

Procena održivosti energetskih sistema sa obnovljivim izvorima energije primenom eksergijske analize životnog ciklusa

BRANISLAV N. PETROVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Mašinski fakultet, Beograd
MILAN D. GOJAK, Univerzitet u Beogradu,
Mašinski fakultet, Beograd

Originalni naučni rad
UDC: 621.311:502.131.1
502.174.3
DOI: 10.5937/tehnika2105595P

Održivi razvoj energetskih sistema ne sastoji se samo u korišćenju obnovljivih energetskih resursa, već i u povećanju njihove efikasnosti, što omogućava društvu da maksimizira dobrobit njihovog korišćenja. Proizvodnja električne energije iz čistih i obnovljivih izvora doprinosi smanjenju iscrpljivanja fosilnih goriva i utiče na smanjenje štetnog uticaja na životnu sredinu. Ovim se postiže globalni cilj održivog razvoja – stvaranje ravnoteže između potrošnje resursa i sposobnosti prirodnih sistema da zadovoljavaju potrebe budućih generacija. U žiži interesovanja je zaštita životne sredine. Naime, kada se procenjuje održivost energetskih sistema, pored procene ekološke održivosti (na osnovu analize životnog ciklusa - LCA), potrebno je obratiti pažnju i na smanjenje kvaliteta energije u energetskim procesima (gubitak eksergije). U ovom radu je izložen termodinamički pristup procene održivosti energetskih sistema primenom eksergijske analize životnog ciklusa (LCEA). Naglasak je na proceni sistema koji koriste obnovljive izvore energije, i to: vetroturbini i samostalnom fotonaponskom solarnom sistemu.

Ključne reči: eksergija; eksergijska analiza životnog ciklusa (LCEA), održivi razvoj, obnovljivi izvori energije, energija vetra, solarna energija

1. UVOD

Porast broja stanovnika, koji prati povećanu upotrebu energije, dovodi do potrebe za rešavanjem problema povezanim sa kvalitetom životne sredine, kao što je globalno zagrevanje – pre svega zbog emisije gasova koji uzrokuju efekat staklene bašte. Ovo implicira veću potrebu za korišćenjem obnovljivih izvora energije poput: solarne energije, hidroenergije, energija vetra i biomase. Pored toga što podstiču smanjenje korišćenja fosilnih goriva i emisije najznačajnijih zagađivača (npr. CO₂ i NO_x), pominju se i kao sredstvo za postizanje održivog razvoja društva.

Sedamdesetih godina 20. veka je od strane komiteta Ujedinjenih nacija, a usled pomenutih problema, razvijen koncept održivog razvoja društva definisan kao „razvoj koji osigurava potrebe sadašnjeg društva, bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe“ [1]. Društvo ne može biti odr-

živo ako se iz prirodne okoline koriste resursi brže nego što se mogu generisati i ako se proizvodi otpad koji negativno utiče na životnu sredinu. Pokazatelji održivosti se prema izveštaju Naučnog odbora za probleme životne sredine (SCOPE) mogu klasifikovati na socijalne, ekološke i ekonomske [1].

Da bi se razvili održivi energetski sistemi, potrebne su sveobuhvatne analize koje u okviru ekološkog aspekta održivosti (uticaja na životnu sredinu) i trošenja resursa, uzimaju u obzir i termodinamičku analizu, odnosno smanjenje kvaliteta energije tokom određenog procesa.

Shodno tome, energetski sistem je održiv ako tokom životnog veka proizvodi više eksergije, od one koja je potrebna tokom izgradnje tog sistema kao i tokom njegove eksploatacije i reciklaže.

Kada se upoređuju različiti izvori energije koji se koriste za proizvodnju električne energije, potrebno je uzeti u obzir čitav životni ciklus ovih sistema, da bi se procenila njihova održivost.

U radu će biti analizirana eksergijska analiza životnog ciklusa (LCEA) koja se sastoji iz eksergijske analize i analize životnog ciklusa (LCA).

Adresa autora: Branislav Petrović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16
e-mail: b.petrovic@mas.bg.ac.rs
Rad primljen: 25.06.2021.
Rad prihvaćen: 17.09.2021.

2. EKSERGIJSKA ANALIZA I ODRŽIVI RAZVOJ

Na osnovu termodinamičke analize se može proceniti kvalitet iskorišćenja energije u datom procesu, odnosno koliko se energija efikasno koristi. Eksergijska analiza se zasniva na drugom zakonu termodinamike i (za razliku od energijske analize) korisna je za proučavanje termodinamičke nesavršenosti i potencijalnih poboljšanja u procesima – procenom gubitka potencijala za obavljanje korisnog rada i identifikovanjem glavnih izvora nepovratnosti procesa.

Ukupna eksergija toka materije $\dot{E}x$ može se podeliti na četiri komponente i to: fizičku eksergiju ($\dot{E}x_{PH}$), kinetičku eksergiju ($\dot{E}x_{KN}$), potencijalnu eksergiju ($\dot{E}x_{PT}$) i hemijsku eksergiju ($\dot{E}x_{CH}$) [2]:

$$\dot{E}x = \dot{E}x_{PH} + \dot{E}x_{KN} + \dot{E}x_{CH} + \dot{E}x_{PT} \quad (1)$$

Opšti bilans eksergije za kontrolnu zapreminu se može napisati na sledeći način [3,4]:

$$\sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out} - \dot{E}x_{dest} = dEx_{CV} / dt \quad (2)$$

S obzirom na moguće načine prenošenja energije (toplotom, radom i masom), bilans eksergije za kontrolnu zapreminu, a pri stacionarnim uslovima ima oblik:

$$\dot{E}x_{heat} - \dot{E}x_{work} + \sum \dot{E}x_{mass,in} - \sum \dot{E}x_{mass,out} - \dot{E}x_{dest} = 0 \quad (3)$$

Gubitak eksergije u stvarnom procesu odgovara nepovratnostima povezanim sa razmatranim procesom, proporcionalna je stvaranju entropije, a sama veza je poznata kao zakon Gouy-Stodole:

$$\dot{E}x_{dest} = T_0 \dot{S}_{gen} > 0 \quad (4)$$

gdje je u jednačinama (2) и (3): $\dot{E}x_{in}$ i $\dot{E}x_{out}$ – eksergija materije u jedinici vremena na ulazu i izlazu iz kontrolne zapremine; $\dot{E}x_{dest}$ – gubitak eksergije u jedinici vremena; dEx_{CV}/dt – promena eksergije unutar kontrolne zapremine u jedinici vremena, $\dot{E}x_{heat}$ – eksergija toplote u jedinici vremena; $\dot{E}x_{work}$ eksergija rada u jedinici vremena; $\dot{E}x_{mass,in}$ i $\dot{E}x_{mass,out}$ – eksergija mase u jedinici vremena na ulazu i izlazu iz kontrolne zapremine.

Eksergijski stepen korisnosti (5) kao mera kvaliteta procesa se definiše kao količnik između ukupnog protoka eksergije na izlazu i ukupnog protoka eksergije na ulazu [5].

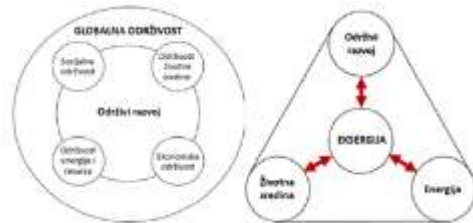
$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} = 1 - \frac{\dot{E}x_{dest}}{\dot{E}x_{in}} \quad (5)$$

Što je ovaj odnos bliži jedinici, veći je eksergijski stepen korisnosti.

Održivost i eksergija, kao radni potencijal energije, međusobno su povezani. Važan aspekt povećanja održivog razvoja predstavlja minimiziranje nepo-

vratnosti procesa, odnosno minimiziranje eksergijskih gubitaka uzrokovanih upotrebom neobnovljivih izvora, tokom životnog ciklusa energetskog sistema. Ovo bi se odrazilo na smanjenje iscrpljivanja prirodnih resursa, a samim tim i na smanjenje uticaja na životnu sredinu. Doslednom primenom ove analize ukazuje se na veliki potencijal za procenu održivog razvoja: veći eksergijski stepen korisnosti znači da je manja nepovratnost procesa u sistemu, samim tim manji je i gubitak eksergije. Shodno tome, eksergija kao mera potencijala sistema predstavlja osnovu za efikasnu procenu uticaja na životnu sredinu, obezbeđujući mogućnost procene održivosti sistema. Njihovi odnosi su prikazani na slici 1 [3].

Smanjenjem unutrašnje nepovratnosti procesa u energetskim sistemima tokom operativne faze, eksergijska analiza zanemaruje upotrebu neobnovljivih resursa tokom preoperativne faze životnog ciklusa – što predstavlja glavni nedostatak eksergijske analize.



Slika 1 - Šematski prikaz a) faktora globalne održivosti; b) eksergijskih odnosa

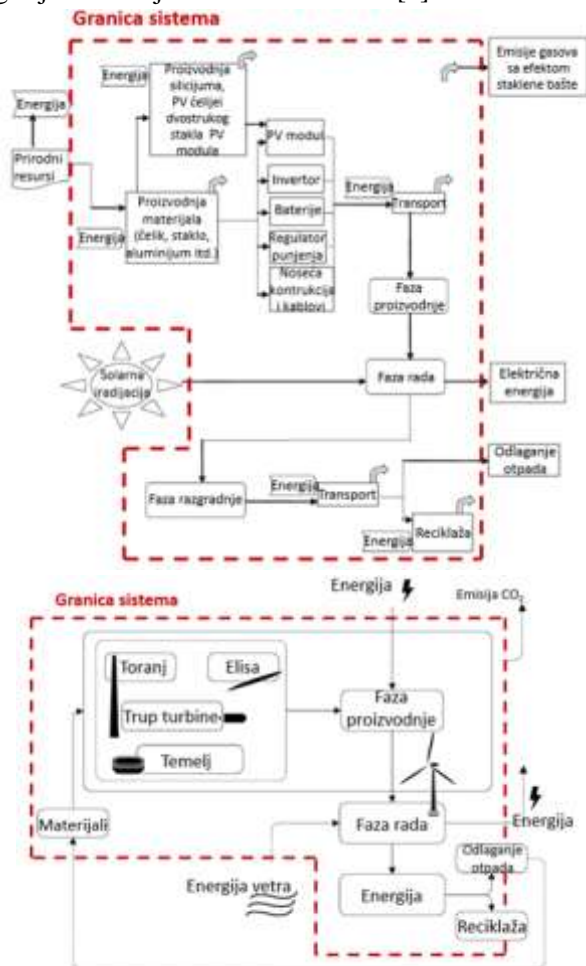
3. ANALIZA ŽIVOTNOG CIKLUSA

Ekološki orijentisana analiza životnog ciklusa (eng. Life Cycle Analysis – LCA) razvijena je u poslednjoj deceniji kako bi se analizirali ekološki problemi povezani sa iscrpljivanjem sirovina, kao i proizvodnjom, upotrebom i recikliranjem proizvoda iz perspektive čitavog životnog ciklusa sistema [6]. Analiza životnog ciklusa označava metodički skup procesa za ispitivanje ulaznih i izlaznih podataka (maseni i energijski bilanci) određenog proizvoda, procesa ili sistema. Obično se vrši u sledeće četiri faze (slika 2), definisane od strane Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO) zasnovanoj na ISO 14040 i ISO 14044: 1. Definicija cilja i obima analize; 2. Analiza prikupljenih podataka; 3. Procena uticaja; 4. Tumačenje rezultata.



Slika 2 – Okvir procene životnog ciklusa koji prikazuje glavne korake u metodi LCA i njihove međusobne odnose

Prva faza uzima u obzir ciljeve i svrhu procene, definisanje funkcionalne jedinice prilikom poređenja uticaja na zajedničkoj osnovi, granicu sistema koja ukazuje na obim detalja u analizi, specifikacije podataka, kao i pretpostavke koje se moraju uzeti u obzir. Druga faza se bavi prikupljanjem relevantnih podataka svakog procesa. Ona definiše sve ekološke i ekonomske tokove unutar granice sistema. Tokovi su vezani za unos materijala i energije u sistem i izlaz iz njega u životnu sredinu, na osnovu kojih se formira posebna tabela svih prikupljenih resursa i zagađivača/otpadaka koji se emituju. Treća faza obuhvata definisanje odgovarajućih kategorija uticaja, i to: uticaj na ljudsko zdravlje, kvalitet životne sredine, klimatske promene i iscrpljivanje prirodnih resursa. Zatim se vrši dodeljivanje podataka iz pomenute tabele, usklađenih sa kategorijama uticaja na životnu sredinu [6].



Slika 3 – Granice sistema za analizu životnog ciklusa a) vetroturbine; b) fotonaponskog sistema

Postupkom „normalizacije“ se svi uticaji na životnu sredinu svode na jednu jedinicu, kako bi bili pogodni za upoređivanje. U završnoj fazi se vrši vrednovanje različitih uticaja, predlaganje načina za poboljšanje procesa u cilju smanjenja negativnih uticaja procesa na životnu sredinu, kao i izbor ekološki pri-

hvatljivih alternativa s obzirom na tehničke, ekonomske i socijalne aspekte.

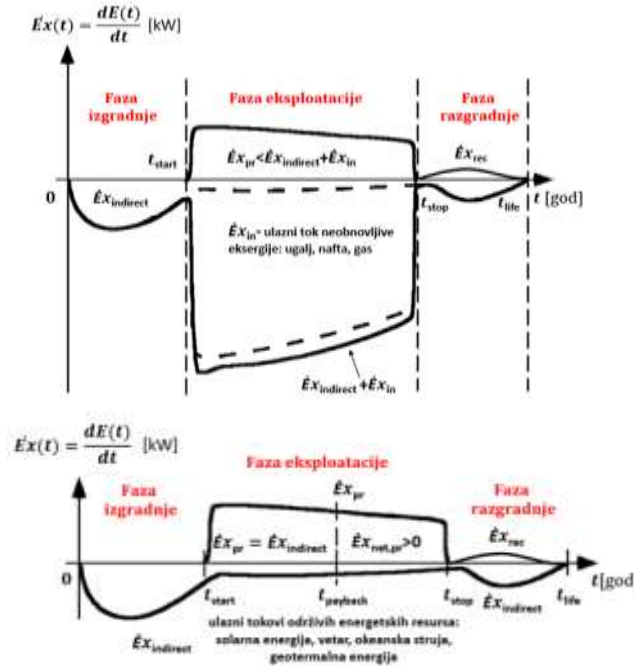
Metoda procene uticaja na životnu sredinu opisana u sledećem odeljku omogućava procenu i iskazivanje održivosti proizvoda ili sistema isključivo pomoću eksergije – eksergijske analize životnog ciklusa (LCEA). Ova metoda, koja će biti primenjena za procenu održivosti sistema koji koriste obnovljive izvore energije (vetroturbine i fotonaponskog solarnog sistema), koristi iste granice sistema kao i u ovom odeljku (slika 3) opisana analiza životnog ciklusa.

4. EKSERGIJSKA ANALIZA ŽIVOTNOG CIKLUSA

Kombinacijom LCA i eksergijske analize se može izvršiti eksergijska analiza životnog ciklusa (eng. Life Cycle Exergy Analysis – LCEA). U poređenju sa eksergijskom analizom, LCEA metoda proširuje svoju primenu na svaki aspekt životnog ciklusa sistema (faza izgradnje sistema, operativna faza, kao i faza razgradnje), čime se procenjuje iscrpljivanje prirodnih resursa (koji se meri direktno kao gubitak eksergije), kao i uticaj emisije zagađivača na životnu sredinu. Proces transformacije energije na ovaj način može biti poboljšan jer se vrednuje kako u pogledu „kvaliteta“, tako i u pogledu „kvantiteta“ [7]. Osnovni koraci koji se koriste prilikom analize LCEA metode (slika 2), kao i razmatrane faze životnog ciklusa, identične su odgovarajućem obliku konvencionalne LCA metode. Međutim, uvođenjem eksergije objedinjene su različite kategorije uticaja na životnu sredinu u jedan nedvosmislen rezultat, koji se može koristiti za laku procenu održivosti energetskih sistema [8]. Ovim načinom se sprečava problem koji se javlja tokom pristupa metode LCA. Metoda LCEA treba da bude deo svakog LCA, jer je identifikovanje nepovratnosti procesa u životnom ciklusu energetskih sistema najprikladniji parametar za kvantifikovanje iscrpljivanja prirodnih resursa (kako bi se manje koristili), kao i za procenu njihovog efikasnog korišćenja.

Važnost LCEA se ogleda prilikom projektovanja sistema za korišćenje energije iz obnovljivih izvora, jer LCEA dijagrami (slika 7) pokazuju da li je projektovani sistem održiv [9]. S obzirom na postojanje aspekta vremena, čitava dinamika celokupnog životnog ciklusa sistema koja je podeljena u tri faze (slika 4) je uzeta u obzir. Ukupno upotrebljena (uneta) eksergija tokom vremena, koja potiče iz neobnovljivih izvora energije, a koja se koristi („troši“) tokom izgradnje sistema, u fazi razgradnje odnosno uništenja ($t_{\text{stop}} \leq t \leq t_{\text{life}}$) i za održavanje sistema u fazi eksploatacije ($t_{\text{start}} \leq t \leq t_{\text{stop}}$), naziva se indirektna eksergija ($\dot{E}x_{\text{ind}}$). Tokom faze izgradnje ($0 \leq t \leq t_{\text{start}}$), eksergija se pored izgradnje sistema, troši na transport i

puštanje sistema u rad, pri čemu je jedan deo eksergije akumuliran u materijalu.



Slika 4 – Promena eksergije tokom životnog ciklusa sistema koji koriste a) obnovljive resurse; b) neobnovljive resurse

U fazi razgradnje, deo eksergije može biti vraćen reciklažom određenih materijala ($\dot{E}x_{rec}$). Ova eksergija se računa kao dodatno uneta u sistem, pri čemu se $\dot{E}x_{ind}$ može znatno smanjiti. Direktna, ulazna eksergija koja se troši, da bi se dobio traženi oblik energije (npr. električna energija) može biti iz obnovljivih ili neobnovljivih izvora. Postrojenje nikada ne može biti održivo, ukoliko se tokom faze eksploatacije sistema koristi eksergija iz neobnovljivog izvora energije (slika 4.b). Eksergija proizvedene električne energije će uvek biti manja od iskorišćene eksergije fosilnih goriva tokom faze izgradnje, eksploatacije i razgradnje $\dot{E}x_{pr} + \dot{E}x_{rec} < \dot{E}x_{in} + \dot{E}x_{indirect}$ [10]. Direktna unos eksergije iz obnovljivih izvora energije (vetra ili sunčevog zračenja) se prilikom razmatranja ne uzima u obzir jer se smatra besplatnim, prema opisu metode LCEA.

Prilikom izgradnje vetroelektrane ili fotonaponskog solarnog sistema, koristi se velika količina indirektna eksergije između $t=0$ i $t=t_{start}$. U fazi eksploatacije, sistem počinje da proizvodi eksergiju u obliku električne energije, upotrebom obnovljivih izvora energije. Pri $t = t_{payback}$, indirektna eksergija koja se koristi za izgradnju, održavanje i uništenje je vraćena proizvedenom eksergijom iz obnovljivih izvora energije.

Nakon trenutka $t = t_{payback}$ započinje dobijanje neto proizvedena eksergije $\dot{E}x_{net,pr} = \dot{E}x_{pr} - \dot{E}x_{indirect} + \dot{E}x_{rec}$ sve do trenutka prestanka rada sistema $t=t_{stop}$. Isporuka

eksergije za solarne elektrane može trajati 20-25 godina [10], a za savremene vetroelektrane može trajati i decenijama [11]. Vreme povratka uložene eksergije $t_{payback}$ za oba sistema iznosi svega nekoliko meseci.

Da bi sistem bio održiv, mora biti zasnovan na upotrebi obnovljivih izvora energije uz uslov $\dot{E}x_{pr} > \dot{E}x_{in} + \dot{E}x_{indirect} - \dot{E}x_{rec}$. Sistemi zasnovani na upotrebi obnovljivih izvora energije, ne moraju uvek biti održivi, jer se tokom izgradnje sistema može potrošiti više eksergije od one koju će proizvesti tokom čitavog životnog ciklusa. U sledećem odeljku će biti izvršena procena održivosti sistema koji koriste obnovljive izvore energije, na primeru vetroturbine i somostalnog fotonaponskog solarnog sistema – eksergijskom analizom životnog ciklusa.

4.1 Eksergijska analiza životnog ciklusa vetroturbine

U ovom poglavlju je radi procene održivosti vetroturbina izvršena eksergijska analiza životnog ciklusa (LCEA) jednog vetroparka. Energija vetra se smatra važnim oblikom čiste energije, što pokazuje činjenica da instalisana snaga vetroturbina udvostručuje otprilike svake tri godine. Stoga je potrebno proceniti održivost ovakvih sistema, kao i njihov uticaj na životnu sredinu. U razmatranom modelu, vetropark se sastoji od 11 vetroturbina nominalnih snaga od po 660 kW.

Životni ciklus vetroturbina se sastoji iz faze izgradnje koja obuhvata: upotrebu materijala za proizvodnju turbina, građevinske radove, transport, montažu; faze rada vetroturbine (sa održavanjem) i faze razgradnje (odlaganja).

Čelik i beton su materijali koji čine najveći deo mase vetroparka (oko 95%), dok bakar, aluminijum i kompozitni materijali čine samo nekoliko procenata ukupne mase (čelik čini 86% ukupne mase vetroturbine). Korišćenje eksergije recikliranog materijala u fazi izgradnje dovodi do smanjenog unosa eksergije određene sirovine. U ovom slučaju se pretpostavlja da je iz recikliranih materijala proizvedeno 30% aluminijuma (prosečna vrednost u svetu) i 45% čelika (prosečna vrednosti u Evropi) [12].

Eksergija materijala i građevinskih radova tokom faze izgradnje jedne vetroturbine se sastoji iz eksergije sirovina i eksergije goriva. Da bi ove vrednosti bile poznate, neophodno je poznavati sastav određene sirovine, što može biti veoma dugotrajan i složen proces. Eksergija sirovine se određuje za 1 kg, za poznati sastav i zasnovana je na standardnoj hemijskoj eksergiji hemijskih elemenata. Eksergija goriva se sastoji iz eksergije toplote za sagorevanje goriva u procesu proizvodnje materijala (izračunava se na osnovu donje toplotne moći goriva) i eksergije korišćene električne energije. Eksergija električne energije potrebna za

proizvodnju komponenata materijala aproksimira se električnom energijom, dobijenom iz termoelektrne koja koristi fosilna goriva. Ukupna vrednost eksergije materijala za vetroturbinu i građevinske radove je prikazana u tabeli 1, kao i u tabeli 2 [13].

Tabela 1. Eksergija različitih materijala vetroturbine [13]

Vetroturbina	Masa [kg]	Eksergija sirovina [MJ]	Eksergija goriva [MJ]	Eksergija materijala [MJ]
Čelik	72 435	263 229	1 027 709	1 290 938
Staklena vlakna	3 911	391	83.912	84 303
Epoksi smola	1 040	54 269	1 257	55 526
Bakar	924	120 120	74 517	194 637
Aluminijum	85	1 307	9 156	10 463
Ulje za podmazivanje	111	5 081	-	5 081
Ukupno	78 505	444 396	1 196 551	1 640 947

Tokom ovog izračunavanja uvedene se sledeće pretpostavke: polimeri su aproksimirani kao epoksidna smola; masa livenog gvožđa je približno izračunata kao masa čelika; masa zemljišta i kamenja je aproksimirana masom peska, a boja i bronza su zanemareni. Građevinski radovi na izgradnji vetroparka obuhvataju izradu puteva, staza, prostorija energetskog transformatora, električnih kablova itd.

Tabela 2. Eksergija različitih materijala u fazi građevinskih radova aproksimirana za jednu vetroturbinu [13]

Građevinski radovi	Masa [kg]	Eksergija sirovina [MJ]	Eksergija goriva [MJ]	Eksergija materijala [MJ]
Cement	42 835	14 992	172 680	187 673
Čelik	11 139	40 478	158 038	198 516
Aluminijum	754	11 589	81 170	92 759
Bakar	263	34 190	21.210	55 400
Polimeri	3 234	168 822	3.911	172 732
Kamen	1 973 455	631 505	-	631 505
Pesak	1 236 996	39 584	-	39 584
Ukupno	3 268 645	941 161	437 009	1 378 169

Pošto se istražuje upotreba i proizvodnja eksergije jedne vetroturbine, ukupna eksergija materijala upotrebljena za građevinske radove vetroparka se množi u odnosu 1/11, s obzirom na to da razmatrani vetropark

sadrži 11 vetroturbina (tabela 2) [13]. Iz tabele se može zaključiti da je u ukupnoj eksergiji materijala udeo eksergije goriva veći nego udeo eksergije sirovina. Takođe se može primetiti da je eksergija materijala polimera (iako čini manji procenat mase) velika isto koliko eksergija materijala cementa i čelika.

Vrednost korišćene eksergije u fazi rada i fazi razgradnje odnosno prilikom transporta, montaže, rada, održavanja i razgradnje, dobijena je na osnovu donje toplotne moći dizel goriva. Ukupno dobijena eksergija neobnovljivih resursa upotrebljena tokom životnog ciklusa celog vetroparka iznosi 45,4 TJ, pri čemu za jednu vetroturbinu iznosi 4,3 TJ.



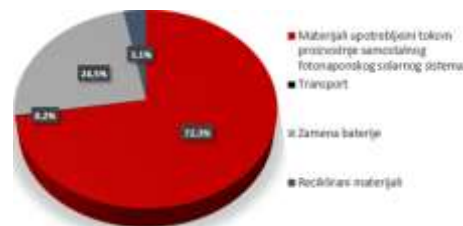
Slika 5 – Procentualno upotrebljena eksergija tokom životnog ciklusa jedne vetroturbine

Procentualno upotrebljena eksergija tokom različitih faza životnog ciklusa jedne vetroturbine je data na slici 5, pri čemu je očigledno da eksergija materijala za proizvodnju vetroturbine i eksergija materijala građevinskih radova čine najveći deo upotrebljene eksergije u životnom ciklusu jedne vetroturbine.

Ukupna proizvodnja električne energije jedne vetroturbine za period od 20 godina iznosi 79,2 TJ (21,9 GWh), što odgovara proizvodnji eksergije sistema tokom ovog životnog ciklusa. Vrednost je dobijena na osnovu godišnje proizvodnje električne energije celog vetroparka, sa faktorom kapaciteta 0,19 [13]. Ovaj faktor predstavlja odnos stvarno proizvedene električne energije i električne energije koja bi bila proizvedena pri nazivnoj snazi vetroturbine.

4.2 Eksergijska analiza životnog ciklusa fotonaponskog solarnog sistema

U sledećem primeru prikazana je eksergijska analiza životnog ciklusa samostalnog fotonaponskog solarnog sistema (eng. *stand-alone PV system*) koji se sastoji od 40 monokristalnih modula.



Slika 6 - Procentualno upotrebljena eksergija tokom životnog ciklusa fotonaponskog solarnog sistema [14].

U ovom, kao i u slučaju vetroturbine se pored upotrebe eksergije za izgradnju, rad i razgradnju sistema razmatra i recikliranje materijala u poslednjoj fazi. Procentualna upotreba eksergija tokom životnog ciklusa ovog sistema je prikazana na slici 6.

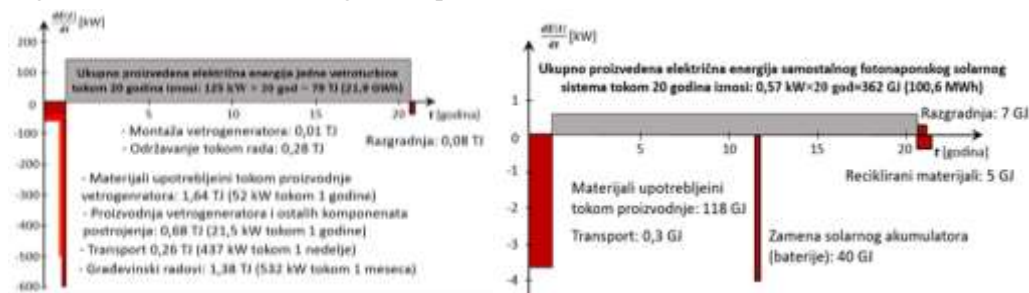
Faza izgradnje fotonaponskog sistema uključuje proizvodnju materijala, transport i montažu delova u cilju puštanja sistema u rad. Izrada PV modula uključuje proizvodnju silicijuma, proizvodnju PV ćelija i noseće konstrukcije. Električnu opremu sačinjavaju pretvarači, transformatori, kablovi, razvodne ploče niskog i srednjeg napona i baterija [14]. Eksergija u fazi izgradnje sistema se kao i u prethodnom slučaju sastoji iz eksergije korišćene električne energije, eksergije goriva i eksergije sirovina iz prirodnih resursa.

Eksergija električne energije, koja se koristi za proizvodnju materijala od kojeg je sačinjen fotonaponski sistem, se dobija iz neobnovljivih izvora. Korišćenje recikliranog materijala tokom faze izgradnje, dovodi do smanjenja ukupne eksergije koja je potrebna za unos. U ovom slučaju se pretpostavlja da je iz recikliranih materijala proizvedeno 35% aluminijuma, 50% olovno-kiselih baterija, 90% čelika i 43% bakra [14]. Prema našoj analizi, ukupan unos eksergije u fazi izgradnje ovog sistema iznosi 118 GJ, pri čemu se najviše primarne eksergije koristi prilikom proizvodnje PV modula i baterije.

U fazi rada se koristi eksergija (oko 40 GJ) za zamenu olovnih baterija nakon 10 godina. Prilikom procene održivosti uzeto je da reciklirana eksergija metala delova korišćenog sistema (oko 0,6 GJ) predstavlja dodatni unos eksergije u sistem.

5. REZULTATI

Eksergija koja se koristi i troši tokom određenih faza životnog ciklusa sistema, može se grafički prika-



Slika 7 – Upotreba eksergije tokom životnog ciklusa sistema koji koriste a) obnovljive resurse; b) neobnovljive resurse

6. ZAKLJUČAK

U radu je razrađena metoda eksergijske analize životnog ciklusa (LCEA), koja predstavlja kombinaciju opisane eksergijske analize, kao i LCA metode.

zati pomoću dijagrama toka eksergije (slika 7). Najveći deo potrebne eksergije troši se tokom faze izgradnje sistema, odnosno tokom proizvodnje materijala od kojih je sačinjen sistem. Iako je ukupan unos eksergije veliki, neznatan je u odnosu na proizvedenu električnu eksergiju tokom rada sistema. Stoga, na osnovu dijagrama toka eksergije se može zaključiti da su oba sistema koja koriste obnovljive izvore energije održiva (slika 7). Razmatrana vetroturbina proizvodi oko 18 puta više eksergije nego što se koristi tokom životnog ciklusa. Vreme povrata uložene eksergije ovog fotonaponskog sistema iznosi 7 godina. Poboľšanom tehnologijom proizvodnje PV modula, povećano upotrebom recikliranog materijala kao i uz povećanim stepenom korisnosti fotoelektrične konverzije, vreme povrata uložene eksergije je kraće. Varijacije u metodologijama u okviru analize eksergijskog životnog ciklusa, mogu dovesti do neusaglašavanja vrednosti vremena povrata uložene eksergije. Faktori koji u velikoj meri utiču na rezultate su: procenjen fiksni faktor kapaciteta, koji daje projektovanu proizvodnju električne energije; neusaglašene vrednosti eksergije goriva potrebne za proizvodnju određenih materijala (npr. eksergija za proizvodnju 1 kg čelika iz rude gvožđa); zanemarivanje korišćenih materijala ispod određenog masenog procenta; različite procentualne vrednosti recikliranja istog materijala. Ovi faktori mogu doprineti promeni vrednosti vremena povrata uložene eksergije, ali nijedan ne može doprineti rezultatu koji će pokazati da ovde razmatrani sistemi koji koriste obnovljive izvore energije prilikom proizvodnje električne energije nisu održivi. Međutim, za modernije energetske sisteme potrebno je uzeti u razmatranje specifične resurse koji se koriste. Bez obzira koliko električne energije proizvode, usled korišćenja određene količine retkih metala ovakvi sistemi često nisu održivi. Zbog toga se prilikom analiziranja održivosti sistema mora obratiti posebna pažnja.

Kao što je pokazano LCEA metoda daje odličnu vizuelizaciju uključenih tokova eksergije, pomaže u poboljšanju efikasnosti sistema i u donošenju odluka prilikom projektovanja i procene njihove održivosti. U

ovoj analizi, metoda LCEA je grafički prikazana primenom na sisteme koji koriste obnovljive i neobnovljive izvore energije. Kao što je poznato sistemi koji koriste fosilna goriva u krajnjem ishodu nisu održivi. Analizirana je primena LCEA metode za procenu održivosti sistema obnovljivih izvora energije na primeru vetroturbina i fotonaponskog solarnog sistema. Zaključeno je da su ovi energetske sistemi za proizvodnju isključivo električne energije održivi, a takođe su i neto proizvođači eksergije (neto proizvedena eksergija je veća od ukupno unete eksergije u sistem tokom životnog). Opisani postupak može da pomogne prilikom podsticanja povećanja svesti istraživača za intenzivniju upotrebu LCEA metode pri analizi održivosti energetske sistema. Analiza se može detaljnije razraditi i za sisteme koji koriste obnovljive izvore energije za proizvodnju termičke energije ili kombinovane proizvodnje električne i termičke energije (npr. PV/T solarni sistemi).

LITERATURA

- [1] Aleksić S, Mujan V. Exergy-based Life Cycle Assessment of Smart Meters, *11th International Conference Elektro*, pp. 248-253, 14-18 May 2016.
- [2] Dincer I, Rosen M.A. *Exergy, Energy, Environment and Sustainable Development*, 3rd edition. Elsevier Science, 2020.
- [3] Turan O. An exergy way to quantify sustainability metrics for a high bypass turbofan engine, *Energy*, Vol. 86, pp. 722-736, 2015.
- [4] Herms S. Exergy Flows in Product Life Cycles Analyzing thermodynamic: improvement potential of cardboard life cycles, *MSc Thesis of Industrial Ecology*, Delft University of Technology, Leiden University, 2011.
- [5] Novak P. Exergy as Measure of Sustainability of Energy System, *International Journal of Earth & Environmental Sciences*, Vol. 2, pp. 139-149, 2017.
- [6] Stougie L, Tsalidis G.A, van der Kooi H.J, Korevaar G. Environmental and exergetic sustainability assessment of power generation from biomass, *Renewable Energy*, Vol. 128, pp. 520-528, 2018.
- [7] Wang Y.W, Zhang J.Y, Zhao Z.Y.L, Zheng C.G. Exergy life cycle assessment model of „CO₂ zero-emission” energy system and application, *Science China Technological Sciences*, Vol. 54, No. 12, pp. 3296-3030, 2011.
- [8] Dincer I, Rosen M. A. *Exergy Energy, Environment And Sustainable Development*, 2nd edition, Elsevier Ltd, 2013.
- [9] Gong M, Wall G. On exergy and sustainable development-Part 2: Indicators and methods. *Exergy, An International Journal*, Vol. 1, No. 4, pp. 217-233, 2001.
- [10] Wall G. Life Cycle Exergy Analysis of Solar Energy Systems, *The Open Renewable Energy Journal*, Vol. 5 No.1, pp. 1-8, 2011.
- [11] Wall G. Life Cycle Exergy Analysis of Renewable Energy Systems, *The Open Renewable Energy Journal*, Vol. 4, No. 1, pp. 72-77, 2011.
- [12] Manzini R, Della Selva V, Accorsi R. A new model for environmental and economic evaluation of renewable energy systems: The case of wind turbines, *Applied Energy*, Vol. 189, pp. 739-752, 2017.
- [13] Kurland S.D. Life Cycle Exergy Analysis of Wind Energy Systems: Assessing and improving life cycle analysis methodology, *M. Sc. Thesis in Energy Systems Engineering*, Uppsala University, 2011.
- [14] García-Valverde R, Miguel C, Martínez-Béjar R, Urbina A. Life cycle assessment study of a 4.2kWp stand-alone photovoltaic system, *Solar Energy*, Vol. 83, No. 9, pp. 1434-1445, 2009.

SUMMARY

ASSESSMENT OF SUSTAINABILITY OF DIFFERENT RENEWABLE ENERGY SYSTEMS BASED ON LIFE CYCLE EXERGY ANALYSIS

The sustainable development of energy systems does not only involve the use of renewable energy resources but the increase in their efficiency as well, enabling society to maximise the benefits of their consumption. The production of electrical energy from clean and renewable sources contributes to lowered fossil fuel exploitation and the reduction of its damaging effect on the environment. This is a way to reach the global target of sustainable development – striking a balance between resource consumption and the achievable natural cycle regeneration. Environmental protection is in the focus of attention. Namely, when energy system sustainability is assessed, in addition to the ecological sustainability assessment (based on life cycle analysis – LCA), attention should be paid to the decrease in energy quality in energy processes (exergy loss).

This paper presents the thermodynamic approach to energy system sustainability assessment by applying life cycle exergy analysis (LCEA). The key issue is the assessment of systems which use sustainable energy sources: the wind turbine and the stand-alone photovoltaic solar system.

Key words: *exergy, sustainable development, life cycle exergy analysis (LCEA), renewable energy sources, wind power, solar energy*