

Fajik Begić¹, Naim Afgan², Anes Kazagić¹

¹ JP Elektroprivreda BiH, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

² Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Beograd, Srbija i Crna Gora

Multikriterijalna procjena održivosti energetskih postrojenja

Originalni naučni rad

UDC: 620.92/.98

BIBLID: 0350-218X, 32 (2006), 1-4, 65–73

U radu je predstavljena multikriterijalna procjena održivosti energetskih sistema različitih izvora na jednom realnom i kompleksnom primjeru elektroenergetskog sistema. Analiza je bazirana na procjeni održivosti rekonstrukcije bloka 110 MW na sprášeni ugalj, kao i uporedivih opcija kao što su termoblok sa sagorijevanjem u fluidiziranom sloju, kombi ciklus, rekonstrukcija hidroenergetskog postrojenja, solarna elektrana, farma vjetroelektrana, i postrojenje na biomasu.

Korištena metodologija je bazirana na sistemu stohastičkih modela neodređenosti, koja omogućava realizaciju procjene uz pomoć različitih sistema, kao i dobijanje različitih normalizacijskih indeksa korištenjem nenumeričke (ordinalne), netačne (intervalne) i nekompletne informacije dobijene iz izvora različite pouzdanosti i vjerovatnoće.

Kroz analizu multikriterijalne procjene održivosti različitih opcija energetskih sistema, donosiocima odluka se nudi mogućnost procjenjivanja različitih opcija, te izbor optimalne opcije kao finalni rezultat multikriterijalne analize.

Ključne riječi: energetski sistem, održivost, multikriterijalna procjena

Uvod

Većina modela za odlučivanje koji se danas koriste u procjeni kompleksnih sistema bazirani su na jednokriterijalnoj analizi. Međutim, u današnjem modernom svijetu, ovakav pristup procjeni postaje neprihvatljiv, ako postavimo prioritete koji

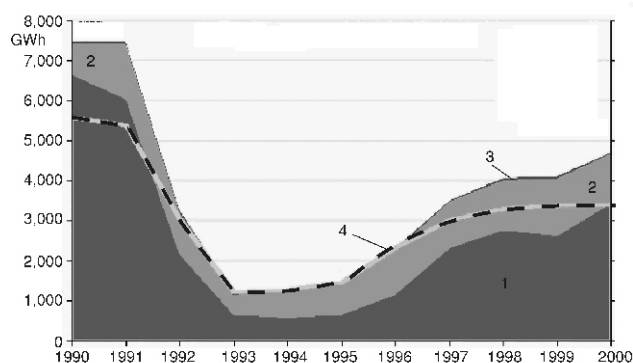
podrazumijevaju različite zahtjeve, odnosno mogućnosti, rizike i troškove koje ti zahtjevi sa sobom nose. U tom smislu, često je neophodno razmatrati nekoliko aspekata istovremeno [1–4].

Energetski sistem predstavlja jedan kompleksan sistem čija evaluacija zavisi od niza ekonomskih, okolinskih, socijalnih i tehnoloških parametara [1–3]. Jedna od perspektivnih metoda za evaluaciju kvaliteta energetskog sistema multikriterijalna procjena održivosti bazirana na analizi i sintezi indikatora koji odražavaju različite aspekte sistema [1–4]. Primjena ove metode u slučajevima nedostatka informacija (ASPID metodologija – Analysis and Synthesis of Index at Information Deficiency) omogućava evaluaciju različitih energetskih sistema.

U ovom radu, primjena multikriterijalne procjene održivosti energetskih sistema različitih izvora istražena je na primjeru proširenja proizvodnog kapaciteta unutar elektroenergetskog sistema Bosne i Hercegovine, čime je metod prvi put ispitan na jednom realnom i kompleksnom energetskom sistemu.

Predmet istraživanja

U posljednjih pet godina, kao rezultat intenzivnih napora na rekonstrukciji cjelokupnog elektroenergetskog sektora, opskrba električne energije u BiH je značajno poboljšana, sl. 1.



Slika 1. Trend potrošnje i proizvodnje električne energije u okviru elektroenergetskog sistema BiH u periodu 1990–2000. godine
(1) – termoelektrane, (2) – hidroelektrane, (3) – male hidroelektrane, (4) – potrošnja

Procjene potrošnje električne energije u domenu JP Elektroprivreda BiH, izvršene od strane brojnih svjetskih konsultantskih firmi, pokazale su da će porast potrošnje u narednom periodu (do 2020.) biti nastavljen.

Ovaj porast zahtjeva za električnom energijom nameće potrebu za skorim instaliranjem novih proizvodnih objekata. Dodajući tome izvozne mogućnosti elektroenergetskog sistema BiH, potreba za novim objektima postaje još izraženija. U tom smislu, multikriterijalna procjena održivosti iskorištena je za procjenu održivosti energetskih sistema različitih izvora u okviru JP Elektroprivreda BiH.

U okviru analize, razmotreno je osam opcija za obezbjeđenje dodatne snage za period od 15 godina. Obnovljivi izvori i čiste tehnologije fosilnih goriva su uključene u razmatranje. Sljedeće opcije su razmotrene:

- *Opcija 1*: Rekonstrukcija bloka na sprášeni uglj u kondenzacionom režimu,
- *Opcija 2*: Rekonstrukcija bloka na sprášeni uglj u kogeneracijskom režimu,
- *Opcija 3*: Instaliranje bloka sa sagorijevanjem u fluidiziranom sloju,
- *Opcija 4*: Instaliranje kombi ciklusa,
- *Opcija 5*: Rekonstrukcija hidroelektrane,
- *Opcija 6*: Instaliranje solarne elektrane,
- *Opcija 7*: Instaliranje vjetroelektrana, i
- *Opcija 8*: Instaliranje postrojenja na biomasu.

Procjena održivosti energetske sistema različitih izvora

Karakteristike razmatranih opcija

Zahtjev za sve razmatrane opcije je proizvodnja od 7875 GWh električne energije za vrijeme životnog vijeka od 15 godina. To daje prosječnu godišnju proizvodnju od 525 GWh. Neki od razmatranih energetske sistema simultano proizvode električnu i toplinsku energiju (kogeneracija), pri čemu proizvodnja toplinske energije ne ulazi u zahtjevanu proizvodnju od 7875 GWh za vrijeme od 15 godina, već se ta dodatna energija uzima u obzir kod proračuna indikatora održivosti.

U sklopu *Opcije 1* razmotren je kondenzacioni blok 110 MW sa kotlom na sprášeni ugalj i tečnim odvodom šljake. Investiranje kod ove opcije ima za cilj poboljšanje efikasnosti kotla i nadogradnju snage. Rekonstrukcijom kotla, efikasnost se poboljšava sa 85% na 87%; produženjem ložišta za 2 m i uvođenjem novog sistema loženja sa *Low NO_x* vrtložnim gorionicima. Dodatno, rekonstrukcijom turbine snaga na stezaljkama generatora se povećava sa 110 MW na 118,55 MW. Sve ove mjere utiču na smanjenje zagađivanja okoline, odnosno redukciju emisije CO₂, NO_x i SO₂ po proizvedenom kWh.

Kod *Opcije 2* razmotren je blok 110 MW sa kotlom na sprášeni ugalj i tečnim odvodom šljake koji radi u kogeneracijskom režimu. Dodatne investicije u odnosu na Opciju 1 odnose se na regulaciju oduzimanja pare sa turbine i na toplinske stanice. Dodatnih 80 MW energije u toplini obezbjeđuje se regulisanim oduzimanjem sa turbine.

Opcija 3 predstavlja novi objekat – blok 110 MW sa sagorijevanjem u fluidiziranom sloju. Elektrana radi u kogeneracijskom režimu, obezbjeđujući dodatnih 80 MWh/h toplinske energije. Moderni dizajn ložišta sa sagorijevanjem u fluidiziranom sloju i unutrašnjom cirkulacijom omogućava sagorijevanje ugljeva niže toplinske moći, uz specifični utrošak topline od 8050 kJ/kWh (efikasnost bloka 45%).

Opcija 4 predstavlja kombinirani ciklus gasne i parne turbine. Instalirana snaga ove elektrane je 102 MW, a pretpostavka je da se ulazna energija transformiše isključivo u električnu energiju. Gorivo je prirodni gas toplotne moći 45 500 kJ/kg. Specifični utrošak topline bloka je 6545 kJ/kWh.

U slučaju *Opcije 5*, rekonstrukcijom hidroenergetskog bloka 6 25 MW, obezbeđuje se nadogradnja instalisane snage za dodatnih 30 MW, kao i povećanje efikasnosti za 4%. Ovo se postiže kroz povećanje projektog pada za 6 m, povećanje instalisanog protoka za 10%, te uvođenje novih moderniziranih Francisovih turbina.

Opcija 6 predstavlja solarnu elektranu (PV sistem) sa ukupnim instalisanim kapacitetom od 210 MW. Odgovarajuća površina ovog polja je 266 000 m², ili 1,26 m²/kW.

Opcija 7 podrazumijeva korištenje energije vjetra. Prema raspoloživim podacima o karakteristikama vjetra na izabranim mikrolokacijama, proračunato je da je potrebno instalirati 438 jedinica snage 600 kW da bi se ostvarila godišnja proizvodnja od 525 GWh. Pri tome je projektovani godišnji pogon 2000 h [7, 8].

U sklopu *Opcije 8* razmotreno je instaliranje postrojenja na biomasu. Instalirani kapacitet je 80 MW. Ukupna efikasnost je 20%. Emisija CO₂ kod ove opcije se smanjuje za količinu karbondioksida koju u procesu fotosinteze absorbuju biljke korištene kao gorivo u ovoj elektrani.

Indikatori održivosti

Procjena održivosti je bazirana na definisanju i određivanju indikatora održivosti u radu [1–4, 7, 8]. U radu [1], definisani su indikatori održivosti koji odražavaju 4 kriterija održivosti, tabl. 1.

Tablica 1. Indikatori održivosti

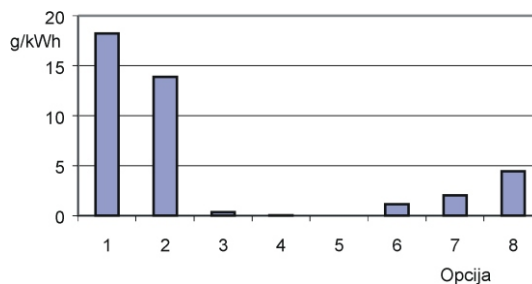
Tip indikatora	Naziv indikatora	Jedinica
Indikator resursa (RI)	1 – Indikator goriva	kg/kWh
	2 – Indikator nehrđajućeg čelika	kg/kWh
	3 – Indikator ugljeničnog čelika	kg/kWh
	4 – Indikator bakra	kg/kWh
	5 – Indikator aluminijuma	kg/kWh
	6 – Indikator izolacije	kg/kWh
Okolinski indikator (EI)	1 – Indikator CO ₂	kg/kWh
	2 – Indikator SO ₂	kg/kWh
	3 – Indikator NO _x	kg/kWh
Ekonomski indikator (Eci)	1 – Indikator cijene energije	EUR/kWh
	2 – Indikator investicija	EUR/kWh
	3 – Indikator efikasnosti	1/kWh
Socijalni indikator (SI)	1 – Indikator posla	h/kWh
	2 – Indikator raznolikosti	–

Indikatori iz tabl. 1. su izračunati za sve razmatrane opcije, na bazi čega se može izvršiti jednokriterijalna analiza.

Rezultati jednokriterijalne analize

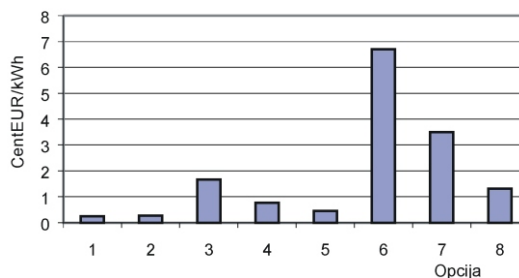
Niže je dat izvod iz rezultata jednokriterijalne analize [1]. Upoređujući razmatrane opcije po osnovu okolinskih indikatora, npr. sl. 2 – indikator emisije sumpordioksida, može se primjetiti da obnovljivi izvori, hidroenergija, i čiste tehnologije fosilnih goriva kao što su kombi ciklus i sagorijevanje u fluidiziranom sloju, su u prednosti u odnosu na konvencionalne blokove na uglj.

Slika 2. Poređenje indikatora SO_2 u okviru jednokriterijalne analize [1]



Suprotno ovome, komparacija po ekonomskim indikatorima, npr. ekonomski indikator investicija – sl. 3, opcije konvencionalnih elektrana na uglj su u prednosti u odnosu na sve ostale opcije, posebice obnovljive izvore energije.

Slika 3. Poređenje indikatora investicija u okviru jednokriterijalne analize [1]



Ovo je očigledan primjer nepouzdanosti jednokriterijalne analize, kada izbor najpovoljnije opcije energetskog sistema zavisi isključivo od odabranog kriterija. Posljedično, prilikom odlučivanja dolazi do izražaja subjektivnost donosioca odluke.

Metod multikriterijalne procjene održivosti

U radu je korištena multikriterijalna procjena održivosti na bazi ASPID metodologije [5, 6]. Metodologija je bazirana na sistemu stohastičkog modela neodređenosti,

omogućujući vršenje procjene pomoću različitih sistema za podršku na kompjuteru, kao i dobijanje različitih normalizacionih indeksa korištenjem nenumeričke, netačne i nekompletne informacije (NNN- informacija), dobijene iz izvora različite pouzdanosti i vjerovatnoće. Multikriterijalna analiza je bazirana na određivanju indikatora održivosti, te specifičnih kriterija adaptiranih težinskim faktorima, koji se potom aglomeriraju u Generalni indeks održivosti. Prema tome, Generalni indeks održivosti se formira prema sljedećoj proceduri:

- (1) Formiranje vektora $x = (x_1, \dots, x_m)$ svih polaznih atributa (karakteristika) koji su nužni za potpunu procjenu određenih kvaliteta ispitivanih objekata; atributi su predstavljeni pomoću četiri grupe indikatora: indikatora resursa, okolinskih indikatora, socijalnih indikatora i ekonomskih indikatora.
- (2) Formiranje vektora specifičnih kriterija $q = (q_1, \dots, q_m)$ kojima se procjenjuju polazni atributi $x = x_1, \dots, x_m$, a u ovom slučaju to su indikatori.
- (3) Uvođenje težinskih koeficijenata w_i , čime se multikriterijska procjena opcija izražava pomoću aditivne agregatne funkcije, odnosno sintetizirajuće funkcije oblika:

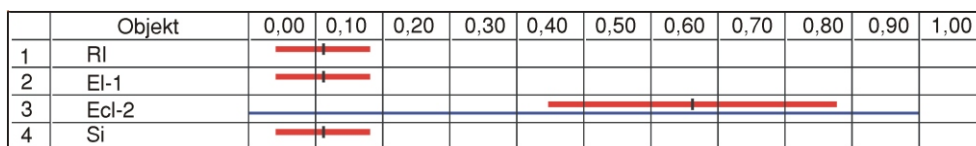
$$Q_+(q; w) = \sum w_i q_i$$

- (4) Izbor vektora $w = (w_1, \dots, w_m), w_i \geq 0, w_1 + \dots + w_m = 1$, tj. težinskih koeficijenata. U praksi se najčešće susrećemo sa situacijom da zbog nedovoljnih informacija ne možemo vektor $w = (w_1, \dots, w_m)$ tačno odrediti. U tom slučaju koristimo postupak randomizacije koji nam omogućava da pri zadanim prioritetima pojedinih kriterijuma možemo odrediti vrijednosti težinskih faktora za svaki razmatrani slučaj.
- (5) Kao rezultat ove evaluacije dobija se prioriteta lista razmatranih opcija pri zadanim kriterijumima.

Rezultati multikriterijalne procjene održivosti

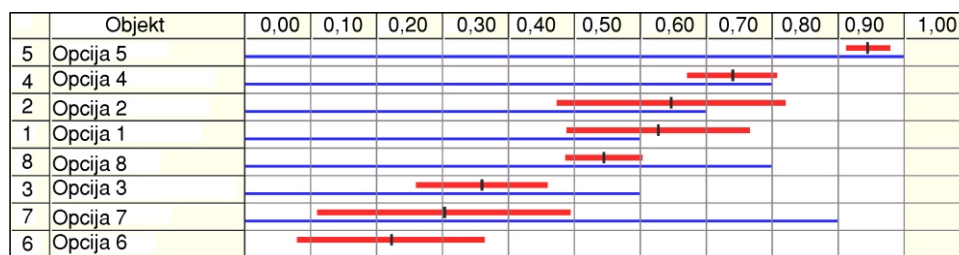
Multikriterijalna analiza održivosti uzima u obzir sve kriterije istovremeno, pri čemu se ti kriteriji adaptiraju odgovarajućim težinskim faktorima. Na ovaj način dobija se jedna realna i pouzdana rang lista opcija koje se razmatraju.

Razmatrajući slučaj kada je u okviru multikriterijalne analize ekonomskom kriteriju kod kojeg dominira indikator investicija pridata najveća važnost, tj. dodijeljen najveći težinski faktor, sl. 4, može se primjetiti da je opcija sa najvećim generalnim indeksom održivosti Opcija 5 – rekonstrukcija hidroenergetskog postrojenja, sl. 5. Opcija 2 – rekonstrukcija bloka na spraseni uglj u kogeneracijskom režimu u ovom slučaju



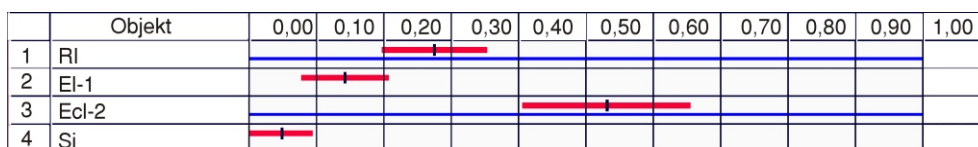
Slika 4. Težinski faktori za slučaj $E_{c12} > E_{I2} = S_{I} = R_{I}$ u okviru multikriterijalne analize [1]

rangirana je na treće mjesto, mada je u slučaju jednokriterijalne analize ova opcija preferabilna.

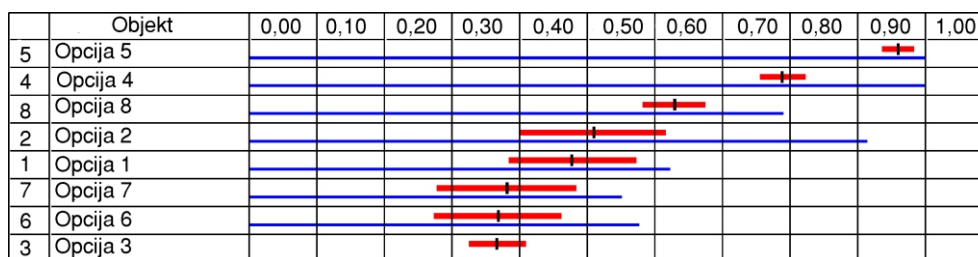


Slika 5. Generalni indeksi održivosti za slučaj $E_{cI2} > E_{I2} = SI = RI$ u okviru multikriterijalne analize [1]

Nadalje, kada se u okviru multikriterijalne analize za slučaj u kojem se ekonomskom kriteriju sa dominacijom indikatora investicija ponovo dodijeli najveći težinski faktor, ali se pri tome preostalim indikatorima da različita važnost, kako je to prikazano na sl. 6, tada Opcija 2 pada na četvrto mjesto na rang listi prioriternih opcija, usljed uticaja različitih težinskih faktora na preostale indikatore, sl. 7.



Slika 6. Težinski faktori za slučaj $E_{cI2} > RI > E_{I2} > SI$ u okviru multikriterijalne analize [1]



Slika 7. Generalni indeksi održivosti za slučaj $E_{cI2} > RI > E_{I2} > SI$ u okviru multikriterijalne analize [1]

Zaključak

Većina modela za odlučivanje koji se danas koriste u procjeni energetske sistema bazirani su na jednokriterijalnoj analizi. Zbog izražene potrebe za jednom realnom procjenom održivosti energetske sistema, ovi modeli su unapređeni i adaptirani za multikriterijalnu procjenu održivosti. Međutim, nedostatak informacija ne dozvoljava dobijanje jedne jasne procjene kvaliteta opcija energetske sistema.

Jedna od perspektivnih metoda za procjenu održivosti energetske sistema je multikriterijalna procjena održivosti na bazi ASPID metodologije. Ova metodologija je bazirana na sistemu stohastičkih modela neodređenosti, koja omogućava realizaciju procjene uz pomoć različitih sistema, kao i dobijanje različitih normalizacijskih indeksa korištenjem nenumeričke (ordinalne), netačne (intervalne) i nekompletne informacije dobijene iz izvora različite pouzdanosti i vjerovatnoće.

Multikriterijalna procjena održivosti energetske sistema različitih izvora je bazirana na definiciji sljedećih indikatora: indikatorima resursa, okolinskim indikatorima, socijalnim indikatorima i ekonomskim indikatorima, uključujući težinske faktore pomoću kojih se pojedinim indikatorima pridaju odgovarajuće važnosti (težine).

U ovom radu, izvršena je procjena održivosti odabranih opcija energetske sistema JP Elektroprivreda BiH, zasnovana na jednom realnom primjeru potrebe za povećanjem proizvodnje električne energije za period od 15 godina.

Kroz multikriterijalnu procjenu održivosti odabranih opcija, donosiocima odluka je omogućeno da formiraju relevantno mišljenje u odnosu na izbor optimalne opcije energetske sistema, čime se predstavljena metoda multikriterijalne procjene održivosti bazirane na ASPID metodologiji nameće kao relevantan alat za donošenje odluka u izboru tipa novog energetske postrojenja.

Literatura

- [1] Begić, F., Metoda procjene stepena održivosti energetske postrojenja različitih izvora u Bosni i Hercegovini, Doktorska disertacija, Univerzitet u Sarajevu, Mašinski fakultet Sarajevo, oktobar 2003
- [2] Afgan, N. H., Multicriteria Indicators for Clean Air Technologies, UNESCO Chair Holder, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Estoril, Portugal, 2000
- [3] Afgan, N. H., Carvalho, M. G., Sustainable Assessment Method for Energy Systems, Kluwer Academic Publisher, New York, 2000
- [4] Begić, F., Kazagić, A., Održivi razvoj Bosne i Hercegovine – Osnov strategije razvoja Bosne i Hercegovine (na bosanskom), V međunarodna konferencija *Energetska i procesna postrojenja*, Dubrovnik 2002, Energetika Marketing, Zagreb, 2002
- [5] Hovanov, N., Fedotov, Yu., Zakharov, V., The Making of Index Numbers Under Uncertainty, Environmental Indices: Systems Analysis Approach, EOLSS Publishers Co., 1999, Oxford, UK, 83-99
- [6] Hovanov, N., Analysis and Synthesis of Parameters under Information Deficiency (in Russian), St. Petersburg State University Press, St. Petersburg, Russia, 1996
- [7] Begić, F., Kazagić, A., Afgan, N., Possibilities Assessment for Wind Energy Utilisation in Bosnia and Herzegovina, RENEWABLES 2004 – International Conference on New and Renewable Energy Technologies for Sustainable Development, 2004, Evora, Portugal
- [8] Begić, F., Afgan, N., Sustainability Assessment as a Basis for the Decision-Making in Selection of Energy System, RENEWABLES 2004 - International Conference on New and Renewable Energy Technologies for Sustainable Development, 2004, Evora, Portugal

Abstract

Multicriteria Sustainability Assessment of Energy Systems

by

*Fajik BEGIĆ¹, Naim H. AFGAN², and
Anes KAZAGIĆ¹*

¹ Public Electric Power Industry of BiH d.d. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

² VINČA Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia and Montenegro

In this paper the multicriteria sustainability assessment of the energy power systems of various sources is performed, using a real and complex energy power system as example. The analysis is based on rehabilitation of a 110 MW thermal power unit, which is considered and then compared with some other comparable options, such as thermal power unit with coal fueled boiler with combustion in fluidized bed, combined cycle gas turbine plant, hydro power plant, power plant based on solar energy (PV systems), wind turbines and bio-mass power plant. Used methodology is based on a system of stochastic models of uncertainty, enabling to realize the assessment from various supporting systems, as well as enabling to obtain various normalization indexes by using Non-numeric (ordinal), Non-exact (interval) and Non-complete information (NNN-information) obtained from sources of various reliability and probability. Through the analysis of multicriteria assessment of various options of energy systems, the decision-makers are offered to evaluate different options and make selection of the optimal option which meet the multicriteria evaluation.

Key words: *energy system, sustainability, multicriteria assessment*

Odgovorni autor / Corresponding author (F. Begić)
E-mail: f.begic@elektroprivreda.ba