

POJEDNOSTAVLJENI POSTUPAK ODABIRA OPTIMALNE VARIJANTE VODOOPSKRBNOG SUSTAVA POKRETANOG SOLARNOM FOTONAPONSKOM (FN) ENERGIJOM

SIMPLIFIED PROCEDURE OF SELECTION OF THE OPTIMUM VARIANT OF WATER SUPPLY SYSTEM POWERED BY SOLAR PHOTOVOLTAIC (PV) ENERGY

Bojan Đurin ^{1*}

¹ Sveučilište u Zagrebu, geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: bojan.djurin@gfv.hr

Sažetak: Rad prikazuje pojednostavljenu metodologiju odabira optimalne varijante vodoopskrbnog sustava, koji kao izvor energije koristi solarnu fotonaponsku (FN ili PV) energiju. Analizira se uobičajeni hibridni sustav koji se sastoji od solarnog fotonaponskog (FN ili PV) generatora i invertora, crpne stanice i vodospreme. Korištenjem Metode Kritičnog Perioda postiže se sustavna održivost takvog sustava. Pri tome se dobije pet, a po potrebi i više varijanti rješenja. Potrebno je uzeti u obzir činjenicu da je uz troškove, kao jednog od odlučujućih čimbenika, nužno razmotriti i ostale kriterije koji moraju biti zadovoljeni. To su u pravilu ekološki i socijalni kriteriji. Samim time, nameće se primjena višekriterijske metode, koja bi kod odabira i rangiranja dobivenih varijanti uzela u obzir sva tri navedena kriterija. Kao jedna od najprikladnijih višekriterijskih metoda odabrana je metoda PROMETHEE, koja će se primijeniti na primjeru vodoopskrbnog sustava naselja.

Ključne riječi: vodoopskrbni sustav, solarna fotonaponska energija, Metoda Kritičnog Perioda, višekriterijska analiza, PROMETHEE

Abstract: The paper presents a simplified methodology for selection of the optimal variant of the water supply system, which uses solar photovoltaic (FN or PV) energy as a source of energy. An usual hybrid system, which consists of a solar photovoltaic (FN or PV) generator and inverter, pumping station and water reservoir is analyzed. By using the Critical Period Method, a systemic sustainability of such a system is achieved. There are five, and if is required, several variants of the solution. It is necessary to take into account the fact that besides the costs, as one of the decisive factors, it is necessary to consider other criteria that must be satisfied. These are, generally, ecological and social criteria. Therefore, the application of the multi-criteria method will be applied, which would take into the account all three mentioned criteria during selection and ranking of the obtained variants. As one of the most appropriate multi-criteria methods, the PROMETHEE method was chosen, which will be applied on the example of a water supply system of the settlement.

Keywords: water supply system, solar photovoltaic energy, Critical Period Method, multicriteria analysis, PROMETHEE

Received: 08.11.2016. / Accepted: 18.6.2018.

Published online: 17.12.2018.

Pregledni rad / Review paper

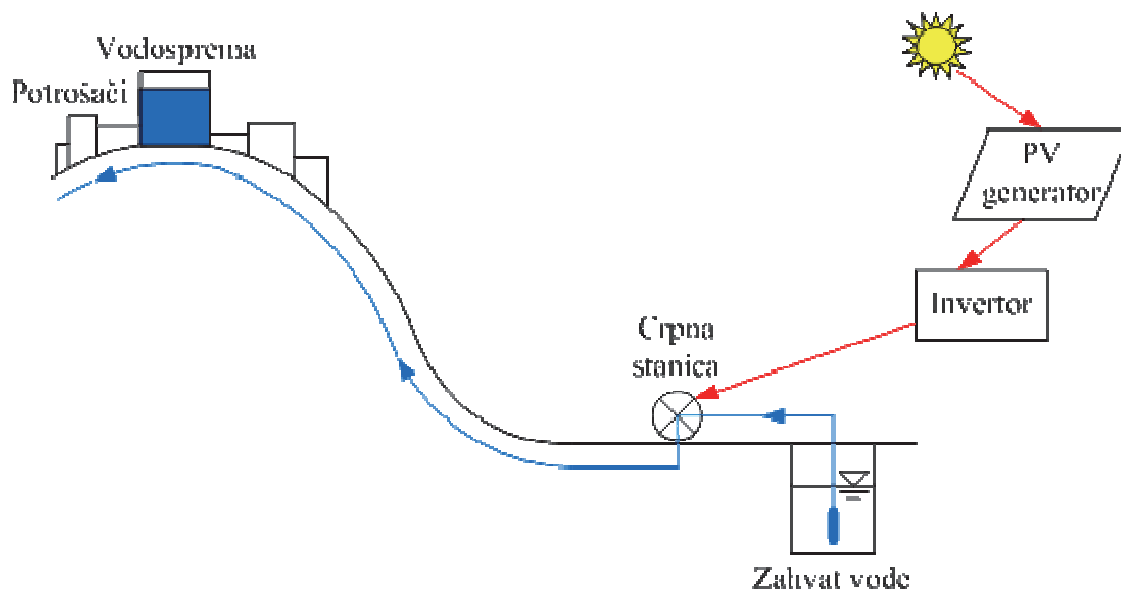
1. UVOD

Predmet analiziranja ovog rada je primjena višekriterijskih metoda u svrhu odabira optimalne varijante vodoopskrbnog sustava pokretanog solarnom fotonaponskom (FN ili PV) energijom. U tu svrhu koristit će se višekriterijske metode PROMETHEE uz korištenje programskog paketa Visual PROMETHEE 1.0 (Mareschal 2012). Analizira se hibridni sustav PV: PV generator i inverter-Vodosprema-Crpna stanica (Slika 1), Đurin i Margeta (2012). U ovom sustavu koristi se PV energija, koja se posredstvom PV generatora i invertora pretvara u električnu energiju. Crpna stanica koristi dobivenu električnu energiju za precrpljivanje vode u vodospremu, nakon čega se voda distribuira do potrošača.

Na osnovu analize provedene u Đurin i Margeta (2012) korištenjem Metode Kritičnog Perioda (MKP) dobiveno je pet varijanti rješenja tj. pet alternativa rješenja prikazanog hibridnog sustava za pet različitih perioda bilanciranja t_b ($t_b = 1, 2, 3, 4$ i 5 dana). Osim u odnosu na ekonomski kriterij (u ovom slučaju to je iznos životnog ciklusa troškova (LCC)), dobivene varijante razlikuju se u odnosu na ekološke i socijalne pokazatelje. Navedeni kriteriji nisu usporedivi na osnovu kvantitativnih pokazatelja. Zbog navedene činjenice potrebno je primijeniti višekriterijske metode. U ovom slučaju, odabir optimalne varijante rješenja izvršit će se primjenom višekriterijske metode PROMETHEE.

Razlika između uobičajenih metoda dimenzioniranja vodoopskrbnih sustava koji koriste PV energiju i MKP je u tome što se kod MKP svaki od podsustava dimenzionira s obzirom na kritični period svakoga od njih, pri

čemu se preko povezanosti između podsustava PV generator i podsustava Vodosprema definira potrebna snaga PV generatora, nakon toga veličina volumena vodospreme te na kraju snaga crpne stanice. Navedeno se određuje s obzirom na periode bilanciranja t_b . Oni predstavljaju vremenski period unutar kojega se radi ujednačavanje dotoka i potrošnje vode, odnosno proizvedene i potrebne energije. Zbog opsega i namjene ovog rada, ova metoda se neće dalje objašnjavati, pri čemu se detalji i detaljna objašnjenja mogu naći u Đurin i Margeta (2012).



Slika 1. Hibridni sustav PV generator-vodosprema-crpna stanica

Kod uobičajenih metoda dimenzioniranja u većini slučajeva rade se osrednjavanja ulaznih podataka, a naročito jakosti Sunčevog zračenja, kao što je to primjerice opisano u (Ebaid et al. 2013 i Escudero-Pascual 2005). Tu se koristi metoda tzv. "najgoreg mjeseca". Pri tome se uzima u obzir srednja mjesečna jakost Sunčevog zračenja. Pristup "najgoreg mjeseca u godini" podrazumijeva dimenzioniranje podsustava "PV generator" tako da on ima dovoljnu potrebnu snagu da može zadovoljiti najveću mjesečnu potrebu za električnom energijom tijekom promatrane godine, ali potrebno je uzeti u obzir da se dimenzioniranje radi s obzirom na mjesec u kojem je prosječna mjesečna jakost Sunčevog zračenja najmanja tijekom te godine. Ovakvim načinom dimenzioniranja ide se na stranu sigurnosti uz izvjesno osrednjavanje rezultata, no prema Escudero-Pascual, 2005. to olakšava postupak dimenzioniranja ovakvih sustava.

Hamidat & Benyoucef (2009) opisuju mogući postupak dimenzioniranja vodoopskrbnog sustava koji se sastoji od podsustava "PV generator i invertor", podsustava "Crpna stanica" i podsustava "Vodosprema", ali za pojednostavljenu i nerealnu shemu potrošnje vode u naselju. Naime, on dimenzionira sustav uz pretpostavku da se voda kontinuirano troši 24 sata ili da se kontinuirano troši u periodu od 6 sati pa do 21 sat, što nije stvarna situacija. Navedena metoda MKP otklanja ove nedostatke i povećava pouzdanost rada takvih sustava.

Višekriterijske metode puno se koriste kod odabira i rangiranja dobivenih varijantnih rješenja, pri čemu je metoda PROMETHEE jedna od najčešće korištenih, bez obzira da li se radi o lokalnim vodoopskrbnim sustavima ili o većim vodoopskrbnim sustavima, koji koriste PV energiju kao glavni izvor energije ili jedan od izvora energije (Andreopoulou et al. 2017; Cavallaro 2013; Kolios et al. 2016) i mnogi drugi).

2. METODOLOGIJA

Višekriterijska analiza je matematički alat donošenja odluka koji omogućuje usporedbu različitih alternativa ili scenarija prema različitim kriterijima (često proturječnim), koji donositelja odluke usmjeravaju prema ispravnom odabiru odluke. Višekriterijska analiza provodi se korištenjem višekriterijskih metoda Roy (1996). Višekriterijske metode omogućavaju postavljanje različitih opcija i definiranje njihovog odnosa sa različitim kriterijima, što u konačnici zahtijeva određenu procjenu. Višekriterijske metode međusobno se razlikuju u načinu obrade ulaznih podataka. Najčešće se radi o definiranju sustava relativnih težina za različite kriterije. Glavni zadatak višekriterijskih metoda je rješavanje problema koje donositelji odluka imaju kod obrade velike količine složenih informacija s težnjom dosljednosti i sistematičnosti. Višekriterijske metode primjenjuju se kod određivanja pojedinačne željene opcije, kod rangiranja opcija, kod smanjenja broja opcija za naknadne analize, odnosno za razlikovanje prihvatljivog rješenja od neprihvatljivog, Department for Communities and Local Government (2009).

U najopćenitijem slučaju, promatra se jednokriterijski problem (Mladineo 2009):

$$\text{Max}\{f(a), a \in A\} \quad (1)$$

gdje su:

A skup mogućih akcija (alternativa), dok je $f: A \rightarrow R_1$ kriterij koji razlikuje te akcije. Rješenje ovog problema je totalni poredak u skupu A . Višekriterijski problem definira se kao (Mladineo 2009):

$$\text{Max}\{f_1(a), \dots, f_j(a), \dots, f_k(a), a \in A\} \quad (2)$$

pri čemu je $f_j(a)$, $j = 1, 2, \dots, k$, gdje je k broj kriterija. U ovom slučaju ne može se dobiti rješenje u obliku totalnog poretka u skupa A . Međutim, ovakvi (višekriterijski) problemi mogu se riješiti. Neka su a i b dvije akcije iz skupa A tako da vrijedi $f_j(a) \geq f_j(b), \forall j \in (1, 2, \dots, k)$, pri čemu je barem jedna nejednakost stroga. Tada vrijedi da a dominira nad b . Na taj se način dobiva parcijalni poredak u A (tranzitivna relacija) koji se zove poredak dominacije. Pretpostavi se da su akcije iz A ponovo čvorovi grafa, luk (ab) postoji ako a dominira nad b te se tako dobiva graf dominacije (usmjeren graf).

Postoje različite podjele višekriterijskih metoda. Uzevši u obzir problematiku analiziranu u ovom radu, prikazat će se podjela prema Lai (2008) na elementarne metode, pojedinačni kriterijski pristup, metode "višeg ranga", metoda cilja ili referentne točke i teoriju "Fuzzy" skupa. Metoda PROMETHEE i njezin program, tj. prateći alat ili programska podrška za „vizualnu analizu“ rezultata GAIA pripadaju u skupinu metoda "višeg ranga". U ovom radu metoda PROMETHEE primijeniti će se na odabir optimalnog rješenja prikazanog hibridnog sustava. Opravdanost navedenih višekriterijskih metoda vidljiva je u prikladnosti i prilagodljivosti primjene na opisanu problematiku odabira optimalne varijante analiziranog hibridnog sustava, kao i u mogućnosti informatičke (softverske) podrške imajući u vidu programski paket Visual PROMETHEE 1.0.

2.1. Metoda PROMETHEE

Ova metoda koristi princip "višeg ranga" u svrhu rangiranja alternativa u kombinaciji s jednostavnošću uporabe i smanjenja složenosti. Drugim riječima, izvršava se paralelna usporedba alternativa u svrhu njihovog rangiranja u odnosu na broj kriterija (Lai 2008).

Za metodu PROMETHEE karakteristična su slijedeća tri segmenta:

- Obuhvat kriterija: Oblikovanje preferencija donositelja odluke bit će modificirano na način da će se za svaki kriterij promatrati šest mogućih obuhvata (funkcija preferencije) zasnovanih na intenzitetu preferencije. Neke od njih dopuštaju netranzitivnost i indiferencije, dok druge nude blagi prijelaz iz indiferencije u strogu preferenciju.

- Procijenjena relacija "višeg ranga": Upotreba kriterija definiranih na način kao što je definirano u prethodnoj točki dozvoljava konstrukciju procijenjene relacije "višeg ranga". Ova relacija biti će manje osjetljiva na male promjene parametara i njena interpretacija će biti jednostavna.

- Korištenje relacije "višeg ranga": Pod ovim pojmom razmatrat će se specifično korištenje procijenjene relacije "višeg ranga", naročito u slučaju kada akcije moraju biti rangirane od najbolje do najgore. Metoda PROMETHEE I omogućava djelomično rangiranje akcija. Potpuno rangiranje dobije se pomoću metode PROMETHEE II.

Obuhvat kriterija temelji se na uvođenju funkcije preferencije, koja daje preferenciju donositelja odluke za akciju a u odnosu na akciju b . Ova će funkcija biti definirana za svaki kriterij posebno; njena će se vrijednost kretati između 0 i 1. Što je manja vrijednost funkcije, veća je indiferencija donositelja odluke; što je ta vrijednost bliže 1, veća je njegova preferencija. U slučaju stroge preferencije, vrijednost funkcije preferencije biti će jednaka 1 (Mladineo 2009).

Neka je f određeni kriterij, a a i b dvije akcije (alternative) iz skupa akcija A . Pridružena funkcija preferencije $P(a, b)$ od a u odnosu na b bit će definirana kao:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ako je } f(a) \leq f(b) \\ p[f(a), f(b)] & \text{ako je } f(a) > f(b) \end{cases} \quad (3)$$

Za konkretne slučajeve potrebno je izabrati funkcije p tipa:

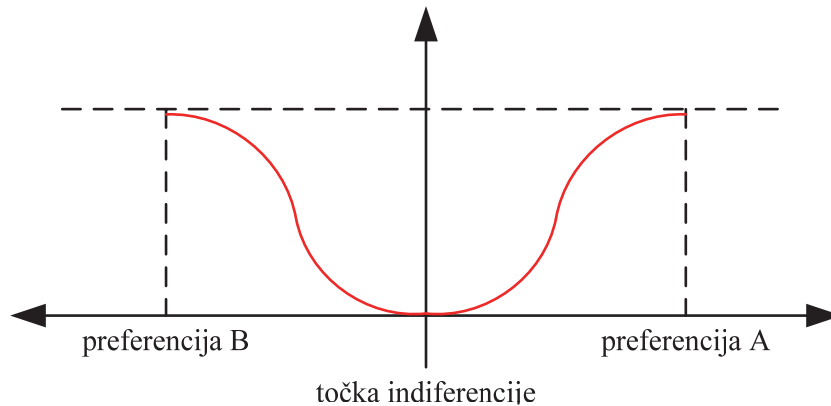
$$p[f(a), f(b)] = p[f(a) - f(b)] \quad (4)$$

kod kojih je p u ovisnosti o razlici između vrijednosti $f(a)$ i $f(b)$. Područja indiferencije d u okolini $f(b)$ definira se preko:

$$d = f(a) - f(b) \quad (5)$$

Izraz (6) predočava funkciju $H(d)$ (Slika 2):

$$H(d) = \begin{cases} P(a,b), & \text{ako je } d \geq 0 \\ P(a,b), & \text{ako je } d \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Slika 2. Prikaz funkcije $H(d)$

Prema Mladineo (2009), Brans et al. (1986) i Mareschal (2012), definirano je šest kriterija:

1. Običan kriterij: Kod ovog kriterija nema praga (parametra) za donošenje odluke. Ovaj kriterij ekvivalentan je postupku optimizacije - što je veća vrijednost to je bolje za odabir pripadne varijante. Navedeni postupak je mjerodavan kod kriterija sa jako malo različitih procjena. Ovo je česti slučaj kod kvalitativnih kriterija.
2. Kvazi kriterij ("U" oblik funkcije preferencije p): Kod ovog kriterija prag (parametar) za donošenje odluke je q . Kod ovog kriterija uvodi se značaj praga (parametra) ili točke indiferencije.
3. Kriterij s linearnom preferencijom ("V" oblik funkcije preferencije p): Kod ovog kriterija prag (parametar) za donošenje odluke je p . "V" oblik funkcije preferencije je posebni slučaj kriterija 5 gdje je $q = 0$. Kriterij 3 pogodan je u onim slučajevima gdje je potrebno uzeti u obzir i najmanje odstupanje.
4. Kriterij razina: Kod ovog kriterija pragovi (parametri) za donošenje odluke su p i q . Ova funkcija preferencije pogodnija je kod kvalitativnih kriterija gdje donositelj odluke želi postaviti stupanj preferencije u odnosu na odstupanje između razina usvajanja.
5. Kriterij s linearnom funkcijom preferencije i područjem indiferencije: Kod ovog kriterija pragovi (parametri) za donošenje odluke su p i q . Linearna funkcija preferencije je najbolji slučaj za kvantitativni kriterij gdje je q u skladu sa preferencijama (željama).
6. Gaussov kriterij: Kod ovog kriterija prag (parametar) za donošenje odluke je σ . Gaussova funkcija preferencije je zamjena za linearnu funkciju (kriterij 5). Ova funkcija ima zaглаđeniji oblik, no u ovom slučaju teže ju je postaviti budući da se Gaussova funkcija oslanja na σ koja se nalazi između q i p i koja ima manje očitiju (vidljiviju) interpretaciju. Ova funkcija rijetko se koristi.

Idući korak je procjena relacije "višeg ranga". Za svaki par akcija $a, b \in A$, prvo se definira višekriterijski indeks preferencije za a u odnosu na b za sve kriterije. Pretpostavlja se da je svaki kriterij identificiran kao jedan od razmotrenih tipova kriterija, tako da su funkcije preferencije $P_j(a, b)$ definirane za svaki $j = 1, 2, \dots, k$. Višekriterijski indeks preferencije $\Pi(a, b)$ definiran je slijedećim izrazom:

$$\Pi(a, b) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k P_j(a, b) \quad (7)$$

gdje je k broj kriterija.

Ako se pretpostavi da se funkcije preferencije $P_j(a, b)$ i ponderi (težine) kriterija W_j specificiraju za svaki kriterij $j=1, \dots, k$, tada se za $\forall a, b \in A$ višekriterijski indeks preferencije $\Pi(a, b)$ definira kao:

$$\Pi(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^k W_j P_j(a, b)}{\sum_{j=1}^k W_j} \quad (8)$$

gdje je W_j ponder (težina) kriterija.

Ako donositelj odluke želi rangirati akcije iz A od najbolje do najlošije, to je onda problem rangiranja. Ako donositelj odluke mora izabrati najbolje akcije iz A , govori se o problemu izbora. Budući da kod višekriterijskog problema općenito nema najboljeg rješenja, problem će se sastojati od određivanja skupa dobrih akcija iz A . U tu svrhu upotrijebit će se dvije tehnike rješavanja problema rangiranja, pri čemu se rangiranjem može dobiti i skup dobrih akcija kao rješenje problema izbora. To su metoda PROMETHEE odnosno metoda PROMETHEE I i metoda PROMETHEE II. Kod metode PROMETHEE I radi se o rangiranju akcija djelomičnim poretkom. Ako se definira procijenjena relacija "višeg ranga", za svaki čvor a , na osnovu višekriterijskog indeksa preferencije za svaki $a \in A$ dobiju se slijedeći tokovi:

- Izlazni tok:

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \Pi(a, x) \quad (9)$$

- Ulazni tok:

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \Pi(x, a) \quad (10)$$

Što je veći izlazni tok, to a više dominira nad ostalim akcijama iz A ; što je manji ulazni tok, to manje akcija dominira nad a . Neke akcije će biti usporedive, a neke neusporedive tako da metoda PROMETHEE I dajedjelomične relacije odnosno procijenjenu relaciju "višeg ranga" koji donositelju odluke daje značajneinformacije o odnosima među akcijama.

Kod metode PROMETHEE II radi se o rangiranju akcija potpunim poretkom (potpuno rangiranje bez neusporedivosti). Za svaku akciju $a \in A$ promatra se rezultirajući (netto) tok:

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (11)$$

koji se koristi u rangiranju akcija:

- a ima viši rang od b ($aP^{(2)}b$) akko $\Phi(a) > \Phi(b)$;
- a je indiferentno b ($aI^{(2)}b$) akko $\Phi(a) = \Phi(b)$.

U metodi PROMETHEE II definirana je potpuna relacija kod koje su sve akcije iz A potpuno rangirane, uz napomenu da se kod ove relacije gubi dio informacija zbog balansirajućih efekata između izlaznog i ulaznog toka što rezultira većim stupnjem apstrakcije (Mladineo 2009).

2.2. Program GAIA

Program GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) daje geometrijsku prezentaciju rezultata metode PROMETHEE, odnosno metoda PROMETHEE I i PROMETHEE II. Ideja na kojoj se zasniva program je svođenje višedimenzionalnog problema na dvodimenzionalni kako bi se omogućila ravninska prezentacija. Dimenzija višekriterijske analize određena je brojem kriterija (svaki kriterij određuje jedanvektor u takvom prostoru) i ukoliko se želi vjerodostojna geometrijska prezentacija, problem je potrebno svesti u dvodimenzionalni prikaz (eventualni trodimenzionalna prikaz bio binepregledan). Pri ovom smanjivanju dimenzije nužan je izvjestan gubitak informacija osamom problemu. Da bi ovaj gubitak bio što manji, ravnina u kojoj se daje geometrijskaprezentacija određena je dvama najvećim svojstvenim vrijednostima kovarijacijske matrice. Pritome program daje podatak o postotku informacije kojeg takav prikaz daje. Osim pri izuzetnonepovoljnoj strukturi problema, geometrijska prezentacija daje dovoljno visok postotak informacija za analiziranje problema. Također je moguće povezati metodu GAIA s metodom PROMETHEE II. PROMETHEE Izahtijeva da se svakom kriteriju pridruži određeni ponder (težina) W_j i definira kompletni poredak u skupu A .

Ponderi (težine) također se mogu prikazati u (u, v) ravnini pomoću tzv. vektora odluke, kojisu usmjereni u smjeru najbolje rangiranih aktivnosti. Na taj je način moguće interaktivnim mijenjanjem pondera promatrati promjene ranga dobivenemetodom PROMETHEE II. Opisanim načinom izbora ravnine za geometrijsku prezentaciju višekriterijskog problema postižese minimalni gubitak informacije (u smislu metode najmanjih kvadrata), što znači da se (uz nužneizvjesne gubitke pri smanjenju dimenzije problema) čuvaju i "međusobni odnosi" kriterija, kao iznačaj svakog kriterija u odnosu na ostale. Konfliktni kriteriji će u ovakvoj prezentaciji imati bitno različiti smjer (mala kovarijanca među kriterijima uzrokuje i malu vrijednost skalarnog produkta vektora koji ih prezentiraju), a međusobno suglasni kriteriji prezentirani su vektorima bliskog smjera. Značaj kriterija za donošenje odluke geometrijski je reprezentiran duljinom vektora, tako dadominirajućim kriterijima odgovaraju i vektori veće apsolutne vrijednosti. Zbrajanjem vektora koji prezentiraju kriterije, dolazi se do sumarnog vektora čiji smjer i iznos opisuju rezultatno djelovanje kriterija. Ukoliko je sumarni vektor kriterija male apsolutne vrijednosti u odnosu na sumarni vektor drugog pojedinog kriterija, navedenoupućuje na

zaključak o konfliktnosti kriterija. Načelno se zaključuje da geometrijska prezentacija višekriterijske analize predstavlja vrlo snažan "alat" i značajnu pomoć kod problema koje karakteriziraju djelomično ili potpuno konfliktni kriteriji, što je nažalost sve prisutnije u procesima odlučivanja (Mladineo 2009).

3. REZULTATI DOBIVENI PROVEDENOM ANALIZOM

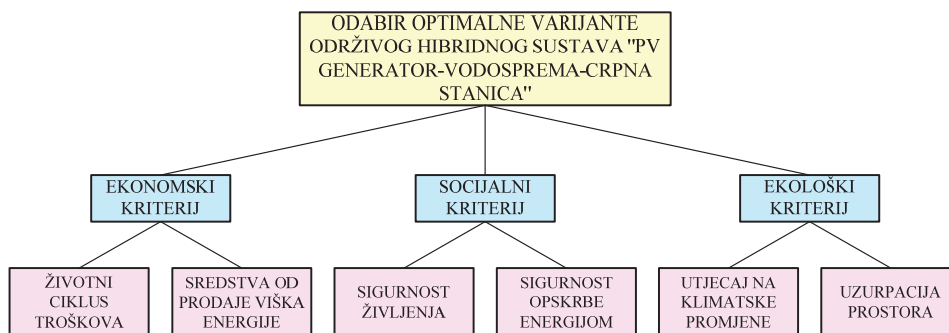
3.1. Definiranje ulaznih parametara

Analizom održivosti hibridnog sustava PV generator-vodosprema-crpna stanica (Slika 1.) dobivene su veličine snage PV generatora P_{el} , veličina volumena vodospreme V te kapacitet crpne stanice Q_{PS} za različite dnevne periode bilanciranja t_b (Đurin i Margeta 2012). Pri tome je izvršena jednokriterijska analiza na osnovu ekonomskih pokazatelja tj. veličine životnog ciklusa troškova LCC . Na osnovu prikazane analize dobiveno je pet varijanti (Tablica 1).

Tablica 1. Veličine životnog ciklusa troškova LCC za svaku varijantu

Redni broj varijante	Period bilanciranja t_b [dani]	LCC [€]
1	1	3573619
2	2	2826835
3	3	2841040
4	4	2939387
5	5	2930098

Iz **Tablice 1** vidljivo je da je na osnovi Ekonomskog kriterija varijanta broj 2 najprihvatljivija budući da je za nju iznos LCC -a najmanji u odnosu na preostale varijante. Međutim, analiza dobivenih varijanti rješenja iz (Đurin i Margeta 2012) nije potpuna. Potrebno je uzeti u obzir i ekološke pokazatelje kao i socijalne pokazatelje kako bi sustavna održivost dobivenih varijanti rješenja bila zadovoljena. Vidljivo je da će biti potrebno primijeniti višekriterijske metode budući da će u ovom postupku biti potrebno definirati, a nakon toga usporediti i rangirati tri kriterija od kojih će svaki imati svoje podkriterije (**Slika 3**).



Slika 3. Hijerarhijska struktura ciljeva

Na slici 3. vidljivo je da su definirana tri glavna kriterija - Ekonomski, Socijalni i Ekološki kriterij, od kojih svaki ima po dva podkriterija. Ekonomski kriterij definiran je kvantitativno, dok su Socijalni i Ekološki kriteriji definirani kvalitativno. U nastavku će se detaljno prikazati opis svakog od navedenih podkriterija.

- Životni ciklus troškova (LCC)

Nastoji se da ovi troškovi budu što manji. Ovaj podkriterij opisan je kvantitativno preko veličine LCC -a u Eurima [€] za svaku varijantu (**Tablica 1**). U ovom slučaju koristit će se kriterij s linearnom preferencijom ("V" oblik funkcije preferencije p), odnosno kriterij 3.

- Sredstva od prodaje viška energije

Nastoji se da ova veličina bude što veća. Ova sredstva su definirana na način da se razlika između snage PV generatora P_{el} i snage crpne stanice P_{PS} pomnoži sa prosječnim godišnjim brojem sati sijanja Sunca, a nakon toga i sa iznosom tarifne stavke od 2.1 kn/kWh (Vlada Republike Hrvatske 2015). U ovom slučaju koristit će se kriterij s linearnom preferencijom ("V" oblik funkcije preferencije p), odnosno kriterij 3. Veličina sredstava od prodaje viška energije tijekom godine za svaku varijantu prikazana je u **Tablici 2**.

Tablica 2. Veličina sredstava od prodaje viška energije za svaku varijantu

Redni broj varijante	Sredstva od prodaje viška energije [€/god]
1	297802
2	203053
3	205838
4	212140
5	205691

Iz **Tablice 2** vidljivo je da je varijanta 1 najpovoljnija, dok je varijanta 2 najnepovoljnija.

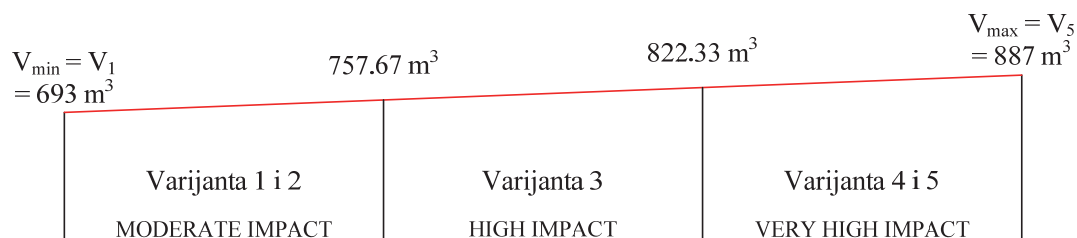
- Sigurnost življenja

Nastoji se da ova veličina bude što veća. Ovaj pod kriterij opisan je kvalitativno korištenjem veličine potrebnog volumena vodospreme V (**Tablica 3**), koji je, prema [Đurin i Margeta \(2012\)](#), najznačajniji čimbenik koji utječe na kontinuitet i sigurnost opskrbe vodom stanovništva. Što je volumen vodospreme V veći, to je sigurnost življenja veća.

Tablica 3. Veličina potrebnog volumena vodospreme V za svaku varijantu

Redni broj varijante	Potrebni volumen vodospreme V [m ³]
1	693
2	750
3	821
4	861
5	887

Iz **Tablice 3** vidljivo je da je varijanta 5 najpovoljnija, dok je varijanta 1 najnepovoljnija. U ovom slučaju koristiti će se kriterij razina, odnosno kriterij 4. Prikaz kvalitativnog opisa ovog kriterija vidljiv je na **Slici 4**.



Slika 4. Prikaz kvalitativnog opisa kriterija razina za sigurnost življenja

U svrhu što objektivnijeg definiranja kvalitativnog mjerila, napravljena je linearna podjela pojedine varijante u odnosu na najveći odnosno na najmanji potrebni volumen vodospreme V . Budući da svaki proračunati volumen vodospreme V osigurava kontinuitet i sigurnost opskrbe vodom, najniža kvalitativna ocjena je "moderate", dok je najviša ocjena "very high".

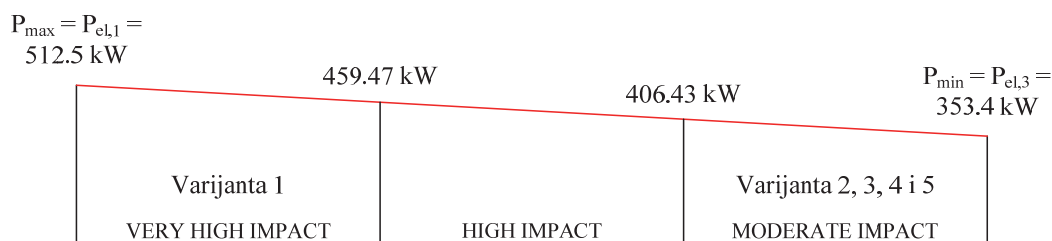
- Sigurnost opskrbe energijom

Ovaj kriterij opisan je kvalitativno korištenjem veličine potrebne snage PV generatora P_{el} (**Tablica 4**), [Đurin i Margeta \(2012\)](#). Što je potrebna snaga PV generatora veća, to je i sigurnost opskrbe energijom veća.

Tablica 4. Veličina potrebne snage PV generatora P_{el} za svaku varijantu

Redni broj varijante	Potrebna snaga PV generatora P_{el} [kW]
1	512.5
2	361.6
3	353.4
4	363.5
5	355.7

Iz **Tablice 4** vidljivo je da je varijanta 1 najpovoljnija, dok je varijanta 3 najnepovoljnija. U ovom slučaju koristit će se kriterij razina, odnosno kriterij 4. Prikaz kvalitativnog opisa ovog kriterija vidljiv je na **Slici 5**.



Slika 5. Prikaz kvalitativnog opisa kriterija razina za sigurnost opskrbe energijom

U svrhu što objektivnijeg definiranja kvalitativnog mjerila, ovdje je također napravljena linearna podjela pojedine varijante u odnosu na najveću odnosno na najmanju potrebnu snagu PV generatora P_{el} . Budući da svaka proračunata snaga PV generatora P_{el} osigurava kontinuitet i sigurnost opskrbe vodom, najniža kvalitativna ocjena je "moderate", dok je najviša ocjena "very high".

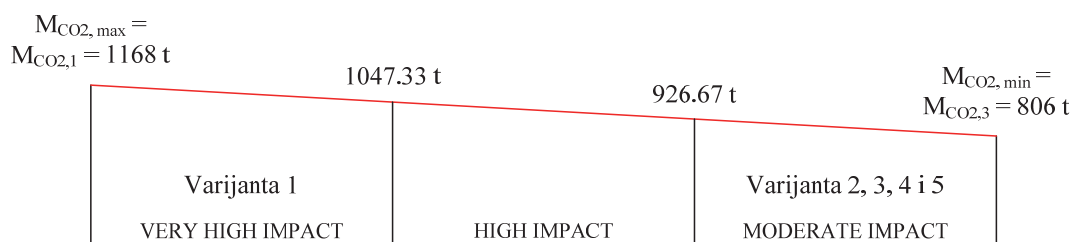
- Utjecaj na klimatske promjene

Ovaj kriterij opisan je kvalitativno korištenjem veličine ukupne mase ugljičnog dioksida M_{CO_2} (Glasnović & Margeta 2012) koja bi se smanjila u slučaju korištenja solarne fotonaponske (PV) energije u odnosu na klasičnu energiju (energiju iz konvencionalnih izvora). (Tablica 5), Đurin i Margeta (2012). Što je veličina ukupne mase ugljičnog dioksida M_{CO_2} (koja bi se smanjila u slučaju korištenja solarne fotonaponske (PV) energije u odnosu na klasičnu energiju) veća, to je utjecaj na klimatske promjene povoljniji (IPCC 2013). U ovom slučaju koristit će se kriterij razina, odnosno kriterij 4.

Tablica 5. Veličina ukupne mase ugljičnog dioksida M_{CO_2} za svaku varijantu

Redni broj varijante	Ukupna masa ugljičnog dioksida M_{CO_2} [t]
1	1168
2	824
3	806
4	829
5	811

Iz **Tablice 5** vidljivo je da je varijanta 1 najpovoljnija, dok je varijanta 3 najnepovoljnija. Prikaz kvalitativnog opisa ovog kriterija vidljiv je na slici 6.



Slika 6. Prikaz kvalitativnog opisa kriterija razina za utjecaj na klimatske promjene

U svrhu što objektivnijeg definiranja kvalitativnog mjerila, ovdje je također napravljena linearna podjela pojedine varijante u odnosu na najveću odnosno na najmanju ukupnu masu ugljičnog dioksida M_{CO_2} , koja bi se smanjila u slučaju korištenja solarne fotonaponske (PV) energije u odnosu na klasičnu energiju. Najniža kvalitativna ocjena je "moderate", dok je najviša ocjena "very high".

- Uzurpacija prostora

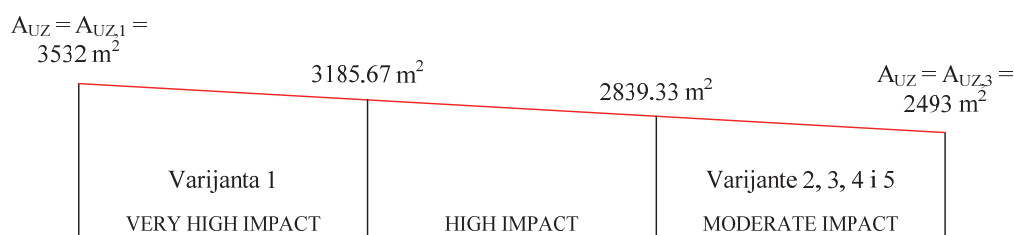
Ovaj kriterij opisan je kvalitativno korištenjem veličine tlocrtna površine solarnih PV panela A_{PV} [m²] i tlocrtna površine vodospreme A_V [m²], odnosno njihove ukupne sume A_{UZ} [m²]. Tlocrtna površina crpne stanice zanemariva je u odnosu na tlocrtna površine solarnih PV panela i vodospreme; okolne površine koje pripadaju solarnim PV panelima i vodospremi također nisu uzimane u obzir jer u konačnici također ne utječe na krajnji ishod analize. Ukupna površina solarnih panela A_{PV} dobivena je iz Đurin i Margeta (2012). Tlocrtna površina vodospreme A_V također je dobivena iz Đurin i Margeta (2012) odnosno iz **Tablice 3** na način da je volumen

vodospreme V podijeljen sa maksimalnom dubinom vode u vodospremi, koja u pravilu prema Margeta (2010) iznosi 6 m. Navedene veličine prikazane su u **Tablici 6**. Što je ukupna površina uzurpacije A_{UZ} veća, to je ekološki utjecaj od strane ovog podkriterija nepovoljniji. U ovom slučaju koristit će se kriterij razina, odnosno kriterij 4.

Tablica 6. Veličine ukupne tlocrtnne površine solarnih PV panela i vodospreme A_{UZ}

Redni broj varijante	Ukupna površina uzurpacije A_{UZ} [m ²]
1	3532
2	2536
3	2493
4	2567
5	2519

Iz **Tablice 6** vidljivo je da je varijanta 3 najpovoljnija, dok je varijanta 1 najnepovoljnija. Prikaz kvalitativnog opisa kriterija razina vidljiv je na **Slici 7**.



Slika 7. Prikaz kvalitativnog opisa kriterija razina za uzurpaciju prostora

3.2. Analiza rezultata dobivenih korištenjem programskog paketa Visual PROMETHEE 1.0

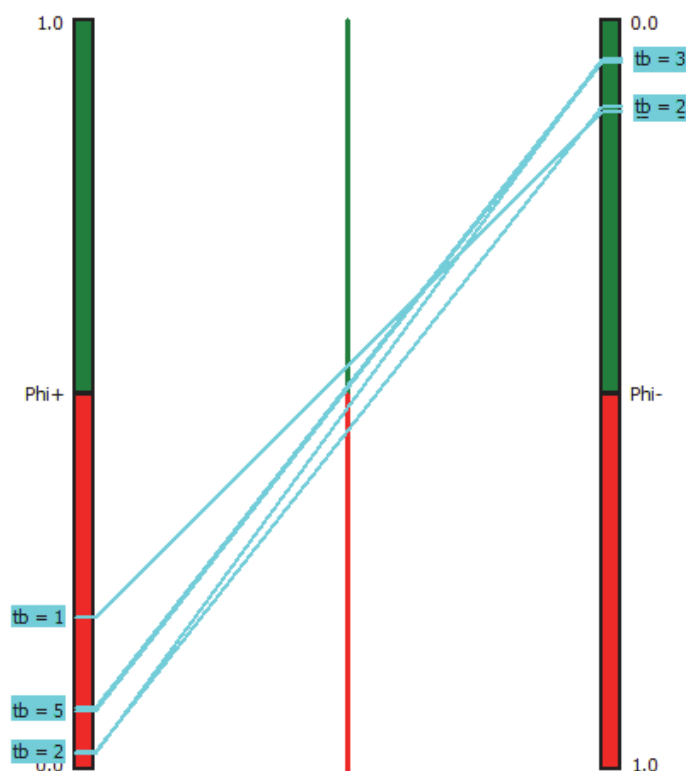
Ulazni podaci, kao i ostale veličine potrebne za provođenje višekriterijske analize prikazane su na **Slici 8**.

	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
	scenario1	Troškovi (LCC)	Sigurnost živ...	Utjecaj na kli...	Zarada sred...	Sigurnost op...	Uzurpacija p...
Unit	€	Utjecaj	Utjecaj	€	Utjecaj	Utjecaj	
Cluster/Group	◆	■	●	◆	■	●	
Preferences							
Min/Max	min	max	max	max	max	min	
Weight	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Preference Fn.	V-shape	Level	Level	V-shape	Level	Level	
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	
- Q: Indifference	n/a	1.00	0.50	n/a	1.00	0.50	
- P: Preference	2826835	2.50	2.50	297802	2.50	1.00	
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	
Statistics							
Minimum	2826835	3.00	3.00	203053	3.00	3.00	
Maximum	3573619	5.00	5.00	297802	5.00	5.00	
Average	3022196	4.00	3.40	224905	3.40	3.40	
Standard Dev.	279424	0.89	0.80	36571	0.80	0.80	
Evaluations							
<input checked="" type="checkbox"/> tb = 1	3573619	moderate	very high	297802	very high	very high	
<input checked="" type="checkbox"/> tb = 2	2826835	moderate	moderate	203053	moderate	moderate	
<input checked="" type="checkbox"/> tb = 3	2841040	high	moderate	205838	moderate	moderate	
<input checked="" type="checkbox"/> tb = 4	2939387	very high	moderate	212140	moderate	moderate	
<input checked="" type="checkbox"/> tb = 5	2930098	very high	moderate	205691	moderate	moderate	

Slika 8. Prikaz ulaznih podataka i ostalih veličina potrebnih za provođenje višekriterijske analize

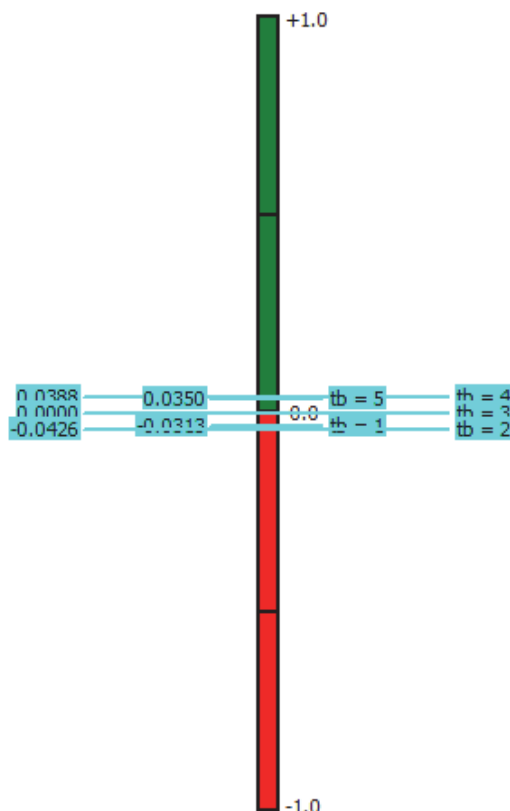
Kod Ekonomskog kriterija vrijednost parametra p postavljena je na poželjnu vrijednost s obzirom na svaku od pet varijanti. U ovom slučaju to je najniža vrijednost LCC -a (najniži troškovi) odnosno najviša vrijednost zarade od prodaje viška energije. Kod Socijalnog i Ekološkog kriterija vrijednost parametra q postavljena je na procijenjenu vrijednost koja se počinje uzimati u obzir, dok je vrijednost parametra p postavljena na poželjnu vrijednost koja se očekuje. Također su proračunati i prikazani statistički parametri (minimalna i maksimalna vrijednost, prosječna vrijednost te standardno odstupanje) za svaki kriterij odnosno za svaku varijantu. Crveno i zeleno naznačene vrijednosti predstavljaju ekstremne vrijednosti (najmanju i najveću vrijednost) ovisno od vrste preferencije koja se traži (minimum ili maksimum). Ponderi (težine) su postavljeni na vrijednost 1.00 u svrhu ujednačenosti kriterija odnosno u svrhu otklanjanja subjektivnosti ove analize.

Na **Slici 9** prikazan je dobiven redosljed (rangiranje) svake varijante metodom PROMETHEE I.



Slika 9. Dobiveni redosljed (rangiranje) svake varijante metodom PROMETHEE I

Lijevi stupac odgovara vrijednostima Φ^+ , desni stupac vrijednostima Φ^- , dok srednji stupac odgovara vrijednostima Φ . Prema (9) i (10) izvršeno je parcijalno rangiranje varijanti. Varijanta 4 nalazi se iznad svih varijanti odnosno dominira nad svim varijantama, što znači da je ona najbolje rangirana. Varijante 2 i 3, kao i varijante 4 i 5 rangirane su jedna uz drugu, što znači da se neznatno razlikuju jedna od druge. Varijanta 1 nije usporediva s ostalim varijantama i obratno jer se dužina koja spaja vrijednosti Φ^+ i Φ^- za varijantu 1 sječe sa dužinama koje spajaju vrijednosti Φ^+ i Φ^- za ostale varijante. S obzirom na vrijednosti Φ^+ i Φ^- dobiven je vizualni prikaz koji nije najzorniji za analizu, stoga je u vrijednosti Φ^+ i Φ^- vidljiv iz Slike 10. Na **Slici 10** prikazan je dobiven redosljed (rangiranje) svake varijante metodom PROMETHEE II. Gornji dio stupca odgovara vrijednostima Φ^+ , dok donji dio odgovara vrijednostima Φ^- .



Slika 10. Dobiveni redosljed (rangiranje) svake varijante metodom PROMETHEE II

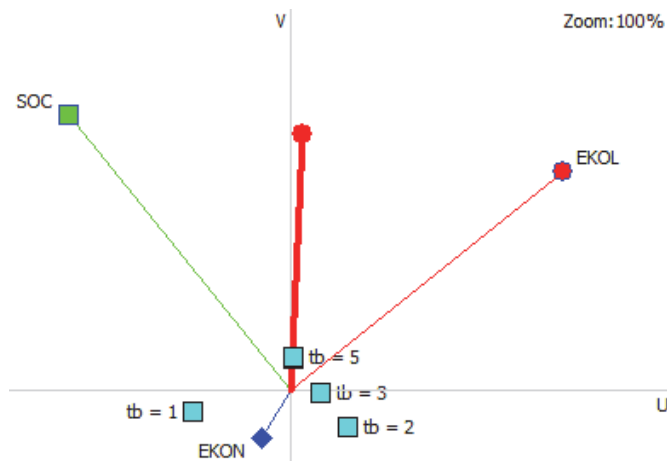
Prema (11) izvršeno je potpuno rangiranje varijanti, pri čemu je vidljivo da je varijanta 4 najbolje rangirana u odnosu na ostale varijante (ima najveću vrijednost veličine Φ), pri čemu ju slijede varijante 5, 3, 1 i 2. Varijanta 3 ima vrijednost veličine Φ vrlo blizu nule, što znači da je ona prosječna varijanta po rangiranju. Iz Slika 9 i 10 vidljivo je da metoda PROMETHEE I omogućava pojedinačnu usporedbu svake pojedine varijante sa ostalim varijantama. Time je ujedno omogućeno da donositelj procjene obrati pažnju na varijante koje su na osnovi (ne)usporedivosti problematične. Metoda PROMETHEE II to ne omogućava, no ona je lakša za analiziranje u odnosu na metodu PROMETHEE I.

Na Slici 11 prikazana su rangiranja i pripadne vrijednosti Φ^+ , Φ^- , te Φ za sve varijante.

	Action	Phi	Phi+	Phi-
1	tb = 4	0.0388	0.0957	0.0569
2	tb = 5	0.0350	0.0933	0.0583
3	tb = 3	0.0000	0.0556	0.0556
4	tb = 1	-0.0313	0.2177	0.2490
5	tb = 2	-0.0426	0.0561	0.0986

Slika 11. Rangiranja i pripadne vrijednosti Φ^+ , Φ^- , te Φ za sve varijante.

Slika 11 je u stvari tablični prikaz rezultata dobivenih metodama PROMETHEE I i PROMETHEE II. Ovaj prikaz je prikladan i pregledan, naročito u slučaju velikog broja kriterija i varijanti. Rezultati analize dobiveni metodama PROMETHEE I i PROMETHEE II mogu se geometrijski prezentirati programom GAIA (Slika 12).



Slika 12. Rezultati provedene analize geometrijski prezentirani metodom GAIA

Sa Slike 12 vidljivo je da su generirane tri dimenzije/komponente:

- u je prva osnovna komponenta, koja sadrži najveću moguću količinu informacija;
- v je druga osnovna komponenta, koja omogućava najviše dodatnih informacija okomito u odnosu na u ;
- w je treća osnovna komponenta, koja omogućava najviše dodatnih informacija okomito na u i v .

Pojedine varijante označene su točkama (odnosno analognim oznakama kao i u samom prikazu dobivenom u metodi PROMETHEE), kriteriji su označeni osima (odnosno analognim oznakama kao i u samom prikazu dobivenom u metodi PROMETHEE), dok su ponderi (težine) označene osima odluke (komponentama u , v i w). Najveća moguća količina informacija označena je u donjem desnom uglu i iznosi 100 %, što znači da se u ovoj analizi provedenoj programom GAIA obuhvaćen maksimum mogućih informacija. Vektor odluke naznačen je debelom crvenom linijom sa ispunjenim krugom. Rangiranje pojedine varijante definira se na način da se na vektor odluke povuče okomica iz točke koja definira pojedinu varijantu. Što je pojedina varijanta bliže u odnosu na smjer kojega definira vrh vektora odluke, to je ona bolje rangirana. Sa Slike 12 vidljivo je da je varijanta 4 najbolje rangirana, slijedi ju varijanta 5, 3, 1 i 2. Varijante 4 i 5 se poklapaju, no na osnovi analize metodom PROMETHEE vidljivo je da je varijanta 4 najbolje rangirana. Varijante koje su slične nalaze su bliže jedna drugoj i obratno. Kod kriterija koji su slični jedan drugome, osi su im usmjerene u istom smjeru (u ovom slučaju nema takvih osi tj. nema takvih kriterija) i obratno. Kriteriji koji su izrazito kontradiktorni jedan drugome nalaze se u suprotnim smjerovima (također u ovom slučaju nema takvih kriterija). Duljina osi pojedinog kriterija izražava značajnost ("jačinu") pojedinog kriterija; što je dulja os, kriterij je značajniji. Navedeno ukazuje na kriterije na koje je potrebno obratiti pažnju. U ovom slučaju vidljivo je da su Socijalni i Ekološki kriterij dominantni u odnosu na Ekonomski kriterij, stoga bi eventualno trebalo smanjiti težine (pondere) Socijalnog i Ekološkog kriterija, odnosno povećati težine (pondere) Ekonomskog kriterija. Navedena odluka ovisi o cilju i namjeni višekriterijske analize, o preferenciji donositelja odluke kao i o mogućim scenarijima koji se razmatraju.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu napravljena je višekriterijska analiza pet različitih varijanti za pet različitih perioda bilanciranja t_b ($t_b = 1, 2, 3, 4$ i 5 dana) korištenjem višekriterijskih metoda u svrhu odabira optimalne varijante vodoopskrbnog sustava pokretanog solarnom fotonaponskom (PV) energijom. Rezultati dobiveni ovom analizom pokazali su da je varijanta 4 optimalna, odnosno najbolje rangirana. Slijede ju varijante 5, 3, 1 i u konačnici varijanta 2 kao najslabije rangirana. Vidljivo je da se optimalni rezultat višekriterijske analize (u ovom slučaju varijanta 4) ne poklapa sa optimalnim rezultatom dobivenim jednokriterijskom analizom odnosno rangiranjem na osnovi samo Ekonomskog kriterija tj. veličine životnog ciklusa troškova LCC-a, gdje je varijanta 2 optimalna. Dobiveni rezultati pokazuju da višekriterijska analiza upotpunjuje jednokriterijsku analizu. Također je i u drugim slučajevima moguće da višekriterijska analiza potvrdi ili odbaci rezultate dobivene jednokriterijskom analizom. Na osnovu ove analize, vidljivo je da se inženjerska problematika mora sagledati sa šireg stajališta. Drugim riječima, uz jednokriterijsku analizu troškova (financijsku tj. ekonomsku analizu) potrebno je problem analizirati i sa strane drugih kriterija (stajališta). U ovom primjeru jednokriterijska analiza dopunjena je sa analizom Socijalnog i Ekološkog kriterija (stajališta). Naročitu pažnju potrebno je obratiti na definiranje težina (pondera) te u raspon i način vrednovanja pojedinog kriterija, što se kasnije odražava i na vrednovanje pojedine varijante. Višekriterijska analiza napravljena je korištenjem višekriterijske metode PROMETHEE (PROMETHEE I i PROMETHEE II), pri čemu je korišten programski paket Visual PROMETHEE 1.0. Dobiveni rezultati prikazani su grafički, što ovaj programski paket čini vrlo prihvatljivim za korištenje, prikaz i analizu dobivenih rezultata. Za izradu ovog rada nisu korištene sve mogućnosti programskog

paketa Visual PROMETHEE, budućida njihovo korištenje prelazi njegovu veličinu i namjenu. U dogledno vrijeme očekuju se i nove nadogradnje mogućnosti i opcija spomenutog programskog paketa. Za očekivati je da će preostale mogućnosti programskog paketa Visual PROMETHEE 1.0, kao i proširenja kriterija odnosno dopune i proširenja same višekriterijske analize biti korištene u daljnjim znanstvenim istraživanjima, Navedena znanja i spoznaje uvelike će doprinosti rješavanju i razumijevanju problematike održivih gradova odnosno problematike korištenja obnovljivih izvora energije ("Green energy").

6. LITERATURA

Andreopoulou, Z., Koliouka, C., Galariotis, E., Zopounidis, C., 2017. Renewable energy sources: Using PROMETHEE II for ranking websites to support market opportunities. *Technological Forecasting and Social Change*. 131, 31-37.

Brans J.P., Vincke Ph., Mareschal B. (1986). How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method, *European Journal of Operations Research*, 24(2):228-238.

Cavallaro, F. (2013). *Assessment and Simulation Tools for Sustainable Energy Systems: Theory and applications*, Springer-Verlag, London, Velika Britanija.

Department for Communities and Local Government. (2009). *Multi-criteria analysis: a manual*, Communities and Local Government Publications, Wetherby, Velika Britanija.

Đurin B., Margeta J. (2012). Concept of green energy supply for urban water system, *Zbornik radova "International Conference on Green Technology & Ecosystems for Global Sustainable Development 2012 (ICGTEC 2012)"*, Tuzla, Bosna i Hercegovina.

Ebaid, M. S. Y., Qandil, H., Hammad, M., (2013). A unified approach for designing a photovoltaic solar system for the underground water pumping well-34 at Disi aquifer. *Energy Conversion and Management*, 75, 780-795.

Escudero-Pascual, A., (2005). Sizing of standalone PV systems based on the "worst month" method, u: *Manual de Energía Solar Fotovoltaica y Cooperación al Desarrollo*, 1998. Engineering without Borders, Madrid, Španjolska.

Glasnović Z., Margeta J. (2011). Vision of total renewable electricity scenario, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4): 1873-1884.

Hamidat, A., Benyoucef, B., (2009). Systematic procedures for sizing photovoltaic pumping system, using water tank storage. *Energy Policy*, 37(4), 1489-1501.

IPCC. (2013). *IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2013 (AR4)*, Ženeva, Švicarska.

Kolios, A., Mytilinou, V., Lozano-Minguez, E., Salonitis, K. (2016). A Comparative Study of Multiple-Criteria Decision-Making Methods under Stochastic Inputs, *Energies*, 9, 566.

Lai E., Lundie S., Ashbolt N.J. (2008). Review of multi-criteria decision-aid for integrated sustainability assessment of urban water systems, *Urban Water Journal*, 5(4):315-327.

Mareschal B. 2012. *Visual PROMETHEE 1.0 Manual*, Brisel, Belgija.

Margeta, J. (2010). *Vodoopskrba naselja: planiranje, projektiranje, upravljanje, obrada vode*, Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, Hrvatska.

Mladineo, N. (2009). *Podrška izvođenju i odlučivanju u graditeljstvu*(manuskript za internu uporabu), Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, Hrvatska.

Roy B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Nizozemska.

Vlada Republike Hrvatske. (2015). *Tarifni sustav za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije*, Zagreb, Hrvatska.