

# DEFINITION AND CALCULATION OF CRITERIA FOR OPTIMIZATION OF ENERGY MIX WITH THE APPLICATION OF MCDM METHODS FOR THE PROCESS OF ITS OPTIMIZATION

M. Mrkić-Bosancić<sup>1</sup>, S.Vasković<sup>2</sup> and P.Gvero<sup>3</sup>

Ministarstvo energetike i rudarstva Republike Srpske<sup>1</sup>, Trg Republike Srpske 1, 78000 Banja Luka, Republika Srpska BiH, [mm.bosancic@mier.vladars.net](mailto:mm.bosancic@mier.vladars.net)  
Mašinski fakultet Univerzitet u Istočnom Sarajevu<sup>2</sup>, Vuka Karadžić 30, 71123 Istočno Novo Sarajevo, Republika Srpska, BiH, [srdjan.vaskovic@ues.rs.ba](mailto:srdjan.vaskovic@ues.rs.ba)  
Mašinski fakultet Univerzitet u Banjoj Luci<sup>3</sup>, Ulica vojvode Stepe Stepanovića 71, 78000 Banja Luka, Republika Srpska, BiH, [petar.gvero@mf.unibl.org](mailto:petar.gvero@mf.unibl.org)

**Abstract:** In the period of energy transition, countries face the challenges of switching from fossil fuels to renewable energy sources (RES), which results in a change in the structure of energy production capacities, but also the need to achieve a sustainable optimal energy mix. The main goal of energy mix optimization was to choose the most efficient method of electricity and heat production within a certain national/local area. Multicriteria optimization is a logical way to fully create a realistic picture of the currently optimal energy mix, taking into account the necessary and sufficient number of criteria by which this problem is described. Multi-criteria decision-making (MCDM) is often a demanding task, as it is necessary to choose one from a set of alternatives, based on a number of conflicting criteria. When defining the energy mix of the state/local community, it is necessary to analyze a number of mutually contradictory criteria. This paper presents the criteria for the description and evaluation of energy systems for the production of electricity and heat in the state/local community: energy and exergy efficiency, exergy factor, specific investment cost of 1 kW installed power technology, specific production cost per 1 kWh energy, specific emission CO<sub>2</sub> u kg/kWh, capacity factor, technical lifespan, storage factor. Three methods that belong to MCDM methods are presented: Entropy weight method (EWM), Analytical Hierarchical Process (AHP) method and VIKOR method. The EWM and AHP methods were used to determine the weights of the criteria in comparative relationships in terms of accuracy and convergence of their calculated numerical values, while the VIKOR method was used in the process of optimizing the energy mix.

**Key words:** energy transition, criteria, MCDM methods, VIKOR, EWM and AHP methods, optimal energy mix

## 1. INTRODUCTION

Da bi odredili optimalnu kombinaciju proizvodnje i snabdijevanja energijom države/regiona/lokalne zajednice, potrebno je prije toga napraviti matematički model kojim se definišu i izračunavaju kriterijumi optimizacije. Zbog toga je važno izabrati adekvatne kriterijume da bi se dala što bolja vrijednost energetskog lanca sistema za proizvodnju i snabdijevanje energijom države/lokalne zajednice. u definisanim granicama posmatranog problema. Lanac snabdijevanja energijom je u ovom slučaju je putanja svih energetskih transformacija od primarnih izvora energije u koristan oblik energije koja se isporučuje krajnjim korisnicima. U nastavku biće prezentovati kriterijumi do kojih se došlo na osnovu pregleda i analize literature i tokom rada na matematičkom modelu za određivanje optimalne kombinacije snabdijevanja energijom države/lokalne zajednice. Dati kriterijumi su prvenstveno bazirani na parametrima održivosti. U procesu odlučivanja uzimamo u obzir kvalitativne i kvantitativne faktore, a kriterijumi održivosti koji se najčešće koriste za ocjenu sistema snabdijevanja energijom se baziraju na tehničkim, ekonomskim, društvenim i faktorima životne sredine (Wang J.J., Jing Y.Y., Zhang C.F., Shi G.H., Zhang X.T., 2008), (Wang J., Jing Y., Zhang C., Zhao J., 2009), a izbor optimalne kombinacije za snabdijevanje energijom države/regiona/lokalne zajednice, je posmatrano kao problem donošenja višekriterijumske odluke.

## 2. KRITERIJUMI I INDIKATORIZA OPTIMIZACIJU KOMBINACIJE SNABDIJEVANJA ENERGIJOM DRŽAVE/REGIONA/LOKALNE ZAJEDNICE

### 2.1 Matematički pristup za izračunavanje kriterijuma za optimizaciju kombinacije snabdijevanja energijom države/regiona/lokalne zajednice

Kategorije kriterijuma za opis i ocjenu energetskog sistema za proizvodnju i distribuciju električne i toplotne energije države/regiona/lokalna zajednice u okviru kojih su dati indikatori, su podjeljeni na 3 vrste:

1. **Tehničko-energetski** (Efikasnost-*Energetska efikasnost*  $f_{1j}$  i *Eksergetska efikasnost*  $f_{2j}$ , *Kvalitet-Koeficijent eksergetskog kvaliteta za različite proizvode*  $f_{3j}$ , *Zrelost-Tehnički vijek rada postrojenja*  $f_{8j}$ , *Sigurnost-Faktor skladištenja*  $f_{9j}$ ),
2. **Ekonomski** (Ekonomska izvodljivost-*Specifični investicioni troškovi po ukupno instalisanoj snazi svih postrojenja*, €/kw  $f_{4j}$  i *Specifični troškovi proizvodnje energije svedeni po 1 kwh proizvedene energije*, €/kwh,  $f_{5j}$ ) i
3. **Životne sredine/stohastički** (Emisija-*Emisija CO<sub>2</sub> u lancu usljed potrošnje fosilnih goriva za dobijanje 1 kwh energije*, kg/kwh,  $f_{6j}$ , *Faktor kapaciteta/stohastika - CF/PDF probability density function*  $f_{7j}$ ).

### 2.1.1 Energetska efikasnost proizvodnje energije $f_{1j}$

Iako se u ovom radu ne razmatraju klasični energetska lanci, protok i transformacija energije u okviru države/lokalne zajednice se može smatrati dijelom energetskog lanca, tako da se koristi formula za faktor energetske efikasnosti (Honorio L; Bartaire J; Bauerschmidt R; Ohman T; Tihany Z; Zeinhofer H; Scowcroft J; Vasco de Janerio, Kruger H; Meier H; Offermann D; Lnagnickel U, 2003), (Vasković S., 2016):

$$f_{1j} = \left( 1 - \sum_{k=1}^j \frac{e_{ckj}}{e_{pkj}} \right) \cdot \mu_{bj} \cdot \mu_{ej} \cdot \mu_{ij} \cdot \mu_{gj} \cdot \mu_{dj} \cdots \mu_{end,usej} \quad (1)$$

Gdjeje:  $e_{ckj}$  - primarna energija utrošena u jednom elementu lanca sistema izražena u kWh,  $e_{pkj}$  - donja toplotna moć one količine energenta procesuirane u jednom elementu lanca sistema u kWh, k-brojač elemenata u energetskom lancu, q-ukupni broj elemenata u energetskom lancu, j-broj energetskih lanaca,  $\mu_{bj} \cdot \mu_{ej} \cdot \mu_{ij} \cdot \mu_{gj} \cdot \mu_{dj} \cdots \mu_{end,usej}$  - faktori energetske efikasnosti za: kotlove, turbine, generatore, distribuciju energije, izmjenjivače toplote, krajnje elemente korišćenja i drugo.

### 2.1.2 Eksergetska efikasnost proizvodnje energije $f_{2j}$

Eksergija je u realnim sistemima uvijek djelimično ili potpuno uništena (usled nepovratnih procesa), odnosno proporcionalna je generisanoj entropiji. Ukupna eksergetska efikasnost (Honorio L; Bartaire J; Bauerschmidt R; Ohman T; Tihany Z; Zeinhofer H; Scowcroft J; Vasco de Janerio, Kruger H; Meier H; Offermann D; Lnagnickel U, 2003), (Vasković S., 2016), data je i izrazom :

$$f_{2j} = \left( 1 - \sum_{k=1}^j \frac{e_{xckj}}{e_{xpkj}} \right) \cdot \mu_{exbj} \cdot \mu_{exej} \cdot \mu_{exij} \cdot \mu_{exgj} \cdot \mu_{exdj} \cdots \mu_{ex, end, usej} \quad (2)$$

Gdje je:

$e_{xckj}$  - eksergija utrošena u jednom elementu lanca sistema izražena u kWh,  $e_{xpkj}$  - eksergija akumulirana u gorivu u kWh, k-brojač elemenata u energetskom lancu, q-ukupni broj elemenata u energetskom lancu, j-broj energetskih lanaca,  $\mu_{exbj} \cdot \mu_{exej} \cdot \mu_{exij} \cdot \mu_{exgj} \cdot \mu_{exdj} \cdots \mu_{ex, end, usej}$  - faktori eksergetske efikasnosti: kotlova, turbina, generatora, mreže, distribucije energije, izmjenjivača toplote, krajnjih korisnika i dr.

### 2.1.3. Koeficijent eksergetskog kvaliteta za različite proizvode $f_{3j}$

Faktor kvaliteta energetske forme predstavlja odnos između eksergije i energije određenog energetskog sistema. Izraz ovog faktora q prikazan je opštom jednačinom (3):

$$q = \frac{\text{Eksergija}}{\text{Energija}} \quad (3)$$

Faktor kvaliteta energetske forme  $q$  predstavlja udio rada koji se može dobiti postupkom transformacije energije koji energetska sistem dovodi u ravnotežu s okolinom, a koji je povezan s energijom prisutnom u sistemu prije nego što se proces transformacije dogodi. Najčešće se to broj u dijapazonu od 0 do 1. Razmatrane su tri energetske forme: električna energija, toplotna energija i gorivo. U Tabeli 1. je dat koeficijent eksergetskog kvaliteta  $f_{3j}$  za ove energetske forme (Vasković S., 2016).

Energetska forma			
	Električna energija	Toplotna energija	Gorivo
Foeficijent $f_{3j}$	$E_j = 1$	$H_j = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$	$F_j = \mu_{exp}$

**Tabela 1. Koeficijent eksergetskog kvaliteta za tri razmatrane energetske forme**

Gdje su:  $T_0$  - temperatura okoline [K],  $T$ - temperatura toplog rezervoara [K],  $E_j$ ,  $H_j$ ,  $F_j$  - koeficijenti eksergetskog kvaliteta za električnu energiju, toplotnu energiju i gorivo,  $\mu_{exp}$  - eksergetska efikasnost za proizvodnju elektriciteta iz različitih tipova goriva za izabranu tehnologiju,

Kombinovani koeficijent eksergetskog kvaliteta za energetska lanac i njegove produkte:

$$f_{3j} = E_j \cdot e_j + H_j \cdot h_j + F_j \cdot f_j \quad (4)$$

$$\text{Gdje je: } e_j + h_j + f_j = 1 \quad (5)$$

$e_j$ ,  $h_j$ ,  $f_j$ - procenat istovremene proizvodnje električne, toplotne energije i goriva.

#### **2.1.4. Funkcija specifičnog investicionog troška po ukupno instaliranoj snazi proizvodnje energije $f_{4j}$**

Investicioni trošak je ekonomski parametar koji izražava troškove za uvođenje određene tehnologije. Sadrži potrebne troškove za sve faze implementacije projekta (obično uključuje trošak planiranja, projektovanja, izgradnje, nadzora, nabavku i instalaciju opreme, kvalifikovani i nekvalifikovani rad, nabavku informatičke tehnologije, trošak zaštite životne sredine i dr. Specifični investicioni trošak se prikazuje slijedećom jednačinom (Vasković S., 2016).

$$f_{4j} = \frac{\sum_{k=1}^q I_{kj}}{\sum_{k=1}^q P_{kj}} \quad (6)$$

Gdje su:  $I_{kj}$  -suma svih investicija u elementu energetska lanca [€],  $P_{kj}$  -suma svih instaliranih (nazivnih) snaga u elementu energetska lanca [kW, MW],  $k$  -brojač elemenata u energetska lancu,  $q$ -ukupni broj elemenata u energetska lancu,  $j$  -broj energetska lanaca.

### 2.1.5 Specifični troškovi proizvodnje energije svedeni po 1 kWh proizvedene energije, €/kWh, funkcija kriterijuma $f_{5j}$

Troškovi proizvodnje energije čine troškovi rada i održavanja i dele se na fiksne i varijabilne, a mogu biti i njihov zbir. Fiksni dio troškova rada i održavanja obuhvataju troškove: administracije, rada zaposlenih (svedeno na 1kWh proizvedene energije), planirano i neplanirano održavanje, poreza na imovinu, anuitete i kamate na zajmove privrednog društva i dr. Oni uglavnom zavise od intalirane snage energetskog postrojenja. Varijabilne troškove čine obični operativni troškovi i cijene goriva (kod tehnologija na bazi fosilnih goriva), koji se sabiraju. Varijabilni troškovi rada i održavanja uključuju potrošnju pomoćnih materijala kao što su voda, mazivo i aditivi za gorivo, troškovi popravaka i održavanja koji nisu pokriveni garancijama i osiguranjem.

$$f_{5j} = \frac{\left( \sum_{k=1}^q Op_{kj} + Mp_{kj} + Cr_j \right) \cdot t}{Ep \text{ gorivo / toplota / elektricitet }_j \cdot t} \quad [€/kWh, €/MWh] \quad (7)$$

Gdje je:

$Op_{kj} + Mp_{kj}$  zbir troškova rada i održavanja u svim elementima energetskog lanca po godinama [€/h],  $Cr_j$  troškovi (goriva-biomasa, gas, ugalj, mazut) [€/h],  $Ep$  (gorivo/toplota/elektricitet) $_j$  - produktivnost različitih energetskih formi definisanih u posmatranom lancu [kwh/god, MWh/h],  $k$ -brojač elemenata u energetskom lancu,  $q$ -ukupni broj elemenata u energetskom lancu,  $j$ -broj energetskih lanaca,  $t$ -vrijeme rada postrojenja [h].

### 2.1.6. Funkcija specifične emisije CO<sub>2</sub> za energetski lanac $f_{6j}$

Uporedo sa tehnološkim i ekonomskim razvojem društva, rastom populacije, emisija gasova sa efektom staklene bašte (GHG) koja je uzrokovana spaljivanjem fosilnih goriva, sagorijevanjem biomase, krčenjem šuma i čišćenjem zemljišta za poljoprivredu se kontinuirano povećavala. Za procjenu emisije gasova staklene bašte koji nastaju sagorijevanjem goriva koristi se izraz (Australian Government, Department of Environment and Energy, 2019), (Vasković S., 2016):

$$f_{6j} = \frac{\sum_{k=1}^q m_{kj} \cdot ec_{kj} \cdot e_{fkj}}{Ep \text{ gorivo / toplota / elektricitet }_j} \cdot 1000, \quad (8)$$

Gdje je:  $m_{kj}$  -količina potrošnje određenog tipa goriva u jednom elementu energetskog lanca [kg/hour],  $ec_{kj}$  -toplotna moć svakog goriva [kWh/kg],  $e_{fkj}$  - emisioni faktor za svaki gas (u ovom slučaju CO<sub>2</sub>) za različite tipove goriva [kWh/kg],  $Ep$ (gorivo / toplota / elektricitet) $_j$  -produktivnost energetskog lanca za različite energetske forme po satu [kwh/hour, MWh/hour],  $j$  -broj energetskih lanaca,  $t$  -

vrijeme rada postrojenja [h]. Za razliku od sagorevanja uglja, prirodnog gasa, mazuta i biomase proizvodi sistemi na bazi vjetra, solarne i hidro energije ne emituju GHG jer je njihovo gorivo odnosno izvor energije bez ugljenika. Tako da se količina emisije staklenih gasova u atmosferu može smanjiti zamjenom konvencionalnih sistema obnovljivim sistema ili drugim sistema za proizvodnju električne i toplotne energije koji ne emituju GHG.

### 2.1.7 Faktor kapaciteta $f_{7j}$

Faktor kapaciteta predstavlja odnos ukupno proizvedene količine energije u određenom vremenskom periodu (godišnjem) sa hipotetičkom (maksimalnom) količinom energije koje bi postrojenje proizvelo da neprekidno radi punim kapacitetom. Ovaj faktor zavisi od vrste energenta koji se koristi, ali i dostupnosti odnosno stohastičkoj prirodi OIE.

$$f_{7j} = \frac{SPE(MWh)}{(365dana) \cdot (24h / danu) \cdot (ISuMW)} \quad (9)$$

Gdje je: SPE-proizvedena količina energije u određenom vremenskom periodu (najčešće godišnjem), IS -instalirani kapacitet postrojenja.

#### 2.1.7.1 Probability density function (PDF)

Stohastička priroda svih OIE razmatranih u ovom radu modelirana je primjenom odgovarajućih PDF. WeibullPDF se koristi za izračunavanje raspoložive energije vjetra. Weibullova PDF najčešće se upotrebljava za predstavljanje raspodjele brzine vjetra  $v$  ( (Surender Reddy S., Bijwe P.R., Abhyankar A.R., 2015), (Biswas, P. P., Suganthan P. N., Amaratunga A., 2017) (Biswas P.P., Suganthan P.N., Qu B.Y., Amaratunga G. A.J., 2018). Vjerojatnoća brzine vjetra prikazana Weibullovom PDF:

$$f_{7j} v = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{v}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad \text{za } 0 < v < \infty \quad (10)$$

$\alpha$ -parametar skale za PDF,  $\beta$ -parametar oblika za PDF.

Sve vrijednosti parametara PDF-a realno su odabrane s obzirom na instalirani kapacitet izvora energije. Izlazna snaga vjetroelektrane je diskretna pri određenim brzinama vjetra, što se može vidjeti iz jednačine (10). Izlazna snaga je nula kada je brzina vjetra ( $v_{out}$ ) ispod brzine uključivanja ( $v_c$ ) ili iznad brzine isključivanja ( $v_f$ ). Između nazivne brzine vjetra ( $v_r$ ) i brzine isključivanja ( $v_f$ ), turbina proizvodi nazivnu snagu  $P_{wr}$ . Dalja razrada i razvoj modela vezanih za stohastičku prirodu OIE napravljena je od strane raznih autora, a vjerojatnoća vjetroelektrane za ove zone izračunava se prema (Surender Reddy S., Bijwe P.R., Abhyankar A.R., 2015), (Biswas, P. P., Suganthan P. N., Amaratunga A., 2017), (Biswas P.P., Suganthan P.N., Qu B.Y., Amaratunga G. A.J., 2018)“.

### 2.1.8 Tehnički vijek trajanja investicije/opreme $f_{8j}$

Tehnički vijek trajanja je fizički vijek trajanja investicije odnosno koliko dugo oprema može da efektivno radi. Ukoliko se komponente/proizvodi zamjenjuju prije nego što se pohabaju, kao rezultat raspoloživosti na tržištu novih i efikasnih komponenti, tada je ekonomski vijek trajanja kraći od tehničkog vijeka trajanja. Promjene standarda i propisa, cijena energije, nivoa udobnosti, itd. takođe mogu da dovedu do zamjene opreme prije isteka njenog tehničkog vijeka trajanja.

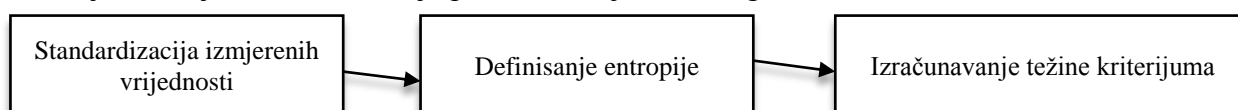
### 2.1.9 Faktor skladištenja $f_{9j}$

Faktor skladištenja predstavlja parametar koji govori dali se energija za određenu tehnologiju skladišti (stanje 1) ili ne (stanje 0).

## 3. METODE ZA ODREĐIVANJE TEŽINE KRITERIJUMA

### 3.1 Entropy Weihgt Method (EWM)

EWM tretira nesigurnost u informacijskoj strukturi matrice odluke, poznatu kao Šenonova entropija. Težine kriterijuma se generišu direktno na osnovu rejtinga alternativa i eliminišu problem subjektivnosti, nekompetentnosti ili odsustva donosioca odluke. Entropijska metoda je odlična metoda za procjenu, iz nereguliranog skupa različitih alternativa energetskog miksa, težine različitih tipova kriterijuma kojima se te alternative opisuju (tehničkih, energetskih, ekonomskih, ekoloških, stohastičkih, investicionih i dr.). Primjena kombinovanih metoda za određivanje objektivnih vrijednosti težina kriterijuma, zajedno sa jednom od postojećih MCDM metoda, tek je nedavno dobila značaj u inženjerstvu. Metoda je prikazana slijedećim algoritmom na Slici 1:



Slika 1 EWM – autor

U ovoj metodi je  $n$  indikatora i  $m$  uzoraka dato u evaluaciji, i izmjerena vrijednost  $i$  indikatora u  $j$ -tom uzorku se definiše kao  $x_{ij}$ . Prvi korak je standardizacija izmjerenih vrijednosti. Standardizovana vrijednost  $i$ -tog indeksa u  $j$ -om uzorku predstavljena je sa  $p_{ij}$ , i izračunava se:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_{ij}} \quad (11)$$

Vrijednost entropije  $E_i$  tog indeksa data je:

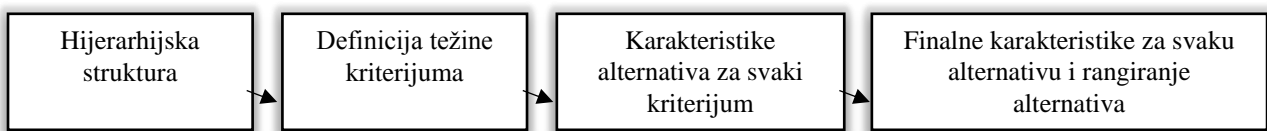
$$E_i = \frac{\sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij}}{\ln m} \quad (12)$$

Vrijednost entropije se kreće u rasponu  $[0,1]$ . Što je veća vrijednost  $E_i$ , to je veći stepen diferencijacije indeksa  $i$ , daje mu se veća težina. Težina  $i$  indikatora je data izrazom:

$$w_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^m (1 - E_i)} \quad (13)$$

### 3.2 Analytic hierarchy process - AHP

AHP metoda se zasniva na modelu upoređivanja parova, određivanjem težine za svaki jedinstveni kriterijum. AHP je predložio Saaty 1980. godine (Saaty T.L., 1978), (Saaty T.L., 1980) i ova metoda se široko primjenjuje u problemima koji uključuju veći broj donosioca odluka, višestruke, često sukobljene kriterijume. Cilj AHP-a je definisanje optimalne alternative i kategorisanje druge, uzimajući u obzir kriterijume koji ih opisuju. AHP metodologija je prezentovana na Slici 2. (Kolios A., Mytilinou V., Lozano-Minguez E, Salonitis K., 2016), kroz četiri koraka:



Slika 2 AHP metodologija

Prva faza uključuje strukturisanje problema odluke u hijerarhijsku strukturu. Cilj je na vrhu hijerarhije; sljedeći nivo uključuje kriterijume za uticanje na odluku; i na kraju, alternative su postavljene na dnu hijerarhije. U drugoj fazi treba odrediti kriterijume za svaku alternativu. Potrebno je definisati matricu poređenja (A). Unos u red  $i$  kolonu  $j$  matrice A ( $a_{ij}$ ) predstavlja, koliko je važniji kriterijum  $i$  nego kriterijum  $j$  u odnosu na alternative.

- Elementi matrice  $a_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n \wedge i > j$  formiraju se direktnim poređenjem kriterijuma  $C_i$  i  $C_j$ , odnosno  $a_{ij} = w_i/w_j$ .
- Elementima koji se nalaze na dijagonali matrice dodeljuje se vrijednost 1, odnosno  $w_i/w_i = 1$ .
- Ostalim elementima matrice ( $i < j$ ) dodeljuje se recipročna vrijednost elementa  $a_{ij}$ , odnosno  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ .

Matrica poređenja A u parovima ima sledeći oblik:

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Poređenje dva elementa hijerarhije (modela) vrši se korišćenjem Satijeve skale date u Tabeli 2.

$$S = \left\{ \frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 \right\}$$

Značaj	Definicija	Objašnjenje
1	Istog značaja	Dva elementa su identičnog značaja u odnosu na cilj



3	Slaba dominantnost	Iskustvo ili rasuđivanje neznatno favorizuje jedan element u odnosu na drugi
5	Jaka dominantnost	Iskustvo ili rasuđivanje znatno favorizuje jedan element u odnosu na drugi
7	Demonstrirana dominantnost	Dominantnost jednog elementa potvrđena u praksi
9	Apsolutna dominantnost	Dominantnost najvišeg stepena
2,4,6,8	Međuvrijednosti	Potreban kompromis ili dalja podjela

**Tabela 2 Satijeva skala vrednovanja**

Vektor težina  $w_i$  se računa na osnovu vektora sopstvenih vrijednosti (Saaty T.L. , 1980), i data je jednačinom:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}^*}{n}, i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

Gdje je:  $n$  broj kriterijuma, a  $\sum_{j=1}^n a_{ij}^*$  normalizovana matrica

AHP je metoda koja ima sposobnost da identifikuje i analizira nekonzistentnost donosioca odluka u procesu rasuđivanja i vrednovanja elemenata hijerarhije. Indeks konzistentnosti CI je definisan jednačinom:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (16)$$

gdje je  $\lambda_{\max}$  maksimalna vrijednost matrice A (17), tj. Eigenvector, a  $n$  je broj kriterijuma ili alternativa koji se upoređuju. Indeks konzistentnosti se poredi sa (RI) za odgovarajuće  $n$  vrijednosti date u Tabeli 4. (Mateo J.R.S.C. , 2012), i dobija se odnos stepen konzistentnosti CR.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (17)$$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

**Tabela 3 RI za različite vrijednosti n**

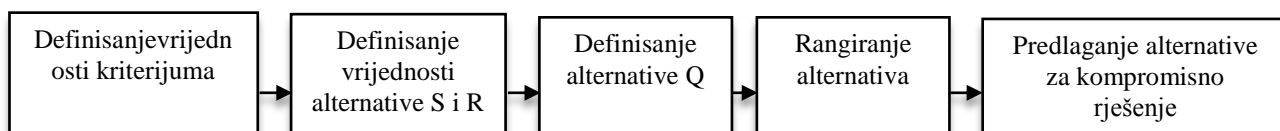
AHP ublažava problem nekonzistentnosti tako što odmjerava stepen nekonzistentnosti i o tome obavještava donosioca odluka. Ako je  $CI/RI \geq 0.10$ , postoji ozbiljna nekonzistentnost, rezultate bi trebalo ponovo analizirati i ustanoviti razloge nekonzistentnosti, ukloniti ih djelimičnim ponavljanjem poređenja u parovima, a ako ponavljanje procedure u nekoliko koraka ne dovede do sniženja stepena konzistentnosti do limita 0.10, sve rezultate treba odbaciti (Karlsson J., Wohlin C., Regnell B., 1998) i ponoviti ceo postupak od početka. Ako je  $CI/RI < 0.10$  stepen konzistentnosti je zadovoljavajući.

## 4. METODA ZA OPTIMIZACIJU ENERGETSKOG MIKSA

### 4.1 VIKOR-VIŠEKRITERIJUMSKO KOMPROMISNO RANGIRANJE

Opricović je 1979. godine u svojoj doktorskoj disertaciji prezentovao osnovne ideje VIKOR-a, a 1990. godine (Opricović S., 1990) se termin VIKOR pojavio kao skraćenica za VIŠEKRITERIJUMSKA OPTIMIZACIJA I KOMPROMISNO RANGIRANJE. Kompromisno rangiranje VIKOR-a prikazano Slikom 3. (Mateo J.R.S.C., 2012), ima pet koraka a  $n$  i  $m$  predstavljaju broj kriterijuma i alternativa.

Prvi korak je odrediti najbolje  $f_i^*$  i najgore  $f_i^-$  vrijednosti svih kriterija funkcija,  $i = 1, 2, \dots, n$



Slika 3 VIKOR metodologija

$$f_i^* = \max_j f_{ij} \quad f_i^- = \min_j f_{ij} \quad \text{ako } i\text{-ta funkcija predstavlja prihodovni atribut} \quad (18)$$

$$f_i^* = \min_j f_{ij} \quad , \quad f_i^- = \max_j f_{ij} \quad \text{ako } i\text{-ta funkcija predstavlja troškovni atribut} \quad (28)$$

U drugom koraku se izračunava vrijednost  $S_j, R_j$ , za  $j=1, 2, \dots, n$ ,

gdje su  $w_i$  težine kriterijuma, izražavajući sklonost donosioca odluke kao relativnu važnost kriterija

$$S_j = \sum_{i=1}^N w_i \left| \frac{f_i^+ - f_{ij}}{f_i^+ - f_i^-} \right| \quad (19)$$

$$R_j = \max_i \left( w_i \left| \frac{f_i^+ - f_{ij}}{f_i^+ - f_i^-} \right| \right) \quad (20)$$

U narednom koraku se definiše  $Q_j$ , za  $j=1, 2, \dots, n$ , slijedi:

$$Q_j = \nu \frac{(S_j - S^*)}{S^- - S^*} + (1 - \nu) \left( \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \right) \quad (21)$$

Gdje:

$$S^* = \min_j S_j, \quad S^- = \max_j S_j, \quad R^* = \min_j R_j \quad \text{i} \quad R^- = \max_j R_j \quad (22)$$

Koeficijent  $\nu$  je "strateški koeficijent" koji pripada intervalu  $[0, 1]$ , tamo gdje je vrijednost veća od 0,5 više se fokusira na zadovoljavanje većine kriterija, dok se za vrijednosti manje od 0,5 postavlja veći prioritet minimiziranja individualne razlike od idealnog rješenja (alternative).

Sljedeći korak je poredati alternative, razvrstavajući po vrijednostima  $S, R$  i  $Q$  u opadajućem redoslijedu. Posljednji korak je predlaganje za kompromisno rješenje alternativu  $F^{(1)}$  koja je najbolje rangirana mjerom  $Q$  (minimum) ako su ispunjena sljedeća dva uslova:

1. „Prihvatljiva prednost“:

$$Q(F^{(2)}) - Q(F^{(1)}) \geq DQ, \quad (23)$$

gdje je  $F^{(2)}$  alternativa s drugom pozicijom na rang listi prema  $Q$ , gdje je  $DQ = 1/(m-1)$ ), a  $m$  je broj alternativa.

2. „Prihvatljiva stabilnost u odlučivanju“:

Alternativa  $F^{(1)}$  takođe mora biti najbolje rangirana sa  $S$  ili / i  $R$ . Ovo kompromisno rješenje je stabilno u procesu donošenja odluka, što bi mogla biti strategija maksimalne korisnosti grupe (kada je potreban  $v > 0,5$ ), ili „prema konsenzusu“  $v \approx 0,5$ , ili „s vetom“ ( $v < 0,5$ ).  $v$  je težina strategije odlučivanja o maksimalnoj korisnosti u grupi. Ako jedan od uslova nije zadovoljen, predlaže se niz kompromisnih rješenja koja se sastoje se od:

- Alternativa  $F^{(1)}$  i  $F^{(2)}$  ako nije ispunjen samo uslov 2.
- Alternativa  $F^{(1)}, F^{(2)}, \dots, F^{(M)}$  ako nije ispunjen samo uslov 1.

$F^{(M)}$  je određen odnosom  $Q(F^{(M)}) - Q(F^{(1)}) < DQ$  za maksimalni  $M$  (pozicije ovih alternativa su "u neposrednoj blizini").

Nakon proračuna kriterijuma, njihovih težina i optimizacije, izračunava se procenat tehnologija ( $P$ ) na bazi vrijednosti ranga  $Q_i$  veličine pomoću sljedeće formule:

$$P = \frac{(1 - Q_i)}{(n - \sum_{i=1}^n Q_i)} \quad (24)$$

$i=1..j$ , je broj alternativa (lanaca snabdijevanja energijom, odnosno učesnika u energetsom miksu).

Na bazi MCDM, razvijeni su vlasiti modeli koji su se uspješno primjenjeni u energetsom sektoru, od vrlo specifičnih koji su se bavili analizom i optimizacijom bioenergetskih lanaca (Vaskovic i dr.2018), do sveobuhvatnih, koji su se bavili energetsom miksom cijelog jednog područja, od nivoa lokalne zajednice do nivoa regiona i države (M M Bosancic, P Gvero, S Vaskovic, 2017), (M M Bosancic, S Vaskovic, P Gvero, 2022). MCDM pristup je primjenjen na vlastitom matematičkom modelu (M M Bosancic, S Vaskovic, P Gvero, 2022), koji je kalibrisan na primjeru Danske, a uspješno iskorišćen za nalaženje optimalnog energetsom miksa za države (Dansku i BiH), kao i za gradove (Kopenhagen i Banja Luku), za tri godine (2015., 2035. i 2050.) i dva scenarija (wind i fosil scenario).

## ZAKLJUČAK

U ovom radu su prezentovane međusobno suprostavljene kategorije kriterijuma i pripadajući indikatori za opis i ocjenu energetsom sistema za proizvodnju električne i toplotne energije u državi/regionu/lokalnoj zajednici. To su tehničko/energetski, ekonomski, kriterijumi životne sredine, ali i stohastički parametri proizvodnje energije primjenjivi na nivou države/regionu/lokalne zajednice, koji su prilagođeni za višekriterijumsku optimizaciju. Ti kriterijumi se odnose na: ukupnu energetsom efikasnost proizvodnje energije, ukupnu eksergijska efikasnost proizvodnje energije, koeficijent

eksergijskog kvaliteta proizvodnje energije, specifični trošak ulaganja ukupno instalirani kapacitet proizvodnje energije, €/kW, specifična proizvodnja/distribucija kostofenergije u proizvodnji/distribuciji energije, po kWh energije, €/kWh, emisije CO<sub>2</sub> zbog potrošnje obnovljivih i neobnovljivih izvora energije za dobijanje 1 kWh energije, kg/kWh, faktor kapaciteta, tehnički/ekonomski vijek trajanja investicije/opreme i faktor skladištenja. U literaturi nisu pronađeni modeli koji su izračunavali istovremeno ove optimizacione kriterijume, što ovu vrstu pristupa čini jedinstvenom. Nabrojani parametri se mogu primijeniti i na matematički opis energetskog miksa bilo koje države/regiona i lokalne zajednice. Ovakav pristup daje univerzalnost primjene datog koncepta za proračun nabrojanih parametara. U radu su prikazani razvijeni univerzalni kriterijumi uz pomoću kojih se mogu opisati različiti energetski miksevi bilo gdje u vrlo obuhvatnom smislu potrebnom za optimizaciju sa jedne strane. Sa druge strane posmatrano, kompletna problematika određivanja optimalnog energetskog miksa prilagođena je višekriterijumskoj metodi VIKOR čije su prednosti iskorištene za određivanje optimalnog procenta učešća od pojedinih varijanti snabdijevanja energijom u miksu. U tom smislu, misli se na korišćenje ranga Q iz VIKOR metode za određivanje procenta učešća pojedinih komponenti miksa. Takođe, problematika određivanja težina kriterijuma energetskog miksa je jasno opisana uz pomoć EWM i AHP metode i u potpunosti prilagođena problemu optimizacije energetskog miksa.

Razvijeni matematički model je u stanju da vrednuje i vrši izbor optimalnog procenta tehnologija u generalnom smislu, što mu daje univerzalnost. Rezultati koji su dobijeni modeliranjem procesa kombinacije snabdijevanja energijom i optimizacionog koncepta, presudni su kod projektovanja i instalacije energetskih sistema za proizvodnju energije države/regiona/lokalne zajednice, što je vrlo djelotvorno pokazao i vlasiti model koji je uspješno tesiran na različitim nivoima od lokalne zajednice do nivoa države. Ovaj razvijeni matematički model i predloženi pristup je univerzalan i može da nađe praktičnu primjenu kao alat u donošenju adekvatnih strateških odluka o uspostavljanju savremenih sistema za energetske snabdjevanje, različitih veličina i struktura, naročito u periodu energetske tranzicije.

## REFERENCES

### *Journals*

- [2] Biswas P.P., Suganthan P.N., Qu B.Y., Amaratunga G. A.J. (2018). "Multiobjective economic-environmental power dispatch with stochastic wind-solar-small hydro power". Energy 150 1039e105.
- [3] Biswas, P. P., Suganthan P. N., Amaratunga A. (2017). "Optimal power flow solutions incorporating stochastic wind and solar power". Energy Conversion and Management 148 (2017): 1194-1207.

- [6] Kolios A., Mytilinou V., Lozano-Minguez E, Salonitis K. (2016). "A Comparative Study of Multiple-Criteria Decision-Making Methods under Stochastic Inputs". *Energies* 2016, 9, 566; doi:10.3390/en9070566.
- [8] Opricovic S., Tzeng G.H. . (2004). "Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS". *European Journal of Operational Research*.156(2): 445-455.
- [9] Opricovic S., Tzeng G.H., (2009). "Science Watch - talks with ScienceWatch.com and answers a few questions about this month's Emerging Research Front. Science Watch". (2009).Paper in the field of Economics & Business. <http://archive.sciencewatch.com/dr/erf/2009/09aprperf>.
- [15] Surender Reddy S., Bijwe P.R., Abhyankar A.R. (2015). "Real-time economic dispatch considering renewable power generation variability and uncertainty over scheduling period". *IEEE Systems journal* 9.4 (2015): 1440-1451.
- [17] Wang J., Jing Y., Zhang C., Zhao J. (2009). „Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision- making”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13(9):2263–78.
- [18] Wang J.J., Jing Y.Y., Zhang C.F., Shi G.H., Zhang X.T. . (2008). "A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system". *Energy Policy* 2008;36:3823–32.

#### Books

- [5] Karlsson J., Wohlin C., Regnell B. (1998). "An Evaluation of Methods for Prioritizing Software Requirements". *Information and Software Technology*, Vol. 39, No. 14-15, pp. 939-947.
- [7] Mateo J.R.S.C. . (2012). "Multi-Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry". Springer-Verlag: London, UK, 2012.
- [13] Saaty T.L. . (1980). „*The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation*“. McGraw-Hill: New York, NY, USA.
- [14] Shafiee M., Kolios A.J. . (2014). "A multi-criteria decision model to mitigate the operational risks of offshore wind infrastructures". In *Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2014, Wroclaw, Poland, 14–18 September 2014*; CRC Press/Bal.
- [19] Yu P.L. . (1973). "Multiple-Criteria Decision Making, Concepts, Techniques, and Extension.". Plenum Press, Lawrence, Kansas, 388.
- [20] Zeleny M. . (1982). "Multiple Criteria Decision Making". McGraw-Hill, New York.

#### Conference or symposium proceedings

- [10] Opricović S. (1990). "Programski paket VIKOR za višekriterijumsko kompromisno rangiranje". SYM-OP-IS '90, Jugoslovenski simpozijum o operacionim istraživanjima, Dubrovnik-Kupari, "Beograd: Naučna knjiga.
- [12] Saaty T.L. . (1978). "Modeling unstructured decision problems: a theory of analytical hierarchies". In: *Proceedings of the first international conference on mathematical modeling*. University of Missouri Rolla.
- [21] M M Bosancic, P Gvero, S Vaskovic. (2017). "Determination of optimal energy mix supply from renewable energy sources by using Multi-criteria optimization". May 2017 Conference: 13th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering At: Banja Luka.
- [22] M M Bosancic, S Vaskovic, P Gvero, . (2022). "Multi-Criteria Decision Modeling of the optimal Combination for Energy Supply Scenario: Test Model for Danish Energy Sector Data". *International Conference on Applied Sciences ICAS2022*, (p. 93). Banja Luka.

#### Thesis

- [11] Opricovic, S. (1998) *Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems*. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 302 p.

- [16] Vasković S. (2016). „Razvoj modela za ocjenu prihvatljivosti energetske lanaca pri proizvodnji energije i energenata iz biomase“. doktorska disertacija – Univerzitet u Istočnom Sarajevu Mašinski fakultet, UDK: 620.952(043.3), 620.95(043.3), 662.63.

*Reports*

- [1] Australian Government, Department of Environment and Energy. (2019). "NGA factors Australian National Greenhouse Accounts". Australian Government. Department of Environment and Energy.
- [4] Honorio L; Bartaire J; Bauerschmidt R; Ohman T; Tihany Z; Zeinhofer H; Scowcroft J; Vasco de Janerio, Kruger H; Meier H; Offermann D; Lnagnickel U. (2003). "Efficiency in electricity generation". Report drafted by Eurelectric „Preservation of resources“, working groups „Upstream“. Subgroup in collaboration with VGB.