

ANALIZA OSJETLJIVOSTI ULAZNIH VELIČINA VODOOPSKRBNOG SUSTAVA POKRETANOG SOLARNOM FOTONAPONSKOM ENERGIJOM

THE SENSITIVITY ANALYSIS OF INPUT VALUES IN WATER SUPPLY SYSTEM DRIVEN BY SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY

Lucija Baić^{1*}, 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: lucija.baic@gmail.com

Sažetak: Obnovljivi izvori energije i njihova primjena danas su vrlo aktualni radi sve veće ekološke svijesti. U ovome radu govorit će se o solarnoj fotonaponskoj (FN) energiji korištenoj za crpljenje vode, odnosno o njenoj primjeni u navodnjavanju. Sustav koji je pokretan takvom energijom sastoji se od solarnog fotonaponskog generatora i invertora, crpne stanice, vodospreme i cjevovoda. Kako je solarna fotonaponska energija stohastičke naravi, ona ima utjecaj na sve dijelove promatranog sustava ovisno o klimatskim i tehnološkim faktorima. S obzirom na klimatske i tehnološke parametre u ovome radu, napravljena je i analiza osjetljivosti pojedinih dijelova urbanog vodoopskrbnog sustava pokretanog solarnom fotonaponskom energijom. Time će se dobiti detaljniji uvid u značaj pojedinih ulaznih parametara na promjene njihovih vrijednosti, odnosno vidjet će se koji od tih faktora utječu najmanje a koji najviše, te koji od njih imaju proporcionalan i obrnuto proporcionalan utjecaj na urbani vodoopskrbni sustav pokretan FN energijom.

Gljučne riječi: analiza osjetljivosti, solarna fotonaponska energija, urbani vodoopskrbni sustav, klimatski parametri, tehnološki parametri.

Abstract: Renewable energy sources and their usage are very actual nowadays, due to greater environmental awareness. This paper deals about the solar photovoltaic (PV) energy, which is used for water pumping, or for her using in irrigation. A system which is driven by such energy consists of solar photovoltaic generator and inverter, pumping stations, water tanks and pipelines. Because solar photovoltaic energy has stochastic nature, she also has an impact on all parts of the observed system depending on climatic and technological factors. Due to climatic and technological parameters, in this paper, an analysis of the sensitivity of certain parts of urban watersupply system driven by a photovoltaic energy has been made. This will give a more detailed insight into the importance of individual input parameters due to change of their values, i.e. shows which of these factors affects at least or the most, or indicate which of them have proportional and inversely proportional impact to the urban water supply system driven by PV energy.

Keywords: sensitivity analysis, solar photovoltaic energy, urban water supply system, climate parameters, technological parameters.

Received: 15.11.2016 / Accepted: 15.05.2017

Published online: 21.07.2017

Prethodno priopćenje / Preliminary communication

1. UVOD

Solarna fotonaponska (FN) energija koristi se u mnogim granama ljudske djelatnosti kao izvor energije pa tako i u svrhu proizvodnje električne energije za crpljenje vode u sustavima za opskrbu vodom stanovništva (Chandel et al. 2015; Hamidat & Benyoucef 2009; Kelley et al. 2010) kao i za navodnjavanje (Bakelli et al 2011, Bouzidi 2013; Margeta & Glasnović 2012; Kenna & Gillett 1985; Cuadros et al. 2004). Crpljenje vode korištenjem FN energije dobiva na značaju posljednjih godina zbog smanjenih količina fosilnih goriva te povećanja njihove cijene (Chandel et al 2015). FN tehnologija je vrlo prilagodljiva, izgradnja FN sustava nije komplicirana te nadograđivanje iste na postojeće elektroenergetske sustave u svrhu njihovog unaprjeđenja može dovesti do smanjenja gubitaka energije, manjih troškova održavanja te smanjenja emisija CO₂ (Hamidat & Benyoucef 2009). Cuadros et al. (2004) u svome radu navode neke od prednosti korištenja crpki pokretanih FN energijom, kao što su lako održavanje, dugi životni vijek, izostanak potrebe za gorivom, ne onečišćuju okoliš te su jednostavne za instalaciju. Slično potvrđuju i Kelly et al. (2010)

zaključkom da je navodnjavanje korištenjem FN tehnologije tehnički i ekonomski primjenjivo sve dok postoji dovoljno velika površina na koju se mogu postaviti solarni paneli. Takve tehnologije, osobito su korisne na udaljenim mjestima u kojim postoji problem sa opskrbom gorivom (Bakelli et al. 2011). Budući da FN energija ovisi o Sunčevom zračenju, navedeno povlači sa sobom činjenicu da je takva vrsta energije stohastičke naravi (Đurin & Baić 2016). Samim time, nameće se pitanje pouzdanosti opskrbe takvom energijom. Najčešće korišteni (uobičajeni) sustav za navodnjavanje koji koristi FN energiju sastoji se od solarnog fotonaponskog (FN) sustava, crpke za vodu, vodospreme, cjevovoda, te uređaja za navodnjavanje (Đurin 2014). Vrlo je važno istaknuti da je dimenzioniranje crpne stanice, koje ovisi o površini FN sustava i o režimu rada vodospreme, značajni čimbenik koji može utjecati na pouzdanost rada cijelog FN sustava za navodnjavanje (Bouzidi 2013). U svom radu (Margeta & Glasnović 2012) također ističu da korištenjem solarne FN energije u takvim sustavima nastaju novi tipovi održive hibridne elektrane koja može raditi kontinuirano, koristeći

solarnu energiju kao izvor primarne energije te vodu za skladištenje energije. Dvije su metode pretvorbe solarne energije u mehaničku energiju potrebnu za crpljenje (Kenna & Gillett 1985). Prva, o kojoj se govori u ovoj knjizi, odnosi se na izravnu pretvorbu Sunčevog zračenja u električnu energiju pomoću FN ćelija (FN postrojenja), a druga se odnosi na pretvorbu Sunčeve energije u toplinu koja se zatim može koristiti za pogon crpke (Solarna termalna – ST postrojenja) (Kenna & Gillett 1985). Sustavi navodnjavanja pokretani solarnom FN energijom mogu osigurati pouzdanu, ekonomski isplativu i ekološki prihvatljivu energiju potrebnu za navodnjavanje. Mnoge su prednosti korištenja takvog izvora energije u svrhe navodnjavanja, što uključuje poboljšanje kvalitete ljudskog života u životnoj zajednici (povećana proizvodnja i doprinos sigurnosti opskrbe hranom), povećanu socijalnu korist (smanjenje siromaštva, kao i redukcija emisija u okoliš) te smanjenje potrošnje fosilnih goriva (IRENA 2016).

U ovom radu napravljena je analiza osjetljivosti kako bi se dobio pregled važnosti ulaznih parametara i uvid u njihovu osjetljivost na promjene njihovih vrijednosti. To daje mogućnost uvida u važnost pojedinog parametra, odnosno ulazne vrijednosti parametara, kao i mogućnost određivanja koliko će neka promjena vrijednosti pojedinog ulaznog parametra utjecati na veličinu svakog podsustava, odnosno na promjenu vrijednosti snage FN generatora, volumena vodospreme i kapaciteta crpne stanice. Postupak analize osjetljivosti, odnosno određivanja koeficijenta osjetljivosti K_k izvršen je uobičajenim izračunom parcijalnih derivacija izraza (Hamby 1994) za snagu FN generatora $P_{el, FN}$, volumena vodospreme V_{op} te potrebnog kapaciteta crpne stanice Q_{CS} po svim parametrima a_k koji ulaze u svaki pojedini izraz navedenih veličina pojedinih podsustava.

2. ANALIZA OSJETLJIVOSTI

Za potrebe ovog rada, analiza osjetljivosti napravljena je u svrhu pregleda ulaznih parametara te kako bi se vidjelo koji je od svih ulaznih parametara najosjetljiviji na promjene vrijednosti. Drugim riječima, analiza osjetljivosti napravljena je kako bi se vidjelo na koji od parametara treba obratiti pažnju kod zadavanja njegove ulazne vrijednosti (Hamby 1994). Time će se vidjeti i koliko će promjena vrijednosti pojedinog ulaznog parametara utjecati na vrijednosti podsustava, odnosno na promjenu vrijednosti snage FN generatora, operativnog volumena vodospreme i kapaciteta crpne stanice. Prvi korak je izrada analize osjetljivosti ulaznih parametara s obzirom na jednadžbe za snagu FN generatora $P_{el, FN}$, potrebni volumen vodospreme V_{op} , kao i kapacitet crpne stanice Q_{CS} . Tim korakom se želi vidjeti koji od ulaznih parametara ima(ju) najveći utjecaj na veličine $P_{el, FN}$, V_{op} i Q_{CS} , a koji najmanji utjecaj.

Izraz za snagu FN generatora $P_{el, FN}$ (W) glasi (Margeta & Glasnović 2011):

$$P_{el, FN(i)} = \frac{2.72H_{CS(i)}}{[1 - \alpha_c(T_{cel(i)} - T_0)]\eta_{CSI}\eta_S E_{S(i)}} V_{CS(i)} \quad i = 1, 2, \dots, 365 \text{ dana} \quad (1)$$

gdje je:

- H_{CS} manometarska visina crpljenja (m);
- E_s srednja dnevna jakost Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu (kWh/m^2);
- V_{CS} precrpljena količina vode posredstvom FN generatora (m^3);
- α_c temperaturni koeficijent solarne ćelije ($^{\circ}\text{C}^{-1}$);
- η_S postotak iskorištenja jakosti Sunčevog zračenja tj. koeficijent kojim se množi E_s zbog varijabilnosti Sunčeve energije tijekom dana (godine) (%);
- η_{CS} učinkovitost crpne stanice (%);
- η_I učinkovitost invertora (%);
- η_{CSI} prosječna učinkovitost invertora i crpke koja se može izraziti preko:

$$H_{CSI} = \eta_P \times \eta_I \quad (2)$$

- T_{cel} temperatura solarnih ćelija i ona je izražena preko meteoroloških parametara:

$$T_{cel(i)} = 2.7E_{S(i)} + T_{a(i)} \quad (3)$$

- T_a ulazna srednja dnevna temperatura zraka ($^{\circ}\text{C}$);
- T_0 temperatura u standardnim testnim uvjetima i iznosi 25°C (Kenna & Gillett 1985).

Potrebni volumen vodospreme V_{op} dobije se iz:

$$V_{op(i)} = \max \left[\sum_{i=1}^{24} (Q_{CS(i,t)} - Q_{OV(i,t)}) \right], I \leq t \leq i \quad (4)$$

gdje $t = 1, \dots, 24$ h, $i = 1, \dots, 365$ dana.

Kapacitet crpne stanice dobije se iz izraza:

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

Potrebna snaga crpne stanice dobije se iz izraza:

$$P_{CS} = \frac{\rho g Q_{CS} H_{CS}}{\eta_{CS}} \quad (6)$$

Iz jednadžbe (6) vidljivo je da u stvari kapacitet crpne stanice Q_{CS} definira kolika će biti snaga crpne stanice P_{CS} , jer su sve ostale veličine konstantne. Veličine H_{CS} , α_c , T_0 , η_{CSI} , ρ , g , η_{CS} , T_{cel} , E_s , T_s i T_a su promjenjive za sve proračune navedene u jednadžbama (1), (4) – (6).

Analiza osjetljivosti primijeniti će se korištenjem parcijalnih derivacija. Općenito gledano, postupak analize osjetljivosti, odnosno određivanja koeficijenta osjetljivosti K_k sastoji se od slijedećih postupaka. U prvom koraku potrebno je odrediti prve parcijalne derivacije izraza za snagu FN generatora $P_{el, FN}$, volumena vodospreme V_{op} , te potrebnog kapaciteta crpne stanice Q_{CS} po svim parametrima a_k koji ulaze u izraz za svakoga od njih. U dobivene izraze za parcijalne derivacije potrebno je uvrstiti odgovarajuće veličine ulaznih parametara a_k .

Općeniti izraz za te parcijalne derivacije je:

$$K_k = \frac{\partial f}{\partial a_k} \quad (7)$$

gdje f označava određenu funkciju (u ovom slučaju to je snaga FN generatora $P_{el, FN}$, potrebni operativni volumen vodospreme V_{op} , te kapacitet crpne stanice Q_{CS}). Deriviranjem f po svakome od a_k i uvrštavanjem vrijednosti a_k u taj dobiveni izraz za derivaciju dobije se apsolutna vrijednost koeficijenta osjetljivosti K_k za svakoga od a_k (Hamby 1994). U tom slučaju je i jedinica od K_k jedinica funkcije f podijeljena sa jedinicom funkcije a_k . Ovakva veličina koeficijenta K_k nije pogodna za međusobno uspoređivanje te je tada preporučljivo tu dobivenu vrijednost pomnožiti sa vrijednosti a_k , odnosno sa vrijednošću parametra po kojem se radila derivacija, čime se dobiju vrijednosti pogodnije za međusobno uspoređivanje (Hamby 1994).

Ukoliko se pogleda **jednadžba (1)**, na snagu FN generatora $P_{el, FN}$ utječu klimatski faktori, kao i faktori vezani uz karakteristike FN ćelije i crpke za vodu. Jednadžba za određivanje potrebnog operativnog volumena vodospreme V_{op} , odnosno **jednadžba** bilance vodospreme **(4)** sastoji se od dotoka vode u vodospremu nastalog radom crpne stanice, odnosno pripadnim kapacitetom crpne stanice Q_{CS} . Izlaz vode iz vodospreme Q_{OV} generiran je potrebama stanovništva, a te potrebe imaju isti režim tijekom svakog dana, s time da se mijenjaju tražene količine vode tijekom godine. Što se tiče potrebnog kapaciteta crpne stanice Q_{CS} , na njega također utječu i klimatski parametri, kao i parametri crpne stanice. Isto se može primijeniti i sa snagom crpne stanice P_{CS} , no analiza osjetljivosti napravljena za kapacitet crpne stanice Q_{CS} ujedno pokazuje utjecaj ulaznih parametara i na snagu crpne stanice P_{CS} , budući da su tamo uključeni svi ulazni parametri i za snagu crpne stanice P_{CS} .

2.1. ANALIZA OSJETLJIVOSTI FN GENERATORA I INVERTORA $P_{el, FN}$

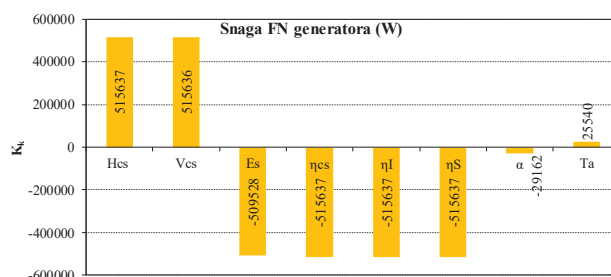
Ulazni parametri za analizu osjetljivosti potrebne snage FN generatora $P_{el, FN}$ su (Đurin & Margeta 2014; Đurin & Baić 2016):

- H_{CS} manometarska visina crpljenja, iznosi 82.41 m;
- E_s ulazna srednja dnevna jakost Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu, 0.93 kWh/m²;
- T_a ulazna srednja dnevna temperatura zraka, iznosi 10.5 °C;
- V_{CS} precrpljena količina vode posredstvom FN generatora, iznosi 850 m³ na dan;
- α_c temperaturni koeficijent solarne ćelije, iznosi 0.005 °C⁻¹;
- η_s postotak iskorištenja jakosti Sunčevog zračenja tj. koeficijent kojim se množi E_s zbog varijabilnosti Sunčeve energije tijekom dana (godine), usvojeno je radi sigurnosti da iznosi 0.5 (50 %);
- η_{CS} učinkovitost crpne stanice, iznosi 0.9 (90 %);
- η_I učinkovitost invertora, iznosi 0.833 (83.3 %);
- η_{CSI} prosječna učinkovitost invertora i crpke, iznosi 0.75 (75 %).

Proračunata snaga FN generatora iz **(1)** iznosi 512.50 kW. Za ovaj slučaj analize snage FN generatora, korištenjem **jednadžbe (7)** dobije se izraz:

$$K_k = \frac{\partial P_{el, FN}}{\partial a_k} \quad (8)$$

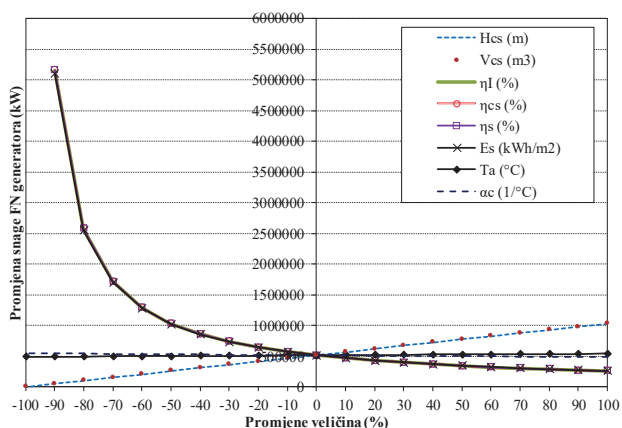
pri čemu su $a_k = H_{CS}, E_s, T_a, V_{CS}, \alpha_c, \eta_s, \eta_{CS}, \eta_I$. Jednostavnije rečeno, potrebno je derivirati **jednadžbu (1)**, $P_{el, FN}$, prema svim prethodno navedenim parametrima a_k . Tada se u dobivene derivacije po svakome od a_k trebaju uvrstiti njihove vrijednosti, čime se dobiju relativne vrijednosti koeficijenata osjetljivosti za svaki od ulaznih parametara snage FN generatora $P_{el, FN}$. Kako bi se dobile apsolutne vrijednosti koeficijenata osjetljivosti K_k prikazane na **Slici 1**, za svaki od tih parametara, potrebno je pomnožiti relativne vrijednosti koeficijenata osjetljivosti sa pripadajućom vrijednosti parametra po kojem se derivacija radila.



Slika 1. Apsolutne vrijednosti koeficijenata osjetljivosti K_k za svaki od ulaznih parametara snage FN generatora $P_{el, FN}$

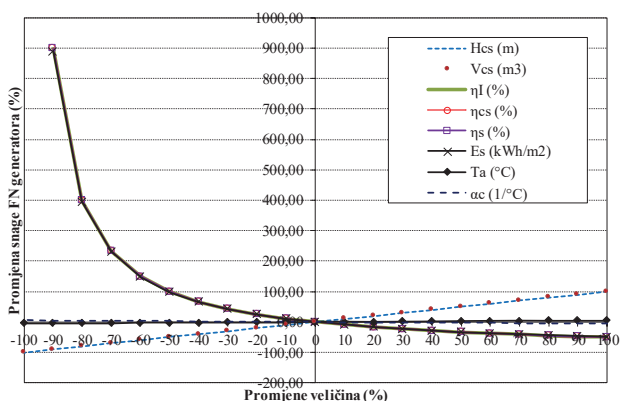
Iz **Slike 1** vidljivo je da najjači proporcionalni utjecaj (povećanje vrijednosti parametra - povećanje vrijednosti snage FN generatora $P_{el, FN}$) na snagu FN generatora $P_{el, FN}$ imaju manometarska visina crpljenja H_{CS} i količina precrpljene vode V_{CS} . Iz njihovih vrijednosti može se zaključiti da navedeni parametri imaju podjednaki učinak na snagu FN generatora $P_{el, FN}$, dok utjecaj temperature zraka T_a nije značajan. Isto tako, vidljivo je da jakost Sunčevog zračenja E_s , postotak iskorištenja jakosti Sunčevog zračenja η_s , koeficijent učinkovitosti crpne stanice η_{CS} i koeficijent učinkovitosti invertora η_I imaju značajan obrnuto proporcionalni učinak (povećanje vrijednosti parametra - smanjenje vrijednosti snage FN generatora $P_{el, FN}$) na snagu FN generatora $P_{el, FN}$. Također se iz njihovih vrijednosti vidi da je njihov učinak podjednak, dok utjecaj temperaturnog koeficijenta solarne ćelije α_c nije značajan.

Dodatno je napravljena i analiza osjetljivosti snage FN generatora $P_{el, FN}$ na način da su vrijednosti svih ulaznih parametara mijenjane u rasponu $\pm 100\%$ u koracima od 10% s obzirom na svoju ulaznu vrijednost. Na **Slici 2** prikazano je kako i u kolikoj mjeri promjene ulaznih veličina utječu na snagu FN generatora $P_{el, FN}$, kao i kako su te promjene izražene apsolutno (u njihovim jedinicama).



Slika 2. Prikaz utjecaja apsolutnih promjena veličina ulaznih parametara na snagu FN generatora $P_{el, FN}$ (W)

Promjene pojedinih ulaznih podataka s matematičke strane jesu ispravne, ali nisu s praktične strane (npr. promjene učinkovitosti crpke η_{CS} i invertora η_I u rasponu od $\pm 100\%$ nisu stvarne jer se time dobije da se njihove učinkovitost kreću više od 100% , a to sa praktičnog pogleda nije moguće). Taj postupak dokazuje analizu osjetljivosti provedenu postupcima parcijalnih derivacija prikazanih na Slici 1. Također, na Slici 2 se vidi da se ovim postupkom dobije i uvid u utjecaj povećanja pojedinih vrijednosti parametara na snagu FN generatora $P_{el, FN}$. Isto tako se Slika 2 može prikazati i na osnovu relativnih promjena snage FN generatora $P_{el, FN}$ na način da se umjesto u kW izraze u postocima, što je i napravljeno te prikazano na Slici 3.



Slika 3. Utjecaj relativnih promjena veličina ulaznih parametara na snagu FN generatora $P_{el, FN}$ (W)

2.2. ANALIZA OSJETLJIVOSTI OPERATIVNOG VOLUMENA VODOSPHERE V_{op}

Analiza osjetljivosti operativnog volumena vodospreme V_{op} napravljena je tako da se promatra kako dotok vode u vodospremu, odnosno kapacitet crpne stanice Q_{CS} , te izlaz vode iz vodospreme utječu na volumen vodospreme. Drugim riječima, ovdje se promatra razlika između dotoka vode u vodospremu i izlaza vode iz vodospreme, budući da upravo ta razlika ΔV (manjak ili višak) definira volumen vodospreme (najveći višak

volumena vodospreme zbrojen sa apsolutnom vrijednosti najvećeg manjka), (Margeta 2010). Ulazni parametri koji ulaze u tu razliku ostaju isti kao i u prethodnoj analizi osjetljivosti snage FN generatora $P_{el, FN}$ s time da umjesto precrpjene količine vode V_{CS} ovdje ulazi snaga $P_{el, FN}$, te se radi analiza utjecaja vremena crpljenja T_S (h), kao i dnevne potrebne količine vode V_{OV} (podrazumijeva se da je ovo dnevna maksimalna potreba za vodom, izražena u m^3/dan) i koeficijenta satne neravnomjernosti potrošnje vode K_h . Prema tome, jednačina koja se analizira je:

$$\Delta V = Q_{CS} - Q_{OV} \quad (9)$$

odnosno:

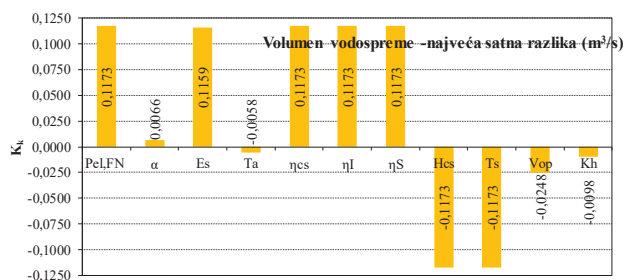
$$\Delta V = \frac{P_{el, FN(i)}}{T_{S(i)}} \frac{[1 - \alpha_c (T_{cel(i)} - T_0)] \eta_{CS} \eta_S E_{S(i)}}{2.72 H_{CS(i)}} - \frac{V_{OV}}{24} \times K_h \quad (10)$$

Trajanje Sunčevog zračenja T_S će ovdje biti izraženo u (s), a ne u (h) radi dimenzijske korektnosti vremena trajanja Sunčevog zračenja. Dobivena vrijednost volumena vodospreme prema (4) iznosi $V_{op} = 1100 m^3$.

Opći izraz za koeficijent osjetljivosti potrebnog volumena vodospreme je:

$$K_k = \frac{\partial \Delta V}{\partial a_k} \quad (11)$$

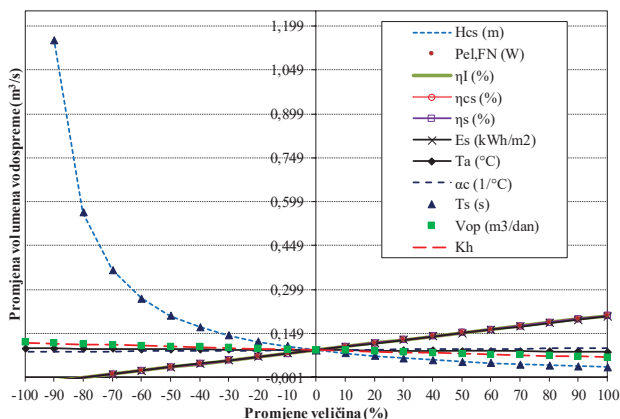
Ako se primijeni analogan postupak kao i kod analize osjetljivosti snage FN generatora $P_{el, FN}$, odnosno primjenjujući jednačinu (11), dobiju se vrijednosti koeficijenta osjetljivosti za potrebni volumen vodospreme V_{op} , što je prikazano na Slici 4.



Slika 4. Apsolutne vrijednosti koeficijenta osjetljivosti K_k za svaki od ulaznih parametara volumena vodospreme V_{op}

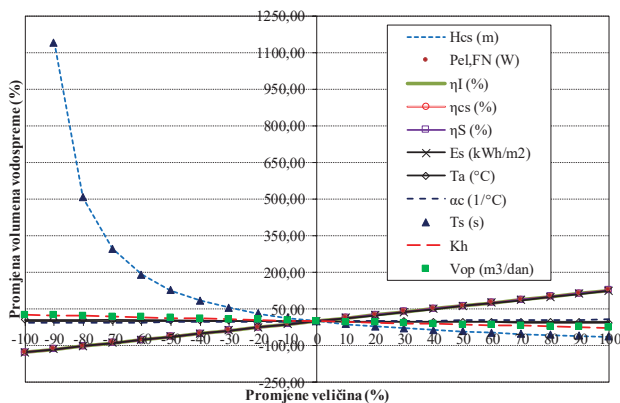
Iz Slike 4 vidljivo je da najveći proporcionalni utjecaj (veća vrijednost parametra - veća vrijednost operativnog volumena vodospreme) na operativni volumen vodospreme V_{op} imaju snaga FN generatora $P_{el, FN}$, jakost Sunčevog zračenja E_s , učinkovitosti crpne stanice η_{CS} i invertora η_I , te koeficijent iskorištenja jakosti Sunčevog zračenja η_S , dok utjecaj toplinskog koeficijenta solarne ćelije α_c nije značajan. S druge strane, obrnuto proporcionalni utjecaj (veća vrijednost parametra - manja vrijednost operativnog volumena vodospreme) na V_{op} imaju manometarska visina dizanja H_{CS} (m) i trajanje Sunčevog zračenja T_S (s, h). Ovdje je zanimljivo da potreba za vodom V_{OV} (m^3) ima mali obrnuto

proporcionalni utjecaj na V_{op} , isto kao i koeficijent satne neravnomjernosti potrošnje K_h , što se objašnjava time da je kod crpljenja rad crpke, gdje on ovisi (između ostaloga) o trajanju Sunčevog zračenja, u kratkom periodu vremena T_S . Drugim riječima, u kratkom periodu vremena T_S mora se precrpsti velika količina vode, a samim time je i kapacitet crpke veći nego da se npr. crpi voda kroz 24 sata ili neki period vremena duži od T_S . Tražena satna potreba za vodom je sigurno manja od ovog dotoka vode u jednom satu. Nakon provedenog deriviranja, tj. nakon uvrštavanja svih vrijednosti, vidi se da je veću pažnju potrebno obratiti na rad crpne stanice. Isto se može vidjeti i kod koeficijenta satne neravnomjernosti K_h . U tom slučaju je maksimalna potreba za vodom upravo u onom satu kad se crpi voda u vodospremu. Ovdje se usvojilo (iz proračunatih volumena vodospreme) da se crpljenje odvija tijekom $T_S = 2$ sata gdje se poklopilo da je upravo u tom periodu i najveća potrošnja vode, no ipak postoji razlika između dotoka vode i potrošnje vode, pri čemu je dotok veći. Veličine ulaznih parametara volumena vodospreme V_{op} s obzirom na promjene svojih vrijednosti prikazane su na **Slici 5**.



Slika 5. Prikaz utjecaja apsolutnih promjena veličina ulaznih parametara na operativni volumen vodospreme V_{op} (m^3)

Sa **Slike 5** može se vidjeti da se zaključci vezani uz **Sliku 4** poklapaju i sa promjenama na **Slici 5**. Apsolutne promjene ulaznih parametara prikazanih na **Slici 5**, prikazane su i kao relativne promjene na **Slici 6**.



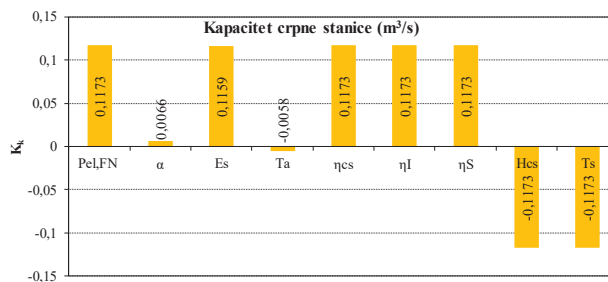
Slika 6. Prikaz relativnih promjena veličina ulaznih parametara na volumen vodospreme V_{op} (m^3)

2.3. ANALIZA OSJETLJIVOSTI KAPACITETA CRPNE STANICE Q_{CS}

Proračunati kapacitet crpne stanice prema (5) iznosi $Q_{CS} = 118$ l/s. Korištenjem **jednadžbi (5) i (7)** dobije se izraz na osnovu kojeg se izračunava koeficijent osjetljivosti kapaciteta crpne stanice Q_{CS} :

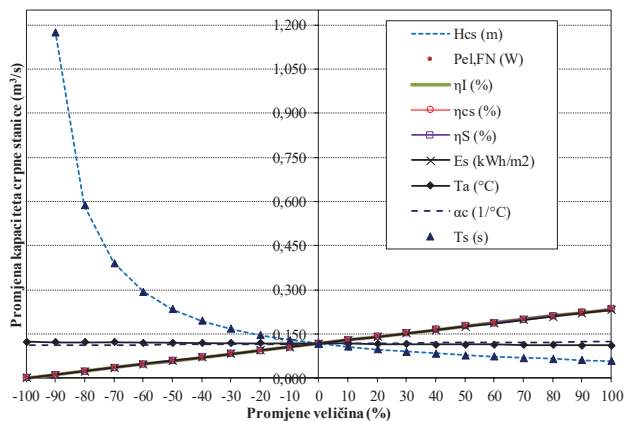
$$K_k = \frac{\partial Q_{CS}}{\partial a_k} \quad (12)$$

Kao i kod prethodnih analiza osjetljivosti snage FN generatora $P_{el, FN}$ i volumena crpne stanice V_{op} , analognim postupkom su dobiveni koeficijenti osjetljivosti K_k , što je prikazano na **Slici 7**.



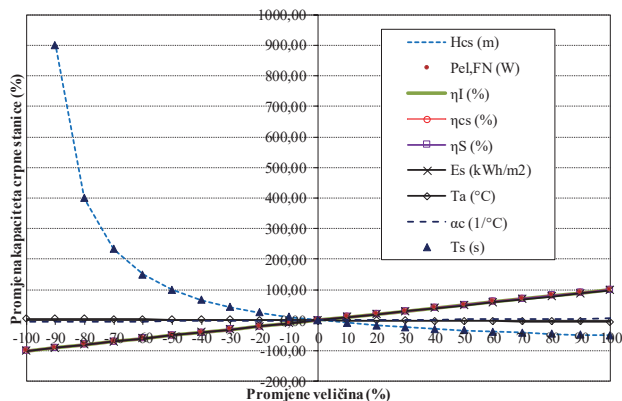
Slika 7. Apsolutne vrijednosti koeficijenta osjetljivosti K_k za svaki od ulaznih parametara kapaciteta crpne stanice Q_{CS}

Kao što je vidljivo iz **Slike 7**, najveći proporcionalni utjecaj (veća vrijednost parametra - veća vrijednost kapaciteta crpne stanice) na kapacitet crpne stanice Q_{CS} imaju snaga FN generatora $P_{el, FN}$, jakost Sunčevog zračenja E_s , učinkovitosti crpne stanice η_{CS} i invertora η_I , te koeficijent iskorištenja jakosti Sunčevog zračenja η_s , dok utjecaj toplinskog koeficijenta solarne ćelije α_c , kao i srednje dnevne temperature zraka T_a nije značajan. S druge strane, obrnuto proporcionalni utjecaj na V_{op} imaju manometarska visina dizanja H_{CS} i trajanje Sunčevog zračenja T_S (s, h). Promjene vrijednosti ulaznih parametara kapaciteta crpne stanice Q_{CS} s obzirom na promjene njihovih vrijednosti prikazane su na **Slici 8**.



Slika 8. Prikaz utjecaja apsolutnih promjena veličina ulaznih parametara na kapacitet crpne stanice Q_{CS} (m^3/s)

Na Slici 8 prikazane su veličine na kojima se vidi preklapanje sa dobivenim zaključcima na osnovi Slike 7. Relativne promjene veličine ulaznih parametara na kapacitet crpne stanice Q_{CS} (m^3/s) prikazane su na Slici 9.



Slika 9. Relativne promjene veličine ulaznih parametara na kapacitet crpne stanice Q_{CS} (m^3/s)

3. ZAKLJUČAK

U ovome radu prikazana je analiza osjetljivosti pojedinih dijelova urbanog vodoopskrbnog sustava pokretanog solarnom fotonaponskom (FN) energijom. Cilj je bio dobiti uvid u osjetljivost ulaznih parametara s obzirom na promjene vrijednosti. Time se dobio uvid u to koliko će promjena vrijednosti pojedinog ulaznog parametara utjecati na vrijednosti podsustava, odnosno na promjenu vrijednosti snage FN generatora, operativnog volumena vodospreme i kapaciteta crpne stanice. Analiza napravljena s obzirom na snagu podsustava FN (FN generator i inverter) pokazala je da najjači proporcionalni utjecaj na snagu FN generatora $P_{el, FN}$ imaju manometarska visina crpljenja H_{CS} i količina precrpljene vode V_{CS} , te da ti parametri imaju podjednaki značaj. Utjecaj temperature zraka ovdje T_a nije značajan. Također se može zaključiti da jakost Sunčevog zračenja E_s , postotak iskorištenja jakosti Sunčevog zračenja η_s , koeficijent učinkovitosti crpne stanice η_{CS} i koeficijent učinkovitosti invertora η_I imaju značajan obrnuto proporcionalni učinak na snagu FN generatora $P_{el, FN}$. Iz njihovih vrijednosti se vidi da imaju podjednak učinak na podsustav, dok utjecaj toplinskog koeficijenta solarne ćelije α_c nije značajan. Analiza osjetljivosti s obzirom na operativni volumen vodospreme pokazala je da najveći proporcionalni utjecaj na operativni volumen vodospreme V_{op} imaju snaga FN generatora $P_{el, FN}$, jakost Sunčevog zračenja E_s , učinkovitost crpne stanice η_{CS} i invertora η_I , te koeficijent iskorištenja jakosti Sunčevog zračenja η_s , dok utjecaj toplinskog koeficijenta solarne ćelije α_c nije značajan. Obrnuto proporcionalni utjecaj ovdje imaju manometarska visina dizanja H_{CS} (m) i trajanje Sunčevog zračenja T_s . Prema provedenoj analizi može se zaključiti da veliku pažnju treba obratiti na rad crpne stanice. Što se tiče rezultata analize osjetljivosti s obzirom na kapacitet crpne stanice, dobiveni su zaključci da najveći proporcionalni utjecaj na kapacitet crpne stanice Q_{CS} imaju snaga FN generatora $P_{el, FN}$, jakost Sunčevog zračenja E_s , učinkovitost crpne stanice η_{CS} i invertora η_I , te koeficijent

iskorištenja jakosti Sunčevog zračenja η_s , dok utjecaj toplinskog koeficijenta solarne ćelije α_c , kao i srednje dnevne temperature zraka T_a nisu značajni. Isto tako vidi se da obrnuto proporcionalni utjecaj na V_{op} imaju manometarska visina dizanja H_{CS} i trajanje Sunčevog zračenja T_s . Ovim analizama osjetljivosti pojedinih dijelova urbanog vodoopskrbnog sustava pokretanog FN energijom dobivene se smjernice temeljem kojih je vidljivo na koji od ulaznih parametara je potrebno obratiti veću pozornost, a na koji manju, s obzirom na njihov utjecaj. Vidljivo je da klimatski i tehnološki parametri podjednako utječu na snagu FN generatora, volumen vodospreme i kapacitet crpne stanice.

4. 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: 288-294
- Bouzidi B (2013) New sizing method of PV water pumping systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 4: 1-10
- Chandel S S, Nagaraju Naik M, Chande R (2015) Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy*, 49: 1084-1099
- Cuadros F, López-Rodríguez F, Marcos A, Coello J (2004) A procedure to size solar-powered irrigation (photoirrigation) schemes. *Solar Energy*, 75: 465-473
- Đurin B (2014) Održivost rada urbanog vodoopskrbnog sustava. Disertacija. Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, Split.
- Đurin B, Baić L (2016) Functional dependencies of the size of certain parts of the energetically and hydraulically sustainable urban water supply system driven by solar photovoltaic energy, XXV. znanstveni skup o energiji i zaštiti okoliša, ENERGIJA I OKOLIŠ 2016, Rijeka, Hrvatski savez za sunčevu energiju Rijeka: 337-348
- Đurin B, Margeta J (2014) Analysis of the possible use of solar photovoltaic energy in urban water supply systems, *Water*, 6: 1546-1561
- Hamby D M (1994) A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models, *Environmental Monitoring and Assessment* 32(2): 135-154
- Hamidat A, Benyoucef B (2009) Systematic procedures for sizing photovoltaic pumping system, using water tank storage. *Energy Policy*, 37: 1489-1501
- IRENA (2016) Solar pumping for irrigation: Improving livelihoods and sustainability, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Kelley L C, Gilbertson E, Sheikh A, Eppinger S D, Dubowsky S (2010) On the feasibility of solar-powered irrigation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 2669-2682
- Kenna, J, Gillett B (1985) *Solar Water Pumping: A Handbook*, Intermediate Technology Publications. London, United Kingdom.
- Margeta, J (2010) *Vodoopskrba naselja: planiranje, projektiranje, upravljanje, obrada vode - 1. izd.* Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split, Hrvatska.
- Margeta J, Glasnović Z (2011) Exploitation of temporary water flow by hybrid PV-hydroelectric plant. *Renewable Energy* 36(8): 2268-2277
- Margeta J, Glasnović Z (2012) Theoretical settings of photovoltaic-hydro energy system for sustainable energy production. *Solar Energy*, 86 (3): 972-982