

EKONOMSKI ASPEKTI PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

Branislav Radonjić

Ilija Vujošević

The overall objective of the paper is to provide information on the key factors affecting the economics of electricity generation. The report can serve as a source for policy makers and industry professionals trying to better understand the generation costs of these technologies. Is it better to use conventional thermal power plants or natural gas, nuclear power plants, wind turbines and the others renewable technologies, or hydroelectric power plants? Competitiveness of the production costs of electricity from existing and potential sources is, and will be, to a large extent, the determinant of economic status and the stability of Montenegro, the determinant of economic motivations for future development and determinant of living standards of the citizens of Montenegro.

Odakle primarna energija

Električna energija danas ima status esencijalnog proizvoda i snabdijevanje električnom energijom se posmatra kao univerzalna usluga kojoj svaki potrošač mora imati slobodan pristup pri razumnim cijenama. Razmatranje ključnih aspekata tehnologija za proizvodnju električne energije otvara prethodno, generičko pitanje: odakle energija? Energija koja ovoj civilizaciji stoji na raspolaganju dolazi od Sunca, zatim energije koja je akumulirana u Zemlji, kao i od energije koja je posljedica gravitacionih sila Sunca, Zemlje i Mjeseca. Ne ulazeći u

fizičke procese na kojima se zasnivaju navedeni resursi (termonuklearne reakcije i zračenje Sunca, temperaturni gradijent Zemlje i promjena potencijalne energije mora usljed gravitacionih sila), ovdje je bitno naglasiti nekoliko činjenica.

Od ukupne energije Sunčevog zračenja samo mali dio doprijeva do Zemlje ($1,05 \cdot 10^9$ TWh/god), no i taj godišnji energetski doprinos Sunca je veći od ukupnih poznatih svjetskih rezervi uglja i nafte. Osnovne forme posredne transformacije ove energije su fotosinteza, isparavanje vode i strujanje vazduha i vode, a manji dio služi za neposredno zagrijavanje okoline. Fotosintezom se energija Sunčevog zračenja milionima godina transformisala u hemijsku energiju fosilnih goriva, a tekućom fotosintezom se obezbjeđuje hrana za ljude i životinjski svijet. Isparavanjem vode sa površina mora, jezera i rijeka, kao i iz zemljišta i biljaka, a potom kondenzacijom na određenoj visini dolazi do padavina koje su izvor potencijalne energije vodnih akumulacija. Najzad, strujanje nastaje kao posljedica temperaturnih razlika vazduha (vjetar) ili vode (morske struje), što po svom karakteru predstavlja kinetičku energiju.

Zemljino jezgro sastoji se od rastopljene materije temperature 5 500 K (kelvina) i vrlo velikog pritiska od $345 \cdot 10^9$ Pa (paskala). Za korišćenje unutrašnje toplotne energije Zemlje bitan je tzv. toplotni gradijent koji za Zemljinu koru (čija je debljina do 50 km) iznosi 1 K za svaka 33 metra. Prema današnjim tehnologijama toplota Zemlje se može koristiti kao izvor vruće vode i pare, kao geotermalna energija suvih stijena i primjenom toplotnih pumpi.

Treći pomenuti izvor energije na Zemlji uslovljava promjenu nivoa mora (plimu i osjeku), odnosno promjenu potencijalne energije mora. Zavisno od geografskog položaja nivo mora varira od nekoliko santimetara do šesnaest metara. Procjenjuje se da ukupna energija plime i osjeke iznosi oko 23 000 TWh godišnje. No, tehničko-ekonomski iskoristiv je potencijal oscilacija

nivoa mora preko jednog metra, što predstavlja samo manji dio ukupne energije.

Klasifikacija oblika energije

Navedeni prirodni (primarni) oblici energije se bez transformacija rijetko mogu neposredno koristiti. Veoma često je neophodno jednom ili više puta transformisati kako bi se dobili najpogodniji oblici energije za upotrebu. Postoje brojne kombinacije i razvijene tehnologije ovih transformacija kao na primjer, transformacija hemijske i nuklearne energije u toplotnu, toplotne u mehaničku, mehaničke u električnu, električne u mehaničku, toplotnu, hemijsku, svjetlosnu itd. Jedino se od prirodnih oblika mogu neposredno upotrijebiti (na primjer, za grijanje prostora) vrući izvori i energija Sunčevog zračenja, dok se prema današnjim saznanjima i tehnologijama ne mogu iskoristiti energije vulkana i atmosferskih pražnjenja.

Prema fizičkim svojstvima prirodni oblici energije dijele se na nosioce:

- *hemijske energije* (drvo i otpaci, ugalj i treset, sirova nafta, zemni gas, uljni škriljci, biomasa i bioplin),
- *potencijalne energije* (vodne snage, plima i osjeka),
- *kinetičke energije* (vjetar, energija morskih struja i talasa),
- *toplotne energije* (getermička, toplotna energija mora),
- *nuklearne energije* (nuklearna goriva),
- *energije zračenja* (Sunčevo zračenje).

U kontekstu obezbjeđivanja ukupnih energetske, a posebno elektroenergetske potreba, veoma važna podjela prirodne energije je na neobnovljive i obnovljive oblike. U *neobnovljive* ubraja se ugalj i treset, nafta, zemni gas, uljni škriljci, nuklearna goriva i unutrašnja toplota Zemlje. Kategoriji *obnovljivih* pripadaju drvena goriva, biomasa, biogas, vodne snage, energija vjetra, energija plime i osjeka, morskih struja i talasa, toplota mora i

energija Sunčevog zračenja. Između neobnovljivih i obnovljivih izvora postoje razlike u pogledu konstantnosti, mogućnosti uskladištenja i transporta, nivoa štetnih uticaja na okolinu, ali i u pogledu potrebnih investicija za izgradnju proizvodnih postrojenja i tekućih troškova njihovog pogona i održavanja.

Nakon otkrića vatre i upotrebe energije životinja za obradu zemlje i za otkrivanje novih prostora, čovjek počinje koristiti obnovljive prirodne oblike energije: energiju vjetra za pogon jedrenjaka i mlinova i energiju vode za pogon mlinova i za navodnjavanje. Slijedi pronalazak parne mašine (James Watt 1769), motora sa unutrašnjim sagorijevanjem (Nicolas August Otto 1861), električnog generatora (Werner fon Siemens 1866), a 1954. god. u Obninsku – Rusija počinje sa radom prva nuklearna elektrana. Dakle, od početka industrijske revolucije naša civilizacija za proizvodnju energije zavisi od fosilnih goriva. Prvo je bio ugalj, zatim nafta, a od kraja XIX vijeka hidroenergija za proizvodnju električne energije, a u drugoj polovini XX vijeka i nuklearno gorivo. No, kod fosilnih goriva postoje dva problema: prvi je da ugalj i nafta nijesu beskonačan resurs, a drugi je da sagorijevanje uglja i nafte ispušta milijarde tona ugljen dioksida (CO₂) u atmosferu.

Energetski resursi i tehnologije za proizvodnju električne energije

U vezi energetske transformacije nije na odmet pomenuti jedan od fundamentalnih prirodnih zakona. To je zakon o održanju energije koji glasi da se energija ne može ni stvoriti ni uništiti, već može mijenjati svoj oblik postojanja, odnosno pretvarati se iz jednog oblika u drugi. Kada je u pitanju električna energija kao najkvalitetniji oblik sekundarne energije, ona se može dobiti iz sva tri osnovna prirodna izvora: energije od Sunca, energije u Zemlji i gravitacione energije. Na primjer,

električna energija se od Sunca može dobiti preko bilo kojeg od četiri procesa: zračenja, fotosinteze, isparavanja i strujanja. Pritom, u savremenim proizvodnim bilansima dominiraju fotosinteza i isparavanje. Fotosintezom su u Zemljinoj kori deponovana fosilna goriva (ugalj, nafta, gas) čijim sagorijevanjem se u prvom stepenu energetske transformacije (sa svim štetnim emisijama) unutrašnja energija goriva transformiše u toplotnu, a u drugom toplotna u mehaničku koja se posredstvom generatora transformiše u električnu energiju. U novije vrijeme se energija Sunčevog zračenja, posredstvom fotonaponskih i gorivih ćelija (bez štetnih emisija), direktno pretvara u električnu energiju. Kod isparavanja (energija vodotoka) i kod strujanja (vjetar i morske struje) kinetička energija vode i vazduha pretvaraju se u mehaničku, a ova u električnu energiju. Slično je i sa energijom gravitacije (plima i osjeka) koja se u malom procentu koristi za proizvodnju električne energije. Međutim, značajan resurs za proizvodnju električne energije je nuklearno gorivo iz Zemlje koje se, poput fosilnih goriva, dvostrukom transformacijom pretvara u električnu energiju.

Prema tome, proizvodnja električne energije uključuje proizvodne kapacitete koji se baziraju na različitim tehnologijama koje pretvaraju toplotnu (sadržanu u različitim vrstama goriva), atomsku, kinetičku i razne oblike obnovljive energije (vjetar, Sunčevo zračenje, plima, geotermalni izvori i sl) u električnu energiju. Po osnovu energije koju koriste, elektrane se dijele na: hidro, termo, nuklearne, geotermalne, vjetroelektrane, solarne, elektrane na biomasu i ostale koje se u statistikama prikazuju kao novi obnovljivi izvori.

U zavisnosti od tehnologije i neizbježnih gubitaka u transformacijama varira nivo efikasnosti i troškovi proizvodnje. Efikasnost termoelektrana kreće se u intervalu 40-45%, kombinovanih gasno-parnih turbina (CCGT) 60%, efikasnost gasnih turbina je na nivou od 40%, nuklearnih reaktora 33-36%,

hidroelektrana 90-95%, a vetrogeneratora 35%. Naravno, sve tehnologije imaju nedostatke koje treba rješavati, i neće svaka ideja uspjeti. Nema izbora nego u ovom smjeru inovirati način na koji osnažujemo naše življenje. Pitanje je kako i kada? Što duže čekamo, prelaz će biti bolniji. Ili će nam ovaj teren (nekada, ali kada?) „poravnati“ uspješni i održivi razvoj tehnologije fuzije ili neke druge tehnologije transformacije ogromnog rezervoara materije u energiju, ili nešto što nadilazi naša sadašnja znanja...?

Tehnologije obnovljivih izvora energije rapidno se ubrzavaju tokom proteklih decenija, kako u tehnološkim rješenjima tako i u konkurentnosti troškova proizvodnje električne energije - i one sve više uzimaju učešće na tržištu. Ove tehnološke opcije nude mnoge pozitivne osobine, ali takođe imaju jedinstvene *cost/benefit* kompromise, kao što su konkurentnost u korišćenju zemljišta za bio-resurse i varijabilnost proizvodnje električne energije tehnologijama koje koriste vjetar i energiju zračenja Sunca.

Električna energija pripada rijetkoj grupi proizvoda će se proizvodnja i potrošnja odvijaju gotovo istovremeno. Usljed brojnih fizičkih ograničenja u proizvodnji i prenosu, postizanje ravnoteže između ponude i tražnje električne energije zahtijeva intenzivnu sistemsku koordinaciju. Prema tome, od značaja za ovu temu je naglasiti da, pored proizvodnje električne energije, elektrane imaju ulogu održavanja normalnog rada prenosne mreže i cjelokupnog elektroenergetskog sistema. U cilju obezbjeđivanja pouzdanog i sigurnog snabdijevanja električnom energijom, neophodno je ispuniti slijedeće funkcije:

- podešavanje angažovane snage kako bi se obezbijedila ravnoteža proizvodnje i potrošnje i izbjegla kolebanja frekvencije u sistemu;
- održavanje konstantnog napona u prenosnoj mreži, što se postiže proizvodnjom određene količine reaktivne energije;
- angažovanje elektrana u periodima van vršnog opterećenja radi obezbjeđenja ekonomičnog rada baznih elektrana;

- obezbjeđenje raspoložive snage koja je u stanju da se odmah angažuje (rotirajuća rezerva);

- sposobnost proizvodne jedinice da radi u uslovima ispada većih proizvodnih jedinica ili raspada elektroenergetskog sistema, što čini osnovu za ponovno podizanje elektroenergetskog sistema.

Navedene funkcije u određenoj mjeri nameću izbor i režim rada proizvodnih kapaciteta u konkretnom sistemu, što utiče na njihovu ekonomičnost. Promocija određenih vrsta tehnologija i pogonskog goriva uglavnom je rezultat nacionalnih politika i strategija koje najčešće polaze od toga da ostvare određenu sigurnost u snabdijevanju električnom energijom, podstaknu razvoj određenih regiona ili industrija, uravnoteže spoljnotrgovinski bilans, promovišu ili destimulišu određene tehnologije i investicije, utiču na životnu sredinu i dr. Tako su, na primjer, Francuska i Japan kroz izgradnju nuklearnih elektrana stimulisali razvoj nuklearnog programa, dok su Engleska i Njemačka uticale da privatna preduzeća koriste domaći ugljik koji je cijena daleko veća od tržišne. Posljednjih godina, zahvaljujući svojem tehnološkom i ekonomskom potencijalu Njemačka postaje lider u proizvodnji električne energije iz vjetroelektrana.

Struktura i iznosi troškova proizvodnje električne energije

Troškovi nastali proizvodnjom električne energije iz različitih izvora i/ili tehnologija sadrže trošak dobijanja električne energije, uključujući početni kapital, povraćaj investicije, kao i troškove rada, goriva i održavanja. Obično se mjere u jedinicama lokalne valute po jedinici električne energije, na primjer, centima po kilovatsatu za male brojeve, ili dolarima po megavatsatu za veće iznose. Kad računamo troškove, nekoliko internih elemenata troškova moraju se uzeti u obzir:

- *Kapitalni troškovi* (uključujući i odlaganje otpada i troškove saniranja lokacije poslije upotrebe za nuklearnu energiju) - su relativno niski za elektrane koje koriste sagorijevanje fosilnih goriva, visoki za obnovljive izvore energije i nuklearne elektrane, vrlo visoki za energiju iz otpada, talasa i plime, foto-naponske i solarne termalne elektrane.

- *Operativni troškovi i troškovi održavanja* - relativno su visoki za nuklearnu, energiju iz uglja, i otpada (odlaganje pepela i šljake otpada, prečišćavanje emisija, rad generatora) i niski za obnovljive izvore energije i jedinice koje prikupljuju ispušne plinove nafte i gasa.

- *Troškovi goriva* - visoki za fosilna goriva i biomase, vrlo niska za nuklearna i obnovljiva, eventualno negativni za energiju iz otpada.

Ostali elementi troškova su ekološke takse, troškovi tretmana i odlaganja otpada (i povezani problemi) i različiti troškovi osiguranja. Prihod ostvaren od prodaje toplotne energije može kompenzovati troškove rada i smanjiti neto troškove u slučaju kogeneracije (kombinirane proizvodnje toplote i električne energije).

Očekivani godišnji sati rada variraju u širokom opsegu: veoma su niski, čak 3%, za rezervne dizel agregate, 30% za vjetar, a idu i do 90% za nuklearne elektrane.

Ova kalkulacija ne uključuje širi sistem troškova povezanih sa svakim pojedinačnim tipom postrojenja, kao što su uključivanja na udaljene prenosne mreže, uravnoteženje i troškovi rezervi, i to ne uključuje eksternalije kao što su štete po zdravlje od elektrana na ugalj, ni uticaj emisija CO₂ na cjelokupnu biosferu (klimatske promjene, kisjelost okeana i eutrofikacije, izmjene okeanskih struja), kao ni troškove razgradnje nuklearnog postrojenja. Zato ovo nije obračun punog troška: ove stavke mogu biti izričito dodavane po potrebi, zavisno od namjene obračuna. To može imati malo uticaja na cijenu energije, ali pomaže kreatorima politike, a drugima da vode rasprave i donose odluke.

Da bi procijenili ukupni trošak proizvodnje električne energije, tokovi troškova se pretvaraju u *neto sadašnju vrijednost*. Ti troškovi su svi sabrani korišćenjem diskontnog *cash flow*-a (novčanog toka).

„Nivelisani trošak“ (Levelized Cost) je način da se uporede različite tehnologije proizvodnje električne energije. On se izračunava pretvaranjem svih kapitalnih troškova i tekućih izdataka za projekt u tekućoj valuti, i dijeljenjem toga sa iznosom proizvedene energije tokom životnog vijeka postrojenja. Nivelisani trošak je sveukupni trošak po kilovatsatu proizvedene energije.

Nivelisani trošak električne energije računa se za životni vijek od 20 do 40 godina i dat je u jedinicama konstantne valute po kilovatsatu, na primjer, AUD/kWh ili EUR (iz referentne godine) po kilovatsatu ili po megawatsatu.

Kada se upoređuju nivelisani troškovi električne energije za alternativne sisteme, vrlo je važno definisati granice 'sistema' i troškove koji su u to uključeni. Na primjer, da li treba prenosne i distributivne vodove uključiti u trošak? Obično je samo trošak konekcije izvora na prenosni sistem uključen kao trošak proizvođača.

Da li treba uključiti R&D (istraživanje i razvoj), porez i studije uticaja na životnu sredinu? Treba li uključiti troškove uticaja na javno zdravlje i troškove oštećenja životne sredine? Treba li uključiti troškove državnih subvencija u izračunate nivelisane troškove proizvodnje električne energije?

U nivelirane troškove u Tabeli 1 su troškovi prenosa, ali ne i troškovi podrške (back-up troškovi) za povremene izvore.¹ Tabele i slike - šeme (ovu i naredne) nećemo detaljnije opisivati jer smatramo da je i za laike suvišno, a osim toga bi se moglo upotrijebiti „hiljadu riječi“ za ono što je iz ilustracija jasno.

¹ Tabela je iz izvještaja američkog ministarstva energetike (U.S. Department of Energy) od 12. januara 2010. Energy Information Administration Energy Outlook, December 2009, DOE/EIA-0383 (2009)

Svako će „uzeti“ ono što ga interesuje: upoređenje klasičnih i obnovljivih resursa, upoređenje i rangiranje svih resursa i tehnologija; prema kapacitetima i njihovom stepenu korišćenja, kapitalnim ulaganjima, operativnim troškovima (fiksni i/ili varijabilni), ukupnim troškovima - ili će imati interesa za sve to.

Tabela 1: Procijenjeni troškovi proizvodnje električne energije po izvoru za objekte koji ulaze u pogon 2016. Subvencije nijesu uključene u račun.

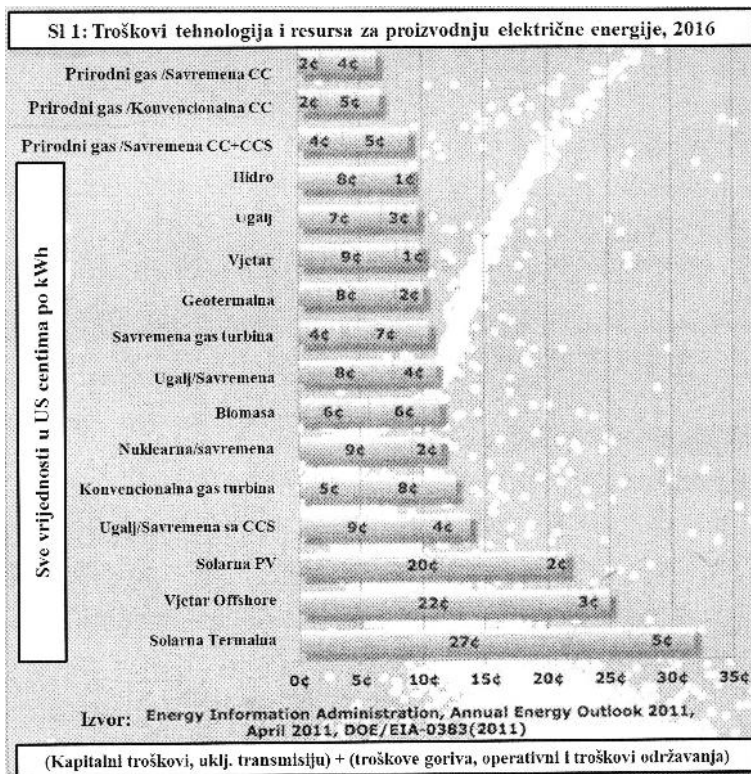
Tip elektrane	Stepen korišćenja kapaciteta (%)	U. S. prosječni nivelirani troškovi (2008 \$/MWh) za elektrane koje ulaze u proizvodnju 2016.				
		Kapitalni troškovi	Fiksni O&M	Varijabilni O&M (uklj. gorivo)	Investicije u prenos	Totalni troškovi sistema
Elektrana na ugalj, konvencionalna	85	69.2	3.8	23.9	3.6	110.4
Elektrana na ugalj, savremena	85	81.2	5.3	20.4	3.6	100.5
Elektrana na ugalj, savremena sa CCS	85	92.6	6.3	26.4	3.6	129.3
Elektrana na prirodni gas - Konvencionalni CC	87	22.9	1.7	54.9	3.6	83.1
- Savremeni CC	87	22.4	1.6	51.7	3.6	79.3
- Savremeni CC sa CCS	87	43.8	2.7	63.0	3.8	113.3
- Konvencionalna turbina za sagorijevanje	30	41.1	4.7	82.9	10.8	139.5
- Savremena turbina za sagorijevanje	30	38.5	4.1	70.0	10.8	123.5

Savremena nuklearna	90	94.9	11.7	9.4	3.0	119.0
Elektrana na vjetar	34.4	130.5	10.4	0.0	8.4	149.3
Elektrana na vjetar - Offshore	39.3	159.9	23.8	0.0	7.4	191.1
Solarna PV	21.7	376.8	6.4	0.0	13.0	396.1
Solarna termalna	31.2	224.4	21.8	0.0	10.4	256.6
Geotermalna	90	58.0	22.9	0.0	4.8	115.7
Elektrana na biomasu	83	73.3	9.1	24.9	3.8	111.0
Hidroelektrana	51.4	103.7	3.5	7.1	5.7	119.9
<p>O&M = operation and maintenance (operativni troškovi i održavanje); CC = combined cycle (kombinovani ciklus); CCS = carbon capture and sequestration (hvatanje i veživanje ugljika); PV = photovoltaics (fotonaponska); GHG = greenhouse gas (gas sa efektom staklene bašte)</p>						
<p>Izvor: Energy Information Administration Energy Outlook, December 2009, DOF/EIA-0383(2009)</p>						

Skorašnji članak koji je napisao Willis Eschenbach² i koji je objavljen na odličnom klimatskom websajtu *Watts Up With That* trebalo bi pročitati u cjelosti da bi shvatili da je Eschenbach-ova glavna poruka da solarna elektrana neće biti ekonomična u doglednoj budućnosti?! On daje grafikon (Slika 1) očekivanih

² Willis Eschenbach, *Levelized Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2011*. Released January 23, 2012. Report of the US Energy Information Administration (EIA) of the U. S. Department of Energy (DOE).

nivelisanih troškova 2016. god., upoređujući širok spektar različitih izvora energije, i sugerirše da je energija vjetra već postigla ekonomski temelj na bazi njenih nivelisanih troškova. No, kako objašnjava Willis, nivelisani troškovi izostavljaju neke važne elemente koje mudar planer energije nikada ne zaboravlja da uključi u svoje proračune.



Brzi pogled grafikona pokazuje da su i solarne fotonaponske (PV) i solarne fokusirane/termalne tehnologije skupe, daleko skuplje od bilo kojeg drugog izvora električne energije na listi. Energija vjetra je troškovno puno konkurentnija od solarne. Takođe su i vjetroelektrane izuzetno kapitalno intenzivne. Pored ostalog, Eschenbach konstatuje: „Ni energija vjetra ni solarne

energija nijesu, bez državnih subvencija, ekonomski ili troškovo konkurentne konvencionalnim izvorima energije. Moglo bi se tvrditi da se energija vjetra na određenim tržištima s dobrim vjetrom približila, ali ta logika ne važi za solarnu energiju.“

Evo i najnovijih nalaza iz studije koju je 2013. godine objavila Uprava za informacije o energiji SAD (EIA - Energy Information Administration), na bazi podataka iz 2012.³ Studija sadrži sadašnje i buduće projektovane troškove i izvršne karakteristike novih kapaciteta i tehnologija na bazi različitih resursa za proizvodnju električne energije, smatrajući da su oni kritični ulazi u razvoju energetske projekcije i analiza. Troškovi izgradnje i operativni troškovi, zajedno sa radnim karakteristikama novih proizvodnih objekata, igraju važnu ulogu u određivanju mješavine dodatnih kapaciteta koji će služiti budućoj potražnji za električnom energijom.

Tabela 2 sažima ažurirane procjene troškova za tipične generičke proizvodne objekte, uključujući sedam elektrana na ugalj, šest na prirodni gas, tri na solarnu energiju, po dvije na vjetar, hidroenergiju, biomasu i geotermalnu energiju, te po jednu na uran i komunalni čvrsti otpad. EIA (Energy Information Administration) modelira većinu, ali ne i sve ove tipove proizvodnim postrojenja, ali ih je uključila u istraživanje kako bi predstavila konzistentni trošak i informacije o performansama za široki spektar proizvodnih tehnologija.

Troškovi su razvijeni korišćenjem dosljedne metodologije koja obuhvata širok opseg projekta, a uključuje i indirektno troškove vlasnika. Brojke o troškovima ne moraju odgovarati onima dobijenim u drugim studijama koje primjenjuju druge pristupke procjene troškova.

Procjene navedene u ovom izvještaju predstavljaju generičke objekte koji su locirani u regiji bez ikakvih posebnih

³ Update Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants, *Energy Information Administration* 12 April 2013.

specifičnosti koje bi karakterisale njihove troškove. Ovo je urađeno zbog toga što se, opšte je poznato, troškovi gradnje elektrana u različitim regijama mogu značajno razlikovati.

Tabela 2: Procjene kapitalnih i proizvodnih troškova elektrana u SAD

Resurs/tehnologija	Kapacitet MW	Troškovi elektrane		
		Kapitalni troškovi (\$/kW)	Fiksni troškovi (\$/kW-god.)	Varijabilni troškovi (\$/MWh)
Ugalj				
Napredna PC - jedna jedinica	650	3,246	37.80	4.47
Napredna PC - dvije jedinice	1300	2,934	31.18	4.47
Napredna PC sa CCS - jedna jedinica	650	5,227	80.53	9.51
Napredna PC sa CCS - dvije jedinice	1300	4,724	66.43	9.51
IGCC-jedna jedinica	600	4,400	62.25	7.22
IGCC-dvije jedinice	1200	3,784	51.39	7.22
IGCC sa CCS-jedna jedinica	520	6,599	72.83	8.45
Gas				
Konvencionalna CC	620	917	13.17	3.60
Napredna CC	400	1023	15.37	3.27
Napredna CC sa CCS	340	2095	31.79	6.78
Konvencionalna CT	85	973	7.34	15.45
Napredna CT	210	676	7.04	10.37
Gorive ćelije	10	7108	0.00	43.00
Uran				
Nuklearna-dvije jedinice	2234	5530	93.28	2.14

Biomasa				
Biomasa CC	20	8180	356.07	17.49
Biomasa BFB	50	4114	105.63	5.26
Vjetar				
ON-shore	100	2213	39.55	0.00
Off-shore	400	6230	74.00	0.00
Solarna				
Solarna-termalna	100	5067	67.26	0.00
Fotonaponska	20	4183	27.75	0.00
Fotonaponska	150	3873	24.69	0.00
Geotermalna				
Geotermalna-Dual Flash	50	6243	132.00	0.00
Geotermalna - Binary	50	4362	100.00	0.00
Opštinski čvrsti otpad	50	8312	392.82	8.75
Hidroelektrična energija				
Konvencionalna	500	2936	14.13	0.00
Reverzibilna	250	5288	18.00	0.00
BFB - Bubbling Fluidized Bed; CC - Combined Cycle; CCS - Carbon Capture and Sequestration; CT - Combustion Turbine; IGCC - Integrated Gasification Combined Cycle; PC - Pulverized Coal; PV – Photovoltaic				
„Update Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants“ (April 2013)				

Da predemo sada na rezultate i procjene na drugim kontinentima.

Sljedeća tabela 3 daje izbor nivelisanih troškova električne energije iz dva velika vladina izvještaja iz Australije.⁴ Ovi nivelisani troškovi električne energije ne uključuju nikakve troškove za emisije gasova sa efektom staklene bašte za različite tehnologije.⁵

Tabela 3: Nivelisani troškovi energije za različite tehnologije u Australiji (2006)

Resurs / Tehnologija	Trošak (AUD/MWh)
Nuklearna (pom COTS planu)	40–70
Nuklearna (tipična)	75–105
Ugalj	28–38
Ugalj: IGCC + CCS	53–98
Ugalj: super pulverizovani + CCS	64–106
Gasne Turbine: otvoreni ciklus	101
Gas: kombinovani ciklus	37–54
Gas: kombinovani ciklus + CCS	53–93
Male hidroelektrane	55
Vjetroelektrane: visoki faktor kapaciteta	63
Solarna termalna	85
Biomasa	88
Fotonaponska solarna	120

U 1997. *Trade Association for Wind turbine (Wirtschaftsverband Windkraftwerke eV-WVW)* naručila je studiju o troškovima proizvodnje električne energije u novo-izgrađenim konvencionalnim

⁴ Graham, P. *The heat is on: the future of energy in Australia* CSIRO, 2006.

⁵ Switkowski, Z. *Uranium Mining, Processing and Nuclear Energy Review UMPNER taskforce*, Australian Government, 2006.

elektranama od *Rheinisch-Westfälischen* Instituta za ekonomska istraživanja-RWI) u Nemačkoj. RWI je predvidio troškove proizvodnje električne energije po kWh za osnovno opterećenje za 2010. kako slijedi u tabeli 4.

Tabela 4: Troškovi proizvodnje električne energije za novoizgrađene elektrane 2010.

Porijeklo energije	Troškovi proizvodnje, €/MWh
Nuklearna energija	107.0–124.0
Ugalj (braon)	88.0–97.0
Ugalj (crni)	104.0–107.0
Domaći gas	106.0–118.0
Energija vjetra - On-shore	49.7–96.1
Energija vjetra - Off-shore	35.0–150.0
Hidroenergija	34.7–126.7
Biomasa	77.1–115.5
Solarna energija	284.3–391.4

Iz tabele se mogu izvući zaključci da je prosječna vrijednost troškova proizvodnje električne energije za sve vrste konvencionalne tehnologije u 2010. godini, 10,9 c€ do 11,4 c€ po kWh. RWI izračunava to na pretpostavci da će troškovi proizvodnje energije zavistiti od razvoja cijene sirove nafte te da će cijena sirove nafte biti cca. 23 US \$ po barelu u 2010. Zapravo cijena sirove nafte bila je oko 80 USD u početku 2010. To znači da efektivni troškovi konvencionalne proizvodnje električne energije još uvijek trebaju biti veći nego što se očekivalo od RWI u prošlosti.

WVW uzima zakonodavnu *feed-in*-tarifu kao osnovu za troškove proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije, jer su elektrane na bazi obnovljivih izvora ekonomski

isplative po njemačkom zakonu (*German Renewable Energy Sources Act-EEG*).

Međunarodna agencija za energiju IEA (The International Agency for the Energy) i Elektroprivreda Francuske EDF (Électricité de France) su za 2011. u vezi sa solarnom energijom procijenile troškove na 293 €/MWh za velika postrojenja koja mogu da proizvode električnu energiju u opsegu od 50-100 GWh/godišnje i koja bi bila locirana na favorizovanoj lokaciji (kao što je južna Evropa). Za mala kućna postrojenja koja mogu da proizvode tipično oko 3 MWh/godišnje trošak je prema lokaciji između 400 and 700 €/MWh. Još uvijek je solarna energija daleko najskuplji obnovljivi izvor za proizvodnju električne energije, iako bi povećanje efikasnosti i duži vijek trajanja fotonaponskih panela, zajedno sa smanjenim troškova proizvodnje, ovaj izvor energije mogao učiniti konkurentnijim.

Troškovi proizvodnje energije u Francuskoj za različite tehnologije (u €/MWh) u 2011. godini bile su: 20 za hidro, 50 za nuklearne, 61 za turbine na prirodni gas bez hvatanja i procesiranja CO₂, 69 za on-shore vjetar i 293 za solarne farme.

Parsons Brinckerhoff⁶ je objavio izvještaj o nivelisanim troškovima proizvodnje električne energije u UK iz marta 2010. godine. Skorije UK procjene date su u studiji *Mott MacDonald*-a iz juna 2010⁷ i *Ove Arup & Partners*-ovoj studiji za DECC publikovanoj 2011. godini.⁸

⁶ *Powering the Nation*, Parsons Brinckerhoff. 2010. http://www.pbworld.com/regional/uk_europe_specialty/. Retrieved 16 February 2012.

⁷ Mott MacDonald study released by DECC in June 2010

⁸ Ove Arup & Partners Ltd (October 2011). *Review of the generation costs and deployment potential of renewable electricity technologies in the UK* (PDF). London: Department of Energy and Climate Change. <http://www.decc.gov.uk/assets/decc/11/consultation/ro-banding/3237-cons-ro-banding-arup-report.pdf>. Retrieved 16 February 2012.

Studija japanske vlade od 2010. godine, nazvana Bijela knjiga o energiji (The Energy White Paper), zaključila je da je trošak za kilowatsat bio 49 ¥ za solarnu, 10 do 14 ¥ za energiju vjetra, i 5 ili 6 ¥ za nuklearnu energiju. *Masayoshi Son*⁹, zagovornik obnovljive energije istakao je, međutim, da vladine procjene za nuklearnu energiju nijesu uključile troškove za reprocesiranje goriva i osiguranje od katastrofa. *Son* je procijenio da ako se ovi troškovi uključe, troškovi nuklearne energije bili bi približno isti kao oni za energiju vjetra.

Specifičnosti pojedinačnih resursa i tehnologija

*Hidroelektrane*¹⁰: Investicioni troškovi (zemljište, izgradnja brane, turbine, generatori naizmjenične struje i ostala električna oprema, itd) i operativni troškovi tokom životnog vijeka objekta (rad, repromaterijali, održavanje itd.) su direktni troškovi. Operativni troškovi obično ne prelazi 25% od cijene kWh (u odnosu na 40% u nuklearnoj elektrani i 70 do 80% u elektrani na ugalj ili prirodni gas). Trošak hidroelektrane po kWh time se sastoji 75% od investicionih troškova (osnovni kapital i kamate), što čini fiksni trošak proizvodnje.

Opseg varijacije troškova ulaganja u hidroenergetske objekte veći je nego kod drugih resursa, jer su geološke i hidrografske razlike mjesta koje treba biti pripremljeno znatne, kao i samih hidroenergetskih objekata: niske i visoke brane, skladištenje i pumpanje, itd.

Visoki troškovi ulaganja ne znače, međutim, da je hidroelektrani kWh skuplji od drugih, jer će operativni troškov biti

⁹ „Son’s quest for sun, wind has nuclear interests wary“, *Japan Times*, 12 July 2011, p. 3.

¹⁰ Jean-Marie Martin-Amouroux, *The economics of hydroelectricity*, *Hydro 21* - 82, Avenue Léon Blum - BP 75 - 38041 Grenoble Cedex 9 – France, Date June 2004.

izuzetno mali. Izračun jediničnih troškova je, međutim, komplikovan zbog ekstremne varijabilnosti broja godišnjih radnih sati hidroelektrane. Postoji nekoliko razloga za to. Proizvodnja hidroelektrana zavisi od dotoka, jer sve imaju fluktuacije priliva tokom vremena, zavisno od klimatskih uslova. Osim toga, sve elektrane ne obavljaju istu funkciju tokom vremena punjenja svog rezervora koje varira od manje od 2 sata za protočne-riječne elektrane do više od 400 sati za akumulacione elektrane. Hidroelektrane s akumulacijama obično su dizajnirane da se nose s dnevnim i sedmičnim modulacijama u potrošnji električne energije. Godišnji operativni rad elektrane takođe je podvrgnut različitim unutarnjim i vanjskim faktorima. Prvi rezultiraju iz upravljanja objektima i tokovima vode, uzvodno i nizvodno, kontrolisanja količine vode zadržane ili puštene iz rezervoara, dok drugi rezultiraju iz ograničenja nametnutih od strane alternativnih korištenja vode (za navodnjavanje, plovidbu, ribarstvo, sport itd.), što može u određenim uslovima dovesti do zatvaranja protoka. I pored svoje ekstremne varijabilnosti, jedinični troškovi kWh hidroelektrana ostaju u rasponu koji se mogu nositi bez problema ne samo s nuklearnim i konvencionalnim termoelektranama (3 do 5 c\$/kWh), već i sa onima koji koriste obnovljive izvore.

Analiza u pogledu životnog ciklusa ističe superiornost hidraulične energije nad svim drugim uporedivim programima:¹¹

- Emisije gasova sa efektom staklene bašte (ekvivalent kt CO₂/TWh): u najgorem mogućem slučaju (akumulacije u tropskom pojasu), basen emituje manje od fotonaponske solarne elektrane, ili elektrane na biomasu i jedva više od vjetroturbine ili nuklearne elektrane; protočna hidroelektrana u ovom pogledu zauzima prvo mjesto nad svim drugim rješenjima za proizvodnju električne energije;

¹¹ Luc Gagnon, *Revue de l'Energie*, 2003, br. 546.

- Emisija SO₂ (t SO₂/TWh): sa akumulacijom ili protočne, hidroelektrane emitiraju beskonačno manje od svih ostalih, bez izuzetka;

- Korišćenje prostora (km²/TWh): jedino nuklearna elektrana u boljoj je poziciji nego protočna hidroelektrana, akumulacione hidroelektrane koriste 4 puta više prostora nego fotonaponske solarne elektrane i dvostruko više nego vjetroturbine, ali daleko manje od biomase.

Male hidroelektrane: (U ove hidroelektrane smatraju se male ili vrlo male jedinice, obično instalisane snage do 10 MW): Kod diskontne stope od 5%, troškovi proizvodnje hidroelektrične energije kreću se između 40 i 80 USD/ MWh. Kod diskontne stope od 10%, troškovi proizvodnje hidroelektrične energije kreću se između 65 i 100 USD/MWh. Udio investicija koji prevladava u ukupnim nivelisanim troškovima proizvodnje električne energije objašnjava veliku razliku između troškova kod diskontne stope od 5 i 10%.

Elektrane na ugalj: Većina elektrana na ugalj imaju specifične troškove gradnje u rasponu između 1 000 i 1 500 USD/kWe. Vremena izgradnje su oko četiri godine za većinu postrojenja. Cijene goriva (ugalj, mrki ugalj ili lignit) tokom ekonomskog vijeka postrojenja variraju od zemlje do zemlje. Izraženo u istoj valuti koristeći službeni valutni kurs, cijene uglja u 2010. god. variraju sa faktorom 20. Otprilike polovina slučajeva ukazuju na eskalaciju cijena tokom ekonomskog vijeka postrojenja, dok druga polovina pokazuje stabilnost cijena.

Kod diskontne stope od 5%, nivelisani troškovi proizvodnje električne energije za većinu termoelektrana kreću se između 25 i 50 USD/MWh. Generalno, investicioni troškovi predstavljaju nešto više od trećine od ukupnog iznosa, troškovi rada i održavanja kreću se oko 20%, a goriva oko 45%.

Kod diskontne stope od 10%, nivelisani troškovi proizvodnje električne energije za većinu termoelektrana kreću se između 35

i 60 USD/MWh. Investicioni troškovi u većini slučajeva predstavljaju oko 50% od ukupnog iznosa, troškovi rada i održavanja kreću se oko 15% i troškovi goriva oko 35%.

Elektrane na gas: Za elektrane na gas specifični troškovi izgradnje u većini slučajeva kreću se između 400 i 800 USD/kWe. U svim zemljama, troškovi izgradnje elektrana na gas su niži od onih na ugalj i od nuklearnih elektrana. Elektrane na gas izgrađuju se brzo i u većini slučajeva između dvije do tri godine. Troškovi rada i održavanja elektranana na gas znatno su niži od onih na ugalj i od nuklearnih elektrana. Većina cijena gasa u 2010. bile su u rasponu između 3,5 i 4,5 USD/GJ.

Kod diskontne stope od 5%, nivelisani troškovi proizvodnje električne energije za većinu elektrana na gas kreću se između 37 i 60 USD/MWh. Investicioni troškovi predstavljaju manje od trećine ukupnih nivelisanih iznosa, troškovi rada i održavanja čine manje od 10% u većini slučajeva i troškovi goriva 80% i do gotovo 90% u nekim slučajevima. Prema tome, pretpostavke o cijenama gasa na dan puštanja u rad i eskalacija tih cijena su glavni činioci u procjeni nivelisanih troškova proizvodnje električne energije u elektranama na gas.

Kod diskontne stope od 10%, nivelisani troškovi proizvodnje električne energije za većinu elektrana na gas kreću se između 40 i 63 USD/MWh. Oni su malko viši nego kod diskontne stope od 5% zahvaljujući niskim investicionim troškovima i vrlo kratkim rokovima izgradnje. Trošak goriva ostaje glavni učesnik i predstavlja 73% od ukupnog nivelisanog troška proizvodnje električne energije, dok investicioni troškovi i troškovi rada i održavanja učestvuju sa oko 20%, odnosno 7%.

Nuklearne elektrane: Za nuklearne elektrane specifični investicioni troškovi, ne uključujući obnovu ili razgradnju i sanaciju lokacije, za većinu postrojenja variraju između 1000 i 2000 USD/kWe. Ukupni nivelisani investicioni troškovi obuhvataju troškove obnove, razgradnje i sanacije lokacije i kamate tokom izgradnje.

Kod diskontne stope od 5%, nivelisani troškovi proizvodnje električne energije za većinu nuklearnih elektrana kreću se između 21 i 31 USD/MWh. Investicioni troškovi predstavljaju najveći dio ukupnih nivelisanih troškova, u prosjeku oko 50%, dok troškovi rada i održavanja predstavljaju oko 30%, i troškovi ciklusa goriva oko 20%.

Kod diskontne stope od 10%, nivelisani troškovi proizvodnje električne energije za većinu nuklearnih elektrana kreću se između 30 i 50 USD/MWh. Udio investicija u ukupnom nivelisanom trošku proizvodnje je oko 70%, dok ostali elementi troškova (rad i održavanje i gorivni ciklus) predstavlja u prosjeku 20, odnosno 10%.

Elektrane na vjetar: Za vjetroelektrane specifični nivelisani troškovi izgradnje u rasponu su između 1 000 i 2 000 USD/kWe. U većini slučajeva potrebno vrijeme izgradnje iznosilo je od jedne do dvije godine,.

Izračunati i prikazani troškovi za vjetroelektrane temelje se na nivelisanoj metodologiji životnog rada (levelised lifetime methodology). Ovaj pristup ne odražava specifične troškove povezane s vjetrom ili druge povremene obnovljive izvore za proizvodnju električne energije, a posebno zanemaruje potrebu za rezervnom energijom za kompenzaciju faktora niske prosječne dostupnosti u odnosu na bazno opterećena postrojenja.

Za intermitentne obnovljive izvore poput vjetra, dostupnost/kapacitet postrojenja je ključni faktor za nivelisani trošak dobijanja električne energije. Pokazatelji raspoloživosti kapaciteta vjetroelektrana su u rasponu između 17 i 38% za postrojenja na kopnu (on-shore), a između 40 i 45% za postrojenja na moru, tj. za off-shore postrojenja.

Kod diskontne stope od 5%, nivelisani troškovi proizvodnje električne energije vjetroelektrana kreću se između 35 i 95 USD/MWh, ali za veliki broj postrojenja su ispod 60 USD/MWh. Udio rada i održavanja u ukupnim troškovima varira između 13% i gotovo 40%.

Kod diskontne stope od 10%, nivelisani troškovi proizvodnje električne energije vjetroelektrana kreću se u rasponu između 45 pa čak do više od 140 USD/MWh.

Solarne elektrane: Za solarne elektrane prikazani faktori dostupnosti/kapaciteta variraju od 9% do 24%. Kod višeg faktora kapaciteta dostupnosti nivelisani troškovi električne energije proizvedene iz solarne elektrane dopiru do 150 USD/MWh pri diskontnoj stopi od 5% i više od 200 USD/MWh pri diskontnoj stopi od 10%.

Kombinovane elektrane - toplane: Za kombinovane elektrane-toplane ukupni nivelisani troškovi proizvodnje električne energije su vrlo zavisni od korišćenja i vrijednosti koproduka, tj. toplote, te su time vrlo specifično zavisne od mjesta gradnje. Kod diskontne stope od 5%, nivelisani troškovi proizvodnje električne energije kreću se između 25 i 65 USD/MWh za većinu kogeneracijskih postrojenja. Kod diskontne stope od 10%, nivelisani troškovi proizvodnje električne energije kreću se između 30 i 70 USD/MWh za većinu postrojenja.

Posebno interesantni (specifični) troškovi

Rast na tržištu svjetske cijene nafte odražava se jasno na cijene prirodnog gasa, čak i ako mehanizam uticaja djeluje sa zakašnjenjem. Cijena uglja raste zbog povećanja cijena nafte i povećanja potražnje za ugljem. Cijena nuklearnog goriva sastoji od cijena prirodnog urana, troškova obogaćivanja i proizvodnje gorivih elemenata. Povećanje cijene prirodnog urana je izazvalo najveći rast troškova nuklearnih goriva. Treba napomenuti da je cijena nuklearnog goriva samo mali dio od nivoa cijena drugih goriva, te da je cijena prirodnog gasa očito veća nego uglja, treseta i drveta.

Uticaj ograničenja emisije gasova sa efektom staklene bašte ostvaruje se kroz cijenu na tržištu emisija. To doprinosi dopuni

troškova proizvodnje energije gasa, uglja i treseta, ali nema nikakvih dodatnih troškova za elektrane koje rade bez značajne emisije CO₂: nuklearne, hidroelektrane, solarne i elektrane na vjetar i drvo. Cijene emisijskih prava se vrednuju na tržištu električne energije. U osnovnom slučaju kalkulacija cijena prava na dopuštenu emisiju iz 2012. bila je 23 €/toni CO₂. U jednoj studiji EU procijenjena je cijena od gotovo 60 €/toni CO₂ za razdoblje 2013-2020.

Uvođenjem ograničenja na emisije CO₂ na proizvodnju energije u Evropskoj uniji klimatska politika počinje imati značajne uticaje na tržišta energije. Evropska unija uvela je EU šemu trgovanja emisijama (EU ETS) 1. januara 2005., koja postavlja *kape* za emisiju CO₂ kod nekih 11 500 postrojenja širom EU-25. Postrojenja imaju fleksibilnost za povećanje emisije iznad svojih *kapa*, pod uslovom da su dobila emisijske kvote za pokrivanje prekoračenja emisija. Postrojenja s emisijama ispod *kape* smiju prodavati neiskorišćene kvote. EU ETS je izazvala vitalno tržište EU dozvolama (EUA), sa transakcijama u ukupnom iznosu od 14,6 milijardi eura u 2006. (Point Carbon, 2007), te kreirala značajnu CO₂ cijenu. Ova cijena je sada još jedna komponenta troška za pokrivena postrojenja, uključujući i proizvođače energije, daleko najvećeg emitera u šemi.

Troškovi sistema. Troškovi razvijeni iz gorenavedene analize samo su dio slike u planiranju i troškovima velikog modernog elektroenergetskog sistema. Dodatna razmatranja odnose se na profil opterećenja, tj. kako se ono mijenja tokom sekunde, minuta, sata, dana i mjeseca određene godine. Kako bi zadovoljili promjenjivo opterećenje, uglavnom je potrebna mješavina opcija elektrana, pa je značajan ukupni trošak obezbjeđenja ovog opterećenja. U tome energija vjetra ima slab doprinos, jer u mirnim razdobljima (zatišjima) mora biti obezbijeđena podrška iz pogonske rezerve sistema. Iako u manjoj mjeri, svi ostali proizvođači energije takođe zahtijevaju pogonsku rezervu.

U slučaju vjetroelektrana, dodatni troškovi rezerviranja radi balansiranja sistema pri promjenljivom opterećenju mogu biti znatni. To je zato što se duvanje vjetra često zaustavlja čak i na velikim površinama, odjednom i za duže vrijeme. Neki zagovornici energije na vjetar tvrde da su u panevropskom slučaju troškovi pogonske rezerve prilično niski, što je rezultiralo ukupnim troškovima energije vjetra približno istim današnjoj cijeni energije. Međutim, takva tvrdnja generalno se smatra previše optimističnom, osim eventualno za neka marginalna povećanja koja, u određenim okolnostima, mogu iskoristiti postojeću infrastrukturu.

Korišćenje vremena vršnog opterećenja nuklearnih elektrana u Finskoj u prosjeku bilo je više od 8000 sati godišnje, a dostizalo je čak 8400 sati. Za osnovni slučaj vrijeme korišćenja vršnog opterećenja od 8000 sati godišnje odgovara faktoru opterećenja od 91,3%. Ista vrijednost se postiže takođe i za druge alternative elektrana, osim za vjetroelektrane. U stvarnosti, korišćenje vremena vršnog opterećenja za gas, uglj, treset i drvo biće kraće, ali zbog ravnopravnosti koristi se ista vrijednost kao i za nuklearnu energiju.

Ekonomski vijek elektrana opisuje vremensko razdoblje u kojem bi se ulaganje u elektrane trebalo vratiti. Tehnički vijek je obično duži od toga. Tehnički vijek nuklearne elektrane je 60 godina, a u izračunima se koristi ekonomski vijek od 40 godina. Potrebna godišnja investiciona održavanja za dostizanje toga su uključena u troškove rada i održavanja. Za ostale elektrane koristi se ekonomski životni vijek od 25 godina, a njihovi troškovi rada i održavanja ne uključuju nikakva posebna godišnja investiciona ulaganja za održavanje.

Ekonomska profitabilnost ulaganja u elektrane zavisi od konkurentnosti troškova proizvodnje i tržišne cijene električne energije. Ograničenja emisija i cijena emisije imaju jasan utjecaj na budući razvoj cijene električne energije na tržištu, koja je očito u rastu. Terminalska cijena električne energije za 2013. god.

je 53 €/MWh, a oko 2020. cijena može biti reda 60-70 €/MWh. Kod se računaju povraćaj investicije i drugi pokazatelji profitabilnosti investicije u nuklearnu energiju koriste se tržišne cijene od 40 do 70 €/MWh.

Projektovani troškovi prema resursu i/ili tehnologiji 2006-2030.

Očekuje se da će troškovi fosilnih goriva koja se trenutno koriste za proizvodnju električne energije rasti dramatično, dok će oni kod obnovljivih izvora padati. Cijena energije vjetra već je niža od cijene prirodnog gasa. Prije ili kasnije, zavisno od raznih faktora, cijena čak i skupljih tehnologija obnovljivih izvora energije, kao što su solarne fotonaponske će pasti ispod cijene električne energije iz fosilnih goriva. Trend obnovljivih izvora energije koji postaju sve više cjenovno konkurentni mogao bi biti ubrzan kada potreba za prirodnim gasom počne nadmašivati ponudu, ili kada elektrane na fosilna goriva budu prisiljene da plaćaju za svoje emisije.

Kao što je prikazano u Tabeli 5, (UC Santa Barbara Economic Forecast Project) predviđa se da će doći do značajnog porasta cijena električne energije iz nuklearnih i elektrana na uglj i prirodni gas u razdoblju do 2030. godine, dok će cijene za obnovljive izvore pasti.

Table 5: Projektovani troškovi prema resursu/tehnologiji 2007–2030. (cUSD/kWh)

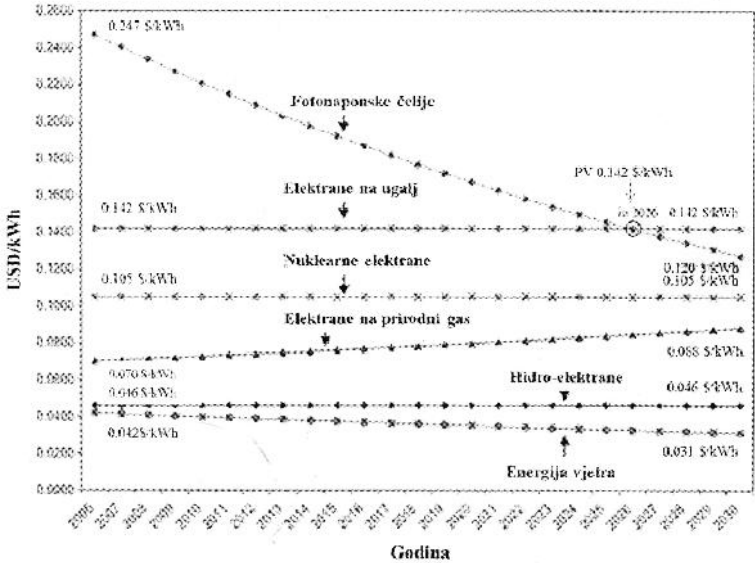
Resurs/Tehnologija	Troškovi 2007	Troškovi 2020	Troškovi 2030
Biomasa (poljski gas)	4,4	4,4	4,4
Geotermalna	6,6	5,5	4,4
Vjetar (klasa 5)	6,6	6,0	6,0

Savremena nuklearna	7,4	9,3	11,4
Prirodni gas	9,4	13,22	17,66
Ugalj w/gasifikacija	9,6	10,9	12,1
Gasifikacija biomase	10,7	7,0	6,0
Male hidroelektrane	11,95	11,95	11,95
Fotonaponske (PV) koncentrične	18,6	9,01	6,92
Fotonaponske (PV) parabolične	21,9	10,6	8,15
Fotonaponske (PV)	39,6	9,38	7,21
Prirodni gas - vršna (prosti ciklus)	46,0	52,63	59,77
Source: Community Environmental Council, „Santa Barbara County Renewable Energy Blueprint“			

Uporedne procjene i proces projektovanja koriste se za ispitivanje ključnih karakteristika vodećih tehnologija za proizvodnju električne energije, predviđanje trendova u smanjenju troškova i procjenu potencijala rasta.¹² Procjenjuje se uloga obnovljivih izvora energije u proizvodnom portfelju, kao i strategije integracije resursa kako bi se smanjili troškovi i ekološke štete. Nivo usvajanja svake tehnologije povezan je sa smanjenjem troškova i trendovima rasta korišćenjem pravila primjene troškovnog prioriteta, kao na slici 2. Procijenjeni nivoi onda se upoređuju s projektovanim rastom potražnje za energijom. Ovo može da se odnosi i na nacionalni i na regionalni nivo energetskog planiranja.

¹² Kelly R. Cowan, Turgrul Daim, *Department of Engineering & Technology Management, Maseeh College of Engineering and Computer Science, Portland State University, P.O. Box 751 Portland, OR 97207 0751, USA* <http://dx.doi.org/10.1016/j.techsoc.2009.10.003>, *How to Cite or Link Using DOI*.

SI 2: Trendovi troškova proizvodnje električne energije USA (2006-2030)

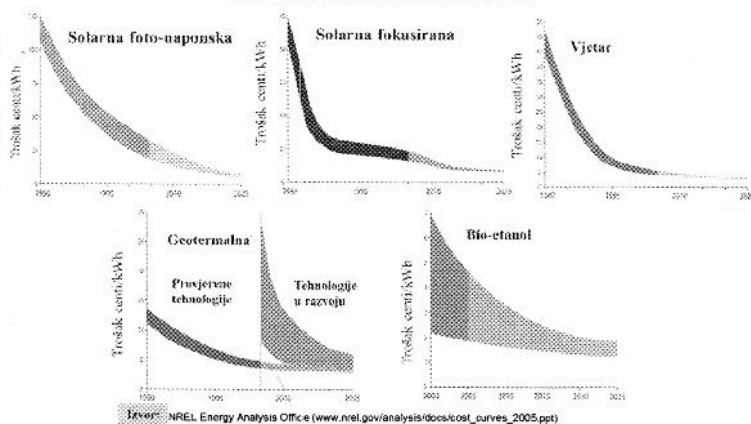


Trendovi zona troškova tehnologija obnovljivih izvora, slike 2 i 3, pokazuju strm pad od 1980. do danas. Projekcije dalje pokazuju da će ovaj pad da se nastavi, ali sporijim tempom do dostizanja tehnološke zrelosti.

Smanjenje troškova tehnologije vjetra vrši se sa posebnom pažnjom na niske brzine vjetra i niske brzine okretanja vjetrenjača, što će staviti na raspolaganje velike količine raspoloživih resursa vjetroelektranama koje su bliže prenosu. Niži troškovi će rezultirati iz dizajna i tehnologije poboljšanja u širokom spektru od temelja i tornjeva, do lopatica turbina, reduktora, generatora i elektronike.

Projekcije fotonaponskih troškova temelje se na povećanju penetracije tehnologije tankog filma u građevinskom sektoru. Vjerovatna poboljšanja tehnologija uključuju veću efikasnost, povećanje pouzdanosti (što može smanjiti cijene modula), poboljšanja procesa proizvodnje i niže troškove od uspostavljanja sistema kroz poboljšanje tehnologije i obim prodaje.

SI 3: Trendovi zona troškova tehnologija obnovljivih izvora
 Nivelisani troškovi u konstantnim \$ 2005



8. Odnos vraćene i uložene energije

U fizičkom, energetski-ekonomskom i ekološki-energetskom smislu, *vraćena energija na uloženu energiju* (energy returned on energy invested - EROEI), ili *energija vraćena po investiciji* (energy return on investment - EROI), je odnos iznosa korisne energije dobijena iz određenog izvora energije prema iznosu energije potrošene za ostvarenje tog energetskog izvora. Kada je EROEI izvora manji ili jednak jedinici, taj izvor energije postaje „ponor energije“, te se više ne može koristiti kao primarni izvor energije.

Prirodni izvori energije obično nijesu uključeni u iznos uložene energije, već samo ljudski-stvoreni izvori. Na primjer, u slučaju biogoriva, solarno zračenje koje pokreće fotosintezu nije uključeno, a energija koja se koristi u zvjezdanoj sintezi fisionih elemenata nije uključena u nuklearnu fisiju. Vraćena energija uključuje korisnu energiju, a ne nenamjenski potrošenu poput izgubljene toplote.

Profesor Charles Hall, ekolog na *SUNY College of Environmental Science and Forestry*, razvio je koncept računanja odnosa

vraćene i uložene energije (Energy return on investment-EROI¹³) da bi dao zajedničku mjeru za upoređivanje vrlo različitih goriva.

Scientific American kompilira niz izvora da bi se vidjelo koji izvori pružaju najviše energije u odnosu na uloženu koja je potrebna da se ostvari proizvodnja. Kad pogledamo u Tabeli 6 povratnu energiju koju nude različiti resursi i tehnologije za proizvodnju električne energije, zapažamo i neke druge faktore koji se uzimaju u obzir pri odluci kako zadovoljiti potražnju za energijom.

Tabela 6: EROI/EROEI - Odnos vraćene energije na uloženu energiju

EROI (SAD)	Gorivo
80.0	Ugalj
100.0	Hidro
10.0	Prirodni gas 2005
10.0	Nuklearno (sa difuznim obogaćivanjem)
50.0	Nuklearno (sa centrifugalnim obogaćivanjem, sa brzim ili Th reaktorom)
30.0	Nafta i gas 1970
14.5	Nafta i gas 2005
6.8	Fotonaponske ćelije
1.6	Solarni kolektor
1.9	Solarni ravni paneli
18.0	Vjetar
Murphy & Hall 2010	

¹³ Profesor Charles Hall, *Energy return on investment (EROI)*, Post Carbon Institute, Santa Rosa, California 9 5404 USA.

Infografija stavlja hidroenergiju, vjetar i ugalj kao najbolje, dok prirodni gas, solarna i nuklearna daju znatno niži povraćaj prema ovom mjerilu.¹⁴

Razlog zašto su hidroelektrane i vjetroelektrane tako dobre po ovom mjerilu je uglavnom zbog relativno male količine energije potrebne za izgradnju brana i turbina - barem u odnosu na izgradnji nuklearne elektrane. Ugalj je relativno lako izvaditi, u energetskom smislu, i ima odnos vraćene i uložene energije usporediv sa vjetroelektranom.

Svi procesi koji su uključeni u izgradnju i upravljanje nuklearnom energijom, kao što su rudarstvo, obogaćivanje urana i skladištenje otpada, su energetski vrlo intenzivni. To nuklearnu elektranu, u pogledu odnosa vraćene i uložene energije, čini lošim izborom proizvodnje električne energije. Solarni paneli su energetski intenzivni za proizvodnju, tako da imaju sličan niski odnos vraćene i uložene energije, iako Mason Inman govori da ovaj odnos raste.¹⁵

Vrijedno je napomenuti, međutim, i druga mišljenja, da je opseg procjena odnosa vraćene i uložene energije za nuklearku uistinu veliki, u rasponu od procijenjenih 40 do 60, od Svjetskog nuklearnog društva (*World Nuclear Association*), do manje od jedinice. Inman ističe da je koristio pregledni članak mnogih studija, u kome se odnos vraćene i uložene energije za nuklearku vrednuje sa pet.

Znači li to da bi svijet trebao da odustane od konvencionalnih termoelektrana i umjesto toga ulaže u hidroelektrane? Ne nužno - postoje neki drugi razlozi kojima se kalkulacije odnosa vraćene i uložene energije ne bave.

¹⁴ *The Energy Return on Investment Threshold*, Posted by David Murphy on November 25, 2011.

¹⁵ <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=eroi-behind-numbers-energy-return-investment&page=3>

Za izvore električne energije, Inman u *Scientific American*-u navodi da je koristio vrijednosti koje su karakteristične za električnu energiju proizvedenu od strane određenog izvora, a ne za proizvodnju sirovog goriva koji se može koristiti da se proizvede električna energija. Dakle, u slučaju ugljenika, na primjer, odnos vraćene energije na uloženu za sami ugalj bio bi otprilike tri puta veći nego za električnu energiju iz uglja (jer je tipična efikasnost elektrane na ugalj oko 33%).

Hidroelektrane: Postoji širok raspon vrijednosti odnosa vraćene i uložene energije prijavljenih za hidroelektrane od oko 40 do više od 250. Da bi iskazao taj niz, Inman je prikazao vrijednost kao „40+“.¹⁶

Vjetroelektrane: Inman, je koristio meta-analizu 50 studija, uključujući i 119 različitih farmi vjetroelektrana ili turbina.¹⁷

Elektrane na ugalj: Većina studija o odnosu vraćene i uložene energije uglja izvještavaju o vrijednostima za ukupni energetski sadržaj u uglju. Da bi ga učinilo uporedivim s drugim izvorima električne energije, posebno obnovljivim izvorima, Inman je koristio odnos vraćene i uložene energije za električnu energiju iz uglja. Jedan je posebno fokusiran na solarnu energiju, ali ju je uporedio s fosilnim gorivima:¹⁸ Brojčana vrijednost odnosa vraćene i uložene energije bila je u skladu s onim što bi dobili iz *back-of-the-envelope* kalkulacije, dijeleći vrijednost saopštenog odnosa vraćene i uložene energije za ugljenik sa tri, na račun gubitka energije u elektrani (personalna komunikacija, Charles Hall iz S.U.N.Y. Environmental Science and Forestry).

¹⁶ Gagnon et al., „Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001“, *Energy Policy* (2002).

¹⁷ Kubiszewski et al., „Meta-analysis of net energy return for wind power systems“, *Renewable Energy* (2010).

¹⁸ Raugei et al., „The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics“, *Energy Policy* (2012).

Solarne (fotonaponske) elektrane: Postoji širok izbor procjena odnosa vraćene i uložene energije solarnih fotonaponskih elektrana, kao i djelimično jer se tehnologije i proizvodne tehnike unapređuju brzo, što je glavni razlog za velika smanjenja cijena u posljednjih deset godina. Inman je koristio najnoviju recenziranu studija koju je mogao naći - *Raugei* i saradnici, 2012. EROI za solarne fotonaponske ćelije skoro izvjesno raste (*Raugei* i saradnici, 2012; personalna komunikacija, Michael Dale sa Stanford Univerzitetu). Najnoviji podatak u *Raugei* studiji je barem par godina star, tako da je odnos vraćene i uložene energije danas najvjerojatnije veći od 6, broja koji se navodi u članku, kaže Inman.

Elektrane na prirodni gas: Inman, kaže da je bilo teško naći procjenu odnosa vraćene i uložene energije za prirodni gas, jer se podaci za prirodni gas tipično prikazuju zajedno s naftom. Za vrijednost 7 Inman je koristio alternativnu mjeru koju je osmislio Carey King¹⁹ (the University of Texas at Austin) koju on naziva *odnos energetske intenzivnosti* (Energy intensity ratio), a koja je uporediva s odnosom vraćene i uložene energije. King-ova vrijednost za odnos energetske intenzivnosti za električnu energiju iz prirodnog gasa je takođe u skladu s onim što bi dala *back-of-the-envelope* kalkulacija, koristeći odnos vraćene i uložene energije nafte i prirodnog gasa od 20 na ulazu, i prilagođen da bi uzeo u obzir tipičnu efikasnost elektrane na prirodni gas (oko 40 do 45%).

Nuklearne elektrane: Kao i kod hidroelektrana, procjene odnosa vraćene i uložene energije za nuklearnu energiju imaju vrlo veliki raspon. Neki tvrde da je odnos vraćene i uložene energije zapravo manje od 1, što bi značilo da cijeli proces nije izvor energije, već ponor. Međutim, drugi (poput jedne industrijske grupacije,

¹⁹ King, „Energy intensity ratios as net energy measures of United States energy production and expenditures“, *Environmental Research Letters* (2010).

World Nuclear Association) procjenjuju da je odnos vraćene i uložene energije puno veći nego možda za bilo koji drugi izvor energije, oko 40 do 60 kada se koristi centrifugalno obogaćivanje. Inman je citirao brojne studije koje je pregledao i procjenio da je odnos vraćene i uložene energije 5.²⁰

I pored mnogih kvaliteta kada su u pitanju izvori energije (na primjer, nafta je energetska gusta i prenosiva, dok je vjetar promjenljiv), kada odnos vraćene i uložene energije glavnih izvora energije za privredu pada, njena tražnja i vrijednost raste u odnosu na druga sredstva i robe. Zato odnos vraćene i uložene energije dobija na važnosti kada se upoređuju energetske alternative. Od utroška energije za dobijanje energije zahtijeva se produktivni napor: kako odnos vraćene i uložene energije pada, veći dio prirede mora biti posvećen dobijanju istog iznosa neto energije.

Pokazatelji za izbor resursa i tehnologija za proizvodnju električne energije

Za procjenu relativnog benefita/uticaja tehnologija: na *ugalj* - klasična tehnologija, na *ugalj* - tehnologija kaptaze i procesiranja gasova, na *prirodni gas*, na *nuklearna goriva*, *hidro*, na *vjetar*, na *biomasu*, *geotermalnih* i *solarnih-fotonaponskih* koriste se slijedeći pokazatelji:

Cijena izgradnje: trošak za izgradnju novog postrojenja prema ekvivalentu proizvodnog kapaciteta.

Cijena proizvodnje: projektovana cijena za proizvodnju električne energije iz novog postrojenja tokom njegovog životnog vijeka.

Korišćenje zemljišta: površina (i vrijednost) zemljišta potrebnog za podršku proizvodnji i snabdijevanju goriva i proizvodnji električne energije.

²⁰ Lenzen, „Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review“, *Energy Conversion and Management* (2008).

Potrebe za vodom: količina vode koja je potrebna za proizvodnju ekvivalentnog iznosa električne energije.

Emisije CO₂: relativna količina CO₂ emisija, po jedinici električne energije.

Ostale emisije, osim CO₂: relativna količina emisije drugih gasova sa efektom staklene bašte, osim CO₂, po jedinici električne energije.

Otpadni proizvodi: prisutnost drugih značajnih otpadnih materija.

Dostupnost tehnologije: mogućnost obezbjeđenja odgovarajuće, savremene i konkurentne tehnologije za proizvodnju električne energije, kada je to potrebno.

Fleksibilnost snabdijevanja: mogućnost da se brzo reaguje na promjene u potražnji električne energije.

Umjesto zaključka - Invencija ili Inercija?

Nemoguće je u okviru jednog rada izložiti svu kompleksnost, tehnološke trendove i brojne dileme u vezi racionalnog izbora elektroenergetskih tehnologija. Sve danas poznate tehnologije za proizvodnju električne energije imaju prednosti i nedostatke. Tehnologije koje koriste obnovljive izvore kao što su sunce i vjetar, „slobodne“ i „trajne“ resurse, ne proizvode štetne gasove sa efektom staklene bašte, ali nijesu fleksibilne. Energija kod njih nije uvijek dostupna (zavisi od „trenutnog“ intenziteta resursa - sunčevog zračenja i vjetra) kada je to potrebno i zahtijevaju znatne površine zemljišta. Tehnologije kao što su elektrane na uglj i nuklearne elektrane proizvode električnu energiju u velikim količinama, pouzdano i konstantno, ali rezultiraju emisijom značajnih količina gasova sa efektom staklene bašte (u slučaju elektrana na uglj), potrebom za velikom količinom vode i potrebom za dugoročnim zbrinjavanjem otpada, posebno u slučaju nuklearnih elektrana.

Hidroelektrane, od velikih, srednjih, vršnih i akumulacionih, kaskadnih, reverzibilnih do protočnih i malih, svaka posebno, podožne su gornjim kriterijuma izbora. Generalno bi rekli sa dosta prednosti u odnosu na konkurentne tehnologije. Valjda su i zato vodni potencijali u razvijenom svijetu davno i na vrijeme u visokom stepenu stavljeni u funkciju proizvodnje električne energije!

Najniži nivelisani troškovi proizvodnje električne energije glavnih tradicionalnih proizvodnih tehnologija u rasponu su od 25-45 USD/MWh u većini zemalja. Nivelisani troškovi i rangiranje tehnologija u svakoj zemlji su osjetljivi na diskontnu stopu i projektovane cijene prirodnog gasa i uglja.

Priroda rizika koji utiču na investicione odluke značajno se promijenila liberalizacijom tržišta električne energije, a to ima posljedice na određivanje potrebne stope povraćaja investicije. Tržišta uglja su pod utjecajem novih faktora. Politika zaštite životne sredine igra sve više i više važnu ulogu koja će vjerovatno značajno uticati na cijene fosilnih goriva u budućnosti. Sigurnost snabdijevanja energijom ostaje briga za većinu zemalja i može se odraziti na vladine politike koje utiču na status kapaciteta i investicije za proizvodnju (ne samo električne energije) u budućnosti.

Ovaj prikaz pruža uvid u relativne troškove tehnologija proizvodnje električne energije i ograničenja metodologije i generičkih pretpostavki. Procjene predstavljenih troškova ne znače precizne troškove koje bi izračunao potencijalni investitor za bilo koji određeni projekt. Sugerise se da ni jedna od tradicionalnih tehnologija proizvodnje električne energije ne može očekivati da će biti najjeftinija u svim situacijama. Poželjna tehnologija proizvodnje električne energije će zavisiti od specifičnih okolnosti svakog pojedinog projekta. Pritom se pokazuje da na globalnom nivou ima mjesta i prilike za sve efikasne proizvodne tehnologije.

Podsticaji za razvoj korišćenja obnovljivih izvora za proizvodnju električne energije preporučuju se samo kod početnih

projekata. Dva su glavna problema: prvi, što su *feed-in* tarife, na teret poreskih obveznika, najčešće više od projektovanih i tržišnih u periodu primjene, a osim toga najčešće su podigle krajnje cijene električne energije i, drugi, što je to netržišni mehanizam koji, u ime nekih lobija za tzv. zelenom energijom, a zapravo za plasman tehnologija i velikim profitom, diskriminišu konkurenciju i, u krajnjem, vode do štete po nacionalne ekonomije. Mehanizam podsticaja normiran je i u Crnoj Gori, ali pomenute uočene kontroverze u EU praksi (Englezi, Španci, Česi... ih napuštaju), ukazuju da je to složena tema koja zahtijeva najmanje jedan poseban rad.

„Tobogan“ troškova obnovljivih izvora energije ne mora biti veliki problem kao što se čini kada gledamo samo na stranu ponude energetske tehnologija. Gledajući na stranu traženja rješenja, kao što je energetska efikasnost, štednja, pametan rast i sl, ne bi morali biti u dilemi oko postepenog prelaska iz neobnovljivih, konačnih i prljavih fosilnih goriva ka neograničenim i čistim obnovljivim izvorima energije.

Takođe, efikasnost i pametni rast zasnivaju se na „inventivnim“ tehnologijama i, naročito, izboru i kombinaciji resursa i tehnologija, za razliku od „inercije“ tradicionalnih izvora energije. Kao takva, njihova primjena zahtijeva dugoročno planiranje i promišljanje. Kako naša fosilna goriva nestaju, moraćemo se opet osloniti na domaću pamet i racionalno aktiviranje sopstvenih resursa, ako se nadamo da ćemo zadržati nešto poput našeg održivog nivoa privredne aktivnosti.

Strategija nedjelovanja („do nothing“) koja znači ne investirati i ne zamijeniti fosilna goriva „slobodnim“ i „trajnim“ izvorima obnovljive energije, uključujući plaćanje energetske cjenovnih šokova sa nestabilnim cijenama električne energije u budućnosti, pogubna je za održiv ekonomski i socijalni napredak svake države, pa i Crne Gore.