža i Đuro Đaković. Elektranu je ušla u probni rad 1981.

⁴⁸ Kolarec, J. (2015) Nuklearna elektranu Krško. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, str. 3.

godine, a u komercijalni pogon 1983. godine.⁴⁹ U veljači 1982. godine prvi je put postignuta 100-postotna snaga elektrane, u srpnju iste godine obavljena je modifikacija sustava za napajanje parogeneratora, a u kolovozu 1983. godine elektrana je počela raditi punom snagom. Nadalje, 1983. godine dolazi do početka prvoga godišnjega remonta i prve zamjene goriva, a u siječnju 1984. godine Nuklearna elektrana Krško dobiva dozvolu za početak redovitoga rada. U lipnju 2000. godine dolazi do završetka projekta osuvremenjivanja izradom i zamjenom parogeneratora, povećanjem snage elektrane i nabavom potpunoga simulatora za trening operativnog osoblja. Slika 6 prikazuje Nuklearnu elektranu Krško u današnje vrijeme.

Slika 4. Nuklearna elektrana Krško danas



Izvor:<http://zastita.info/hr/novosti/nuklearna-elektrana-krsko-najsigurnija-je-u-europi!,13548.html>

Rad Nuklearne elektrane Krško temelji se na odgovornosti koju ostvaruju: trajnom predanošću nuklearnoj sigurnosti i dnevnim ostvarivanjem sigurnosne kulture, što je nezaobilazna odgovornost svih zaposlenih, osiguravanjem sigurnog i stabilnog rada koji je u skladu sa suvremenim standardima vođenja nuklearnih objekata, samokritičnim prosudbama postignutih rezultata, osiguravanjem konkurentne proizvodnje električne energije na otvorenome elektroenergetskome tržištu, osiguravanjem društvene prihvatljivosti svoga djelovanja koje je pregledno, etično i pozitivno se odnosi prema okolišu i poštivanjem načela zapisanih u Ugovoru između Vlade Republike Slovenije i Vlade Republike Hrvatske o

⁴⁹ On-line izdanje Hrvatske enciklopedije, enciklopedijski članak Nuklearna elektrana, dostupno na: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=44374> (pristupljeno: 21. lipnja 2019.)

uređenju statusnih i drugih pravnih odnosa povezanih s ulaganjem u Nuklearnu elektranu Krško, njezinim iskorištavanjem i razgradnjom.⁵⁰

Nuklearna elektrana Krško je, u skladu s Ugovorom između Vlade Republike Slovenije i Vlade Republike Hrvatske o uređenju statusnih i drugih pravnih odnosa povezanih s ulaganjem u Nuklearnu elektranu Krško, njezinim iskorištavanjem i razgradnjom te Društvenim ugovorom, koji su stupili na snagu 11. ožujka 2003. godine, organizirana kao društvo s ograničenom odgovornošću. Temeljni kapital Nuklearne elektrane Krško d.o.o., podijeljen je na dva jednaka poslovna udjela u vlasništvu članova društva GEN energija d.o.o. i Hrvatske elektroprivrede d.d. NEK proizvodi i isporučuje električnu energiju isključivo u korist partnera koji imaju pravo i obavezu preuzimanja 50 posto ukupne raspoložive snage i električne energije na pragu NEK-a.⁵¹

Strateški ciljevi Nuklearne elektrane Krško su:⁵²

1. postizanje sigurnoga i stabilnoga poslovanja na razini gornje četvrtine nuklearnih elektrana koje posluju u svijetu u skladu s WANO-om (World Association of Nuclear Operators) pokazateljima poslovne učinkovitosti;

2. postizanje konkurentnosti proizvedene električne energije na otvorenom tržištu, s prosječnom godišnjom proizvodnjom od 5100 GWh, 18-mjesečnim gorivnim ciklusom, remontima kraćima od 28 dana te troškovnom učinkovitošću i

3) postizanje društvene prihvatljivosti nuklearne tehnologije, koja se temelji na sigurnom, za okoliš čistome i odgovornome poslovanju te na visokoj motiviranosti i pripadnosti svih zaposlenih.

4.2 Kapacitet i proizvodnja nuklearne elektrane Krško

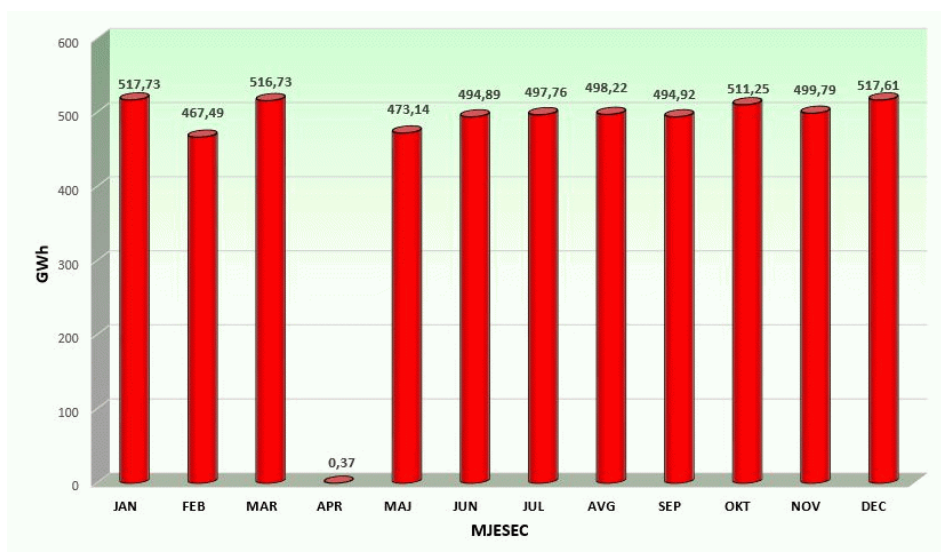
Nuklearna elektrana Krško je opremljena Westinghouseovim lakovodnim tlačnim reaktorom toplinske snage od 2000 MW. Njezina je snaga na pragu 696 MW, elektrana je priključena na 400-kilovoltnu mrežu za napajanje potrošačkih središta u Sloveniji i Hrvatskoj, a godišnje proizvede više od pet milijardi kWh električne energije, što je 40 posto ukupno proizvedene električne energije u Sloveniji. Grafikon 7 prikazuje mjesečnu proizvodnju električne energije u 2018. godini u Nuklearnoj elektrani Krško. Uočava se minimalna isporuka u mjesecu travnju, a razlog je redovni remont elektrane u mjesecu travnju. Ako izuzmemo vrijeme remonta, mjesečna proizvodnja se kreće od 467,49 do 517,73 GWh.

⁵⁰ Nuklearna elektrana Krško, Vizija i poslovanje, dostupno na: <https://www.nek.si/hr/o-nek-u/vizija-i-poslanje> (pristupljeno: 21. lipnja 2019.)

⁵¹ Ibid.

⁵² Ibid.

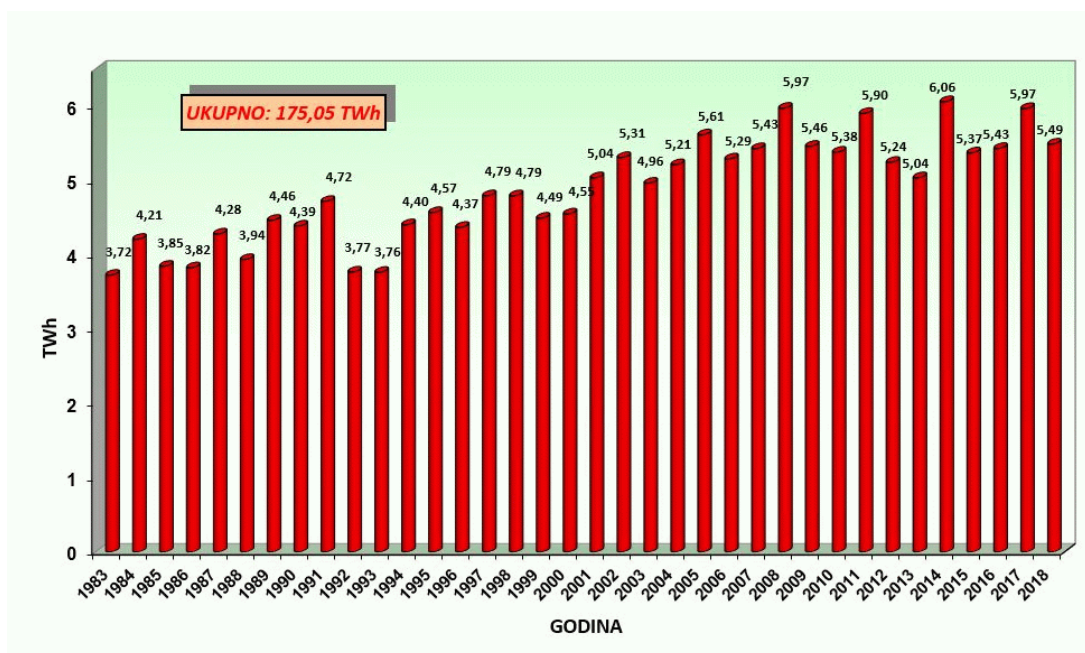
Graf 7: Mjesečna proizvodnja električne energije u NEK u 2018. godini



Izvor: <https://www.nek.si/hr/o-nek-u/proizvodnja> (preuzeto 21. lipnja 2019.)

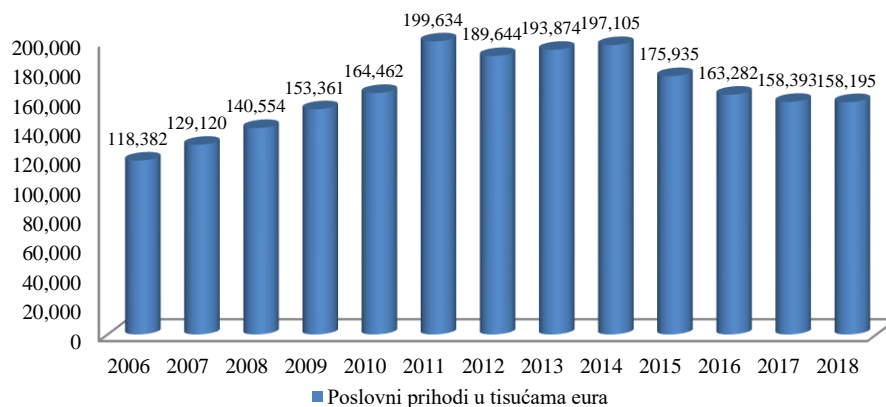
NEK s obzirom na svoje radne karakteristike pokriva osnovno opterećenje cijele godine. Osim toga, kao pouzdan izvor radne i jalove snage, važna je potporna točka elektroenergetskoga sustava u sklopu europske udruge ENTSO-E – Europska udruga sustavnih operatera prijenosne mreže. Važan je čimbenik u stabilizaciji kritičnih radnih stanja i odnosa napona, a posebno u slučaju velikih tranzijenata unutar ENTSO-E. Poslovanje elektrane između dva remonta naziva se gorivni ciklus. Tijekom remonta dio istrošenoga goriva nadomješta se svježim, preventivno se pregledava oprema i zamjenjuju dijelovi, provjerava integritet materijala, obavlja kontrolna testiranja te korektivne mjere s obzirom na zatečeno stanje. Graf 8 prikazuje godišnju proizvodnju električne energije u Nuklearnoj elektrani Krško, iz kojeg je vidljivo da se ona u razdoblju od 1983. do 2000. godine kretala između 3,72 i 4,79 TWh, dok je od 2001. do 2018. godine ta se proizvodnja kretala od 4,55 do čak 6,06 TWh 2014. godine. Na Grafu 9 su prikazani godišnji poslovni prihodi od 2006. do 2018. godine iz kojeg je vidljivo kako su oni ostvarivali najviše vrijednosti u razdoblju od 2011. do 2014. godine. Najviša prosječna godišnja cijena električne energije po MWh iznosila je 44,69 eura 2006., a najniža 2013. godine u iznosu od 26 eura (Graf 10).

Graf 8: Godišnja proizvodnja električne energije u NEK u razdoblju od 1983. do 2018. godine



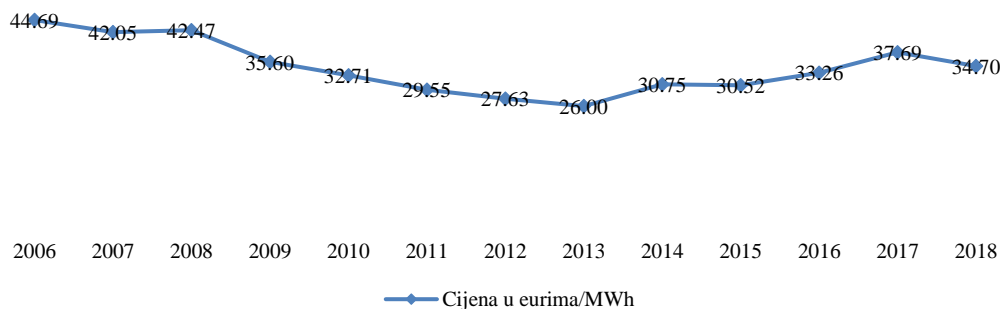
Izvor: <https://www.nek.si/hr/o-nek-u/proizvodnja> (preuzeto 21. lipnja 2019.)

Graf 9: Poslovni prihodi NEK-a u razdoblju od 2006. do 2018. godine



Izvor: izračun autora na temelju podataka NEK-a, dostupno na: <https://www.nek.si/hr/novinarski-centar/izvjesca/godisnja-poslovna-izvjesca> (preuzeto 31. kolovoza 2019.)

Graf 10: Cijena isporučene električne energije u NEK u eurima po MWh u razdoblju od 2006. do 2018. godine



Izvor: izračun autora na temelju podataka NEK-a, dostupno na: <https://www.nek.si/hr/novinarski-centar/izvjesca/godisnja-poslovna-izvjesca> (preuzeto 31. kolovoza 2019.)

Nuklearna elektrana Krško radi slično kao klasična termoelektrana na fosilna goriva, iako izvor topline nije izgaranje ugljena ili plina, nego se toplina oslobađa pri cijepanju jezgri urana u reaktoru. Reaktor čine reaktorska posuda s gorivnim elementima, koji tvore jezgru reaktora. Kroz reaktor kruži pročišćena obična voda pod tlakom, koja odvodi oslobođenu toplinu u parogeneratore. U njima nastaje para koja pokreće turbinu, a ona pokreće električni generator. Sva oprema reaktora i pripadajućega primarnog rashladnog kruga smještena je u reaktorskoj je zgradi, koja se zbog svoje funkcije naziva i zaštitna zgrada. Reaktorska posuda u kojoj su gorivni elementi tijekom rada je zatvorena. Za planiranu izmjenu goriva elektranu je potrebno zaustaviti. Razdoblje između dviju zamjena goriva naziva se gorivni ciklus, koji u Nuklearnoj elektrani Krško traje 18 mjeseci. Nakon završetka svakoga gorivnoga ciklusa istrošeni se gorivni elementi nadomjeste svježim.⁵³ Tehnološki dio nuklearne elektrane podijeljen je u tri osnovna termodinamička sklopa sustava: primarne, sekundarne i tercijarne.⁵⁴ Budući da u sva tri sklopa, međusobno odvojena, kruži voda, mogu se zbog lakšeg razumijevanja nazvati i krugovi. Prva su dva kruga zatvorena, a treći je, budući da za hlađenje pare koristimo savsku vodu, povezan s okolišem. Primarni krug čine: reaktor, parogeneratori, reaktorske crpke, tlačnik i cjevovodi. Toplina koja se oslobađa u jezgri reaktora zagrijava vodu koja kruži u primarnome krugu, te se preko stijenki cijevi u parogeneratorima prenosi na vodu sekundarnoga kruga. Sekundarni krug čine: parogeneratori, turbine, generator, kondenzator, napojne crpke i cjevovodi. Tercijarni krug

⁵³ Nuklearna elektrana Krško, Rad NEK-a, dostupno na: <https://www.nek.si/hr/o-nuklearnoj-tehnologiji/rad-nek-a> (pristupljeno: 21. lipnja 2019.)

⁵⁴ Kolarec, J. (2015) Nuklearna elektrana Krško. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, str. 7.

čine: kondenzator, rashladne crpke rashladni tornjevi i cjevovodi, a isti je namijenjen odvođenju topline koja se ne može korisno upotrijebiti za proizvodnju električne energije i potreban je za hlađenje kondenzatora.⁵⁵ Elektrana je opremljena američkim Westinghouseovim lakovodnim tlačnim reaktorom. Jezgra reaktora u njoj sastoji se od 121 gorivnog elementa. Pojedini gorivni elementi sadrže izgorive neutronske apsorbere, a 33 sadrže neutronske apsorpcijske šipke koje se tijekom rada izvlače. U jezgri se odvija cijepanje fisijskih jezgri. Obična voda za hlađenje u reaktoru Nuklearnoj elektrani Krško ima funkciju moderatora neutrona. Pri cijepanju atoma goriva oslobađa se toplina koju je potrebno odvesti hladilom. U lakovodnome tlačnome reaktoru hladilo je obična pročišćena (demineralizirana) voda koja među ostalim ima dobre toplinske karakteristike i nisku cijenu.⁵⁶ Treba istaknuti kako je briga o zaštiti okoliša uključena u sve radne procese u Nuklearnoj elektrani Krško. Rezultati mjerenja potvrđuju da su svi utjecaji na okoliš bili daleko ispod upravnih ograničenja, a primjerenost upravljanja okolišem ponovno je potvrdila i ponovna prosudba ispunjavanja zahtjeva novog okolišnog standarda ISO 14001:2015. Nuklearna elektrana Krško mjeri radioaktivnost u kontroliranim ispustima otpadne vode u rijeku Savu i u ispustima iz ventilacijskog sustava u atmosferu, dok vanjske ovlaštene organizacije mjere uzorke iz okoliša prije svega na području s radijusom od 12 kilometara oko iste. Osim toga oko elektrane smješteno je 13 automatskih postaja za mjerenje zračenja, koje mogu registrirati kako promjene prirodne razine zračenja zbog oborina tako i možebitne promjene zbog nuklearnog objekta.⁵⁷ Neovisne ovlaštene organizacije prate i radioaktivnost rijeke Save do 30 kilometara nizvodno od elektrane. Utjecaj Nuklearne elektrane Krško na okoliš tako je nizak da zapravo nije mjerljiv, ali se može primjenom modela izračunati za najizloženiju skupinu stanovništva te godišnju dozu usporediti s dozom zbog prirodnih i ostalih izvora zračenja. Procjena opterećenja pojedinca iz referentne kritične skupine (odrasla osoba koja prima najviše doze i uzima isključivo lokalno proizvedenu hranu i ulovljenu ribu) pokazuje da godišnja doza takvog pojedinca iznosi približno 1 mikrosivert, što je manje od 0,1 posto doze koju pojedinac prosječno primi iz prirodnih izvora zračenja (približno 2500 mikrosiverta). Za Nuklearnu elektranu Krško vrijedi ograničenje doze pojedinca od 50 mikrosiverta u jednoj godini (na udaljenosti od 500 metara od reaktora ili više) za prijenosne putove preko atmosfere i vode.⁵⁸

⁵⁵ Kolarec, J. (2015) Nuklearna elektrana Krško. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, str. 8.

⁵⁶ Ibid., str. 11.

⁵⁷ Nuklearna elektrana Krško (2018) Godišnje izvješće. Krško: NEK, str. 15.

⁵⁸ Ibid.

U 2018. godini nakon daljnje obrade u Nuklearnoj elektrani Krško je privremeno skladište odloženo 18 novih paketa niskoradioaktivnog i srednjoradioaktivnog otpada (NSRAO) ukupnog volumena od 10,2 kubna metra. Tijekom godine je nastalo 14,6 kubnog metra NSRAO-a. Dio otpada iz 2018. godine uskladištiti će se u 2019. godini jer je bilo potrebno u novu zgradu za rukovanje radioaktivnim teretima iz skladišta premjestiti tehnološku opremu za obradu radioaktivnog otpada kao što su visokotlačna preša i mjerna oprema, a nova zgrada omogućuje visoke radne standarde pri rukovanju otpadom, ispitivanjima i održavanju.⁵⁹

Treba istaknuti kako je 2018. godina za Nuklearnu elektranu Krško bila uspješna jer je elektrana radila ekonomično uz ostvarivanje visoke nuklearne sigurnosti i dosljedno poštivanje okolišnih ograničenja. Ispunjeni su svi ključni ciljevi koji su zacrtani za 2018. godinu, premašena je planirana proizvodnja i isporučeno je 5.489,43 MWh električne energije, što je za 59.429 MWh više od planiranoga, a pritom su ostvarili prihode u iznosu od 158.494,57 eura i rashode u iznosu od 158.494,57 eura, što znači da su prihodi jednaki rashodima.⁶⁰

4.3 Utjecaj nuklearne elektrane Krško na bilancu električne energije u Republici Hrvatskoj

Prema podacima Hrvatskog operatora prijenosnog sustava (HOPS), Hrvatska će od 2018. do 2022. godine uvoziti u prosjeku oko 43 posto potrebne električne energije godišnje⁶¹. To, međutim, vrijedi samo za idealne hidrometeorološke uvjete, a kao primjer je uzeta 2013. godine (Graf 11). Kao nepovoljan primjer može nam već poslužiti 2017. godina, gdje je uvoz električne energije u odnosu na domaću proizvodnju u 50 postotnom omjeru. Ako bismo u obzir uzeli nepovoljne okolnosti, poput velikih suša ili kvarova na elektranama, predviđanja o uvozu puno su depresivnija. U slučaju jednog nepovoljnog događaja, koji se odnosi ili na smanjenu sposobnost proizvodnje ili na povećanje potrebe te na ostale nepredvidive okolnosti, uvoz bi dostignuo razinu od 53 do čak, u najnepovoljnijem scenariju, 67 posto. Poznato je također da se nabava odnosno uvoz električne energije obavlja putem burze, a „izravno bilateralno ugovaranje najčešći je oblik ugovaranja kupovine električne energije te posredno izravno ugovaranje putem burze. Njemačko tržište električnom energijom najznačajnije je tržište, a cijena je 2018 godine u prosjeku iznosila 45 eura po MWh što se

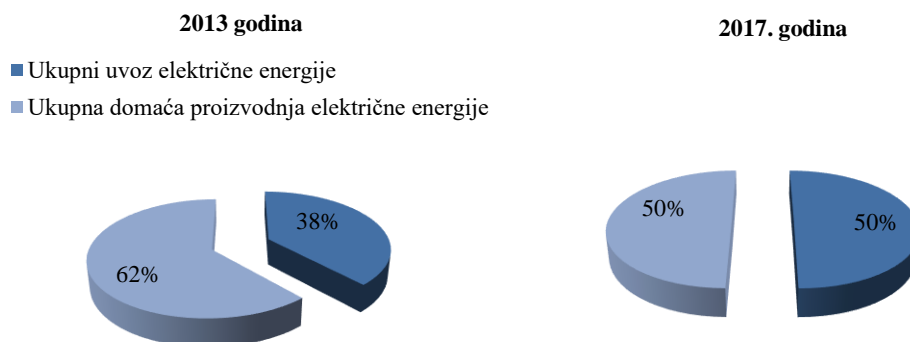
⁵⁹ Nuklearna elektrana Krško (2018) Godišnje izvješće. Krško: NEK, str., str. 18.

⁶⁰ Ibid., str. 65.

⁶¹ Energetika-net, dostupno na: <http://www.energetika-net.com/vijesti/energetsko-gospodarstvo/hrvatska-sve-ovisnija-o-uvozu-elektricne-energije-26644> (pristupljeno 2. rujna 2019.)

smatra niskom cijenom. U Njemačkoj je najviša cijena električne energije u industriji. Hrvatska je s cijenom od 42,5 eura po MWh u drugoj kategoriji od četiri cjenovne razine“.⁶²

Graf 11: Udio uvoza električne energije u odnosu na domaću proizvodnju 2013. i 2017. godine



Izvor: izračun autora na temelju podataka publikacija EIHP (2006-2017)

Kapaciteti za proizvodnju električne energije u sastavu HEP grupe obuhvaćaju 17 pogona velikih hidroelektrana, sedam pogona termoelektrana i polovinu instaliranih kapaciteta u Nuklearnoj elektrani Krško (na teritoriju Slovenije).) i veći broj lokacija koje koriste druge obnovljive izvore energije (vjetar i sunce) Termoelektrane koriste ugljen, plin i loživo ulje. Većinski vlasnik nad proizvodnim kapacitetima Republike Hrvatske je HEP d.d. Objekti koji nisu u potpunom vlasništvu HEP-a su NE Krško d.o.o. – mješovito vlasništvo HEP d.d. (udio 50 posto) i slovenskog partnera ELES GEN d.o.o. (udio 50 posto) i TE Plomin d.o.o. – mješovito vlasništvo HEP d.d. (udio 50 posto) i njemačkog partnera RWE Power (udio 50 posto). HEP Proizvodnja d.o.o. ima ugovor o vođenju i održavanju pogona s TE Plomin d.o.o. Ukupna raspoloživa snaga elektrana u sastavu HEP grupe na teritoriju Republike Hrvatske je 4.105 MW (uračunata TE Plomin d.o.o, bez NE Krško d.o.o.) odnosno ukupna snaga elektrana u okviru hrvatskog EES-a je 4.453 MW (s 50 posto NE Krško). Od toga je 1.906 MW u termoelektranama (uračunata TE Plomin d.o.o, bez NE Krško d.o.o.), 2.199 MW u hidroelektranama te 348 MW u NE Krško (50 posto ukupno raspoložive snage).⁶³

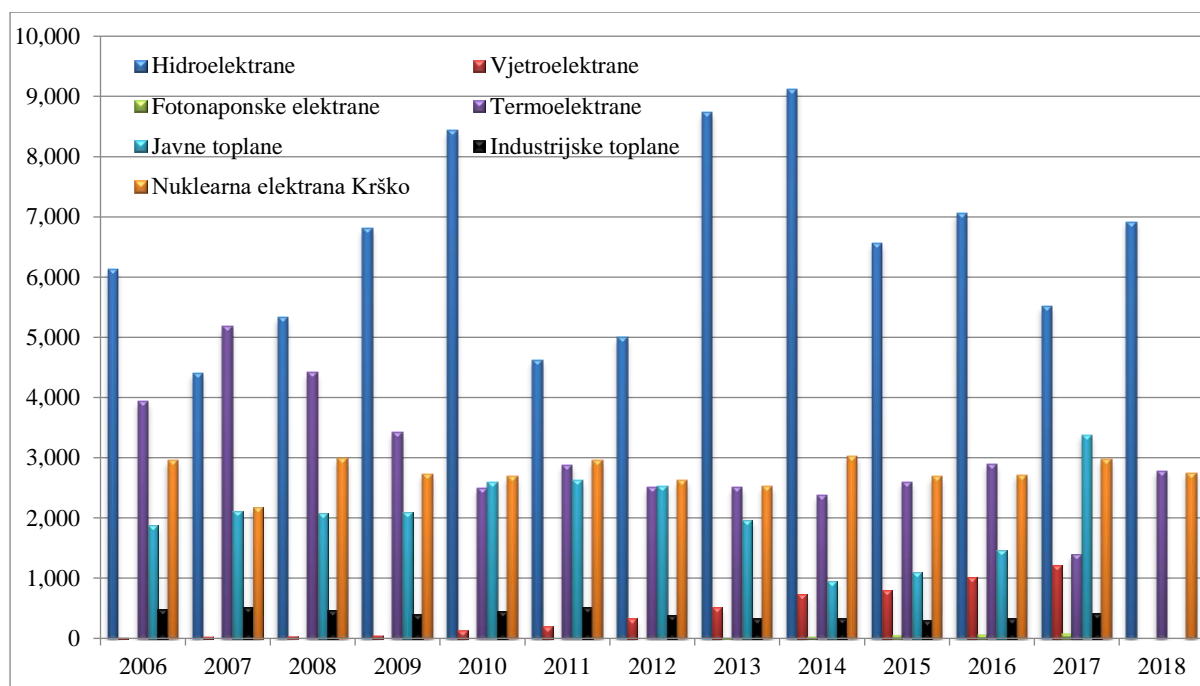
Graf 12 prikazuje ukupnu proizvodnje električne energije prema izvoru za razdoblje od 2006. do 2018*. godine, gdje se može vidjeti kako je u trinaestogodišnjem razdoblju prosječna proizvedena i isporučena količina električne energije Republici Hrvatskoj od strane NEK-a 2.736 GWh odnosno da je najveća proizvodnja bila 2014. godine s 3.030 GWh, a najmanja

⁶² Hrvatska gospodarska komora, dostupno na: <https://www.hgk.hr/ocekivanje-kretanja-trzista-opskrbe-elektricnom-energijom-u-nadolazecem-razdoblju> (pristupljeno 8. kolovoza 2019.)

⁶³ Ministarstvo zaštite okoliša i energetike (2016) Energija u Hrvatskoj. Zagreb, str. 148.

2007. s proizvedenih 2.174 GWh. Što se pak struktura udjela pojedinih izvora električne energije Republike Hrvatske u sastavu HEP grupe tiče, na Grafu 13 je vidljivo kako su Hidroelektrane najzastupljenije s udjelom od 42 posto, dok su termoelektrane i NEK zastupljene s udjelom od 17 posto.

Graf 12: Ukupna proizvodnja električne energije prema izvoru u razdoblju od 2006. do 2018*. godine

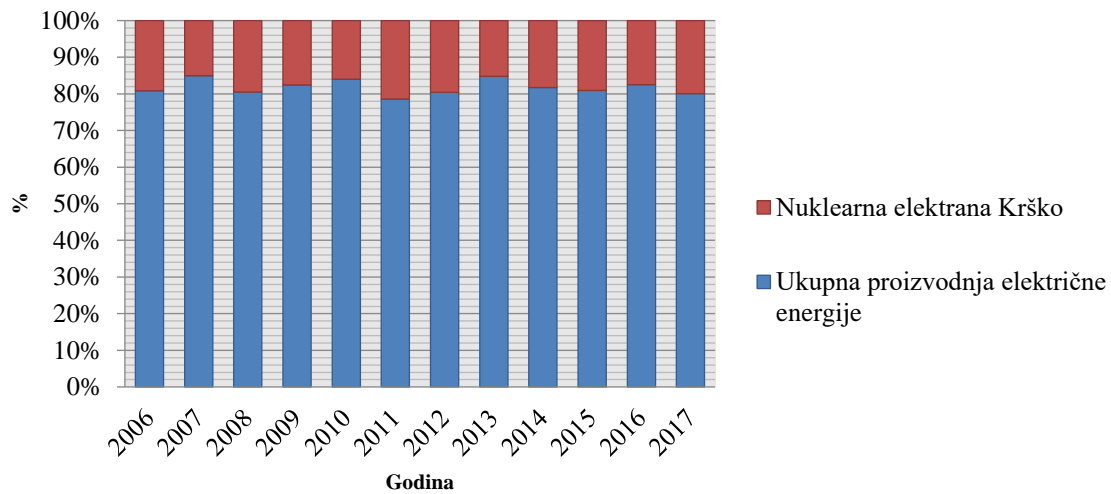


Izvor: izračun autora na temelju podataka publikacija EIHP (2006-2017) i HEP opskrbe, dostupno na: <https://www.hep.hr/opskrba/trziste-elektricne-energije/trziste/izvori-energije/1385> (preuzeto 31. kolovoza 2019.)

* Pojedinačni podaci u 2018. godini za fotonaponske i vjetroelektrane te za javne i industrijske toplane nisu dostupni.

Potrebno je također istaknuti da važnost isporuke električne energije iz NEK-a varira s obzirom na hidrološke prilike odnosno količini padalina koji su važan čimbenik proizvodnje električne energije u hidroelektranama. S tim u vezi je na Grafu 13 prikazan udio proizvodnje električne energije iz NEK-a iz ukupne proizvedene električne energije u razdoblju od 2006. do 2017. godine. Vidljivo je da se taj udio kreće od 18 do čak 27 posto, što nam sugerira da je „nuklearna električna energija“ od velike važnosti za namirenje hrvatskih potreba.

Graf 13: Udio proizvodnje električne energije iz NEK-a za ukupne potrebe RH za razdoblje od 2006. do 2017. godine (%)



Izvor: izračun autora na temelju podataka publikacija EIHP (2007-2017)

Poznato je da od 19. travnja 2003. godine Nuklearna elektrana Krško isporučuje proizvedenu električnu energiju članovima društva, GEN energiji i Hrvatskoj elektroprivredi u skladu s Ugovorom između Vlade Republike Slovenije i Vlade Republike Hrvatske o uređenju statusnih i drugih pravnih odnosa povezanih s ulaganjem u Nuklearnu elektranu Krško, njezinim iskorištavanjem i razgradnjom. Svaki član društva preuzima polovicu proizvedene električne energije. Nuklearna elektrana Krško posluje na neprofitnoj osnovi, troškove proizvodnje električne energije pokrivaju oba člana društva. U vlastitu cijenu, koja je konkurentna i u Sloveniji i u Hrvatskoj, a i šire, uključeni su troškovi nuklearnoga goriva, vodni doprinos, troškovi korištenja materijala i usluga, troškovi amortizacije, troškovi osiguranja, naknada za ograničeno korištenje prostora i korištenje građevinskoga zemljišta, troškovi rada i ostali rashodi poslovanja. Što se tiče poslovanja Nuklearne elektrane Krško, prema financijskim pokazateljima za 2017. i 2018. godinu, može se zaključiti da je poslovanje elektrane rentabilno. Primici kod poslovanja su u odnosu na izdatke pozitivni (44.991,42 eura), a približno isti iznos pokriva manje gubitke kod investiranja (Tablica 8).

Tablica 7: NEK, Izvještaj novčanih tijekova za 2018. godinu

	u EUR	
	2018	2017
A. Novčani tijekovi kod poslovanja		
Primici kod poslovanja	176.290.556	177.295.834
Izdaci kod poslovanja	131.299.138	135.022.905
POZITIVNA ILI NEGATIVNA DOBIT KOD POSLOVANJA	44.991.418	42.272.929
B. Novčani tijekovi kod investiranja		
Primici kod investiranja	209.180.340	202.262.315
Izdaci kod investiranja	254.173.202	244.546.055
POZITIVNA ILI NEGATIVNA DOBIT KOD INVESTIRANJA	-44.992.862	-42.283.740
C. Novčani tijekovi kod financiranja		
POZITIVNA ILI NEGATIVNA DOBIT KOD FINANCIRANJA	-	-
KONAČNO STANJE NOVČANIH SREDSTAVA	32.678	34.122
Tijek novca u razdoblju	-1.444	-10.811
Početno stanje novčanih sredstava	34.122	44.933

Izvor: https://www.nek.si/_files/3599/NEK_2018_HR.pdf (preuzeto 27. lipnja 2019.)

Nadzorni odbor Nuklearne elektrane Krško na svojoj zadnjoj sjednici u 2018. godini prihvatio je informaciju o poslovanju NEK-a, prema kojoj će elektrana uz trenutnu stabilnost do kraja godine ostvariti i premašiti pogonske i poslovne ciljeve. Do današnjeg dana članovima društva isporučeno je 4,888 milijarde kilovat sati električne energije te su premašene planirane isporuke za 50,119 milijuna kilovat sati što je odraz stabilnog rada elektrane na punoj snazi. Proizvodni cilj je 5,5 milijardi kilovat sati čime bi ponovno bio premašen zacrtani godišnji plan. Takvo djelovanje elektrane rezultat je pažljivog pogonskog nadzora, dobre suradnje sa organima upravljanja, predanost svih zaposlenih kao i povoljne hidrologije te s tim u vezi dobra termodinamička iskoristivost elektrane. Cijena proizvedene električne energije konkurentna je u usporedbi sa ostalim izvorima i u skladu u potpunosti sa gospodarskim planom te je vlasnicima omogućila profitabilnost u prilično zahtjevnim odnosima na tržištu električne energije. U stručnoj reviji Nuclear Engineering International, listopad 2018, objavljena je usporedba godišnjih pokazatelja proizvodne sposobnosti između 341 elektrane u svijetu. NEK se uvrstio na visoko 23 mjesto. Pokazatelj proizvodne sposobnosti je odnos između stvarne i moguće proizvodnje elektrane tijekom 12 mjeseci odnosno tijekom ukupnog pogonskog vijeka. Faktor proizvodne sposobnosti koji iznosi 99,1 posto i znači visoku pouzdanost i predvidljivost u nuklearnoj elektrani proizvedene električne energije što predstavlja izuzetnu dodanu vrijednost za stabilnost elektroenergetskog sustava

Slovenije i Hrvatske. NEK je također prema posljednjem sigurnosnom pregledu WANO uvršten u prvi razred uspješnosti i time je svrstan među uspješne elektrane u svijetu.⁶⁴

5 BUDUĆNOST NUKLEARNE ENERGIJE I NUKLEARNIH ELEKTRANA

5.1 Sigurnost rada nuklearnih elektrana kao njihov ograničavajući faktor

Nuklearne elektrane moraju biti sigurne i pouzdane, te moraju biti konkurentne (porast cijene fosilnih goriva, njihova moguća nestašica, utjecaj na okoliš i eksterni troškovi zajedno s povećanom raspoloživošću kompenziraju velike investicijske troškove). Potrebno je riješiti problem istrošenog goriva (problem je tehnički rješiv i radi se na par demonstracijskih projekata) te spriječiti proliferaciju nuklearnog materijala (uglavnom političko pitanje i nije nužno vezano za energetska primjenu). Sigurnost nuklearnih elektrana jest međunarodna obveza svake zemlje koja posjeduje takvu tehnologiju. U tu svrhu je Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) osnovala posebnu skupinu stručnjaka, nazvanu INSAG (*International Safety Advisory Group*). Ta je skupina već 1988. godine izradila dokument pod nazivom *Osnovna sigurnosna načela za nuklearne elektrane*, u kojem su postignuti međunarodni standardi sigurnosti, što se prvenstveno odnosi na konzervativni dizajn elektrane, koncept obrane po dubini i razne tehničke norme kako bi se osigurala kvaliteta komponenata u svim fazama gradnje i pogona.⁶⁵ Konzervativni projekt/dizajn nuklearne elektrane određuje način njenog projektiranja uz velike rezerve i pesimističke pretpostavke, a uz takvo projektiranje podiže se sigurnosna margina. Sustavi i komponente u pravilu su višestruki (redundantni), tako da kvar jedne komponente automatski aktivira njezinu zamjenu. Građevinski objekti nuklearne elektrane se projektiraju za pouzdanu izdržljivost na najnepovoljnije vanjske utjecaje koji se mogu pojaviti na geografskoj lokaciji elektrane, npr. seizmička aktivnost i atmosferski utjecaji. Višestruki mjerni i regulacijski kanali trebaju osigurati nadzor i upravljanje u svim uvjetima rada. Posebno se to odnosi na sustav za obustavu pogona i odvođenje ostatne topline iz reaktora. Sustav kontrole i osiguranja kvalitete svodi na najmanju mjeru mogućnost pogreške u gradnji i pogonu elektrane. Oprema sigurnosne klase prolazi posebne mjere kontrole. Cijeli sustav osiguranja kvalitete definiran

⁶⁴ Energetika-net, dostupno na: <http://www.energetika-net.com/vijesti/energetsko-gospodarstvo/ne-krsko-premasio-ciljeve-za-ovu-godinu-27728> (pristupljeno 2. srpnja 2019.)

⁶⁵ Nuklearna energija, Sigurnost nuklearnih elektrana, dostupno na: <http://www.nemis.hr/index.php/sigurnost/sigurnost-nuklearnih-elektrana.html> (pristupljeno: 1. lipnja 2019.)

je međunarodnim propisima. Školovanje pogonskog osoblja nuklearne elektrane također ulazi u kategoriju aktivnosti koje su povezane s nuklearnom sigurnošću, a djelovanje sustava nuklearne elektrane stalno se prati, 24 sata na dan, 7 dana u tjednu, pri čemu se sustavno i pravovremeno otklanjaju svi uočeni nedostaci.⁶⁶ Ako se promotri primjer černobilske nesreće 1986. godine i havarije u nuklearnoj elektrani Greifswald iz 1989. godine, nezaobilazni uzrok obiju nesreća može se pronaći u radu izvan propisanih i dizajniranih parametara te u zanemarivanju sigurnosnih postavki, što se prije svega može pripisati ljudskom čimbeniku, a ne nužno samoj tehnologiji.⁶⁷

Sigurnost u radu nuklearnih elektrana se usredotočuje na nenamjerne uvjete ili događaje koji dovode do radioloških ispuštanja iz ovlaštenih aktivnosti, što se uglavnom odnosi na unutarnje probleme ili opasnosti. Sigurnost se usredotočuje i na namjernu zlouporabu nuklearnih ili drugih radioaktivnih materijala od strane nedržavnih elemenata kako bi uzrokovala štetu, što se uglavnom odnosi na vanjske prijetnje materijalima ili objektima. Zaštitne mjere usredotočene su na aktivnosti ograničavanja od strane država koje bi mogle dovesti do stjecanja ili razvoja nuklearnog oružja. Riječ je uglavnom o materijalima i opremi u odnosu na nepoštene vlade. Projekti mnogih postojećih nuklearnih elektrana, kao i projekti za nove nuklearne elektrane, poboljšani su kako bi uključili dodatne mjere za ublažavanje posljedica složenih sekvenci nesreća koje uključuju višestruke kvarove i teške nesreće. Komplementarnim sustavima i opremom s novim mogućnostima su opremljene mnoge postojeće nuklearne elektrane kako bi se pomoglo u sprečavanju teških nesreća i ublažavanju njihovih posljedica. Smjernice za ublažavanje posljedica teških nesreća pružene su u većini postojećih nuklearnih elektrana. Projektiranje novih nuklearnih elektrana sada izričito uključuje razmatranje scenarija teških nesreća i strategija za njihovo upravljanje. U projektiranju nuklearnih elektrana uzimaju se u obzir i zahtjevi koji se odnose na državni sustav računovodstva i nadzora nad nuklearnim materijalom i sigurnosnim zahtjevima.

Temeljni sigurnosni cilj primjenjuje se na sve faze trajanja nuklearne elektrane, uključujući planiranje, postavljanje, projektiranje, proizvodnju, izgradnju, puštanje u pogon i rad, kao i stavljanje izvan pogona. To uključuje povezan radioaktivni materijal i upravljanje istrošenim nuklearnim gorivom i radioaktivnim otpadom. Ipak, s nuklearnom energijom, visoka gustoća energije čini potencijalnu opasnost očiglednom, a to je uvijek uključeno u projektiranje nuklearnih elektrana.

⁶⁶Nuklearna energija, Sigurnost nuklearnih elektrana, dostupno na: <http://www.nemis.hr/index.php/sigurnost/sigurnost-nuklearnih-elektrana.html> (pristupljeno: 1. srpnja 2019.)

⁶⁷ Szekeres, I. (2012) Smijemo li nuklearne elektrane smatrati sigurnima, dostupno na: <https://www.h-alter.org/vijesti/smijemo-li-nuklearne-elektrane-smatrati-sigurnima> (pristupljeno: 1. srpnja 2019.)

Cilj je tehničke sigurnosti učinkovito sprečavanje nezgoda u nuklearnim elektranama. Potrebno je osigurati iznimno malu vjerojatnost nezgoda s ozbiljnim radiološkim posljedicama. Tehnička sigurnost nuklearnog objekta prvi je cilj projekatata i upravljača nuklearnih elektrana, a može se postići korištenjem pouzdanih materijala, komponenti sustava i postupaka te dobro osposobljenim osobljem, koje se pridržava stroge sigurnosne kulture. Naime, elektrana se mora projektirati i voditi tako da otkazivanje opreme ili bilo koja ljudska pogreška ne dovedu do nezgode, a u slučaju da do nezgode ipak dođe, tehnički sigurnosni sustavi moraju omogućiti ublažavanje njezinih posljedica.⁶⁸

5.2 Budućnost nuklearnih elektrana u Europskoj uniji i Hrvatskoj

Globalno zagrijavanje i povećanje temperaturnih amplituda traži globalni odgovor na klimatske promjene, a kao glavni cilj jest kontrola i smanjenje emisije stakleničkih plinova. Mnogo je predloženih rješenja koja će dovesti ili već dovode do postavljenog cilja. To su: povećanje produktivnost resursa, održivo gospodarenje resursima, resursno učinkovito gospodarstvo i društvo uopće, održivo gospodarenje otpadom, smanjenje degradacije okoliša i potrošnje resursa, zelena industrija, prijelaz iz linearnog u kružno gospodarstvo, kao i druga rješenja.⁶⁹ Upravo se iz konteksta „drugih rješenja“, a uvažavajući i sve navedene, dobivanje električne energije iz nuklearnih resursa nameće kao jedno od najrealnijih rješenja u budućnosti. Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA), Međunarodna agencija za energiju (IEA) te Europska komisija (EC) izradili su nekoliko scenarija budućeg razvoja nuklearne energije do 2030. i 2050. godine u kojima se razmatra umjeren, pojačan i ubrzan razvoj. Prema IAEA umjerenom scenariju do 2020. godine rast nuklearnih kapaciteta bio bi 1,1 posto godišnje s dostignutom produkcijom od 3100 Twhe, a pojačan rast od 2,6 posto godišnje, do 2030. godine rezultirao bi praktičnim udvostručenjem sadašnje proizvodnje (5040 TWhe).⁷⁰ Najambiciozniji je EC-ov ubrzani scenarij WETO koji uključuje nuklearnu tehnologiju i gorivni ciklus najnovije Generacije IV, koja je u stanju razvoja, a s predviđenih 21.400 TWhe godišnje produkcije, 2050. godine, nuklearna bi energija postala dominantan proizvođač električne energije i vodika.⁷¹ WETO ubrzani scenarij zahtijeva bitno povećanje eksploatacije izvora urana, koja već danas zaostaje za potrebama reaktora u radu, te se

⁶⁸ Szekeres, I. (2012) Smijemo li nuklearne elektrane smatrati sigurnima, dostupno na: <https://www.h-alter.org/vijesti/smijemo-li-nuklearne-elektre-smatrati-sigurnima> (pristupljeno: 1. srpnja 2019.)

⁶⁹ Gelo, T. (2018), Energetska tranzicija i novi model energetskeg tržišta, Modeli razvoja hrvatskog gospodarstva, Družić, G ; Družić, I. (ur.), Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti i Ekonomski fakultet, Zagreb, str. 395-425.

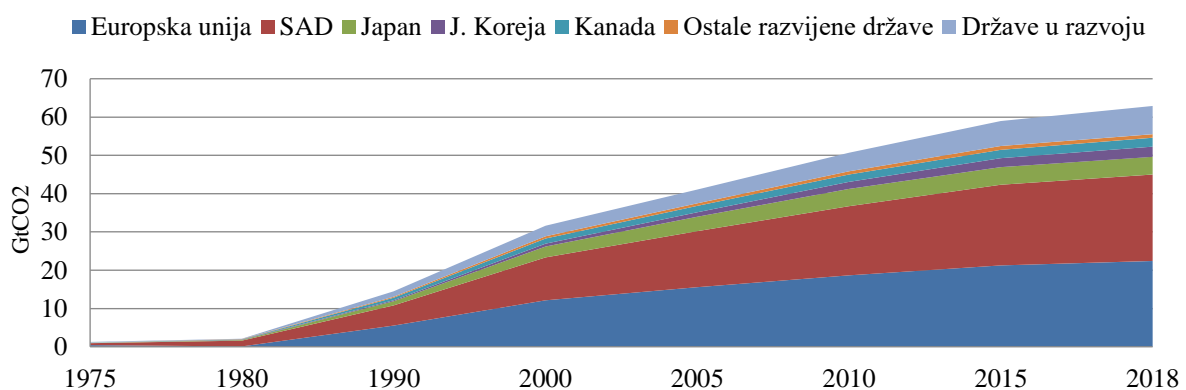
⁷⁰ Nuklearna energija, Perspektive nuklearne energije, dostupno na: <http://www.nemis.hr/index.php/energetske-svrhe/perspektive-nuklearne-energije.html> (pristupljeno: 3. srpnja 2019.)

⁷¹ Ibid.

razmatra eksploatacija urana iz siromašnijih, ali velikih izvora, fosfata i konačno oceana (procjena je da oceani sadrže 4,5 milijardi tona urana), a dugoročno, jedino rješenje nuklearne opcije, a time ujedno i održivog razvoja, primjena je oplodnih reaktora, koji su već danas u ozbiljnom razmatranju u Kini i Indiji.⁷² Naime, Kina i Indija, imaju velike potrebe za energijom i velike planove gradnje nuklearnih instalacija s velikim udjelom oplodnih reaktora. Kina planira da do 2050. godine 20 posto njenih nuklearnih kapaciteta budu oplodni reaktori.

Budući da je glavni cilj kontrola i smanjenje emisije stakleničkih plinova, sve svjetske i domaće studije u prvi plan ističu emisije CO₂ kao ključno pitanje u smislu energetske tranzicije. Na Grafu 14 su kumulativno prikazane izbjegnute emisije CO₂ koje bi bile ispuštene u atmosferu da nije bilo proizvodnje električne energije iz nuklearnih resursa. Proizvodnjom električne energije iz nuklearnih elektrana izbjegnuto je ispuštanje oko 55 Gt emisije CO₂ u posljednjih 50 godina, što je gotovo jednako 2 godine globalne emisije CO₂ povezane s energijom, a kao najveći zagađivači izdvajaju se SAD i zemlje EU s preko 40 Gt emisije CO₂.⁷³ Međutim, unatoč doprinosu nuklearne energije i brzom rastu obnovljivih izvora energije, emisije CO₂ povezane s energijom u 2018. godini dosegle su rekordno visoke rezultate jer je rast potražnje za električnom energijom nadmašio porast energije s niskim udjelom ugljika.

Graf 14: Kumulativni prikaz izbjegnutih emisije CO₂ u svijetu za razdoblje od 1975. do 2018. godine



Izvor: <https://www.iea.org/publications/nuclear/> (preuzeto 4. rujna.2019.)

Da bi se odgovor na pitanje perspektive nuklearnih elektrana u svijetu, Europskoj uniji pa i u Republici Hrvatskoj mogao dobiti, potrebno je uz smanjenje emisija CO₂, promotriti i ostale

⁷² Ibid.

⁷³ Međunarodna agencija za energiju (IEA), dostupno na: <https://www.iea.org/publications/nuclear/> (pristupljeno: 3. rujna 2019.)

ključne parametare koji utječu na izbor elektroenergetske strategije u budućnosti. U tom kontekstu je važno analizirati troškove dobivanja električne energije iz konvencionalnih odnosno nekonvencionalnih (alternativnih) izvora danas, ali i u budućnosti, a dobar pokazatelj su nivelirani troškovi proizvodnje električne energije (LCOE). Radi se o pokazatelju koji se koristi za izračunavanje prosječnih troškova proizvodnje jednog kilovatsata (kWh) električne energije izraženih u neto sadašnjoj vrijednosti kroz životni vijek elektrane. Jednostavnije rečeno, LCOE metoda izračunava prosjek troškova elektrane kroz duži vremenski period. Sistem LCOE-a najčešće se koristi za usporedbu troškova proizvodnje energije iz različitih izvora. Međutim, širok raspon tehnologija koje se koriste za proizvodnju električne energije te njihove velike razlike otežavaju usporedbu isplativosti između različitih sustava proizvodnje⁷⁴. Još jedan od važnih pokazatelja su, uz ostale troškove (kapitalni, operativni, troškovi goriva), emisije CO₂, vrijeme izgradnje i životni vijek postrojenja (Tablica 8), te troškovi izgradnje nuklearne elektrane (Graf 15). koji variraju ovisno o vrsti postrojenja i državi u kojoj se grade, a oni variraju čak od 3.000 u Južnoj Koreji do čak 9.000 USD/kWh u Europi i SAD-u.

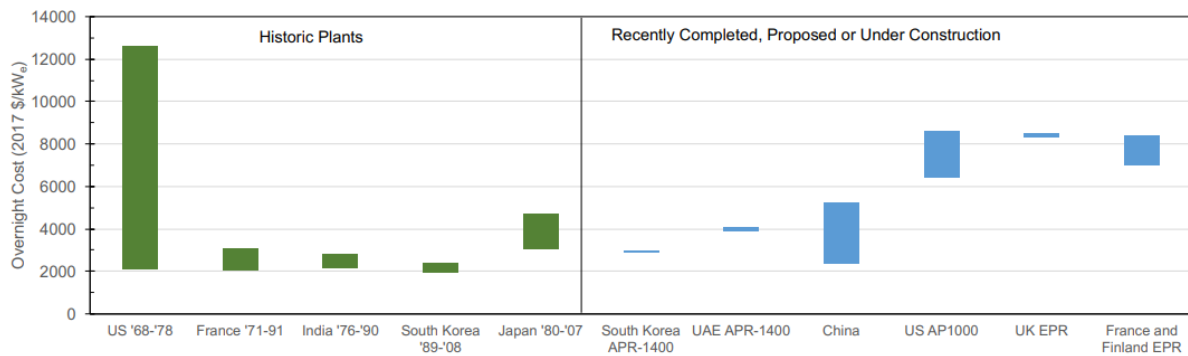
Tablica 8. Životni vijek postrojenja prema tehnologiji proizvodnje u godinama

Tehnologija	Životni vijek (godine)
Vjetroelektrana	25
Fotonaponski sustav	25
Plin i CCTG (kombinirani ciklus)	30
Geotermalna elektrana	40
TE na ugljen	40
Nuklearna elektrana	60
Hidroelektrana	80

Izvor: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos:1181/preview> (preuzeto 7. rujna 2019.)

⁷⁴ Šarić, A. (2016) Analiza isplativosti proizvodnje električne energije Osijek: Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku: diplomski rad . Osijek, str.: 4

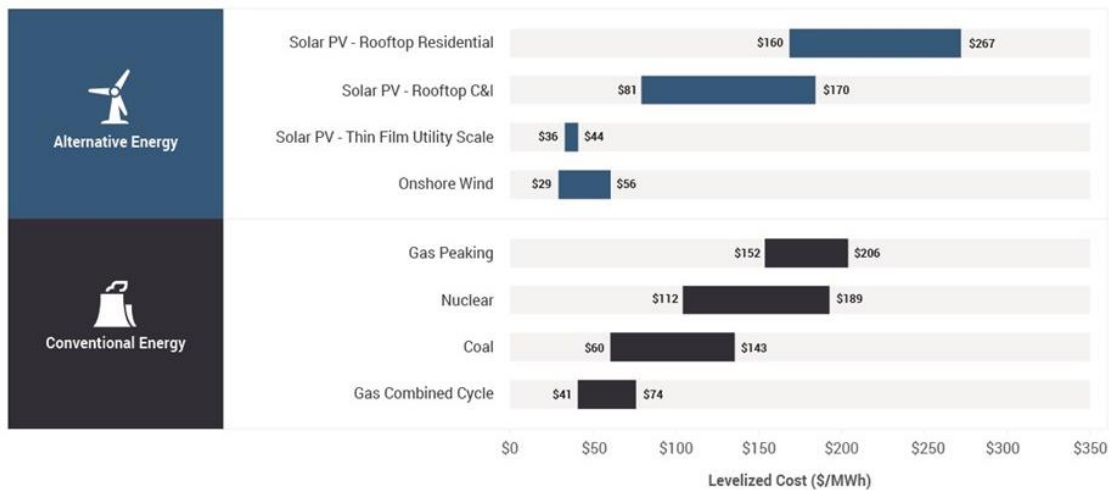
Graf 15: Trokovi prije izgrađenih nuklearnih elektrana, nedavno završenih, operativnih ili u izradi, u odabranim državama



Izvor: <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2018/09/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World.pdf> (preuzeto 7. rujna 2019.)

Podaci američke investicijske banke Lazard (Slika 5) prikazuju nivelirane troškove proizvodnje električne energije u 2018. godini u MWh (najniži do najviši) za konvencionalne i alternativne izvore što nam pokazuje kontinuirani pad troškova proizvodnje električne energije iz alternativnih energetske tehnologije, posebno solarne energije i vjetrova.

Slika 5: Nivelirani troškovi proizvodnje električne energije u 2018. godini



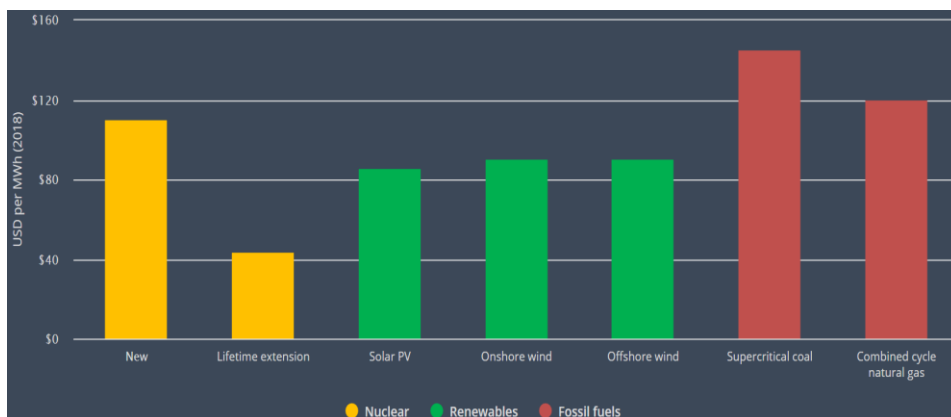
Izvor: <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2018/> (preuzeto 6. rujna 2019.)

Troškovi proizvodnje iz nuklearnih kapaciteta se kreću između 112 i 189 USD/MWh. U nekim scenarijima, alternativni troškovi energije smanjili su se do te mjere da su sada na ili ispod graničnih troškova konvencionalne proizvodnje, a budućnosti se očekuje i njihov dodatni pad pa se s tim u vezi može postaviti pitanje isplativosti „nuklearne električne

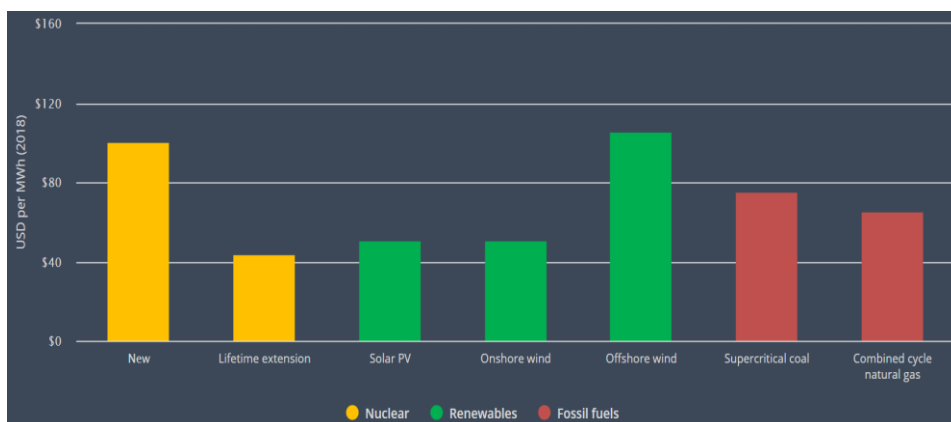
energije“, a budućnost je još neizvjesna jer postrojenjima istječe radni vijek i u razvijenim gospodarstvima počinje ih se zatvarati, dijelom zbog politika koje se zalažu za njihovo ukidanje, ali i zbog ekonomskih i regulatornih čimbenika. S obzirom da se nuklearna energija suočava s neizvjesnom budućnošću u mnogim zemljama, svijet riskira nagli pad njezine uporabe u razvijenim gospodarstvima, što bi moglo rezultirati milijardama tona dodatnih emisija ugljika.

Uspoređujući nivelirane troškove proizvodnje električne energije 2040. godine, vidljivo je da su nuklearni kapaciteti s produženim životnim vijekom u svim regijama znatno konkurentniji na ostale izvore (oko 40 USD/MWh), a da su potencijalni novi kapaciteti u SAD-u i EU nešto nepovoljniji samo u odnosu na obnovljive izvore energije (Slika 6 i 7). Kada promatramo Japan (Slika 8) dobivanje električne energije iz nuklearnih kapaciteta je neizbježno zbog znatno više cijene iz obnovljivih izvora.

Slika 6: LCOE u Europskoj uniji 2040



Slika 7: LCOE u SAD-u 2040. godine



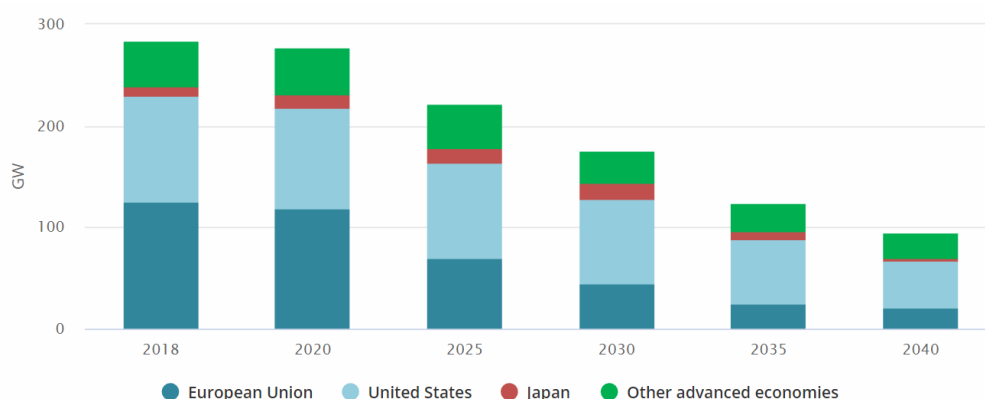
Slika 8: LCOE u Japanu 2040. godine



Izvor: <https://www.iea.org/publications/nuclear/> (preuzeto 7. rujna 2019. godine)

Međutim, s obzirom na nove izazove, postoji mogućnost da se nuklearna postrojenja u razvijenim gospodarstvima suoče s naglim padom. Analizom Međunarodne agencije za energiju (IEA) iz 2019. godine (Nuclear Fade Case) istraženo je što bi se moglo dogoditi tijekom sljedećih desetljeća ukoliko nebi bilo dodatnih ulaganja u produženje životnog vijeka nuklearnih elektrana ili izgradnje novih kapaciteta projekata. Nedvojbeno je utvrđeno da bi se nuklearni kapacitet koji postoje u razvijenim gospodarstvima smanjili za dvije trećine do 2040., s oko 280 GW u 2018. na nešto više od 90 GW u 2040. godini. Europska unija bi imala pad od oko 4 posto. Udio u Sjedinjenim Državama smanjio bi se na 8 posto, a u Japanu bi udio pao na 2 posto (Graf 16).

Graf 16: Operativni kapaciteti nuklearne energije u razvijenim gospodarstvima u slučaju odustajanja za razdoblje od 2018. do 2040. godine

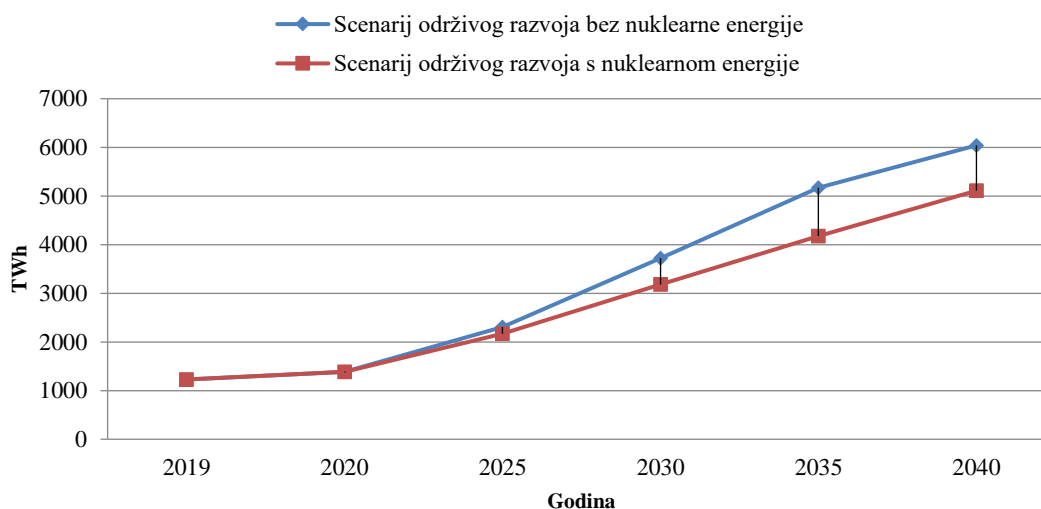


Izvor: <https://www.iea.org/publications/nuclear/> (preuzeto 7. rujna 2019. godine)

Nagli pad proizvodnje nuklearne energije bi u slučaju nuklearnog odustajanja trebalo nadoknaditi alternativnim izvorima jer će potražnja za električnom energijom globalno rasti,

a kao rješenje se nameće povećana proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije u odnosu na konvencionalne. U istom bi slučaju, također, energetska tranzicija čiste energije postala teža i skuplja pa bi se proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora, većinom energijom vjetra i sunca, trebala konstantno povećavati. Na Grafu 17 je izveden prikaz scenarija održivog razvoja sa i bez proizvodnje električne energije iz nuklearnih kapaciteta u razdoblju od 2019. do 2040. godine. U slučaju scenarija bez proizvodnje električne energije iz nuklearnih kapaciteta, stopa porasta izlaza snage vjetra i sunčeve energije bi se do 2040. godine otprilike trebala povećavati za gotovo 20 posto, što nije izgledno zbog ograničavajućih faktora koji se vežu na proizvodnju električne energije iz navedenih izvora.

Graf 17: Scenarij održivog razvoja sa i bez proizvodnje električne energije iz nuklearnih kapaciteta za razdoblje od 2019. do 2040. godine

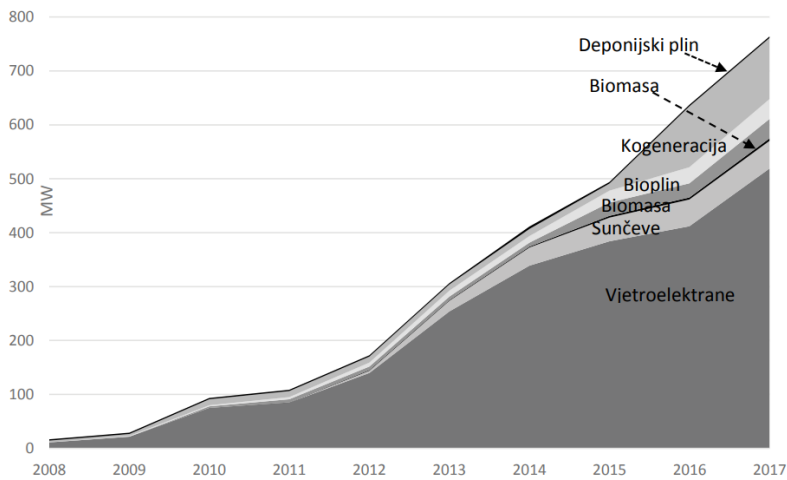


Izvor: izračun autora na temelju podataka IEA (pristupljeno 7. rujna 2019.)

Što se tiče Republike Hrvatske, Hrvatska kao dio EU-a sudjeluje u energetskej tranziciji i slijedi trendove u kojima se fosilna goriva postupno zamjenjuju obnovljivim izvorima energije. Svoj zakonodavni okvir prilagodila je zakonodavstvu EU-a i na taj način omogućila energetskej tranziciju. Moglo bi se reći da je Hrvatska predvodnik energetske tranzicije s obzorom na udio proizvodnih kapaciteta iz obnovljivih izvora u strukturi ukupnih elektroenergetskih kapaciteta (Graf 18).⁷⁵

⁷⁵ Gelo, T, (2018), Energetska tranzicija i novi model energetskeg tržišta, Modeli razvoja hrvatskeg gospodarstva, Družić, G ; Družić, I, (ur.), Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti i Ekonomski fakultet, Zagreb, str. 395-425.

Graf 18: Struktura proizvodnih kapaciteta obnovljivih izvora energije u RH u razdoblju od 2008. do 2017. godine*



Izvor: <http://web.efzg.hr/repec/Chapters/chapter18-17.pdf> (preuzeto 8. rujna 2019.)

*Bez velikih hidroelektrana u vlasništvu HEP-a

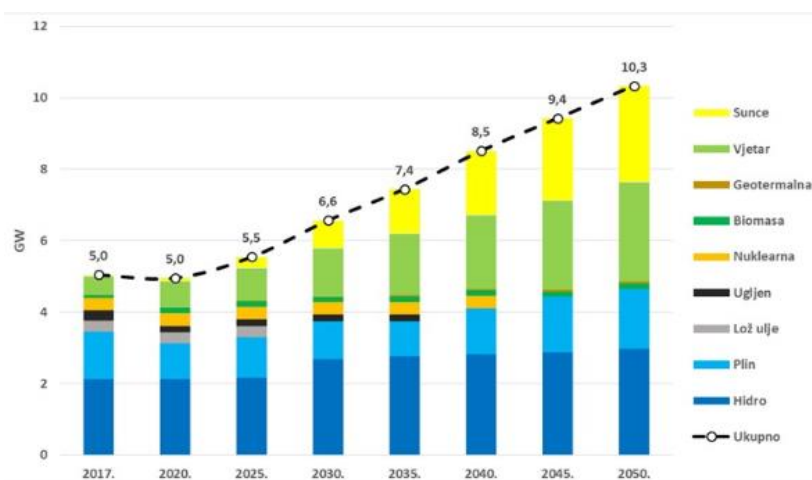
S obzirom na sve kapacitete koji proizvode električnu energiju, u Hrvatskoj je 2017. godine, od ukupno instaliranih kapaciteta, oko 60 posto iz obnovljivih izvora, što nas svrstava u sam vrh EU-a po obnovljivim izvorima. Povećanje navedenih kapaciteta utjecalo je i na rast udjela električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora s 34 posto 2008. godine (prije izgradnje novih kapaciteta obnovljivih izvora) na gotovo 47 posto 2017. godine (12,5 posto iz novih kapaciteta u kojima prevladava električna energija proizvedena u vjetroelektranama, 50 posto u proizvodnji i oko 70 posto u novim kapacitetima), što Hrvatsku svrstava na 6 mjesto po udjelu u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora u EU. Kada se uzme u obzir bruto finalna potrošnja energije (ne samo električna energija), udio u ukupnoj potrošnji iz obnovljivih izvora je oko 30 posto, što je i dalje svrstava oko šestog mjesta u EU.⁷⁶

Prema najnovijem dokumentu koji je izdala Vlada RH: Nacrt prijedloga Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu, važno je istaknuti kako se „nuklearna budućnost“ RH sa zatvaranjem NEK-a 2043. godine, ne planira, odnosno rad NE Krško nakon 2043. godine ovisit će o odluci o produljenju dozvole i poslovnoj odluci suvlasnika. Spominje se također, kako RH ostaje uključena u daljnja istraživanja mogućnosti njezina korištenja i mogućnosti produljenja dozvole za rad iza 2043. godine. I dalje će se pratiti razvoj novih tehnologija manjih i fleksibilnih reaktora, kao i

⁷⁶ Gelo, T, (2018), Energetska tranzicija i novi model energetskog tržišta, Modeli razvoja hrvatskog gospodarstva, Družić, G ; Družić, I, (ur.), Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti i Ekonomski fakultet, Zagreb, str. 395-425.

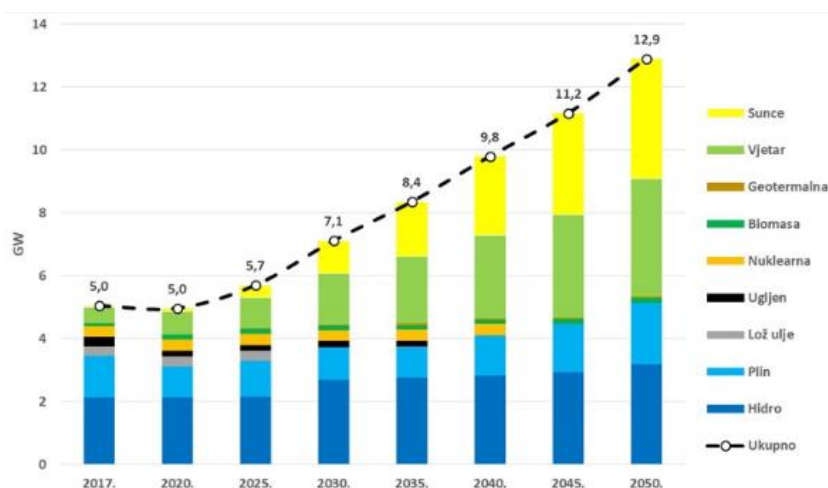
moćna partnerstva na razvoju novih projekata u susjednim zemljama⁷⁷. Na Grafovima 19 i 20 su prikazani tzv. scenariji 1 (ubrzane energetske tranzicije) i 2 (umjerene energetske tranzicije), kojima se planira snaga elektrana po izvoru energije u razdoblju od 2017. do 2050. godine, a koji potvrđuju gore navedenu tezu o proizvodnji električne energije iz nuklearnih kapaciteta. Primarnu bi ulogu, dakle, trebali preuzeti, uz hidropotencijale, obnovljivi izvori energije, u prvom redu vjetar i sunce. Iz iste je strategije vidljivo da se u RH ne planiraju daljnje investicije za dobivanje električne energije iz nuklearnih izvora (Graf 21).

Graf 19: Snaga elektrana po izvoru energije u RH za razdoblje od 2017. do 2050. godine (S1)



Izvor: <https://esavjetovanja.gov.hr/ECon/MainScreen?entityId=10936> (preuzeto 7. rujna 2019.)

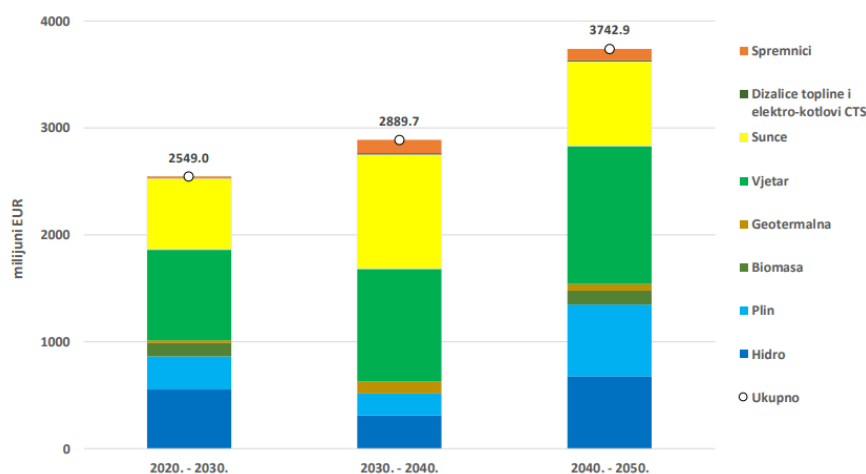
Graf 20: Snaga elektrana po izvoru energije u RH za razdoblje od 2017. do 2050. godine (S2)



Izvor: <https://esavjetovanja.gov.hr/ECon/MainScreen?entityId=10936> (preuzeto 7. rujna 2019.)

⁷⁷ Nacrt prijedloga Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. i konačne verzije Bijele knjige, dostupno na: <https://esavjetovanja.gov.hr/ECon/MainScreen?entityId=10936> (pristupljeno 7. rujna 2019.)

Graf 21: Ukupne investicije u RH u elektrane, spremnike i dizalice topline za razdoblje od 2020. do 2050. godine



Izvor: <https://www.hup.hr/EasyEdit/UserFiles/zelena-knjiga.pdf> (preuzeto 7. rujna 2019.)

5.3 Održivi razvoj i nuklearne elektrane

Održivi razvoj je okvir za oblikovanje politika i strategija kontinuiranog gospodarskog i socijalnog napretka, bez štete za okoliš i prirodne izvore bitne za ljudske djelatnosti u budućnosti. Osnovni je cilj osigurati održivo korištenje prirodnih izvora na nacionalnoj i međunarodnoj razini. Isti način razmišljanja treba biti primijenjen u svim sferama svakodnevnog života kroz kreiranje planova uvijek pomno razmatrajući učinke na okoliš, resurse i posljedično utjecaj na druge ljude, njihovu mogućnost da zadovolje potrebe, a naravno i interese generacija koje dolaze.⁷⁸ Ograničenost prirodnih resursa i negativni utjecaji na okoliš uzrokovani njihovom potrošnjom zahtijevaju unaprjeđenje postojećih i iznalaženje novih modela za njihovo održivo korištenje, pa je jedan od osnovnih ciljeva Europske unije kroz čitav niz financijskih instrumenata i strategija potaknuti unaprjeđenje gospodarskog sustava u smislu učinkovitijeg korištenja resursa i energije.⁷⁹ Održivi razvoj podrazumijeva ravnotežu pa s tog stajališta koncepcija održivog razvoja zahtijeva očuvanje prirodnih resursa, veću pravednost u raspodjeli resursa i bogatstva, uvođenje i primjenu novih tehnologija, razlikovanje koncepta rasta i koncepta razvoja, odustajanje od aktivnosti koje bi mogle ugroziti interese budućih pokoljenja, te prihvaćanje održivog razvoja kao filozofskog pristupa i pragmatičnog djelovanja.⁸⁰

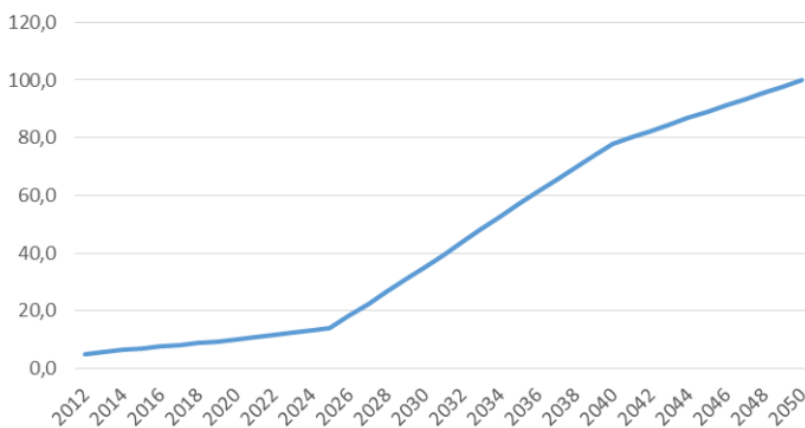
⁷⁸ Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost (2019) Program Energija i klimatske promjene, dostupno na: http://www.fzoeu.hr/hr/energetska_ucinkovitost/edukacija_i_ostali_projekti/program_energija_i_klimatske_promjene/ (pristupljeno: 5. srpnja 2019.)

⁷⁹ Ibid.

⁸⁰ Črnjar, M. (2002) *Ekonomika i politika zaštite okoliša*. Rijeka: Ekonomski fakultet Sveučilišta u Rijeci, str. 190.

Nuklearna energija po ocjeni stručnjaka izaziva po tom pitanju oprečna mišljenja, ali u većini segmenata zadovoljava kriterije održivog razvoja. Argumenta za takvu tvrdnju je mnogo, a kao jedan od glavnih je da nuklearna elektrane ne stvaraju stakleničke plinove tako da se njenim korištenjem ublažuje globalno zatopljenje. Korištenjem nuklearne energije pojedine države reducirale bi emisiju ugljičnog dioksida na razinu koja osigurava međunarodno dogovoreno ograničenje porasta temperature atmosfere. Postizanje ciljeva smanjenja emisija za 80% do 2050. godine, uključuje scenarije s različitim tehničkim i bihevioralnim mjerama. Svaki od tih scenarija, s obzirom na uključenost troškova, podrazumijeva i različitu projiciranu cijenu emisija. Koristeći model PRIMES, stavljajući naglasak na mjere vezane uz energetska učinkovitost i/ili obnovljive izvore energije, projicirane su cijene emisija do 2050. godine prema referentnom ili ambicioznijim scenarijima. Cijene (i energije i emisija) u PRIMES modelu koriste se na način da se podrazumijeva zajedničko tržište emisija, kao i energije za čitavu Europsku uniju. Utjecaj na cijenu emisija značajno ovisi o tome hoće li se naglasak na implementaciju mjera staviti na ciljeve vezane uz energetska učinkovitost ili one uz obnovljive izvore energije ili na njihovu kombinaciju, kako preporučuje europsko zakonodavstvo davanjem zajedničkih preporuka (npr. EU 20-20-20) i uz korištenje linearnog pravila o smanjenju od 1,74% godišnje-koje je trenutno na snazi.⁸¹ Na Grafu 22 je prikazana projekcija cijena emisija stakleničkih plinova u ETS sustavu po toni ispuštenog CO₂ do 2050. godine, iz kojeg je vidljivo kako će cijene od polovice sljedećeg desetljeća rapidno rasti i u budućnosti biti opterećenje svim „karbonskim“ gospodarstvima kako u Europi tako i u ostatku svijeta.

Graf 22: Projekcije cijena emisija stakleničkih plinova u ETS sustavu, do 2050. godine



Izvor: http://www.door.hr/wp-content/uploads/2016/04/CBA_Plomin_C.pdf (preuzeto 8. rujna 2019.)

⁸¹ Društvo za oblikovanje održivog razvoja (2016) Analiza koristi i troškova TE Plomin C, Zagreb, str. 25

Nuklearne elektrane u usporedbi s instaliranim postrojenjima u obnovljivim izvorima energije za svoj pogon koriste puno manje površinu zemljišta pa je tako za nuklearnu elektranu snage 1.000 MW površina korištenog zemljišta na lokaciji elektrane 1-4 km², za solarni ili fotonaponski park iste snage 20-50 km², za farmu vjetrenjača iste snage 50-150 km², dok je za elektranu na biomasu iste snage potrebna površina zemljišta od 4.000-6.000 km².⁸² S obzirom da do 2050. godine pola svjetske populacije živjeti u velikim gradovima, potrebe proizvodnje električne energije u blizini velikih centara će biti izvori koji iziskuju velike površine za proizvodnju energije i biti će nepraktični.⁸³ U tom bi smislu trebalo u razmatranje uzeti izgradnju manjih nuklearnih elektrana u blizini tih područja. Za proizvodnju električne energije iz nuklearnih elektrana bilo je potrebno izgraditi masovne objekte okružene velikim površinama, električnu infrastrukturu, ceste, parkirališta i još mnogo toga, a izgradnjom „naprednih malih modularnih reaktora“ navedeni ograničavajući faktori bi se reducirali. Nova generacija manjih i više tehnološki naprednih reaktora nudi mnoge prednosti od proizvodnje na montažnoj traci, znatno smanjene rizika od taljenja i eksplozije do veće fleksibilnosti u smislu njihove lokacije. Većina malih modularnih reaktora ima snagu između 50 MW (za opskrbu 60.000 modernih kućanstava) i 200 MW, za razliku od konvencionalnih nuklearnih reaktora koji imaju snagu od 1.000 do 1.600 MW. Postoje projekti za još manje reaktore tzv. 'mini' ili 'mikro-reaktori' koji imaju kapacitet od 4 MW. Međutim, takvi manji reaktori i nisu baš neka novost jer ih Indija već ima 18, s kapacitetom između 90 i 220 MW, koji su izgrađeni između 1981. i 2011. godine. Takvi reaktori mogli bi opskrbljivati energijom ruralne gradove, industrijska postrojenja, planinska područja i vojne baze, kao i gradske četvrti i luke. Mali modularni reaktori bili bi opremljeni sustavima za hlađenje koji bi radili čak i ako nema prisutnih operatora i u slučaju nestanka električne energije. U mnogim slučajevima, cijeli reaktor i oprema za proizvodnju pare bit će ispod zemlje kako bi se zaštitili od prirodnih katastrofa poput potresa i tsunamija. Privatne i državne tvrtke sve više su zainteresirane za izgradnju malih elektrana u desetak zemalja, uključujući SAD i Veliku Britaniju. Uskoro će im se pridružiti Francuska, koja dobiva tri četvrtine svoje električne energije iz nuklearnih elektrana, i Kanada. Prema Međunarodnoj agenciji za atomsku energiju (IAEA) takvi reaktori bi mogli proizvoditi energiju već prije 2020. godine u Kini, Rusiji i Argentini. U američkoj saveznoj državi Idaho, takvih 12 reaktora krenut će s radom do sredine 2020. godine s ukupnim kapacitetom od 720 MW. Ovaj globalni trend je

⁸²Nuklearna energija, Održivi razvoj nuklearne energije, dostupno na: <http://www.nemis.hr/index.php/strategije-i-zakoni/odrzivi-razvoj-nuklearne-energije.html> (pristupljeno: 6.srpnja 2019.)

⁸³ Ibid.

posljedica sve češćeg uklanjanje velikih nuklearnih elektrana u svijetu, a iako mali modularni reaktori proizvode manje radioaktivnog otpada nego standardni, veći reaktori za istu količinu električne energije i dalje ostaje neriješen problem sigurne sanacije nuklearnog otpada.

S tim u vezi treba spomenuti Ruski Rosatom, koji je u travnju 2018. godine u more u okolici Murmanska porinuo svoju eksperimentalnu nuklearnu elektranu "Akademik Lomonosov" i s time postao prvi u svijetu koji je takvo što učinio u 21. stoljeću. Rosatom planira pokrenuti serijsku proizvodnju malih nuklearki, u skladu sa svojom podužom tradicijom izvoza nuklearne tehnologije, u prvom redu u Kinu, Indiju i neke moćnije zemlje u razvoju. Nakon puštanja u rad FNPP-a, što je planirano za 2019. godine, zamijenit će nuklearnu elektranu Bilibino i TE Chaunskaya koja su tehnološki zastarjela i postat će najsjevernija nuklearna elektrana na svijetu. Dizajnirana je da djeluje kao dio plutajuće nuklearne termoelektrane (FNPP) i nova je klasa izvora energije na temelju ruske tehnologije nuklearne brodogradnje.⁸⁴

Nuklearna elektrana ima dvije reaktorske koje tijekom normalnog rada mogu proizvesti do 70 MW električne energije i 50 Gcal/h toplinske energije. To je dovoljno za održavanje aktivnosti u gradu sa 100.000 ljudi. FPU je jedinstveni i prvi svjetski projekt mobilne prijenosne jedinice male snage. Dizajniran je za operaciju na područjima krajnjeg sjevera i ruskog dalekog istoka, a glavna zadaća će biti osigurati električnu energiju udaljenim industrijskim postrojenjima, lučkim gradovima, te plinskim i naftnim platformama na moru.

Za razliku od elektrana na fosilna goriva koje raspršuju ogromne količine otpada na velike površine, u nuklearnim elektranama se sav otpad može sakupiti i sigurno pospremiti s tim da razina intenziteta zračenja s vremenom opada. Dio otpada iz fosilnih elektrana je toksičan i takav ostaje zauvijek. Iskustva s odlaganjem i niskoaktivnog i visokoaktivnog otpada iz civilnog energetskeg programa su pozitivna. Nije bilo značajnog ispuštanja radioaktivnog otpada u okoliš, a odlagališta koja su u izgradnji bit će još sigurnija. No oportuno je mišljenje također za razmotriti. Naime, visoko radioaktivni otpad mora biti skladišten i pod nadzorom gotovo 300.000 godina, što je period koji nadilazi ljudsku civilizaciju. To znači da ostavljamo opasni, radioaktivni otpad za buduće generacije da se bave njime, na veoma dugi period vremena, kako bismo mi danas mogli koristiti njegovu energiju pa je razlika između vremena korisnosti (oko 60 godina) te cijene i tereta koji ono predstavlja vrlo delikatan⁸⁵.

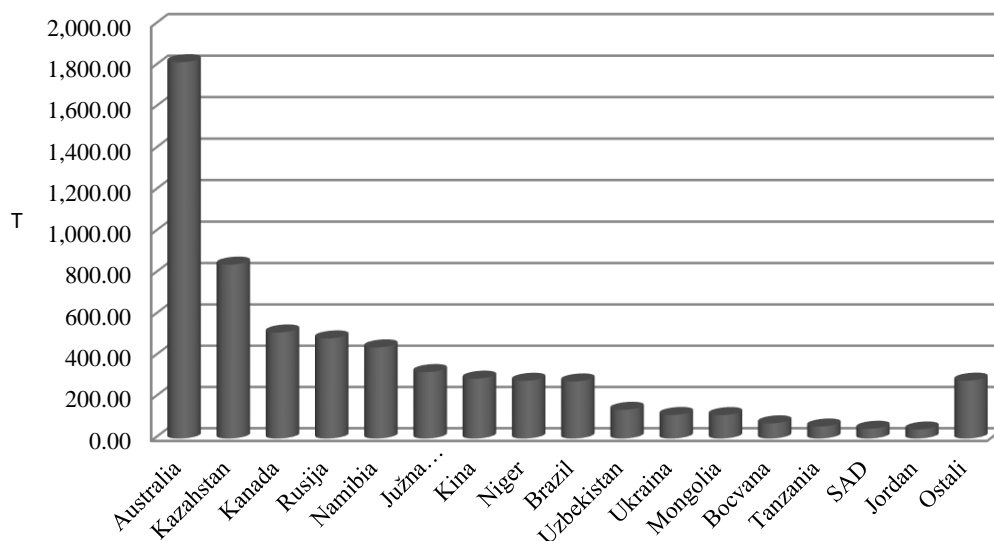
Kao jedni od utjecajnih čimbenika na održivi razvoj nuklearnih elektrana su i sigurnost okoliša i stanovništva te zalihe nuklearnog goriva. Procjenjuje da su zalihe urana dovoljne za

⁸⁴ Rosatom, dostupno na: <https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/the-world-s-only-floating-power-unit-akademik-lomonosov-takes-the-sea/> (pristupljeno 8. rujna 2109.)

⁸⁵ Nuklearna energija: Spas ili prijetnja planeti, dostupno na: <http://balkans.aljazeera.net/vijesti/nuklearna-energija-spas-ili-prijetnja-planeti> (pristupljeno 8. rujana 2019.)

pogon sadašnje generacije nuklearnih elektrana (termički reaktori, bez recikliranja goriva) za sljedećih stotinjak godina uz značajno povećanje nuklearnih kapaciteta (Graf 23), a apsolutni rekorder s otkrivenim zalihama je Australija s 1.818,30 tona ili udjelom od 30 posto.

Graf 23: Zalihe urana po zemljama u 2017. godini



Izvor: izračun autora na temelju podataka World Nuclear association (pristupljeno 7. rujna 2019.)

Komercijalnim razvojem i značajnom primjenom tehnologije prerade nuklearnog goriva i tehnologije oplodnih reaktora, koji proizvode veću količinu nuklearnog goriva nego što ga troše, period iscrpljenja zaliha nuklearnog goriva produžio bi se na desetak tisuća godina. Razvoj efikasne tehnologije izdvajanja urana iz morske vode u Japanu i SAD je obećavajući čime bi zalihe nuklearnog goriva postale praktički neiscrpne. Na taj način bi zalihe nuklearnog goriva bile dostatne i za mnoge buduće generacije. Međutim, situacija oko eksploatacije urana nije posve zadovoljavajuća. Iskopavanje urana ima velike posljedice na okoliš i ljude, što su pokazale studije provedene u nizu zemalja, od Bugarske do Nigera.⁸⁶ I nakon zatvaranja rudnika i pokušaja da se obnovi područje, zone bivših rudnika predstavljaju pravu pustoš s pogoršanim stanjem okoliša. Zbog loših pravila i nebrige vlasnika i upravitelja, nuklearni materijal je dospijevao u obradiva tla, u podzemne vode koje su poslije služile za piće ljudi i stoke, a čak je i vjetar u nekim slučajevima raznosio nuklearne čestice i plinove, kada se iskopani materijal držao na otvorenom i na taj se način problematizirala sigurnost okoliša i stanovništva.

⁸⁶ Nuklearna energija: Spas ili prijetnja planeti, dostupno na: <http://balkans.aljazeera.net/vijesti/nuklearna-energija-spas-ili-prijetnja-planeti> (pristupljeno 8. rujna 2019.)

Od samih početaka razvoja nuklearne tehnologije posebna pažnja posvećena je brizi da povećano korištenje nuklearne energije ne bi dovelo do nekontrolirane proizvodnje nuklearnog oružja, a Međunarodna agencija za atomsku energiju uspostavila je efikasni međunarodni sustav kontrole nuklearnih materijala nastalih miroljubivom upotrebom nuklearne energije s ciljem sprečavanja širenja nuklearnog oružja.⁸⁷ Iako postoje države koje pod krinkom proizvodnje električne energije iz nuklearnih kapaciteta rade na razvoju nuklearnog oružja (npr. Iran), sve vodeće svjetske sile pružaju dodatne napore kako bi taj problem stavile pod kontrolu. Transferom nuklearne tehnologije u zemlje u razvoju kao što su Brazil, Kina, Indija, Koreja, Argentina i Južna Afrika značajno je povećana proizvodnja energije u tim zemljama, a taj trend transfera tehnologije se nastavlja i stvara dobru osnovu za daljnje korištenje nuklearne energije u budućnosti.

6 ZAKLJUČAK

Izazovi s kojima se suočavaju donositelji politika u energetske polju ogromni su. Zbog porasta broja stanovništva i globalne industrijalizacije postoji jasna potreba za novim proizvodnim kapacitetima električne energije širom svijeta. Nuklearna energija se uz „zelenu proizvodnju“ izdvaja kao jedno od mogućih rješenja problema rastuće potrebe čovječanstva za električnom energijom. Međutim, stavovi o nuklearnoj energiji i njezinoj primjeni u mirnodopske svrhe oduvijek su bili oprečni. Ako suprotstavimo glavne argumente koji govore u prilog dobivanju energije iz nuklearnih resursa (stabilan i pouzdan izvor električne energije, siguran izvor električne energije, mala emisija stakleničkih plinova, cijena proizvedene električne energije, dugoročno rješenje za opskrbu električnom energijom i slično) nasuprot argumentima koji zastupaju oportuno mišljenje (produkcija radioaktivnog otpada, percepcija javnosti, zbrinjavanje radioaktivnog otpada i slično), onda se svakako može zaključiti kako je dobivanje električne energije iz nuklearnih izvora povoljno rješenje, a kao najbolji pokazatelj su Francuska, SAD, Japan, ali i Kina, Južna Koreja i Indija te ostala rastuća gospodarstva.

Prema podacima Svjetske nuklearne asocijacije oko 11 posto svjetske električne energije proizvodi oko 450 nuklearnih reaktora, a oko 60 reaktora je još u izradi. Trinaest zemalja u 2018. godini proizvelo je najmanje jednu četvrtinu električne energije iz nuklearnih kapaciteta. Francuska dobiva oko tri četvrtine električne energije iz nuklearne energije;

⁸⁷ Nuklearna energija: Spas ili prijetnja planeti, dostupno na: <http://balkans.aljazeera.net/vijesti/nuklearna-energija-spas-ili-prijetnja-planeti> (pristupljeno 8. rujana 2019.)

Mađarska, Slovačka i Ukrajina dobivaju više od polovice nuklearne energije, Belgija, Švedska, Slovenija, Bugarska, Švicarska, Finska, Češka i Južna Koreja dobivaju više od 30 posto električne energije iz nuklearne energije te se očekuje da se i Japan približi navedenim zemljama u skoroj budućnosti, dok se u SAD-u, Velikoj Britaniji, Španjolskoj, Rumunjskoj i Rusiji oko petine električne energije dobiva se iz nuklearne energije.

Primarno se proizvodnja električne energije dobiva izgaranjem fosilnih goriva (65 posto). Unatoč snažnoj potpori i porastu povremenih obnovljivih izvora električne energije posljednjih godina, doprinos fosilnog goriva proizvodnji električne energije ostao je gotovo nepromijenjen. Međunarodni stručnjaci za energiju u svojim objavama ističu „scenarije održivog razvoja“ koji su u skladu s pružanjem čiste i pouzdane energije i smanjenjem onečišćenja zraka. Planom dekarbonizacije, proizvodnja električne energije iz nuklearne energije trebala bi se u narednih 30 godina povećati se za gotovo 90 posto. Ambiciozniji planovima se predlaže instalacija povećanih nuklearnih kapaciteta do 2050. godine, što bi se ostvarilo gradnjom novih i modernijih reaktora. Omogućavanje barem četvrtine svjetske električne energije iz nuklearnih elektrana, značajno bi smanjilo emisiju ugljičnog dioksida i imalo vrlo pozitivan učinak na kvalitetu zraka. U tom smislu svi navedeni podaci upućuju na činjenicu da se energetska budućnost neće moći planirati bez nuklearne energije. Međutim, analizirajući i druge svjetske elektroenergetske strategije s pogledom u budućnost, dolazimo do zaključka kako dobivanje električne energije iz nuklearnih resursa nije opće prihvaćeno nego će se veća pozornost posvetiti alternativnim izvorima (vjetar i sunce), postojećim hidro resursima pa čak i konvencionalnim izvorima.

Europske zemlje u svojim energetkim politikama planiraju smanjenje nuklearnih kapaciteta (Francuska), a pojedine države planiraju gašenje svih nuklearnih reaktora do polovice sljedećeg desetljeća (Njemačka). Postoje europske države koje su nažešći kritičari „nuklearne energije“ (Italija i Austrija).

Što se pak Hrvatske tiče, koja osim 50 postotnog udjela u Nuklearnoj elektrani Krško nema druge proizvodne nuklearne kapacitete, također vlada podijeljeno mišljenje. Većina stručnjaka podržava gradnju nuklearne elektrane opravdavajući je ekološki najčišćom energijom, ali i potrebom Hrvatske za većom energetskom autonomijom. Republika Hrvatska uvozi oko 50 posto električne energije i ti trendovi se prema budućim scenarijima neće mijenjati. Cijena uvezene „struje“ varira ovisno o odnosu ponude i potražnje, odnosno periodu nabave, a kreće se u rasponu od 35 i 90 €/MWh i ona je u većini slučajeva skuplja od „domaće“. Ako se u obzir uzme trošak izgradnje moderene nuklearne elektrane snage 1.200 MW (oko 5 milijardi eura) i njezin prosječni životni vijek (60 godina), cijena električne

energije iz nuklearnih kapaciteta (oko 35 eura) i cijena po kojoj uvozimo električnu energiju (oko 50 eura), dolazimo do zaključka da bi se gradnja takve nuklearne elektrane isplatila. Država koja je energetska ovisna kao RH i koja nema ozbiljnu i održivu strategiju razvoja po elektroenergetskom pitanju danas, nije u mogućnosti konkurirati postojećim razvijenim gospodarstvima u zapadnim zemljama, ali i gospodarstvima u tranziciji (npr. Rumunjska, Mađarska i Slovačka), ukoliko će biti ovisna o značajnijem uvozu električne energije. Stoga bi s obzirom na svjetske trendove, mišljenje stručnjaka i energetske izbora za Republiku Hrvatsku svakako trebalo u obzir uzeti mogućnost izgradnje nuklearne elektrane ili podržati prijedlog proširenja Nuklearne elektrane Krško, kao bi se smanjio rizik od ovisnosti po pitanju električne energije.

Konačni zaključak je da bi razvoj nuklearne energije mogao u budućnosti postati ključni dio održivih energetske mješavine pod uvjetom da vlade, industrija i civilno društvo rade zajedno kako bi utvrdili čvrst okvir za donošenje politike za sve mogućnosti koje će se ocjenjivati i razvijati u skladu s njihovim troškovima i dobrobiti za društvo. To uključuje multilateralnu suradnju kako bi se osiguralo da se tehnologija doista razvija prema najvišim standardima u područjima sigurnosti i pouzdanosti.

LITERATURA

1. Baker, P. J., Hoel, D. G. (2007) Meta-analysis of standardized incidence and mortality rates of childhood leukaemia in proximity to nuclear facilities. *European Journal of Cancer Care*, 16 (4), str. 355–363
2. Črnjar, M. (2002) *Ekonomika i politika zaštite okoliša*. Rijeka: Ekonomski fakultet Sveučilišta u Rijeci
3. Drljača, M. (2012) Koncept održivog razvoja i sustav upravljanja, Međunarodni skup Nedelja kvaliteta: Kvalitet i izvrsnost, 1 (1-2)
4. Feretić, D., Čavlina, N., Debrecin, N., Govedarica, V. (1995) *Nuklearne elektrane*. Zagreb: Školska knjiga
5. Gelo, T. (2018), Energetska tranzicija i novi model energetskeg tržišta, *Modeli razvoja hrvatskog gospodarstva*, Družić, G ; Družić, I, (ur.), Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti i Ekonomski fakultet, Zagreb, str. 395-425
6. Jakšić, F. (2015) *Nuklearne elektrane danas*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje: diplomski rad. Zagreb
7. Jaroš, T. (2015) *Nuklearne reakcije*, Osijek: Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku
8. Josipović, I. (2017) *Nove tehnologije nuklearnih termoelektrana*. Osijek: Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku: diplomski rad . Osijek
9. Knapp, V., Krejči, M., Lebegner, J. (2006) Prvih pola stoljeća komercijalnih nuklearnih elektrana, *Journal of Energy: Energija*, 55 (6)
10. Little, J., McLaughlin, J., Miller, A. (2008) Leukaemia in young children living in the vicinity of nuclear power plants, *International Journal of Cancer*, 122 (4)
11. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike (2016) *Energija u Hrvatskoj*. Zagreb
12. Mreža mlade generacije Hrvatskoga nuklearnoga društva (2013) *Proizvodnja električne energije: Prednosti i nedostaci postojećih tehnologija*. Zagreb: Tehnički muzej
13. OECD Nuclear Energy Agency and International Atomic Energy Agency (2006) *Uranium 2005: Resources, Production and Demand*. Paris: OECD
14. OECD Nuclear Energy Agency and International Energy Agency (2005) *Projected Costs of Generating Electricity: 2005 Update*. Paris: OECD
15. Saito, M. (2011) Japan anti-nuclear protesters rally after PM call to close plant
16. Spadaro, J.V. i sur. (2000) Greenhouse gas emissions of electricity generation chains: Assessing the difference, *IAEA Bulletin*, 42 (2)
17. Szekeres, I. (2012) Smijemo li nuklearne elektrane smatrati sigurnima

18. Šarić, A. (2016) Analiza isplativosti proizvodnje električne energije Osijek: Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku: diplomski rad . Osijek
19. Vember, V.V., Zhdanova, N.N. (2001) Peculiarities of linear growth of the melanin-containing fungi *Cladosporium sphaerospermum* Penz, And *Alternaria alternata*, *Mikrobiologichnyi Zhurnal*, 63 (3)
20. Društvo za oblikovanje održivog razvoja (2016) Analiza koristi i troškova TE Plomin C, Zagreb

POPIS SLIKA

Slika 1 Nuklearna reakcija fisije	10
Slika 2 Dijelovi nuklearnog reaktora	11
Slika 3: Montaža reaktorske zgrade Nuklearne elektrane Krško 1975. godine	37
Slika 4. Nuklearna elektrana Krško danas	38
Slika 5: Nivelirani troškovi proizvodnje električne energije“ u 2018. godini	54
Slika 6: LCOE u Europskoj uniji 2040	55
Slika 7: LCOE u SAD-u 2040. godine.....	55
Slika 8: LCOE u Japanu 2040. godine.....	56

POPIS TABLICA

Tablica 1: Operativni i dugotrajni zaustavni reaktori prema vrsti na dan 31. prosinca 2018. godine.....	12
Tablica 2: Broj operativnih reaktora, ukupna neto električna snaga i iskoristivost kapaciteta (u MW) na dan 31. prosinca 2019. godine	22
Tablica 3: Trend isporuke električne energije u svijetu u razdoblju od 1999. do 2018. godine	24
Tablica 4: Udio proizvedene električne energije iz nuklearnih elektrana po zemljama (%) u razdoblju od 2007. do 2017. i proizvodnja u milijunima kWh (2016. i 2107. godina)	27
Tablica 5: Vrijeme poluraspada glavnih zaostalih radioaktivnih izotopa (radionuklida).....	30
Tablica 6: Primjer troškova dekomisije nuklearne elektrane.....	33
Tablica 7: NEK, Izvještaj novčanih tijekova za 2018. godinu	48
Tablica 8. Životni vijek postrojenja prema tehnologiji proizvodnje u godinama.....	53

POPIS GRAFOVA

Graf 1: Proizvodnja električne energije iz nuklearnih izvora u svijetu po regijama u razdoblju od 1965. do 2018. godine.....	13
Graf 2: Ukupna opskrba primarnom energijom u svijetu po regijama u razdoblju od 1965. do 2018. godine.....	19
Graf 3: Potrošnja energije po stanovniku po regijama u razdoblju od 1965. do 2017. godine	20
Graf 4: Potrošnja energije u RH u razdoblju od 1988. do 2017. godine.....	21
Graf 5: Trend isporuke električne energije iz nuklearnih izvora u TWh i broj operativnih reaktora u razdoblju od 1999. do 2018. godine	23
Graf 6: Prosječno trajanje izgradnje nuklearnog reaktora u razdoblju od 1981. do 2017. godine.....	25
Graf 7: Mjesečna proizvodnja električne energije u NEK u 2018. godini.....	40
Graf 8: Godišnja proizvodnja električne energije u NEK u razdoblju od 1983. do 2018. godine.....	41
Graf 9: Poslovni prihodi NEK-a u razdoblju od 2006. do 2018. godine	41
Graf 10: Cijena isporučene električne energije u NEK u eurima po MWh u razdoblju od 2006. do 2018. godine.....	42
Graf 11: Udio uvoza električne energije u odnosu na domaću proizvodnju 2013. i 2017. godine.....	45
Graf 12: Ukupna proizvodnja električne energije prema izvoru u razdoblju od 2006. do 2018*. godine.....	46
Graf 13: Udio proizvodnje električne energije iz NEK-a za ukupne potrebe RH za razdoblje od 2006. do 2017. godine (%).....	47
Graf 14: Kumulativni prikaz izbjegnute emisije CO ₂ u svijetu za razdoblje od 1975. do 2018. godine.....	52
Graf 15: Trokovi prije izgrađenih nuklearnih elektrana, nedavno završenih, operativnih ili u izradi, u odabranim državama.....	54
Graf 16: Operativni kapaciteti nuklearne energije u razvijenim gospodarstvima u slučaju odustajanja za razdoblje od 2018. do 2040. godine	56
Graf 17: Scenarij održivog razvoja sa i bez proizvodnje električne energije iz nuklearnih kapaciteta za razdoblje od 2019. do 2040. godine	57
Graf 18: Struktura proizvodnih kapaciteta obnovljivih izvora energije u RH u razdoblju od 2008. do 2017. godine*	58

Graf 19: Snaga elektrana po izvoru energije u RH za razdoblje od 2017. do 2050. godine (S1)	59
Graf 20: Snaga elektrana po izvoru energije u RH za razdoblje od 2017. do 2050. godine (S2)	59
Graf 21: Ukupne investicije u RH u elektrane, spremnike i dizalice topline za razdoblje od 2020. do 2050. godine.....	60
Graf 22: Projekcije cijena emisija stakleničkih plinova u ETS sustavu, do 2050. godine	61
Graf 23: Zalihe urana po zemljama u 2017. godini	64

KORIŠTENE INTERNET STRANICE

- <http://www.brc.gov>
- <http://www.enciklopedija.hr>
- <http://www.energetika-net.com>
- <http://www.europarl.europa.eu>
- <http://www.fzoeu.hr/hr>
- <http://www.nemis.hr>
- <http://www.novilist.hr>
- <http://www.world-nuclear.org>
- <https://pris.iaea.org>
- <https://whatisnuclear.com>
- <https://www.cancer.gov>
- <https://www.cdc.gov>
- <https://www.economist.com>
- <https://www.iea.org>
- <https://www.izvorienergije.com>
- <https://www.nek.si/hr>
- <https://www.oecd-nea.org>
- <https://repozitorij.vuka.hr>
- <http://balkans.aljazeera.net>