

EKONOMSKA ANALIZA ODRŽIVOSTI URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA POKRETANOG SOLARNOM FOTONAPONSKOM ENERGIJOM

doc. dr. sc. Bojan Đurin, dipl. ing. geoteh.
Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Hallerova aleja 7, 42 000 Varaždin
bojan.djurin@gfv.hr

Lucija Plantak, mag. ing. amb.
Samostalni istraživač
V. Gotovca 37, 42 000 Varaždin

Solarni fotonaponski (FN) sustavi koji služe za proizvodnju električne energije za rad crpnih stanica koje crpe vodu koriste se oko 50 godina. U pravilu, takvi sustavi sastoje se od FN generatora, crpne stanice i vodospreme. Njihovo korištenje je u pravilu opravdano s ekološkog i društvenog stajališta, no ne i u potpunosti s ekonomskog stajališta. Međutim, ovakvi sustavi su jedina opcija koja se može koristiti u izoliranim i udaljenim područjima. Veliki nedostatak ovakvih sustava je mogućnost zatajenja uslijed pojave nedovoljne jakosti i intenziteta sunčevog zračenja. U ovom je radu korištena Metoda kritičnog perioda (MKP), osmišljena upravo radi otklanjanja navedenog problema. Uz navedeno, u radu je naglasak na ekonomskoj analizi u svrhu dokaza održivosti, odnosno prikaza ekonomske bilance Urbanog vodoopskrbnog sustava (UVS), dimenzioniranog metodom MKP. Ekonomska analiza je izvršena korištenjem *Life Cycle Costs (LCC)* analize za sve dobivene varijante UVS-a pokretanog FN energijom. Zaključeno je da FN energija ima opravdanu mogućnost korištenja u UVS-u, pri čemu se korištenjem MKP postiže održivost.

Ključne riječi: vodoopskrbni sustav, solarna fotonaponska energija, održivost, Metoda kritičnog perioda, ekonomska analiza.

1. UVOD

Korištenje solarne fotonaponske (FN) energije za crpljenje vode ima potencijal na gotovo svakoj lokaciji u svijetu, počevši od samih tehničko-tehnoloških činjenica (jednostavan način rada, serijska proizvodnja FN ćelija, jednostavna montaža, korištenje i održavanje), ekoloških (emisije stakleničkih plinova su zanemarive) (Boizidi, 2013., Meah et al., 2008.), društvenih (povećanje broja radnih mjesta zbog sve veće i veće proizvodnje FN ćelija, odnosno rasta industrije) (Đurin i Margeta, 2014.), a najviše zbog osiguranja električne energije na lokacijama gdje nema klasične elektroenergetske mreže (Đurin, 2014.). S ekonomskog stajališta, FN tehnologija postaje sve povoljnija zbog smanjenja cijene FN ćelija, odnosno sve veće konkurencije u proizvodnji. Usprkos još uvijek aktualnim poticajnim cijenama za korištenje svih oblika obnovljivih izvora energije, FN energija nije zamijenila klasičnu energiju iz elektroenergetske mreže.

Razlog tome je, također, i nepouzdanost FN energije, što se otklanja korištenjem spremnika energije (solarnih baterija i akumulatora), kao i unaprjeđenjem same tehnologije korištenja sa tehničkog aspekta (povećanje učinkovitosti, produljenje trajanja samih ćelija), ali i novim načinima dimenzioniranja takvih sustava, no problem još uvijek nije u potpunosti otklonjen (Đurin, 2014.). Navedeno predstavlja motivaciju za istraživanjem ove problematike. Ovaj rad je nastavak rada pod naslovom „Analiza održivosti urbanog vodoopskrbnog sustava pokretanog sunčevom energijom i zavisnosti veličina njegovih pojedinih dijelova“ (*Hrvatske vode*, 24 (98), 285–294), u kojem je prikazana znanstveno inovativna i inženjerski primjenjiva Metoda kritičnog perioda (MKP), koja daje doprinos povećanju pouzdanosti korištenja FN sustava za potrebe rada urbanog vodoopskrbnog sustava. Stoga će ona biti ukratko opisana u ovome radu, dok će naglasak biti na ekonomskoj analizi rada jednog takvog sustava, odnosno na ekonomskim pokazateljima

pojedinih dijelova Urbanog vodoopskrbnog sustava (UVS-a) kroz analizu troškova životnog ciklusa (LCC, eng. *Life-Cycle Cost*), tj. ciklus životnih troškova.

Ekonomska analiza FN sustava u pravilu se svodi na LCC analizu, koja je jedan od najvažnijih pokazatelja ekonomske isplativosti takvih sustava (Armendariz-Lopez et al., 2016., Ristimäki et al, 2013.), kao i njihovih nadopuna sa sustavom za crpljenje vode (Bakelli et al., 2011.) te ostalim sustavima i kombinacijama, npr. korištenjem dizelskih agregata i solarnih baterija (Yahyaoui, 2017.). Daljnja ekonomska analiza može uključiti i razine troškova energije (LCOE, eng. *Levelized cost of energy*), koji je predložen od U.S. Department of Energy (DOE), (Wang et al., 2011.), pri čemu se vrijednost LCC-a dijeli s količinom proizvedene električne energije tijekom analiziranog perioda (Branker et al., 2011.).

2. PRIMJENA METODE "MKP"

Urbani vodoopskrbni sustav dimenzioniran primjenom MKP sastoji se od podsustava FN (solarno fotonaponsko postrojenje), podsustava CS (crpna stanica s pripadajućom opremom) i podsustava V (vodosprema) (Đurin, 2014.). Vodosprema se, osim za osiguranje kontinuirane količine vode za potrebe stanovništva i potrebnog tlaka za vodoopskrbnu mrežu, koristi i kao spremnik potencijalne električne energije proizvedene iz podsustava FN. Kako bi se osigurao kontinuitet i sigurnost opskrbe vodom, MKP koristi umjesto jednog kritičnog perioda tri kritična perioda koja odgovaraju posustavima dimenzioniranog UVS-a. Prema Đurin (2014.) to su:

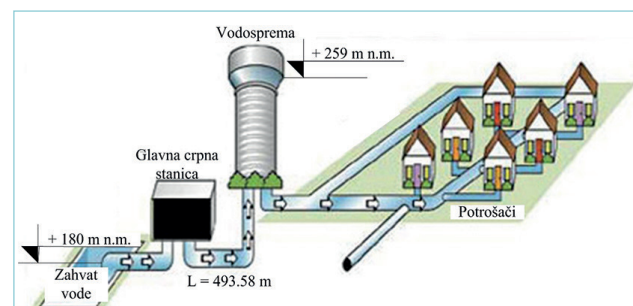
- kritični period za dimenzioniranje podsustava FN $t_{Pel(i)}^*$
- kritični period za dimenzioniranje podsustava CS $t_{CS(i)}^*$
- kritični period za dimenzioniranje podsustava V $t_{Vop(i)}^*$

Prvi kritični period $t_{Pel(i)}^*$ definira se za određivanje dovoljne snage podsustava FNi, odnosi se na onaj peiod u kojem je razlika između potrebne dnevne količine vode i precrpljene dnevne količine vode najmanja. Kritični period za dimenzioniranje podsustava CS predstavlja period u kojem je omjer između dnevne potrošnje vode u naselju i trajanja dnevnog sunčevog zračenja najmanji, dok je kritični period za određivanje operativnog volumena vodospeme $t_{Vop(i)}^*$ onaj period kod kojeg je najveća dnevna potrošnja vode u naselju najveća tijekom godine, a vrijednosti jakosti i trajanja sunčevog zračenja su dovoljni za proizvodnju potrebne količine električne energije za pokretanje crpne stanice. MKP se zasniva na korištenju vremenskih nizova, koji se mogu formirati na dva načina (Đurin i Baić, 2016.). Razlika između navedenih načina formiranja vremenskih nizova, kao i detaljan matematički opis, mogu se naći u radovima Đurin (2014.) i Đurin i Baić (2016.). U navedenoj literaturi dokazano

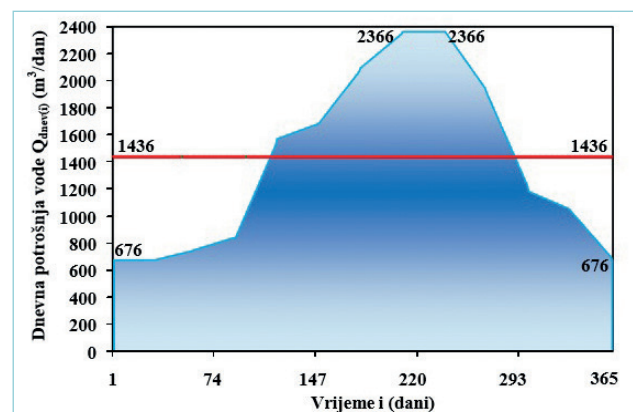
je da je drugi način formiranja vremenskih nizova bolji jer nema skokova u vrijednostima pojedinih članova, odnosno ukoliko se pojave, oni su manji u odnosu na skokove u prvom načinu. Iz tog razloga se u ovome radu primijenjuje drugi način formiranja vremenskih nizova, odnosno prikazat će se rezultati dobiveni na osnovu korištenja tog načina.

3. ULAZNI PODATCI I PRIMJER

Analizira se primjer malog naselja od 8970 stanovnika na brdovitom području mediteranskog dijela Republike Hrvatske. Potrebno je naglasiti da su sve karakteristike naselja, kao i svi zahtjevi i uvjeti, definirani na osnovu preporuka i smjernica u skladu sa literaturom i primjerima iz inženjerske prakse. Za potrebe rada crpne stanice sva proizvedena električna energija osigurava se iz podsustava FN. Voda se crpi sa 180 m n.m. u vodospremu koja se nalazi na nadmorskoj razini od 259 m n.m. Manometarska visina crpne stanice iznosi 82.41 m. Položaj glavnih dijelova urbanog vodoopskrbnog sustava preuzet je i prilagođen iz Đurin i Margeta (2014.) (slika 1). Izračunavaju se veličine urbanog vodoopskrbnog sustava, snaga podsustava FN, $P_{el, FN}$ kapacitet, Q_{CS} , odnosno snaga, P_{CS} , podsustava CS te operativni volumen podsustava V, V_{op} , zajedno s pripadnim kritičnim periodom (periodima) za dimenzioniranje podsustava FN, $t_{Pel(i)}^*$ podsustava CS, $t_{CS(i)}^*$ i podsustava V, $t_{Vop(i)}^*$ sve u skladu s metodologijom opisanom u Đurin (2014.) te Đurin i Baić (2016.).

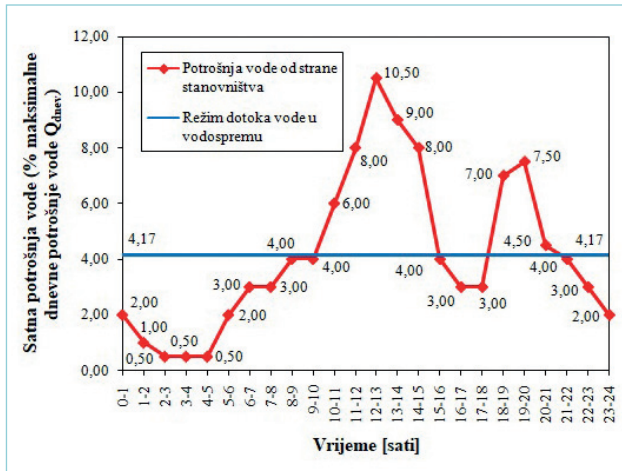


Slika 1: Shematski prikaz analiziranog Urbanog vodoopskrbnog sustava (prilagođeno iz Đurin i Margeta, 2014.)



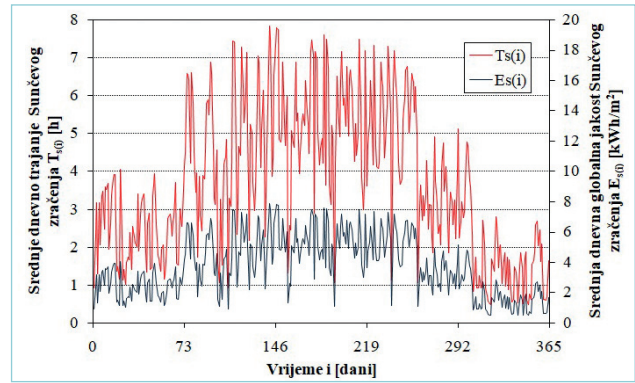
Slika 2: Režim dnevne potrošnje vode tijekom godine (preuzeto iz Đurin i Baić, 2016.)

Također se proračunava i potrebna površina solarnih ćelija, A_{FN} . Ulazni podatci režima dnevne potrošnje vode, $Q_{dnev(i)}$ u jednoj godini za svaki pojedini dan i u toj godini i podatci o satnoj potrošnji vode u naselju određeni su na temelju usvojenih dnevnih režima potrošnje vode, uključujući i gubitke, sve u skladu sa smjericama i preporukama iz literature (Margeta, 2011.) pri čemu $1436 \text{ m}^3 \text{ dan}^{-1}$ predstavljaju maksimalnu dnevnu potrebu za vodom u naselju (slike 2 i 3, preuzeto iz Đurin i Baić, 2016.).

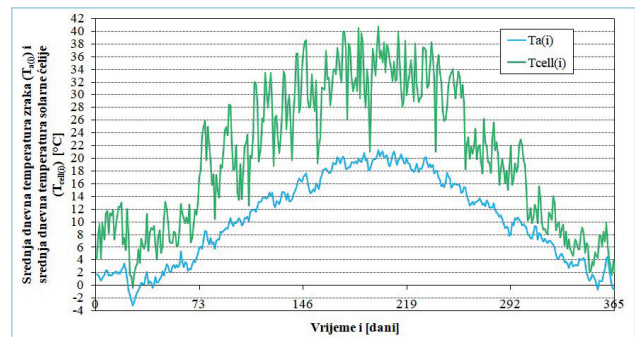


Slika 3: Režim satne potrošnje vode tijekom dana (preuzeto iz Đurin i Baić, 2016.)

Prosječna učinkovitost invertora iznosi $\eta_i = 0,83$, prosječna učinkovitost crpne stanice $\eta_{CS} = 0,90$, prosječna učinkovitost invertora i crpke je $\eta_{CSI} = 0,75$, a usvojena učinkovitost podsustava FN iznosi $\eta_{FN} = 0,15$. Temperaturni koeficijent solarne ćelije iznosi $\alpha_c = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, dok je temperatura solarne ćelije u standardnim testnim uvjetima $T_0 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Đurin, 2014.). Na slikama 4 i 5 prikazane su vrijednosti prosječne dnevne jakosti, $E_{s(i)}$ i prosječno dnevno trajanje, $T_{s(i)}$ globalnog sunčevog zračenja te srednje dnevne temperature zraka, $T_{a(i)}$ ($^\circ\text{C}$) i srednja dnevna temperatura solarnih ćelija, $T_{cel(i)}$ ($^\circ\text{C}$).



Slika 4: Prosječna dnevna jakost i trajanje sunčevog zračenja (preuzeto iz Đurin, 2014.)



Slika 5: Prosječna dnevna temperatura zraka i solarne ćelije (preuzeto iz Đurin, 2014.)

4. DOBIVENI REZULTATI

4.1 Kritični period

Primjenom Metode kritičnog perioda (MKP), određeni su kritični periodi za određivanje snage FN generatora i invertora, $P_{el,FN}$ kapaciteta crpne stanice, Q_{CS} i volumena vodospreme, V_{op} , za periode bilanciranja, t_b , od 1 do 5 dana te srednja vrijednost i standardno odstupanje vremenskog niza jakosti sunčevog zračenja E_s prikazani su u tablici 1.

Tablica 1: Kritični periodi za određivanje snage FN, kapaciteta Q_{CS} i volumena te karakteristike vremenskog niza E_s

Period bilanciranja t_b (dani)	1	2	3	4	5
Kritični period (dani u godini) za podsustav FN $t_{P_{el(i)}}^*$	352	344-345	344-346	349-352	348-352
Kritični period (dani u godini) za podsustav CS $t_{Q_{CS(i)}}^*$	352	344-345	344-346	344-347	343-347
Kritični period (dani u godini) za podsustav V $t_{V_{op(i)}}^*$	244	244-245	243-245	243-246	242-246
Srednja vrijednost vremenskog niza jakosti sunčevog zračenja E_s	4.30	4.01	3.73	3.52	3.39
Standardno odstupanje vremenskog niza jakosti sunčevog zračenja E_s	2.05	1.90	1.76	1.67	1.60

Tablica 2: Proračunate snage podsustava FN, CS i V te površine solarnih ćelija za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Period bilanciranja t_b (dani)	1	2	3	4	5
Snaga FN generatora $P_{el,FN}$ (kW)	512.50	477.82	443.87	419.80	403.45
$P_{el,FN} = -27.61 \times t_b + 534.3$			$R^2 = 0.979$		
Kapacitet crpne stanice Q_{CS} (l/s)	118	133	124	117	111
Snaga crpne stanice P_{CS} (kW)	106	119.47	111.39	105.10	99.71
Operativni volumen vodospreme V_{op} (m³)	1100	1178	1271	1415	1513
$V_{op} = 106.3 \times t_b + 976.5$			$R^2 = 0.989$		
Površina solarnih ćelija A_{FN} (m²)	3417	3185	2959	2799	2690

Dobivenim rezultatima dobije se pet varijanti rješenja, s obzirom na pet perioda bilanciranja, t_b (od 1 do 5 dana). Kritični periodi se razlikuju, osim (očekivano) kod perioda bilanciranja $t_b = 1$ dan, što se može vidjeti u prikazanoj tablici.

4.2 Veličine podsustava FN, CS, V i površina solarnih ćelija

Uzevši u obzir dobivene kritične dane prikazane u tablici 1, potrebne snage podsustava FN, $P_{el, FN}$, podsustava CS, podsustava V te površine solarnih ćelija proračunate su i prikazane u tablici 2.

Promatrajući prikazane vrijednosti u tablici, može se primijetiti da vrijednosti snaga podsustava FN, $P_{el, FN}$ s povećanjem perioda bilanciranja t_b padaju. Prikazani trend smanjenja snage $P_{el, FN}$ u funkciji perioda bilanciranja t_b je približno linearan, $P_{el, FN} = -27,612 \times t_b + 534,324$, pri čemu je koeficijent determinacije jednak $R^2 = 0,979$.

U tablici 2 prikazani su i proračunati potrebni kapaciteti i vrijednosti snage crpnih stanica za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana, s obzirom na kritične periode. Veza između potrebnog kapaciteta crpne stanice Q_{CS} i snage crpne stanice P_{CS} je linearna, također su iz tablice 2 vidljivi trendovi pada vrijednosti kapaciteta Q_{CS} i snage crpne stanice P_{CS} . Veličine kapaciteta Q_{CS} i snage P_{CS} crpne stanice su takve naravi da nisu pogodne za primjenu linearnog trenda, odnosno općenito nekog pretpostavljenog trenda. Kod perioda bilanciranja $t_b = 2$ dana dolazi do izraženog skoka (povećanja vrijednosti), što je posljedica kratkog trajanja jakosti sunčevog zračenja T_s , odnosno smanjenja T_s unutar kritičnog perioda za dimenzioniranje podsustava CS, $t_{CS(i)}$ zbog stohastičke naravi sunčevog zračenja. Najveći kapacitet dobiven je kod perioda bilanciranja $t_b = 2$ dana, a samim time i snaga crpne stanice, dok je najmanji kapacitet i snaga crpne stanice dobivena za period bilanciranja $t_b = 5$ dana.

Veličina operativnog volumena vodospreme V_{op} , s obzirom na kritične periode, prikazana je u tablici 2 za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana. U tablici se primijećuju trendovi povećanja vrijednosti operativnog volumena vodospreme V_{op} s povećanjem perioda bilanciranja t_b , s time da je trend povećanja volumena vodospreme V_{op} u funkciji perioda bilanciranja t_b približno linearan, $V_{op} = 106,3 \times t_b + 976,5$, pri čemu je koeficijent determinacije jednak $R^2 = 0,989$. Za period bilanciranja $t_b = 1$ dan dobivena je najmanja vrijednost volumena vodospreme i iznosi $V_{op} = 1100 \text{ m}^3$, dok je najveći volumen $V_{op} = 1513 \text{ m}^3$ dobiven za period bilanciranja $t_b = 5$ dana.

Potrebne površine solarnih ćelija A_{FN} za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana također su prikazane u tablici 2. Veličina A_{FN} je u proporcionalnoj vezi sa snagom podsustava FN, $P_{el, FN}$.

Iz tablice se može vidjeti trend pada vrijednosti površina solarnih ćelija A_{FN} s obzirom na povećanje perioda bilanciranja t_b , što se može poistovjetiti s

analizom dobivenih rezultata snage podsustava FN, $P_{el, FN}$. Može se primijetiti da nema skokova u prikazanim vrijednostima, a najveće površine solarnih ćelija dobivene su kod perioda bilanciranja $t_b = 1$ dan, dok je najmanja vrijednost površine solarnih ćelija dobivena za period bilanciranja $t_b = 5$ dana.

5. EKONOMSKA ANALIZA

Kako bi se najbolje prikazala ekonomska učinkovitost analize troškova promatranog primjera koristit će se koncept ciklusa životnih troškova LCC. LCC uzima u obzir sadašnju vrijednost kapitalnih troškova $C_{kapital}$, sadašnju vrijednost troškova zamjene $C_{zamjena}$ i sadašnju vrijednost troškova upravljanja i održavanja $C_{(U\&O)}$ (Đurin, 2014.):

$$LCC = C_{kapital} + C_{zamjena} + C_{(U\&O)} \quad (1)$$

Kod obnovljivih izvora energije, koja je besplatna, postoji mogućnost prodaje viška električne energije te je potrebno uključiti i Neto sadašnju vrijednost (NPV, eng. Net Present Value) zarade/troškova električne energije. Vrijednost NPV-a pokazuje koliko će novac vrijediti na kraju određenog perioda vremena (NREL, 1995.). Prema Kenna i Gillett (1985.), NPV je definiran izrazom:

$$NPV = \sum_{i=1}^N \frac{F}{(1+d)^i} \quad (2)$$

gdje je F buduća vrijednost novca (pozitivna ili negativna) u planskom periodu N , s obzirom na određenu diskontnu stopu d .

Potrebno je i definirati ukupnu vrijednost LCC_{UK} (€), kod koje se vrijednosti LCC-a, jednadžba (1), oduzima zarada od prodane energije L_{Zarada} (€), dobivena korištenjem jednadžbe (2), (Đurin, 2014.):

$$LCC_{UK} = LCC - L_{Zarada} \quad (3)$$

Kao ulazni podatci u LCC analizi koriste se podatci iz literature (Bakelli et al., 2011., Hidroing, 2004., SolarServer, 2017., Solar electricity costs, 2017., White International, 2012.). U tablici 3 prikazani su troškovi i životni vijek trajanja dijelova pojedinih podsustava UVS-a. Budući da je razina ovog istraživanja na konceptualnoj (studijskoj) razini, usvojeno je da nema odstupanja godišnjih vrijednosti od višegodišnjeg trenda, odnosno višegodišnjih promjena. Detaljnija analiza na razini idejnog i glavnog projekta zahtijeva i detaljniju razradu s obzirom na tražene zahtjeve. U LCC analizu uključene su osrednjene vrijednosti iz literature, budući da se na ovoj razini razrade ne mogu definirati detalji koji su nužni za detaljniju ekonomsku analizu.

Tablica 3: Troškovi i životni vijek trajanja dijelova pojedinih podsustava promatranog Urbanog vodoopskrbnog sustava (Đurin, 2014.)

Dijelovi podsustava	Jedinična cijena, c (srednja vrijednost iz literature)	Troškovi održavanja u prvoj godini, k (%)	Životni vijek, L_p (godine)	Realna kamatna stopa, k_d (%)	Stopa inflacije (%)	
					f_0	f_1
FN generator	1.5 (€/W)	1	25	8	4	4
Invertor	0.5 (€/W)	0	10	8	4	4
Vodosprema	400 (€/m ³)	1	25	8	4	4
Crpna stanica	1 (€/W)	3	15	8	4	4

Prema Đurin, (2014.), životni period FN generatora je $L_p = 25$ godina, tako da ga se ne mora mijenjati u planskom periodu, koji je jednak $N = 25$ godina, no trajanje invertora je manje, obično 10 godina, što znači da se invertor kroz tih 25 godina mora 2 puta mijenjati (prvi put nakon 10 godina, drugi put nakon 20 godina), dok ostali dijelovi (kablovi, postolja i slično) nisu značajni da bi se morali razmatrati, pogotovo na ovoj konceptualnoj razradi problema. Vodosprema može trajati 25 godina i više, a razmatra se samo betonska konstrukcija vodospreme, odnosno njezin volumen koji je proračunat. Osrednjena vrijednost trajanja crpne stanice, koja se usvaja zbog variranja životnog vijeka, je 15 godina i mijenja se jedanput kroz 25 godina (Đurin, 2014.). U analizi se neće uzeti u obzir troškovi rada zaposlenika na izgradnji razmatranog sustava, administrativno-zakonskih dozvola i cijena zemljišta. Realna kamatna stopa iznosi $k_d = 8$ %, dok su stope inflacije f_0 i $f_1 = 4$ % (Bakelli et al., 2011.). Slika 6 prikazuje rezultate provedene LCC analize s obzirom na periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana.

Sa slike 6 može se vidjeti da su za period bilanciranja $t_b = 1$ dan iznosi najveći, odnosno ta varijanta je najskuplja, a samim time i najnepovoljnija, dok je najpovoljnija varijanta za period bilanciranja $t_b = 5$ dana. Razlika između te dvije varijante je 7 %. Također je vidljivo da su u ovom slučaju kapitalni troškovi dominantni u odnosu na troškove zamjene, kao i troškove upravljanja i održavanja.

Kapitalni troškovi $C_{kapital}$ čine u prosjeku dvije trećine troškova (od 66 % za $t_b = 1$ i 2 dana, 67 % za $t_b = 3$ dana,

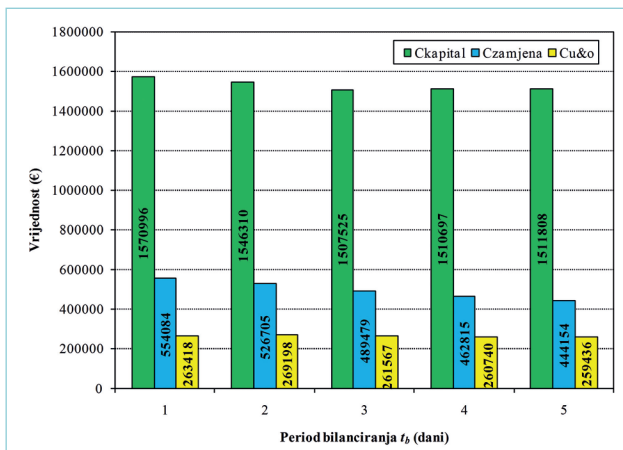
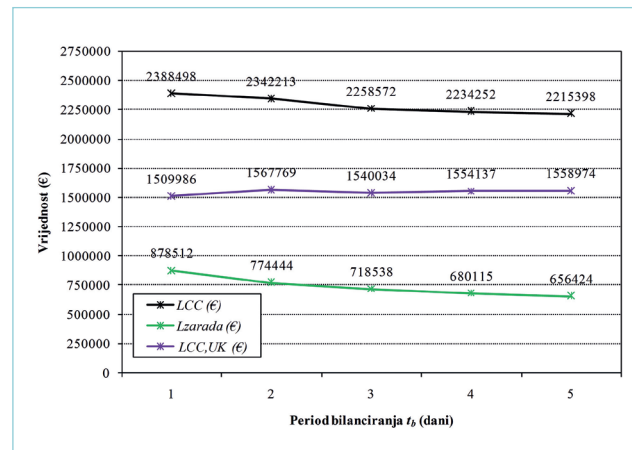
dok je za $t_b = 4$ i 5 dana, 68 %) s obzirom na vrijednost LCC-a. S obzirom na periode bilanciranja t_b , razlika između najveće vrijednosti ($t_b = 1$) i najmanje vrijednosti ($t_b = 3$) je 4 %.

Za period bilanciranja $t_b = 5$ dana, troškovi zamjene, $C_{zamjene}$ iznose 20 %, 21% za $t_b = 4$ dana, te 22 % za $t_b = 2, 3$ dana i 23 % za $t_b = 1$ dan. S obzirom na periode bilanciranja t_b , razlika između najveće vrijednosti ($t_b = 1$ dan) i najmanje vrijednosti ($t_b = 5$ dana) iznosi 20 %.

Troškovi upravljanja i održavanja, C_{UEO} iznose 11 % za $t_b = 1$ i 2 dana, dok za preostale periode bilanciranja $t_b = 3, 4$ i 5 dana iznose 12 %. Kod troškova upravljanja i održavanja s obzirom na periode bilanciranja t_b , razlika između najveće vrijednosti ($t_b = 2$ dana) i najmanje vrijednosti ($t_b = 5$ dana) iznosi 4 %.

Ukoliko se uključi u analizu i mogućnost prodaje viška proizvedene električne energije, L_{Zarade} prikazan na slici 7, dobiva se dodatni uvid u ekonomske kriterije. Za potrebe izračuna koristi se jednadžba (2), gdje je prodajna jedinična cijena električne energije 0,07 €/kWh u skladu sa (HERA, 2013., NN 104/15.a., NN 104/15.b.), dok nominalna diskontna stopa d iznosi 10 % (U.S. Department of Energy, 2010.). Na slici 7 može se vidjeti da ukoliko se od vrijednosti LCC-a oduzme vrijednost zarade od prodaje viška električne energije (L_{Zarade}), dobiju se ukupne vrijednosti LCC_{UK} .

Trend smanjenja vrijednosti zarade od prodaje viška električne energije, L_{Zarade} događa se u slučaju povećanja perioda bilanciranja, t_b , odnosno sa smanjenjem snage podsustava FN, $P_{el, FN}$. Najveća vrijednost, L_{Zarade} javlja se za

Slika 6: Kapitalni troškovi, troškovi zamjene i troškovi upravljanja i održavanja s obzirom na periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana za planski period od $N = 25$ godinaSlika 7: Prikaz vrijednosti LCC-a, zarade od prodaje energije Lzarade, te ukupne vrijednosti LCCUK za različite periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana za planski period od $N = 25$ godina

period bilanciranja $t_b = 1$ dan, dok je najmanja vrijednost L_{Zarade} za $t_b = 5$ dana, a njihova razlika iznosi 25 %. Na slici 7 vidi se da se vrijednost LCC_{UK} stabilizira s povećanjem perioda bilanciranja t_b , odnosno ona je najveća za period bilanciranja $t_b = 2$ dana, a je najmanja za $t_b = 1$ dan, dok razlika između najveće i najmanje vrijednosti LCC_{UK} iznosi 4 %. Zapravo, prodaja viška proizvedene električne energije, L_{Zarade} utječe na smanjenje LCC-a, što iznosi 30 % za $t_b = 4$ i 5 dana, 32 % za $t_b = 3$ dana, 33 % za $t_b = 2$ dana, te 37 % za $t_b = 1$ dan.

6. ZAKLJUČAK

U ovome je radu prikazana ekonomska analiza pojedinih podsustava Urbanog vodoopskrbnog sustava (UVS-a) pokretanog solarnom FN energijom dimenzioniranog Metodom kritičnog perioda (MKP) s ciljem prikaza energetske, a i hidrauličke učinkovitosti navedenog sustava. Rezultati provedene analize ciklusa životnih troškova, odnosno LCC analize kroz pet različitih trajanja perioda bilanciranja prikazuju da su za period

bilanciranja $t_b = 1$ dan iznosi najveći, odnosno ta varijanta je najskuplja, a samim time i najnepovoljnija, dok je najpovoljnija varijanta za period bilanciranja $t_b = 5$ dana. Razlika između spomenute dvije varijante je 7 %, a kapitalni troškovi su dominantni u odnosu na troškove zamjene te troškove upravljanja i održavanja. Ukoliko se u analizu uključi i mogućnost prodaje viška proizvodne električne energije L_{Zarade} primijećuje se trend smanjenja vrijednosti zarade od prodaje viška električne energije, koji se događa u slučaju povećanja perioda bilanciranja t_b , odnosno sa smanjenjem snage podsustava FN, $P_{el, FN}$. Povećanjem perioda bilanciranja t_b , stabilizira se ukupna vrijednost LCC_{UK} , što prikazuje da prodajom viška proizvedene električne energije, vrijednost prodaje viška proizvedene električne energije L_{Zarade} utječe na smanjenje LCC-a, odnosno ciklusa životnih troškova. Prikazana analiza, odnosno prikazane ekonomske značajke vodoopskrbnog sustava dimenzioniranog primjenom MKP omogućuju primjenu različitih strategija izgradnje UVS-a. Daljnja razrada problematike obuhvatila bi višekriterijsku analizu, uzevši u obzir ekološke i društvene kriterije, a ne samo ekonomske. ■

LITERATURA

- Armendariz-Lopez, J. F.; Luna-Leon, A.; Gonzalez-Trevizo, M. E.; Arena-Granados, A. P.; Bojorquez-Morales, G.; (2016): *Life cycle cost of photovoltaic technologies in commercial buildings in Baja California, Mexico*. Volume 87, 564-571.
- Bakelli, Y.; Hadj, A. A.; Azoui, B. (2011): Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept. *Solar Energy*, 85, 288-294.
- Boizidi, B. (2013): New sizing method of PV water pumping systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 4, 1-10.
- Branker, K., Pathak M. J. M.; Pearce J. M. (2011.). A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4470-4482.
- Đurin, B. (2014): Održivost rada urbanog vodoopskrbnog sustava. Disertacija. Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, Split.
- Đurin, B., Baić, L. (2016): Analiza održivosti urbanog vodoopskrbnog sustava pokretanog sunčevom energijom i zavisnosti veličina njegovih pojedinih dijelova. *Hrvatske vode*, 24(98), 285-294.
- Đurin, B.; Margeta, J. (2014): Analysis of the Possible Use of Solar Photovoltaic Energy in Urban Water Supply Systems, *Water*, 6, 1546-1561.
- Hidroing, d.o.o., (2004.): Regionalni vodoopskrbni sustav: Neretva, Pelješac, Korčula, Lastovo, Mljet, Novelacija pred-investicijskog programa. Split, Croatia.
- HERA (2013.): *Metodologija za određivanje iznosa tarifnih stavki za opskrbu električnom energijom u okviru univerzalne usluge*. Hrvatska energetska regulatorna agencija, Zagreb, Hrvatska.
- Kenna, J.; Gillett, W. B. (1985.): *Solar Water Pumping: A Handbook*. Intermediate Technology Publications, London, U.K.
- Margeta, J. (2011.): *Vodoopskrba naselja: planiranje, projektiranje, upravljanje, obrada vode*. Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split, Hrvatska.
- Meah K.; Ula S; Barrett S. (2008.): Solar photovoltaic water pumping-opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1162-1175.
- NN (2015.a). Metodologija za određivanje iznosa tarifnih stavki za distribuciju električne energije. *Narodne novine*, 104/15.
- NN (2015.b). Metodologija za određivanje iznosa tarifnih stavki za prijenos električne energije. *Narodne novine*, 104/15.
- NREL (1995.): *A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies*. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, SAD.
- Ristimäki, M.; Säynäjoki, A.; Jukka Heinonen, J.; Junnila, S. (2013.): Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design. *Energy*, 63, 168-179.
- SolarServer, Global Solar Industry Website, PVX spot market price index solar PV modules, <http://www.solarserver.com/service/pvx-spot-market-price-index-solar-pv-modules.html> (datum pristupa 12.12.2017.).
- Solar electricity costs, http://solarcellcentral.com/cost_page.html (datum pristupa 10.12.2017.).
- U.S. Department of Energy (2010.): The Prospect for \$1/Watt Electricity from Solar. \$1/W Workshop, Washington, USA.
- Wang Z., A i Q., Xie D., Jiang C. (2011.). A Research on Shading and LCOE of Building Integrated Photovoltaic. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) – Asia-Pacific Wuhan 2011*, 1-4.
- White International (2012.) CNP industrial pumps - cjenik 2011, Mippera, Australia.
- Yahyaoui, I.; Atieh, A.; Serna, A.; Tadeo, F., (2017.) Sensitivity analysis for photovoltaic water pumping systems. *Energetic and economic studies*, 135, 402-415.

Economic analysis of the sustainability of urban wastewater systems powered by solar photovoltaic energy

Abstract. Solar photovoltaic (PV) systems used in electrical power generation for the operation of pumping stations have been used for about 50 years. In principle, these systems consist of a PV generator, pumping station and water tank. Their use is generally justified from the environmental and social viewpoints, although not fully economically. However, these systems are the only option that can be applied in isolated, remote areas. A great disadvantage of these systems is a possibility of their failure due to insufficient strength and intensity of sunlight. The paper uses the critical period approach (CPA), which was devised precisely to solve this problem. Additionally, the paper puts the emphasis on the economic analysis to prove sustainability, i.e. present the economic balance of an urban water supply system (UWSS) dimensioned with the CPA approach. The economic analysis was carried out by applying the Life Cycle Costs (LCC) analysis for all obtained variants of a UWSS powered by PV energy. The conclusion is that PV energy has a justified potential to be used in UWWs, with the CPA inclusion to achieve sustainability.

Key words: water supply system, solar photovoltaic energy, sustainability, critical period approach, economic analysis

Analyse wirtschaftlicher Nachhaltigkeit eines städtischen mit Photovoltaik betriebenen Wasserversorgungssystems

Zusammenfassung. Solare Photovoltaiksysteme (PV-Systeme) werden schon etwa 50 Jahre zur Stromerzeugung für den Betrieb von Wassergewinnungsanlagen eingesetzt. In der Regel bestehen solche Systeme aus PV-Generator, Wassergewinnungsanlage und Wassertank. Ihr Einsatz ist vom ökologischen und sozialen Standpunkt aus gerechtfertigt, vom wirtschaftlichen Standpunkt allerdings nicht ganz. Diese Systeme sind aber die einzigen Anlagen, die in isolierten und entfernten Gebieten eingesetzt werden können. Eine große Schwäche dieser Systeme ist der Ausfall wegen ungenügender Strahlungsstärke und Strahlungsintensität. In dieser Arbeit ist die Methode des kritischen Zeitraums angewendet, die gerade zum Zwecke der Lösung dieses Problems entwickelt wurde. Zusätzlich werden in der Arbeit die wirtschaftliche Analyse betont, die die Nachhaltigkeit eines städtischen Wasserversorgungssystems bestätigt, sowie die wirtschaftliche Bilanz dieses nach der Methode des kritischen Zeitraums dimensionierten Wasserversorgungssystems dargestellt. Die wirtschaftliche Analyse beruht auf der Lebenszykluskostenanalyse für alle ermittelten Varianten des städtischen mit Photovoltaik betriebenen Wasserversorgungssystems. Es wird daher der Schluss gezogen, dass die Photovoltaikenergie im städtischen Wasserversorgungssystem gerechtfertigt eingesetzt werden kann, wobei die Nachhaltigkeit durch die Anwendung der Methode des kritischen Zeitraums erzielt wird.

Schlüsselwörter: Wasserversorgungssystem, solare Photovoltaikenergie, Nachhaltigkeit, Methode des kritischen Zeitraums, wirtschaftliche Analyse