

KARAKTERISTIKE KONCEPTA POBOLJŠANJA RADA VODOOPSKRBNOG SUSTAVA ZASNOVANOG NA KORIŠTENJU SOLARNE FOTONAPONSKE ENERGIJE

Bojan Đurin¹

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: U radu se opisuje primjena solarne fotonaponske energije za opskrbu vodom urbanih vodnih sustava. Predloženi koncept temelji se na čistim i obnovljivim izvorima energije kao što je solarne energija. Rad sustava temelji se na solarnoj energiji koja je besplatna i široko dostupna. U ovom radu solarni fotonaponski sustavi su primijenjeni za proizvodnju "zelene" električne energije. Zbog važnosti za održivost vodoopskrbe urbanog područja i zbog značajnih potrošača energije, čija cijena raste svaki dan, alternativno rješenje za energetske sustave traži se u obliku vodoopskrbnih sustava koji koriste solarne fotonaponske generatore. To je sustav čiji je rad definiran nizom čimbenika kao što su: klima, tlo, hidrološki podaci, potrebe za vodom itd. Taj sustav mora biti analiziran i optimiziran primjenom sustavnog pristupa. U ovom radu prezentirati će se osnovne karakteristike sustava koji se sastoji od solarnih fotonaponskih generatora, crpne stanice i vodospreme, te glavni hidraulički i energetski odnosi između tih elemenata. Metodologija za analizu i projektiranje sustava, kao i ekonomski čimbenici također će biti prikazani.

Ključne riječi: solarni fotonaponski generator; vodoopskrba; ekonomski čimbenici; optimizacija; sustavna održivost

Abstract: This paper describes the application of a solar photovoltaic energy for urban water supply. Proposed concept is based on the clean and renewable energy sources, as it is solar energy. Operation of the system is based on solar energy which is free and widely available. In this paper, solar photovoltaic systems have been applied for green electric energy production. Due to the importance of water supply for urban area sustainability, and due to a significant energy consumer whose price is increasing each day, alternative solution to power systems are sought in the form of water supply systems which uses solar photovoltaic generator. It is a system, whose operation is defined by a range of factors such as: climate, soil, hydrological data, water demand etc. It has to be analyzed and optimized with the application of a systematic approach. In this paper, basic characteristics of the system consist of solar photovoltaic generator, pump station and water supply service reservoir and main hydraulic and energy relationship between his elements will be presented. The methodology for the system analysis and design as well as economical factors will be also presented.

Keywords: solar photovoltaic generator; water supply; economical factors; optimization; sustainability

Received: 14.10.2016 / Accepted: 23.06.2017

Published online: 21.07.2017

Pregledni rad / Review paper

1. UVOD

Urbani vodni sustavi (UVS) su prirodni, modificirani i od strane ljudi izgrađeni elementi kruženja urbanih voda, koji se mogu naći u gradovima. Vodne komunalne usluge su funkcije koje pruža izgrađeni sustav infrastruktura vodoopskrbe, odvodnje otpadne vode i odvodnje oborinske vode (Slika 1), (Margeta 2011).

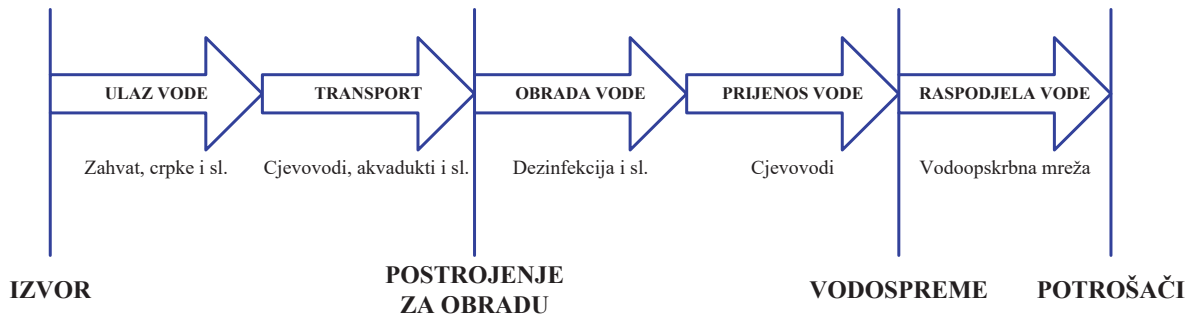
Postojeće stanje u mnogim područjima u svijetu zahtijeva pomak od postojećeg linearnog trenda u eksploataciji resursa na održivo upravljanje urbanim vodama, koje će biti dio stalnog kretanja u sklopu postizanja "održivih gradova". Upravljanje urbanim vodama treba pridonijeti cilju održivog urbanog razvoja, uključujući i resurse poput vode, energije i dr. (Margeta, 2011)

Potrošnja energije i vode u gradovima općenito je usklađena sa satnom i dnevnom insolacijom (Slika 2) (Margeta 2011; DHMZ 2007). To znači da korištenje solarne fotonaponske energije iz FN generatora za vodoopskrbu može dovesti do učinkovitog i prihvatljivog rješenja.

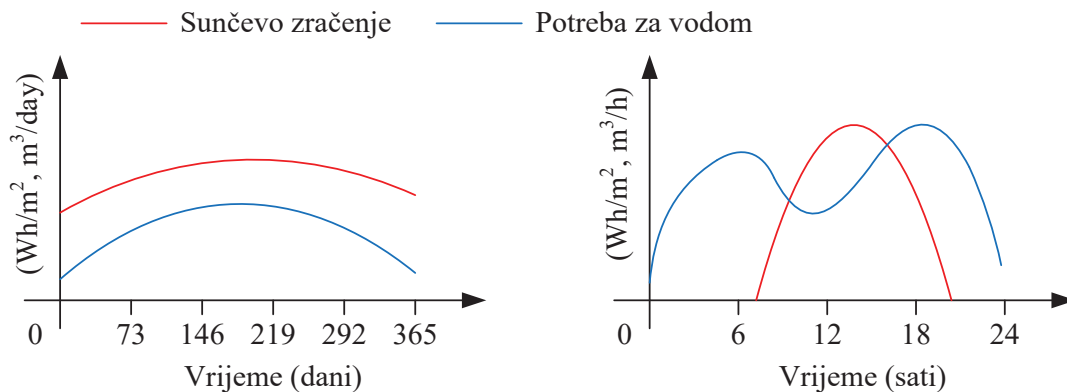
Različiti povremeni obnovljivi izvori energije (OIE) (vjetar, solarne toplinska (ST) energija, solarne fotonaponska (FN) energija) će imati različite produktivnosti i proizvodnje energije (Glasnović i Margeta

2011; Patel 1999). Ulazna solarne energija je redovita svaki dan, ali s različitim zračenjem i trajanjem insolacije. Ulaz solarne energije u većem dijelu dana podudara se s dinamikom življenja u gradovima, a time i s potrebama za vodom, što je posebice naglašeno u gradovima male i srednje veličine (Slika 2). Solarni fotonaponski proces samostalno i bez buke proizvodi energiju, budući da nema nikakvih pokretnih dijelova. To znači da korištenje Sunčeve energije omogućava široku uporabu solarnog fotonaponskog postrojenja za dovod električne energije u vodoopskrbni sustav.

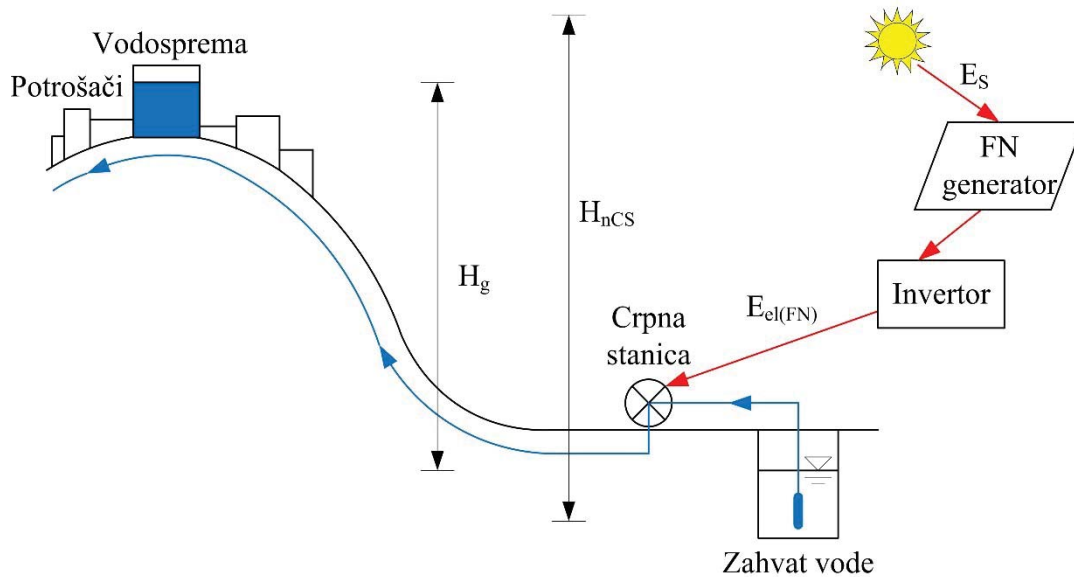
Korištenje solarne energije za crpljenje vode je već obrađivano u literaturi (Bakelli et al. 2011; Ghoneim 2006 i Margeta 2011). U stvari, korištenje solarnih FN generatora za crpne sustave već je neko vrijeme predmet istraživanja (Glasnović 2007; Kenna & Gillett 1985). Međutim, danas ne postoje značajne publikacije vezane uz hibridni sustav "FN generator-crpna stanica-vodosprema", koji je analiziran u ovom znanstvenom radu. Ovakav sustav može funkcionirati kao samostalni sustav kod kojeg je opskrba vodom osigurana potrebnim volumenom vodospreme. Ovaj rad je više orijentiran na prikaz sustavne održivosti analiziranog sustava.



Slika 1. Tipični elementi vodoopskrbnog sustava



Slika 2. Odnosi između raspoložive solarne energije i potreba za vodom



Slika 3. Koncept kontinuirane opskrbe energijom vodoopskrbnog sustava

2. METODOLOGIJA

2.1. KONCEPT HIBRIDNOG SUSTAVA "FN GENERATOR-CRPNA STANICA-VODOSPREMA"

Koncept hibridnog sustava "FN generator-crpna stanica-vodosprema" (Slika 3) koristi FN postrojenje koje zajedno s vodosprenom i crpnom stanicom osigurava kontinuirani dotok vode stanovništvu. Tijekom dana

solarna energija se prvenstveno koristi za opskrbu energijom glavne crpne stanice koja vodu crpi u vodospremu, a sve u skladu s dostupnim dnevnim sunčevim zračenjem. Voda iz vodospreme koristi se u skladu s potrebama potrošača. Vodosprema treba biti projektirana tako da ima dovoljan kapacitet za ravnotežu između precrpljene vode i potrebe za vodom. FN postrojenje treba imati dovoljnu snagu za opskrbu crpne stanice električnom energijom u cijelom planskom razdoblju.

Prikazani energetski sustav "obnovljivi izvor energije-crpna stanica-vodosprema" ili FN-CS-V sastoji se od tri glavna dijela:

- FN generator i inverter (FN);
- Crpna stanica (CS);
- Vodosprema (V).

To je tehnološki sustav koji se može promatrati kao otvoreni sustav u kojem je masi vode dozvoljeno ući i izaći. Masa vode koja ulazi u sustav zamjenjuje jednaku količinu mase vode koja izlazi.

Sunčevo zračenje koristi se za proizvodnju električne energije $E_{el, FN(i)}$ (kWh) (Margeta & Glasnović 2011):

$$E_{el, FN(i)} = i \cdot P_{el(i)} = E_{S(i)} \cdot \eta_{FN} \cdot A_{FN} \quad (1)$$

gdje je i vremenski interval proračuna, $P_{el(i)}$ je izlazna snaga iz FN sustava (W) (koji ima površinu solarnih ćelija A_{FN} (m²)) kao prosječna vrijednost kada je ukupno Sunčevo zračenje $E_{S(i)}$ (kWh/m²) u periodu i okomito na površinu solarnih ćelija A_{FN} . η_{FN} je ukupna učinkovitost FN sustava. Ta energija se pretvara u rad crpke koja omogućava dovoljan tlak da se voda sa potrebnom protokom kreće kroz sustav.

Volumen vodospreme V određuje se na osnovi procjene ravnoteže ulaza vode kojeg generira solarna energija i planiranih izlaza vode generiranih od strane potrošača (Margeta 2011). Na taj način, volumen vodospreme znatno utječe na veličinu/snagu FN postrojenja P_{el} i obrnuto.

2.2. BILANCA VODE I ENERGIJE

Prema (Fontane & Margeta 1988) te prema Slici 1, jednačba za stanje sustava za vodospremu može se izraziti na slijedeći način:

$$V_{(i)} = V_{(i-1)} + V_{CS(i)} - V_{OV(i)} - V_{gub(i)} \quad (2)$$

gdje prirast i preuzima vrijednost $i = 1$ do n (n je ukupan broj vremenskih faza, npr. dana ili sati), $V_{(i-1)}$ i $V_{(i)}$ su volumeni vodospreme u $(i-1)$ i i -tom vremenskom razdoblju odnosno (m³); $V_{CS(i)}$ je voda crpljena korištenjem FN postrojenja u i -tom razdoblju (m³); $V_{OV(i)}$ je voda ispuštena iz vodospreme prema potrošačima i $V_{gub(i)}$ su gubici vodospreme u i -tom razdoblju (m³). Jednačba stanja sustava uključuje najvažnije varijable vodne bilance. Vodosprema za opskrbu vodom grada je zatvorena i vodonepropusna. Dakle, veličina $V_{gub(i)}$ jednaka je 0 za sve praktične svrhe. Veličina $V_{OV(i)}$ je potreba za vodom tijekom dana i općenito je poznata i propisana u procesu projektiranja sustava. Voda crpljena posredstvom FN postrojenja $V_{CS(i)}$ je rezultat raspoložive solarne energije i stoga je promjenjiva s obzirom na solarnu energiju.

FN postrojenje, nominalne snage $P_{el(i)}$, formira stacionarno polje FN kolektora međusobno spojenih serijski i paralelno, kako bi se dobio potrebni napon i jakost struje. Inverteri su potrebni kako bi FN postrojenje davalo izmjeničnu struju (Rashid 2001). Snaga FN generatora $P_{el(i)}$ koristi se za precrcpljivanje vode $V_{CS(i)}$ u

spremnik, uzimajući u obzir manometarsku visinu H_{nCS} . Učinkovitosti invertera i crpke je η_{CSI} , temperaturni koeficijent FN ćelije je α_c (°C⁻¹), T_{cel} je temperature FN ćelije i jednaka je $2.7 \cdot E_S + T_a$, T_a je srednja dnevna temperatura zraka, dok je T_0 temperatura solarne ćelije u standardnim testnim uvjetima (25 °C) u skladu s dostupnom solarnom energijom, $E_{S(i)}$ (Kenna & Gillet 1985):

$$P_{el(i)} = \frac{2.72 H_{nCS}}{[1 - \alpha_c (T_{cel} - T_0)] \eta_{CSI} \eta_S} \frac{V_{CS(i)}}{E_{S(i)}} \quad (3)$$

Iz jednačbe (3) mogući volumen vode $V_{CS(i)}$ (m³) koja se crpi u vremenskom periodu i u vodospremu je:

$$V_{CS(i)} = P_{el(i)} \frac{[1 - \alpha_c (T_{cel} - T_0)] \eta_{CSI} \eta_S}{2.72 H_{nCS}} E_{S(i)} \quad (4)$$

Prosječni kapacitet crpne stanice $Q_{CS(i)}$ u razdoblju i je:

$$Q_{CS(i)} = \frac{V_{CS(i)}}{T_{S(i)}} = \frac{P_{el(i)}}{T_{S(i)}} \frac{[1 - \alpha_c (T_{cel} - T_0)] \eta_{CSI} \eta_S}{2.72 H_{nCS}} E_{S(i)} \quad (5)$$

gdje je $T_{S(i)}$ prosječni broj sati Sunčevog zračenja u jednom danu i .

Ukoliko se sva raspoloživa energija (iz dana u dan) koristi za crpljenje vode u rezervoar, tada je kapacitet crpne stanice Q_{CS} :

$$Q_{CS} \geq \max Q_{CS(i)} ; i=1, \dots, t \quad (6)$$

gdje je t broj dana korištenih za planiranje/projektiranje sustava.

2.3. ALGORITAM RAZVOJA SISTEMA

Opći cilj definiranja sustava je pronalaženje dovoljne snage postrojenja FN postrojenja, koja će na najbolji mogući način zadovoljiti sve potrebe potrošača za vodu s minimalnim troškovima konstrukcije i rada sustava "obnovljivi izvor energije-crpna stanica-vodosprema" ili OIE-CS-V. Međutim, (ulazna) solarna energija je besplatna.

Postoje različiti mogući pristupi rješavanju problema u skladu s ciljevima analize, odnosno fazama rješenja. Rješavanje problema uglavnom se provodi u sljedećim koracima:

- Prikupljanje svih potrebnih podataka za procjenu potrošnje vode u planskom periodu;
- Prikupljanje klimatskih i svih ostalih potrebnih podataka za projektiranje solarnog fotonaponskog FN postrojenja;
- Odabir broja dana za bilancu vode u sustavu i period projektiranja odnosno za definiranje nekoliko varijanti za projektiranje sustava; $t_b = 1$ do 5 dana tj. varijante od 1 do 5;
- Odabir kritičnog perioda t^* iz raspoloživih vremenskih serija E_S u skladu s odabranim periodom bilanciranja;

- Potrebna snaga FN generatora P_{el} se određuje prema odabranom kritičnom dnevnom periodu bilanciranja t_b ;

- Za odabranu snagu FN generatora P_{el} i za vrijeme njegovog rada tijekom dana, određuje se potrebni volumen vodospreme V ;

- Potrebni volumen vodospreme V određuje se za svaki dan u godini (kritični period) shodno potrebnim količinama vode i raspoloživom dotoku vode. Mjerodavni je najveći volumen;

- Kapacitet Q_{CS} glavne crpne stanice je definiran na način da se odredi potrebni kapacitet crpne stanice za svaki dan u godini (kritični period) i pripadno trajanje insolacije. Rezultat je potrebni kapacitet crpne stanice za satno izravnjanje. Mjerodavni je najveći kapacitet;

- Višekriterijska analiza varijanti (različite konfiguracije) i rangiranje varijanti rješenja: snaga FN generatora P_{el} , volumen vodospreme V i kapacitet glavne crpne stanice Q_{CS} .

Ulazni podaci: Glavni ulazni podaci za analizu su: klimatski podaci, konfiguracija vodoopskrbnog sustava (ulazni podaci, crpna stanica, vodosprema) te potrošnja vode kao i odstupanja potrošnje. Osim tih podataka, potrebno je utvrditi ograničenja vezana uz izgradnju FN generatora, crpne stanica i vodospreme, kao i pravne, ekološke, socijalne i druge zahtjeve.

Na početku analize potrebno je definirati satnu i dnevnu količinu vode u naselju prema karakteristikama naselja, te režim potrošnje vode tijekom godine u planskom periodu. To su količine koje se moraju crpiti svaki dan u vodospremu korištenjem FN generatora.

Dimenzioniranje FN generatora: Potrebna snaga FN generatora mora osigurati dovoljno energije u skladu sa dnevnim režimom insolacije i drugim klimatskim značajkama, tako da se u razdoblju rada FN generatora, potrebna dnevna količina vode crpi u vodospremu tijekom cijele godine. Ovaj postupak je jednostavan, jer je odnos između P_{el} i V linearan.

Na osnovu odabrane/proračunate početne vrijednosti $P_{el(i)}$ i $V_{CS(i)}$, (jednadžbe (3) i (4)), minimalna potrebna snaga FN generatora P_{el}^* određena je iz utvrđene razlike:

$$\Delta V_t = V_{CS,t} - V_{dnevno,t} ; t = 1, \dots, 365, \quad (7)$$

gdje je $V_{dnevno,t} (Q_{dnevno,t})$ dnevna potreba za vodom.

Kritični dan t^* određen je iz dnevne minimalne razlike:

$$\min \Delta V_t \Rightarrow t^* \quad (8)$$

Dakle, to je dan kod kojeg je odnos između hidrauličke i Sunčeve energije (E_H/E_S) maksimalan.

Određivanje minimalnog potrebnog volumena vodospreme: Potrebni volumen vodospreme V_{tb} određuje se preko satne potrošnje vode u naselju i režima dotoka vode u vodospremu, odnosno rada crpne stanice (Margeta 2011):

$$V_{tb} = \max \left[\sum_{t=1}^j (Q_{CS,t} - Q_{OV,t}) \right], \quad 1 \leq t \leq j \leq t_b = x \cdot T, \quad (9)$$

$$T = 24 \text{ h}$$

gdje je x broj dana, a t_b je vremenski korak za dimenzioniranje vodospreme. Općenito, gradske vodospreme nisu izgrađene za razdoblje uravnoteženja duže od 5 dana, dakle:

$$1 \leq x \leq 5 \quad (10)$$

Definiranje rada crpne stanice: dostupna insolacija E_S , odnosno snaga FN generatora P_{el} određuje period rada crpne stanice. U ovom radu se pretpostavlja da će crpna stanica raditi sa konstantnim potrebnim kapacitetom Q_{CS} (m^3/h) tijekom insolacije T_S (h), u skladu s jednadžbom (5). Stoga, proračun se odnosi na prosječni intenzitet i trajanje Sunčeve svjetlosti u kritičnom razdoblju rada sustava.

Izbor kompromisnog rješenja: željeni rezultat optimizacije procesa je najbolje kompromisno rješenje između parova P_{el} i V koji najbolje zadovoljavaju postavljene ciljeve. Optimalna kombinacija x snage FN generatora $P_{el} (f_1)$, operativnog volumena vodospreme $V_{tb} (f_2)$ te potrebnog kapaciteta crpne stanice $Q_{CS} (f_3)$ traži se za odabranu skupinu parova - varijante X :

$$DR[f_1(x), f_2(x), f_3(x)], x \in X \quad (11)$$

DR znači primijeniti odgovarajuću odluku/pravilo i pronaći najbolje kompromisno rješenje x^* iz skupa varijanti X . Standardna "trade-off" metoda može se, između ostalog, koristiti za odabir kompromisnog rješenja, (Chankong & Haimes 1983). Operativni volumen $V_{tb} (f_2)$ je funkcija broja dana x , korištenog za period izravnjanja vodospreme. U tom slučaju gospodarski kriterij je dominantan. Međutim, problem se može analizirati proširenjem kriterija od kojih je pouzdanost opskrbe vodom najvažniji.

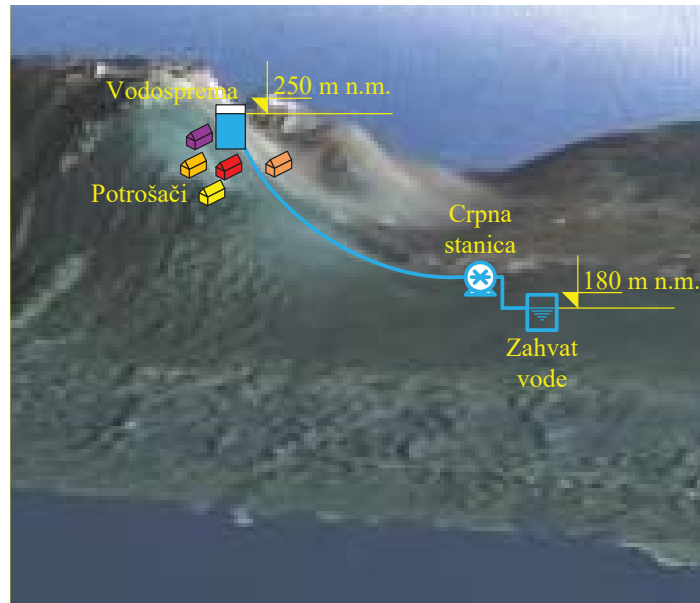
3. REZULTATI

3.1. ULAZNE VELIČINE

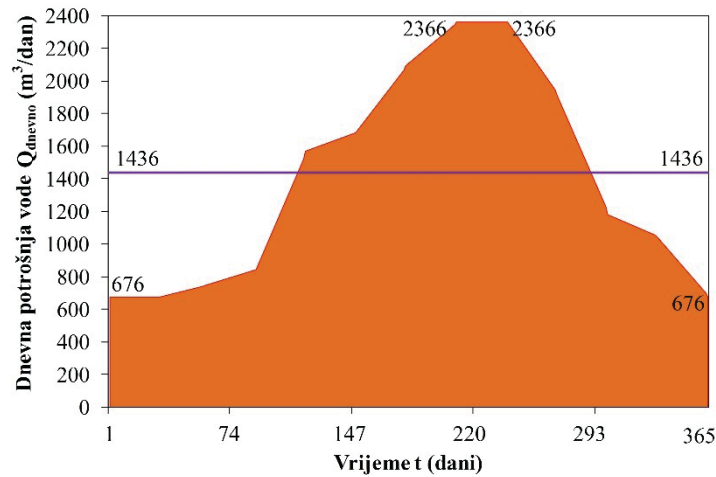
U ovom se slučaju analizira hipotetski primjer naselja (modificirano iz Turbosquid 2012) sa brojem stanovnika jednakim 8970. Naselje je smješteno na brdovitom području otoka u južnom dijelu mediteranske Hrvatske i ima jednu vodospremu smještenu na nadmorskoj visini od 250 m iznad mora. Voda dotiče u vodospremu iz crpnog bazena crpne stanice, smještenog na razini od 180 m iznad razine mora. Voda u crpni bazen dotiče gravitacijski iz izvora. Kvaliteta vode je zadovoljavajuća, tako da obrada vode nije potrebna. Položaj osnovnih objekata vodoopskrbnog sustava prikazan je na Slici 4.

Analiza je provedena prema metodologiji predstavljenoj u poglavlju 2. Specifična potrošnja vode q_{sp} je 160 l/dan/stan. Godišnja dnevna potrošnja vode Q_{dnevno} prikazana je na Slici 5.

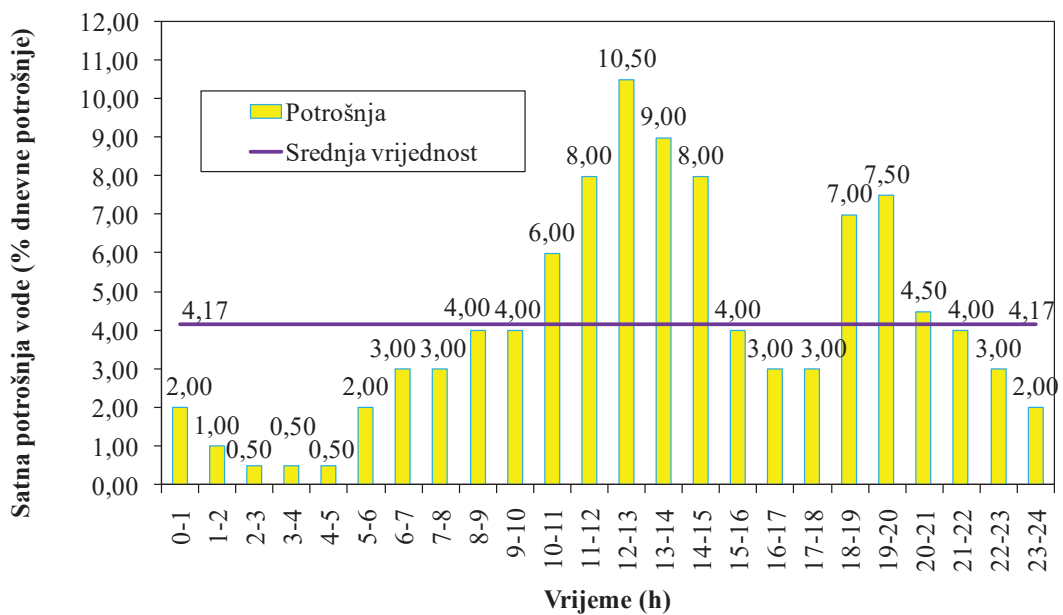
Satna potrošnja vode u naselju određena je sa dnevnim režimom potrošnje vode (Slika 6).



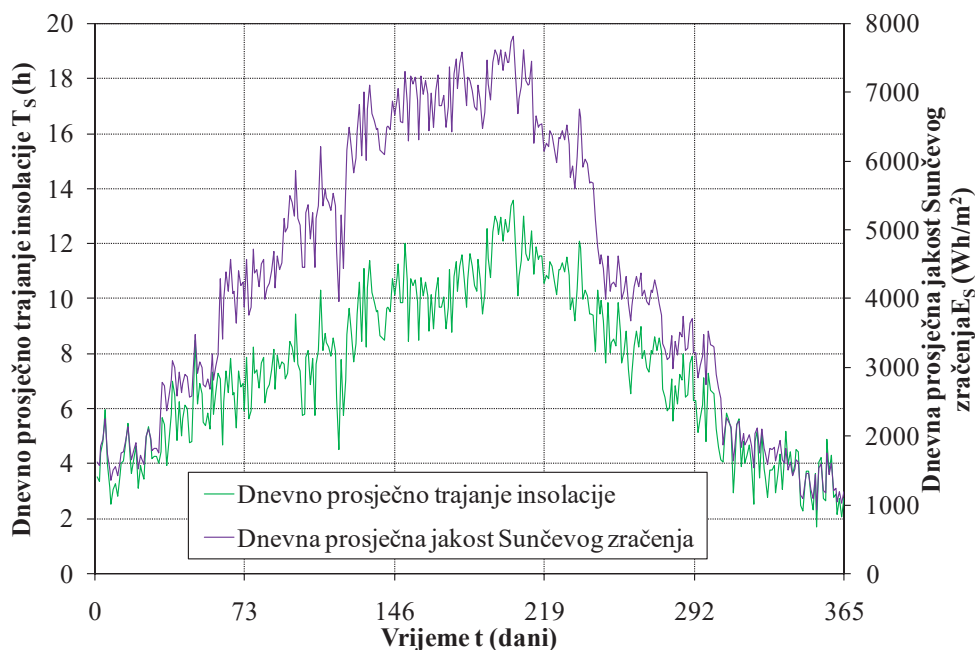
Slika 4. Položaji osnovnih objekata vodoopskrbnog sustava



Slika 5. Dnevna potrošnja vode u naselju u tipičnoj godini



Slika 6. Satna potrošnja vode u naselju u tipičnom danu



Slika 7. Prosječni dnevni period insolacije T_s (h) i prosječna solarna energija E_s (Wh/m^2)

Tablica 1. Kritični dani t^* u odnosu na duljinu perioda bilanciranja t_b

Periodi bilanciranja t_b (dani)	1	2	3	4	5
Kritični dani t^* za P_{el} (dani u godini)	344	344-345	343-345	349-352	346-350
Kritični dani t^* za V_{ib} (dani u godini)	244	244-245	244-246	241-244	241-245

Za promatranu lokaciju, manometarska visina je $H_{nCS} = 82.41$ m, dok je učinkovitost invertera i crpke $\eta_{CSI} = 0.75$, a_c je temperaturni koeficijent FN ćelije ($^{\circ}C^{-1}$) i iznosi 0.005, T_0 je temperatura FN generatora u standardnom testnom stanju ($25^{\circ}C$), a T_{cel} je temperatura FN generatora ($^{\circ}C$). E_s se uzima kao prosječna dnevna vrijednost za svaki tipičan dan u godini.

Izračun je napravljen sa sigurnošću odnosno 50 % vjerojatnosti iskorištavanja solarne energije $\eta_s = 0.5$ (jer je za izračun korištena prosječna godina, dok se kod detaljne analize ulaznih podataka vrijednost η_s može mijenjati u skladu s postavljenim ciljevima analize).

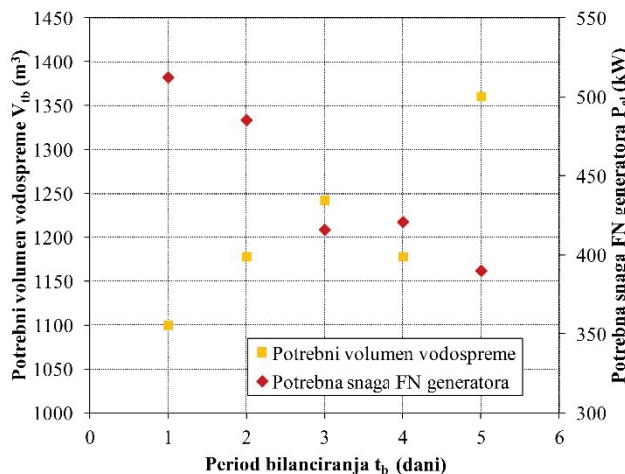
Prosječni dnevni period insolacije T_s (h) i prosječna solarna energija E_s (Wh/m^2) prikazana je na Slici 7, (DHMZ 2007).

3.2. REZULTATI

Predloženi sustav je analiziran u skladu s predstavljenom metodologijom. Na početku, periodi bilanciranja t_b za projektiranje sustava su odabrani od 1 do 5 dana. Na temelju poznatih veličina raspoložive solarne energije i potrebe za vodom, primjenjujući **jednadžbu (8)**, kritični periodi za određivanje snage FN generatora i potrebnog volumena vodospreme V_{ib} prikazani su u **Tablici 1**.

Potrebno je naglasiti da se kritični dani za dimenzioniranje P_{el} poklapaju sa kritičnim danima za dimenzioniranje crpne stanice P_{CS} , stoga se oni nisu naveli u **Tablici 1**. Snaga FN generatora P_{el} izračunata je pomoću **jednadžbe (3)**, dok je potrebni volumen vodospreme V_{ib}

izračunat pomoću **jednadžbe (9)**. Rezultati dobiveni za različite periode bilanciranja t_b prikazani su na **Slici 8**.



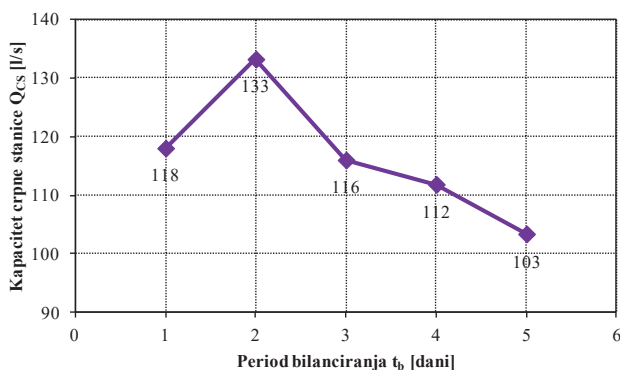
Slika 8. Potrebni volumen vodospreme V_{ib} i snaga FN generatora P_{el} u funkciji perioda bilanciranja t_b

Korištenjem **jednadžbe (5) i (6)**, proračunati kapacitet crpne stanice Q_{CS} prikazan je na **Slici 9**.

Povećanjem koraka bilanciranja t_b vidljivo je da dolazi do tendencije smanjenja potrebne snage FN generatora P_{el} . Navedeno se događa jer se povećanjem perioda bilanciranja t_b ujednačavaju razlike između ukupne potrošnje vode i ukupnog dotoka vode u vodospremu, tako da kad se te razlike svedu na jedan dan, one postaju sve manje i

manje. No, s povećanjem perioda bilanciranja t_b potrebni volumen vodospreme V_{tb} ima tendenciju povećanja, što je za očekivati budući da se sumiranjem potreba za vodom za više dana dobije i veća količina vode koja se mora precrpsti u vodospremu odnosno koja mora biti na raspolaganju stanovništvu.

Produženjem perioda bilanciranja t_b smanjuje se utjecaj varijabilnosti srednje jakosti zračenja E_s , odnosno povećava se ukupna raspoloživa E_s za crpljenje vode (srednja vrijednost). Kapacitet crpne stanice Q_{CS} nadovezuje se na gore navedeno.



Slika 9. Potrebni kapacitet crpne stanice Q_{CS} u funkciji perioda bilanciranja t_b

3.3. EKONOMSKE KARAKTERISTIKE DOBIVENIH VARIJANTI

Očito je da se osnovna ekonomska analize treba provesti dok se optimiziraju veličine FN generatora, crpne stanice i vodospreme. Ekonomski pristup, prema konceptu životnog ciklusa troškova (LCC) (Euro), razvijen je u smislu da bude najbolji pokazatelj ekonomske isplativosti analize troškova sustava (Bakelli et al. 2011). Sustav se sastoji od tri glavna dijela: (1) FN generator i inverter, (2) vodosprema i (3) glavna crpna stanica. LCC uzima u obzir sadašnju vrijednost kapitalnih troškova ulaganja ($C_{kapital}$), sadašnju vrijednost troškova zamjene ($C_{zamjena}$) i sadašnju vrijednost troškova pogona i održavanja ($C_{(R\&O)}$):

$$LCC = C_{kapital} + C_{replacement} + C_{(O\&M)} \quad (12)$$

Sadašnja vrijednost kapitalnih troškova (troškova ulaganja): Temeljni kapital/trošak svakog dijela sustava sastoji se od udjela cijene samog podsustava, troškova građevinskih radova, troškova montaže i troškova spajanja:

$$C_{kapital} = C_{FN} \cdot c_{FN} + C_V \cdot c_V + C_{CS} \cdot c_{CS} + C_{const} \quad (13)$$

Gdje su C_{FN} , c_{FN} ukupna snaga (W) i jedinična cijena (€/W) FN postrojenja, C_{SR} , c_{SR} su potrebni volumen (m^3) i jedinična cijena (€/m³) vodospreme; C_{CS} , c_{CS} su ukupni kapacitet (l/s) i jedinična cijena (€/l/s) crpne stanice; C_{const} je ukupni konstantni trošak uključujući ostale konstantne troškove (projektiranje, cijena zemljišta, porezi,...).

U ovom istraživanju c_{FN} uključuje ukupne troškove FN generatora i invertora; c_{CS} uključuje ukupne troškove crpne stanice i tlačnih cjevovoda; c_{SR} obuhvaća ukupni trošak vodospreme.

Sadašnja vrijednost troškova zamjene: Svi troškovi zamjene, nastali tijekom perioda funkcioniranja sustava, moraju se uračunati u skladu s posebnim periodom funkcioniranja svake komponente. Sadašnja vrijednost troška zamjene ($C_{zamjena}$) može se odrediti preko Soras & Makios (1988):

$$C_{zamjena} = C \cdot c \sum_{i=1}^{N_{zam}} \left[\frac{(1+f_0)}{(1+k_d)} \right]^{N_i / N_{zam} + 1} \quad (14)$$

gdje je f_0 stopa inflacije od zamjene sastavnih dijelova, k_d je kamatna stopa, C je kapacitet zamjene komponenti sustava, c je jedinični trošak komponenti, dok je N_{zam} broj zamjena komponenti u periodu funkcioniranja rada sustava.

Sadašnja vrijednost troškova pogona i održavanja: Sadašnja vrijednost troškova pogona i održavanja sustava izračunava se pomoću (Groumos & Papageorgiou 1987):

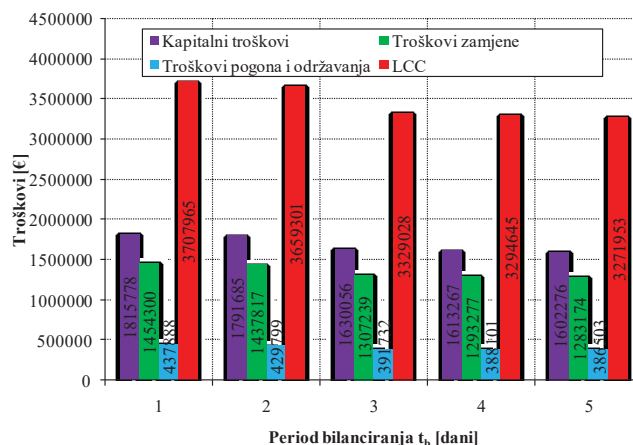
$$C_{(R\&O)} = C_{(R\&O)_0} \left(\frac{1+f_1}{k_d - f_1} \right) \cdot \left[1 - \frac{1+f_1}{1+k_d} \right]^{L_p} ; \text{za } k_d \neq f_1$$

$$C_{(R\&O)} = C_{(R\&O)_0} \cdot L_p ; \text{za } k_d = f_1 \quad (15)$$

gdje je f_1 stopa inflacije, k_d je kamatna stopa i L_p je razdoblje funkcioniranja sustava u godinama. $C_{(R\&O)_0}$ su troškovi rada i održavanja u prvoj godini; oni se mogu izračunati kao postotak k temeljnog kapitala $C_{kapital}$:

$$C_{(R\&O)_0} = C_{kapital} \cdot k \quad (16)$$

U ovoj analizi pretpostavlja se da se sve cijene povećavaju po istoj kamatnoj stopi. Na temelju **jednadžbi (12)-(16)** i na temelju podataka iz literature (Hidroing 2004; Hrvatske vode, 2008; Penstar 2012, PVX Change 2015; Solar electricity costs 2016; White International 2012), životni ciklus troškova (LCC) je napravljen i prikazan je u **Tablici 2** i na **Slici 10**.



Slika 10. Životni ciklus troškova (LCC) u Eurima za različite periode bilanciranja t_b

Tablica 2. Troškovi sa svim davanjima i vrijeme trajanja dijelova analiziranog sustava

Dio sustava	Jed. cijena, c (srednja vrijednost iz literature)	Troškovi održavanja u prvoj godini, k (%)	Vrijeme funkcioniranja, L _P (godine)	Kamatna stopa, k _d (%)	Stopa inflacije	
					f ₀ (%)	f ₁ (%)
FN generator i inverter (FN)	2-3 (€/W)	1	25	8	4	8
Vodosprema (V)	400-540 (€/m ³)	1	25	8	4	8
Crpna stanica (CS)	400-1200 (€/l/s)	1	8	8	8	8

4. DISKUSIJA I BUDUĆE SMJERNICE

Na temelju prethodno prikazanih rezultata jasno je da je najjeftinija varijanta ona s periodom bilanciranja $t_b = 5$ dana. U stvari, varijante sa $t_b = 2$ do $t_b = 5$ dana su slične, kao što se i očekuje. Također je vidljivo da su s povećanjem koraka perioda bilanciranja t_b prirasti prikazanih veličina relativno mali.

Analiza sadašnjih rezultata može se proširiti prema prikazanoj metodologiji. Kao zaključak – predloženi koncept do sada u literaturi nije obrađen. Mogući koncept rada FN generatora je objavljen i detaljno elaboriran, kao i rad crpnih sustava (Bakelli et al. 2011; Ghoneim 2006 i Hamidat & Benyoucef 2009). Ono što nije elaborirano je primjena FN generatora u gradskim vodoopskrbnim sustavima vezano za koncept "smart city" odnosno "sustainable city" kao i primjena sustavnog inženjerstva.

Može se analizirati sigurnost opskrbe i moguće povećanje snage FN generatora P_{el} ili volumena vodospreme V ili kapaciteta crpne stanice Q_{CS} ili moguće kombinacije navedenog. U svakom slučaju, povećanje perioda bilanciranja smanjuje rizik odnosno povećava pouzdanost rada ovakvog sustava. Ne smije se zaboraviti da je silazni trend u cijenama FN generatora u posljednjih 5 godina vrlo značajan (Campoccia et al. 2009; PVX Change 2015 i Solar electricity costs 2016), te će i dalje biti tako. To znači da će troškovi izgradnje vodosprema imati presudnu ulogu. Veći FN generatori osiguravaju značajan višak energije tijekom cijele godine, što omogućuje dodatni prihod (Slika 8).

Potrebno je postaviti pitanje dali je izgradnja FN postrojenja isplativa. Ako se problem promatra iz ekonomske točke gledišta, odgovor je ne, ali ako se uzima u obzir ekološko i društveno stajalište, odgovor i nije tako jednostavan. Zbog toga će se naredno istraživanje baviti detaljnije sa ekonomskom analizom sustava te utjecajem sustava na cijenu vode i prihvatljivost vezano za socijalne, ekonomske, ekološke kriterije te pouzdanost rada. Isto bi bilo ulaz za primjenu višekriterijalnih metoda u izboru optimalnog rješenja. Preduvjet za sve ove analize je izrada simulacionog modela rada sustava, što će isto biti sastavni dio narednih istraživanja. Analizu treba prilagoditi stvarnim karakteristikama problema. Detaljnije analize, analize senzitivnosti s obzirom na ulazne podatke, trend promjene cijene FN generator (i ćelija) i energije iz energetskog sustava, subvencije za "zelenu" energiju, itd. prikazale bi potpuniju sliku o problemu koji treba riješiti. Takva analiza nadilazi ovu fazu znanstvenog istraživanja, te će biti predmet budućih istraživanja.

Također je potrebno optimizirati rad vodosprema, glavnih crpnih stanica kao i ostalih elemenata koji sudjeluju u funkcioniranju i održivosti vodoopskrbnog sustava. Da bi se navedeno napravilo, planira se izraditi simulacijski model sustava koji bi se kasnije integrirao sa optimizacijskim modelom u cilju cjelovite analize predložene rješenja. U sklopu navedenog simulacijskog modela, svakako je potrebno uklopiti analizu rizika zbog stohastične naravi Sunčevog zračenja.

5. ZAKLJUČCI

Dokazano je da je usvojeni koncept održiv. Prikazano je moguće korištenje FN generatora u opskrbi energijom glavne crpne stanice urbanog vodnog sustava. Ovi rezultati jasno pokazuju da predloženi koncept može biti realiziran i da pruža veliku priliku usklađivanja rješenja (kombinacija P_{el} , V i Q_{CS}) na stvarnim potrebama problema kojega treba riješiti.

Postizanje održivosti i korištenje "zelene" energije ima svoju cijenu. Iako je osnovni izvor energije besplatan (Sunce), tako da tu otpada značajan dio troškova, troškovi izgradnje su znatno veći i uglavnom se odnose na troškove izgradnje FN generatora. Međutim, troškovi izgradnje FN generatora stalno se smanjuju i na odgovarajući način povećava se njihova učinkovitost, (Green et al. 2017). Štoviše, tržište PV ćelija je toliko napredovalo da je trenutno energija iz PV sustava jeftinija od energije nastale korištenjem ugljena u Njemačkoj, Australiji, SAD-u, Španjolskoj i Italiji (Bloomberg 2017). Dakle, smanjenjem troškova izgradnje FN generatora, isplativost primjene planiranog koncepta se povećava.

Održivost opskrbe vodom također ima svoju cijenu, počevši od važnosti vodoopskrbe za svako urbano naselje. Dakle, neće biti potrebno rješavati sve crpne kapacitete na taj način. Postupno uvođenje "zelene" energije povećava održivost vodoopskrbnih sustava, smanjuje rizik i postiže druge ciljeve u konceptu održivog življenja, kao što je smanjenje emisije CO₂, odnosno zaštita okoliša.

Kroz različita razdoblja korištenja i povoljnije uvjete za rad FN generatora, cijeli proces (ujedno i moguća rješenja) mogu se racionalizirati. Na primjer, ako je FN generator dimenzioniran za ljetne uvjete, kada je insolacija veća, troškovi izgradnje mogu se značajno smanjiti. Tijekom zimskog razdoblja nedostatak energije rješava se kombiniranjem dostupne solarne i konvencionalne energije. To omogućuje značajno niže troškove izgradnje, ali realizacija primarnog cilja "održivosti" je niža. Slično tome, energija iz FN generatora može se koristiti tijekom dana kada je energija iz konvencionalnog energetskog

sustava najskuplja, dok se energija iz tog istog energetskog sustava koristi tijekom noći kada je najjeftinija. Postoje različite kombinacije koje uvijek treba sveobuhvatno razmotriti.

Klima ima dominantni utjecaj na rješenje, stoga je jasno da su lokacije s većom količinom insolacije i sa stalnom insolacijom tijekom cijele godine povoljnije za primjenu predloženog rješenja. Povećanjem učinkovitosti FN generatora može se postići bolje skupljanje solarne energije i time omogućiti povoljne primjene predloženih rješenja u područjima s manje insolacije, kao i sa promjenjivom insolacijom. Jasno je da predloženo rješenje uvijek pruža održivu opskrbu energijom vodoopskrbnog sustava s različitim učinkovitostima, jer solarna energija varira od lokacije do lokacije, ali je uvijek dostupna na mjestima gdje ljudi žive.

Ključni zaključak je da postavljeni koncept osigurava održivost opskrbe energijom vodoopskrbnog sustava, koja se može realizirati sadašnjim raspoloživim tehnologijama. Ovaj koncept se uklapa u postojeće trendove vezane za razvoj održivih urbanih sredina koje ne mogu biti održive bez održivih vodoopskrbnih sustava. Time je jasno potvrđena važnost ove teme za buduće potrebe razvoja struke.

Problem koji se rješava je složen, zahtijeva sustavni i cjeloviti pristup i široko je primijenjiv na svim lokacijama na kojima egzistiraju naselja i vodoopskrbni sustavi.

6. LITERATURA

Bakelli, Y., Hadj, A. A., Azoui, B. (2011) Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept, *Solar Energy*; 85(11): 288-294.

Bloomberg - New Energy Outlook 2017 (2017) 23.06.2017., <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>.

Campoccia, A., Dusonchet, L., Telaretti, E., G. Zizzo, G. (2009) Comparative analysis of different supporting measures for the production of electrical energy by solar PV and Wind systems: Four representative European cases, *Solar Energy*, 83(3): 287-297.

Chankong, V., Haimes, Y. (1983) *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*, prvo izdanje, Elsevier - North Holland, New York, 424 p.

Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) (2007) *Klimatski podaci za Palagružu i Komiju od 1995. do 2006.*, Zagreb, Hrvatska.

Fontane D. G., Margeta J. (1988) *Uvod u sustavno inženjerstvo u projektiranju i upravljanju vodosprema*, prvo izdanje, Građevinski fakultet, Sveučilište u Splitu, Hrvatska.

Ghoneim, A. A., Design optimization of photovoltaic powered water pumping system (2006) *Energy Conversion and Management*, 47(11-12): 1449-1463.

Glasnović, Z., Margeta, J. (2007) A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems, *Solar Energy*, 81(12): 904-916.

Glasnović, Z., Margeta, J. (2011) Vision of total renewable electricity scenario, 15(12): 1873-1884.

Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. (2017) *Solar cell efficiency tables (version 49)*, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25: 3-13.

Groumpos P. P., Papageorgiou G. (1987) An optimal sizing method for stand-alone photovoltaic power systems, *Solar Energy*; 38: 341-51.

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

Hidroing d.o.o. Split (2004) *Regionalni vodoopskrbni sustav: Neretva, Pelješac, Korčula, Lastovo, Mljet - Novelacija pred-investicijskog programa*, 26p, Split, Hrvatska.

Hrvatske vode (2008) *Vodoopskrbni plan Splitsko-Dalmatinske županije*, 306p, Split, Hrvatska.

Kenna, J., Gillett, B. (1985) *Solar Water Pumping: A Handbook*, prvo izdanje, Intermediate Technology Publications, London, Velika Britanija, 132 p.

Margeta, J. (2011) *Vodoopskrba naselja: planiranje, projektiranje, upravljanje, obrada vode*, prvo izdanje, Građevinsko - arhitektonski fakultet, Sveučilište u Splitu, Split, Hrvatska, 737 p.

Margeta, J., Glasnović, Z. (2011) Exploitation of temporary water flow by hybrid PV-hydroelectric plant, 36(2): 2268-2277.

Patel, M. R. (1999) *Wind and Solar Power Systems*, prvo izdanje, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, SAD, 351 p.

Penstar Ltd. (2012) *Cjenik*, Cardigan, Velika Britanija.

PVX spot market price index solar PV modules (PVX change) (2017) 05.06.2017. www.pvxchange.com

Rashid, M. H. (2001) *Power Electronics Handbook*, prvo izdanje, Academic Press, San Diego, SAD, 1000 p.

Solar electricity costs (2016) 14.06.2016. http://solarcellcentral.com/cost_page.html

Soras C., Makios V. (1988) A novel method for determining the optimum size of stand-alone photovoltaic systems. *Solar Cells*; 25: 127-142.

Turbosquid - digital media supply company - 3D models (2012) 20.02.2012. <http://www.turbosquid.com>

White International - CNP industrial pumps (2012) *Cjenik 2011*, Mippera, Australija.