

UNIVERZA V LJUBLJANI
EKONOMSKA FAKULTETA

MAGISTRSKO DELO

**ANALIZA PROIZVODNJE ELEKTRIKE IZ JEDRSKEGA GORIVA
IN PRIHODNJA PERSPEKTIVA V SLOVENIJI IN V SVETU**

Ljubljana, februar 2020

JERNEJ RIHAR

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani Jernej Rihar, študent Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani, avtor predloženega dela z naslovom Analiza proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva in prihodnja perspektiva v Sloveniji in v svetu, pripravljene v sodelovanju s svetovalko red. prof. dr. Nevenko Hrovatin

IZJAVLJAM

1. da sem predloženo delo pripravil samostojno;
2. da je tiskana oblika predloženega dela istovetna njegovi elektronski obliki;
3. da je besedilo predloženega dela jezikovno korektno in tehnično pripravljeno v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih nalog Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani, kar pomeni, da sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev oziroma avtoric, ki jih uporabljam oziroma navajam v besedilu, citirana oziroma povzeta v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih nalog Ekonomske fakultete Univerze v Ljubljani;
4. da se zavedam, da je plagiatstvo – predstavljanje tujih del (v pisni ali grafični obliki) kot mojih lastnih – kaznivo po Kazenskem zakoniku Republike Slovenije;
5. da se zavedam posledic, ki bi jih na osnovi predloženega dela dokazano plagiatstvo lahko predstavljalo za moj status na Ekonomski fakulteti Univerze v Ljubljani v skladu z relevantnim pravilnikom;
6. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v predloženem delu in jih v njem jasno označil;
7. da sem pri pripravi predloženega dela ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
8. da soglašam, da se elektronska oblika predloženega dela uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
9. da na Univerzo v Ljubljani neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve predloženega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja predloženega dela na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija Univerze v Ljubljani;
10. da hkrati z objavo predloženega dela dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v njem in v tej izjavi.

V Ljubljani, dne 10. 2. 2020

Podpis študenta: Jernej Rihar

KAZALO

UVOD	1
1 PREGLED PROIZVODNIH VIROV ELEKTRIKE Z NJIHOVIMI ZNAČILNOSTMI, PREDNOSTMI IN SLABOSTMI.....	4
1.1 Kratka zgodovina elektrike	4
1.2 Proizvodnja elektrike	5
1.2.1 Proizvodnja elektrike iz izgorevanja fosilnih goriv	7
1.2.2 Proizvodnja elektrike iz vodnih virov oz. hidroenergije.....	8
1.2.3 Proizvodnja elektrike iz vetrne in sončne energije.....	9
1.2.4 Proizvodnja elektrike iz drugih obnovljivih virov.....	10
1.2.5 Proizvodni viri elektrike v razvoju	11
1.3 Primerjava proizvodnih virov elektrike z vidika elektroenergetskega sistema.....	12
2 PROIZVODNJA ELEKTRIKE IZ JEDRSKEGA GORIVA.....	14
2.1 Zgodovina proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva.....	14
2.2 Trenutno stanje proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji in v svetu.....	16
2.3 Ekonomska analiza proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva.....	19
2.3.1 Ekonomska primerjava stroškov proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva in drugih proizvodnih virov.....	19
2.3.2 Občutljivost cen jedrskega goriva	21
2.3.3 Ekonomska problematika odlaganja jedrskih odpadkov	22
2.3.4 Stroški razgradnje jedrskih elektrarn.....	24
2.4 Varnostni, okoljevarstveni in javnomnenjski vidik proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva.....	25
2.4.1 Mednarodni jedrski varnostni standardi.....	25
2.4.2 Varnostni vidik proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva.....	26
2.4.3 Problematika uporabe jedrske tehnologije v vojaške namene	27
2.4.4 Okoljevarstveni vidik proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva.....	28
2.4.5 Vladne politike glede proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva	30
2.4.6 Javno mnenje in jedrske elektrarne	30
2.5 Posebnosti trgovanja z elektriko iz jedrskega goriva v elektroenergetskem sistemu.....	33
2.6 Pregled značilnosti proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva in pregled SWOT analize	35
3 PERSPEKTIVA PROIZVODNJE ELEKTRIKE IZ JEDRSKEGA GORIVA	37
3.1 Gibanje porabe elektrike	37
3.1.1 Trenutno stanje porabe elektrike v svetu in Sloveniji.....	37
3.1.2 Nekateri izzivi pri ugotavljanju rasti porabe elektrike.....	39
3.2 Odnos politike in javnosti do proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva.....	40

3.2.1 Stanje in projekcije proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v razvitih državah	40
3.2.2 Stanje in projekcije proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v državah v razvoju	42
3.2.3 Stanje in projekcije proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji	43
3.3 Pričakovana perspektiva proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva po svetu	43
3.4 Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji	46
3.4.1 Posebnosti proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji	46
3.4.2 Pričakovana perspektiva proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji	46
3.5 Prihodnji izzivi proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva	47
SKLEP	48
LITERATURA IN VIRI	51

KAZALO TABEL

Tabela 1: Delež proizvodnje elektrike glede na vir	5
Tabela 2: Faktorji zmogljivosti za različne vrste elektrarn	13
Tabela 3: Države z največjimi deleži proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v letu 2018	17
Tabela 4: LCOE za nekatere vrste elektrarn v ZDA z začetkom obratovanja v letu 2023 .	20
Tabela 5: Preglednica energentov z energijskimi vrednostmi	21
Tabela 6: Površina zemljišča v km ² , ki ga za proizvodnjo 1 TWh elektrike potrebuje posamezna vrsta elektrarne	29
Tabela 7: Odnos do jedrske energije pred nesrečo v JE Fukušima Daiči in po njej	33
Tabela 8: SWOT analiza proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva	37

KAZALO SLIK

Slika 1: Jedrska tehnologija na Gartnerjevi krivulji posvajanja novih tehnologij	2
Slika 2: Število delujočih jedrskih reaktorjev po svetu v letih 1954–2019	15
Slika 3: Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v TWh po svetu v letih 1970–2017	15
Slika 4: Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v TWh v letu 2017	16
Slika 5: Pričakovani razpon LCOE za različne vrste elektrarn za pokrivanje osnovne obremenitve za elektrarne z začetkom obratovanja v letu 2020	19
Slika 6: Odvisnost LCOE od cene goriva elektrarn za pokrivanje osnovne obremenitve, pri 7-odstotni diskontni stopnji	22
Slika 7: Odnos do elektrike iz jedrskega goriva v evropskih državah leta 2009	32
Slika 8: Cena kuponov EU ETS na borzi EEX od leta 2013 do 2019	35

Slika 9: Poraba elektrike v svetu od 1990 do 2018 v TWh.....	38
Slika 10: Poraba elektrike v Sloveniji od leta 1990 do 2018	39
Slika 11: Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji pri treh scenarijih v letih 1990–2060.....	47

SEZNAM KRATIC

angl.	– angleško
EU	– Evropska unija
EU ETS	– (angl. Emissions Trading System); Sistem EU trgovanja s pravicami do emisij toplogrednih plinov
EURATOM	– Evropska skupnost za atomsko energijo
IAEA	– (angl. International Atomic Energy Agency); Mednarodna agencija za jedrsko energijo
IEA	– (angl. International Energy Agency); Mednarodna agencija za energijo
LCOE	– (angl. Levelized cost per unit of output); povprečna diskontirana lastna cena na enoto proizvodnje
NEK	– Nuklearna elektrarna Krško
PPA	– (angl. power purchase agreement); dogovor o nakupu elektrike
ZDA	– Združene države Amerike

UVOD

Odkar so se v zadnji četrtini 19. stoletja pojavile prve komercialne elektrarne v Združenem kraljestvu in kmalu zatem v Združenih državah Amerike (v nadaljevanju ZDA), še posebej pa po odkritju izmeničnega električnega toka, s katerim so se bistveno zmanjšale izgube energije na daljnovodih, se je uporaba elektrike hitro in nezadržno širila po vsem svetu. V letu 2015 je končna poraba elektrike v svetovnem merilu znašala 24.255 TWh, kar je skoraj štirikrat več kot leta 1973, ko je znašala 6131 TWh (IEA, 2018a, str. 30). Ameriška vladna agencija U.S. Energy Information Administration (U.S. EIA, 2019a) je v svoji publikaciji denimo navedla, da je bila poraba elektrike v ZDA v letu 2018 kar šestnajstkrat večja kot leta 1950.

V letu 2015 je sicer delež porabljene elektrike glede na druge oblike energije v svetovnem merilu znašal okoli 18,5 % in se v zadnjih letih ni bistveno spreminjal (IEA, 2018a, str. 34).

Naraščajoči porabi elektrike sledi tudi naraščajoča ponudba. Za proizvodnjo elektrike so sprva uporabljali predvsem vodno energijo in premog, z leti pa so se zaradi naraščajočih potreb po elektriki iskali tudi drugi viri, še posebej zavzeto v zadnjih desetletjih, ko se je zaradi naraščajoče skrbi za okolje v razvitih državah začela omejevatí uporaba fosilnih goriv.

Jedrsko gorivo, točneje energija, ki nastaja pri razpadanju atomskih jeder urana in plutonija, se je za proizvodnjo elektrike začela uporabljati v 50. letih prejšnjega stoletja, sprva eksperimentalno, od sredine 50. let naprej pa tudi komercialno. Jedrske reaktorje za proizvodnjo elektrike so najprej začele graditi vojaške jedrske sile, kasneje pa se je praksa razširila tudi v druge države. Po skromnih začetkih v 60. letih prejšnjega stoletja je proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva sprva naglo, nato pa nekoliko počasneje naraščala, dokler ni leta 2006 dosegla vrha (World Nuclear Association, 2019a). Tega leta so jedrski reaktorji po svetu proizvedli rekordnih 2661 TWh elektrike, po tem letu je svetovna proizvodnja padala do leta 2012, ko je spet začela počasi naraščati do 2498 TWh leta 2017 (IAEA PRIS, 2019), kar predstavlja dobrih 10 % proizvedene in porabljene elektrike.

Slovenija (Jugoslavija) se je pridružila jedrskemu klubu leta 1981, ko je bila v električno omrežje povezana Nuklearna elektrarna Krško (v nadaljevanju NEK) v Vrbini pri Krškem. Od leta 1983, ko je NEK začela komercialno tržiti elektriko, je njena proizvodnja narastla iz 3,72 TWh (NEK, 2018a) na 5,97 TWh leta 2017 (NEK, 2018b, str. 10). V zadnjih letih se proizvodni delež NEK giblje okoli 40 % proizvedene elektrike v Sloveniji, v letu 2017 je ta delež denimo znašal 38,5 % (Vlada RS, 2019, str. 25). Glede na polovično lastništvo NEK to pomeni, da je v Sloveniji delež proizvedene elektrike iz jedrskega goriva nekaj manj kot 20-odstoten. Visok relativni delež nas uvršča med 15 držav z največjim deležem elektrike, proizvedene iz jedrskega goriva (Nuclear Energy Institute, 2019). Operativna doba delovanja NEK je bila leta 2015 podaljšana za 20 let z leta 2023 na leto 2043, zato vprašanje glede nadaljnje usode elektrike iz jedrskega goriva za Slovenijo sicer ni zelo pereče, a v obdobju naslednjega desetletja vendarle potrebuje odgovor.

Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva po svetu se je znašla na razpotju. Po navdušenju in hitrem širjenju v 60., 70. in 80. letih prejšnjega stoletja se je zaradi ekonomskih razlogov, pa tudi po zaslugi odmevnih nesreč v jedrskih elektrarnah v ZDA in Sovjetski zvezi ter problema z odlaganjem radioaktivnih odpadkov, v 90. letih znašla v politični nemilosti (World Nuclear Association, 2019a). Vendar pa se je kasneje izkazalo, da so drugi energetski viri za proizvodnjo elektrike bodisi okoljevarstveno vprašljivi (fosilna goriva) bodisi dragi in nezanesljivi (obnovljivi viri), pričakovani povsem novi viri elektrike (na primer jedrska fuzija) pa še v razvojni fazi in še lep čas nedosegljivi, zato v zadnjih letih elektrika iz jedrskega goriva počasi spet pridobiva veljavo, predvsem v novih projektih v državah v razvoju. Lahko bi rekli, da se elektrika iz jedrskega goriva po vrhuncu napihnjenih pričakovanj v drugi polovici 20. stoletja in globeli razočaranja v začetku tega stoletja trenutno nahaja na vzponu razsvetljenja na Gartnerjevi krivulji posvajanja novih tehnologij, kar je razvidno iz slike 1.

Slika 1: Jedrska tehnologija na Gartnerjevi krivulji posvajanja novih tehnologij



Vir: Gartner Hype Cycle, 2019

V magistrskem delu bomo poskušali pokazati, kakšen je, glede na trenutno stanje po svetu, najverjetnejši scenarij uporabe elektrike iz jedrskega goriva v naslednjih desetletjih, torej v času, ko še ne pričakujemo izrazitih razvojnih prebojev novih tehnologij. Analiza stanja in prihodnost tega tehnološkega področja sta nedvomno zanimiva tudi za Slovenijo, ki po deležu proizvodnje in porabe elektrike iz jedrskega goriva sodi v svetovni vrh.

Namen magistrskega dela je prikazati možne scenarije gibanja proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v naslednjih nekaj desetletjih in izpostaviti najverjetnejšega od njih. Cilji magistrskega dela so pregled trenutnega stanja proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva, umestitev te proizvodnje v širši kontekst elektroenergetskih sistemov in konkurenčnih

proizvodnih virov, analiza značilnosti proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva, proučitev družbenih, okoljevarstvenih in varnostnih vidikov proizvodnje ter ovrednotenje različnih scenarijev prihodnje perspektive. Omejitve magistrskega dela so inovativna odkritja in posledične revolucionarne spremembe na področju energetike.

Za doseg ciljev bomo v magistrskem delu preverili naslednja raziskovalna vprašanja:

RV1: Kako je proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva umeščena v celotno proizvodnjo elektrike in v elektroenergetski sistem?

RV2: Katere so ključne prednosti in slabosti proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva glede na druge proizvodne vire?

RV3: Kakšno je trenutno stanje elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji in v svetu ter kakšne so obstoječe projekcije v posameznih državah?

RV4: Kakšen je najverjetnejši prihodnji scenarij razvoja proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji in v svetu?

Magistrsko delo sestavljajo tri poglavja, ki so razdeljena na več podpoglavij. V prvem poglavju je na kratko orisan pregled proizvodnje elektrike iz različnih virov. Nadaljnja razdelitev prvega poglavja je sledeča: V prvem podpoglavju je orisana zgodovina odkrivanja pojava elektrike in njene proizvodnje, v drugem je prikazana kategorična porazdelitev elektrarn, porazdelitev proizvodnje elektrike po različnih proizvodnih virih in pregled njihovih deležev v celotni proizvodnji, v tretjem podpoglavju pa je prikazana primerjalna analiza proizvodnih virov z vidika elektroenergetskega sistema.

Drugo poglavje vsebuje pregled zgodovine in analizo trenutnega stanja proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva. Poglavje je razdeljeno na naslednja podpoglavja: V prvem je opisana zgodovina proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva, drugo opisuje trenutno stanje proizvodnje po posameznih pomembnejših državah. Tretje podpoglavje vsebuje ekonomsko analizo proizvodnje z vidika stroškov delovanja, stroškov razgradnje, občutljivosti cen goriva in problematike jedrskih odpadkov. Četrto podpoglavje vsebuje družbeno, okoljevarstveno in varnostno analizo proizvodnje, peto podpoglavje navaja posebnosti proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva z vidika elektroenergetskega sistema, šesto podpoglavje opisuje glavne značilnosti proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva in povzema ugotovitve v obliki SWOT analize.

V tretjem poglavju je prikazano pričakovano gibanje porabe elektrike po svetu, perspektiva proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva pri zadovoljevanju te porabe in projekcije proizvodnje po posameznih pomembnejših državah. V prvem podpoglavju je opisano gibanje porabe elektrike v svetu in Sloveniji, v drugem podpoglavju je opisan odnos politike in javnosti do elektrike iz jedrskega goriva, trenutno stanje in projekcije v razvitih državah ter državah v razvoju, v tretjem podpoglavju je opisana perspektiva proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v svetu, v četrtem podpoglavju so opisane posebnosti in perspektiva

proizvodnje v Sloveniji, v petem podpoglavju pa sledijo prihodnji izzivi proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva.

1 PREGLED PROIZVODNIH VIROV ELEKTRIKE Z NJIHOVIMI ZNAČILNOSTMI, PREDNOSTMI IN SLABOSTMI

1.1 Kratka zgodovina elektrike

Elektrika je fizikalni pojav, ki ga povzroči prisotnost (statična elektrika) ali gibanje (električni tok) delcev z električnim nabojem. S pojavom elektrike se je človeštvo seznanilo že v davni preteklosti, ko so tako ali drugače prišli v stik z živalmi, ki so bile sposobne proizvesti električne sunke. Antični Grki so opazovali pojav statične elektrike, ko so opisovali učinke, ki so nastali z drgnjenjem jantarjevih palic ob krzno (Žniderič, 2017, str. 5). Fenomen je bil očitno zanimiv tudi širše, saj so leta 1938 blizu Bagdada odkrili več lončenih posod iz časa približno 200 pr. n. št., za katere domnevajo, da bi lahko bile najstarejše znane električne baterije (BBC, 2003).

Vendar pa so se fenomena resno znanstveno lotili šele v času renesanse, ko je angleški fizik William Gilbert v svojem, leta 1603 izdanem delu *De Magnete*, ločil učinke magnetizma od učinkov statične elektrike in je novo odkriti fenomen poimenoval z besedo elektrika, po grški besedi za jantar, elektron (Žniderič, 2017, str. 8). V 17. in 18. stoletju se je s statično elektriko ukvarjalo mnogo znanstvenikov, a vendar je šele v začetku 19. stoletja, ko sta danski fizik Hans Christian Ørsted in francoski fizik André-Marie Ampère odkrila in opredelila elektromagnetno polje ter s tem postavila temelje elektrodinamike, ta fizikalni fenomen postal zanimiv tudi za tehnološko uporabo.

Serija teoretičnih odkritij, izumov in inovacij na področju elektrotehnike v 18. stoletju je kmalu privedla do potrebe po stalni, zanesljivi in cenovno učinkoviti dobavi elektrike za različne potrebe, od osvetljave in ogrevanja do poganjanja elektromotorjev. Napajanje iz dragih, težkih in nezanesljivih baterij je bilo videti neperspektivno, zato so se kmalu po izumu dinamoa, naprave, ki iz krožnega gibanja ustvarja električni tok, pojavili prvi generatorji električnega toka. Prvi znani industrijski električni generator je bil tako leta 1844 postavljen v londonski tovarni Elkington Silver Electroplating Works za potrebe galvanizacije (Žniderič, 2017, str. 34).

Uporaba elektrotehničnih naprav se je v drugi polovici 18. stoletja naglo širila na vseh področjih, čemur industrijski električni generatorji niso več mogli slediti, zato je januarja leta 1882 v Londonu začela obratovati prva komercialna termoelektrarna na premog, zgrajena po načrtih ameriškega izumitelja Thomasa Alve Edisona (Harris, 1982), septembra istega leta pa ji je sledila podobna termoelektrarna v New Yorku, ki jo je zgradilo Edisonovo podjetje (Žniderič, 2017, str. 49).

Vendar pa je imel enosmerni tok, ki so ga proizvajale elektrarne, zgrajene po Edisonovih načrtih, veliko slabost, namreč izjemno velike izgube na daljnovodih, zaradi česar so bili ti omejeni na največ kilometer ali dva dolžine, kar je praktično onemogočalo njegovo širšo uporabo. Teoretična opredelitev elektromagnetne indukcije škotskega matematika Jamesa Clerka Maxwella in bistvene tehnološke izboljšave na transformatorjih so pokazale prednosti izmeničnega električnega toka in omogočile ameriškemu industrialcu Georgeu Westinghousu, da je leta 1886 v mestu Great Barrington v ameriški zvezni državi Massachusetts postavil prvi električni in distribucijski sistem za izmenični tok. Izgube na Westinghousovem petkilometrskem daljnovodnem sistemu so bile po pričakovanju praktično zanemarljive (Žniderič, 2017, str. 53–54). Po kratkem in srditem, včasih celo bizarnem dvoboju med protagonistoma obeh tehnologij, je tudi po zaslugi izumov srbskega izumitelja Nikola Tesla že v 90. letih 19. stoletja prevladala tehnološko naprednejša in ekonomsko učinkovitejša tehnologija izmeničnega toka.

1.2 Proizvodnja elektrike

Industrijske velesile na obeh straneh Atlantika so kmalu prevzele in standardizirale novo tehnologijo in v začetku 20. stoletja se je začela uporaba elektrike v industriji, javnih storitvah in po domovih nezadržno širiti. Države, javne institucije ter zasebniki so začeli graditi elektrarne, ki so zagotavljale zadosti veliko proizvodnjo elektrike za naglo rastoče število uporabnikov. V zadnjih dobrih sto letih so se elektrarne nenehno širile po velikosti, zmogljivosti in namembnosti, hkrati pa tudi tehnološko razvijale in diverzificirale.

Stanje svetovne proizvodnje elektrike v letu 2017 navaja Mednarodna agencija za energijo (angl. International Energy Agency; v nadaljevanju IEA) v svojem letnem poročilu, z naslednjimi viri in deleži, prikazanimi v tabeli 1 (IEA, 2018b, str. 528).

Tabela prikazuje deleže v svetovni proizvodnji elektrike glede na vir. Razberemo lahko, da v proizvodnji elektrike po svetu prevladujejo termoelektrarne, saj tri od štirih vrst elektrarn z največjimi deleži delujejo na podlagi termalnega načina pogona. Kot proizvodni vir elektrike še vedno prevladuje premog, proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva je z nekaj več kot 10 % na četrtem mestu.

Tabela 1: Delež proizvodnje elektrike glede na vir

Vir	Delež (v %)
Premog	38,39
Plin	22,80
Vodna energija	16,00
Jedrsko gorivo	10,27
Veter	4,23
Nafta	3,66

se nadaljuje

Tabela 1: Delež proizvodnje elektrike glede na vir (nad.)

<i>Vir</i>	<i>Delež (v %)</i>
Bioenergija	2,43
Sončna energija	1,73
Drugi obnovljivi viri	0,34
Drugo	0,15

Vir: IEA, 2018b, str. 528

V literaturi ni enotnega načina razvrščanja elektrarn v kategorije. Za potrebe tega dela jih bomo razvrstili po naslednjih kategorijah:

- po načinu pogona,
- po viru pogona,
- po obsegu uporabe in
- po načinu proizvodnje.

Po načinu pogona jih razvrščamo na:

- termoelektrarne,
- hidroelektrarne in
- elektrarne, ki izkoriščajo alternativne vire energije.

Po viru pogona jih razvrščamo na:

- elektrarne na obnovljive vire,
- elektrarne na neobnovljive vire in
- elektrarne za shranjevanje energije.

Po obsegu uporabe jih razvrščamo na:

- mini elektrarne,
- industrijske elektrarne,
- regijske elektrarne in
- meddržavne elektrarne.

Po načinu proizvodnje jih razvrščamo na:

- elektrarne za pokrivanje osnovne obremenitve (»obratovanje v pasu«),
- elektrarne z variabilno proizvodnjo glede na potrebe,
- elektrarne za pokrivanje konic in
- elektrarne s kratkoročno nepredvidljivo proizvodnjo.

Termoelektrarne nadalje razvrščamo na:

- elektrarne na neobnovljive vire:
 - elektrarne na fosilna goriva in
 - jedrske elektrarne;
- elektrarne na obnovljive vire:
 - geotermalne elektrarne,
 - elektrarne na biomaso,
 - sončne visokotemperaturne elektrarne idr.

Elektrarne na obnovljive vire razvrščamo na:

- hidroelektrarne,
- vetrne elektrarne,
- sončne elektrarne,
- geotermalne elektrarne,
- elektrarne na biomaso,
- morske elektrarne idr.

V nadaljevanju bodo podrobneje prikazane glavne značilnosti nekaterih najpomembnejših načinov proizvodnje elektrike.

1.2.1 Proizvodnja elektrike iz izgorevanja fosilnih goriv

Termoelektrarne na fosilna goriva so poleg hidroelektrarn najstarejša vrsta pogonov za pridobivanje elektrike, ki se komercialno uporablja že od leta 1882. V termoelektrarnah izgorevajo fosilna goriva, nastala toplotna energija pa proizvaja paro, ki vrti turbine, te pa poganjajo generatorje za proizvodnjo elektrike. Termoelektrarne so sprva za proizvodnjo elektrike uporabljale le premog, kasneje z razvojem tehnologije pa še nafto in zemeljski plin.

Termoelektrarne na fosilna goriva imajo izjemen razpon v zmogljivosti in se lahko uporabljajo bodisi kot mini elektrarne bodisi kot industrijske ali regijske elektrarne. Po tehnoloških značilnostih termoelektrarne na fosilna goriva spadajo med elektrarne na neobnovljive vire z visoko ravni emisij toplogrednih plinov, namenjene pa so lahko pokrivanju osnovne obremenitve, variabilni proizvodnji ali pokrivanju porabe v konicah.

Zaradi izjemne prilagodljivosti, preproste tehnologije, relativno visokih energetskih vrednosti fosilnih goriv in njihove razširjenosti so termoelektrarne na fosilna goriva najbolj razširjena vrsta elektrarn po svetu. V termoelektrarnah je bilo v letu 2017 po svetu proizvedeno več kot 64,8 % električne energije, večino od tega v termoelektrarnah na premog (IEA, 2018b, str. 528), v Sloveniji pa v istem letu okoli 34,4 % električne energije (Vlada RS, 2019, str. 25). Premog kot najpogostejše fosilno gorivo najdemo v skoraj vseh državah sveta, po trenutnih ocenah je po svetu še okoli 11.000 milijard ton zaloga premoga,

kar bi pri današnji porabi zadostovalo še za vsaj 150 let, medtem ko je odkritih zalog nafte in zemeljskega plina še za vsaj 50 let porabe (World Coal Association, brez datuma). Te količine vsako leto rastejo z novo odkritimi zalogami, ki se še dodatno povečujejo z razvojem novih tehnologij pridobivanja fosilnih goriv.

V zadnjih desetletjih so se termoelektrarne na fosilna goriva, predvsem premogovne, znašle na udaru javnosti in vlad zaradi negativnih okoljskih eksternalij, predvsem v obliki toplogrednih plinov in prašnih delcev. Različne organizacije in posamezniki zato priporočajo bodisi opuščanje uporabe premoga (Greenpeace & Climate Action Network Europe, 2015, str. 2) bodisi njegovo zamenjavo z zemeljskim plinom (Wilson & Staffell, 2018, str. 2, 10–11). Mnoge države so tako pričele z opuščanjem termoelektrarn na fosilna goriva, nemška vlada se je tako na primer zavezala k njihovem zaprtju do leta 2038 (Wacket, 2019), vlada Združenega kraljestva pa za nadomeščanje premoga v termoelektrarnah z zemeljskim plinom do leta 2025 (Gosden, 2015).

1.2.2 Proizvodnja elektrike iz vodnih virov oz. hidroenergije

Hidroelektrarne se tako kot termoelektrarne na premog za komercialno proizvodnjo elektrike uporabljajo že od osemdesetih let 19. stoletja dalje. Hidroelektrarne izkoriščajo potencialno energijo rek s stabilnim pretokom, ki poganja turbine in generatorje za proizvodnjo elektrike. Hidroelektrarne se v grobem delijo na pretočne, ki neposredno izkoriščajo pretočni potencial reke, in akumulacijske, ki izkoriščajo potencialno energijo akumulirane vode v jezeru. Posebna vrsta akumulacijskih vodnih elektrarn so črpalne elektrarne (v Sloveniji HE Avče), ki ob nizkih cenah elektrike (na primer ponoči) črpajo vodo v višje ležeče jezero, ob visokih cenah pa proizvajajo elektriko in s tem predstavljajo za zdaj najbolj učinkoviti način shranjevanja elektrike (Rožman, 2012, str. 64–67).

Hidroelektrarne imajo, tako kot termoelektrarne, izjemen razpon zmogljivosti in lahko po velikosti segajo od mini elektrarn do meddržavnih, kakršna je denimo elektrarna na reki Parana med Brazilijo in Paragvajem. Hidroelektrarne torej spadajo med elektrarne na obnovljive vire za obratovanje v pasu ali za pokrivanje potreb v konicah.

Zaradi velike prilagodljivosti, nizkih obratovalnih stroškov, dolge življenjske dobe, preproste tehnologije in nizkih emisij toplogrednih plinov so hidroelektrarne zelo razširjene in v njih je bilo na svetovni ravni v letu 2017 proizvedeno 16 % (IEA, 2018b, str. 528), v Sloveniji pa v istem letu 25,4 % elektrike (Vlada RS, 2019, str. 25). Po oceni IEA (2010) je izkoristek hidroenergetskega potenciala v svetovnem merilu v povprečju okoli 20-odstoten, vendar pa je precej držav, ki so svoj hidroenergetski potencial skoraj v celoti že izkoristile.

Kljub temu da hidroelektrarne v širši javnosti na splošno veljajo za okolju prijazne, obstajajo tudi študije, ki temu mnenju nasprotujejo, pri čemer navajajo različne negativne okoljske dejavnike, kot na primer velike posege v okolje, spremembo ravni podtalnice in lokalnega podnebja ali povečano izločanje metana zaradi umetnih akumulacijskih jezer (Rožman,

2012, str. 140; Weiser, 2016). Kljub tem pomislekom pa ostajajo hidroelektrarne eden bistvenih gradnikov prehoda v nizkoogljico družbo, kot ga vidijo vlade in nevladne organizacije po svetu.

1.2.3 Proizvodnja elektrike iz vetrne in sončne energije

Vetrna in sončna energija sta se začeli uporabljati za proizvodnjo elektrike konec prejšnjega stoletja, intenzivneje pa po letu 2000. Vetrne elektrarne izkoriščajo kinetično energijo vetra za pogon električnih generatorjev in se med sabo v glavnem razlikujejo le po vrsti rotorja (Rožman, 2012, str. 76). Sončne elektrarne se delijo na visokotemperaturne sisteme, pri katerih toplotna energija sonca ogreva paro, ki poganja turbino z generatorjem, tako kot pri drugih termoelektrarnah, in fotonapetostne sisteme, ki pretvarjajo silo svetlobnih fotonov neposredno v elektriko (Rožman, 2012, str. 84–86).

Vetrne in sončne elektrarne spadajo med elektrarne na obnovljive vire s kratkoročno nepredvidljivo proizvodnjo z velikostmi od mini do regijskih elektrarn. Moč vetra je na kopnem in priobalnem morju ocenjena na 72 TW, kar petkratno presega trenutno potrebo človeštva po energiji, tudi energija sonca presega trenutne energijske potrebe človeštva (Rožman, 2012, str. 74, 83). Vetrne in sončne elektrarne med svojim delovanjem tako rekoč ne izpuščajo toplogrednih plinov, zato se v zadnjih desetletjih po svetu izjemno hitro širijo, tako da je bilo v letu 2017 v teh elektrarnah po svetu proizvedeno okoli 6 % elektrike v primerjavi z le 0,2 % v letu 2000 (IEA, 2018b, str. 528). V Sloveniji je bil delež elektrike iz teh dveh virov v letu 2017 okoli 1,7-odstoten (Vlada RS, 2019, str. 25).

Največja problema vetrnih in sončnih elektrarn sta nezanesljiva in variabilna proizvodnja zaradi narave vira (von Selasinsky, 2016, str. 7–8) ter lastna cena proizvedene elektrike. Kljub visokim državnim subvencijam, ki so pripomogle k hitremu razvoju tehnologije, so stroški proizvodnje elektrike iz teh virov, razen iz kopenskih vetrnih elektrarn, še vedno relativno visoki, tako da se je povprečna diskontirana lastna cena na enoto proizvodnje (angl. Levelized cost per unit of output; v nadaljevanju LCOE) v razvitem svetu šele v zadnjih letih spustila proti 100 USD/MWh in nekoliko nižje na Kitajskem (IEA, 2018b, str. 296), kar pa je še vedno višje od drugih virov elektrike.

Subvencije pa imajo tudi negativen učinek, saj preko davčnih mehanizmov obremenjujejo predvsem manj premožna gospodinjstva (Böhringer, Landis & Reaños, 2017, str. 189, 191), zato se v zadnjem času tudi investitorji v sočne in vetrne elektrarne čedalje bolj usmerjajo v delovanje na konkurenčnem trgu, brez državnih subvencij. To pomeni iskanje novih načinov dolgoročnega financiranja projektov, kakršen je na primer čedalje popularnejši dolgoročni dogovor o nakupu elektrike (angl. power purchase agreement; v nadaljevanju PPA) (Ernst & Young, 2019).

1.2.4 Proizvodnja elektrike iz drugih obnovljivih virov

Med druge obnovljive vire za proizvodnjo elektrike štejemo naslednje vrste virov (Rožman, 2012, str. 91, 96, 101):

- biomasa,
- geotermalna energija in
- energija morja.

V svetovnem merilu se je v letu 2017 iz biomase pridobilo okoli 2,4 % vse elektrike, iz vseh drugih obnovljivih virov, brez vetrne in sončne, pa okoli 2,8 % (IEA, 2018b, str. 528). V Sloveniji je delež proizvodnje elektrike iz drugih obnovljivih virov zanemarljiv. Kljub relativno majhnemu deležu pa v nekaterih državah ti viri že pomembno dopolnjujejo državni energetskega portfelja.

Biomasa je naravna in obnovljiva alternativa fosilnim gorivom, ki jo lahko uporabimo neposredno za kurjenje, ali pa s spreminjanjem stanja iz nje ustvarimo biodizel in bioplin, torej ogljikovodika v tekoči ali plinasti obliki. Električna energija se proizvaja z uporabo biomase na različne načine, največ s sežiganjem kot v termoelektrarnah, lahko pa tudi z biološko ali toplotno-kemijsko pretvorbo (Rožman, 2012, str. 101). Biomasa je kot obnovljiv vir energije sicer cenjena, a zaradi precejšnjih izpustov toplogrednih plinov, izrabe rodovitne zemlje in nekaterih drugih slabosti ne predvidevajo prav velike rasti uporabe tega vira pri proizvodnji elektrike v naslednjih desetletjih (IEA, 2018b, str. 528–529).

Geotermalna energija je shranjena toplota v notranjosti zemlje, ki jo elektrarne na različne načine pridobivajo iz globin in z njo ogrevajo paro za pogon turbine in generatorja. Za pridobivanje elektrike je potrebna temperatura termalne pare vsaj 150 °C, nižje temperature pa se lahko rabijo le za ogrevanje (Rožman, 2012, str. 91–93). Geotermalna energija se za proizvodnjo elektrike sicer uporablja že od začetka 20. stoletja, a v svetovnem merilu je proizvodnja elektrike iz tega vira majhna, ker ima pogoje za izkoriščanje geotermalne energije za pridobivanje elektrike sorazmerno malo držav. V državah, ki imajo pogoje za to, pa lahko ta oblika energije predstavlja sorazmerno velik delež pri pridobivanju elektrike, v Keniji, denimo, je ta odstotek nad 50 (Miriri, 2015).

Energija morja je shranjena v naslednjih oblikah (Rožman, 2012, str. 96):

- plimovanje,
- potencialna energija valov,
- kinetična energija morskih tokov in
- notranja toplotna energija morja.

Energetski potencial morja je sicer izjemno visok, a je za zdaj mogoče izkoristiti le sorazmerno majhen odstotek tega potenciala. Trenutna proizvodnja iz tega vira je zanemarljiva in naj bi kljub sicer velikemu povečanju do leta 2040 po napovedih dosegala zgolj med 0,1 in 0,2 % svetovne proizvodnje elektrike (IEA, 2018b, str. 528–529).

1.2.5 Proizvodni viri elektrike v razvoju

Trenutno je po svetu v razvoju več potencialnih novih proizvodnih virov elektrike. V nadaljevanju bosta na kratko predstavljena dva najperspektivnejša, ki oba temeljita na vodiku, tretjem najpogostejšem elementu na Zemlji.

Fuzijska reakcija je zlivanje lahkih atomskih jeder v težja, pri čemer pride do zmanjšanja mase in s tem presežka energije. Na enoto atomske mase nastane približno sedemkrat do osemkrat več presežne energije kot pri cepljenju jeder, ki ga sedaj prakticirajo v jedrskih elektrarnah. Najprimernejši gorivi za te reakcije sta vodikova izotopa devterij in tritij. Devterij se naravno nahaja v vodi, sicer v izjemno majhnem odstotku (0,0115 %), a glede na količino vode na planetu je goriva za potrebe človeštva več kot dovolj (Murray & Holbert, 2015, str. 101–102). Najbolj energetsko učinkovita je sicer fuzijska reakcija devterija in tritija, ki v naravi ne obstaja in ga je treba umetno pridobiti. Dodatna prednost fuzijske reakcije je, da ne proizvaja jedrskih odpadkov z dolgo dobo radioaktivnega sevanja (Rožman, R., 2012, str. 125–127).

Kljub ugodnim lastnostim pa ostaja uporaba fuzijske reakcije za zdaj le na eksperimentalni ravni. Kontrolirano in dolgotrajno obliko fuzijske reakcije je v zemeljskih razmerah namreč zelo težko uresničiti, saj zahteva izjemno visoke temperature (10^8 °K) za oblikovanje plazme in ogromen zunanji pritisk na plazmo, da se premaga odbojnost enako nabitih atomskih jeder (Rožman, 2012, str. 124). Kontrolirane fuzijske reakcije, ki bi ustvarila več energije, kot jo je porabila, zato človeku doslej še ni uspelo proizvesti.

Vsa pozornost je zdaj usmerjena v poskusni fuzijski reaktor (tokamak) ITER, ki ga gradi EU v sodelovanju s Kitajsko, Indijo, Rusijo, ZDA, Japonsko in Južno Korejo v Franciji. Gre za stroškovno izredno zahteven projekt, ki naj bi predvidoma v letih 2025/26 proizvedel prvo zdržno fuzijsko reakcijo devterij – devterij in v letu 2035 prvo energetsko pozitivno reakcijo devterij – tritij. Če bo eksperiment uspešen, mu bo v letih 2040–2051 sledila gradnja prve fuzijske elektrarne DEMO (EUROfusion, 2018, str. 21).

Gorivne celice so naprave za pretvarjanje kemijske energije goriva (najpogosteje vodika) neposredno v elektriko, brez vmesne pretvorbe v toploto v procesu, ki je nasproten kot pri elektrolizi vode. Obstaja več vrst gorivnih celic, v splošnem pa se delijo na nizko- in visokotemperaturne (Rožman, 2012, str. 122).

Nizkotemperaturne gorivne celice so v uporabi že dokaj dolgo kot lokalni vir energije za avtomobile, letala, čolne, vesoljska plovila ali kot rezervni energetski sistemi in kot take predstavljajo pomembno prvino decentralizacije oskrbe z elektriko. Visokotemperaturne gorivne celice ne potrebujejo predhodnega ločevanja vodika, saj se vodik za reakcijo izloča s pomočjo visokih temperatur na anodi. Tovrstne celice so primerne predvsem za pridobivanje elektrike in toplote v stacionarnih energetskih objektih (Rožman, 2012, str. 123). Področje se hitro razvija, a za zdaj komercialno še ni povsem konkurenčno.

1.3 Primerjava proizvodnih virov elektrike z vidika elektroenergetskega sistema

V prejšnjem poglavju so bile predstavljene značilnosti proizvodnje elektrike in pregled različnih proizvodnih virov, v tem poglavju pa je prikazana njihova primerjava z vidika umeščenosti elektroenergetskega sistema in preskrbe elektrike. Za potrebe tega dela bomo primerjali proizvodne vire glede na:

- *zanesljivost,*
- *prožnost* in
- *trajnost* preskrbe z elektriko.

Kot je bilo že omenjeno, elektrike za zdaj še ne znamo shranjevati v zadostni meri in brez sorazmerno velikih stroškov, zato je treba v elektroenergetskem sistemu kratkoročno in dolgoročno zagotavljati tako rekoč popolno ravnovesje med njeno proizvodnjo in porabo oziroma zanesljivost preskrbe. Zanesljivost proizvodnega vira elektrike torej predstavlja njegovo zmožnost, da zanesljivo proizvede elektriko, ob tistem trenutku in s tako količino, kot je potrebno.

Za pokrivanje osnovne obremenitve (»obratovanje v pasu«), so primerni le proizvodni viri z najvišjo stopnjo zanesljivosti, kamor spadajo edino termoelektrarne, vključno z manj razširjenimi geotermalnimi in elektrarnami na biomaso. Hidroelektrarne so manj primerne, saj je njihova proizvodnja odvisna od vodostaja, sončne in vetrne elektrarne pa za to nalogo zaradi izrazitih in pogosto nepričakovanih nihanj v proizvodnji niso primerne.

Zanesljivost oskrbe je precej olajšala sodobna tesna povezanost mednarodnih elektroenergetskih sistemov, na katerih je v vsakem trenutku mogoče hitro poiskati vršno ponudbo ali povpraševanje, bodisi kratkoročno bodisi dolgoročno. Visoka učinkovitost neprekinjenega znotrajdnevnega trgovanja je precej povečala tudi uporabnost in koristnost sicer manj zanesljivih proizvodnih virov elektrike, kot so denimo sončne ali vetrne elektrarne. V letih 2010–2016, ko je proizvodnja elektrike iz obnovljivih virov v Nemčiji zrasla za približno 100 %, je obseg neprekinjenega znotrajdnevnega trgovanja zrasel za več kot 400 %. S tem se je nemški elektroenergetski sistem lahko izognil dragemu in tveganemu fizičnemu uravnavanju moči ob spremenljivi ponudbi zaradi obnovljivih proizvodnih virov elektrike (Martin & Otterson, 2018, str.1).

Zanesljivost lahko merimo s faktorjem zmogljivosti, ki predstavlja povprečni odstotek časa, v katerem elektrarna deluje s polno zmogljivostjo (Suman, 2018, str. 168). Izsledki merjenja faktorjev zmogljivosti za različne elektrarne so prikazani v tabeli 2. Rezultati v tabeli dokazujejo, da imajo najvišji povprečni faktor zmogljivosti jedrske elektrarne, termoelektrarne na premog in geotermalne elektrarne, pri čemer je zgornja meja intervala najvišja za jedrske elektrarne.

Tabela 2: Faktorji zmogljivosti za različne vrste elektrarn

Vrsta elektrarne	Faktor zmogljivosti (v %)
Jedrska	60–100
Termalna, na premog	70–90
Geotermalna	70–90
Solarna, termalna s skladiščenjem	70–75
Vodna (hidro)	30–80
Vetrna	20–40
Solarna, fotovoltaična	12–19
Solarna, termalna	~ 15

Vir: Suman, 2018, str. 168

Prožnost preskrbe z elektriko pomeni odpornost elektroenergetskega sistema na neugodne zunanje okoliščine. Prožnost preskrbe znižujejo na primer previsoka odvisnost od enega samega vira, visoka odvisnost od uvoza proizvodnih virov, visoka centralizacija proizvodnje elektrike, denimo v nekaj velikih regijskih elektrarnah ipd. Nasprotno pa prožnost preskrbe dvigujejo uporaba komplementarnih proizvodnih virov, viri domačega porekla in razpršena proizvodnja manjših, med seboj neodvisnih proizvodnih virov.

Prožnost proizvodnih virov je pogosto v nasprotju z njihovo zanesljivostjo, zato mora elektroenergetski sistem države pri zasnovi svoje elektroenergetske oskrbe iskati med tema prvinama primerno ravnotežje. V praksi to pomeni, da naj bi elektroenergetski sistem vseboval proizvodnjo iz čim več različnih proizvodnih virov, da naj se v prvi vrsti zanaša na dostopne domače vire, denimo premog, vodne vire ali veter in da naj bi bil elektroenergetski sistem sestavljen decentralizirano, z velikimi, srednjimi, majhnimi in celo mikro elektrarnami. Na prožnost preskrbe z elektriko pomembno vpliva tudi distribucijsko omrežje države, kar pa v tem delu ne bo posebej obravnavano.

Trajnost preskrbe z elektriko lahko pomeni bodisi okoljsko trajnost proizvodnje, bodisi trajnost proizvodnih virov. Kar se tiče okoljske trajnosti ima prednost proizvodnja elektrike iz takih proizvodnih virov in na tak način, da kar najmanj obremenjuje okolje z onesnaženjem ali drugačno trajno degradacijo. S stališča okoljske trajnosti imajo prednost (manjše) hidroelektrarne, sončne, vetrne in geotermalne elektrarne ter elektrarne, ki izkoriščajo silo morja.

Trajni proizvodni viri so tisti, ki neposredno ali posredno izvirajo iz energij sonca in zemlje, iz gravitacijske sile meseca, ali pa jih je na zemlji toliko, da ni strahu pred izčrpanjem (denimo vodik). Vsi proizvodni viri elektrike, ki so bili raziskani zadnji dve desetletji ali so v fazi raziskav, bodisi aktivnih, bodisi konceptualnih, spadajo v kategorijo trajnih proizvodnih virov.

2 PROIZVODNJA ELEKTRIKE IZ JEDRSKEGA GORIVA

2.1 Zgodovina proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva

Prva elektrika iz jedrskega goriva je bila proizvedena s pomočjo grafitnega jedrskega reaktorja, postavljenega leta 1943 v Oak Ridgeu v ZDA za pridobivanje plutonija za izdelavo jedrske bombe, ki je bila kasneje uporabljena nad Nagasakijem (Oak Ridge National Laboratory, brez datuma). Ne glede na to pa velja za začetek proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva datum 20. december 1951, ko je v bližini mesteca Arco v državi Idaho v ZDA začel delovati eksperimentalni reaktor EBR-I, ki kot prvi ni bil namenjen vojaški uporabi in je lahko proizvedel okoli 100 kWh elektrike za potrebe razvojnega laboratorija (Michal, 2001).

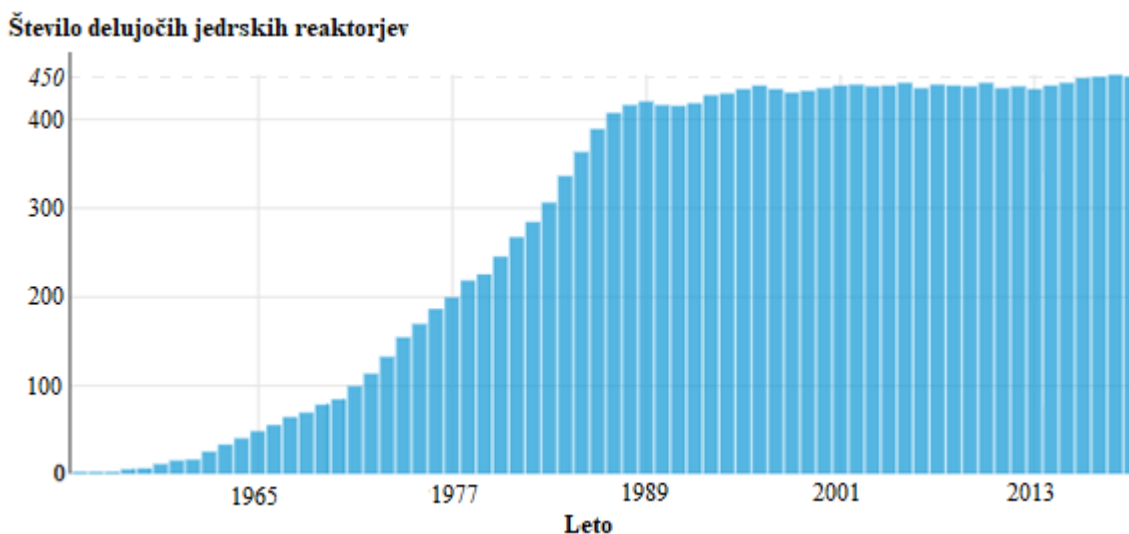
Prva jedrska elektrarna, ki je bila vključena v javno električno omrežje, je pričela obratovati 26. junija 1954 v sovjetskem mestu Obninsk blizu Moskve in je lahko napajala okoli 2000 stanovanjskih enot (IAEA, 2004). Prva komercialna jedrska elektrarna je začela obratovati 17. oktobra 1956 v Združenem kraljestvu (Taylor, 2016), prva komercialna jedrska elektrarna, ki je bila namenjena izključno civilni uporabi, pa je bila priključena v omrežje 18. decembra 1957 v ZDA (U.S. NRC, 2018).

Po nekoliko obotavljajočem začetku v 50. letih prejšnjega stoletja je v naslednjih desetletjih število delujočih jedrskih reaktorjev za proizvodnjo elektrike po svetu začelo naglo naraščati, še posebno po naftni krizi leta 1973. Francoska vlada je tako leta 1974 sprejela ambiciozni Messmerjev načrt za zagotavljanje energetske neodvisnosti z naslonitvijo na elektriko iz jedrskega goriva. V naslednjih desetih letih je delež tovrstne elektrike v Franciji poskočil z 8 na 49 % in do leta 1990 celo na 75 % (Electricité de France History, brez datuma).

Na Japonskem so leta 1973 proizvedli 67 % elektrike v termoelektrarnah na nafto in le 2 % v jedrskih elektrarnah, do leta 1993 pa je delež nafte pri proizvodnji elektrike padel na 19 %, delež jedrskega goriva pa zrasel na 34 % (Kibune 1995, str. 127). Mnoge države, med njimi tudi Jugoslavija, so v tem desetletju sprejele odločitev o gradnji svojih prvih jedrskih elektrarn.

Število delujočih jedrskih reaktorjev po posameznih letih prikazuje slika 2. Iz slike je razvidna hitra rast števila jedrskih reaktorjev v letih od 1961 do 1987, ko se je njihovo število povzpelo nad 400. Od konca 80. let naprej pa se število delujočih jedrskih reaktorjev po svetu zelo malo spreminja in zadnjih 30 trideset let niha med številoma 420 in 450.

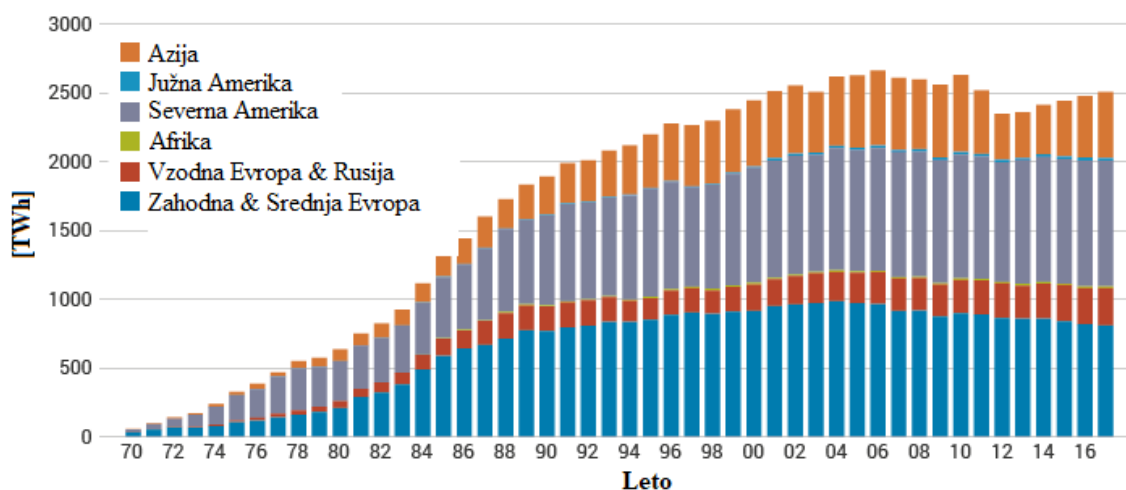
Slika 2: Število delujočih jedrskih reaktorjev po svetu v letih 1954–2019



Vir: World Nuclear Association, 2019a

Gibanje proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva po svetu od leta 1970 do leta 2017 je prikazano na sliki 3. Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva je tudi po upočasnitvi gradnje novih reaktorjev konec 80. let zaradi tehnoloških izboljšav še nekaj let naraščala in dosegla vrh leta 2006 pri 2660 TWh, potem začela upadati, do leta 2012 za 12 % na 2336 TWh, v zadnjih letih pa spet počasi narašča (Schneider, 2014).

Slika 3: Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v TWh po svetu v letih 1970–2017



Vir: World Nuclear Association, 2019a

Gradnja jedrskih reaktorjev po svetu je torej po začetnem navdušenju konec 80. let prejšnjega stoletja praktično zastala. Razloga za tako dogajanje sta dva, ekonomski in družbeno-politični.

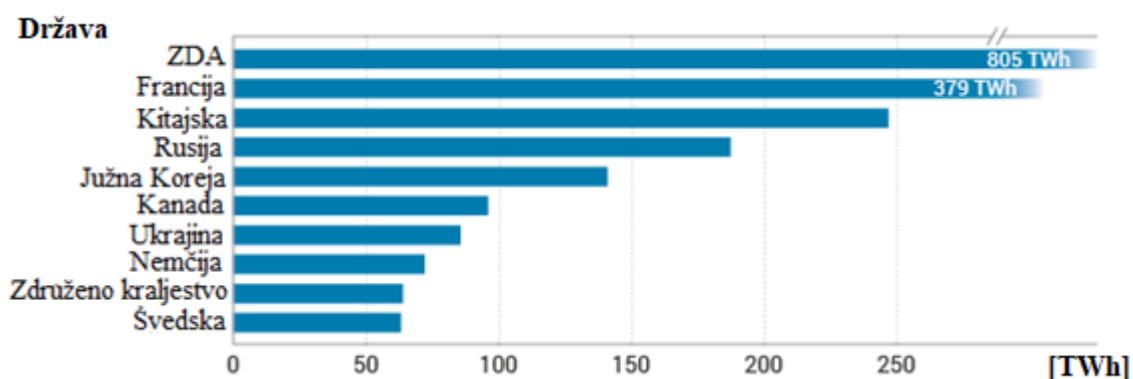
V drugi polovici 80. let prejšnjega stoletja je po dveh naftnih šokih v letih 1973 in 1979 cena nafte naglo upadla in ostala bolj ali manj nespremenjena naslednjih 15 let. Po drugi strani pa se je zaradi okoljevarstvenih in varnostnih razlogov regulacija, povezana z gradnjo jedrskih elektrarn, naglo zaostrovala, zaradi česar so investicijski stroški novih jedrskih reaktorjev začeli naglo naraščati in so v ZDA od leta 1970 do 1987 narasli za skoraj trinajstkrat (Cohen, 1990). Vse to je delalo elektriko iz jedrskega goriva ekonomsko manj privlačno v primerjavi z alternativnimi možnostmi. Poleg tega so se po nekaj desetletjih uporabe jedrske tehnologije že začele kazati ekonomske posledice dolgotrajnega shranjevanja nizko in srednje radioaktivnih odpadkov.

Kar se tiče odnosa javnosti do jedrske tehnologije, so se predvsem v ZDA in Nemčiji že zelo zgodaj začeli pojavljati pomisleki glede okoljevarstvenega in varnostnega vpliva jedrskih elektrarn, in to tako v strokovni javnosti kot med ljudmi. Protesti nasprotnikov jedrske tehnologije po svetu so se močno povečali po nesreči na jedrskem reaktorju na otoku Tri milje v ZDA (Fortuna, 2011), po doslej največji nesreči v jedrski elektrarni leta 1986, ki se je zgodila med varnostnim testiranjem 4. reaktorja jedrske elektrarne Černobil pri mestu Pripjat v Sovjetski zvezi, pa so mnoge države revidirale svoje energetske politike in začele opuščati načrte za gradnjo novih reaktorjev (World Nuclear Association, 2018c). Podobna reakcija javnosti in politike se je v še večji meri ponovila leta 2011 po odmevni nesreči, ki jo je v jedrski elektrarni Fukušima Daiči pri mestecu Okumi na Japonskem povzročil cunami (Knight, 2011; Maeda & Sheldrick, 2012).

2.2 Trenutno stanje proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji in v svetu

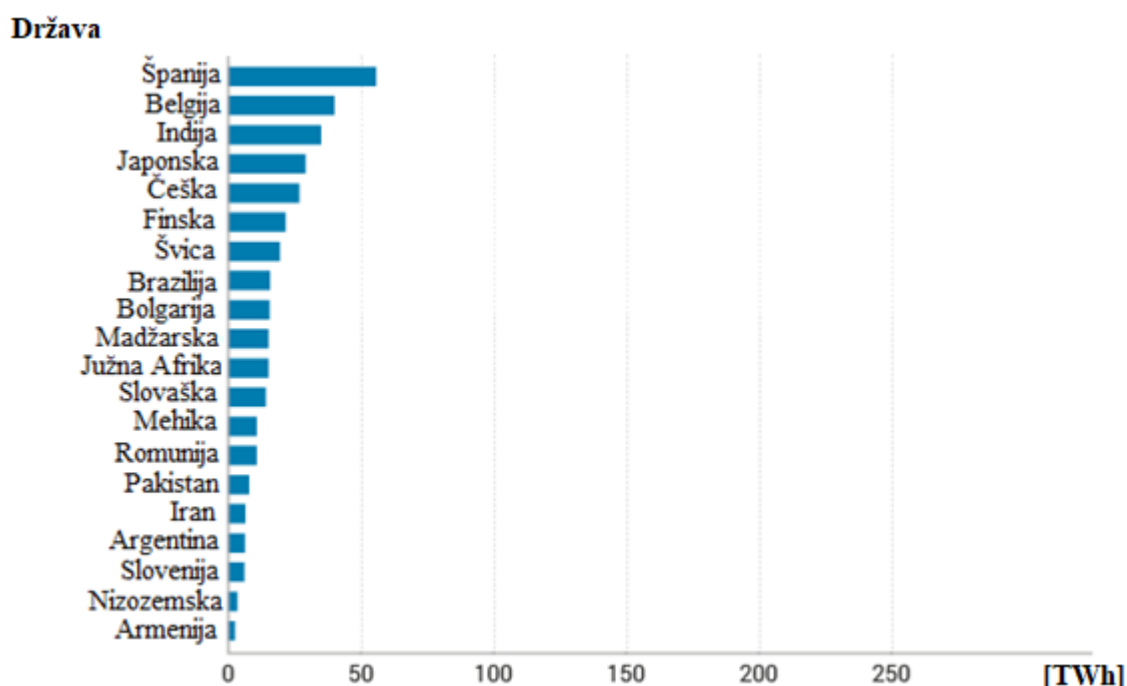
V letu 2017 je svetovna proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v 31 državah, v katerih obratujejo jedrske elektrarne, znašala 2502,82 TWh (IAEA PRIS, 2019) ali 10,31 % vse proizvedene elektrike. Slika 4 prikazuje porazdelitev proizvodnje po državah.

Slika 4: Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v TWh v letu 2017



Se nadaljuje

Slika 4: Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v TWh v letu 2017 (nad.)



Vir: World Nuclear Association, 2019a

Delež elektrike iz jedrskega goriva glede na elektriko iz drugih virov je bil v svetovnem merilu največji leta 1996, ko je znašal 17,5 %, od takrat pa stalno pada. Padanje se je nekoliko upočasnilo po letu 2012, ko se je ta delež ustalil med desetimi in enajstimi odstotki (Mytle Schneider Consulting Project, 2018, str. 28).

Petnajst držav z največjim deležem elektrike iz jedrskega goriva v svoji proizvodnji za leto 2018 prikazuje tabela 3.

Tabela 3: Države z največjimi deleži proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v letu 2018

	Država	DELEŽ JE
1	Francija	71,7 %
2	Slovaška	55,0 %
3	Ukrajina	53,0 %
4	Madžarska	50,6 %
5	Švedska	40,3 %
6	Belgija	39,0 %
7	Švica	37,7 %
8	Slovenija	35,9 %
9	Bolgarija	34,7 %
10	Češka	34,5 %

Se nadaljuje

Tabela 3: Države z največjimi deleži proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v letu 2018 (nad.)

	Država	DELEŽ JE
11	Finska	32,4 %
12	Armenija	25,6 %
13	Južna Koreja	23,7 %
14	Španija	20,4 %
15	ZDA	19,3 %

Vir: Nuclear Energy Institute, 2019

V največjih petih proizvajalkah elektrike iz jedrskega goriva je stanje različno. V ZDA, kjer v svojih 99 delujočih komercialnih jedrskih reaktorjih proizvedejo 32,2 % svetovne elektrike iz jedrskega goriva, je proizvodnja v zadnjih letih stabilna, delež elektrike iz jedrskega goriva je bil v letu 2017 na ravni 20,1 %, kar je 2,5 odstotnih točk pod najvišjo vrednostjo iz leta 1995 (Mytle Schneider Consulting Project, 2018, str. 19, 99). Francija je v letu 2017 v svojih 57 delujočih jedrskih reaktorjih proizvedla 15,2 % svetovne elektrike iz jedrskega goriva, kar je v svetovnem merilu takrat pomenilo rekordni delež, v državi pa je to predstavljalo 71,6-odstotni delež, ki pa pada od leta 2005, ko je bil z 78,5 % najvišji (Mytle Schneider Consulting Project, 2018, str. 19, 52).

Kitajska, ki se je v zadnjih letih prebila na tretje mesto med proizvajalkami elektrike iz jedrskega goriva, je v letu 2017 povečala svoj delež elektrike iz tega vira na 3,9 %, kar je 18-odstotno povečanje glede na leto prej. Povprečna starost njenih reaktorjev je s 7,1 leta najnižja med vsemi vodilnimi proizvajalkami (Mytle Schneider Consulting Project, 2018, str. 19, 47). Rusija je v letu 2017 proizvedla rekordno količino elektrike v svojih jedrskih elektrarnah, delež elektrike iz tega vira je bil 17,8-odstoten, kar je 0,7 odstotne točke več kot leto prej (Mytle Schneider Consulting Project, 2018, str. 251). Južna Koreja je v letu 2017 proizvedla 8,6 % manj elektrike iz jedrskega goriva kot leto prej, delež elektrike iz tega vira je bil 27,1-odstoten, kar je le še dobra polovica od 53,3-odstotnega deleža, ki je bil dosežen leta 1987 (Mytle Schneider Consulting Project, 2018, str. 19, 84).

V Sloveniji je bil leta 2017 delež proizvedene elektrike iz jedrskega goriva 38,5-odstoten, delež dejansko porabljene elektrike iz tega vira pa je seveda polovičen, zaradi 50-odstotnega solastništva naše edine jedrske elektrarne s Hrvaško. Proizvodnja v NEK se počasi dviguje ves čas od leta 1983, ko je elektrarna začela obratovati s polno močjo (NEK, 2018a), letni deleži elektrike iz NEK pa v zadnjih letih nihajo le zaradi remontov, ki potekajo v rednem, 18-mesečnem ciklusu.

Obratovalna doba NEK, ki je bila prvotno omejena na 40 let, torej do leta 2023, je bila na podlagi odločitve meddržavne komisije 20. julija 2015 podaljšana za 20 let, pod pogojem, da se vsakih 10 let naredi varnostno preverjanje objekta (World nuclear news, 2015b).

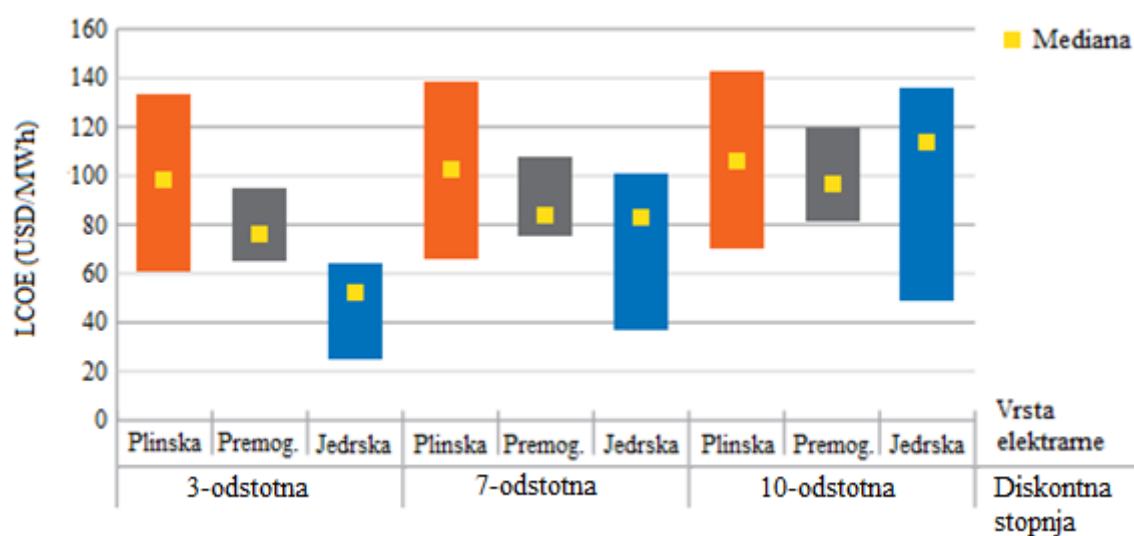
2.3 Ekonomska analiza proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva

2.3.1 Ekonomska primerjava stroškov proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva in drugih proizvodnih virov

Primerjava stroškov proizvodnje elektrike iz različnih proizvodnih virov se izvaja s pomočjo LCOE v pričakovani obratovalni dobi elektrarne. Izračunavanje LCOE je zelo odvisno od kakovosti in nabora podatkov, ki jih zbirajo posamezne države, zato je treba pri izračunu upoštevati vrsto predpostavk, ki šele omogočajo primerjavo med državami in po letih kolikor toliko verodostojno (OECD, 2015, str. 23).

OECD s pomočjo svoje agencije Nuclear Energy Agency (NEA) in IEA vsakih pet let naredi študijo proizvodnih stroškov elektrike iz različnih virov v vzorčnih državah. Razpon LCOE v USD/MWh v 22 proučevanih državah za tri glavne vrste elektrarn za pokrivanje osnovne obremenitve (»obratovanje v pasu«) pri treh različnih diskontnih stopnjah, ki prikazuje pričakovani LCOE za elektrarne z začetkom obratovanja v letu 2020, prikazuje slika 5 (OECD, 2015, str. 14).

Slika 5: Pričakovani razpon LCOE za različne vrste elektrarn za pokrivanje osnovne obremenitve za elektrarne z začetkom obratovanja v letu 2020



Vir: OECD, 2015, str. 14

Pri 3-odstotni diskontni stopnji sta mediana in razpon vrednosti LCOE za jedrske elektrarne najnižja med tremi primerjanimi vrstami elektrarn za pokrivanje osnovne obremenitve (»obratovanje v pasu«). Pri 10-odstotni diskontni stopnji so vrednosti LCOE za jedrske elektrarne v nekaterih državah sicer še vedno nižje v primerjavi z drugima vrstama, a razpon vrednosti se močno poveča in mediana zraste nad mediani obeh primerjanih vrst elektrarn. To gibanje LCOE jasno kaže na zelo visoko odvisnost stroškov proizvodnje elektrike od investicijskih stroškov v jedrskih elektrarnah.

Združenje svetovne jedrske industrije (angl. World Nuclear Association, 2019b) navaja, da mora ekonomska analiza jedrskih elektrarn upoštevati naslednje vidike oziroma stroške:

- investicijski stroške,
- stroške delovanja,
- stroške eksternalij in
- druge stroške.

Za jedrske elektrarne na splošno velja, da imajo sorazmerno visoke zagonske in investicijske stroške ter nizke stroške goriva glede na druge proizvodne vire (Murray & Holbert, 2015, str. 296).

Tabela 4 prikazuje LCOE za nekatere vrste elektrarn, kot jih je v svojem zadnjem poročilu izračunala ameriška agencija U.S. Energy Information Administration. Vrednosti LCOE so bile izračunane v letu 2018 za elektrarne, ki bi začele proizvajati elektriko v letu 2023 (U.S. EIA, 2019b, str. 8). Zgornji podatki za ZDA kažejo, da če medsebojno primerjamo elektrarne za pokrivanje osnovne obremenitve (»obratovanje v pasu«), torej premogovne, plinske, jedrske in elektrarne na biomaso, pri predvideni dinamiki cen energentov najnižji LCOE dosežejo plinske elektrarne, tem pa sledijo jedrske. Solarne, vetrne in hidroelektrarne zaradi nepredvidljive proizvodnje niso primerne za pokrivanje osnovne obremenitve.

Tabela 4: LCOE za nekatere vrste elektrarn v ZDA z začetkom obratovanja v letu 2023

<i>Vrsta elektrarne</i>	<i>LCOE (USD/MWh)</i>
Solarna, termalna	121,2
Vetrna na morju	117,5
Na premog s 30-odstotnim znižanjem emisij	104,3
Na premog z 90-odstotnim znižanjem emisij	98,6
Na biomaso	92,2
Jedrska	77,5
Plinska z znižanjem emisij	67,5
Vetrna na kopnem	49,8
Plinska	46,3
Solarna, fotovoltaična	45,7
Vodna (hidro)	39,1

Vir: U.S. EIA, 2019b, str. 8

Zaradi visokega deleža investicijskih stroškov v ceni proizvedene elektrike na končno vrednost LCOE in rentabilnost jedrskih elektrarn najbolj negativno vplivajo prekoračitve investicijskih stroškov ter prekoračitev rokov gradnje (Cohen, 1990; Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 75). Od 50 enot v gradnji ob koncu septembra 2018 so pri 33 enotah že prekoračili načrtovane roke, od teh je pri 15 enotah zamuda trajala že več kot eno leto. Na Kitajskem, kjer gradijo največ jedrskih elektrarn, je konec leta 2018 zamujala roke

več kot polovica od 16 novogradenj (Mytle Schneider Consulting Project, 2018, str. 15, 18). Pri nekaterih novogradnjah prekoračitev rokov povzroča bistveno zmanjšanje pričakovane konkurenčnosti. Tak primer je elektrarna Hinkley Point C v Združenem kraljestvu, ki zamuja že več kot eno leto in pri investicijskih stroških več kot 20 milijard funtov skoraj dvakratno presega načrtovane stroške iz leta 2008 (Ambrose, 2019). Podoben primer slabe prakse, preseganja stroškov in prekoračitve roka je gradnja francoskega reaktorja naslednje generacije tipa evropski tlačni reaktor v mestu Flamanville, ki bi morala biti končana leta 2012, a bo predvidoma končana šele leta 2022 (AFP, 2019). Na Kitajskem so reaktor istega tipa, zgrajenega po tehnologiji francoske Électricité de France, uspešno dokončali in zagnali leta 2018.

2.3.2 Občutljivost cen jedrskega goriva

Občutljivost stroškov proizvodnje elektrike na spremembe cen goriva je eden pomembnejših faktorjev pri odločanju o tehnologiji elektrarn, ki se bodo gradile. Ta občutljivost je še posebej pomembna lastnost pri elektrarnah za pokrivanje osnovne obremenitve, saj te delujejo stalno in s svojimi stroški proizvodnje bistveno vplivajo na višino in stabilnost cen elektrike v državi ter s tem posredno tudi na konkurenčnost gospodarstva.

Za jedrske elektrarne je med drugim značilno, da za svoje delovanje potrebujejo zelo majhno fizično količino goriva zaradi njegove zelo učinkovite izrabe. Iz ene tone naravnega urana je tako mogoče proizvesti okoli 44.000 MWh elektrike, medtem ko bi za proizvodnjo iste količine elektrike potrebovali okoli 20.000 ton črnega premoga ali 8,5 milijona kubičnih metrov zemeljskega plina (World Nuclear Association, 2017a).

Tabela 5 prikazuje energijske vrednosti nekaterih fosilnih energentov, ki so v primerjavi z energijsko vrednostjo uranovega oksida v reaktorju bistveno nižje.

Tabela 5: Preglednica energentov z energijskimi vrednostmi

Vir energije	Energijska vrednost [MJ]
Lignit (1 kg)	7,9–12,1
Rjavi premog (1 kg)	13,2–23,4
Črni premog (1 kg)	27,6–33,1
Zemeljski plin (1 m ³)	38,3
Dizelsko goriva (1 l)	38,7
UO₂ v reaktorju (1 kg)	500.000

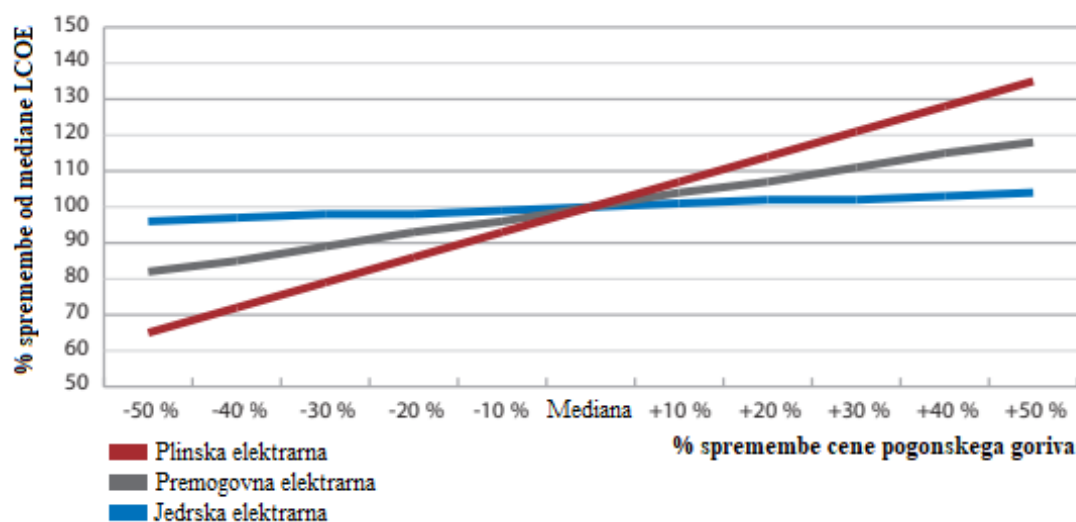
Vir: Rožman, 2012, str. 15

Stroški goriva zato pomenijo sorazmerno majhen delež stroškov proizvodnje elektrike v jedrskih elektrarnah v primerjavi z drugimi vrstami elektrarn za pokrivanje osnovne obremenitve, torej termoelektarn na premog in plin. Slika 6 prikazuje odvisnost LCOE od

spremembe cene pogonskega goriva v razponu od -50 % do +50 % za tri glavne vrste elektrarn za pokrivanje osnovne obremenitve (»obratovanje v pasu«).

Slika 6 prikazuje stanje odvisnost LCOE pri 7-odstotni diskontni stopnji, ki pa sicer ne razlikuje bistveno od tistih, ki prikazujejo stanje pri 3- ali 10-odstotni diskontni stopnji. V vsakem primeru je razvidno, da je cena elektrike iz jedrskih elektrarn daleč najmanj občutljiva na spremembo cene pogonskega goriva.

Slika 6: Odvisnost LCOE od cene goriva elektrarn za pokrivanje osnovne obremenitve, pri 7-odstotni diskontni stopnji



Vir: OECD, 2015, str. 131

2.3.3 Ekonomska problematika odlaganja jedrskih odpadkov

Med delovanjem jedrske elektrarne in po njeni razgradnji ostajajo radioaktivni materiali, ki jih ni več mogoče koristno uporabiti, zato se obravnavajo kot radioaktivni ali jedrski odpadki. Jedrski odpadki sevajo različne vrste delcev, ki so nevarni za življenje, zato ne smejo priti v stik z okolico, njihovo sevanje pa lahko traja od nekaj dni do nekaj sto tisoč let. Ker je radioaktivne atome zelo težko narediti spet neaktivne, je treba jedrske odpadke dolgoročno shraniti tako, da ne ogrožajo okolice (Murray & Holbert, 2015, str. 395). Stroški odlaganja jedrskih odpadkov se obračunavajo kot stroški delovanja jedrskih elektrarn.

Jedrski odpadki se glede na stopnjo radioaktivnosti delijo na visoko radioaktivne odpadke, (pretežno produkte, nastale pri cepitvi jeder, rabljeno gorivo ipd.), ki zahtevajo tako hlajenje kot varovanje okolja pred sevanjem, srednje radioaktivne odpadke, ki zahtevajo dodatno zaščito pri rokovanju, a ne oddajajo toplote, in nizko radioaktivne odpadke, ki ne terjajo posebne dodatne zaščite pri rokovanju (IAEA, 1994, str. 8, 9). Visoko radioaktivni jedrski odpadki predstavljajo 3 % prostornine in okoli 95 % sevanja vseh odpadkov, srednje

radioaktivni odpadki tvorijo 7 % prostornine in približno 4 % sevanja, preostanek pa odpade na nizko radioaktivne odpadke (World Nuclear Association, 2018a).

Nizko radioaktivni in kratkotrajno sevajoči srednje radioaktivni jedrski odpadki, katerih sevalna doba traja od nekaj deset do nekaj sto let, se zaradi zmanjšanja prostornine stisnejo in skladiščijo v zavarovanih skladiščih nizko pod zemeljsko površino. Za trajno odlaganje tovrstnih jedrskih odpadkov ima večina jedrskih držav zgrajena posebna trajna odlagališča. V Sloveniji se takšno gradi v bližini NEK v Vrbini pri Krškem in bo predvidoma začelo delovati leta 2021. Nekatere države tovrstne odpadke odlagajo tudi globoko v morje.

Dolgo sevajoči srednje radioaktivni in visoko radioaktivni jedrski odpadki, katerih sevalna doba traja od nekaj tisoč do nekaj deset tisoč let, se navadno kalcinirajo, zalijejo v borosilikatno steklo in zaprejo v sode. V letu delovanja tipične 1000 MW jedrske elektrarne, se ustvari približno 5 ton tovrstnih odpadkov (World Nuclear Association, 2017a). Rabljeno jedrsko gorivo se pred predelavo nekaj časa ohlaja v posebnih ohlajevalnih bazenih v jedrskih elektrarnah, kjer počasi izgublja toploto in radioaktivnost.

Količino visoko radioaktivnih jedrskih odpadkov je mogoče znižati do 80 % s predelavo rabljenega goriva za ponovno uporabo. V obratih za tovrstno predelavo je bila doslej predelana okoli tretjina uporabljenega goriva komercialnih jedrskih elektrarn, trenutno pa za civilno rabo obratujejo le predelovalnice goriva v Franciji, Indiji in Rusiji (World Nuclear Association, 2018b). Naslednje generacije jedrskih reaktorjev naj bi bile po predvidevanjih sposobne uporabljati tudi druge prvine rabljenega jedrskega goriva, zato se to za zdaj še nikjer trajno ne odlaga, ampak le skladišči v pričakovanju morebitne reciklaže (Murray & Holbert, 2015, str. 471; Yano, Mao, Wharry & Porterfield, 2018, str. 474).

Trenutno je edini predvideni način odlaganja visoko radioaktivnih jedrskih odpadkov njihovo spuščanje in pečatenje v zelo globoke vrtine. Glede na to, da se zaradi znižanja stopnje radioaktivnosti priporoča 50-letno čakanje pred trajnim odlaganjem visoko radioaktivnih jedrskih odpadkov, doslej po svetu še ni začelo delovati nobeno odlagališče tovrstnih odpadkov za komercialne jedrske elektrarne.

Ocena je, da stroški odlaganja jedrskih odpadkov in razgradnje znašajo okoli 10 % stroškov proizvodnje elektrike v jedrskih elektrarnah (World Nuclear Association, 2017b). Načini pokrivanja stroškov trajnega odlaganja jedrskih odpadkov se od države do države razlikujejo, v večini pa se to vprašanje rešuje s posebnimi naložbenimi skladi, v katere jedrske elektrarne odvajajo del svojih dohodkov od prodaje elektrike v času obratovanja. V Sloveniji je bil tako decembra 1994 na podlagi sklepa Vlade oblikovan Sklad za financiranje razgradnje NEK (brez datuma) in za odlaganje njenih radioaktivnih odpadkov. V ta sklad slovenski lastnik NEK, Gen energija, d. o. o., od leta 2004 vplačuje 3 evre za vsako prevzeto MWh elektrike, medtem ko v hrvaški sklad za enak namen vplačuje 5,5 €/MWh. Osnova za določitev tega vplačila so bili na leto 2002 diskontirani stroški razgradnje NEK in odlaganja njenih radioaktivnih odpadkov, ki znašajo 350 milijonov evrov. Slovenski in hrvaški sklad morata ta sredstva v celoti zbrati do konca leta 2022. Če vplačila v sklade primerjamo z lastno proizvodno ceno, v kateri so všteti vsi stroški poslovanja NEK in je leta 2016 znašala

približno 30 €/MWh (Zore, 2016), ugotovimo, da vplačila v slovenski sklad znašajo približno 10 % lastne proizvodne cene, kar ustreza oceni World Nuclear Association glede stroškov odlaganja jedrskih odpadkov in razgradnje, vplačila v hrvaški sklad pa dobrih 18 % proizvodne cene, kar presega to oceno.

Za primerjavo s tujino lahko navedemo, da je leta 1982 Kongres ZDA jedrskim elektrarnam zapovedal plačilo 1 \$/MWh proizvedene elektrike v sklad za pokrivanje stroškov odlaganja jedrskih odpadkov. Zapoved je veljala do leta 2014, pri čemer je realna vrednost sklada leta 2016 znašala 46 milijard dolarjev. To je sicer le del vsega proračuna zvezne agencije Department of Energy, ki je sicer odgovorna za vprašanje ravnanja z jedrskimi odpadki. Letni proračun te agencije se giblje med 26 in 34 milijard dolarjev, od katerih je trenutno zgolj 6 % namenjenih za investicije v proizvodnjo elektrike iz jedrskega goriva. Avtorji ocenjujejo, da je trenutno financiranje za ravnanje z jedrskimi odpadki v ZDA močno podhranjeno (Yano, Mao, Wharry & Porterfield, 2018, str. 475–476). Glede na sorazmerno kratko dobo obratovanja jedrskih elektrarn seveda ni povsem jasno, kakšni so dejanski dolgoročni stroški odlaganja jedrskih odpadkov, pa tudi stroški tveganj, povezanih z morebitno kontaminacijo okolja ali dolgoročno naložbeno politiko namenskih skladov.

2.3.4 Stroški razgradnje jedrskih elektrarn

Prve jedrske elektrarne so bile načrtovane za 30-letno obratovanje, kar se je kasneje z izboljšavami podaljšalo na 40 do 60 let, kakršna je pričakovana obratovalna doba današnjih elektrarn. Po tem času postane vzdrževanje jedrske elektrarne za proizvodnjo elektrike neekonomično in jo je zato treba zaustaviti. V nekaterih primerih pa se lahko zgodi, da je treba jedrsko elektrarno trajno zaustaviti tudi pred potekom obratovalne dobe zaradi izjemno hude okvare, politične odločitve ali kakega drugega vzroka. Po trajni zaustavitvi je treba jedrsko elektrarno, skupaj z lokacijo, na kateri stoji, narediti trajno neškodljivo za življenje v okolici. To je po opredelitvi Mednarodne agencije za jedrsko energijo (angl. International Atomic Energy Agency; v nadaljevanju IAEA) mogoče narediti na enega od naslednjih treh načinov (World Nuclear Association, 2019c):

- *takojšnja razgradnja*, pri kateri se popolna odstranitev kontaminiranega materiala in dekontaminacija zemljišča začne v nekaj mesecih ali letih po zaustavitvi jedrske elektrarne;
- *odložena razgradnja*, pri kateri se zaustavljena elektrarna varno zapre in varuje za dobo od 40 do 60 let, da se delno zmanjša stopnja radioaktivnosti pogonskih delov, popolna razgradnja pa se začne po tem obdobju;
- *zazidava*, pri kateri se najprej zmanjšajo zunanji gabariti elektrarne, nato se ta zapre z zunanjim ščitom, navadno iz betona, v katerem ostane toliko časa, da se notranja radioaktivnost zmanjša na raven, ki ni več nevarna za okolico.

Vsak od teh načinov ima svoje očitne prednosti in slabosti, izbira načina ali kombinacije različnih načinov pa je prepuščena državnim zakonodajalcem. Slovenija se je s Programom razgradnje, sprejetim leta 2004, na primer odločila za takojšnjo razgradnjo svoje jedrske elektrarne (Sklad za financiranje razgradnje NEK, brez datuma).

Glede na sorazmerno kratko obdobje delovanja komercialnih jedrskih elektrarn, je z njihovo razgradnjo sorazmerno malo izkušenj. Sredi leta 2018 je bilo po celem svetu trajno zaustavljenih 173 jedrskih reaktorjev, od katerih jih je bilo 115 v postopku razgradnje, le 19 pa že uspešno razgrajenih, od tega 13 v ZDA, pet v Nemčiji in eden na Japonskem (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 21). Povprečen čas razgradnje je bil 19 let, posamezne razgradnje pa so trajale od šest pa vse do 42 let. V nekaterih primerih je razgradnja torej trajala dlje od gradnje in delovanja jedrskega reaktorja (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 134).

Stroški razgradnje se od primera do primera razlikujejo. V ZDA je strošek razgradnje jedrskega reaktorja Fort St. Vrain, uspešno razgrajenega leta 1997, znašal 195 milijonov dolarjev, strošek razgradnje jedrske elektrarne Maine Yankee, uspešno razgrajene leta 2004, pa 500 milijonov dolarjev. V elektrarni Big Rock Point, razgrajeni leta 2006, je strošek znašal 836 milijonov dolarjev. V Nemčiji bo strošek razgradnje hitrega nevtronskega reaktorja KNK-2, predvidoma razgrajenega leta 2020, znašal 364 milijonov evrov. Prav tako imajo štiri izmed osmih jedrskih reaktorjev, zaprtih marca 2011 in s pričakovano dobo razgradnje 15 let, skupaj zbranih 38 milijard evrov za potrebe razgradnje in odlaganja jedrskih odpadkov. Na Japonskem naj bi razgradnja reaktorja Tokai 1, s pričetkom leta 2011, stala okoli 950 milijonov evrov, od česar bo predvidoma 38 % porabljenih za razgradnjo, preostanek pa za odlaganje jedrskih odpadkov (World Nuclear Association, 2019c).

Stroški razgradnje elektrarne in tudi stroški odlaganja jedrskih odpadkov spadajo med stroške delovanja jedrskih elektrarn. Načini pokrivanja stroška razgradnje se po državah nekoliko razlikujejo. V Sloveniji in večini držav jedrske elektrarne odvajajo del sredstev od prodaje v namenski zunanji ali interni sklad, v nekaterih posebnih primerih pa se stroški razgradnje lahko krijejo tudi iz državnega proračuna. Kljub temu da velja področje razgradnje za tehnološko in ekonomsko dobro proučeno, je treba zaradi sorazmerno majhnih izkušenj in dolgoročnih tveganj razgradnjo jedrskih elektrarn upoštevati kot tveganje pri proizvodnji elektrike iz jedrskega goriva.

2.4 Varnostni, okoljevarstveni in javnomnenjski vidik proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva

2.4.1 Mednarodni jedrski varnostni standardi

Zaradi varnostne in okoljske občutljivosti jedrske tehnologije je bila leta 1957, torej takoj po zagonu prvih komercialnih jedrskih elektrarn po svetu, ustanovljena IAEA, samostojna

agencija v okviru organizacije Združenih narodov. Agencija je bila namenjena podpori širjenja jedrske energije v miroljubne namene in uveljavitvi nabora splošnih varnostnih standardov na področju jedrske in sevalne varnosti (IAEA, 2019b), standardov na področju fizičnega varovanja jedrskih objektov (IAEA, 2019a) in drugih varnostnih priporočil. Po nekaterih odmevnih nesrečah v jedrskih objektih je agencija leta 1985 ustanovila še posebno posvetovalno telo, International Nuclear Safety Group (brez datuma), sestavljeno iz strokovnjakov za jedrsko varnost iz različnih držav, ki pripravlja priporočila, navodila in poročila o varnostnem stanju jedrskih objektov.

Približno v istem času je bila s podobnim namenom podpisana tudi Pogodba o ustanovitvi Evropske skupnosti za atomsko energijo (v nadaljevanju: EURATOM), ki je pričela veljati 1. januarja 1958 hkrati s Pogodbo o Evropski gospodarski skupnosti in h kateri so pristopile tudi vse kasnejše članice EU. Na podlagi pogodbe EURATOM je bila v okviru EU sprejeta vrsta direktiv in priporočil v zvezi z jedrsko varnostjo, varnostjo pred sevanji, ravnanjem z jedrskimi odpadki in drugimi področji, povezanimi z mirnodobno uporabo jedrske energije, ki zavezujejo države članice EU.

Za upravljanje z jedrsko tehnologijo, zagotavljanje standardov in nadzor nad njeno uporabo večina držav ustanovi posebno upravno agencijo. V Sloveniji je to Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost (URSJV), organ v sestavi Ministrstva za okolje in prostor (Uprava RS za jedrsko varnost, 2019).

2.4.2 Varnostni vidik proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva

Gradnja, oskrbovanje z gorivom, obratovanje in razgradnja jedrskih elektrarn so tehnološko zahtevni in varnostno občutljivi postopki. Tveganja, ki se pojavljajo v celotni proizvodni verigi pri proizvodnji elektrike iz jedrskega goriva, lahko razdelimo na tri področja (World Nuclear Association, 2019d):

- notranja tveganja,
- zunanja tveganja in
- tveganje uporabe jedrske tehnologije v vojaške namene.

Notranja tveganja so tveganja nepredvidenih dogodkov, do katerih lahko pride zaradi človeškega faktorja ali okvare materiala v vseh fazah proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva, od pridobivanja goriva do skladiščenja jedrskih odpadkov. Z namenom zmanjšanja notranjih tveganj so bili zapisani standardi, pravila in dobre prakse dosedanjih 17.000 reaktorskih let delovanja ter za njihovo uveljavljanje ustanovljene regulativne, upravne in nadzorne institucije. Najpogostejša posledica nepredvidenih dogodkov v vseh fazah proizvodnje so nehoteni izpusti radioaktivnega materiala in s tem povezane večje ali manjše negativne posledice na ljudeh in okolju.

Zunanja tveganja so nepričakovani naravni dogodki, denimo poplave ali potresi, dovolj veliki, da resneje poškodujejo jedrsko elektrarno, sabotaze in teroristični ali vojaški napadi,

zaradi katerih lahko pride do večjega izpusta radioaktivnega materiala v okolje. Standardi izgradnje zahtevajo, da so jedrske elektrarne načrtovane tako, da njihove konstrukcije zdržijo vse pričakovane naravne nesreče in da njihovi betonski oklepi vzdržijo izjemne pritiske, tudi nalete letal ali artilerijske izstrelke (World Nuclear Association, 2019d). Vsak jedrski objekt mora biti varovan s 24-urno oboroženo stražo in tehničnim varovanjem, prav tako so predpisani posebni, poostreni pogoji za kadrovanje osebja.

Vendar pa kljub vsem previdnostnim ukrepom lahko še vedno pride do nesreč z izpusti, kar je pokazala nesreča v jedrski elektrarni Fukušima Daiči leta 2011, kjer je zaradi cunamija prenehal delovati sistem hlajenja reaktorja. Jedrski objekti, podobno kot jezovi hidroelektrarn, tudi še vedno ostajajo realni cilji morebitnega vojaškega napada, zato ne glede na vse varnostne ukrepe pomenijo do neke mere grožnjo okolici.

2.4.3 Problematika uporabe jedrske tehnologije v vojaške namene

Uporaba jedrske tehnologije za pridobivanje elektrike in uporaba te tehnologije za izdelavo jedrskega orožja sta si, tehnološko gledano, dokaj podobni. Tehnologija za bogatenje urana, potrebna za izdelavo jedrskega goriva, se ne razlikuje kaj dosti od tehnologije za bogatenje urana za izdelavo jedrskih bomb. Zato ni presenetljivo, da so bile prve države, ki so začele uporabljati jedrsko tehnologijo za pridobivanje elektrike, prav države z jedrskim orožjem in da so nekatere države, denimo Jugoslavija in Južnoafriška republika, začele z energetskim jedrskim programom kot kritjem za tajni razvoj vojaškega jedrskega programa (Potter, Miljanic & Slaus, 2000; World Nuclear Association 2018c).

Iz tega razloga se je pobudi o širjenju jedrske energije v miroljubne namene v podobi IAEA v letu 1968 pridružila še Pogodba o neširjenju jedrskega orožja (angl. Nuclear Non-proliferation Treaty – NPT), s katero so želele takratne države z jedrskim orožjem, ZDA, Sovjetska zveza, Kitajska, Združeno kraljestvo in Francija, preprečiti uporabo jedrske tehnologije za izdelavo orožja in s tem širjenje jedrskega orožja na druge države. Pogodba namreč prepoveduje razvoj, uvoz in izvoz tehnologije za izdelavo jedrskega orožja pa tudi orožja samega v druge države. Pogodba je stopila v veljavo leta 1970 in je bila leta 1995 podaljšana za nedoločen čas. Trenutno ima pogodba 190 držav podpisnic, med katerimi pa, kar je pomembno, ni Izraela, Indije, Pakistana in Severne Koreje, ki so vse pridobile jedrsko orožje po letu 1970 in tako kršijo določila pogodbe. Določila pogodbe je občasno kršilo tudi nekaj podpisnic, zato se je pogodbi leta 1997 pridružil še posebni Dodatni protokol (angl. Additional Protocol), ki podeljuje inšpektorjem IAEA večja pooblastila. Poleg te pogodbe je s podobnim namenom podpisanih še več ločenih bilateralnih in multilateralnih dogovorov (World Nuclear Association, 2018e).

V dokaz spoštovanja pogodbe morajo vse države brez jedrskega orožja, ki uporabljajo jedrsko tehnologijo za pridobivanje elektrike, dovoliti strokovnjakom IAEA redne preglede svojih jedrskih objektov in voditi redna poročila o gibanju jedrskega materiala na svojih ozemljih. Enako velja za države z jedrskim orožjem, le da so pri teh objekti in jedrski

material, ki so kakorkoli povezani z vojaškim programom, izvzeti iz nadzora. Tudi Indija in Pakistan, ki sicer nista podpisnici pogodbe, pod posebnimi pogoji inšpektorjem IAEA dovoljujeta redne preglede svojih jedrskih elektroenergetskih objektov (World Nuclear Association, 2018e). Mednarodni nadzor nad delovanjem jedrskih elektrarn in drugih jedrskih objektov, ki se uporabljajo v miroljubne namene, je pomembna prvina pri odločanju o uporabi elektrike iz jedrskega goriva, saj lahko nespoštovanje teh pravil privede do resnih gospodarskih ali celo vojaških zapletov, kot je primer z Iranom in multilateralno pogodbo o iranskem jedrskem programu, JCPOA.

2.4.4 Okoljevarstveni vidik proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva

Jedrske elektrarne vplivajo na okolje na pet različnih načinov. Z oddajanjem toplogrednih plinov, izločanjem odvečne toplote, uporabo površine zemljišča, jedrskimi odpadki, ki nastajajo med delovanjem in ostanejo po razgradnji, ter z neželenimi izpusti radioaktivnih snovi v primeru nezgod ali nesreč.

Jedrske elektrarne spadajo med energetske objekte z nizkim ogljičnim odtisom, saj med proizvodnjo elektrike ne oddajajo toplogrednih plinov. Tudi če upoštevamo celotni življenjski cikel, jedrske elektrarne z ocenjeno povprečno količino toplogrednih plinov v višini 12 g CO₂ ekvivalenta na kWh proizvedene elektrike [ekv./kWh], skupaj z vetrnimi elektrarnami (morske povprečno 12 g CO₂ ekv./kWh in kopenske 11 g CO₂ ekv./kWh) s toplogrednimi plini najmanj onesnažujejo okolico. Povprečna količina izpuščenih toplogrednih plinov v življenjskem ciklusu za termoelektrarne na premog je denimo 820 g CO₂ ekv./kWh in za plinske 490 g CO₂ ekv./kWh (Schlömer in drugi, 2014, str. 1335).

Večina današnjih delujočih jedrskih elektrarn uporablja jedrske reaktorje 2. generacije, katerih toplotna učinkovitost je okoli 33-odstotna, kar pomeni, da morajo med delovanjem slabi dve tretjini proizvedene toplote izločiti v okolje. Odvečno toploto izločajo s hlajenjem z vodo, to pa v nadaljevanju hladijo bodisi s tekočo reko ali jezerom oziroma morjem, če so v bližini, bodisi z uporabo hladilnih stolpov, v katerih odvečno toploto z izparevanjem ali zračnim tokom odlagajo v ozračje (Murray & Holbert, 2015, str. 283–284). Količino odvečne toplote je sicer mogoče zmanjšati z njeno koristno uporabo, denimo za ogrevanje domov v bližini ali za preskrbo tovarn z industrijsko paro (tako imenovani CHP – Combined Heat and Power pogoni).

Odvajanje odvečne toplote samo po sebi okoljevarstveno sicer ni problematično, saj se hlajenje načrtuje tako, da njegov vpliv na okolje ne presega naravnega nihanja. Večje tveganje predstavlja že sama potreba po nenehnem hlajenju reaktorja, saj v primeru odpovedi hladilnih sistemov lahko pride do taljenja sredice in izpusta radioaktivnih snovi v okolico, kot se je na primer zgodilo v jedrski elektrarni Fukušima Daiči na Japonskem marca leta 2011. Zaradi pomanjkanja vode za hlajenje je zato včasih potrebno tudi zmanjševanje proizvodnje ali celo zaustavitev jedrskih elektrarn, kot na primer v Evropi ob vročinskem

valu leta 2006 (Jowit & Espinoza, 2006). Prav zaradi tega tveganja je prihajajoča 4. generacija jedrskih reaktorjev načrtovana s funkcijo t. i. pasivne varnosti, ki omogoča varno zaustavljanje reaktorja tudi v primeru nedelovanja zunanjega hlajenja.

Jedrske elektrarne imajo v primerjavi z drugimi vrstami elektrarn nižji okoljski odtis (Suman, 2018, str. 169). Okoljski odtis predstavlja površino zemljišča, ki ga elektrarna potrebuje za svoje delovanje. Tabela 6 prikazuje okoljski odtis različnih vrst elektrarn za proizvodnjo 1 TWh elektrike. Ta je za jedrske elektrarne daleč najnižji med vsemi vrstami elektrarn.

Tabela 6: Površina zemljišča v km², ki ga za proizvodnjo 1 TWh elektrike potrebuje posamezna vrsta elektrarne

Vrsta elektrarne	Površina zemljišča (v km²)
Na biomaso	95
Vodna (hidro)	50
Vetrna na kopnem	46
Solarna, fotovoltaična	5,7
Termalna, na premog	2,1
Plinska	1,1
Jedrska	0,1

Vir: Suman, 2018, str. 169

Okoljevarstveno bolj občutljiva posledica pridobivanja elektrike iz jedrskega goriva so jedrski odpadki in ostanki po razgradnji jedrske elektrarne. Trenutno velja kot najboljše dolgoročno odlagališče visoko radioaktivnih in dolgotrajno sevajočih srednje radioaktivnih odpadkov pečenje v globoke vrtine, medtem ko se za nizko in srednje radioaktivne odpadke predvideva odlaganje v plitkih podzemnih odlagališčih (World Nuclear Association, 2018a). Mnenja strokovnjakov in javnosti o dolgoročni trajnosti in varnosti teh odlagališč so deljena, zagotovo pa k negotovosti pripomore tudi dejstvo, da zaradi relativne kratkotrajnosti te tehnološke panoge ni dovolj izkušenj z dolgoročnim ravnanjem z radioaktivnimi ostanki.

Najbolj problematični pa so zagotovo izpusti radioaktivnih snovi v primeru nezgod ali nesreč v jedrskih elektrarnah. Ti nehoteni izpusti z zelo dolgotrajnim in težko popravljivim škodljivim vplivom na okolje igrajo eno pomembnejših vlog pri vladnih odločitvah in javnem mnenju glede jedrske tehnologije, kar bo podrobneje prikazano v naslednjih poglavjih.

2.4.5 Vladne politike glede proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva

Vladna energetska politika je pomembna prvina pri odločitvi za gradnjo elektrarn, pri jedrskih elektrarnah pa celo bistvena, saj se brez izrecne vladne usmeritve takega energetskega objekta ne da umestiti v prostor. Vladne politike odražajo državno ekonomsko in varnostno strategijo, v zadnjih letih pa na njih najmočneje vplivajo predvsem javnomnenjski in okoljevarstveni pritiski, kar je še posebej izrazito ob sicer redkih, a odmevnih nesrečah v jedrskih elektrarnah.

Za proizvodnjo elektrike iz jedrskega goriva so se najprej in najbolj zavzeto odločale predvsem države, ki so že imele vojaški jedrski program ali so ga želele vzpostaviti. Zato ni nepričakovano, da so jedrski energiji še danes najbolj naklonjene oblasti v državah z vojaškimi jedrskimi zmogljivostmi, kot sta ZDA ali Združeno kraljestvo, kjer država z namenom pretoka znanja med civilnim in vojaškim jedrskim področjem subvencionira tudi civilne jedrske projekte (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 21).

Pomembna prvina vladnih odločitev za večjo uporabo elektrike iz jedrskega goriva v nekaterih državah, denimo v Franciji in na Japonskem, je tudi odsotnost drugih energetskih virov, saj je zaradi majhne potrebne količine goriva jedrska tehnologija najmanj občutljiva na morebitne energetske šoke in posledične probleme s preskrbo.

V zadnjih letih je razprava o globalnem segrevanju postavila v ospredje visoke emisije energetskih objektov na fosilna goriva, kar je navedlo vlade v mnogih državah k spremembam energetske politike v smeri večje uporabe obnovljivih virov. Kljub majhnemu ogljičnemu odtisu jedrskih elektrarn se iz okoljevarstvenih razlogov mnoge države v svojih energetskih politikah odločajo predvsem za spodbujanje investicij v vetrno in solarno energijo, tako da je, denimo, v devetih od 31 držav z elektrarnami na jedrsko gorivo v letu 2017 delež elektrike iz obnovljivih virov presegal delež elektrike iz jedrskega goriva (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 22). K temu trendu je izdatno pripomoglo tudi javno mnenje.

2.4.6 Javno mnenje in jedrske elektrarne

Nasprotovanje jedrski tehnologiji se je začelo pojavljati že v 50. letih prejšnjega stoletja najprej v ZDA, kasneje pa se je razširilo tudi na druge države. Sprva je bilo usmerjeno predvsem proti jedrskemu oboroževanju, po prepovedi zračnih jedrskih poskusov leta 1963 pa se je preusmerilo tudi na pridobivanje energije. Razlogi za javno nasprotovanje jedrski tehnologiji so bili različni, od splošnega protivojnega razpoloženja preko okoljskega postmaterialističnega gibanja in protivladnega razpoloženja do strahu pred tehnologijo in morebitnimi posledicami zaradi njenega nepoznavanja, pa tudi zaradi velikih razhajanj v mnenjih med znanstveniki (Murray & Holbert, 2015, str. 117).

Na javno mnenje, posledično pa tudi na državne energetske politike, so še posebno močno vplivale odmevnejše nesreče v jedrskih elektrarnah. Po prvi večji nesreči v jedrski elektrarni, ki se je zgodila leta 1979 v ZDA v jedrskem reaktorju Otok treh milj, je bilo v ZDA in po svetu organiziranih več velikih in odmevnih protestov proti gradnji novih jedrskih elektrarn in proti jedrski tehnologiji nasploh (Fortuna, 2011). Po tej nesreči se je ugled jedrske tehnologije za pridobivanje energije v svetovni javnosti močno zamajal in tako so na Švedskem leta 1980 na referendumu sprejeli odločitev o postopni ukinitvi jedrskega energetskega programa do leta 2010, kar pa so leta 1997 delno in leta 2010 v celoti preklicali (World Nuclear Association, 2018c).

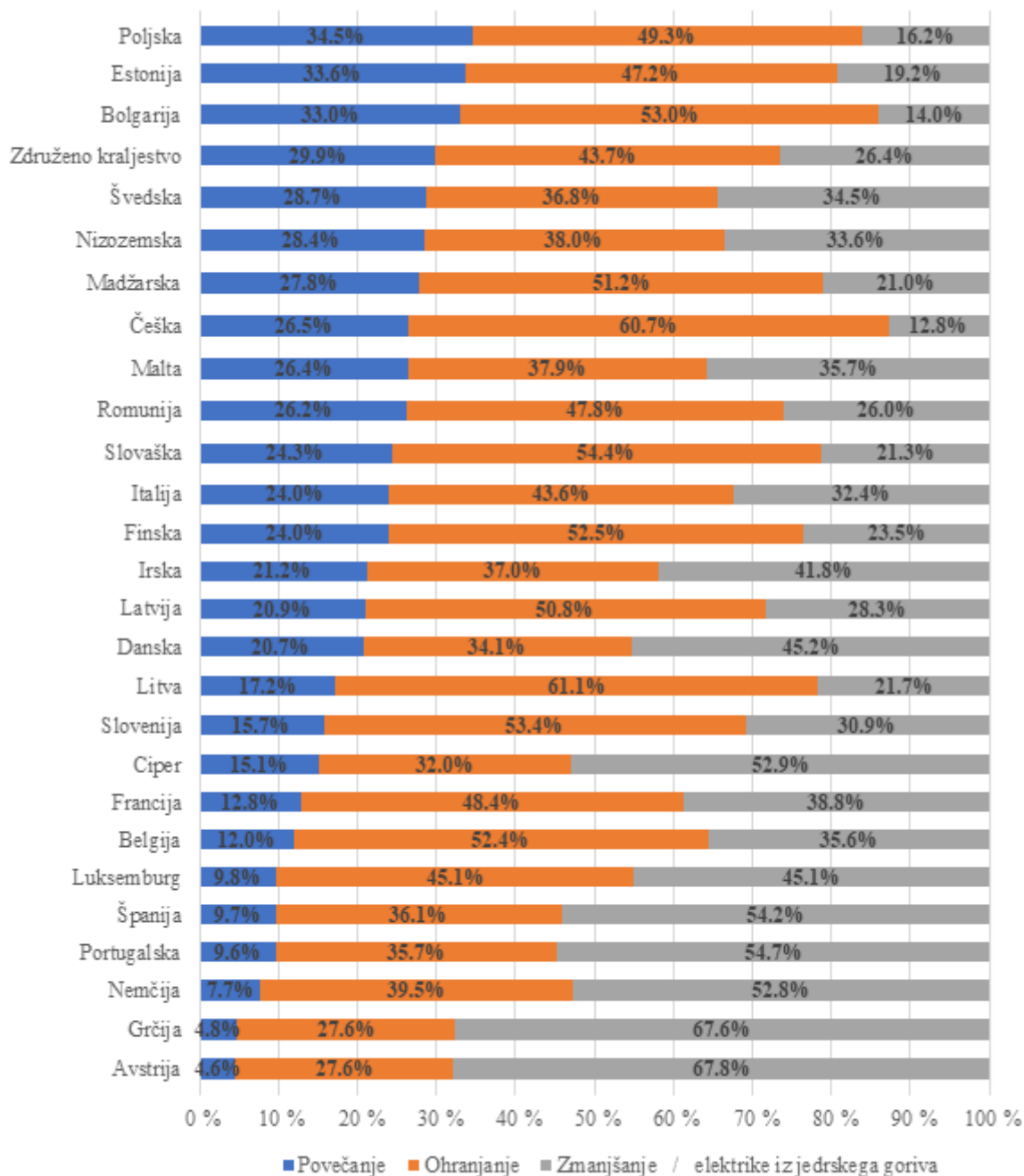
Precej hujše posledice učinka na državne energetske politike so se zgodile po nesreči aprila leta 1986 v 4. reaktorju elektrarne Černobil, doslej največji nesreči v kateri od jedrskih elektrarn glede količine izpusta radioaktivnega materiala. V Italiji so novembra naslednjega leta izvedli referendum, s katerim je bila sprejeta odločitev o popolni opustitvi pridobivanja elektrike iz jedrskega goriva v tej državi, na podlagi katere so ustavili gradnjo ene jedrske elektrarne, delujoče elektrarne pa zaustavili do leta 1990 (World Nuclear Association, 2018c). V Švici so z referendumom leta 1990 uveljavili desetletni moratorij na gradnjo jedrskih elektrarn (Damiano, Herdegen, Lower, Mulholland & Sumpter, 2014), v več vzhodnoevropskih državah so prekinili gradnjo elektrarn z reaktorji tipa RBMK, torej enakega tipa, kot je bil poškodovani černobilski reaktor. V letih 1984 in 1985 je začelo obratovati rekordno število novih reaktorjev (po 33), ta številka pa je po letu 1986 začela naglo upadati (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 30).

Podobna zgodba se je ponovila leta 2011 po hudi nesreči v jedrski elektrarni Fukušima Daiči zaradi cunamija. Po svetu so se zvrstili številni protesti, največji na Japonskem (Dickie, 2012), v Nemčiji (Brown, 2011) in Švici (Associated Press, 2011). Pod pritiskom javnega mnenja je vlada sprejela sklep o zaustavitvi vseh jedrskih reaktorjev v Nemčiji do leta 2022 (Breidhardt, 2011), v Italiji so na referendumu junija 2011 zavrnil vladni predlog o ponovni gradnji jedrskih reaktorjev (World Nuclear Association, 2018c), v Švici pa je parlament sprejel zakon o prepovedi gradnje novih reaktorjev, kar je bilo leta 2017 potrjeno tudi na referendumu (World Nuclear Association, 2018c). Japonska vlada je julija 2011 ustanovila posebno posvetovalno telo, ki je septembra 2012 izdelalo načrt o postopni opustitvi proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva na Japonskem do leta 2030 (Energy and Environment Council, 2012, str. 2).

Sprejetost jedrske tehnologije za pridobivanje elektrike v javnosti je posledica odnosa posameznika in odnosa države do te tehnologije. Na osebni ravni se odnos oblikuje predvsem na podlagi razmerja med pričakovanim tveganjem in koristmi od tehnologije, zaupanja v oblast in institucije ter ravni poznavanja same tehnologije. Na državni ravni pa se odnos oblikuje predvsem na podlagi energetskega stanja države, odnosa države do okolja ter kulturno-političnega in ekonomskega stanja v državi (Wang & Kim, 2018, str. 5, 6). Rezultati raziskave, ki je bila narejena na podlagi odgovorov anketirancev za Eurobarometer septembra in oktobra 2009, so prikazani na sliki 7, kjer vidimo, da se odnos do elektrike iz jedrskega goriva med prebivalci evropskih držav močno razlikuje. Tej obliki energije so bolj

naklonjeni na vzhodu in v Združenem kraljestvu, najmanj pa v Avstriji in Grčiji. Slovenija se nahaja nekje na sredini s sorazmerno velikim deležem populacije, ki je naklonjena ohranitvi trenutne ravni preskrbe z elektriko iz jedrskega goriva.

Slika 7: Odnos do elektrike iz jedrskega goriva v evropskih državah leta 2009



Vir: Wang & Kim, 2018, str. 8

Raziskovalna hiša WIN-Gallup International je leta 2011 po jedrski nesreči na Japonskem izvedla anketo v 47 državah, s katero je želela ugotoviti razliko v sprejemanju jedrske tehnologije za pridobivanje elektrike v primerjavi s stanjem pred nesrečo. V anketi je bilo ugotovljeno, da je neto sprejetost (razlika med zagovorniki in nasprotniki) jedrske tehnologije v anketiranih državah padla s prejšnjih 25 % na 6 %, a je kljub nesreči ostala

pozitivna z 49 % zagovornikov in 43 % nasprotnikov (WIN-Gallup International, 2011, str. 2). Rezultati ankete za nekaj držav so prikazani v tabeli 7.

Tabela 7: Odnos do jedrske energije pred nesrečo v JE Fukušima Daiči in po njej

Država	Pred nesrečo			Po nesreči		
	Pozitivno*	Negativno*	Razlika**	Pozitivno*	Negativno*	Razlika**
Avstrija	13	87	-74	9	90	-81
Belgija	43	46	-3	34	57	-23
Češka	63	31	32	61	34	27
Finska	58	38	20	52	44	8
Francija	66	33	34	58	41	16
Grčija	12	86	-74	10	89	-79
Indija	58	17	41	49	35	13
Irska	34	61	-27	30	67	-37
Italija	28	71	-43	24	75	-51
Japonska	62	28	34	39	47	-7
Kitajska	83	16	67	70	30	40
Nemčija	34	64	-30	26	72	-46
Nizozemska	51	43	8	44	50	-6
Poljska	36	41	-5	30	50	-20
Rusija	63	32	31	52	27	25
Španija	39	42	-3	41	44	-3
Švica	40	56	-16	34	62	-28
ZDA	53	37	16	47	44	3

Legenda: * Pozitivni in negativni odnos sta podana v odstotkih.

** Razlika je podana v odstotnih točkah.

Vir: WIN-Gallup International, 2011, str. 9–10

2.5 Posebnosti trgovanja z elektriko iz jedrskega goriva v elektroenergetskem sistemu

Podrobnosti strategije trgovanja z elektriko iz jedrskega goriva so poslovna skrivnost posameznih proizvajalcev in trgovcev, vendar lahko nekatere splošne značilnosti strategij izluščimo iz posrednih virov. Na razvitih in liberaliziranih elektroenergetskih trgih lahko proizvajalci in trgovci izbirajo med prodajo na energetskih borzah, kakršna je BSP (Predstavitev trgovanja, brez datuma), na zunajborznih trgih (angl. Over-the-counter) s pomočjo energetskih posrednikov ali brokerjev, kakršen je 42 Financial Services (Energy Broker, brez datuma), ali v obliki bilateralnih dogovor neposredno med prodajalcem in kupcem, kakršen je PPA.

Prva posebnost trgovanja se nanaša na enakomerno proizvodnjo elektrike iz jedrskega goriva, ki je natančno napovedljiva, ni pa prilagodljiva z vidika možnosti uravnavanja. V času majhnega povpraševanja ali presežne ponudbe lahko elektrika doseže zelo nizke, celo negativne cene, zato je za trgovce elektrike iz jedrskega goriva bolj smiselno le-to prodajati v obliki dolgoročnih pogodb, navadno letnih, s čimer zmanjšajo vplive urnega nihanja tržnih cen elektrike in tveganja negativnih marž v posameznih urah. Še vedno pa obstaja tveganje tržne volatilitnosti, zato je treba poiskati pravi trenutek za prodajo na trgu, kar pomaga še zagotoviti najvišjo maržo na prodano proizvodnjo. Visoka volatilitnost in nestabilna cena elektrike sta še posebej izraziti v elektroenergetskih sistemih z visokim deležem obnovljivih virov, ki zaradi nepredvidljive proizvodnje in nizkih marginalnih stroškov močno dvigajo volatilitnost (von Selasinsky, 2016, str. 4–8).

Da bi se trgovci izognili tržnim nihanjem, pogosto prodajajo elektriko v obliki PPA. To potrjuje tudi analiza Congressional Research Service (2016), ki dokazuje, da trgovci v želji po zmanjševanju cenovnih tveganj sodelovanja na trgu sklepajo take dogovore, in navaja, da vsaj šest jedrskih elektrarn v ZDA proda celotno svojo proizvodnjo ali njen del v obliki takih dogovorov. V nekaterih primerih se dolgoročni dogovori o nakupu elektrike sklepajo že med gradnjo elektrarne. V Združenih arabskih emiratih sta podjetje Barakah One, ki gradi prvo jedrsko elektrarno na Arabskem polotoku, in državni distributer elektrike Združenih arabskih emirатов ADWEC sklenila PPA za dobavo elektrike iz elektrarne, ki bo predvidoma zgrajena v letu 2020 (Staff Report, 2016).

V Franciji lastnik vseh jedrskih elektrarn, državni proizvajalec Électricité de France, po veljavnih tržnih pravilih dobaviteljem in trgovcem letno proda 100 TWh elektrike iz jedrskega goriva, to je približno 25 % proizvodnje oziroma 18 % francoske letne porabe elektrike (Felix & Mallet, 2019). Elektriko prodaja po vnaprej dogovorjeni ceni, in sicer z namenom stabiliziranja državnih cen elektrike. Zaradi nevarnosti zviševanja cen elektrike v Evropi si konkurenčna podjetja in industrijski lobiji prizadevajo za dvig količine fiksno prodane elektrike na vsaj 200 TWh, kar bi po njihovem mnenju pomagalo pri zaščiti potrošnikov.

Druga posebnost, ki vpliva na trgovanje te elektrike, je ničen izpust toplogrednih plinov pri njeni proizvodnji. Od leta 2005 Evropska unija (v nadaljevanju EU) uvedla tako imenovani EU Emissions Trading System (v nadaljevanju EU ETS), prvi in za zdaj daleč največji tržni sistem omejevanja izpusta toplogrednih plinov na svetu (European Commission, 2016, str. 2), morajo termoelektrarne na plin in premog kupovati kupone EU ETS za izpust toplogrednih plinov ter stroške za njihov nakup prištevati k lastni ceni elektrike. Sprva so bili kuponi za dovoljeno količino izpustov razdeljeni brezplačno, od leta 2013 naprej pa morajo termoelektrarne v EU kupovati vse kupone na dražbah in na sekundarnem trgu z izjemo osmih vzhodnoevropskih držav, v katerih imajo do leta 2019 za del izpustov še na voljo brezplačne kupone (European Commission, 2016, str. 3).

Cena kuponov EU ETS na sekundarnem trgu se hitro spreminja, zato je postala tudi cena elektrike iz termoelektrarn na fosilna goriva, ki je sicer namenjena pokrivanju osnovne

obremenitve, dolgoročno precej nepredvidljiva. Na sliki 8 je prikazano gibanje cen kuponov EU ETS od leta 2013 do februarja 2019. Krivulja prikazuje visoko cenovno volatilnost in splošni trend naraščanja cen kuponov. Po letu 2013 je ta znašala manj kot 5 evrov na tona izpusta CO₂, ob koncu leta 2019 pa je ta narasla na več kot 20 evrov na tona. Elektrarnam na jedrsko gorivo v primerjavi s fosilnimi termoelektrarnami ni treba kupovati kuponov, zato je cena njihove elektrike v EU dolgoročno stabilnejša, kar jim zagotavlja tudi dolgoročno konkurenčno prednost na trgu elektrike. Poleg EU tudi nekatere druge države pripravljajo podobne sisteme, instrumente ali davke, ki bi lahko predstavljali dodatno prednost investicijam energetskih objektov z nizkim ogljičnim odtisom (Climate Policy Info Hub, brez datuma)

Slika 8: Cena kuponov EU ETS na borzi EEX od leta 2013 do 2019



Vir: EEX Group, EU Emission Allowances | Secondary Market, 2019

2.6 Pregled značilnosti proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva in pregled SWOT analize

Jedrske elektrarne lahko opišemo kot:

- termoelektrarne na neobnovljive vire,
- z majhno emisijo toplogrednih plinov,
- regijske ali meddržavne velikosti,
- namenjene pokrivanju osnovne obremenitve.

Tehnično gledano jedrske elektrarne proizvajajo elektriko s pomočjo generatorjev, ki jih ženejo turbine, te pa poganja para, katero na delovno temperaturo ogreva toplota, ki nastaja ob razpadu atomskih jeder jedrskega goriva, pridobljenega bodisi iz uranovega izotopa U-235, bodisi (redkeje) iz plutonijevega izotopa Pu-239. Zaradi fizikalnih zakonitosti nadzorovane verižne jedrske reakcije je reguliranje izhodne moči jedrske elektrarne

dolgotrajno in drago, zato je za jedrske elektrarne optimalno, da v rednem režimu delovanja delujejo z nespremenjeno močjo pri nazivni zmogljivosti ali tik pod njo. Če k temu prištejemo še dejstvo, da je zaradi visokih investicijskih in varnostnih stroškov ter stroškov odlaganja jedrskih odpadkov in razgradnje ekonomsko upravičena le gradnja sorazmerno velikih jedrskih elektrarn, je logično, da so te namenjene predvsem pokrivanju osnovne obremenitve, oziroma t. i. »obratovanju v pasu«.

Enakomerna in stalna dobava elektrike iz jedrskega goriva ima svoje prednosti in slabosti. Prednost s stališča gospodarstva je zagotovo zanesljiva in stalna oskrba z elektriko, slabost s stališča elektroenergetskega sistema pa bi lahko bila, da bi bilo treba v času majhnega povpraševanja (vikendi, prazniki, visok vodostaj ipd.) viške elektrike oddajati v omrežje za zelo nizko ali celo negativno ceno. Prav zato je elektrika iz jedrskega goriva bolj primerna za dolgoročno prodajo in ne za dnevno trgovanje.

Značilnost elektrike iz jedrskega goriva je sorazmerno nizka proizvodna cena, ob upoštevanju nekaterih predpostavk, in nizka občutljivost cene proizvedene elektrike na spremembo cene goriva. Posebnost jedrskih elektrarn z ekonomskega stališča je ta, da je treba še sorazmerno dolgo po prenehanju delovanja skrbeti za jedrske odpadke, ki nastajajo med delovanjem in ob razgradnji. Za financiranje trajnega odlaganja jedrskih odpadkov se trenutno po svetu uporabljajo različne rešitve, ki sicer uspešno opravljajo svojo nalogo, a trajno odlaganje in/ali nevtralizacija jedrskih odpadkov za zdaj še nista dokončno rešeni vprašanji.

V primerjavi z drugimi vrstami elektrarn jedrske elektrarne ustvarijo več bolj zahtevnih in boljše plačanih delovnih mest. V ZDA posamezna elektrarna zaposluje med 400 in 700 ljudi, ki prejemajo 36 % višje plačilo glede na povprečje lokalne skupnosti (Nuclear Energy Institute, brez datuma).

Jedrske elektrarne spadajo med proizvodne obrate z nizkim ogljičnim odtisom oziroma nizko emisijo CO₂ in drugih toplogrednih plinov. Tudi z vidika okoljskega odtisa jedrske elektrarne za svoje delovanje potrebujejo najmanjšo površino zemljišča v primerjavi z drugimi vrstami elektrarn. S stališča vpliva na okolje sta sicer največja problema jedrskih elektrarn vprašanje odlaganja jedrskih odpadkov in okoljski vpliv morebitnih nesreč. Problem nesreč v jedrskih elektrarnah kljub tehnološkemu napredku, ki zmanjšuje njihovo verjetnost in obseg, ostaja odprt, saj nevarnosti radioaktivne kontaminacije širšega okolja ob morebitnih nesrečah nikakor ni mogoče izključiti. Zaradi tovrstne občutljivosti za okolje so jedrske elektrarne tudi umeščene visoko na seznam potencialnih tarč terorističnih ali vojaških napadov. Vprašanje varnosti in odlaganja radioaktivnih odpadkov sta po svetu tudi glavni povod za odpor javnosti in politike do te tehnologije.

Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva se srečuje tudi s priložnostmi, ki bi lahko izboljšale njen položaj. Vzpostavljena mreža vladnih in nevladnih organizacij skrbi za razvoj področja jedrske varnosti. Nadalje teoretična odkritja in praktični prijemi izboljšujejo perspektive spopadanja s problemom odlaganja jedrskih odpadkov. Nekateri novejši tržni mehanizmi, med katere spada PPA, lastnikom elektrarn omogočajo zagotovitev dolgoročnega

financiranja in pomagajo pri cenovni zaščiti pred tržno volatilnostjo. Na konkurenčnost elektrike iz jedrskega goriva negativno vplivajo tudi visoki investicijski stroški, pogosti presežki teh investicijskih stroškov in prekoračitve rokov pri gradnji jedrskih elektrarn. Kot možno rešitev tega problema se razmišlja o tovarniški oz. modularni izdelavi reaktorjev, o čemer je več zapisano v poglavju 3.5.

Povzetek zgoraj napisanega o značilnostih proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva je v obliki SWOT analize prikazan v tabeli 8.

Tabela 8: SWOT analiza proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva

Prednosti:	Slabosti:
<ul style="list-style-type: none"> • Stabilnost in zanesljivost proizvodnje, • nizki stroški proizvodnje, • nizek ogljični odtis, • nizka občutljivost na cene jedrskega goriva in • nizek okoljski odtis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visoki investicijski stroški, • razgradnja in odlaganje jedrskih odpadkov, • hude posledice nesreč, • strah in nasprotovanje pri ljudeh in • nizka/negativna cena elektrike v času majhnega povpraševanja.
Priložnosti:	Nevarnosti:
<ul style="list-style-type: none"> • Povečanje varnosti delovanja JE, • izboljšanje tehnologij za trajno odlaganje jedrskih odpadkov, • optimiziranje mehanizmov trgovanja z elektriko in • tovarniška izdelava rektorskih delov. 	<ul style="list-style-type: none"> • Možni cilj terorističnega/vojaškega napada, • prekoračitev rokov pri gradnji in • presežki pričakovanih investicijskih stroškov.

Vir: lastno delo

3 PERSPEKTIVA PROIZVODNJE ELEKTRIKE IZ JEDRSKEGA GORIVA

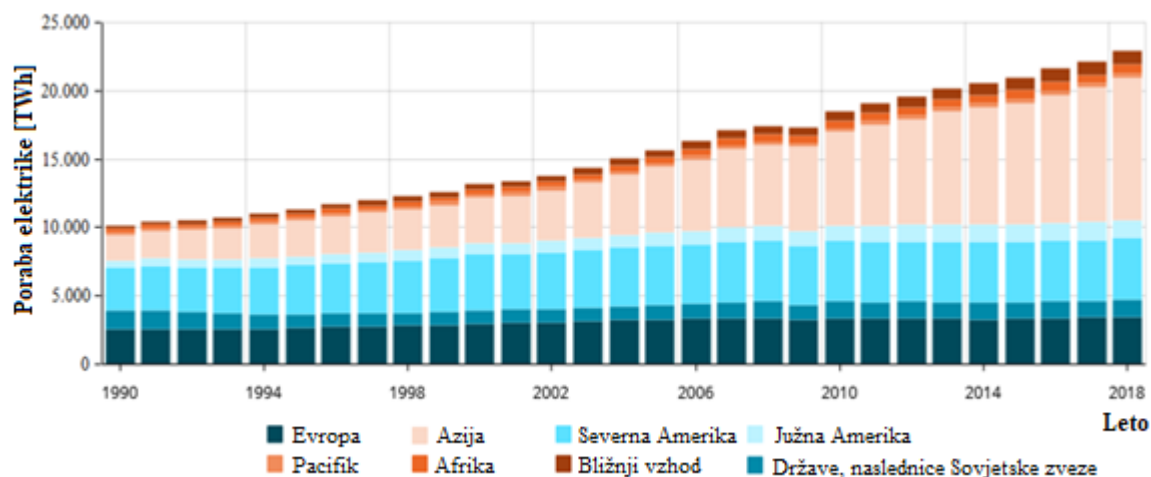
3.1 Gibanje porabe elektrike

3.1.1 Trenutno stanje porabe elektrike v svetu in Sloveniji

Poraba elektrike po svetu vztrajno narašča in se je od leta 1990 do 2018 povečala z 10.135 TWh na 22.964 TWh oziroma za 126,5 %, s povprečno stopnjo rasti skoraj 3 % letno. Največji doprinos k svetovni rasti porabe je prispevala Azija, kjer se je poraba v tem obdobju zvišala s 1908 TWh na 10.446 TWh oziroma za skoraj štirikrat in pol. V tem časovnem

obdobju je bil zabeležen le en padec letne svetovne porabe elektrike, in sicer leta 2009, ko je poraba zaradi padcev v Severni Ameriki, Evropi in državah, naslednicah Sovjetske zveze, zdrsnila za 0,69 % v primerjavi z letom prej kot posledica zmanjšanja proizvodnje zaradi svetovne finančne in gospodarske krize leta 2008. Gibanje porabe elektrike od leta 1990 do leta 2018, razdeljeno po posameznih geografskih območjih, prikazuje slika 9 (Enerdata, 2019).

Slika 9: Poraba elektrike v svetu od 1990 do 2018 v TWh



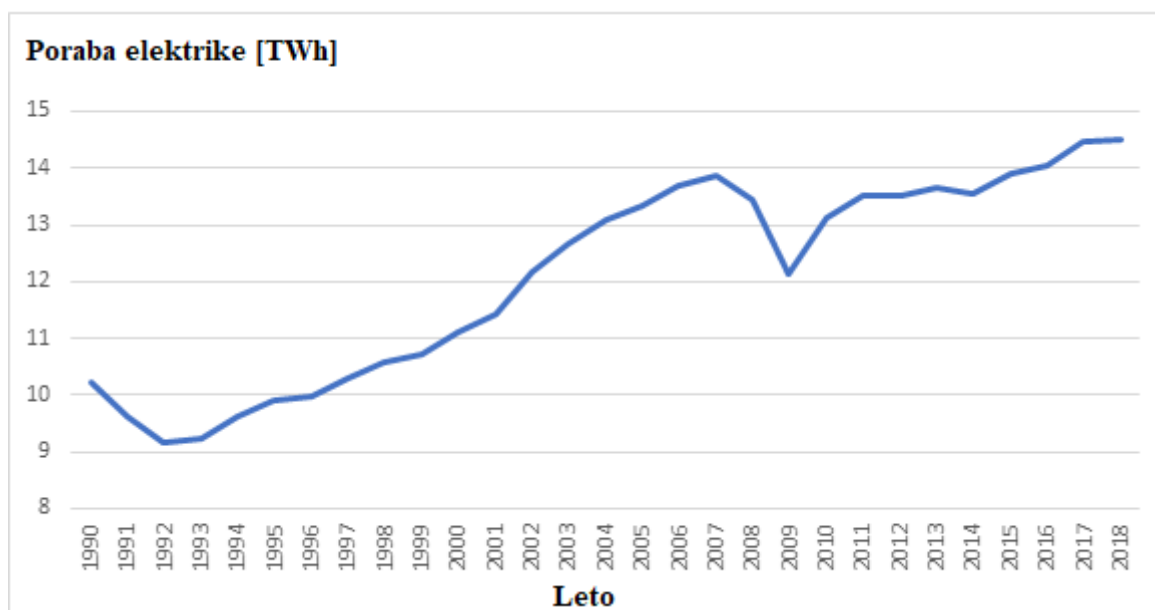
Vir: Enerdata, 2019

V obdobju od leta 2010 do 2018 so bile gonilo rasti porabe elektrike države BRICS, torej Brazilija, Rusija, Indija, Kitajska in Južnoafriška republika, ki so skupaj k rasti svetovne porabe prispevale 72 %. Med temi državami izstopa predvsem Kitajska, katere poraba elektrike je od leta 1990, ko je znašala 534 TWh, in do leta 2018, ko je znašala 6167 TWh, narasla za več kot desetkrat in pol ali letno v povprečju za 9,14 %. Kitajska je danes daleč na prvem mestu med državami po porabi elektrike in presega porabo v ZDA, ki zaseda drugo mesto, za več kot polovico (Enerdata, 2019).

Na Bližnjem vzhodu je v tem obdobju poraba zrasla z 213 na 997 TWh ali za 368,08 %, v Afriki z 263 na 696 TWh ali za 164,64 %, v Latinski Ameriki s 507 na 1338 TWh ali za 163,91 %, v pacifiških državah s 165 na 276 TWh ali za 67,27 %, v Severni Ameriki s 3146 na 4499 TWh ali za 43,01 % in v Evropi z 2516 na 3411 TWh ali za 35,57 %. V državah, naslednicah Sovjetske zveze je v tem obdobju poraba elektrike padla s 1417 na 1301 TWh, kar predstavlja 8,19-odstotni padec (Enerdata, 2019).

V tem času je poraba elektrike v Sloveniji zrasla z 10,23 na 14,5 TWh, oziroma za 41,79 %. Porabo elektrike v Sloveniji je med letoma 1990 in 2018 prikazuje slika 10. Na krivulji porabe sta jasno razvidna padca zaradi zmanjšanja gospodarske aktivnosti v letih po osamosvojitvi in po izbruhu svetovne finančne in gospodarske krize leta 2008. V letih 1992–2007 je poraba rastle v povprečju 2,8 % letno, v letih 2009–2018 pa po povprečni letni stopnji 2 %.

Slika 10: Poraba elektrike v Sloveniji od leta 1990 do 2018



Vir: Portal Energetika, brez datuma a

Leta 2018 so od 14,5 TWh 78,43 % ali 11,37 TWh porabili distribucijski odjemalci, 2 TWh ali 13,76 % neposredni odjemalci in zaprti distribucijski sistemi, 252 GWh ali 1,74 % črpalna hidroelektrarna, preostanek pa je odpadel na izgube na omrežjih. Od leta 1990 do 2018 se je odjem distribucijskih odjemalcev povečal s 6,81 na 11,37 TWh ali za 66,98 %, neposredni odjem pa je v tem obdobju padel z 2,62 na 2 TWh ali za 23,88 % (Portal Energetika, brez datuma a).

3.1.2 Nekateri izzivi pri ugotavljanju rasti porabe elektrike

Pri napovedovanju gibanja porabe elektrike v svetu v prihodnjih desetletjih je treba upoštevati dva nasprotujoča si faktorja. Prvi je rast porabe zaradi gospodarske rasti in rasti porabe gospodinjstev v državah v razvoju oziroma zaradi zamenjave drugih energentov z elektriko (npr. pri transportu, za ogrevanje stanovanj) v razvitih državah. Drugi pa je padec porabe zaradi čedalje učinkovitejših električnih naprav, varčevanja in prehoda z industrijske v postindustrijsko storitveno družbo.

Če je še do nedavnega držalo, da sta gibanji porabe elektrike in bruto domačega proizvoda med seboj odvisni, pa to v zadnjih dveh desetletjih za razvita gospodarstva ne velja več (IEA, 2018b, str. 287). Kar 18 od 30 članic IEA (članic OECD) je namreč po podatkih te agencije v letih 2000–2017 zabeležilo padec porabe elektrike, predvsem zaradi učinkovitejše uporabe elektrike, saj naj bi po ocenah IEA (2018b, str. 286) razvite države v tem obdobju prihranile do 1800 TWh ali okoli 20 % vse porabljene elektrike. Podobno je tudi v državah v razvoju,

le da je bil tam prihranek več kot kompenziran z rastjo porabe v industriji in gospodinjstvih (IEA, 2018b, str. 288).

Podobna gibanja naj bi se nadaljevala tudi v naslednjih desetletjih. Ameriški Institute for Electric Efficiency (IEE, 2013, str. 1) v svoji študiji ugotavlja, da naj bi do leta 2035 na račun izboljšanja gradbenih in elektrotehniških standardov ter varčevalnih programov prihranek porabe elektrike v ZDA znašal od 15 do 23 %, odvisno od agresivnosti uvajanja teh ukrepov. Tudi IEA (2018b, str. 328) v svoji projekciji ugotavlja, da naj bi poraba elektrike v razvitih državah do leta 2040 zaradi učinkovitosti in varčevanja pa tudi deindustrializacije rasla zelo počasi, tako da bi kar 90 % rasti porabe v tem obdobju ustvarile države v razvoju.

Že gibanje porabe pri trenutnih glavnih uporabnikih je dokaj težko predvideti, še precej težje pa je napovedovati porabo potencialnih novih uporabnikov, ki bi v prihodnjih letih zamenjali druge energente z elektriko, na primer v transportu, za ogrevanje stanovanj ali v industriji. Zaradi teh nejasnosti se napovedi navezujejo na potencialne scenarije in se zato med sabo precej razlikujejo. IEA (2018b, str. 387, 528, 529) v okviru štirih različnih scenarijev za leto 2040 navaja ocene porabe elektrike, ki se gibljejo od 37.100 do 42.700 TWh.

3.2 Odnos politike in javnosti do proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva

3.2.1 Stanje in projekcije proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v razvitih državah

ZDA proizvedejo daleč največ elektrike iz jedrskega goriva na svetu. Delež oskrbe v zadnjih letih je stabilen pri okoli 20 %, trenutna administracija pa aktivno zagovarja uporabo termoelektrarn na jedrsko gorivo in premog zaradi zagotavljanja stabilnosti omrežja in zaposlitev kljub njihovi slabši rentabilnosti in povečanem vstopu novih, obnovljivih virov (World Nuclear News, 2018). Zaradi državne podpore v obliki subvencij in garancij bodo obnovili nekaj starih reaktorjev, a razmerje med pričakovanimi novogradnjami in zaprtji jedrskih reaktorjev nakazuje, da bosta proizvodnja in delež elektrike iz jedrskega goriva v ZDA v naslednjih letih nazadovala (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 100–105).

Francija, druga največja proizvajalka in obenem država z največjim, 71,6-odstotnim deležem elektrike iz jedrskega goriva na svetu, je že pred časom sprejela načrt, da zmanjša ta delež s takratnih 75 na okoli 50 % do leta 2025 (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 60). Rok je bil za vlado prekratek, zato je konec leta 2018 sprejela sklep, da se ta rok podaljša do leta 2035 (Louet, White & Evans, 2018).

V Južni Koreji, peti državi na svetu po količini proizvedene elektrike iz jedrskih elektrarn, delež elektrike iz tega vira pada že od leta 1987. Vlada se je leta 2017 na podlagi ankete, ki

jo je opravila neodvisna komisija, odločila, da dokonča gradnjo nekaterih že začetih jedrskih reaktorjev, potem pa se v Južni Koreji preneha z gradnjo jedrskih objektov in se po poteku operativne dobe delujočih reaktorjev ta tehnologija opusti (Jang, 2017; World Nuclear News, 2017).

Kanada je kot šesta največja proizvajalka na svetu v svojih 19 jedrskih reaktorjih leta 2017 proizvedla 14,6 % svoje elektrike, kar je 4,5 odstotne točke manj od največjega deleža, ki ga je dosegla leta 1994 (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 209). Po projekciji iz leta 2017 v Kanadi do leta 2040 ne nameravajo graditi novih jedrskih kapacitet, tako da se bo ta delež zmanjšal pod 12 % (National Energy Board, 2017, str. 48–50).

Nemčija je v letu 1997 proizvedla 30,8 % svoje elektrike v jedrskih elektrarnah, po nesreči v jedrski elektrarni Fukušima Daiči leta 2011 pa je vlada zaradi pritiska javnosti sprejela odločitev o popolni opustitvi jedrske tehnologije. V letu 2017 je le še 11,6 % nemške elektrike proizvedene iz jedrskega goriva, preostalih delujočih sedem jedrskih reaktorjev pa nameravajo zapreti do leta 2022 (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 66).

V Združenem kraljestvu so v letu 2017 proizvedli 19,3 % svoje elektrike iz jedrskega goriva, kar je 1,1 odstotne točke manj kot leto poprej in 7,6 odstotne točke manj od največjega deleža, ki so ga dosegali leta 1997 (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 90). Vladna projekcija iz leta 2016 predvideva, da bi do leta 2035 v Združenem kraljestvu zgradili dodatnih 14 GW jedrskih zmogljivosti, s čimer bi se delež elektrike iz jedrskega goriva povzpел na približno 33 % (Department of Energy & Climate Change, 2016, str. 8, 19). Zelo verjetno pa je, da bo odločitev Združenega kraljestva o izstopu iz EU vplivala na te načrte.

Švedska, deseta največja proizvajalka elektrike iz jedrskega goriva na svetu, je v letu 2017 proizvedla skoraj 40 % svoje elektrike v jedrskih elektrarnah. Po sprejetju moratorija na gradnjo jedrskih elektrarn leta 1980 in njegovem dokončnem preklicu leta 2010, je švedska vlada januarja 2019 sprejela strategijo o popolni preskrbi države z elektriko iz obnovljivih virov do leta 2040, ki pa ne predvideva zapiranja jedrskih elektrarn niti prepovedi gradnje novih jedrskih reaktorjev v tem obdobju (Government Offices of Sweden, 2019, str. 3).

Španija, ki je v sedmih reaktorjih leta 2017 proizvedla 21,2 % svoje elektrike, skoraj pol manj od 38,4-odstotnega deleža leta 1989, niha med popolno oskrbo iz obnovljivih virov in ohranjanjem obstoječe proizvodnje v jedrskih elektrarnah. Novogradenj ne načrtujejo, energetska politična in gospodarska bitka pa se odvija na podlagi vprašanja o podaljšanju obratovalnega dovoljenja obstoječih reaktorjev (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 234, 235).

Belgija, ki je bila leta 2017 z deležem 49,9 % na petem mestu med državami po oskrbi z elektriko iz jedrskega goriva, je leta 2003 sprejela odločitev o opustitvi jedrskega energetskega programa po izteku operativne dobe njenih sedmih reaktorjev, torej do leta 2025 (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 224). Kljub nekaterim pomislekom in vmesnem podaljšanju operativne dobe nekaterih reaktorjev je belgijska vlada v svoji

strategiji leta 2018 potrdila popolno opustitev jedrske tehnologije do leta 2025 (Gouvernement fédéral, 2018).

Japonska je leta 2017 v svojih devetih delujočih jedrskih reaktorjih proizvedla 3,6 % svoje elektrike, kar je le še desetina deleža iz leta 1998 (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 69). Po jedrski nesreči leta 2011 je vlada pod pritiskom javnosti pripravila načrt o postopni opustitvi jedrske tehnologije do leta 2040, načrt pa je bil kasneje zaradi odsotnosti ustreznih alternativ spremenjen, tako da je trenutno v veljavi energetska strategija iz leta 2015, ki do leta 2030 predvideva povečanje deleža elektrike iz jedrskega goriva na 20–22 % (World nuclear news, 2015a).

Energetska politika EU, ki se ukvarja predvsem z zagotavljanjem delovanja skupnega energetskega trga in zanesljive oskrbe ter varčevanja z energijo, na podlagi sklepa Evropskega sveta iz leta 2014 sicer poziva k povečanju deleža obnovljivih virov v energetske oskrbi, a prepušča vprašanje uporabe jedrske tehnologije v celoti državam članicam (Evropski parlament, 2019).

3.2.2 Stanje in projekcije proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v državah v razvoju

Na Kitajskem v zadnjih letih hitro povečujejo število jedrskih reaktorjev, tako da je ta država v letu 2017 zasedala tretje mesto med proizvajalkami elektrike iz jedrskega goriva, trenutno pa gradijo 16 novih reaktorjev (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 48). Državna energetska politika daje prednost proizvodnji elektrike iz jedrskega goriva, saj si prizadeva, da bi Kitajska zmanjšala svojo odvisnost od termoelektrarn na premog, kljub temu pa nameščena moč vetrnih in solarnih elektrarn v zadnjih letih narašča hitreje.

Tudi v Rusiji nameščena zmogljivost jedrskih elektrarn narašča iz leta v leto, trenutno je v gradnji pet jedrskih reaktorjev, v letu 2016 pa je vlada sprejela načrt o gradnji 11 novih reaktorjev do leta 2030 (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 252, 254). Rusija je tudi agresiven izvoznik jedrske tehnologije in trenutno gradi sedem reaktorjev v različnih državah po svetu, še 14 pa jih je v pripravi.

Ukrajina je v svojih 15 delujočih reaktorjih leta 2017 proizvedla 80,4 TWh elektrike (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 254), kar jo uvršča na sedmo mesto med proizvajalkami in s 55,1-odstotnim deležem na drugo mesto med državami po deležu proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva. Zadnja vladna energetska strategija iz leta 2017 predvideva, da bi ta delež do leta 2035 ostal pri okoli 50 % ob siceršnjem zmanjšanju porabe elektrike v državi (Interfax Ukraine, 2017).

Indija je bila leta 2017 na 13. mestu med proizvajalkami elektrike iz jedrskega goriva, s katero pokriva 3,2 % svojih potreb po elektriki, kar je 0,2 odstotni točki manj od leta prej (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 212). Načrti iz leta 2010 o skoraj

desetkratnem povečanju nameščene moči jedrskih elektrarn do leta 2032 so bili po nesreči v jedrski elektrarni Fukušima Daiči zaradi nasprotovanja javnosti opuščeni, tako da zadnja vladna strategija iz leta 2018 predvideva le še približno dvakratno povečanje nameščene moči do leta 2024 in nekaj več kot trikratno povečanje do leta 2031 (Department of Atomic Energy, 2018).

Štiri države v razvoju, Bangladeš, Belorusija, Turčija in Združeni arabski emirati, ki doslej še niso proizvajale elektrike iz jedrskega goriva, trenutno gradijo jedrske reaktorje. Pogodbe za gradnjo reaktorjev so podpisali tudi v Egiptu, Turčiji (dva dodatna) in Vietnamu, novogradnje pa so v zadnjih letih načrtovali tudi v Litvi (ki je leta 2009 ob vstopu v EU morala zaustaviti svoj zadnji reaktor tipa RBMK), Jordaniji, Čilu, Indoneziji, Kazahstanu, Savdski Arabiji, na Poljskem in Tajskem, pri čemer pa so nekateri od teh načrtov za določen ali nedoločen čas odloženi (Mytle Schneider Consulting Project, 2018, str. 152–172).

3.2.3 Stanje in projekcije proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji

V Sloveniji, kjer delež porabe elektrike iz jedrskega goriva ostaja dokaj konstanten okoli 20 %, je bilo povečanje zmogljivosti NEK formalno opredeljeno v Resoluciji o nacionalnih razvojnih projektih za obdobje 2007–2023, dokumentu Vlade republike Slovenije iz leta 2006. Po tem dokumentu je bil predviden začetek gradnje drugega bloka NEK z močjo 1000 MW v letu 2013 in začetek obratovanja leta 2017, nekaj let pred potekom obratovalne dobe obstoječega reaktorja (Vlada RS, 2006, str. 44).

Leta 2014 je Ministrstvo za infrastrukturo Republike Slovenije pripravilo bilanco energetske oskrbe Slovenije do leta 2030, po kateri je v pričakovanju podaljšanja obratovalne dobe NEK začetek obratovanja drugega bloka prestavljen na čas po letu 2030, moč pa opredeljena v razponu od 1000–1600 MW (Ministrstvo za infrastrukturo RS, 2014, str. 76). Leta 2015 je bil s Hrvaško podpisan sporazum o podaljšanju obratovalne dobe obstoječega reaktorja za 20 let do leta 2043, s preverjanjem stanja vsakih 10 let, tako da je potreba po vladni odločitvi glede usode elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji za nekaj let odložena.

3.3 Pričakovana perspektiva proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva po svetu

Kot je bilo že omenjeno, na razvoj in širitev tehnologije pridobivanja elektrike iz jedrskega goriva vplivata predvsem ekonomska učinkovitost panoge in javno mnenje, ki se zrcali v energetskih politikah posameznih držav. Poleg teh dveh prvin na perspektivo te panoge zelo pomembno vplivata še pričakovanje glede rasti porabe elektrike v osnovni (»pasovni«) obremenitvi in morebiten vstop popolnoma novih tehnologij pridobivanja elektrike. V tem poglavju je na kratko predstavljenih nekaj najnovejših mednarodnih študij, v katerih so

avtorji poskušali podati svoja videnja razvoja pridobivanja elektrike iz jedrskega goriva v naslednjih desetletjih.

IEA (2018b, str. 528–529) je v svoji zadnji vsakoletni študiji World Energy Outlook 2018 predstavila dva pričakovana scenarija razvoja proizvodnje elektrike do leta 2040. Po scenariju, ki upošteva obstoječe energetske politike in uvedbo že najavljenih sprememb v teh politikah, bo delež elektrike iz jedrskega goriva do leta 2040 z 10,31 % leta 2017 padel na 9,21 %, pri čemer se bo njena proizvodnja v tem času povečala za 41,3 %. Po scenariju trajnostnega razvoja, ki se osredotoča na mednarodno dogovorjene standarde glede klimatskih sprememb, kakovosti ozračja in splošnega dostopa do elektrike, pa bo delež elektrike iz jedrskega goriva v istem obdobju narasel na 13,36 %, pri čemer se bo v tem obdobju njena proizvodnja povečala za 88,1 %.

Skupina raziskovalcev s Tehnološkega inštituta Massachusetts (MIT) je v svoji študiji The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World (MIT Energy Initiative, 2018, str. 5, 11–18) predstavila ugotovitve glede pričakovane projekcije cene elektrike v letu 2050 z uporabo jedrske tehnologije ali brez nje v ZDA, Franciji, Združenem kraljestvu in na Kitajskem, če bi te države želele doseči znižanje izpustov CO₂ iz trenutnih 350–680 g/kWh na zelenih 11–24 g/kWh. V svoji raziskavi so upoštevali trenutne in za 25 % znižane cene jedrske tehnologije in to primerjali z varianto električne oskrbe z znižanim izločanjem CO₂ popolnoma brez jedrske tehnologije. Po njihovih ugotovitvah bi stroški oskrbe z elektriko v primeru popolne ukinitve jedrske tehnologije začeli bistveno naraščati v vseh državah, takoj ko se zahtevana stopnja izločanja CO₂ spusti pod 50 g/kWh. Cenovno optimalne sestave virov elektrike v primeru zahteve po znižanju emisij na 10 g CO₂/kWh v letu 2050 po njihovih izračunih vsebujejo od 30- do 40-odstotni delež jedrskih elektrarn na zahodu, medtem ko na Kitajskem predvidevajo kar 70-odstotni delež.

Podobno ugotavlja Združenje svetovne jedrske industrije, ki v svoji pobudi Harmony (World Nuclear Association, 2018d) ugotavlja, da lahko cenovno ugodno in splošno dosegljivo oskrbo z elektriko v razmerah, ki zahtevajo bistveno zmanjšanje izpustov CO₂, do leta 2050 najlaže dosežemo tako, da v proizvodnji vse elektrike povečamo delež elektrike iz jedrskega goriva na okoli 25 %. Če bi želeli doseči ta cilj, bi morali v naslednjih 30 letih postopno dograditi okoli 1000 GW nove reaktorske moči, kar je približno dvakrat in pol več od trenutnih nameščenih zmogljivosti.

Mycle Schneider s skupino raziskovalcev pa v svoji študiji ugotavlja, da proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v svojem trenutnem razvojnem stanju ni ekonomsko konkurenčna nikjer na svetu, predvsem zaradi predrage in prepočasne gradnje (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 25). Če bi želeli samo nadoknaditi zmogljivost reaktorjev, ki so predvideni za zaustavljanje, bi morali do leta 2030 zagnati 151 novih reaktorjev, kar je trikrat več od novogradenj v preteklem desetletju, zato se države v zadnjih letih čedalje bolj zatekajo k podaljševanju operativne dobe že obstoječih reaktorjev (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 45, 46). Tudi vsesplošno prizadevanje za zniževanje izpustov CO₂ v energetiki ni bistveno pripomoglo k ponovni oživitvi jedrske tehnologije, saj

v zadnjem desetletju zmogljivost novozgrajenih vetrnih in solarnih elektrarn na svetovni ravni vsaka zase do desetkrat prekoračuje zmogljivost novozgrajenih jedrskih elektrarn in ni opaziti, da bi se ta trend v prihodnosti kaj spremenil (Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 192).

Mnenja akademikov o prihodnosti proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva so deljena. Suman (2018, str. 166–167) trdi, da niti elektrika iz obnovljivih virov niti elektrika iz jedrskega goriva ne moreta sami zadovoljiti naraščajoče energetske porabe, ki bi po ocenah do leta 2035 narastla za 35 %. Da bi torej zagotovili nizkoogljično elektriko, avtor predlaga hibridne in integrirane jedrsko obnovljive energetske sisteme. Podobnega mnenja so Peterscu in drugi (2017, str. 941, 945), ki ugotavljajo, da bi jedrske elektrarne zaradi nepredvidljive proizvodnje elektrike iz obnovljivih virov lahko predstavljale energetsko blažilo, predvsem z zagotavljanjem minimalne zmogljivosti za pokrivanje manka proizvodnje iz obnovljivih virov. Nasprotnega mnenja je von Hirschhausen (2018, str. 21–23, 31–35), ki trdi, da elektrika iz jedrskega goriva nikakor ni opcija za prihodnost nizkoogljične družbe v EU, predvsem zaradi zavez k zapiranju jedrskih elektrarn, nizkih investicij v novogradnjo, stroškovne nekonkurenčnosti na dereguliranih trgih, visokih investicijskih stroškov, negativnih eksternalij in negativne korelacije med demokratično družbo ter izbiro investicij v prihodnost njene proizvodnje.

Lombaard in Kleynhaus (2016, str. 9–10) sta v svojem delu analizirala možnost jedrske renesanse, torej znatnega povečanja vloge elektrike iz jedrskega goriva kot odgovora na potrebo po nizkoogljični družbi. Z analiziranjem stroškov in koristi sta ugotovila, da je najbolj verjeten scenarij zgolj rahlo povečanje njene vloge, saj za znatno povečanje obstaja preveč zadržkov. Tudi Ming, Yingxin, Shaojie, Hui in Chunxue (2015, str. 153, 156) ugotavljajo, da bo kljub začetnim zadržkom zaradi jedrske nesreče v reaktorju Fukušima Daiči večina držav nadaljevala z razvojem proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva. Kitajska bo razvijala varnejše in učinkovitejše reaktorje, z osredotočenostjo na domačo, množično ter standardizirano proizvodnjo. Do drugačnih zaključkov sta prišla Linares in Conchado (2013, str. S119, S124), ki trdita da je prihodnost stroškovne konkurenčnosti elektrike iz jedrskega goriva na dereguliranih trgih malo verjetna in da bi morala proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva, če bi želela ostati konkurenčna, znižati presežke pričakovanih investicijskih stroškov, skrajšati prekoračitve rokov v gradnjah in pridobiti podporo v obliki državnih subvencij. Podobne zadržke delita Khatib in Difiglio (2016, str. 749), ki prikazujeta, da tako elektrika iz jedrskega goriva kot tudi iz obnovljivih virov nista stroškovno konkurenčni elektriki iz izgorevanja fosilnih goriv. Zniževanje investicijskih in drugih stroškov obeh tehnologij preko krivulje učenja je navzdol omejeno s stanovitnimi stroški dela ter infrastrukture. Da bi tehnologiji ostali konkurenčni fosilnim elektrarnam, se bosta morali zanašati na državne subvencije.

3.4 Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji

3.4.1 Posebnosti proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji

Slovenija je svojo edino jedrsko elektrarno podedovala od Jugoslavije, ki je svoj energetski jedrski program zasnovala v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja kot kritje za tajni razvoj vojaškega jedrskega programa. Leta 1981 je bila v Vrbini pri Krškem zgrajena prva od dveh načrtovanih jedrskih elektrarn, ki naj bi ju financirali republiki Slovenija in Hrvaška, načrti za gradnjo sestrške elektrarne pri Prevlaki na Hrvaškem pa so bili leta 1986 po nesreči v jedrski elektrarni Černobil opuščeni skupaj z načrti za jugoslovanski vojaški jedrski program (Nuclear Threat Initiative, 2015).

Posledica te odločitve in kasnejšega razpada Jugoslavije je, da je NEK v tem trenutku edina jedrska elektrarna v meddržavni lasti na svetu. Zaradi nejasnega statusa elektrarne po razpadu Jugoslavije sta bili Slovenija in Hrvaška nekaj let v sporu, ta pa je bil leta 2001 rešen z meddržavnim sporazumom, po katerem sta državi polovični lastnici objekta, proizvedene elektrike in jedrskih odpadkov. Skupno lastništvo prinaša s sabo nekaj izzivov, med katere spadajo tudi meddržavna usklajevanja glede usode elektrarne v razmerah, v katerih se elektroenergetska sistema in energetski politiki obeh držav precej razlikujeta.

3.4.2 Pričakovana perspektiva proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji

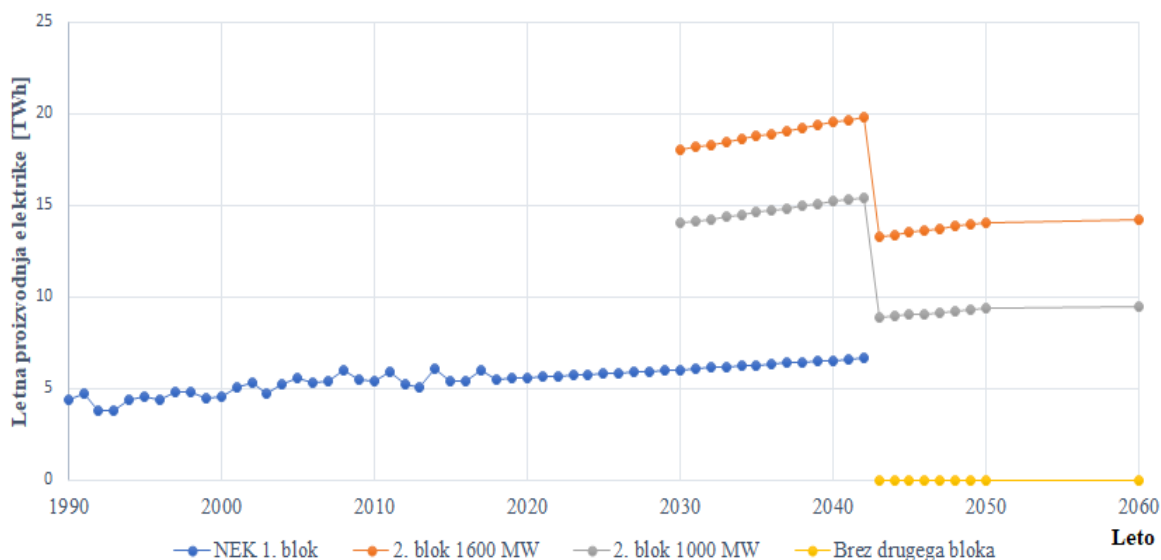
Povečanje zmogljivosti jedrske elektrarne v Krškem z 2. blokom moči 1000 MW je bilo prvič opredeljeno v vladni resoluciji 2007–2023 iz leta 2006, a je naslednja vlada iz različnih razlogov dala prednost izgradnji 6. bloka termoelektrarne Šoštanj. Ob pričakovanem dogovoru o 20-letnem podaljšanju obratovalnega časa obstoječega bloka NEK je leta 2014 Ministrstvo za infrastrukturo RS v energetski bilanci Slovenije do leta 2030 preložilo načrtovani začetek obratovanja 2. bloka z leta 2017 na leto 2030.

V tem času so bile na to temo narejene nekatere študije in priprave, a razen načelne naklonjenosti do ohranitve proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji po poteku obratovalnega časa NEK nobena vlada doslej ni uvrstila gradnje 2. bloka v izvedbene načrte. Javna razprava o tem vprašanju je bila vsa leta sorazmerno šibka in se je nekoliko okrepila šele v zadnjih letih, ko se dokončna odločitev o morebitnem začetku ali dokončni opustitvi gradnje novega jedrskega reaktorja po 20-letnem odlogu nezadržno bliža (Zore & Tavčar, 2017; Vorkapić 2019).

Na sliki 11 je prikazana letna proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji po dveh scenarijih v razponu reaktorjske moči iz zadnje energetske bilance Slovenije, ob predpostavki, da začne 2. blok obratovati leta 2030, in ob morebitni odločitvi o opustitvi gradnje. Podatki so vzeti iz poročil o proizvodnji NEK in ocen podjetja GEN energija (2015) o letni proizvodnji elektrike v 2. bloku NEK pri moči 1000 oz. 1600 MW ob pričakovanem

letnem povprečnem povečanju proizvodnje zaradi tehnoloških posodobitev med obratovanjem.

Slika 11: Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva v Sloveniji pri treh scenarijih v letih 1990–2060



Vir: Nek, 2018a; GEN energija, 2015

Slika 11 je od leta 1990 do leta 2018 opremljena z dejanskimi podatki letne proizvodnje 1. bloka NEK (2018a). Iz teh podatkov je izračunana povprečna letna stopnja rasti proizvodnje približno 0,8 %. Rast proizvodnje je posledica izboljšanja obratovalne učinkovitosti in stabilnosti, natančnejšega obratovalnega nadzora, dobrega sodelovanja z organi upravljanja, večje zavzetosti zaposlenih in boljšega termodinamičnega izkoristka, povezanega z ugodno hidrologijo, ter tudi tehnoloških izboljšav in posodobitev v elektrarni (NEK, 2018c; NEK, 2019). Enaka povprečna rast proizvodnje je projicirana tudi za potencialni 2. blok NEK z nazivno močjo 1000 ali 1600 MW do leta 2060.

3.5 Prihodnji izzivi proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva

Če želi elektrika iz jedrskega goriva v naslednjih desetletjih ostati relevanten dejavnik v svetovni energetiki, bo morala razrešiti nekaj organizacijskih in tehnoloških izzivov. Zaradi visokih investicijskih stroškov in kroničnih prekoračitev rokov izgradnje jedrskih reaktorjev postaja cena elektrike iz jedrskega goriva manj konkurenčna. Zato bo morala jedrska industrija doseči večjo stopnjo tovarniške, po možnosti modularne izdelave reaktorjskih delov, ki bi bili čimbolj standardizirani. S preходом z unikatne na modularno izgradnjo standardnih reaktorjev bi poenostavila oskrbovalno linijo ter izboljšala oziroma standardizirala postopke vodenja projektov izgradnje in na ta način pocenila gradnjo (MIT Energy Initiative, 2018, str. xi-xii; Mycle Schneider Consulting Project, 2018, str. 13).

Lovering, Yip in Nordhaus (2016, str. 371, 378) so z analizo investicijskih stroškov gradnje 349 reaktorjev v ZDA, Franciji, Kanadi, Zahodni Nemčiji, Indiji, Južni Koreji in na Japonskem pokazali, da njihova rast ni bila pravilo v vseh državah. V večini držav so investicijski stroški izmenično padali zaradi krivulje učenja in rastli kot posledica jedrskih nesreč. Stopnja rasti investicijskih stroškov je bila po državah dokaj različna. Najvišja je bila v ZDA, najmanjša v Franciji. Posebna izjema pa je bila Južna Koreja, ki je s proizvodnjo elektrike iz jedrskega goriva pričela kasneje od drugih analiziranih držav, kjer so investicijski stroški skozi vse obdobje padali po povprečni letni stopnji 2 %. Prihodnji izziv proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva je implementacija južnokorejske prakse tudi v drugih državah.

Za zmanjšanje možnosti okvare jedrskega reaktorja in posledičnega onesnaženja okolja, kar je eden glavnih razlogov za javnomnenjsko zavračanje jedrske tehnologije, bo treba pri novih reaktorjih uvajati sisteme pasivne varnosti (MIT Energy Initiative, 2018, str. xii). Za izboljšanje učinkovitosti izrabe toplotne energije jedrskih reaktorjev in zmanjševanje onesnaženja okolice z odvečno toploto bi bilo smiselno graditi kombinirane energetske pogone, ki poleg elektrike oskrbujejo okolico tudi s toploto za različne namene, na primer za ogrevanje stanovanj in rastlinjakov, oskrbo industrije z industrijsko paro, proizvodnjo vodikovega plina, razsoljevanje morske vode ipd. (Murray & Holbert, 2015, str. 286).

Ena od potencialnih možnosti je uporaba t. i. hitrih oplodnih reaktorjev, ki med svojim delovanjem proizvedejo več jedrskega goriva, kot ga porabijo. Taki reaktorji za svoje delovanje lahko porabijo skoraj ves razpoložljivi uran in torij namesto nekaj odstotkov, kot jih lahko uporabijo trenutni termični reaktorji. V kombinirani uporabi s hitrimi reaktorji za zažiganje lahko hitri oplodni reaktorji bistveno zmanjšajo količino radioaktivnih odpadkov, katerih razpolovna doba se poleg tega z več tisoč let skrajša na nekaj stoletij. Težava z uporabo tehnologije hitrih reaktorjev v komercialne namene pa je trenutno v tem, da je gorivo za te reaktorje bistveno dražje od konvencionalnega uranskega goriva, zato se pri trenutnih cenah tega goriva uvajanje ne izplača (Murray & Holbert, 2015, str. 459–469).

Razvoj novih komercialnih jedrskih tehnologij je izjemno zahteven in drag, zato so v ZDA leta 2001 ustanovili Generation IV International Forum (GIF), v katerem je trenutno združenih 13 držav in EURATOM. Namen tega foruma je s skupnimi močmi razviti tehnološke rešitve za novo, 4. generacijo jedrskih reaktorjev, ki bi nadomestila reaktorje 2. in 3. generacije, ki se trenutno uporabljajo za pridobivanje elektrike. Raziskujejo tri različice termičnih in tri različice hitrih jedrskih reaktorjev, komercialno uporabne rezultate pa pričakujejo v letih 2030–2040 (GEN IV International Forum, brez datuma).

SKLEP

Prvih 30 let tehnologije proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva je zaznamovalo njeno izjemno hitro širjenje, v drugih 30 letih, nekako od nesreče v jedrski elektrarni Černobil leta 1986 dalje, pa je predvsem zaradi odpora javnosti, pa tudi zaradi ekonomskih razlogov,

njeno širjenje skoraj povsem zastalo. Kaj se torej tej tehnologiji obeta v tretjem tridesetletju – zaton, stagnacija ali ponovni vzpon?

S stališča zanesljivosti oskrbe lahko tej tehnologiji pripišemo najvišjo oceno, saj velja elektrika iz jedrskega goriva za izjemno stabilen vir sorazmerno poceni energije. Izpadi delovanja zaradi menjave goriva in popravil so predvidljivi in kratkotrajni, raven oskrbe je stalna in dokaj neodvisna od zunanjih dejavnikov. To trditev potrjujejo tudi merjenja faktorjev zanesljivosti, ki jedrskim elektrarnam skupaj z nekaterimi drugimi termoelektrarnami pripisujejo najvišjo povprečno oceno (Suman, 2018, str. 168). Reguliranje izhodne moči je sicer omejeno, zato je ta tehnologija primerna predvsem za pokrivanje osnovne obremenitve pri oskrbi z elektriko, ki je nujen sestavni del vsakega elektroenergetskega sistema.

S stališča prožnosti preskrbe lahko tehnologijo ocenimo nekaj slabše. Zaradi vojaške strateške narave urana in plutonija se države, ki nimajo lastne proizvodnje goriva za jedrske elektrarne, lahko znajdejo v nevarnosti, da na trgu goriva ne morejo legalno kupiti. Vendar pa močna mednarodna regulacija in sorazmerno širok nabor proizvajalk goriva to nevarnost zmanjšuje na minimum. Drug zadržek s stališča prožnosti tehnologije bi lahko bil strateški položaj jedrskih elektrarn v vlogi potencialnega cilja terorističnega ali vojaškega napada. Ta zadržek ni zanemarljiv, vendar pa je v mirnodobnih razmerah zaradi visokih varnostnih standardov jedrskih elektrarn sorazmerno majhen.

Tudi s stališča trajnosti ima tehnologija nekoliko nižjo oceno. Vpliv na okolje je ob pravilnem delovanju in ravnanju z jedrskimi odpadki sicer skorajda zanemarljiv, a ob nepredvidenih situacijah oziroma nesrečah lahko postane izjemno močan in negativen. Goriva, torej urana, je v zemeljski skorji zelo veliko, vendar pa se le manjši del nahaja v primerni obliki za komercialno izkoriščanje. Točne zaloge urana zaradi strateških razlogov sicer niso znane, a znanih komercialnih zalog je po svetu vsaj še za 90 let ob sedanji uporabi, k temu pa je treba prišteti še uran iz razgrajenega jedrskega orožja, reciklirani uran oziroma plutonij in obogateni osiromašeni uran iz vojaške ali civilne uporabe, ki se vsi lahko uporabijo kot gorivo za jedrske elektrarne (World Nuclear Association, 2019e).

Da je kljub sorazmerno ugodnim kazalnikom obseg novogradenj na tem področju v zadnjih letih sorazmerno majhen, gre pripisati predvsem visokim investicijskim stroškom, odporu javnosti po odmevnejših nesrečah v jedrskih elektrarnah in političnemu subvencioniranju gradnje elektrarn na obnovljive vire. Glede na to, da je prizadevanje vlad po svetu za zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov na področju energetike videti neomajno – Evropska komisija se je denimo v svoji energetske politiki do leta 2030 zavezala h kar 40-odstotnemu znižanju emisij toplogrednih plinov v primerjavi z ravnijo leta 1990 (Evropski parlament, 2019) –, je ob upoštevanju pomanjkljivosti vetrnih in sončnih elektrarn videti, da je vsaj delna renesansa proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva neizogibna. To potrjuje tudi večina študij razvoja proizvodnje elektrike v naslednjih nekaj desetletjih, še posebno ob upoštevanju predpostavk o potrebi po proizvodnji cenovno dostopne elektrike z nizko

stopnjo izpustov toplogrednih plinov in možnosti bistvenega povečanja porabe elektrike zaradi novih odjemalcev in področij uporabe.

Do ponovne rasti investicij na področju pridobivanja elektrike iz jedrskega goriva pa bo precej verjetneje prišlo v primeru tehnoloških in organizacijskih izboljšav na tem področju. Modularna gradnja, pasivna varnost in izboljšana učinkovitost pogonov in izrabe goriva so skorajda nujni pogoji za ohranjanje konkurenčnosti panoge. Ker se tudi v naslednjih desetletjih pričakuje najintenzivnejša rast proizvodnje elektrike predvsem v Aziji in državah v razvoju, ni naključje, da se vrh jedrskega tehnološkega raziskovanja iz Evrope in ZDA počasi seli v Rusijo in na Kitajsko (Mytle Schneider Consulting Project, 2018, str. 15).

IEA (2018b, str. 528–529) v svojih dveh scenarijih razvoja napoveduje rast proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva do leta 2040, v prvem scenariju za 41,3 %, v drugem pa za 88,1 %. Če je rast proizvodnje elektrike iz jedrskega goriva v naslednjih desetletjih dokaj verjetna, pa je vprašanje glede njenega relativnega deleža glede na druge vire bolj nejasno. IEA v prvem scenariju napoveduje padec relativnega deleža z 10,31 % na 9,21 %, v drugem scenariju pa rast na 13,61 %. Vsekakor pa napovedi v naslednjih desetletjih predvidevajo izredno hitro rast proizvodnje elektrike iz obnovljivih virov (IEA 2018b, str. 27, 35, 38), na obzorju pa se kažejo že tudi novi, alternativni viri elektrike. Proizvodnja elektrike iz jedrskega goriva se, kot vse kaže, vendarle dviguje iz globeli razočaranja po nesrečah jedrskih elektrarnah Černobil in Fukušima Daiči in počasi spet pridobiva na veljavi, a če ne bo prišlo do občutnejših revolucionarnih tehnoloških izboljšav, rast nikoli več ne bo dosegla stopenj iz začetnih treh desetletij, tehnologija pa bo počasi vstopila v fazo zrelosti in stagnacije.

Tudi Slovenija kot najmanjša država z jedrsko elektrarno se je znašla pred pomembno odločitvijo. Zaradi zaveze Slovenije, da bo do leta 2030 na področju energetike zmanjšala izpuste toplogrednih plinov za 40 %, do leta 2050 pa za 80 % glede na leto 1990 (Portal energetika, brez datuma b), si po velikem onesnaževalcu TEŠ 6 v naslednjih nekaj desetletjih ne more privoščiti dodatne uporabe fosilnih goriv ali biomase za pridobivanje elektrike. Glede na to, da je potencial slovenske hidroenergije že skorajda v celoti izkoriščen, da nimamo velikega vetrnega in geotermalnega potenciala in da je izkoriščanje potenciala sončne energije neposredno odvisno od subvencij in obsežnega investicijskega sodelovanja lastnikov objektov, česar pa pri trenutni zakonodaji in stanju solarne tehnologije ni pričakovati, ostaneta po mojem mnenju Sloveniji le dve alternativni: dodatni uvoz elektrike ali gradnja novih jedrskih reaktorjev. Obstoječi jedrski reaktor, ki pokriva približno 20 % slovenske porabe elektrike, bo predvidoma obratoval do leta 2043, kar pomeni, da bo glede na pričakovano trajanje izgradnje treba sprejeti dokončno odločitev.

LITERATURA IN VIRI

1. AFP (2019, 26. julij). *Snag-hit new French nuclear power station delayed by further 3 years*. Pridobljeno 15. novembra 2019 iz <https://www.france24.com/en/20190726-snag-hit-new-french-nuclear-power-station-delayed-further-3-years>
2. Ambrose, J. (2019, 13. avgust). *Hinkley Point C: rising costs and long delays at vast new power station*. Pridobljeno 25. oktobra 2019 iz <https://www.theguardian.com/uk-news/2019/aug/13/hinkley-point-c-rising-costs-long-delays-power-station>
3. Associated Press (2011, 22. maj). *Biggest anti-nuclear Swiss protests in 25 years*. Pridobljeno 13. maja 2019 iz <https://web.archive.org/web/20121026080657/http://www.businessweek.com/ap/financialnews/D9NCL8100.htm>
4. BBC (2003, 27. februar). *Riddle of 'Baghdad's batteries'*. Pridobljeno 15. aprila 2019 iz <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/2804257.stm>
5. Böhringer, C., Landis, F., & Reaños, M. A. T. (2017). Economic Impacts of Renewable Energy Promotion in Germany. *The Energy Journal*, 38(2), 189–210.
6. Breidhardt, A. (2011, 30. maj). *German government wants nuclear exit by 2022 at latest*. Pridobljeno 13. maja 2019 iz <https://uk.reuters.com/article/us-germany-nuclear/german-government-wants-nuclear-exit-by-2022-at-latest-idUKTRE74Q2P120110530>
7. Brown, S. (2011, 26. marec). *Anti-nuclear Germans protest on eve of state vote*. Pridobljeno 13. maja 2019 iz <https://uk.reuters.com/article/germany-nuclear/anti-nuclear-germans-protest-on-eve-of-state-vote-idUKLDE72P0FG20110326>
8. Climate Policy Info Hub. (brez datuma). *The Global Rise of Emissions Trading*. Pridobljeno 15. novembra 2019 iz <https://climatepolicyinfohub.eu/global-rise-emissions-trading>
9. Cohen, B. L. (1990). *The Nuclear Energy Option: an alternative for the 90s*. Pridobljeno 15. aprila 2019 iz <http://www.phyast.pitt.edu/~blc/book/chapter9.html>
10. Congressional Research Service. (2016). *Financial Challenges of Operating Nuclear Power Plants in the United States*. Pridobljeno 11. julija 2019 iz https://www.everycrsreport.com/reports/R44715.html#_Toc469675674
11. Damiano, D., Herdegen, H., Lower, E., Mulholland, G., & Sumpter, C. (2014). *Contextualizing Nuclear Power in Dottingen, Switzerland*. Pridobljeno 13. maja 2019 iz <https://philologiavt.org/article/10.21061/ph.v6i1.48/>
12. Department of Atomic Energy. (2018). *Unstarred Question No. 2064 – Share of Atomic Energy*. Pridobljeno 27. maja 2019 iz <http://dae.nic.in/writereaddata/parl/budget2018/lsus2064.pdf>
13. Department of Energy & Climate Change. (2016). *Nuclear power in the UK*. Pridobljeno 23. maja 2019 iz <https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2016/07/Nuclear-power-in-the-UK.pdf>

14. Dickie, M. (2012, 16. julij). *Japanese anti-nuclear demonstrations grow*. Pridobljeno 13. maja 2019 iz https://www.washingtonpost.com/world/asia_pacific/japanese-anti-nuclear-demonstrations-grow/2012/07/16/gJQAPXPgoW_story.html?noredirect=on&utm_term=.eece9f426170
15. *EEX Group, EU Emission Allowances | Secondary Market*. Pridobljeno 17. februarja 2019 iz <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/spot-market/european-emission-allowances#!/2019/02/15>
16. Electricité de France History. (brez datuma). V *Funding Universe*. Pridobljeno 16. aprila 2019 iz <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/electricit%C3%A9-de-france-history/>
17. Enerdata. (2019). *Electricity domestic consumption*. Pridobljeno 14. julija 2019 iz <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>
18. Energy and Environment Council. (2012). *Inovative Strategy for Energy and the Environment*. Pridobljeno 13. maja 2019 iz <https://www.un.org/esa/socdev/egms/docs/2012/greenjobs/enablingenvironment.pdf>
19. *Energy Broker*. Pridobljeno 15. novembra 2019 iz <http://www.42fs.com/products-and-services.html#energie>
20. Ernst & Young. (2019). *Renewable energy is taking strides towards a subsidy-free era, EY report reveals*. Pridobljeno 11. julija 2019 iz https://www.ey.com/en_gl/news/2019/05/renewable-energy-is-taking-strides-towards-a-subsidy-free-era-ey-report-reveals
21. EUROfusion. (2018). *European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy*. Pridobljeno 24. julija 2019 iz https://www.eurofusion.org/fileadmin/user_upload/EUROfusion/Documents/2018_Research_roadmap_1ong_version_01.pdf
22. European Commission. (2016). *The EU Emissions Trading System (EU ETS)*. Pridobljeno 20. maja 2019 iz https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/factsheet_ets_en.pdf
23. Evropski parlament. (2019). *Energetska politika: splošna načela*. Pridobljeno 22. februarja 2019 iz <http://www.europarl.europa.eu/factsheets/sl/sheet/68/energetska-politika-splosna-nacela>
24. Felix, B., & Mallet, B. (2019, 23. maj). *EDF must sell more nuclear power at fixed cost to protect consumers-lobby groups*. Pridobljeno 4. oktobra 2019 iz <https://www.reuters.com/article/france-electricity/edf-must-sell-more-nuclear-power-at-fixed-cost-to-protect-consumers-lobby-groups-idUSL5N22Z2M9>
25. Fortuna, T. (2011, 18. september). *U.S. anti-nuclear activists campaign against restarting Three Mile Island nuclear generator, 1979–1985*. Pridobljeno 10. maja 2019 iz <https://nvdatabase.swarthmore.edu/content/us-anti-nuclear-activists-campaign-against-restarting-three-mile-island-nuclear-generator-19>
26. *Gartner Hype Cycle*. Pridobljeno 2. oktobra 2019 iz <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle>

27. GEN Energija. (2015). *JEK 2*. Pridobljeno 12. julija 2019 iz <https://www.gen-energija.si/investiramo-in-razvijamo/jek-2>
28. *GEN IV International Forum*. Pridobljeno 5. junija 2019 iz <https://www.gen-4.org/gif/>
29. Gosden, A. (2015. 18. november). *UK coal plants must close by 2025, Amber Rudd announces*. Pridobljeno 10. julija 2019 iz <https://www.telegraph.co.uk/finance/newsbysector/energy/12001752/UK-coal-plants-must-close-by-2025-Amber-Rudd-to-announce.html>
30. Gouvernement fédéral. (2018). *Federale Energiestrategie*. Pridobljeno 14. julija 2019 iz <https://premier.fgov.be/sites/default/files/articles/federale%20energiestrategie.pdf>
31. Government Offices of Sweden. (2019). *Sweden's draft integrated national energy and climate plan*. Pridobljeno 23. maja 2019 iz <https://www.government.se/48ee21/contentassets/e731726022cd4e0b8ffa0f8229893115/swedens-draft-integrated-national-energy-and-climate-plan>
32. Greenpeace & Climate Action Network Europe. (2015). *End of an era: why every European country needs a coal phase-out plan*. Pridobljeno 10. julija 2019 iz <https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/end-of-era-coal-phase-out-plan-20151204.pdf>
33. Harris, J. (1982, 14. januar). *The electricity of Holborn*. Pridobljeno 15. aprila 2019 iz https://books.google.si/books?id=bfVKt7UzjnEC&pg=PA89&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
34. von Hirschhausen, C. (2018). *Energy Scenarios, Projections, and Modeling ("Academic approach"): Case of the "Clean European Energy Package"*. Ljubljana: 16th IAEE European Conference.
35. IAEA. (1994). *Classification of Radioactive waste*. Pridobljeno 26. aprila 2019 iz https://web.archive.org/web/20050515212915/http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub950e_web.pdf
36. IAEA. (2004). *From Obninsk Beyond: Nuclear Power Conference Looks to Future*. Pridobljeno 15. aprila 2019 iz <https://www.iaea.org/newscenter/news/obninsk-beyond-nuclear-power-conference-looks-future>
37. IAEA. (2019a). *IAEY Nuclear Security Series*. Pridobljeno 26. julija 2019 iz <https://www.iaea.org/resources/security-series/search>
38. IAEA. (2019b). *IAEY Safety Standards*. Pridobljeno 26. julija 2019 iz <https://www.iaea.org/resources/safety-standards/search>
39. IAEA PRIS. (2019). *Trend in Electricity Supplied*. Pridobljeno 15. aprila 2019 iz <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/WorldTrendinElectricalProduction.aspx>
40. IEA. (2010). *Renewable Energy Essentials: Hydropower*. Pridobljeno 22. julija 2019 iz https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/hydropower_essentials.pdf
41. IEA. (2018a). *Key World Energy Statistics 2018*. Pridobljeno 15. aprila 2019 iz <https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2018>
42. IEA. (2018b). *World Energy Outlook 2018*. Pridobljeno 27. maja 2019 iz <https://www.iea.org/weo/>

43. IEE. (2013). *Factors Affecting Electricity Consumption in the U.S.* Pridobljeno 14. julija 2019 iz https://www.edisonfoundation.net/iee/Documents/IEE_FactorsAffectingUSElecConsumption_Final.pdf
44. Interfax Ukraine. (2017, 8. september). *Energy ministry publishes Energy Strategy of Ukraine until 2035.* Pridobljeno 27. maja 2019 iz <https://en.interfax.com.ua/news/economic/447034.html>
45. *International Nuclear Safety Group.* Pridobljeno 12. julija 2019 iz <https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-and-security/committees/insag>
46. Jang, S. (2017, 26. oktober). *South Korea's Nuclear Energy Debate.* Pridobljeno 22. maja 2019 iz <https://thediplomat.com/2017/10/south-koreas-nuclear-energy-debate/>
47. Jowitz, J., & Espinoza, J. (2006, 30. julij). *Heatwave skuts down nuclear power plants.* Pridobljeno 7. maja 2019 iz <https://www.theguardian.com/environment/2006/jul/30/energy.weather>
48. Khatib, K., & Difiglio, C. (2016). Economics of nuclear and renewables. *Energy Policy* 96(1), 740–750.
49. Kibune, H. (1995). *Regulatory Reform and Its Effect in the Japanese Electric Utility Industry.* Pridobljeno 16. aprila 2019 iz <http://www.esri.go.jp/jp/archive/dis/dis062/dis062h.pdf>
50. Knight, B. (2011, 15. marec). *Merkel shuts down seven nuclear reactors.* Pridobljeno 15. aprila 2019 iz <https://www.dw.com/en/merkel-shuts-down-seven-nuclear-reactors/a-14912184>
51. Linares, P., & Conchado, A. (2013). The economics of new nuclear power plants in liberalized electricity markets. *Energy Economics* 40(1), S119–S125.
52. Lombaard, A. L., & Kleynhans E. P. J. (2016). The feasibility of a nuclear renaissance: A cost-benefit analysis of nuclear energy as a source of electricity. *Acta Commercii* 16(1).
53. Louet, S., White, S., & Evans, D. (2018, 18. november). *France to cut nuclear energy reliance by 2035: minister.* Pridobljeno 17. februarja 2019 iz <https://www.reuters.com/article/us-france-nuclearpower/france-to-cut-nuclear-energy-reliance-by-2035-minister-idUSKCN1NN0OK>
54. Lovering, J. R., Yip, A., & Nordhaus, T. (2016). Historical construction costs of global nuclear power reactors. *Energy Policy* 91(1), 371–382.
55. Maeda, R., & Sheldrick, A. (2012, 14. februar). *Japan aims to abandon nuclear power by 2030s.* Pridobljeno 15. aprila 2019 iz <https://www.reuters.com/article/us-japan-nuclear-idUSBRE88D05520120914>
56. Martin, H., & Otterson, S. (2018). German Intraday Electricity Market Analysis and Modeling Based on the Limit Order Book. *2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM).*
57. Michal, R. (2001, november). *Fifty years ago in December: Atomic reactor EBR-I produced first electricity.* Pridobljeno 15. aprila 2019 iz <http://www2.ans.org/pubs/magazines/nn/docs/2001-11-2.pdf>

58. Ming, Z., Yingxin, L., Shaojie, O., Hui, S., & Chunxue, L. (2016). Nuclear energy in the Post-Fukushima Era: Research on the developments of the Chinese and worldwide nuclear power industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58(1), 147–156.
59. Ministrstvo za infrastrukturo RS. (2014). *Dolgoročne energetske bilance Slovenije do leta 2030 in strokovne podlage za določanje nacionalnih energetske ciljev*. Pridobljeno 18. aprila 2019 iz https://www.energetika-portal.si/fileadmin/dokumenti/publikacije/nep/deb__2030.pdf
60. Miriri, D. (2015, 16. februar). *Geothermal overtakes hydro as Kenya's main power source in January: KenGen*. Pridobljeno 23. julija 2019 iz <https://af.reuters.com/article/investingNews/idAFKBNOLK1AM20150216>
61. MIT Energy Initiative. (2018). *Future of nuclear energy in a Carbon-Constrained World*. Pridobljeno 20. februarja 2019 iz https://art.inl.gov/Rotating%20Files/MIT_Future_of_Nuclear_Energy_in_a_Carbon-Constrained_World.pdf
62. Murray, L. R., & Holbert, E. K. (2015). *Nuclear Energy An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes*. Seventh Edition. Oxford: Elsevier Inc.
63. Mycle Schneider Consulting Project. (2018). *The World Nuclear Industry Status Report 2018*. Pridobljeno 20. februarja 2019 iz <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/20180902wnisr2018-hr.pdf>
64. National Energy Board. (2017). *Canada's Energy Future 2017*. Pridobljeno 23. maja 2019 iz <https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/fttr/2017/2017nrgftr-eng.pdf>
65. NEK. (2018a). *Proizvodnja*. Pridobljeno 15. aprila 2019 iz <https://www.nek.si/sl/o-nek/proizvodnja>
66. NEK. (2018b). *Letno poročilo 2017*. Pridobljeno 15. aprila 2019 iz https://www.nek.si/_files/3535/NEK_SLO_2017.pdf
67. NEK. (2018c). *Novice 26. novembra 18*. Pridobljeno 4. oktobra 2019 iz <https://www.nek.si/sl/novinarsko-sredisce/novice/nek-stopnjuje-obratovalno-ucinkovitost-in-rezultate-ter-tako>
68. NEK. (2019). *Novice 26. septembra 19*. Pridobljeno 4. oktobra 2019 iz <https://www.nek.si/sl/novinarsko-sredisce/novice/nek-ponovno-potrjuje-visokozanesljivost-in-predvidljivost-s>
69. Nuclear Energy Institute. (2019). *Top 15 Nuclear Generating Countries*. Pridobljeno 22. julija 2019 iz <https://www.nei.org/resources/statistics/top-15-nuclear-generating-countries>
70. Nuclear Energy Institute. (brez datuma). *Jobs*. Pridobljeno 3. oktobra 2019 iz <https://www.nei.org/advantages/jobs>
71. Nuclear Threat Initiative. (2015). *Former Yugoslavia Nuclear*. Pridobljeno 13. julija 2019 iz <https://www.nti.org/learn/countries/former-yugoslavia/nuclear/>
72. Oak Ridge National Laboratory. (brez datuma). *Graphite Reactor*. Pridobljeno 15. aprila 2019 iz

- <https://web.archive.org/web/20131102212003/http://www.ornl.gov/ornl/news/communications/graphite-reactor>
73. OECD. (2015). *Projected Costs of Generating Electricity*. Pridobljeno 23. aprila 2019 iz <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2015/7057-proj-costs-electricity-2015.pdf>
 74. Peterscu, F. I. T., Apicella, A., Peterscu, R.V., Kozaitis, S., Bucinell, R., Aversa, R., & Abu-Lebdeh, T. (2017). Environmental Protection Through Nuclear Energy. *American Journal of Applied Sciences*, 13(9), 941–946.
 75. Portal Energetika. (brez datuma a). *Bilanca električne energije na javnem omrežju (GWh), Slovenija, letno*. Pridobljeno 14. julija 2019 iz <https://www.energetika-portal.si/statistika/statisticna-podrocja/elektricna-energija--kolicine/>
 76. Portal Energetika. (brez datuma b). *Energetski koncept Slovenije*. Pridobljeno 2. septembra 2019 iz <https://www.energetika-portal.si/dokumenti/strateski-razvojni-dokumenti/energetski-koncept-slovenije/>
 77. Potter, W., Miljanic, D., & Slaus I. (2000). Tito's Nuclear Legacy. *The Bulletin of the Atomic Scientists*, 56(2), 63–70
 78. *Predstavitev trgovanja*. Pridobljeno 15. novembra 2019 iz <https://www.bsp-southpool.com/predstavitev-trgovanja-11/splosne-informacije.html>
 79. Rožman, R. (2012). *Proizvodnja električne energije*. Krško: Založništvo Nevidodunum.
 80. Schlömer, S., Bruckner, T., Fulton, L., Hertwich, E., McKinnon, A., Perczyk, D., Roy, R., Schaeffer, R., Sims, R., Smith, P., & Wisner, R. (2014). *ANNEX III, Technology-specific Cost and Performance Parameters*. Pridobljeno 6. maja 2019 iz https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf
 81. Schneider, M. (2014, marec). *The Status of the Nuclear Industry in the World – Dawn or Dusk?*. Pridobljeno 10. julija 2019 iz <https://www.aps.org/units/fps/newsletters/201404/nuclear.cfm>
 82. von Selasinsky, A. (2016). *The integration of renewable energy sources in continuous intraday markets for electricity* (doktorska disertacija). Dresden: Fakultät Wirtschaftswissenschaften Lehrstuhl für Energiewirtschaft.
 83. Sklad za financiranje razgradnje NEK. (brez datuma). *Program razgradnje Nuklearne elektrarne Krško in odlaganja nizko in srednje radioaktivnih odpadkov ter izrabljenega jedrskega goriva*. Pridobljeno 3. maja 2019 iz <http://www.sklad-nek.si/arhiv-novic/program-razgradnje-nuklearne-elektrarne-krsko-in-odlaganja-nizko-in-srednje-radioaktivnih-odpadkov-ter-izrabljenega-jedrskega-goriva>
 84. Staff Report (2016, 1. november). *UAE's first nuclear energy power purchase agreement signed*. Pridobljeno 4. oktobra 2019 iz <https://gulfnews.com/uae/environment/uaes-first-nuclear-energy-power-purchase-agreement-signed-1.1922556>
 85. Suman, S. (2018). Hybrid nuclear-renewable energy systems: A review. *Journal of Cleaner Production*, 181(1), 166–177.
 86. Taylor, S. (2016, avgust). *All systems glow*. Pridobljeno 15. aprila 2019 iz <https://www.chathamhouse.org/system/files/publications/twt/All%20systems%20glow.pdf>

87. Uprava RS za jedrsko varnost. Pridobljeno 29. julija 2019 iz <https://www.gov.si/drzavni-organi/organi-v-sestavi/uprava-za-jedrsko-varnost/>
88. U.S. EIA. (2019a). *Electricity Explained, Use of Electricity*. Pridobljeno 6. maja 2019 iz https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=electricity_use
89. U.S. EIA. (2019b). *Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2019*. Pridobljeno 23. aprila 2019 iz https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf
90. U.S. NRC. (2018). *History of Emergency Preparedness*. Pridobljeno 15. aprila 2019 iz <https://www.nrc.gov/about-nrc/emerg-preparedness/history.html>
91. Vlada RS. (2006). *Resolucija o nacionalnih razvojnih projektih za obdobje 2007–2023*. Pridobljeno 18. aprila 2019 iz http://www.slovenijajutri.gov.si/uploads/tx_publicacije/061127_resolucija.pdf
92. Vlada RS. (2019). *Energetska bilanca Republike Slovenije za leto 2018*. Pridobljeno 22. julija 2019 iz https://www.energetika-portal.si/fileadmin/dokumenti/publikacije/energetska_bilanca/ebrs_2018.pdf
93. Vorkapić, M. (2019, 16. julij). *Nuklearna elektrarna Krško: zgodba o zaupanju, ki se je gradila desetletja*. Pridobljeno 16. julija 2019 iz <https://www.24ur.com/novice/slovenija/nuklearna-elektrarna-krsko-zgodba-o-zaupanju-ki-se-je-gradila-desetletja.html>
94. Wacket, M. (2019, 26. januar) *Germany to phase out coal by 2038 in move away from fossil fuels*. Pridobljeno 10. julija 2019 iz <https://www.reuters.com/article/us-germany-energy-coal/germany-to-phase-out-coal-by-2038-in-move-away-from-fossil-fuels-idUSKCN1PK04L>
95. Wang, J., & Kim, S. (2018). Comparative Analysis of Public Attitudes toward Nuclear Power Energy across 27 European Countries by Applying the Multilevel Model. *Sustainability*. 10(5), 1518.
96. Weiser, M. (2016, 6. november). *The hydropower paradox: is this energy as clean as it seems*. Pridobljeno 11. julija 2019 iz <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2016/nov/06/hydropower-hydroelectricity-methane-clean-climate-change-study>
97. Wilson, G., & Staffel, I. (2018). Rapid fuel switching from coal to natural gas through effective carbon pricing. *Nature Energy*. 3(5): 365–372.
98. WIN-Gallup International. (2011). *Japan Earthquake Jolts Global Views on Nuclear Energy*. Pridobljeno 13. maja 2019 iz <http://gallup.com/wp-content/uploads/2016/06/PressReleaseJapan1.pdf>
99. World Coal Association. (brez datuma). *Where is coal found?* Pridobljeno 14. julija 2019 iz <https://www.worldcoal.org/coal/where-coal-found>
100. World Nuclear Association. (2017a). *The Nuclear Fuel Cycle*. Pridobljeno 25. februarja 2018 iz <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx>

101. World Nuclear Association. (2017b). *Radioactive Waste – Myths and Realities*. Pridobljeno 25. aprila 2019 iz <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-wastes-myths-and-realities.aspx>
102. World Nuclear Association. (2018a). *Radioactive Waste Management*. Pridobljeno 25. aprila 2019 iz <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>
103. World Nuclear Association. (2018b). *Processing of Used Nuclear Fuel*. Pridobljeno 25. aprila 2019 iz <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx>
104. World Nuclear Association. (2018c). *Country Profiles*. Pridobljeno 13. maja 2019 iz <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles.aspx>
105. World Nuclear Association. (2018d). *The Harmony programme*. Pridobljeno 25. februarja 2019 iz <http://world-nuclear.org/harmony>
106. World Nuclear Association. (2018e). *Safeguards to Prevent Nuclear Proliferation*. Pridobljeno 12. julija 2019 iz <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/non-proliferation/safeguards-to-prevent-nuclear-proliferation.aspx>
107. World Nuclear Association. (2019a). *Nuclear Power in the World Today*. Pridobljeno 20. februarja 2019 iz <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
108. World Nuclear Association. (2019b). *Economics of Nuclear Power*. Pridobljeno 24. aprila 2019 iz <http://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>
109. World Nuclear Association. (2019c). *Decommissioning Nuclear Facilities*. Pridobljeno 3. maja 2019 iz <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities.aspx>
110. World Nuclear Association. (2019d). *Safety of Nuclear Power Reactors*. Pridobljeno 12. julija 2019 iz <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx>
111. World Nuclear Association. (2019e). *Supply of Uranium*. Pridobljeno 1. septembra 2019 iz <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium.aspx>
112. World nuclear news. (2015a, 3. junij). *Plan sets out Japan's energy mix for 2030*. Pridobljeno 24. maja 2019 iz <https://www.world-nuclear-news.org/NP-Plan-sets-out-Japans-energy-mix-for-2030-0306154.html>
113. World nuclear news. (2015b, 21. julij). *Partners agree on life extension for Krško*. Pridobljeno 18. aprila 2019 iz <http://www.world-nuclear-news.org/C-Partners-agree-on-life-extension-for-Krsko-2107154.html>
114. World nuclear news. (2017, 19. junij). *Korea's nuclear phase-out policy takes shape*. Pridobljeno 22. maja 2019 iz <http://www.world-nuclear-news.org/NP-Koreas-nuclear-phase-out-policy-takes-shape-1906174.html>

115. World nuclear news. (2018, 4. junij). *President calls for action to preserve US nuclear plants*. Pridobljeno 20. maja 2019 iz <http://www.world-nuclear-news.org/NP-President-calls-for-action-to-preserve-US-nuclear-plants-0406187.html>
116. Yano, K. H., Mao, K. S., Wharry, P. J., & Porterfield, D. M. (2018). Investing in a permanent and sustainable nuclear waste disposal solution. *Progress in Nuclear Energy*, 108(1), 474–479.
117. Zore, J. (2016, 20. december). *Proizvodnja v NEK bo občutno cenejša*. Pridobljeno 25. oktobra 2019 iz <https://www.delo.si/gospodarstvo/infrastruktura/proizvodnja-v-nek-bo-obcutno-cenejsa.html>
118. Zore, J., & Tavčar, B. (2017, 21. december). *Za Nek 2 dali 14 milijonov, odločitve pa še kar ni*. Pridobljeno 25. marca 2019 iz <https://www.delo.si/gospodarstvo/podjetja/za-nek-2-dali-14-milijonov-odlocitve-pa-se-kar-ni.html>
119. Žniderič, D. (2017). *Od jantarja do tiskanih vezij: zgodovinski pregled razvoja elektrotehnike*. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije.