Održivost rada urbanog vodoopskrbnog sustava

Đurin, Bojan

Doctoral thesis / Disertacija

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

https://doi.org/10.31534/DocT.033.DurB

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:895583

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Splitu
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Bojan Đurin, dipl. ing. geoteh.

ODRŽIVOST RADA URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA

D i s e r t a c i j a

Split, 2014.

Sveučilište u Splitu
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Bojan Đurin, dipl. ing. geoteh.

ODRŽIVOST RADA URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA

D i s e r t a c i j a

Split, 2014.

Bojan Đurin, dipl. ing. geoteh.
Redni broj: 033

Ova disertacija predana je na ocjenu Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu u svrhu stjecanja akademskog stupnja doktora tehničkih znanosti u znanstvenom polju građevinarstvo.

Mentor: prof. dr. sc. Jure Margeta, dipl. ing. građ.

Povjerenstvo za ocjenu:

prof. dr. sc. Jure Margeta, dipl. ing. građ.
izv. prof. dr. sc. Mijo Vranješ, dipl. ing. građ.
doc. dr. sc. Željko Rozić, dipl. ing. građ.

Povjerenstvo za obranu:

prof. dr. sc. Jure Margeta, dipl. ing. građ.

izv. prof. dr. sc. Mijo Vranješ, dipl. ing. građ.

doc. dr. sc. Željko Rozić, dipl. ing. građ.

Rad je obranjen dana: 28. kolovoza 2014.

MP

T a j n i c a:

Saša Delić, dipl. iur.

Rad sadrži:

103 stranice teksta

44 slika

6 tablica

3 priloga

105 citiranih referenci

Posvećeno mojoj obitelji...

"...I live my life for the stars that shine,
People say it's just a waste of time,
When they said I should feed my head,
That to me was just a day in bed,
I'll take my car and drive real far,
You're not concerned about the way we are,
In my mind my dreams are real,
Now you're concerned about the way I feel,
Tonight, I'm a rock 'n' roll star!"

Noel Gallagher, Oasis

Na samome početku, potrebno je naglasiti da ova disertacija nebi mogla biti napravljena bez Božje pomoći. Zahvaljujem se obitelji na podršci i što su mi omogućili da se u životu mogu baviti sa svim onim što volim. Velika hvala mojem mentoru prof.dr.sc. Juri Margeti na ukazanom povjerenju, suradnji, strpljenju i požrtvovnosti tijekom svih ovih godina koliko surađujemo. Njegovi savjeti, ideje i pomoć oko ove disertacije su neizmjerni. Hvala prof.dr.sc. Mladenu Kranjčecu s mojeg matičnog Geotehničkog fakulteta u Varaždinu, koji me uveo u okruženje akademske zajednice. Velika hvala mojim kolegama iz Splita izv.prof.dr.sc. Hrvoju Gotovcu, dr.sc. Veljku Srziću, dr.sc. Ivi Andriću i Toniju Kekezu, dipl.ing., na nesebičnoj i bezrezervnoj pomoći oko svih tehničko-administrativnih obveza tijekom Poslijediplomskog studija, kao i na vrijednim i kvalitetnim raspravama, te na iskazanoj moralnoj podršci. Velika hvala mojim kolegama s Geotehničkog fakulteta na podršci tijekom svih ovih, a vjerujem i tijekom narednih godina. Hvala prijatelju Mariju Svrti, dipl. ing., na pomoći oko tehničkog uređenja teksta disertacije.

Također se zahvaljujem mojoj budućoj supruzi Martini Filipović za strpljenje i razumijevanje, kao i nesebičnu potporu tijekom svih dobrih i loših događaja koji su se odvijali u mojem privatnom i profesionalnom životu.

Hvala mojim prijateljima Draženu, Davidu, Mariju, Franji, Stipi i Diniju, te Mirni, Jasmini, Nataši i Vesni na podršci, kao i zajedničkim druženjima koja su mi u trenucima odmora pomogla da "napunim baterije" i da vidim da ima onih koji vjeruju u mene.

S a d r ž a j

1. UVOD _____ 1

1.1. Problematika održivosti i njezine značajke _____ 1

1.2. Klimatske promjene i urbani vodoopskrbni sustav _____ 5

2. PRISTUPI I PRAKSA RJEŠAVANJA PROBLEMA ODRŽIVOSTI URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA PREMA LITERATURI _8

3. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE I ODRŽIVOST RADA URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA _____ 17

4. KONCEPT PRIMJENE SOLARNE FOTONAPONSKE ENERGIJE U URBANOM VODOOPSKRBNOM SUSTAVU _____ 22

4.1. Općenito o solarnoj fotonaponskoj energiji _____ 22

4.2. Energija i voda u vodoopskrbnom sustavu _____ 26

4.3. Integracija solarnog fotonaponskog sustava u urbani vodoopskrbni sustav _____ 31

4.3.1. Dimenzioniranje podsustava PV (PV generator i invertor) _____ 33

4.3.2. Dimenzioniranje podsustava CS (Crpna Stanica) _____ 34

4.3.3. Dimenzioniranje podsustava V (Vodosprema) _____ 37

4.3.4. Dimenzioniranje podsustava VM (Vodoopskrbna Mreža) _____ 39

5. METODOLOGIJA DIMENZIONIRANJA I IZBORA RJEŠENJA ENERGETSKI ODRŽIVOG URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA UZ KORIŠTENJE SOLARNE FOTONAPONSKE ENERGIJE _____ 41

5.1. Metoda kritičnog perioda _____ 41

5.1.1. Kritični period za dimenzioniranje podsustava PV (PV generator i invertor) 43

5.1.2. Kritični period za dimenzioniranje podsustava CS (Crpna stanica) 44
5.1.3. Kritični period za dimenzioniranje podsustava V (Vodosprema) 44
5.1.4. Ulazni podaci 47
5.2. Formiranje članova vremenskih serija precrpljenih količina vode i potrebnih količina vode 47
5.3. Metodologija rangiranja i izbora rješenja 51
5.3.1. Uvodna razmatranja 51
5.3.2. Rangiranje i izbor rješenja 52
5.3.3. Ekonomska analiza 53
5.3.4. Višekriterijska analiza 56
6. PRIMJER I ANALIZA REZULTATA 58
6.1. Ulazne veličine 59
6.2. Rezultati 62
6.2.1. Kritični period 62
6.2.2. Veličina podsustava PV (PV generator i invertor) 63
6.2.3. Veličina podsustava CS (Crpna stanica) 66
6.2.4. Veličina podsustava V (Vodosprema) 67
6.2.5. Površina solarnih ćelija 69
6.2.6. Međusobna ovisnost dobivenih veličina 70
6.2.7. Hidraulički kapacitet Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava 74
6.2.8. Energetski kapacitet Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava 76
6.3. Ekonomske značajke Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava 78
6.4. Ekološke značajke Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava 83
6.5. Društvene značajke Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava 85
7. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA 87
7.1. SWOT analiza 87
7.1.1. Prednosti EOUVS-a 87

7.1.2. Nedostaci EOUVS-a 89
7.1.3. Mogućnosti EOUVS-a 89
7.1.4. Moguće prijetnje EOUVS-u 90
7.2. Zaključci 91
7.2.1. Koncept i primjena 91
7.2.2. Ulazne pretpostavke i metodologija 92
7.2.3. Period bilanciranja 92
7.2.4. Kritični period za dimenzioniranje podsustava PV (PV generator i invertor), podsustava CS (Crpna Stanica) i podsustava V (Vodosprema) 93
7.2.5. Formiranje vremenskih serija 93
7.3. Smjernice za daljnja istraživanja 93
8. BIBLIOGRAFSKE JEDINICE 95
PRILOG P-1 105
PRILOG P-2 111
PRILOG P-3 116
ŽIVOTOPIS 127

UDK [628.11/.14:621.311.243](043.3)

Bojan Đurin, dipl.ing.geoteh.

Održivost rada urbanog vodoopskrbnog sustava

Sažetak:
Opskrba vodom je od iznimnog značaja za održivost urbanih područja. Poznata je činjenica da se u tu svrhu koriste sve veće i veće količine energije iz fosilnih goriva, čija cijena se svakodnevno povećava. Kao alternativno rješenje nameće se korištenje Obnovljivih Izvora Energije (OIE), posebice Solarne Fotonaponske (PV) energije. Ova disertacija na inovativan i originalan način dokazuje održivost Urbanog Vodoopskrbnog Sustava (UVODS-u) uz primjenu PV energije. Koncept korištenja PV energije u UVODS-u u ovoj disertaciji zasniva se na Metodi Kritičnog Perioda (MKP). U sklopu MKP-a, definirani su kritični periodi i periodi bilanciranja. Njihovim uvođenjem i primjenom odnosno primjenom MKP-a postiže se pouzdanost dobivenog rješenja, pri čemu nastaje Energetski Održivi Urbani Vodoopskrbni Sustav (EOUVS). U ovoj disertaciji prikazane su hidrauličke i energetske značajke, te i metodologija dimenzioniranja EOUVS-a, koje će se prikazati na jednom hipotetskom primjeru, uzevši u obzir stvarne karakteristike analiziranog problema. Dobiveni rezultati su pokazali da je PV energija prikladna za primjenu u UVODS-u, odnosno za pogonsku (električnu) energiju crpnih stanica. Pri tome je dobiveno rješenje hidraulički i energetski održivo. U ovom rješenju vodosprema, uz uobičajenu ulogu spremnika vode, ima i ulogu spremnika energije. Prikazano rješenje ima pozitivan utjecaj na klimatske promjene, budući da značajno doprinosi smanjenju emisija stakleničkih plinova. Kod toga se klasična električna energija nastala korištenjem fosilnih goriva zamjenjuje "Zelenom energijom" iz PV sustava, pri čemu su količine emisija stakleničkih plinova koje se oslobađaju beznačajne. Predloženo rješenje ima i pozitivan društveni utjecaj na širu i užu zajednicu, budući da EOUVS pruža društvene koristi u svim svojim segmentima. Prikazano rješenje, kao i metodologija dimenzioniranja EOUVS-a su široko primjenjivi u skladu s karakteristikama vodoopskrbnog sustava i pripadnog klimatskog područja.

Ključne riječi: Urbani Vodoopskrbni Sustav, Solarna Fotonaponska Energija, Metoda Kritičnog Perioda, klimatske promjene, "Zelena energija", društveni utjecaj.

UDC [628.11/.14:621.311.243](043.3)

Bojan Đurin, dipl.ing.geoteh.

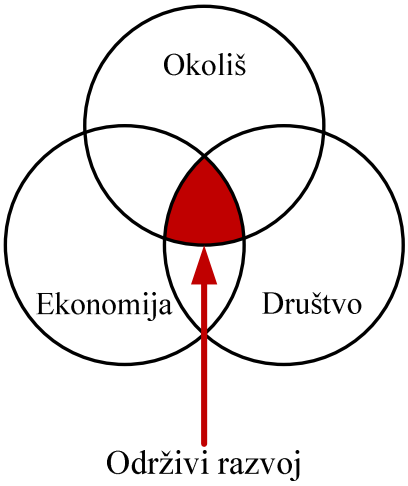
Sustainability of the urban water supply system operating

Abstract:
Water supply is of great importance for the sustainability of urban areas. It is a known fact that increasing amounts of energy from fossil fuels are used for this purpose, whose price is daily increasing. The use of Renewable Energy Sources (RES), in particular solar Photovoltaic (PV) energy is an alternative solution to this problem. This thesis on innovative and original way proves the sustainability of Urban Water Supply System (UWSS), by using PV energy. Concept of using the PV energy in UWSS in this thesis is based on a method called Critical Period Method (CPM). Within CPM, critical periods and balancing periods were defined. By their introduction and application, respectively by use of the CPM, sustainability of the obtained solution is achieved, to give the Energy Sustainable Urban Water Supply System (ESUWSS). In this thesis, hydraulically and energetically features, and also a sizing methodology of ESUWSS have been shown on a hypothetical example that has the characteristics of a real analyzed problem. The obtained results confirmed the hypothesis that PV energy is suitable for use in UWSS, i.e. for driving (electric) energy of pumping stations. The obtained solution is hydraulically and energetically sustainable. In the proposed solution, water reservoir (with the usual role of water storage) has the role of energy storage. The presented solution has a positive impact on the climate changes, since it significantly contributes to the reduction of greenhouse gas emissions. Herein, classical electric energy, produced by the use of fossil fuels, is entirely replaced with "green" energy from the PV system. Thereby, the amounts of greenhouse gases that are released are insignificant. The proposed solution has a positive social impact on wider and narrower community, since ESUWSS provides social benefits in all its aspects. The presented solution, as well as sizing methodology of ESUWSS, is widely applicable to various characteristics of a water supply system and climate.
Keywords: Urban Water Supply System, Solar Photovoltaic Energy, Critical Period Method, climate changes, "green energy", social impact.

1. UVOD

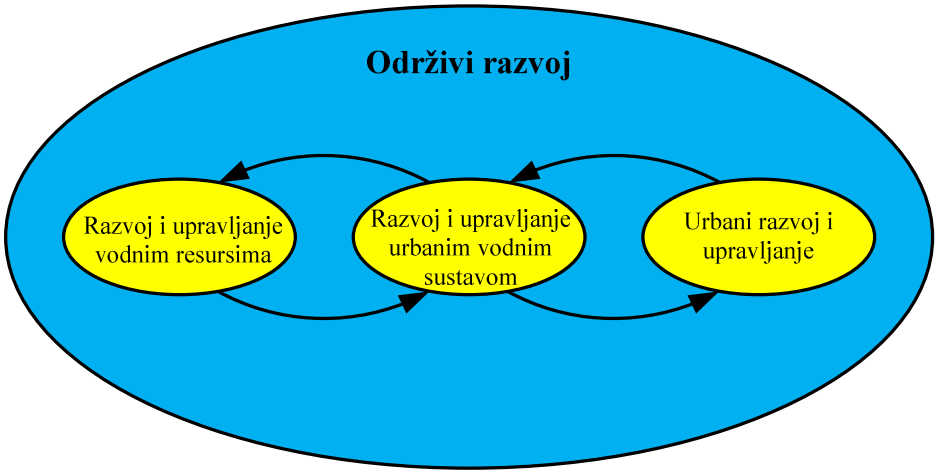
1.1. Problematika održivosti i njezine značajke

Održivi Urbani Vodni Sustav (UVS) i njegovi infrastrukturni dijelovi, a samim time i održivi Urbani Vodoopskrbni Sustav (UVODS) je onaj vodoopskrbni sustav koji je izgrađen i upravljan tako da sada i u budućnosti u potpunosti doprinosi ciljevima društva na način da zadržava svoj ekološki, okolišni i hidrološki integritet [H8]. U skladu sa time, vizija održivog razvoja svakog sustava (a tako i vodoopskrbnog sustava) u najopćenitijem obliku prikazana je na slici 1.1. preko okolišnih, društvenih i ekonomskih pokazatelja. UVODS, kao dio UVS-a, je važna urbana infrastruktura koja svojim radom također treba doprinijeti ostvarenju globalnih ciljeva održivog razvoja, te i sama biti održiva. Održivost rada vodoopskrbnog sustava je od velike važnosti za svaku urbanu sredinu i održivost življenja u njoj. Trenutno, UVS-i a samim time i UVODS-i, bez obzira što omogućavaju usluge za koje su i namijenjeni, nisu nužno i održivi [Y1].



Slika 1.1. Vizija održivog razvoja sustava [P1]

Vezano na to, definira se upravljanje i razvoj UVS-a (slika 1.2.). Ono treba doprinijeti cilju održivog upravljanja i razvoja vodnih resursa s jedne strane te urbanih sredina s druge strane, kao i obrnuto. Znači, održivost je moguća samo ako se UVS sagleda cjelovito kao sastavni dio izgrađenog okoliša (urbana sredina), te prirodnog okoliša (riječni bazen).

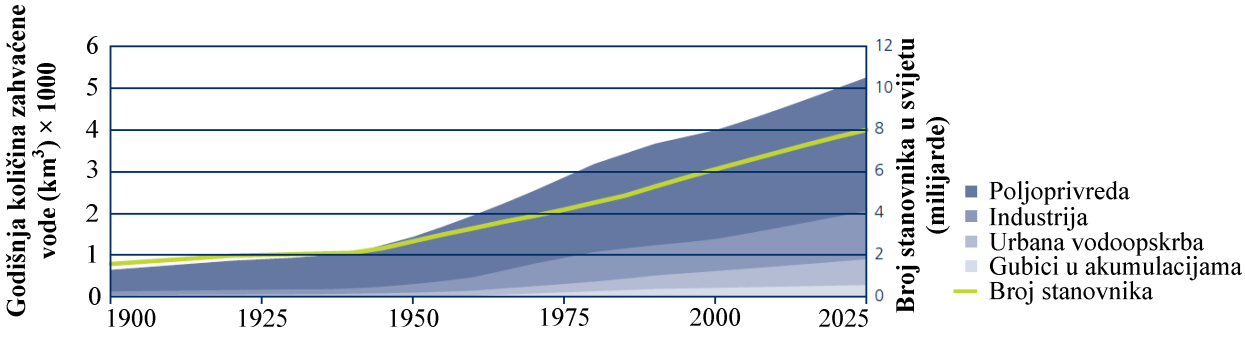


Slika 1.2. Održivo upravljanje i razvoj Urbanog Vodnog Sustava (UVS-a) [T3]

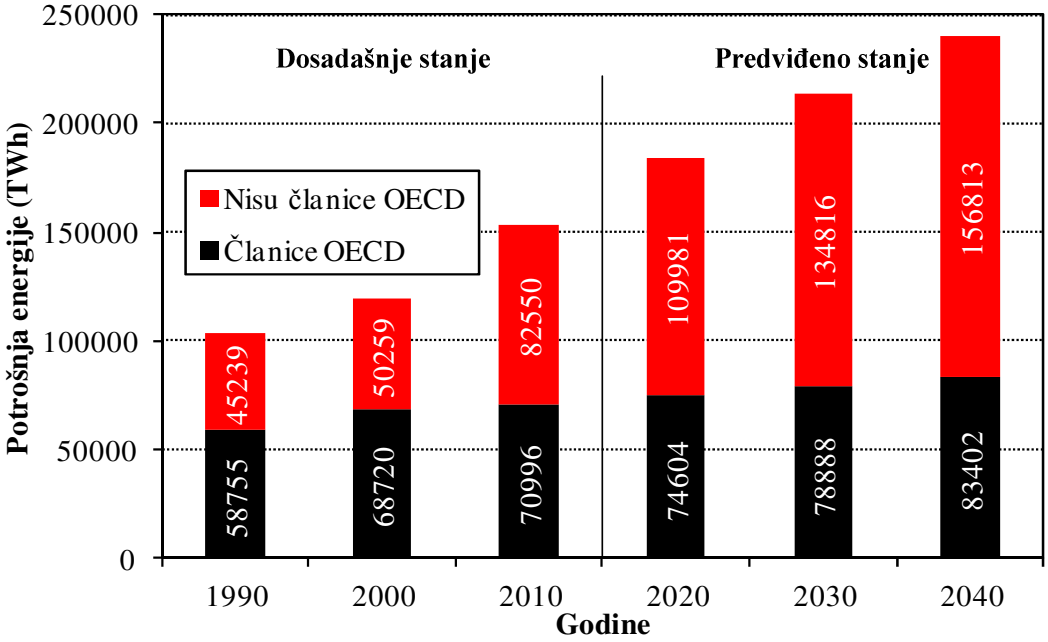
UVS ne može biti održiv bez održive opskrbe energijom i vodom. Šire gledajući, održiva opskrba energijom i vodom, a samim time i održivi UVS najvažniji su za dugogodišnju nacionalnu sigurnost, učinkovitu klimatsku politiku, održivost prirodnih resursa i socijalnu dobrobit.

Svjetska potrošnja energije za potrebe vodoopskrbe iznosi 7 % ukupne energije, pri čemu se 2 do 3 % svjetske električne energije troši za crpljenje vode u vodoopskrbnom sustavu [A2]. Od toga 80 do 90 % potrošnje energije otpada na crpne stanice [B4], [G5].

U svijetu raste broj stanovnika, a pri tome se povećava standard življenja. Sve više ljudi živi u gradovima tako da rastu potrebe za vodom i energijom. Na slici 1.3. prikazan je predviđeni trend rasta potrošnje vode i stanovništva u svijetu do 2025. godine, dok je na slici 1.4. prikazan predviđeni trend rasta potrošnje energije u svijetu do 2040. godine.



Slika 1.3. Predviđeni trend rasta potrošnje vode i stanovništva u svijetu do 2025. godine [V3]



Slika 1.4. Predviđeni trend rasta potrošnje energije u svijetu do 2040. godine [U2]

Očekuje se povećanje rasta potrošnje vode za oko 15 % od danas pa do 2025. godine. Također je vidljiv trend povećanja potrošnje energije za oko 39 % za zemlje koje nisu članice OECD-a, dok taj trend za zemlje članice OECD-a iznosi oko 13 %, sve navedeno od danas pa do 2040. godine.

Nestašice energije i vode su najveći svjetski rastući izazovi. Nadalje, ova dva vitalna resursa su međusobno neraskidivo povezana [Z2]. Proizvodnja energije zahtijeva velike količine vode,

dok su obrada sirove vode i distribucija vode za piće također značajno ovisni o energiji [M11]. Dakle, energija se troši u svakom vodoopskrbnom sustavu, samo je pitanje koliko učinkovito. Uzevši u obzir da je za postizanje održivosti UVODS-a ključno da su gubici vode i energije što manji, spomenuti trendovi povećanja potrošnje energije i vode ne idu u prilog tome. Energija se u UVODS-u uglavnom neučinkovito troši zbog više razloga: neefikasno i loše projektiranje crpnih stanica, loše održavanje vodoopskrbnog sustava, stare cijevi s velikom hrapavošću unutarnjih stijenki, začepljenja u vodoopskrbnoj mreži, prekomjerni tlak u sustavu, te neučinkovito upravljanje pojedinih objekata vodoopskrbnog sustava [F2].

Drugi važni uzrok energetske neučinkovitosti je uvećana opskrba vodom, koja se javlja zbog gubitaka uslijed nekontroliranog istjecanja vode iz sustava ili zbog neučinkovitog korištenja vode. Budući da su gubici vode u svijetu u vodoopskrbnim sustavima procijenjeni na 30 %, to povlači da je energetska neučinkovitost također jednaka tih 30 % [F2]. Potrebno je naglasiti da se u gradovima većina neučinkovitosti događa i prije nego što voda stigne do krajnjih potrošača, dakle već u samome vodoopskrbnom sustavu [A3]. Energetska neučinkovitost ujedno znači nepotrebno iskorištavanje fosilnih goriva i nepotrebno ispuštanje stakleničkih plinova, odnosno povećani negativni utjecaj na klimatske promjene.

Situacija u Hrvatskoj je slična trendovima u svijetu, ali sa jednom bitnom razlikom. Hrvatska je jedna od zemalja u kojoj broj stanovnika opada, a time i potrošnja vode. Međutim u Hrvatskoj, kao i u svijetu, ljudi sve više žive u urbanim sredinama tako da su potrebe za učinkovitim UVODS-om velike. U Hrvatskoj su gubici vode veliki, u prosjeku veći od 30 %, tako da su i gubici energije veliki. Zbog svega navedenoga održivost sustava je upitna ako se ne provedu sve nužne mjere kojima će se smanjiti gubici vode i energije. Kao članici Europske unije, Hrvatskoj će u tu svrhu biti na raspolaganju velika financijska sredstva, tako da se očekuje da će se stanje značajno poboljšati. Uz to, morati će se ispuniti i obveze vezane uz primjenu mjera za energetsku učinkovitost, korištenje obnovljivih izvora energije i smanjenje ispuštanja stakleničkih plinova [E3].

Navedeni problemi održivosti UVODS-a s obzirom na potrošnju vode i energije, te moguće otklanjanje tih problema uvođenjem obnovljivih izvora energije radi smanjenja ispuštanja stakleničkih plinova glavna su motivacija za znanstvena istraživanja vezana uz navedeno. U ovoj doktorskoj disertaciji želi se istražiti navedena problematika.

Uloga vodospreme u ostvarenju ciljeva održivosti UVODS-a je posebno zastupljena u ovoj doktorskoj disertaciji. U ovoj disertaciji će se detaljnije elaborirati uloga vodospreme u ostvarenju

ovih ciljeva kroz korištenje Obnovljivih izvora energije (OIE). Posebni naglasak će biti na iskorištavanju solarne fotonaponske (PV) energije, kao najprikladnijeg vanjskog OIE za primjenu u UVODS-u. Isto tako će se istražiti uloga vodospreme u reguliranju energetskih stanja u vodoopskrbnoj mreži. Veza između potrebne ulazne energije u vodoopskrbni sustav i izlazne energije kroz korištenje vode iz vodoopskrbne mreže je dio istraživanja ove teme, a koji nije cjelovito istražen. Ova veza, odnosno funkcionalna ovisnost je od posebne važnosti u slučaju korištenja OIE.

Uloga vodospreme kao objekta kojim se omogućava pouzdano korištenje OIE nije cjelovito istražena, niti je razvijena odgovarajuća metodologija i metoda za dimenzioniranje. Isto se može reći i za ulogu vodospreme u smanjenju ispuštanja stakleničkih plinova kao i utjecaj na održivost korištenja vodnih resursa. Dakle, vodosprema je objekt kojim se pretežito reguliraju energetski odnosi u vodoopskrbnom sustavu, a ne samo hidraulički. Vodosprema je i objekt koji tradicionalno osigurava sigurnost opskrbe vodom, ali i hidrauličkom energijom nužnom za opskrbu vodom potrošača. Međutim, vodosprema je i objekt od važnosti za korištenje obnovljivih izvora energije i smanjenje ukupne potrošnje energije i time smanjenje ispuštanja stakleničkih plinova. Uloga vodospreme u UVODS-u kao elementa za izjednačavanje protoke i regulaciju tlačnih odnosa detaljno je opisana u literaturi. Međutim, uloga vodospreme u ostvarenju ciljeva održivog življenja u urbanim sredinama, a posebno u odnosu na energetsku održivost rada UVODS-a nije se značajnije istraživala.

Ovom doktorskom disertacijom istražiti će se ove teme, kao i druga pitanja održivosti rada UVODS-a. To su i pitanja klimatskih promjena i utjecaja istih na održivost UVODS-a.

1.2. Klimatske promjene i urbani vodoopskrbni sustav

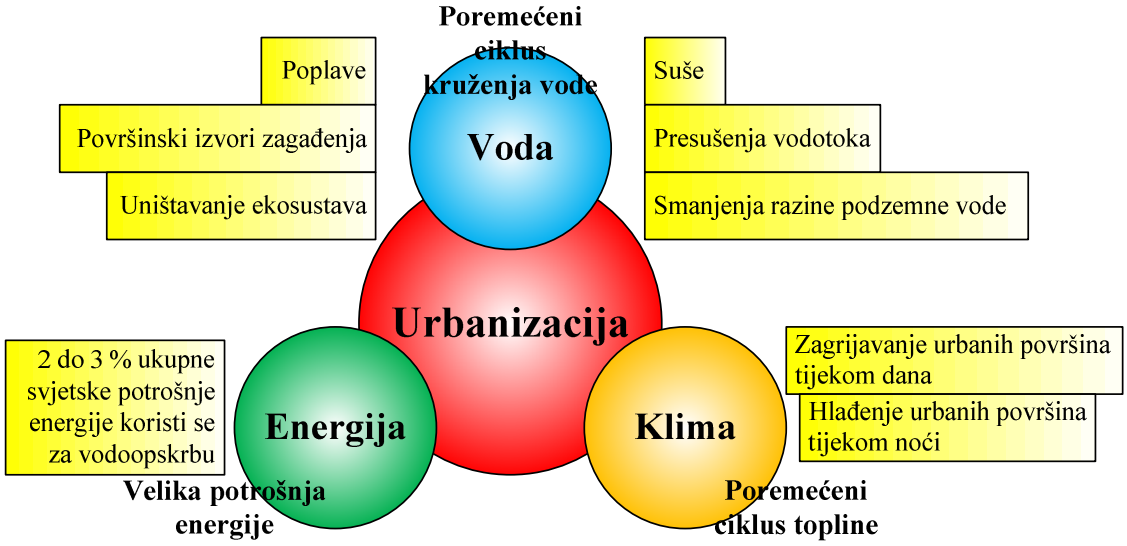
Klimatske promjene uzrokovane ljudskom aktivnošću postaju pitanje od naročite važnosti za čovječanstvo [U3]. Od klimatskih promjena, najviše pažnje se u svijetu pridaje globalnom zatopljenju, nastalom zbog emisije stakleničkih plinova. Razumljivo je da su zbog toga istraživanja koja proučavaju nastalo povećanje temperature zraka pod naročitom pažnjom svjetske javnosti i da su samim time izložene kritikama, budući da se radi o globalnom problemu [H6].

Povećanje temperature potiče isparavanje vode s mora i kopna i ujedno omogućava atmosferi da drži više vlage, što dovodi do ekstremnih oborina, koje mogu uzrokovati poplave, a samim time i do socijalnih i ekonomskih problema u široj zajednici. Slični problemi javljaju se zbog evapotranspiracije, pri čemu dolazi do intenzivnijih sušnih razdoblja, gdje se posljedice

očitavaju u sniženim razinama (ispod uobičajenih normalnih razina) podzemnih voda, rijeka i jezera, kao i u nedostatku vlage u tlu [U4]. U nekim europskim zemljama, posebice u južnoj Europi, očekuje se da će režim tečenja vodotoka, kao i prostorna i vremenska raspodjela vodnih resursa postajati sve nepravilniji. Također se očekuje da će potreba za vodom postajati sve veća. Navedeno može dovesti do konflikta između različitih korisnika vode, a prije svega korisnika u naseljima i u poljoprivredi. Uz to očekuje se povećanje potrošnje energije radi sve obimnijeg transporta vode i preraspodjele vodnih resursa, te postupka desalinizacije [R1].

Klimatske promjene utječu na količinu i kvalitetu vode za piće. Tijekom ekstremnih oborina i poplava dolazi do nekontroliranog širenja onečišćenja, koje se zatim pojavljuje i u vodoopskrbnom sustavu. Pojačano topljenje snijega i leda na sličan način uzrokuju onečišćenja vode za piće. Gotovo jedna šestina svjetske populacije živi u neposrednoj blizini rijeka koje se opskrbljuju vodom iz ledenjaka i snježnog pokrova. Većina te populacije može očekivati da će ti vodni resursi doživjeti svoje smanjenje tijekom ovog stoljeća. Očekivani porast razine mora dovodi do prodora slane vode u vodonosnike [U4].

Sve intenzivnija urbanizacija dovodi do narušavanja vodnog režima, što u kombinaciji sa klimatskim promjenama negativno utječe na urbani vodni sustav i njegovu održivost, slika 1.5., pri čemu kao rezultat dolazi i do povećanja potrošnje energije.



Slika 1.5. Povezanost urbanizacije sa vodnim režimom, klimatskim promjenama i sa tokom energije (modificirano iz [K3])

Vodoopskrbni sustavi su vrlo ranjivi na ove promjene, a posebno sustavi u turističkim područjima sa velikom sezonskom potrošnjom vode. Intenzitet i smjer prilagodbe vodne

infrastrukture na klimatske promjene u vidu investicija i promjeni režima rada je presudan, jer je glavna svrha vodne infrastrukture zaglađivanje (ublažavanje) varijabilnosti opskrbe vodom, bez obzira dali se radi o spremanju vode tijekom sušnih perioda ili osiguranju dovoljnih kapaciteta spremnika koji će prihvatiti vodu tijekom kišne sezone ili poplava. Prilagodba vodne infrastrukture na klimatske promjene u vidu suša i poplava je teža negoli u odnosu na promjene prosječne temperature zraka i oborine. Sve ovo skupa utječe na socioekonomsko stanje i održivost življenja u urbanim sredinama, što se očitava u povećanju cijene vode i u redukcijama potrošnje vode [O2], što na kraju uzrokuje promjene u radu vodoopskrbnog sustava. Stoga vodoopskrbni sustavi moraju biti sve više učinkovitiji u odnosu na potrošnju vode i energije.

Energetska učinkovitost vodoopskrbnog sustava je značajan element optimalnog i učinkovitog funkcioniranja vodoopskrbnog sustava, koja u zadnje vrijeme sve više dolazi do izražaja. Primjerice, smanjenjem potrošene energije od samo 5 % godišnje, u SAD-u bi se uštedilo 48,000,000 dolara [T1].

Navedene činjenice pokazuju i potvrđuju da vodoopskrbni sustavi moraju biti učinkoviti u pogledu korištenja vodnih resursa i energije. Od vodoopskrbnog sustava se također traži da smanji ispuštanje stakleničkih plinova. U tom smislu se poduzimaju mjere za racionalizaciju potrošnje vode i smanjenje gubitaka vode i energije. Jedna od mjera je korištenje OIE i smanjenje potrošnje vršne energije. Uloga vodospreme u primjeni ovih mjera je od velike važnosti.

Smanjenje gubitaka vode i energije je funkcionalno zavisno tako da se ovaj problem mora sagledati cjelovito. Jedna od značajnih mjera za smanjenje utjecaja UVODS-a na klimatske promjene i održivost življenja je korištenje OIE. Važni objekt koji utječe na ostvarenje ovih ciljeva je vodosprema koja u UVODS-u služi za izravnanje zahvaćanja i potrošnje vode, ali i proizvodnje i potrošnje energije. Izravnanjem proizvodnje i potrošnje vode, kao i energije smanjuju se negativni utjecaji na izvore vode i energije, te se doprinosi i njihovom održivošću.

2. PRISTUPI I PRAKSA RJEŠAVANJA PROBLEMA ODRŽIVOSTI URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA PREMA LITERATURI

U prošlosti, odnosno u tradicionalnom pristupu, problem upravljanja vodoopskrbnim sustavom svodio se na isključivo ekonomski pristup s obzirom na količinu i kvalitetu vode za potrebe potrošača. Koristio se uglavnom linearni koncept u kojem su se rastuće potrebe rješavale novim povećanjem zahvaćanja voda. Na taj način su se pokrivali i gubici koji su sa starošću sustava i zbog nedovoljnog ulaganja bili sve veći. Zbog zahvaćanja sve većih količina vode radi zadovoljavanja potreba, istovremeno dolazi do povećanja potrošnje energije.

Smanjenjem raspoloživih vodnih resursa i porastom troškova opskrbe kao odgovor razvio se koncept integriranog upravljanja u kojem se ista važnost davala smanjenju potreba (gubitaka) i zahvaćanju novih količina. Slično se događalo i sa energijom čija se potrošnja povećavala razmjerno povećanju potrošnje vode. Zbog visokih troškova rada i problema financiranja takvih sustava, sustavi su postajali nesigurni i sve više su ugrožavali održivost življenja i rada ljudi u urbanim sredinama. Zbog toga je bilo nužno provesti mjere kojima će se ojačati održivost.

Danas se u upravljanje vodoopskrbnim sustavom moraju uključiti analiza rada vodoopskrbnog sustava, poboljšanja pouzdanosti i uštede na troškovima rada, kao i mogućnost utjecaja na okoliš i standard življenja korisnika. Svemu navedenome mora se pridodati jednaka

važnost kao i ekonomskoj analizi, što u konačnici zadovoljava koncept integriranog pristupa. Logično, postoje i različiti pogledi koji su orijentirani na učinkovitost i djelotvornost sustava s obzirom na kvalitetu, pouzdanost, štetu, gubitke vode i energiju. Mjere za poboljšanje učinkovitosti i djelotvornosti sustava mogu se postići samo ako su svi raspoloživi resursi koriste na optimalan način, te ako su definirani ciljevi ekonomske, ekološke i društvene održivosti ispunjeni. Glavna motivacija ovog procesa zasnovana je na prepoznavanju integrirane vizije i multidisciplinarnog upravljanja sustavom, koji objedinjuje hidrauličku i energetsku učinkovitost, pouzdanost, upravljanje energijom, te okolišne aspekte. Navedeno omogućava trajnu i dobru razinu vodoopskrbne usluge za životni ciklus sistema. Očuvanje vodnih resursa, kontrola potrošnje energije te značajke okoliša koje su povezane s politikom upravljanja vodom donose niz prioritetnih pitanja i traže rješenja za buduće (novo) vremensko razdoblje. Dakle, nužne su nove metodologije i rješenja [R1].

Istraživanja su pokazala da smanjenje potrebe za vodom za 20 % ujedno znači i smanjenje količine energije za 20 % [P3]. Odnosno, prema [F2], smanjenje gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu za 30 %, povećava energetsku učinkovitost za tih istih 30 %. Racionalizacija potrošnje vode postiže se korištenjem uređaja koji u domaćinstvu troše manje vode tijekom uporabe, racionalizacijom potrošnje (uporabom kišnice i već uporabljene vode dobre kvalitete za zalijevanje), i sl. [M3].

Budući da je tlak najveći generator gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu, velika pažnja je posvećena upravljanju tlakovima. [N3] opisuje postupak kojim se tlak u vodoopskrbnom sustavu regulira razinom vode u vodospremi. Tu je razvijen model kod kojeg se tlak vode u sustavu mijenja u ovisnosti o potrebi za vodom, razini vode u vodospremi i nadmorskoj visini analiziranih točaka (lokacija) u vodoopskrbnoj mreži.

Danas cijena energije raste stalno, stoga vodoprivredne tvrtke moraju ulagati sve više u energetski učinkovita rješenja. Hidraulički gubici u vodoopskrbnim sustavima se nastoje smanjiti koliko god je to moguće korištenjem glatkih cijevi (npr. cijevi iz sintetičkih materijala) i politikom kontroliranja tlakova. Potrebe za vodom sve su veće, kao i potrošnja energije i utjecaj na klimatske promjene. Zbog toga se nastoje koristiti Obnovljivi Izvori Energije (OIE). Na razini pojedinih država primjenjuju se poticaji za korištenje OIE, a posebno u slučajevima malih i decentraliziranih sustava. Ova mjera je vrlo važna, posebno u privatnom sektoru, budući da je interes privatnih tvrtki ovisan o ekonomskom ishodu svakog projekta [R3].

Sve više se analiziraju različiti koncepti i modeli korištenja OIE. Koncept (pristup) "Watergy" [A3] je jedan od njih. Gradovima pomaže u smislu značajnih energetskih poboljšanja, ekonomskih ušteda i ušteda vode kroz tehnička i upravljačka poboljšanja u vodoopskrbnim i kanalizacijskim sustavima. Konkretno, u ovom konceptu daju se smjernice za poboljšanje crpnog sustava, za smanjenje gubitaka vode, za automatizaciju sustava upravljanja, te za sustav nadzora sa strogim sustavom mjerenja količine krajnje potrošene vode. Dakle, povećava se učinkovitost koja potrošačima osigurava kvalitetnu uslugu s minimalnom potrošnjom vode i energije. Učinkovitost u vodoopskrbnom sustavu uključuje i krajnju upotrebu vode: učinkovite WC-e, niskoprotočne tuševe, te smanjenje vršnih potrošnji vode, kao i učinkovitost opskrbe vodom. Prema navedenom konceptu, najperspektivnija područja za djelovanje unutar vodoopskrbnog sustava su poboljšanje crpnog sustava, kontroliranje curenja i gubitaka vode, automatizacija sustava upravljanja te redovito praćenje potrošnje vode po mogućnosti s preciznim mjerenjem krajnje uporabe vode.

[F2] navodi metode/alate za moguće rješenje za povećanje energetske učinkovitosti i smanjenje gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu, a to su: primjena hidrauličkih modela u svrhu analize različitih struktura vodoopskrbne mreže i načina rada, uvođenje sustava upravljanja energijom u kojem se predviđaju potrebe za energijom te upravljanje rada vodoopskrbnog sustava, kao i metodologija (FAVAD) koja predviđa utjecaj tlakova na gubitke.

Slična rješenja i modele predlažu i drugi autori, kao što je to [C6]. Brojni autori kao jedno rješenje predlažu učinkovito korištenje vode na mjestu potrošnje [V4], te smanjenje gubitaka, što su već sada klasične metode upravljanja potrebama za vodom.

Navedene metode i postupci zahtijevaju ulaganje određenih financijskih sredstava, u rasponu od minimalnih pa sve do značajnijih iznosa. U današnje vrijeme recesije navedeno predstavlja značajan problem. S druge strane, potiče se korištenje Obnovljivih Izvora Energije (OIE) u svrhu smanjenja emisija stakleničkih plinova i povećanja energetske učinkovitosti [E3], [U3]. Korištenje OIE osigurava pouzdani i fleksibilni energetski sustav, veliku i nepotrošivu opskrbu energijom, stabilne cijene energije, nikakvu ili jako malu emisiju stakleničkih plinova, poboljšanu razinu zdravlja ljudi i kvalitetu okoliša, te otvaranje novih radnih mjesta i ostale ekonomske prednosti [U4]. Također, [V4] i [C6] preporučaju korištenje OIE u vodoopskrbnim sustavima.

Energija iz energetskog sustava je uglavnom proizvedena iz klasičnih izvora, a prije svega iz termoelektrana koje značajno doprinose ispuštanju stakleničkih plinova i time klimatskim

promjenama. To znači da se vodoopskrbni sustavi u svom radu sve više trebaju bazirati na korištenju OIE i korištenju unutrašnjih energetskih potencijala samih vodovoda, te stalno provoditi mjere smanjenja potrošnje energije.

Teme koje se obrađuju u literaturi uglavnom se odnose na energetsku učinkovitost vodoopskrbnih sustava [C1, L1]. Unaprjeđenje energetske učinkovitosti je tradicionalna mjera kojom se nastoji minimizirati potrošnja električne energije. Ona se odnosi prije svega na redukciju potrošnje energije kroz adekvatni rad crpnih stanica i svih uređaja koji troše energiju. Međutim, smanjenje troškova energije se postiže i korištenjem energije u periodima kad je jeftinija, te korištenjem OIE.

Korištenje jeftinije energije je tradicionalna praksa koja se provodi shodno karakteristikama vodoopskrbnog sustava [M3]. Međutim, korištenje OIE za rad UVODS-a i ostvarenje ciljeva održivosti još uvijek nije dovoljno istraženo, a posebno zamjena vršne energije sa solarnom energijom.

OIE se već dugo koriste za rad crpnih sustava, a posebno solarna fotonaponska (PV) energija. Korištenje PV energije u svojoj najjednostavnijoj formi tj. u svrhu proizvodnje električne energije koja se koristi za pogon crpne stanice koja crpi vodu, a koja se pak koristi za potrebe stanovništva, industrije ili navodnjavanja, je već dokazana i provjerena tehnologija koja se već dugo koristi [H5, J1, K1, O3, P5].

Primjena ove tehnologije za rad UVODS-a kao cjeline nije u potpunosti istražena. [O1] zaključuje da se u vodoopskrbnom sustavu pokretanom PV energijom godišnja učinkovitost PV (pod)sustava smanjuje sa povećanjem površine solarnih ćelija. Korištenje snage PV sustava kontrolirano je kapacitetom crpke - kad crpka dosegne svoju maksimalnu brzinu okretanja, snaga PV sustava više se ne koristi za crpku. Ta snaga PV sustava odgovara određenoj jačini Sunčevog zračenja, nazvanoj projektnom točkom jačine Sunčevog zračenja. Ako se površina solarnih ćelija u PV sustavu povećava, njegova snaga također se povećava. Kod toga se spomenuta projektna točka smanjuje, što za posljedicu ima smanjenje učinkovitosti podsustava PV. Godišnja učinkovitost (pod)sustava CS (crpna stanica) povećava se sa povećanjem površine solarnih ćelija u PV sustavu. Pri tome veća površina omogućava podsustavu CS da radi u području ili blizu područja svoje nominalne učinkovitosti (zadane tvornički) za dulji period vremena. Ukupna učinkovitost integralnog sustava, odnosno optimalna vrijednost učinkovitosti dominantno ovisi u učinkovitosti podsustava PV i o učinkovitosti podsustava CS. Povećanje površine solarnih ćelija od optimalne veličine površine lagano povećava troškove jedinice volumena crpljene vode, dok

smanjenje površine solarnih ćelija značajno povećava troškove jedinice volumena crpljene vode. Konkretno, u spomenutom radu povećanje površine PV generatora od 60 % povećava troškove jedinice volumena crpljene vode za 11 %, dok smanjenje od 60 % povećava troškove jedinice volumena vode za 94 %. Također je pokazano da tehno-ekonomski optimalno rješenje nije i rješenje sa maksimalnom učinkovitošću takvog vodoopskrbnog sustava pokretanog PV energijom.

U istom radu [O1] navedeno je da odstupanje stvarne manometarske visine od proračunate za posljedicu ima značajno smanjenje učinkovitosti vodoopskrbnog sustava pokretanog PV energijom. To se može pojaviti zbog lošeg projektiranja sustava, smanjenja razine podzemne vode koja se crpi, te nedovoljne vrijednosti jakosti Sunčevog zračenja. Optimalna manometarska visina koja je povezana sa maksimalnom učinkovitošću podsustava PV nužno ne mora biti optimalna manometarska visina za podsustav CS. Međutim, manometarska visina koja se uzima u obzir je ona koja daje najveću prosječnu učinkovitost vodoopskrbnog sustava pokretanog PV energijom, koja ovisi o učinkovitostima podsustava PV i o učinkovitosti podsustava CS. Također se preporuča projektirati takav vodoopskrbni sustav koji većinu vremena radi u neposrednom području ili u samom području optimalne učinkovitosti podsustava CS. No, zbog navedenoga može doći do predimenzioniranja podsustava PV, pogotovo u periodu smanjene jakosti Sunčevog zračenja ili naoblake. Povećanje površine podsustava PV povećava volumen crpljene vode i učinkovitost podsustava CS, no smanjuje se učinkovitost podsustava PV. Učinkovitost takvog integriranog sustava povećava se do određene površine podsustava PV, te se sa daljnjim povećanjem površine podsustava PV smanjuje.

[F3] predlažu metode optimizacije ulaznih parametara u svrhu poboljšanja rada sustava koji se sastoji od podsustava PV i podsustava CS. Tu se koriste srednje mjesečne jakosti Sunčevog zračenja, koje se za svaki pojedini mjesec jednom mjesečno "baždare" na način da se jednim mjesečnim mjerenjem srednje dnevne jakosti Sunčevog zračenja ispravlja funkcija/krivulja srednjih mjesečnih vrijednosti jakosti Sunčevog zračenja. Kod dobivene ispravljene funkcije/krivulje, analizira se samo jedan njezin dio kod kojeg se nalazi efektivna jakost Sunčevog zračenja, odnosno jakost Sunčevog zračenja koja se najviše može iskoristiti (ona jakost kod koje je višak, odnosno neiskorišteni dio najmanji). Na kraju, definira se statistički parametar koji je monotona funkcija razlike između vršne snage podsustava PV i snage kod točke u kojoj se odvija rad navedenog podsustava. Time se jednostavno, brzo i točno odabire optimalna konfiguracija podsustava PV.

[H2] opisuje sustav koji se sastoji od podsustava PV i podsustava CS, kod kojeg se analizira utjecaj veličine snage podsustava PV, volumena vodospreme i različitih vrsti crpki sa različitim

manometarskim visinama u odnosu na različite potrebe za vodom od strane stanovništva. U tom radu zaključeno je da varijabilnosti dnevne potrebe za vodom imaju mali utjecaj na mogući nedostatak vode u vodospremi ako se vodosprema dimenzionira na dulji period dnevnog bilanciranja. Također je zaključeno da geografski položaj lokacije utječe na rad cijelog sustava, s obzirom na jakost Sunčevog zračenja i trajanje Sunčevog zračenja (što su navedene veličine veće, rad cijelog sustava je pouzdaniji i obratno). Isti autor u [H1] dokazuje da je snaga podsustava PV manja ukoliko je jakost Sunčevog zračenja veća i obratno. Samim time, za jednaku veličinu vodospreme, potrebna je manja snaga PV generatora ukoliko je jakost Sunčevog zračenja veća.

[H4] opisuju mogući postupak dimenzioniranja UVODS-a koji se sastoji od podsustava "PV generator i invertor", podsustava "Crpna stanica" i podsustava "Vodosprema", ali za pojednostavljenu i nerealnu shemu potrošnje vode u naselju. Naime, on dimenzionira sustav uz pretpostavku da se voda kontinuirano troši 24 sata ili da se kontinuirano troši u periodu od 6 sati pa do 21 sat, što nije stvarna situacija. Istraživanje se provelo za jedan, dva i tri dana autonomije vodospreme, odnosno za dane kod kojih vodosprema može osigurati dovoljnu količinu vode u slučaju prekida dotoka, čime se povećava sigurnost vodoopskrbe. Dakle, što je broj dana autonomije veći, sigurnost vodoopskrbe se povećava. Također je primijenjen matematički model ovisnosti snage crpne stanice o protoku vode koja se crpi i o manometarskoj visini crpke. Taj matematički model ranije je predstavljen u [H3]. Sličan postupak korišten je u [O4], s time da je u ovom slučaju postavljen matematički model ovisnosti protoka crpljene vode o snazi crpne stanice i o manometarskoj visini crpke.

U spomenutom radu [H4], pokazano je da se sa produljenjem dana autonomije vodospreme smanjuje deficit, tj. razlika između potrebe za vodom i raspoložive količine vode. Tu je korištena metoda *LPP* ("Load Losses Probability"), kod koje se uzima u obzir omjer između potrebne količine vode koja se ne može osigurati i ukupne potrebe za vodom, čime se definira stupanj pouzdanosti vodospreme, a samim time i pouzdanost cijelog vodoopskrbnog sustava. Također je zaključeno da je spomenuti omjer manji što je snaga podsustava PV veća.

[B1] utvrđuje da vodosprema poboljšava rad UVODS-a pokretanog PV energijom zbog mogućnosti uskladištenja vode, odnosno gravitacijske energije vode. Navedeno je potvrđeno u radu [O1], pri čemu je za optimalno dimenzioniranje UVODS-a dovoljno uzeti u obzir srednje dnevne, mjesečne odnosno godišnje ulazne parametre, dok se njihova eventualna odstupanja kompenziraju vodospremom. Međutim, nije istraženo na koji način i u kojoj mjeri kompenzirati ta odstupanja za uobičajene uvjete rada UVODS-a.

[D2] pokazali su da su u crpnom sustavu pokretanom PV energijom, kod konstantnog dnevnog ili satnog protoka vode, promjene manometarske visine crpke proporcionalne kvadratu učestalosti opskrbe vodom (parametar koji odgovara broju okretaja osovine crpke) i to samo u rasponu tih vrijednosti ispod veličine protoka koji odgovara vršnoj učinkovitosti crpke. Također je za raspon vrijednosti učestalosti opskrbe vodom iznad veličine protoka koji odgovara vršnoj učinkovitosti crpke definirana funkcijska zavisnost koja ovisi o veličinama protoka. U istom radu pokazano je da je, kod konstantne manometarske visine, veća učinkovitost crpnog sustava dobivena kod veće učestalosti opskrbe vodom. Tu je preporučeno upravljanje radom crpke tako da su protok vode i manometarska visina što moguće bliže protoku i manometarskoj visini koja odgovara najvećoj učinkovitosti crpke koju definira proizvođač.

U [K4] preporuča se, ukoliko je za neku lokaciju poznata prosječna jakost Sunčevog zračenja, da se parametri pojedinih podsustava UVODS-a pokretanog PV energijom odaberu tako da točke profila tražene količine vode budu u blizini maksimalne snage podsustava PV, koja ovisi o jakosti Sunčevog zračenja. Drugim riječima, krivulja koja izražava satnu potrebu za vodom unutar jednog dana po obliku se treba poklapati sa krivuljom koja prikazuje satnu jakost Sunčevog zračenja unutar jednog dana.

[B3] pokazuje da što je učinkovitost UVODS-a pokretanog PV energijom manja, cijena jednog m^3 vode koji se crpi je sve veća.

U [B2] opisan je UVODS, kod kojeg je postupak optimizacije njegovog rada proveden na dva načina. Prvi način koristi metodu gubitka vjerojatnosti opskrbe energijom, *LPSP* ("Loss of Power Supply Probability"), gdje se određuje (kvantificira) vjerojatnost da podsustav "PV generator i invertor" i podsustav "Vodosprema" ne mogu osigurati tražene količine vode. Pri tome vrijednost *LPSP*-a jednaka 0 znači da sustav može u potpunosti zadovoljiti, a vrijednost *LPSP*-a jednaka 1 da nikako ne može u potpunosti zadovoljiti potrebe za vodom. Dakle, ovom metodom određuje se pouzdanost UVODS-a. Drugi način koristi ekonomsku metodu *LCC* ("Life Cycle Cost"), koja je također primijenjena u [O4]. Dobiveni rezultati su pokazali da ako se želi veća pouzdanost UVODS-a, veličina podsustava "PV generator i invertor", kao i broj dana autonomije vodospreme moraju biti veći. To znači da se sa produljenjem dana autonomije vodospreme, što podrazumijeva povećanje volumena vodospreme, postiže zadovoljavanje potreba sa vodom sa što manje prekida u opskrbi, odnosno povećava se pouzdanost UVODS-a. Što se tiče *LCC*-a, kombinacija kod koje je najmanja vrijednost *LCC*-a smatra se optimalnom.

[E1] prikazuje postupak dimenzioniranja UVODS-a, pri čemu se podsustav "PV generator i invertor" dimenzionira korištenjem pristupa "najgoreg mjeseca u godini" s obzirom na jakost Sunčevog zračenja, te korištenjem analize vršnih sati Sunčevog sijanja. Pristup "najgoreg mjeseca u godini", koji je već ranije opisan u [E2], podrazumijeva dimenzioniranje podsustava "PV generator i invertor" tako da on ima dovoljnu snagu da može zadovoljiti najveću mjesečnu potrebu za električnom energijom tijekom analizirane godine, ali potrebno je uzeti u obzir da se proračun vrši s obzirom na mjesec u kojem je prosječna mjesečna jakost Sunčevog zračenja najmanja tijekom te godine. Ovime se radi određeno osrednjavanje rezultata, no prema [E2] to olakšava postupak dimenzioniranja ovakvih sustava, a ujedno se postiže zadovoljavajuća pouzdanost rada sustava. [E1] također radi pojednostavljenje usvajanjem konstantnog satnog i dnevnog režima crpljenja vode od strane stanovništva. U spomenutom radu, analiza vršnih sati Sunčevog sijanja napravljena je u svrhu određivanja potrebne veličine baterija koje bi služile u svrhu osiguranja električne energije tijekom perioda u kojem bi se javili manjkovi proizvedene električne energije u slučaju nedovoljne jakosti Sunčevog zračenja ili tijekom noći. Vršni sat podrazumijeva da unutar njih podsustav "PV generator i invertor" tijekom svojeg rada ima izlaznu snagu jednaku svojoj nazivnoj snazi. To je ispunjeno ukoliko je stvarna jakost Sunčevog zračenja jednaka jakosti Sunčevog zračenja u Standardnim Testnim Uvjetima (STC). Određivanjem vršnih sati rada podsustava "PV generator i invertor" određeno je vrijeme u kojem podsustav ne zadovoljava svoju nazivnu snagu, pa je time ujedno i određen period u kojem se korištenjem baterije osigurava kontinuitet i pouzdanost njegovog rada.

Već spomenuti [E2] također uvodi broj dana autonomije rada podsustava "PV generator i invertor". Ti dani autonomije izražavaju pouzdanost rada navedenog podsustava budući da u tom periodu podsustav može funkcionirati, a da prima nezadovoljavajuću razinu jakosti Sunčevog zračenja ili da ju uopće ne prima. Drugim riječima, dani autonomije izražavaju pouzdanost rada takvog podsustava.

Ova istraživanja su se bavila pojednostavljenim sustavima opskrbe vodom, odnosno samo crpljenjem određenih količina vode bez integracije i cjelovite analize UVODS-a i njegovih karakteristika (dnevne i satne potrošnje vode tijekom godine, odnosno profila potrošnje), kao i uloge vodospreme u vodoopskrbnom sustavu.

Mogućnosti korištenja drugih obnovljivih izvora energije za rad UVODS-a (vjetar, geotermalna energija, morske struje i valovi, …) nisu analizirane. Jedino je analizirano korištenje vjetra za crpljenje vode [R2], ali uz pojednostavljen utjecaj režima potrošnje vode.

Korištenje hidroenergije kao obnovljivog izvora energije u UVODS-u odnosi se na korištenje unutrašnjih resursa. UVODS-a je sam za sebe potencijalni izvor hidroenergije, koja se tradicionalno koristi, ukoliko je raspoloživa. Kod dovodnih cjevovoda je takva energija na raspolaganju i ona je raspoloživa za hidropostrojenje male snage. Voda se koristi u onoj količini koja je na raspolaganju u cijevima. Takav sistem poznat je pod nazivom "run-of-river" postrojenje, kod kojeg se turbine mogu smjestiti direktno u cijev [E6, K5]. Ovakvo rješenje nema negativan utjecaj na okoliš, ne iziskuje dodatne količine vode, a ujedno i reducira tlakove u vodoopskrbnoj mreži, a samim time i gubitke.

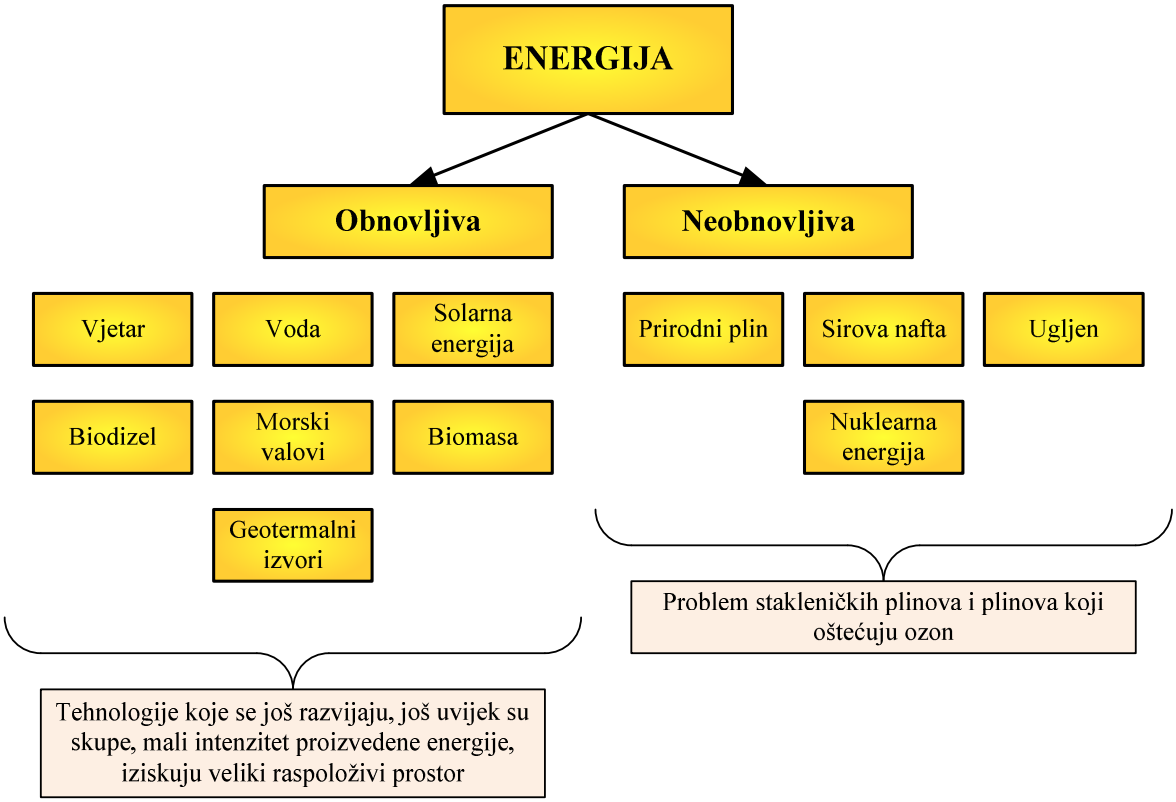
Na kraju se može zaključiti da analiza korištenja OIE u UVODS-a nije cjelovito istražena. Posebno nije elaborirana uloga gradske vodospreme i utjecaj korištenja OIE na dimenzioniranje i režim rada vodospreme s jedne strane, te izvora OIE s druge strane, odnosno uloge vodospreme kao "spremnika energije". Tu se posebno ističe potreba analize zajedničkog rada izvora energije i vodospreme, jer snaga (količina) OIE je direktno ovisna o raspoloživom volumenu vodospreme. Uz to, nužno je istražiti utjecaj perioda dimenzioniranja na veličine elemenata sustava "OIE - Crpna stanica - Vodosprema" i sigurnost rada vodoopskrbnog sustava, ali u skladu sa stvarnim režimom potrošnje vode u naselju. Isto tako nije istraženo kako i koliko vodoopskrbni sustav može doprinijeti smanjenju ispuštanja stakleničkih plinova.

Ovaj pregled bibliografskih referenci predstavlja aktualno stanje znanstvenog dosega u području doktorske disertacije.

3. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE I ODRŽIVOST RADA URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA

Prema [R1], korištenje Obnovljivih Izvora Energije (OIE) u vodoopskrbnom sustavu je vrijedan alternativni pristup kojim se upotrebljava raspoloživa energija. Važnost energetske učinkovitosti i politike OIE dodatno je naglašena u [C7] kako bi se održala održiva, konkurentna i sigurna energetska tehnologija koja bi mogla pomoći da se uštedi 20 % troškova potrošnje energije za vodne sustave, a samim time i za vodoopskrbne sustave. Iz perspektive energetske politike, najveća prednost OIE je sigurnost opskrbe i prednost pred fosilnim gorivima s obzirom na utjecaj na okoliš.

OIE ili često korišten drugi naziv "Zelena energija" podrazumijeva proizvodnju energije korištenjem energije vjetra, Sunca, hidroenergije iz malih hidrocentrala, biomase i iz geotermalnih izvora, slika 3.1.



Slika 3.1. Izvori energije i njihove osnovne karakteristike (modificirano iz [S5])

Obnovljiva energija je trajan izvor energije koji se obnavlja, što podrazumijeva da je nakon toga ponovno spremna za uporabu. Ti izvori energije ne uzrokuju zagađenja, ne oslobađaju otrovne spojeve, dakle - u pravilu ne nastaju stakleni̇čki plinovi. Međutim, obnovljiva energija nema veliki intenzitet, što znači da za njenu proizvodnju treba dosta prostora. Potrebno je naglasiti da izraz obnovljiva energija znači održivu energiju.

Postavlja se pitanje dali su OIE, te koji su OIE pogodni za UVODS, te na koji način se oni mogu koristiti. Postoje dvije osnovne mogućnosti:

(i) kao samostalan sustav (off-grid) proizvodnje energije za različite potrošače energije u vodoopskrbnom sustavu (crpne stanice, postrojenja za obradu vode, itd.) ili

(ii) (on-grid), koji spajanjem na lokalnu i/ili regionalnu električnu mrežu postaje sve više "zelena".

U prvom slučaju se OIE razvija kao lokalni samostalni izvor električne energije koji se lokalno neposredno koristi. U drugom slučaju OIE je dio šireg energetskog sustava kao što je danas. UVODS koristi ovu energiju na isti način kako se i danas opskrbljuje energijom.

Odabir primjene pojedinog koncepta ovisi o cijelom nizu čimbenika od kojih su najvažniji značajke vodovoda, te značajke mogućih izvora OIE. Moguće je primijeniti i oba koncepta.

Općenito, obnovljivi izvori energije dijele se na stalne izvore energije (OIE-C) i povremene izvore energije (OIE-I), [G2]. Stalni OIE su hidroenergija, geotermalna energija i biomasa, koji mogu kontinuirano proizvoditi zelenu energiju, a povremeni su solarna energija i vjetar, koji proizvode "zelenu" energiju kada Sunce sija, odnosno kada puše vjetar. Trenutni tehnološki razvoj i korištenje OIE još nije potpuna i učinkovita zamjena klasičnih energetskih izvora. Problem je u tome što se najvažniji OIE, kao što su solarna energija i energija vjetra (OIE-I) ne mogu izravno usmjeriti prema potrošačima energije, te pritom ostati stabilni i kontrolirani, za razliku od hidroenergije, geotermalne energije i biomase (OIE-C). Solarna energija i energija vjetra nisu konstantne, budući da vjetroelektrane proizvode energiju samo kad puše pogodan vjetar, dok solarne elektrane proizvode energiju samo tijekom sunčanog perioda. Nadalje, OIE-I izvori energije ne mogu kontinuirano proizvoditi energiju i opskrbljivati potrošače, tako da je važno kombinirati ih sa klasičnim izvorima posredstvom sustava električne mreže ili korištenjem Spremnika Električne Energije (SEE).

Na ovakav način, SEE imaju značajnu ulogu u ostvarenju opskrbe UVODS-a "zelenom energijom". Danas su poznate različite tehnologije spremanja energije (baterije, tlačni kotlovi, zamašnjaci, itd.), koje se razlikuju u veličini, troškovima uskladištenja energije, učinkovitosti, roku trajanja, troškovima ciklusa rada, itd., [C5]. Tradicionalni način skladištenja električne energije je putem hidroelektrana sa spremnicima vode (crpne hidroelektrane), koje se i danas koriste za pokrivanje dnevnih "špiceva" potrošnje energije.

Očito da je najpouzdanije rješenje za UVODS korištenje "Zelene energije" iz elektroenergetskog sustava (mreže). Međutim, takvi energetski sustavi za sad još ne postoje pa za UVODS to predstavlja dugoročno rješenje za vrijeme kad će takva mreža "Zelene energije" biti raspoloživa. Normalno, postavlja se pitanje da li postoji lokalno rješenje za korištenje "Zelene energije" (samostalni sustav) koji će zadovoljiti rigorozne kriterije povezane s pouzdanošću rada UVODS-a i istovremeno doprinijeti postizanju cilja održivosti.

To bi trebalo biti rješenje koje bi koristilo lokalne raspoložive OIE i vodoopskrbni sustav kao spremnike energije, te ukoliko je moguće i kao izvore hidroenergije. To znači da se povremeni OIE tj. vjetar i solarna energija (OIE-I) mogu koristiti sa hidroenergijom, biomasom i ostalim stabilnim OIE-C, ukoliko su raspoloživi unutar ili u blizini urbanih područja. Takvo rješenje očito zahtijeva pouzdano i ekonomski isplativo rješenje uskladištenja energije. Koncept proizvodnje i skladištenja energije u UVODS-u analizira se u ovoj disertaciji.

OIE-C koji se mogu primijeniti u urbanom vodnom sustavu su geotermalna energija, biomasa i mala hidroenergetska postrojenja. To su specifični izvori energije i tehnološki su vrlo različiti.

Geotermalna energija je dobivena od Zemljine unutarnje topline i može biti upotrijebljena za stvaranje pare u svrhu rada parnih turbina i električnih generatora, kao klasične termoelektrane. Preduvjet za primjenu tog izvora energije je postojanje povoljnih geotermalnih uvjeta u blizini gradova.

Biomasa uključuje svaku organsku tvar koja je raspoloživa i koja je obnovljiva. Energija biomase može se koristiti kao plin, čvrsta ili tekuća biomasa. Budući da je obnovljiva i dostupna u velikim količinama, biomasa ima potencijal ponuditi različitu opskrbu pouzdanih, ekonomski dostupnih spojeva i energije koji mogu zamijeniti fosilna goriva. Biomasa uključuje usjeve i drveće, ostatke od usjeva, ostatke od životinja i ostale organske otpadne materijale, te mulj na uređajima za pročišćavanje otpadnih voda.

Energija biomase je dugo vremena korištena u urbanim vodnim sustavima i postrojenjima za pročišćavanje otpadnih voda. Izvor energije je plin metan, nastao procesom anaerobne digestije iz mulja. Napredna fluidizirana tehnologija također je korištena za obradu mulja, pri čemu nastaje električna energija i toplina. Općenito, raspoloživa količina kod većih uređaja je dovoljna da pokrije sve potrebe postrojenja za pročišćavanje otpadne vode. To je dokazana i provjerena tehnologija, kao i njezina isplativost. Nažalost, raspoloživa energija nije dovoljna da zadovolji sve potrebe UVS-a, pa ni UVODS-a.

Hidroenergija je klasični izvor "Zelene energije", koji je u prednosti nad ostalim izvorima energije, no često nije na raspolaganju u blizini ili pak u gradovima. Međutim, ona u pojedinim slučajevima može imati utjecaje na okoliš povezane sa emisijom stakleničkih plinova, koji nastaju biološkim procesima u akumulacijama [I2]. Također je zbog promjene lokalnih hidroloških uvjeta potrebno uzeti u obzir lokalne utjecaje na mikroklimu, i tako na floru i faunu [S5].

OIE-I (u odnosu na njihovu globalnu distribuciju), koji se mogu naširoko koristiti u UVS-a su vjetar i solarna energija. Vjetar je lokalni i globalni izvor energije, raspoloživ na brojnim lokacijama, s različitim energetskim potencijalom. Vjetar je posljedica Sunčevog zračenja. Projekt vjetroenergetskog postrojenja počinje analizom vjetrovitosti lokacije, budući da ekonomičnost snage vjetra ovisi o brzini vjetra i njegovom trajanju tijekom godine. Aktualna snaga sadržana u vjetru varira do treće potencije brzine vjetra.

Jedna stvar je sigurna - ne postoji lokacija s vjetrom, koja je toliko blizu UVODS-a, a koja je dovoljno pouzdana i ima adekvatnu brzinu vjetra tijekom cijele godine i iz godine u godinu isto tako. Prekidi proizvodnje energije su mogući, pri čemu je njihova karakteristika da su nepredvidljivi i po pojavljivanju i po trajanju. Ove karakteristike vjetro-turbina su u stvari najveći problem za energetski sustav "bez mreže" (off-grid), odnosno za korištenje u UVODS-u [S5].

Drugi značajni stalni izvor energije (OIE-I) je Sunce (solarna energija). Solarna energija može se koristiti za proizvodnju električne energije na dva načina: ili putem solarnih (ST) termoelektrana ili putem solarnih fotonaponskih (PV) elektrana. Solarno fotonaponsko (PV) postrojenje pretvara Sunčevo zračenje direktno u električnu energiju. To su vrlo jednostavna postrojenja, ali zasnovana na tehnologiji koja je energetski intenzivna. ST postrojenja koriste Sunce kao izvor topline. Toplina je zahvaćena, koncentrirana i korištena za pogon toplinskih motora i električnih generatora. To su složena postrojenja, uglavnom zasnovana na postojećim tehnologijama (termoelektrane). Ona mogu proizvoditi električnu energiju samo kad Sunce sija. Tijekom noći nema sijanja Sunca, a samim time i električne energije, što je glavni nedostatak ovakvog postrojenja. Međutim, Sunce u manjoj ili većoj mjeri sija svaki dan, što je osnovna prednost ovog izvora u odnosu na vjetar. U svrhu proizvodnje kontinuirane izlazne snage, ovakva postrojenja zahtijevaju određeno pokrivanje korištenjem klasičnih (fosilnih) goriva ili korištenjem spremnika električne energije (baterije, akumulatori) ili topline.

Sunce se javlja svaki dan u manjem ili većem intenzitetu. To je energija dostupna na svim lokacijama gdje ljudi žive. Zbog toga je u ovom istraživanju naglasak na PV energiji. Međutim, osnovne karakteristike ovdje predloženog i analiziranog rješenja su primjenjive i na druge OIE, s tim da se rješenje prilagodi značajkama tih OIE.

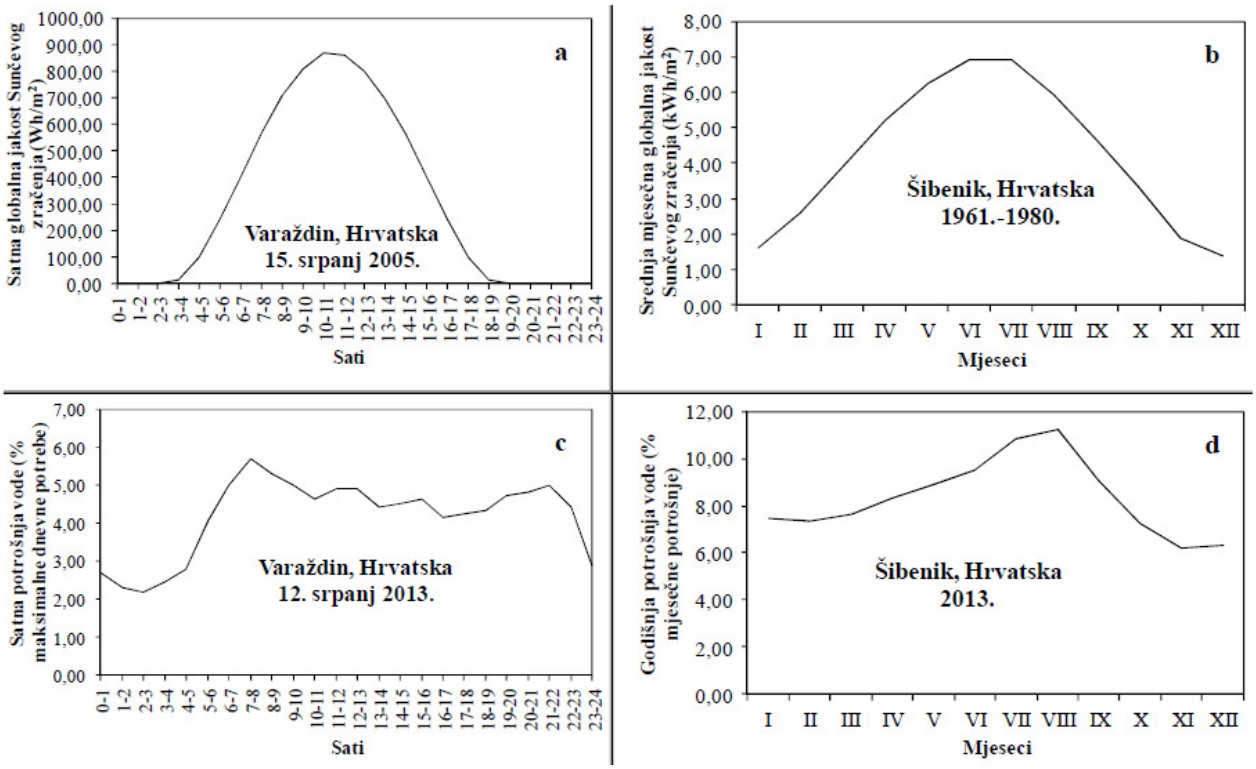
4. KONCEPT PRIMJENE SOLARNE FOTONAPONSKE ENERGIJE U URBANOM VODOOPSKRBNOM SUSTAVU

4.1. Općenito o solarnoj fotonaponskoj energiji

U disertaciji će se analizirati korištenje solarne fotonaponske (PV) energije u Urbanom Vodoopskrbnom Sustavu (UVODS-u). Solarna energija je primarna energija na Zemlji. Ona je izvor svih ostalih energija (vjetar, biomasa, hidroenergija, morski valovi). Zbog toga je ovaj izvor energije sa stanovišta održivosti najpovoljniji. S druge strane, PV tehnologija je najjednostavnija sa značajnim trendom smanjenja cijene, te trendom povećanja učinkovitosti. Stoga se ista smatra vrlo povoljnim izvorom ako je uspješno riješen problem skladištenja energije.

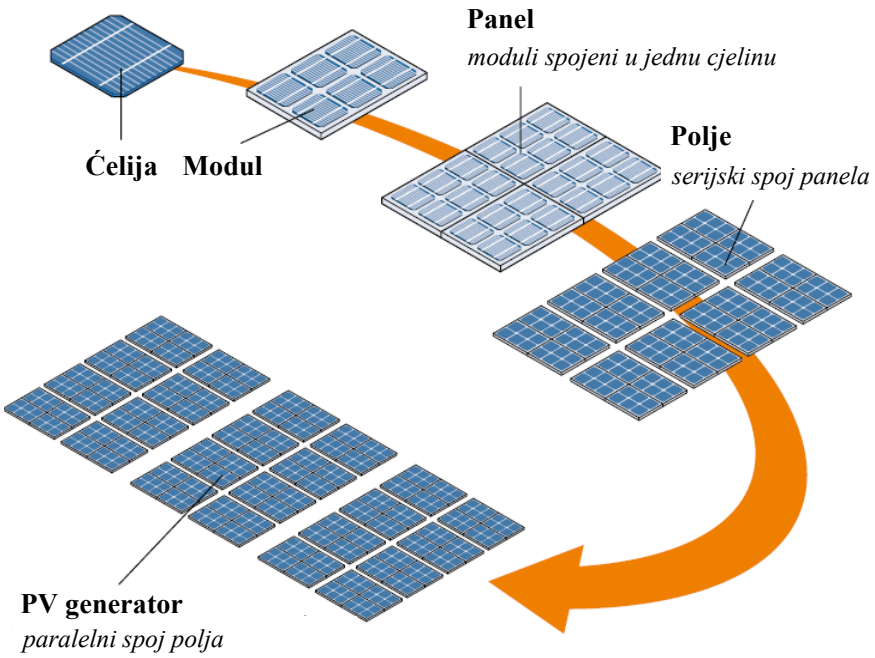
Vrlo je bitno naglasiti da je "besplatna solarna energija" raspoloživa u periodu kad je energija iz regionalnog klasičnog sustava (sustava koji koristi električnu energiju iz električne mreže) najskuplja (najčešće od 6 do 18 sati), što znači da su uštede na troškovima energije najveće. Također, godišnja proizvodnja energije u nekim područjima poklapa se sa godišnjim povećanjem potrošnje vode (npr. mediteranska turistička područja). Općenito, 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 4.1.

Drugim riječima, dnevna potrošnja vode u gradovima općenito je dijelom usklađena sa dnevnom insolacijom (slike 4.1b. i 4.1d.), dok je satna potrošnja vode također djelomično usklađena sa dnevnom insolacijom (slike 4.1a. i 4.1c.). To znači da korištenje solarne fotonaponske energije iz PV generatora može biti učinkovito i prihvatljivo rješenje opskrbe UVODS-a sa "Zelenom energijom".



Slika 4.1. Odnosi između raspoložive solarne energije i potreba za vodom (podaci preuzeti iz [M8], [S2], [V2])

Solarni fotonaponski sustav proizvodnje električne energije (PV elektrana) ili PV sustav sastoji se od PV generatora i invertora, te pripadne opreme i kablova. PV ćelije spajaju se u PV modul, pri čemu spojeni PV moduli formiraju samostalnu strukturu nazvanu PV panel, koji se serijski spaja u PV polja koja, spojena serijski ili paralelno, konačno formiraju PV generator određene snage tj. kapaciteta, slika 4.2.

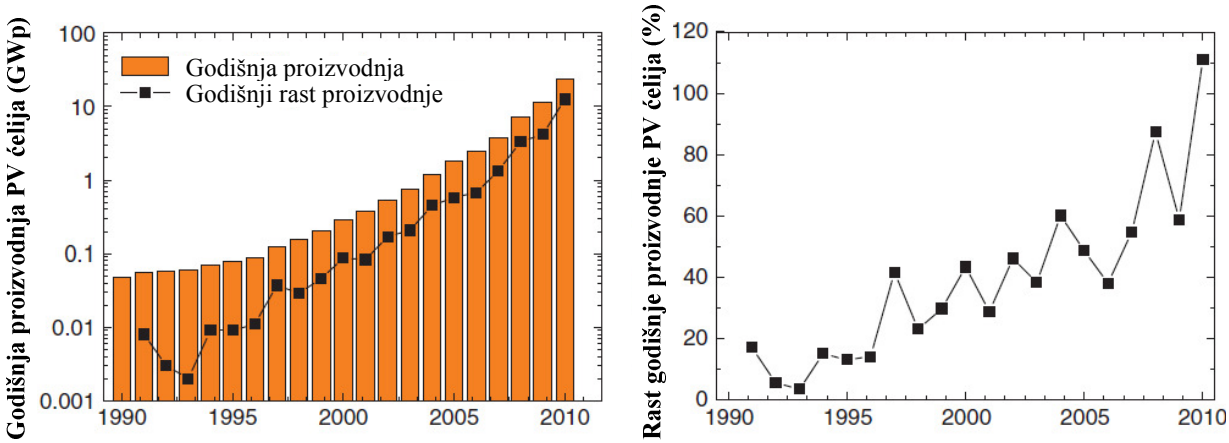


Slika 4.2. Struktura PV generatora [A1]

Zadatak solarnih ćelija je prikupljanje Sunčevog zračenja. Ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu sastoji se od izravnog i raspršenog zračenja, dok se ukupno Sunčevo zračenje na nagnutu plohu sastoji od izravnog, raspršenog i odbijenog zračenja [M8]. Uloga invertora je pretvaranje istosmjerne električne struje u izmjeničnu električnu struju [R4]. Danas se najviše koriste solarne ćelije na bazi silicija od monokristalnog silicija, polikristalnog silicija, amorfnog silicija, te nešto manje od kadmij-telura i bakar-iridij-galij selenida/sulfata [G3], a također su u postupku istraživanja ćelije od ostalih materijala [T2].

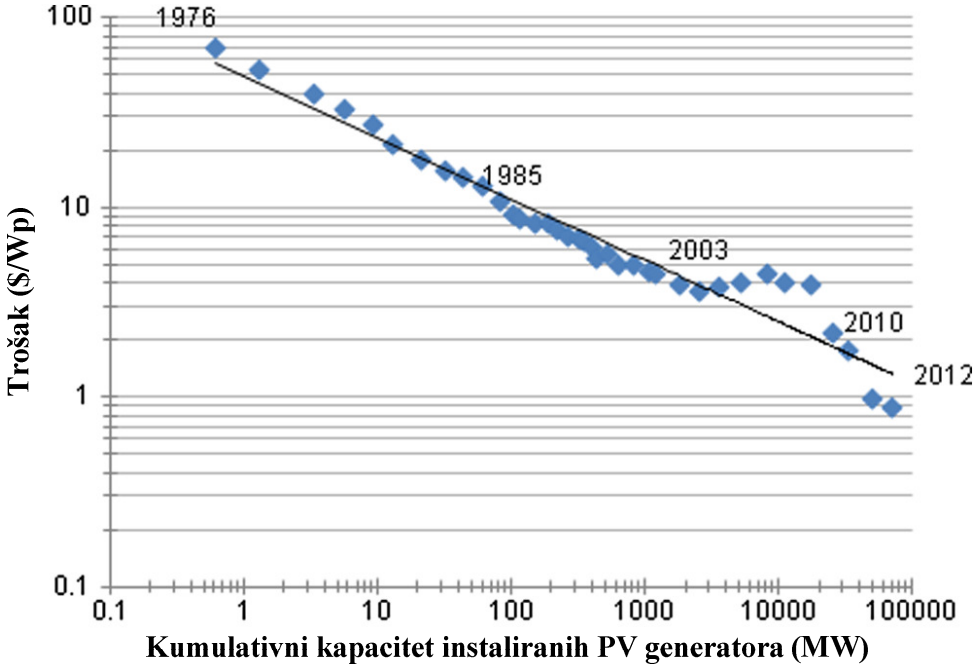
Period vraćanja uloženih sredstava u PV energiju je kratak i konstantno se smanjuje. To znači da vrijeme potrebno da PV sustav proizvede toliko energije koliko je potrebno da bude proizveden je vrlo kratko i ono iznosi između godine i pola pa do tri godine. PV sustav proizvodi 6 do 18 puta više energije u odnosu na energiju koja je potrebna da se on proizvede. Sektor PV industrije, s prosječnim godišnjim rastom od 40 % unatrag prošlih nekoliko godina, značajno doprinosi nastanku novih radnih mjesta u Europi i svijetu. Dakle, PV sustavi doprinose sigurnosti svjetske opskrbe energijom, [E5]. Sve dosad navedeno podrazumijeva da korištenje Sunčeve fotonaponske energije omogućava široku uporabu PV sustava za dovod električne energije u vodoopskrbni sustav. Pogotovo je to slučaj u izoliranim vodoopskrbnim područjima ili pojedinim dijelovima (objektima) vodoopskrbnog sustava, kod kojih nije omogućen dovod električne energije iz električne mreže ili je pak isto vrlo skupo [M9].

Sa slike 4.3. vidljivo je da je, na osnovu proizvedene količine PV ćelija, korištenje solarne fotonaponske energija dokazano i prepoznato u cijelom svijetu, a također je vidljiva i tendencija daljnjeg povećanja proizvodnje PV ćelija.



Slika 4.3. Godišnja količina i stopa rasta proizvedenih solarnih PV ćelija [V1]

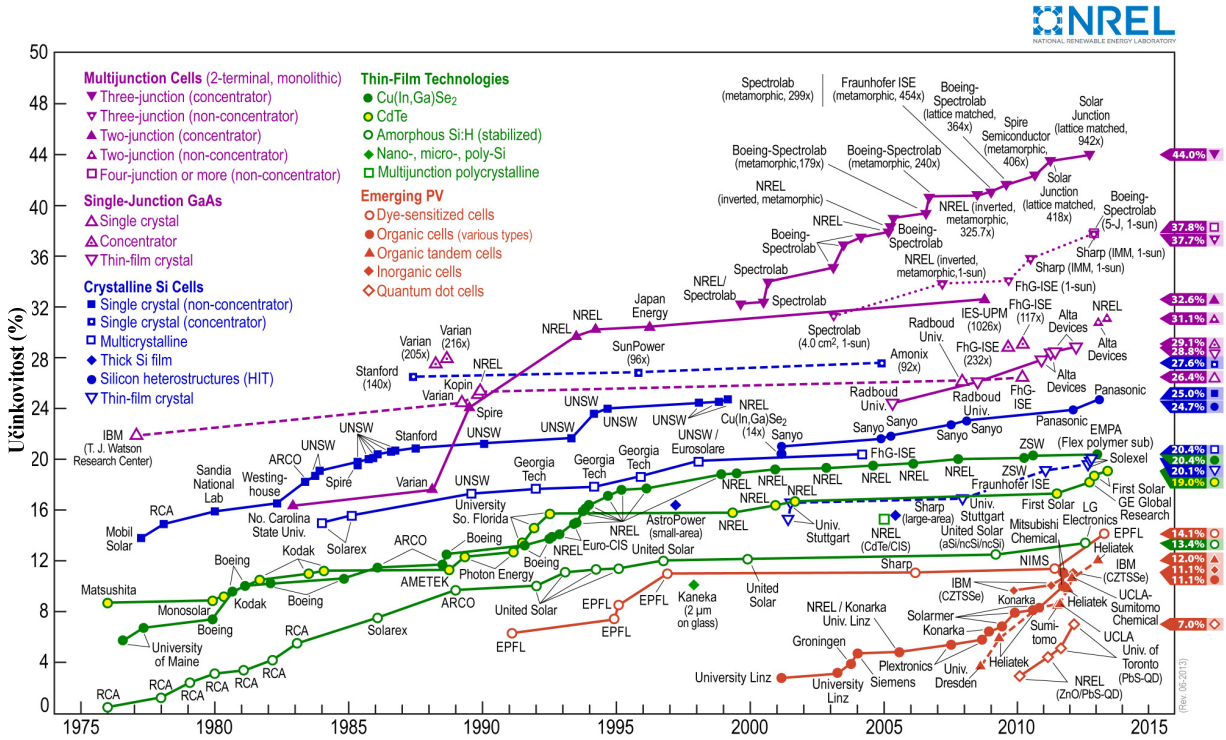
Od 1976. godine do današnjeg dana, troškovi solarnih ćelija pali su za čak 98 %, dok je kapacitet instaliranja povećan otprilike za čak više od 100 000 puta, slika 4.4.



Slika 4.4. Prikaz smanjenja cijene PV ćelije za 1 W vršne proizvedene snage i prikaz povećanja instaliranog kapaciteta PV sustava od 1976. godine do 2012. godine [M7]

Također se očekuje godišnji pad cijene PV ćelija od 4 % do 7 % s obzirom na današnju cijenu koja se kreće u rasponu od od 1 $ (slika 4.4.) pa do 1.5 € za 1 W proizvedene snage, [S1,

S3]. No, ove informacije potrebno je uzeti s određenom dozom rezerve, budući da je teško prognozirati trendove smanjenja, odnosno povećanja cijena na ovako velikom tržištu. Na slici 4.5. vidljiv je trend povećanja učinkovitosti PV ćelija.



Slika 4.5. Trend povećanja učinkovitosti PV ćelija [T2]

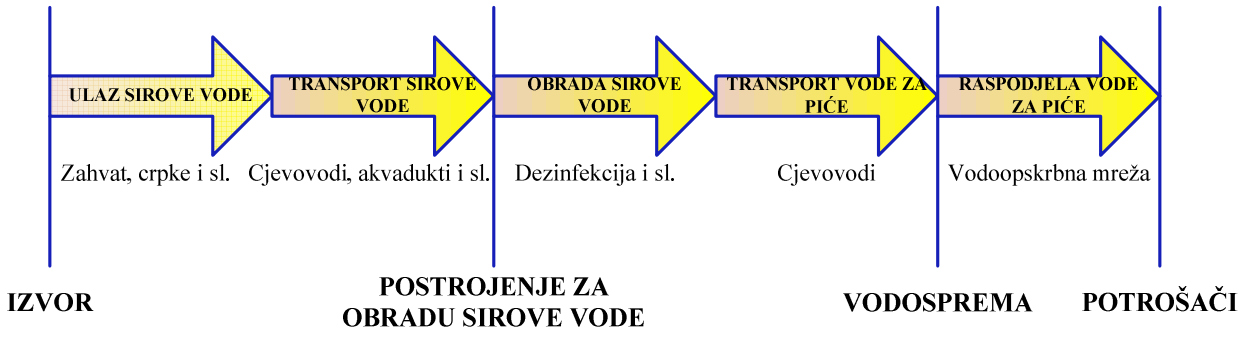
S današnjih 15 % očekuje se trend povećanja učinkovitosti do 30 % u narednih 30 godina [G4], dok je već u laboratorijskim uvjetima postignuta učinkovitost od 44 % (slika 4.5.).

Kad se sagleda sve dosad navedeno, zaključuje se da je solarna fotonaponska (PV) energija najbolji obećavajući izvor energije za UVODS, dok je drugi izvor energije, hidroenergija, uvijek manje ili više dostupna u samom vodoopskrbnom sustavu.

4.2. Energija i voda u vodoopskrbnom sustavu

Urbani Vodoopskrbni Sustavi (UVODS) su prirodni, modificirani i od strane ljudi izgrađeni elementi kruženja urbanih voda, koji se mogu naći u gradovima. UVODS-i osiguravaju vodu u svrhu življenja ljudi, higijene, zdravlja, sigurnosti, rekreacije i općenito kvalitete življenja. Prirodni sustav uključuje lokalne i regionalne izvore vode, dok izgrađeni sustav uključuje zahvate

vode, uređaje za obradu sirove vode, vodoopskrbne cjevovode, crpne stanice, te vodospreme. Izgrađeni UVODS (slika 4.6.) je cjeloviti dio šireg urbanog infrastrukturnog sustava.



Slika 4.6. Urbani vodoopskrbni sustav [T3]

U vodoopskrbnom sustavu energija se troši na zahvaćanje (crpljenje) vode na zahvatima, u postrojenjima za obradu sirove vode, no najviše energije troši se za crpljenje vode u vodospreme koje osiguravaju potrebni tlak vode u vodoopskrbnom sustavu. Kako je već rečeno u *UVODU*, u vodoopskrbnom sustavu je velika potrošnja energije čija cijena u najvećoj mjeri određuje cijenu usluge vodoopskrbe. Zbog toga se sustav optimizira kako bi se postiglo energetski, a time i ekonomski prihvatljivo rješenje. Pored uobičajenih mjera za poboljšanje energetske učinkovitosti, ključni objekt koji najviše utječe na energetske značajke vodoopskrbnog sustava je vodosprema.

Najveći izazov za sadašnja vodoopskrbna poduzeća je osiguranje vodoopskrbe po prihvatljivim cijenama. Aktivnosti u UVODS-u su energetski intenzivne, te općenito rastu sa povećanjem veličine grada, kao i sa povećanjem potrošnje vode u njemu. Četiri su osnovna pokazatelja koja karakteriziraju sustave i kvalitetu usluga koje pružaju; to su količina vode, kakvoća vode, cijena i sigurnost.

Vodosprema je glavni funkcionalni element vodoopskrbnog sustava. Visinski položaj vodospreme određuje tlak vode u vodoopskrbnom sustavu s jedne strane, te visinu crpljenja vode s druge strane. Operativni volumen gradske vodospreme je rezultat izjednačavanja količine vode koja dotječe u vodospremu (koja se crpi pomoću crpne stanice) i količine vode koja istječe iz vodospreme (koju zahtijeva stanovništvo) u analiziranom planskom periodu.

Uz operativni volumen, u ukupni volumen vodospreme potrebno je uračunati požarni volumen koji služi za spremanje vode za gašenje požara, volumen za incidentne situacije, volumen za održavanje minimalne razine potrebnog tlaka, kao i volumen za osiguranje potrebne količine vode kod prekida dotjecanja za podržavanje dotoka vode u vodoopskrbnu mrežu.

Prema [M2], jednadžba stanja (bilance vode) za gradsku vodospremu jednaka je:

$$V_{(t)} = V_{(t-1)} + V_{CS(t)} - V_{sat(t)} - V_{gub(t)} \tag{4.1.}$$

gdje prirast t preuzima vrijednost t = 1 do n (n je vremenski period, npr. 24 sata ukoliko se radi o jednom danu), $V_{(t-1)}$ (m^3) i $V_{(t)}$ (m^3) su volumeni vodospreme u t-1 i t-tom vremenskom razdoblju, $V_{CS(t)}$ je voda crpljena posredstvom crpne stanice u t-tom razdoblju (m^3), $V_{sat(t)}$ je voda ispuštena iz vodospreme prema potrošačima i $V_{gub(t)}$ su gubici vodospreme u t-tom razdoblju (m^3). Jednadžba stanja sustava uključuje najvažnije varijable vodne bilance. Vodosprema za opskrbu vodom grada je zatvorena i vodonepropusna [M3]. Samim time, veličina $V_{gub(t)}$ jednaka je 0 za sve praktične svrhe. Veličina $V_{sat(t)}$ je satna potreba za vodom tijekom dana i općenito je poznata i propisana u procesu projektiranja sustava, dok $V_{CS(t)}$ ovisi o projektiranom režimu rada crpne stanice. Dakle, može se reći da vodosprema također ima i ulogu spremnika energije, budući da izjednačava ulaznu i izlaznu energiju u vodoopskrbnoj mreži.

U vodoopskrbnom sustavu koji koristi električnu energiju iz regionalne i/ili lokalne električne mreže crpljenje vode u vodospremu uglavnom se planira na dva načina:

- Crpljenje vode konstantno tijekom 24 sata;
- Crpljenje vode tijekom perioda jeftinije električne energije (od 21 do 7 sati), te
- Kombinacija prethodna dva režima crpljenja.

Naravno, izvor električne energije je električna mreža koju klasične hidroelektrane, termoelektrane ili nuklearne elektrane još uvijek opskrbljuju električnom energijom.

Ulaz vode u vodospremu je moguće kontrolirati, budući da se radom crpne stanice koja crpi vodu u vodospremu može upravljati, dok izlaz vode iz vodospreme nije moguće kontrolirati, budući da on ovisi o navikama i standardu ljudi, slika 4.7.

Slika 4.7. Shematski prikaz režima ulaza i izlaza vode iz vodospreme

U skladu sa time, veličina operativnog volumena vodospreme V_{op} je funkcija dotoka vode u vodospremu Q_{CS} i istjecanja vode iz vodospreme Q_{GOC}:

$$V_{op} = f\,(Q_{CS},\, Q_{GOC}) \tag{4.2.}$$

Protok vode u glavnom opskrbnom cjevovodu Q_{GOC} je količina vode koju troši stanovništvo.

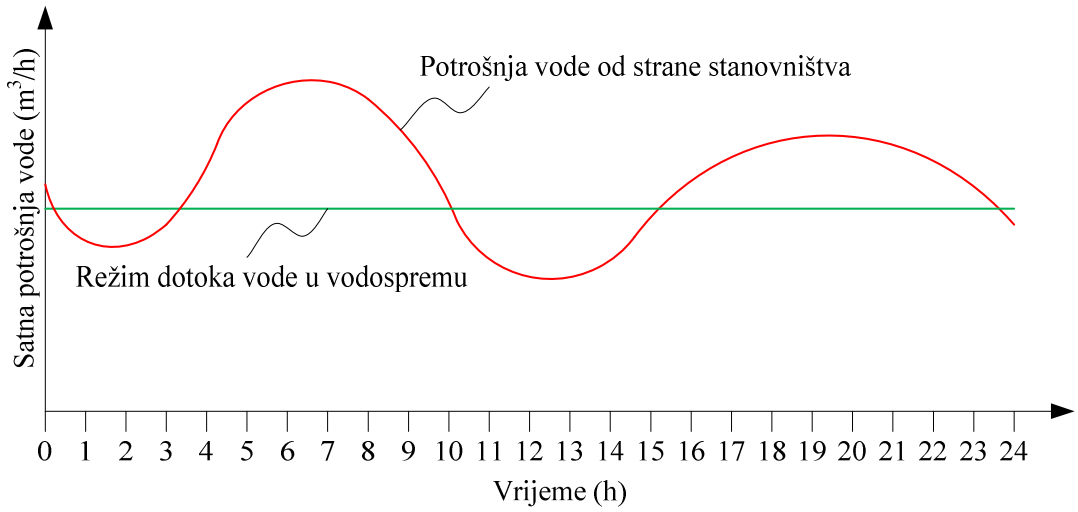
Ukupni dotok vode u vodospremu je jednak količini vode koju crpi crpna stanica Q_{CS} tijekom 24 sata crpljenja, ukoliko se sva precrpljena voda crpi u vodospremu, odnosno ukoliko je ta crpna stanica namijenjena isključivo crpljenju vode u vodospremu, što je slučaj u gradskim vodospremama. U tom slučaju govori se o Glavnoj Crpnoj Stanici (GCS). Dakle, maksimalni dotok Q_{CS} (m^3/h) za ovaj slučaj crpljenja vode tijekom trajanja crpljenja T_{CS} = 24 sata jednak je:

$$Q_{CS,24} = V_{dnev}/T_{CS} = 0.0417\times V_{dnev} \tag{4.3.}$$

pri čemu je V_{dnev} najveća dnevna količina vode koju zahtijeva stanovništvo tijekom planskog perioda.

Režim izlaza (istjecanja) vode iz vodospreme određuje stanovništvo i drugi korisnici u naselju svojom potrošnjom.

Na slici 4.8. prikazan je režim dotjecanja i istjecanja vode iz vodospreme, ukoliko je dotok vode u vodospremu, odnosno rad GCS konstantan kroz 24 sata.

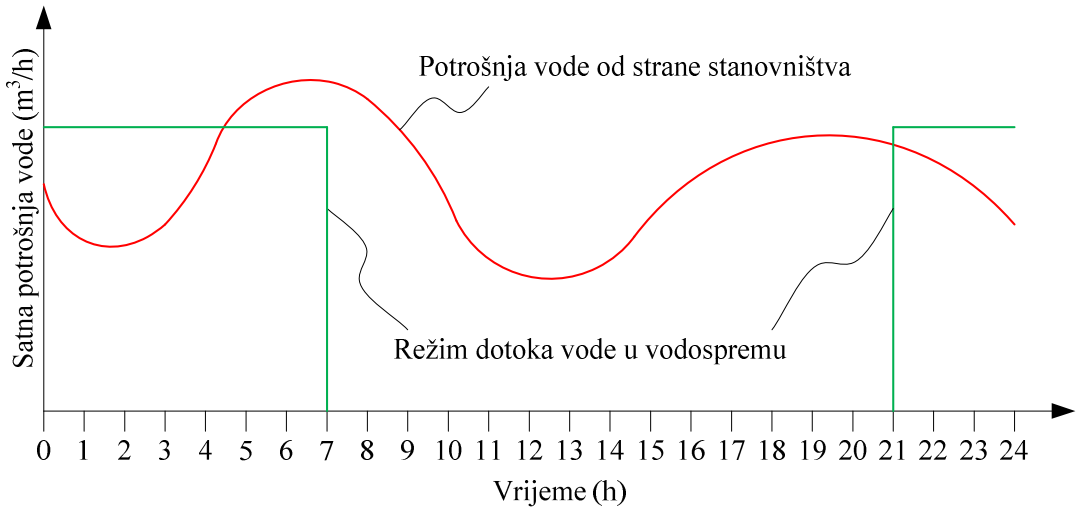


Slika 4.8. Prikaz režima ulaza i izlaza vode iz vodospreme tijekom 24 satnog konstantnog rada GCS

Za ovaj slučaj, režim dotoka vode u vodospremu ujedno predstavlja i srednju satnu potrošnju vode od strane stanovništva, odnosno najmanji mogući kapacitet GCS. GCS radi

konstantno kroz 24 sata, dakle u vrijeme perioda jeftinije i skuplje električne energije. Pri tome se u vodospremu crpi konstantna količina vode, pri čemu je ukupni dotok $Q_{CS,24}$ jednak dnevnoj potrošnji vode V_{dnev} (m^3) podijeljenoj s vremenom crpljenja T_{CS} = 24 h, jednadžba (4.3.).

Ukoliko se usvoji da će GCS raditi tijekom perioda u kojem je električna energija jeftinija, dakle od 21 do 7 sati (kroz T_{CS} = 10 sati), režim dotoka vode u vodospremu je drugačiji, a kapacitet GCS veći, slika 4.9.



Slika 4.9. Prikaz režima ulaza i izlaza vode iz vodospreme tijekom 10 sati (od 21 do 7 sati) rada GCS

Dotok vode u GCS, $Q_{PS,10}$ (m^3/h), tijekom perioda rada u trajanju od T_{CS} = 10 h jednak je:

$$Q_{PS,10} = 0.1 \times V_{dnev} \tag{4.4.}$$

Dakle, povremeni rad GCS-e rezultira većim dimenzijama crpnog sustava, instaliranim snagama crpnih agregata, ali i kraćim trajanjem rada GCS-e. Stalni 24-satni rad GCS-e rezultira najmanjim mogućim instaliranim kapacitetom crpki (samim time i snage), dimenzijama tlačnog cjevovoda i svih drugih sastavnih elemenata crpne stanice. Očito da je GCS sa kontinuiranim radom najjeftinije izvedbeno rješenje. Isto tako je očito da je sa stanovišta potrošnje električne energije najjeftinije rješenje sa radom GCS-e u periodu jeftinije električne energije. Za slučaj dotoka vode u vodospremu u periodu jeftinije energije, volumen vodospreme $V_{op,10}$ veći je od operativnog volumena vodospreme za slučaj konstantnog dotoka vode u vodospremu, $V_{op,24}$:

$$\begin{gathered} V_{op,24} < V_{op,10} \\ Q_{PS,24} < Q_{PS,10} \end{gathered} \tag{4.5.}$$

Kompromisno rješenje se na ovaj način bira između izvedbenih troškova GCS i vodospreme s jedne strane, te troškova energije s druge strane. Izvedbeni troškovi su jednokratni troškovi, dok je trošak energije stalan. Kako raste cijena električne enegije, rastu i troškovi rada UVODS-a. zato se sustav stalno prilagođava novim uvjetima i potrebama. Kao što je rečeno u *UVODU*, klasični izvori energije se sve više nastoje zamijeniti sa OIE, kako bi se smanjili negativni utjecaji na klimatske promjene.

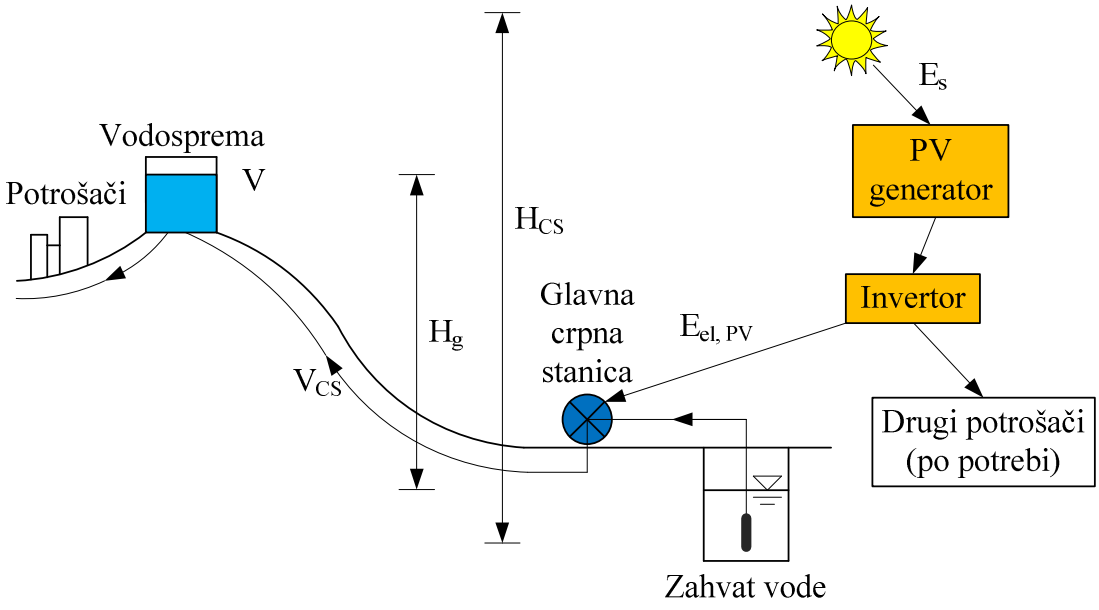
U ovoj disertaciji odabran je solarni fotonaponski (PV) sustav kao izvor OIE. PV sustav proizvodi električnu energiju kada Sunce sija (tijekom dana), a to znači da u tom periodu može raditi crpna stanica. To je drugačiji režim rada GCS u odnosu na uobičajeni gdje GCS radi i noću i danju. Proizvodnja električne energije u slučaju korištenja PV energije nije u potpunosti kontrolirana jer ovisi o veličini dnevnog zračenja Sunca, koje po svojoj jakosti i trajanju zračenja nije isto svaki dan. To su drugačiji uvjeti za rad GCS od uobičajenih, te zahtijevaju cjelovitu integraciju sa UVODS-om kako bi isti bio pouzdan u svom radu.

4.3. Integracija solarnog fotonaponskog sustava u urbani vodoopskrbni sustav

Rješenje koje se analizira u ovoj disertaciji sastoji se od četiri osnovna dijela (slika 4.10.):

- Solarno fotonaponsko postrojenje: solarni fotonaponski generator i invertor s pripadnom opremom - podsustav PV;
- Crpna stanica s pripadnom opremom - podsustav CS;
- Vodosprema s pripadnom opremom - podsustav V;
- Vodoopskrbna mreža - podsustav VM.

Ti podsustavi čine integrirani tehnološki sustav i međusobno su funkcionalno povezani, pri čemu je nastao "Zeleni" odnosno Energetski Održivi Urbani Vodoopskrbni Sustav (EOUVS). To je sustav koji u suštini pretvara Sunčevu energiju iz okoline tijekom Sunčevog zračenja u električnu energiju u podsustavu PV, koja se koristi za crpljenje vode (mehanička energija) u vodospremu. Dakle, električna energija iz podsustava PV osigurava dovoljnu, a vodosprema kontinuiranu količinu vode za potrebe stanovništva, kao i potreban tlak za vodoopskrbnu mrežu. U ovom sustavu nisu predviđeni, niti su potrebni klasični Spremnici Električne Energije (SEE) proizvedene iz podsustava PV (baterije, akumulatori i slično). Umjesto toga, kao rješenje za SEE koristi se vodosprema.



Slika 4.10. Energetski Održivi Urbani Vodoopskrbni Sustav (EOUVS)

Gradska vodosprema mora biti projektirana tako da ima dovoljan volumen za uravnoteživanje količine crpljene vode u skladu s radom podsustava PV i potrošnje vode u vodoopskrbnom području u cijelom planskom periodu. Podsustav PV mora osigurati dovoljnu količinu električne energije za pogon crpne stanice tijekom cijelog planskog perioda, odnosno perioda za koji je EOUVS projektiran. GCS mora osigurati crpljenje traženih količina vode u vodospremu, u skladu s dnevnom potrošnjom vode u naselju. Vodoopskrbna mreža ima zadatak osiguranja opskrbe vodom do svih potrošača u naselju.

Kao što je rečeno u poglavlju *OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE I ODRŽIVOST RADA URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA*, podsustav PV se može koristiti kao jedini izvor električne energije ili u kombinaciji sa drugim izvorima, odnosno zajedno sa dostupnom električnom mrežom ili nekim drugim lokalnim izvorima (dizel-agregati).

Ukoliko postoji veza između lokalne/regionalne električne mreže, električna energija iz podsustava PV u isto vrijeme može se koristiti za direktnu opskrbu GCS i električne mreže, kao i za ostale potrošače kad podsustav PV ima dovoljan kapacitet i kad je vodosprema puna. Isto tako, električna mreža može osigurati električnu energiju ako podsustav PV ne daje dovoljno električne energije. Podsustav PV može davati električnu energiju samo za pokrivanje dnevnih i sezonskih "špiceva" potrošnje energije. Moguće su razne kombinacije, ovisno o značajkama UVODS-a i planirane funkcije podsustava PV, kao i izvora električne energije. Glavni cilj ovakvog kombiniranog sustava je osiguranje kontinuirane vodoopskrbe sa visokom pouzdanošću tijekom cijelog planskog perioda.

Solarna energija je stohastičke prirode s obzirom na jakost i trajanje Sunčevog zračenja. Stoga je uloga vodospreme kao spremnika vode, odnosno energije u sprezi sa mogućom proizvodnjom električne energije iz podsustava PV, ključna u osiguravanju kontinuiteta i sigurnosti opskrbe vodom. Zato se sustav mora odgovarajuće planirati i dimenzionirati, odnosno mora se primijeniti metodologija koja se u ovoj disertaciji prikazuje i analizira.

4.3.1. Dimenzioniranje podsustava PV (PV generator i invertor)

Snaga podsustava PV, $P_{el,PV}$ (W), koji proizvodi električnu energiju za crpljenje vode u vodospremu u određenom vremenskom periodu i, koji označava dane u godini, i = 1, 2,… 365 dana, jednaka je [M4]:

$$P_{el,PV(i)} = \frac{2.72 H_{CS(i)}}{\left[1-\alpha_c\left(T_{cel(i)}-T_0\right)\right]\eta_{CSI} E_{s(i)}} V_{CS(i)} \tag{4.6.}$$

gdje je $H_{CS(i)}$ (m) manometarska visina, $V_{CS(i)}$ (m^3/dan) je dnevna količina vode koja se crpi u vodospremu u određenom vremenskom periodu (danu) i (i = 1, 2,..., 365), α_c je temperaturni koeficijent solarne ćelije (°C), T_{cel} je srednja dnevna temperatura solarne ćelije (°C), T_0 je srednja dnevna temperatura solarne ćelije u standardnim uvjetima ispitivanja i ona iznosi 25°C, η_{CSI} je srednja učinkovitost crpne stanice i invertora (%), $E_{s(i)}$ (kWh/m^2) je raspoloživa srednja dnevna jakost globalnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu, u vremenskom koraku i.

Proizvedena električna energija $E_{el,PV(i)}$ (Wh) izražena je preko:

$$E_{el,PV(i)} = P_{el,PV(i)} \times T_i \tag{4.7.}$$

gdje je T_i vremenski korak za kojega se određuje $E_{el,PV(i)}$.

Srednja dnevna temperatura solarne ćelije, $T_{cel(i)}$, dobije se pomoću [K1]:

$$T_{cel(i)} = 2.7 \times E_{s(i)} + T_{a(i)} \tag{4.8.}$$

gdje je $T_{a(i)}$ srednja dnevna temperatura zraka (°C).

Srednja učinkovitost crpne stanice i invertora η_{CSI} dobivena je kao [M5]:

$$\eta_{CSI} = \eta_{CS} \times \eta_I \tag{4.9.}$$

gdje je η_{CS} učinkovitost crpne stanice, dok je η_I učinkovitost invertora.

Za određenu snagu podsustava PV, $P_{el,PV(i)}$ (W), moguća količina vode $V_{CS(i)}$ (m^3) koja se crpi u vodospremu u vremenskom periodu *i* jednaka je:

$$V_{CS(i)} = \frac{\left[1-\alpha_c\left(T_{cel(i)}-T_0\right)\right]\eta_{CSI}\,E_{S(i)}}{2.72\,H_{CS(i)}}\,P_{el,PV(i)} \tag{4.10.}$$

Potrebna površina PV generatora A_{PV} (m^2), dobije se iz [K1]:

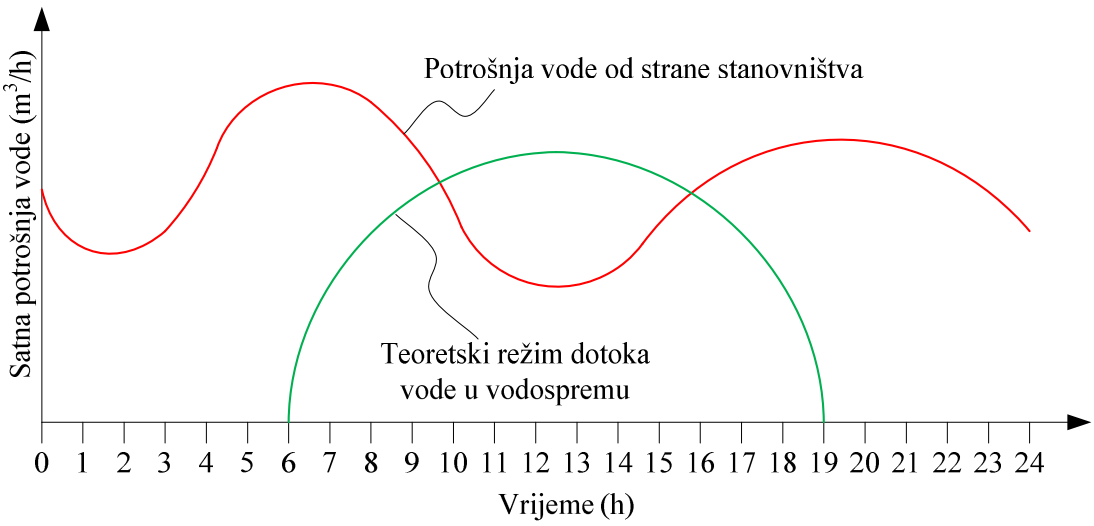
$$A_{PV} = \frac{P_{el,PV}}{1000\,\eta_{PV}} \tag{4.11.}$$

gdje je η_{PV} srednja učinkovitost podsustava PV.

Kao što se može vidjeti, količina vode koja $V_{PS(i)}$ se može precrpiti je direktno proporcionalna raspoloživoj snazi podsustava PV, $P_{el,PV(i)}$ i jakosti Sunčevog zračenja $E_{s(i)}$.

4.3.2. Dimenzioniranje podsustava CS (Crpna Stanica)

Podsustav CS (Crpna Stanica) podrazumijeva Glavnu Crpnu Stanicu (GCS) u kojoj se nalazi crpni agregat sa elektromotorom, crpnim bazenom, pripadnom opremom i kablovima. Raspoloživo Sunčevo zračenje $E_{s(i)}$, odnosno proizvedena električna energija $E_{el,PV(i)}$ (iz podsustava PV) određuje mogući kapacitet i period rada crpne stanice za svaki dan. Pri tome je rad crpne stanice u svakom danu *i* omogućen samo za određeno standardno trajanje Sunčevog zračenja $T_{s(i)}$ (h), slika 4.11. Period trajanja Sunčevog zračenja T_s definiran je kao razdoblje u kojem je intenzitet direktnog Sunčevog zračenja veći od 120 W/m^2 [M8]. Trajanje sijanja Sunca ili osunčavanje T_s se mjeri u satima, pri čemu T_s treba razlikovati od ukupnog broja Sunčanih sati (bez oblaka).



Slika 4.11. Prikaz režima ulaza i izlaza vode iz vodospreme tijekom rada crpne stanice tijekom perioda trajanja Sunčevog zračenja

Odabir optimalne snage podsustava PV (PV generatora i invertora) je u stvari određen u skladu sa Standardnim Testnim Uvjetima (Standard Test Conditions), što označava nazivnu snagu PV podsustava. Pri tome se podrazumijeva da se jedan W nazivne snage podsustava PV ostvaruje pri jakosti Sunčevog zračenja od 1000 W/m^2 pri temperaturi od 25 °C i koeficijentu zračne mase (veličina koja izražava debljinu zračne mase) od 1.5. To često nije ostvareno, tako da je moguće da izlazne (stvarne) snage budu čak u jače od nazivnih snaga, primjerice ukoliko je srednja dnevna temperatura zraka ispod 25°C, odnosno što je srednja dnevna temperatura zraka manja, to je izlazna snaga veća. Također je kod viših nadmorskih visina, primjerice kod planinskih lokacija u Švicarskoj, izlazna snaga podsustava PV veća. Konkretno, tamo je zabilježena izlazna snaga 30 % veća od nazivne [P4]. Također je potrebno naglasiti činjenicu da su izlazne snage podsustava PV u stvari usvojene s određenom rezervom, upravo iz prethodno spomenutih razloga, odnosno ekstremnih uvjeta koji se mogu pojaviti.

Također je moguće da i izlazna snaga podsustava PV bude manja od njegove nazivne snage, u slučaju naoblake, magle, sjene i prašine na PV ćelijama, slabe kvalitete proizvodnje i loše montaže, te smanjenja učinkovitosti PV ćelija tijekom vremena [M12].

Ukoliko će se sva dnevna raspoloživa solarna energija E_s, odnosno proizvedena električna energija, koristiti za crpljenje vode $V_{CS(i)}$ u vodospremu, prosječni potrebni kapacitet crpne stanice $Q_{CS,raspoloživo(i)}$ tada će biti jednak:

$$Q_{CS,raspoloživo(i)} = \frac{V_{CS(i)}}{T_{s(i)}} = \frac{P_{el,PV}}{T_{s(i)}} \frac{[1-\alpha_c(T_{cel}-T_0)]\eta_{CSI} E_{s(i)}}{2.72 H_{CS(i)}} \tag{4.12.}$$

odnosno:

$$Q_{CS} \geq max\, Q_{CS,raspoloživo(i)},\ i = 1, 2,\ldots, 365 \text{ dana} \tag{4.13.}$$

Međutim, ukoliko se sva količina vode $V_{CS(i)}$ ne mora nužno precrpiti, odnosno ukoliko je količina vode $V_{CS(i)}$ veća od potrebne količine vode za potrebe stanovništva $V_{dnev(i)}$, tada je minimalni prosječni potrebni kapacitet crpne stanice $Q_{CS,potrebno(i)}$:

$$Q_{CS,potrebno(i)} = \frac{V_{dnev(i)}}{T_{s(i)}} \tag{4.14.}$$

Budući da je namjena GCS crpljenje vode u vodospremu, tada je zahtijevani kapacitet Q_{CS}^* :

$$Q_{CS}^* = max(Q_{CS,potrebno(i)}),\ i = 1, 2,\ldots, 365 \text{ dana} \tag{4.15.}$$

Prosječna snaga crpne stanice P_{CS}^* tada je:

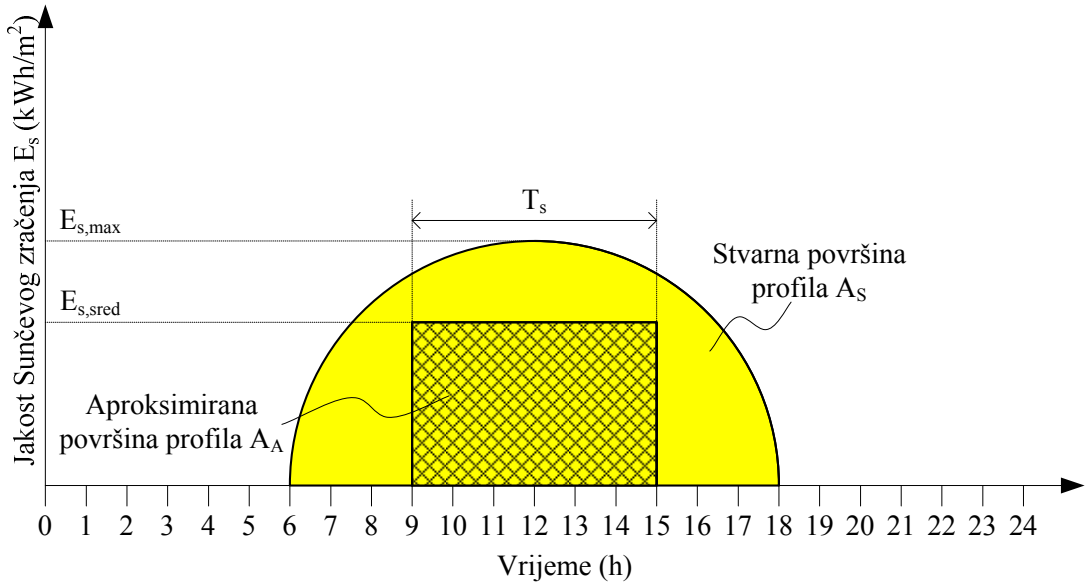
$$P_{CS}^* = \frac{\rho g Q_{CS}^* H_{CS}}{\eta_{CS}} \tag{4.16.}$$

gdje je η_{CS} prosječna učinkovitost crpne stanice.

Vidljivo je da je odabrani (instalirani) kapacitet crpne stanice određen kao dio rješenja EOUVS-a, a sve u skladu s karakteristikama problema i traženim ciljevima. Navedeni kapacitet crpne stanice je u stvari teorijska moguća veličina u kojoj GCS radi kontinuirano tijekom perioda Sunčevog zračenja T_s sa promjenjivom snagom koju ostvaruje podsustav PV u određenim klimatskim uvjetima. Isto je tehnološki složeno i teško ostvarivo. Dakle, od praktične važnosti je aproksimacija stvarnog profila dnevnog Sunčevog sijanja, odnosno režima dotoka vode u vodospremu (slika 4.11.) sa modificiranijim i pouzdanijim profilom Sunčevog sijanja prikladnim za praktično korištenje (slika 4.12.).

U tu svrhu, uvodi se postupak na osnovu kojega se definira praktična iskoristiva veličina jakosti Sunčevog zračenja, a samim time i u suštini određena rezerva (sigurnost) na osnovu koje se

vrši proračun potrebne snage PV generatora. Na slici 4.12. prikazane su ulazne veličine tog postupka.



Slika 4.12. Prikaz stvarnog i aproksimiranog profila Sunčevog zračenja tijekom dana

$E_{s,max}$ je maksimalna satna direktna jakost Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu u promatranom danu. $E_{s,sred}$ je u stvari vrijednost srednje dnevne globalne jakosti Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu E_s. Ovdje je na osnovu raspoloživih podataka o navedenim jakostima Sunčevog zračenja potrebno utvrditi koliki je odnos između površine profila A_A, koji predstavlja aproksimiranu (praktičnu za primjenu) površinu profila jakosti Sunčevog zračenja i površine profila A_S, koji predstavlja stvarnu (teoretsku) površinu profila jakosti Sunčevog zračenja.

S navedenim odnosom (omjerom) između A_A i A_S množi se, a samim time i korigira ulazna jakost Sunčevog zračenja E_s. Navedeno predstavlja određenu rezervu (sigurnost) s obzirom na veličinu jakosti Sunčevog zračenja E_s na osnovu koje se proračunava potrebna snaga PV generatora $P_{el,PV}$.

4.3.3. Dimenzioniranje podsustava V (Vodosprema)

Ukupni volumen vodospreme V (m^3) čine volumeni [M3]:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 \tag{4.17.}$$

gdje su pojedine veličine volumeni za:

- Izravnanje dotoka i potrošnje vode V_1 (m^3);
- Gašenje požara V_2 (m^3);
- Incidentne situacije V_3 (m^3);
- Osiguranje potrebne minimalne razine vode radi održanja tlaka V_4 (m^3);
- Osiguranje potrebne količine vode kod prekida dotjecanja za podržavanje dotoka vode u vodoopskrbnu mrežu V_5 (m^3).

Najveći dio volumena vodospreme čine volumeni $V_1 + V_2 + V_3$, dok su volumeni $V_4 + V_5$ relativno mali u odnosu na ukupni volumen V.

Vodospreme se u pravilu dimenzioniraju za jednodnevno izravnanje dotoka i potrošnju vode u danu maksimalne potrošnje, no izravnanje se može raditi i za više dana, najviše do sedam. Na dobivenu veličinu V_1 dodaju se volumeni za gašenja požara V_2 i za incidentne situacije V_3. Potrebne veličine se određuju za početni period rada vodospreme i krajnji planski period, te karakteristične razvojne međuperiode kod kojih se očekuje značajnija promjena potrebnog volumena vodosprema (promjena režima potrošnje vode). Isto tako nužno je analizirati rad vodosprema za sezonske varijacije potrošnje vode, ako su iste značajne, kao recimo u našim obalnim turističkim područjima.

S obzirom na vremenski intenzitet izmjena vode, ukupni volumen vodospreme V dijelimo na:

- Redovito dnevno izmjenjivi volumen V_A (operativni volumen vodospreme);
- Povremeno izmjenjivi volumen V_B.

Volumen V_A prvenstveno čini volumen V_1 koji se redovito svaki dan izmijeni u vodospremi, a koji čini i najveći dio ukupnog volumena V. Volumen V_B je manje-više slučajno obnovljivi volumen vode u vodospremi, a njega čine volumeni V_2, V_3, V_4 i V_5. U ovoj disertaciji će se zbog navedenih karakteristika analizirati samo volumen V_A koji će se u tekstu dalje označavati kao V_{op}.

Operativni volumen vodospreme $V_{op(i)}$ određuje se za svaki dan u godini grafičkim ili numeričkim postupkom metodom integralne krivulje, odnosno Riplove metode [M3]:

$$V_{op(i)} = max\left[\sum_{t=1}^{24}\left(Q_{CS(t)} - Q_{sat(t)}\right)\right],\ 1 \le t \le i \qquad (4.18.)$$

gdje je t = 1,…, 24 h, dok je i = 1,..., 365 dana.

Jednadžba (4.18.) vrijedi ukoliko je u periodu od t = 1 sat pa do 24 sata (jedan dan) dotjecanje vode u vodospremu jednako istjecanju vode iz vodospreme. To je jednostavna metodologija, koja se bazira na činjenici da je u periodu izmjene, a to može biti period od jednog pa do sedam dana, sva voda koja je dotekla u vodospremu također i istekla iz nje.

Volumen V_B se shodno potrebama precrpljuje pojačanim i produženim radom GCS. Također je potrebno razmotriti odvojeno rješavanje protupožarne zaštite od vodoopskrbe stanovništva na lokacijama gdje je to logično i moguće, kao što je predloženo i prikazano u [M1], čime se također smanjuje ukupni volumen vodospreme V.

4.3.4. Dimenzioniranje podsustava VM (Vodoopskrbna Mreža)

Cilj planiranja, dimenzioniranja i rada UVODS-a je postići tehnološki siguran i ekonomski učinkovit vodoopskrbni sustav koji jamči:

- Neprekinutu opskrbu potrošača potrebnim količinama;
- Kvalitetu vode za piće u skladu sa važečim propisima i standardima;
- Tlak u traženim (potrebnim) granicama;
- Potrebnu sigurnost u odnosu na količine, kvalitetu, tlak i sve incidentne situacije;
- Minimalne troškove i cijenu vode, minimalan negativni utjecaj na okoliš.

Za osiguranje navedenoga, grade se različiti objekti, slika 4.6., pri čemu raspored tih objekata najviše ovisi o topografskim karakteristikama područja i visinskom položaju zahvata vode u odnosu na potrošače. Ovi čimbenici reguliraju odnose u sustavu koji su definirani tehničkim i ekonomskim razlozima pogona vodoopskrbnog sustava.

U vodoopskrbnoj mreži definiran je minimalni tlak u iznosu od 2.5 bara (0,25 MPa) u skladu sa zahtjevima Pravilnika o tehničkim normativima za hidrantsku mrežu za gašenje požara [M10], kao i maksimalni dozvoljeni tlak u kritičnim (geodetski najnižim) točkama cjevovoda u iznosu od 8 bara, koji ne smije biti premašen zbog dosezanja tvornički dane tlačne čvrstoče cijevi. Tlak u mreži je nužan za rad sustava, ali tlak veći od potrebnog je najveći generator gubitaka vode u vodoopskrbnom sustavu, a njega na ulazu u mrežu regulira razina vode u vodospremi. Zbog toga je izbor kote vodospreme važan zadatak koji se mora cjelovito analizirati, kako bi se ostvarila zahtijevana vodoopskrba uz najmanje gubitke vode, a time i energije.

Osim tlaka, potrebno je zadovoljiti zahtjevu vodovodne mreže za mjerodavnom potrebnom količinom vode. Ta količina je jednaka zbroju maksimalne satne potrošnje vode, požarne potrošnje vode i očekivanih fizičkih gubitaka u mreži. U skladu s time, vodoopskrbna mreža se dimenzionira tako da se zadovolje sve potrebe (tlak i količine) uz najmanje troškove njezinog građenja, održavanja i upravljanja. U praksi se koriste odgovarajuće smjernice vezane uz izbor brzine vode u cijevima, koju u najvećoj mjeri određuje potrebni profil cijevi. Kako se protok mijenja tijekom 24 sata, kao i tijekom godine, također se mijenja i stanje tlaka vode u vodoopskrbnoj mreži. Raspoloživi višak tlaka vode je ujedno raspoloživi hidroenergetski potencijal, ali i potencijal koji generira gubitke vode u mreži.

5. METODOLOGIJA DIMENZIONIRANJA I IZBORA RJEŠENJA ENERGETSKI ODRŽIVOG URBANOG VODOOPSKRBNOG SUSTAVA UZ KORIŠTENJE SOLARNE FOTONAPONSKE ENERGIJE

5.1. Metoda kritičnog perioda

Vodosprema i crpna stanica koja crpi vodu u vodospremu se u klasičnom načinu (rješenju), kod kojeg se koristi električna energija iz električne mreže, dimenzioniraju u skladu sa smjernicama (pravilima struke) koje zahtijevaju najmanji potrebni volumen vodospreme i optimalni kapacitet crpne stanice, koji može precrpsti zahtijevanu količinu vode uz najmanje troškove. Tražena veličina vodospreme i crpne stanice je određena u skladu sa zahtjevima potrošača za vodom u planskom periodu. Mjerodavna količina je maksimalna dnevna potreba $V_{dnev(i)}$ (m^3) u planskom periodu, koja pak je suma satne protoke (potrošnje) u danu maksimalne potrošnje $Q_{sat(t)}$ (m^3/h), gdje je i = 1, 2, … 365 dana, dok je t = 1, 2, …, 24 h. Taj dan, odnosno bolje rečeno period naziva se *kritični period*. Period bilanciranja (dimenzioniranja) t_b predstavlja vremenski period u kojem se provodi izjednačavanje satnog dotoka i satnog istjecanja vode iz vodospreme. To je određeni broj dana unutar kojega se na osnovu kritičnog perioda radi izravnanje između dotoka vode u vodospremu i izlaza (istjecanja) vode iz vodospreme prema potrošačima. Period bilanciranja t_b je najčešće jedan dan, a može biti i dulji do najviše tjedan dana,

budući da su to najduži periodi na koje se dimenzioniraju gradske vodospreme [M3]. Duži period bilanciranja ujedno znači i duži kritični period.

Kao što je već rečeno, potrebna veličina volumena vodospreme ovisi o režimu potrošnje vode u naselju, kao i o režimu rada crpne stanice. Rad crpne stanice, koja dobiva električnu energiju iz regionalnog ili lokalnog energetskog opskrbnog sustava može biti kontinuirani (kroz 24 sata), a također su moguće i druge kombinacije (npr. intenzivniji rad tijekom noći kad je električna energija jeftinija). U stvari, moguće su različite kombinacije, što daje mogućnost optimizacije rada crpnog sustava, čime se u konačnici optimizira kapacitet crpne stanice Q_{CS} i operativni volumen vodospreme V_{op}. Operativni volumen vodospreme je u pravilu potrebno uvećati za volumen koji se odnosi na protupožarnu zaštitu, kao i na volumen za rezervu u slučaju prestanka dotoka vode u vodospremu zbog prekida opskrbe električne energije crpne stanice, puknuća glavnog dovodnog cjevovoda i slične incidentne situacije. Ipak, ove smjernice moraju se prilagoditi velikom rasponu svih uvjeta koji se mogu pojaviti, što u suštini znači da su ovakvi sustavi u stvari predimenzionirani, ali su zato pouzdani.

U slučaju korištenja PV energije, dimenzioniranje sustava je složenije u odnosu na vodoopskrbni sustav pokretan električnom energijom iz klasičnog izvora (električne mreže), budući da su raspoloživa jakost Sunčevog zračenja i trajanje Sunčevog zračenja o kojima ovisi dotok vode u vodospremu promjenjivi tijekom dana, kao i tijekom godine. Samim time, količina električne energija kao i vremenski period u kojem je ona na raspolaganju za rad crpnog sustava također su promjenjivi.

Ovakva situacija mijenja klasično značenje veličine kritičnog perioda na dimenzioniranje vodoopskrbnog sustava, gdje je u stvari samo jedan kritični period (periodi) $t^{*}_{klasika(i)}$, koji je definiran kao period (periodi) u kojem je u kojemu je za svaki dan u godini s obzirom na period bilanciranja t_b potrebna dnevne količine vode za potrebe stanovništva $V_{dnev(i)}$ za svaki dan u godini i najveća:

$$max\, V_{dnev(i)} \Rightarrow t^{*}_{klasika(i)} \tag{5.1.}$$

Međutim, kod podsustava PV, njegova snaga $P_{el,PV}$ je u funkciji količine vode V_{CS} koju je tijekom kritičnog perioda potrebno precrpiti u vodospremu, jednadžba (4.6.) i raspoložive solarne energije. Što je količina V_{CS} veća, to je potrebna i veća snaga $P_{el,PV}$. S druge strane, veličina operativnog volumena vodospreme V_{op} je funkcija potrebnih količina vode koja se troši u naselju $Q_{sat(t)}$ i režima rada crpne stanice tijekom dana $Q_{CS(t)}$, jednadžba (4.18.). Međutim, potrebni kapacitet (snaga) crpne stanice Q_{CS} je funkcija količine vode koja se precrpljuje $Q_{CS(t)}$, te

raspoložive jakosti E_s i raspoloživog trajanja Sunčevog zračenja T_s, jednadžbe (4.12. - 4.15.). U skladu s navedenim, metodologija dimenzioniranja je drugačija nego u slučaju korištenja električne energije iz klasične elektroenergetske mreže.

Proizlazi da u slučaju korištenja PV energije za potrebe Urbanog Vodoopskrbnog Sustava (UVODS-a) postoje tri kritična perioda:

- Kritični period za dimenzioniranje podsustava PV (PV generator i invertor) $t^*_{Pel(i)}$;
- Kritični period za dimenzioniranje podsustava CS (Crpna stanica) $t^*_{CS(i)}$;
- Kritični period za dimenzioniranje podsustava V (Vodosprema) $t^*_{Vop(i)}$.

Ovi kritični periodi se ne moraju podudarati, ali i mogu, ovisno o klimatskim značajkama lokacije i značajkama vodoopskrbnog sustava.

5.1.1. Kritični period za dimenzioniranje podsustava PV (PV generator i invertor)

Prvi kritični period $t^*_{Pel(i)}$ definira se za određivanje dovoljne snage podsustava PV $P_{el,PV}$, koja će osigurati dovoljno električne enegije za crpljenje vode u vodospremu u svakom danu u karakterističnoj godini unutar cijelog planskog perioda N od više godina (obično 20 do 25 godina), sve u skladu sa režimom dnevne potrošnje vode u naselju. To je onaj period (periodi) u kojemu je za svaki dan u godini s obzirom na period bilanciranja t_b razlika $\Delta V_{Pel(i)}$ između potrebne dnevne količine vode za potrebe stanovništva $V_{dnev(i)}$ i precrpljene dnevne količine vode $V_{CS(i)}$ najmanja:

$$\Delta V_{Pel(i)} = V_{dnev(i)} - V_{CS(i)},\ i = 1, 2,..., 365 \tag{5.2.}$$

odnosno:

$$min\,\Delta V_{Pel(i)} \Rightarrow t^*_{Pel(i)} \tag{5.3.}$$

gdje je $\Delta V_{Pel(i)}$ prihvatljiva razlika u praktičnoj primjeni, jednaka 0 ili eventualno neznatno veća od 0, obzirom da postoji i mogućnost osiguranja određene rezerve snage, odnosno precrpljene količine vode. Također se umjesto razlike $V_{dnev(i)}$ i $V_{CS(i)}$ može napraviti i njihov omjer, što također definira isti period bilanciranja $t^*_{Pel(i)}$ kao i kod korištenja spomenute razlike $\Delta V_{Pel(i)}$.

5.1.2. Kritični period za dimenzioniranje podsustava CS (Crpna stanica)

Trajanje dnevnog Sunčevog zračenja $T_{s(i)}$ određuje mogući period rada crpne stanice. Samim time, uvodi se drugi po redu kritični period (periodi) $t^*_{CS(i)}$ za određivanje kapaciteta GCS. $t^*_{CS(i)}$ je onaj kritični period (periodi) u kojem je odnos između dnevne potrošnje vode u naselju $V_{dnev(i)}$ i trajanja dnevnog Sunčevog zračenja $T_{s(i)}$ najmanji:

$$max\, Q_{dnev} = \frac{V_{dnev(i)}}{T_{s(i)}} \Rightarrow t^*_{CS(i)} \tag{5.4.}$$

Pri tome se podrazumijeva da je osigurana dovoljna snaga podsustava PV, $P_{el,PV}$, s obzirom na pripadni kritični period $t^*_{Pel(i)}$. Time se u skladu sa pravilima struke određuje kapacitet crpne stanice koji može precrpsti potrebnu količinu vode $Q_{sat(t)}$ (m^3/h), što u stvari predstavlja najveći satni protok tijekom karakteristične godine unutar planskog perioda N.

5.1.3. Kritični period za dimenzioniranje podsustava V (Vodosprema)

Kritični period (periodi) $t^*_{Vop(i)}$ za određivanje operativnog volumena vodospreme V_{op} je onaj period kod kojega je najveća dnevna potrošnja vode u naselju $V_{dnev(i)}$ za svaki dan i najveća tijekom godine, pri čemu su jakost Sunčevog zračenja $E_{s(i)}$ kao i trajanje Sunčevog zračenja $T_{s(i)}$ zadovoljavajući, tako da podsustav PV može proizvesti dovoljnu količinu električne energije za pogon GCS. Pri tome se podrazumijeva da je osigurana dovoljna snaga podsustava PV, $P_{el,PV}$, s obzirom na pripadni kritični period $t^*_{Pel(i)}$ i dovoljan kapacitet podsustava CS, Q_{CS}, također s obzirom na pripadni kritični period $t^*_{CS(i)}$:

$$max\, V_{dnev(i)} \Rightarrow t^*_{Vop(i)} \tag{5.5.}$$

Najkraći mogući period bilanciranja t_b je jedan dan. Što je period dulji, to je rješenje u principu sigurnije jer se sa duljim periodima bilanciranja postiže smanjenje utjecaja ekstremnih malih insolacija E_s na potrebni iznos snage podsustava PV, $P_{el,PV}$. Najracionalnije rješenje bilo bi kada bi se kao kritični period za dimenzioniranje uzeo cijeli planski period N. Međutim, isto zbog ograničenja vezanih za moguću promjenu stanja kakvoće vode u vodospremi nije moguće. Dulji

period bilanciranja t_b ujedno znači i dulji period zadržavanja vode u vodospremi koja zbog dulje ustajalosti mijenja svoju kvalitetu, što zahtijeva intervencije u cilju postizanja traženog standarda vode za piće. Zato se vrijeme zadržavanja vode za piće u pravilu ograničava na maksimalno sedam dana. Međutim, u određenim okolnostima isti se može produljiti. U svakom slučaju, za dimenzioniranje vrijedi ista metodologija.

Što je period bilanciranja t_b duži, sistem je učinkovitiji s obzirom na mogućnost korištenja Sunčevog zračenja, budući da je zbroj ukupne raspoložive Sunčeve insolacije veći kad je t_b duži, jer se time eliminira utjecaj ekstremnih maksimalnih pojedinačnih dnevnih jakosti i trajanja Sunčevog zračenja. Samim time, rješenje je sigurnije i racionalnije s obzirom na dimenzioniranje podsustava PV. To znači da se tražena količina vode može precrpsti sa manjom instaliranom snagom podsustava PV. Usprkos tome što se dnevno istjecanje vode iz vodospreme ne mijenja previše iz dana u dan, varijabilna (stohastička) priroda Sunčevog zračenja uzrokuje varijabilnost dotjecanja vode u vodospremu. To znači da zbog nejednolikog dotoka vode volumen vodospreme postaje veći, jer se moraju kompenzirati te neravnomjernosti u dotoku i potrošnji vode. Dnevna potrošnja vode (iako je u suštini promjenjiva) u inženjerskim razradama (rješenjima) vodoopskrbe uglavnom se usvaja istom u periodu od više dana (do tjedan dana) u nekom mjesecu. Odnos između $P_{el,PV}$ i V_{op} ovisi o klimatskim karakteristikama područja, no najviše ovisi o dnevnoj promjenjivosti Sunčevog zračenja (njenoj jakosti i trajanju) i dnevnim i sezonskim potrebama za vodom. Što je manja promjenjivost Sunčevog zračenja iz dana u dan, njezin utjecaj na $P_{el,PV}$ i V_{op} je manji, kao i obrnuto. Na potrebne veličine $P_{el,PV}$ i V_{op} isto tako utječu značajke dnevne jakosti Sunčevog zračenja E_s i dnevne potrošnje vode V_{dnev} tijekom godine. U suštini, promjena V_{dnev} prati promjenu srednje dnevne temperature zraka T_a; što je veća T_a, to je u pravilu veća i V_{dnev}, odnosno u skladu s time veća je i E_s. To znači da raste i proizvodnja električne energije, odnosno može se zaključiti da se trend potrošnje vode i trend proizvodnje električne energije međusobno podudaraju, slika 4.1.

Metodologija dimenzioniranja EOUVS-a korištenjem Metode Kritičnog Perioda sastoji se od slijedećih koraka:

- Prikupljanje svih podataka potrebnih za određivanje potrošnje vode tijekom svake godine unutar planskog perioda, te za određivanje dnevnog $V_{dnev(i)}$ i satnog režima potrošnje vode, $Q_{sat(t)}$;
- Prikupljanje klimatskih podataka, kao i svih ostalih potrebnih podataka za dimenzioniranje podsustava PV;

- Odabir broja dana za izjednačavanje količine vode u sustavu, odnosno perioda bilanciranja t_b, usvaja se t_b = 1, 2, 3, 4 i 5 dana. Odabirom duljih perioda bilanciranja t_b dobiva se veći broj varijanti dobivenih rješenja;

- Odabir kritičnog perioda $t^*_{Pel(i)}$ za određivanje potrebne snage podsustava PV $P_{el,PV}$ korištenjem podataka iz vremenskih serija jakosti Sunčevog zračenja $E_{s(i)}$ i potreba za vodom $V_{dnev(i)}$ u skladu sa odabranim periodom bilanciranja t_b;

- Određivanje potrebne snage podsustava PV $P_{el,PV}$ u skladu sa odabranim kritičnim dnevnim periodom bilanciranja t_b;

- Odabir kritičnog perioda $t^*_{CS(i)}$ za određivanje potrebnog kapaciteta Q_{CS}, odnosno snage P_{CS} crpne stanice korištenjem podataka iz vremenskih serija potreba za vodom $V_{dnev(i)}$ i trajanja Sunčevog zračenja $T_{s(i)}$ u skladu sa odabranim periodom bilanciranja t_b;

- Određivanje potrebnog kapaciteta Q_{CS} i snage P_{CS} crpne stanice za svaki period bilanciranja t_b za svaki dan i u godini. Mjerodavni su najveći dobiveni kapacitet $Q_{CS(i)}$, odnosno snaga $P_{CS(i)}$ u svakom danu;

- Odabir kritičnog perioda $t^*_{Vop(i)}$ za određivanje operativnog volumena vodospreme V_{op} korištenjem podataka iz vremenskih serija potreba za vodom $V_{dnev(i)}$ u skladu sa odabranim periodom bilanciranja t_b;

- Određivanje operativnog volumena vodospreme V_{op} s obzirom na odabranu snagu podsustava PV $P_{el,PV}$ i period njegovog rada tijekom dana (satnog dotoka vode u vodospremu), u skladu sa predviđenim režimom satne potrošnje vode u naselju (istjecanjem vode iz vodospreme), za svaki period bilanciranja t_b i za svaki dan i u karakterističnoj godini. Pri tome je mjerodavan najveći dobiveni volumen $V_{op(i)}$;

- Određivanje površine solarnih ćelija A_{PV} za svaki period bilanciranja t_b, s obzirom na usvojenu snagu podsustava PV $P_{el,PV}$. Postupak se može napraviti za jedan odabrani t_b ili se može analizirati niz rješenja sa različitim veličinama t_b-a. Odabirom većeg broja perioda bilanciranja t_b za dimenzioniranje postiže se izbor najboljeg od svih dobivenih varijanti rješenja. Time se vide razlike u značajkama svake dobivene varijante, što pomaže donosiocu odluke o najpovoljnijoj varijanti. Znači, provodi se analiza i rangiranje dobivenih kombinacija snage PV generatora i invertora $P_{el,PV}$, operativnog volumena vodospreme V_{op} i snage crpne stanice P_{CS} za svaki period bilanciranja t_b. Rangiranje se provodi odgovarajućom višekriterijskom analizom.

5.1.4. Ulazni podaci

Na samom početku analize, potrebno je odrediti satni i dnevni režim potreba za vodom u naselju unutar karakteristične godine tijekom čitavog planskog perioda *N*. Potrebno je utvrditi o kakvoj vrsti naselja se radi, koliki je broj stanovnika *M*, dali je osigurana zadovoljavajuća količina i kvaliteta vode za potrebe naselja, te kakva je konfiguracija vodoopskrbnog sustava (zahvata i uređaja za obradu sirove vode, crpne stanice, vodospreme, vodoopskrbne mreže). U skladu sa pravilima struke, potrebno je usvojiti kolika je specifična potrošnja vode q_{spec} (l/dan/stan), te kakav je režim potrošnje vode preko podataka o satnoj i dnevnoj neravnomjernosti potrošnje vode (minimalni i maksimalni koeficijenti neravnomjernosti satne potrošnje vode $K_{H,min}$ i $K_{H,max}$, kao i dnevne potrošnje vode $K_{D,min}$ i $K_{D,max}$). Ovime se dobiju ekstremne (minimalna i maksimalna) satne i dnevne potrošnje vode, kao i dnevni režim potrošnje vode u periodu od t = 1, ..., 24 sati u karakterističnoj godini unutar planskog perioda *N*. Usvojeno je da se isti režim koristi za svaki dan *i* tijekom godine. Potrebni su i podaci o kvaliteti vode koja se crpi, kao i o zahtijevanoj kvaliteti vode koja se troši. Uz navedeno, potrebno je razmotriti sve ekonomske, pravne, zakonske, okolišne, društvene i ostale uvjete i zahtjeve vezane uz lokaciju i građenje (postavljanje) PV generatora i invertora, crpne stanice i vodospreme.

Također se prikupljaju određeni klimatski podaci potrebni za određivanje snage podsustava PV $P_{el,PV}$, odnosno podsustava PV. To su: srednja dnevna globalna jakost Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu E_s (kWh/m^2), srednje dnevno trajanje Sunčevog zračenja T_s (h) i srednja dnevna temperatura zraka T_a (°C), za svaki dan *i* u godini. Uz to, potrebni su i tehnički podaci o odabranoj vrsti solarnih ćelija i invertora (učinkovitost solarnih ćelija η_{cel} i invertora η_I, odnosno cijelog PV sustava η_{PV}), te crpne stanice (vrsta i učinkovitost crpki η_C i pogonskog elektromotora η_{el}, odnosno njihova zajednička učinkovitost η_{CS}).

5.2. Formiranje članova vremenskih serija precrpljenih količina vode i potrebnih količina vode

Predložena metodologija se zasniva na korištenju vremenskih serija u planskom periodu shodno odabranoj duljini perioda bilanciranja. Kod perioda bilanciranja t_b većih od jednog dana moguća su dva načina formiranja članova vremenskih serija. Isto tako, proračun se može raditi za jednu plansku godinu iz niza godina ili za niz od određenog broja godina unutar planskog perioda *N* ili za cijeli niz godina *N*.

Vremenske serije mogu se formirati na dva načina:

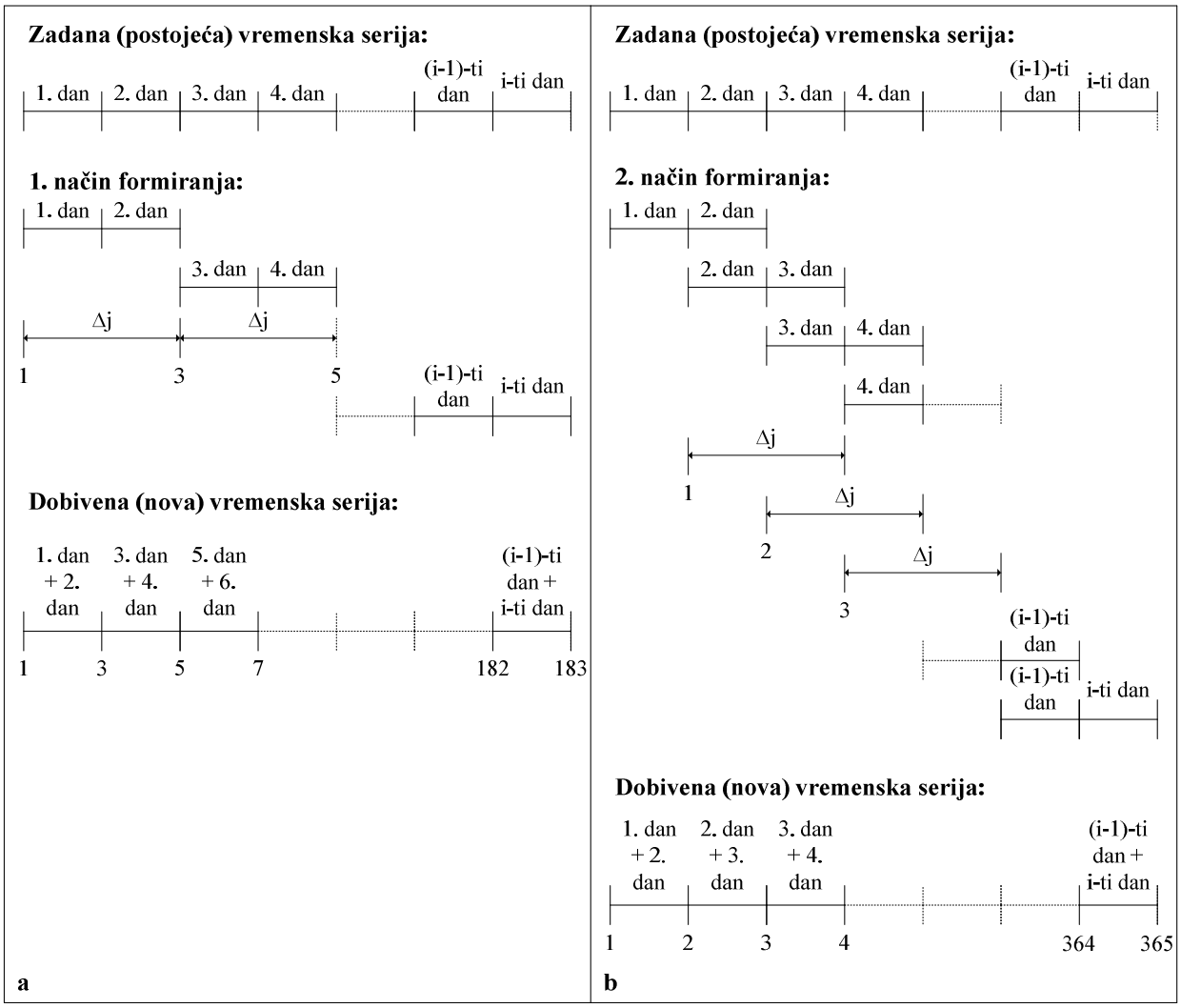
(i) kao skupovi od t_b dana u kojem se članovi niza ne preklapaju, odnosno skupovi se nadovezuju jedan na drugi bez preklapanja pojedinih dana;

(ii) kao skupovi od t_b dana u kojem se članovi niza pomiču za Δt = 1 dan duž planskog (računskog) perioda. Znači, u ovom slučaju članovi niza se preklapaju u broju dana, koji iznosi t_b - 1.

Prvi način generira diskontinuirane veličine iz niza raspoloživih veličina, dok drugi način zbog preklapanja formira kontinuirane veličine slične zadanom (izvornom) nizu. Za očekivati je da se kod prvog načina (zbog nepreklapanja pojedinih dana) mogu pojaviti skokovi u vrijednostima pojedinih članova vremenskih serija, koji u konačnici mogu rezultirati odstupanjima u veličinama pojedinih dijelova EOUVS-a, odnosno podsustava PV, podsustava CS i podsustava V. Također se očekuje da kod drugog načina neće doći do skokova u vrijednostima pojedinih članova, odnosno da će eventualno ti skokovi biti manji u odnosu na prvi način.

Na slici 5.1. prikazan je postupak formiranja vremenske serije za period bilanciranja t_b = 2 dana. Kod prvog načina (slika 5.1a.) formiraju se skupovi od $\Delta j = t_b$ dana (2 dana u prikazanom primjeru), pri čemu idući skup počinje od člana čiji je je redni broj uvijek ($i \times t_b - t_b + 1$). Drugim riječima, nema preklapanja pojedinih dana u godini. Za ovaj način formiranja vremenskih serija, broj članova nove (formirane) serije jednak je omjeru broja dana u godini, dakle 365 (ili 366, ukoliko se radi o prijestupnoj godini) i pripadnog perioda bilanciranja t_b. U ovom slučaju, kod perioda bilanciranja t_b = 2 dana, broj članova nove (formirane) serije jednak je, sa zaokruživanjem na cijelu vrijednost, 183 (365/2).

Kod drugog načina, (slika 5.1b.), korak Δj također je jednak t_b dana (odnosno 2 dana u prikazanom primjeru). Međutim, u ovom načinu idući skup počinje od člana čiji je redni broj uvijek i -1. Drugim riječima, idući član vremenske serije se nastavlja na prethodni član. Za ovaj način formiranja vremenskih serija, broj članova nove (formirane) serije jednak je broju dana u godini, dakle 365 (ili 366, ukoliko se radi o prijestupnoj godini).



Slika 5.1. Shematski prikaz načina formiranja članova vremenskih serija za period bilanciranja t_b = 2 dana

U drugom slučaju, slika 5.1b., pojedini dani u godini se preklapaju jer se nova vremenska serija formira tako da se članovi zadane (postojeće) vremenske serije, s obzirom na pripadni period bilanciranja t_b, nastavljaju za pomak od jednog dana.

Ako se proračun radi za jednu odabranu godinu unutar planskog perioda N, tada su za 1. način formiranja za period bilanciranja t_b (u ovom slučaju t_b = 2 dana) nove (dobivene) vrijednosti dnevne precrpljene količine vode $V_{CS(j)}^{(2)}$ i dnevne potrebne količine vode $V_{dnev(j)}^{(2)}$ jednake:

$$V_{CS(j)}^{(2)} = V_{CS(2i-1)} + V_{CS(2i)}$$

$$V_{dnev(j)}^{(2)} = V_{dnev(2i-1)} + V_{dnev(2i)} \tag{5.6.}$$

pri čemu je i = 1, 2, …, 365 broj dana u godini, dok su članovi nove vremenske serije j = 1, 2,… 183, uzevši u obzir ukupni broj dana u godini i podijeljen sa periodom bilanciranja t_b = 2 dana i uzevši u obzir prethodno navedeno pravilo kod kojega po potrebi postupak završava sa početnim članom promatrane vremenske serije. Dakle, za j = 1, $V^{(2)}_{CS(1)} = V_{CS(1)} + V_{CS(2)}$, za j = 2, $V^{(2)}_{CS(2)} = V_{CS(3)} + V_{CS(4)}$, itd. Analogan postupak je i za $V^{(2)}_{dnev(1)}$, $V^{(2)}_{dnev(2)}$, itd.

2. način formiranja za isti period bilanciranja od t_b = 2 dana daje:

$$V^{(2)}_{CS(j)} = V_{CS(i)} + V_{CS(i+1)}$$

$$V^{(2)}_{dnev(j)} = V_{dnev(i)} + V_{dnev(i+1)} \tag{5.7.}$$

pri čemu je i = 1, 2, …, 365 broj dana u godini, dok su članovi nove vremenske serije j = 1, 2, …, 365. Dakle, za j = 1, $V^{(2)}_{CS(1)} = V_{CS(1)} + V_{CS(2)}$, za j = 2, $V^{(2)}_{CS(2)} = V_{CS(2)} + V_{CS(3)}$, itd. Analogan postupak je i za $V^{(2)}_{dnev(1)}$, $V^{(2)}_{dnev(2)}$, itd. U ovom slučaju, nove vremenske serije se formiraju tako da se pomiču za jedan dan, te se u stvari svi dani u svakoj postojećoj (zadanoj) vremenskoj seriji preklapaju. Navedeno vrijedi za svaki period bilanciranja t_b.

Ukoliko se kod oba načina sumiranja dogodi da postupak ne završava sa posljednjim članom analizirane serije, postupak završava sa početnim članom (članovima) iste serije. Dakle, po potrebi se sumiranje vraća na početak i tu završava. Ovo ovisi o tome dali promatrana godina ima 365 ili 366 dana (zbog prijestupne godine). Analogan postupak formiranja vremenskih serija je i za članove vremenskih serija za ostale periode bilanciranja (t_b = 3, 4 i 5 dana), a također se postupak može primijeniti i ako bi se analizirali nizovi od više godina unutar planskog perioda N.

Različiti načini formiranja vremenskih serija za posljedicu daju i različite rezultate. U 2. načinu formiranja vremenskih serija ne događaju se veliki skokovi između veličina skupova koji se sastoje od zbroja t_b članova analizirane vremenske serije. Ovim načinom formiranja vremenskih serija rade se izvjesna "zaglađivanja" ukoliko se u skupu od t_b članova nalazi ekstremni član koji svojom veličinom smanjuje ili povećava veličinu tog skupa. Oba načina smanjuju utjecaj ekstremne vrijednosti, no vidljivije je da 2. način više doprinosi tome.

Oba načina formiranja vremenskih serija mogu se primijeniti u prikazanoj metodologiji dimenzioniranja EOUVS-a. Time se za svaki period bilanciranja t_b dobiju drugačije vrijednosti potrebne snage PV generatora i invertora $P_{el,PV}$, potrebnog kapaciteta Q_{CS}, odnosno snage P_{CS}

crpne stanice, potrebnog operativnog volumena vodospreme V_{op}, kao i potrebne površine solarnih ćelija A_{PV}.

U prvom slučaju analizira se značajno manji broj članova vremenske serije nego u drugom slučaju. To ujedno znači i različiti broj dobivenih rezultata za obradu i analizu.

5.3. Metodologija rangiranja i izbora rješenja

5.3.1. Uvodna razmatranja

Glavni cilj dimenzioniranja sustava je pronalazak rješenja koje će, u najboljoj mogućoj mjeri zadovoljiti sve zahtjeve za vodom, sa što manjim troškovima gradnje i rada EOUVS-a. Međutim, isti cilj se postavlja i u slučaju kada se za rad UVODS-a koristi električna energija iz elektroenergetske mreže. Razlika je samo u tome što je u slučaju primjene PV energije ulazna (solarna) energija besplatna, ali je potrebno investirati u gradnju PV generatora i invertora (podsustava PV). Kod izbora rješenja u obzir se, osim ekonomskih aspekata korištenja "Zelene" energije umjesto klasične energije iz fosilnih goriva, trebaju uzeti drugi aspekti problematike, prije svega tehnološki, ekološki kao i društveni. To u sadašnjem stanju na tržištu podrazumijeva da se mora odabrati sustav koji će što više smanjiti negativnu ekonomsku razliku između korištenja "Zelenih" energetskih sustava i klasičnih energetskih sustava, imajući u vidu ostale prednosti "Zelene" energije. Naime, trenutno je korištenje "Zelene" energije još uvijek nešto skuplje u odnosu na korištenje klasične energije.

Međutim, ekološke prednosti "Zelene" energije koje bi se trebale uzeti u obzir su mali, odnosno zanemarivi utjecaj na okoliš, te sigurnosne prednosti: smanjenje emisije stakleničkih plinova, smanjenje ovisnosti o određenim oblicima energije (fosilnim gorivima), povećanje raspoloživih izvora energije kao i povećanje mogućnosti opskrbe, mogućnost raspolaganja lokalno raspoloživih izvora energije neovisnih o regionalnoj energetskoj mreži (energetska neovisnost), itd.

Kao što je u *UVODU* obrazloženo, rješenje treba biti održivo i to: ekonomski, ekološki i društveno. To znači da se u izboru rješenja moraju uzeti u obzir i odgovarajući kriteriji za vrjednovanje ispunjenja ovih ciljeva. Kada se govori o ekonomskim ciljevima, tu se podrazumijeva da su troškovi najmanji, a zarada najveća, odnosno da je ekonomska učinkovitost rješenja najveća. Što se tiče ekoloških ciljeva, tu se prvenstveno podrazumijeva utjecaj na okoliš.

Društveni ciljevi odnose se na utjecaj rješenja na životno blagostanje ljudi i društvene troškove koji proizlaze od šteta nastalih zbog klimatskih promjena. Očito je da se izbor rješenja treba zasnivati na višekriterijskoj analizi.

Problem koji bi se danas najčešće rješavao predloženim konceptom uglavnom nije izgradnja kompletno novog EOUVS-a, već implementacija podsustava PV u postojeći UVODS. To posebno vrijedi za velike vodoopskrbne sustave. Mali sustavi kao što su nova manja naselja, turistička naselja i razvojne zone možda i mogu graditi kompletno novi vodoopskrbni sustav, kao i sustav opskrbe električnom energijom. U tom slučaju primjena EOUVS-a ima poseban značaj. Moguće su različite kombinacije u primjeni i time različiti ciljevi, a samim time i okviri (smjernice) za primjenu EOUVS-a.

Danas sva veća naselja u razvijenim državama uglavnom već imaju izgrađenu vodoopskrbni sustav, no stanje u svijetu može biti bitno drugačije. U mnogim područjima nema dobrog i pouzdanog energetskog sustava, kao i vodoopskrbnog sustava. To su područja u kojima primjena analiziranih EOUVS-a ima posebni značaj jer omogućava lokalno rješavanje problema. Radi se o urbanim sredinama udaljenim od energetske mreže, otocima i slično. Isto tako, korištenje PV energije može biti i kao dopunski sustav opskrbe energijom kojom se povećava pouzdanost energetske opskrbe.

5.3.2. Rangiranje i izbor rješenja

Traženi rezultat procesa optimalizacije je najbolje kompromisno rješenje između skupova odabranih vrijednosti podsustava PV (snage PV generatora i invertora $P^*_{el,PV}$), podsustava V (operativnog volumena vodospreme V^*_{op}) i podsustava CS (kapaciteta Q^*_{CS}, odnosno snage P^*_{CS} crpne stanice), koji u najboljoj mjeri zadovoljavaju postavljene ciljeve. Optimalna kombinacija *x* s obzirom na $P^*_{el,PV}$ (f_1), V^*_{op} (f_2) i P^*_{CS} (f_3), zapisana u općenitom obliku, usvojena je za odabranu varijantu *X*:

$$DR\left[f_1(x), f_2(x), f_3(x)\right], x \in X \qquad (5.8.)$$

DR podrazumijeva primjenu prikladnih pravila odlučivanja u svrhu pronalaska najboljeg kompromisnog rješenja *x** iz skupa alternativa *X*. Uobičajena "trade-off" metoda može, s obzirom na ostale metode, biti upotrebljena za odabir kompromisnog rješenja [C4]. U tom slučaju, ekonomski kriterij je dominantan i najvažniji. Međutim, problem se može analizirati

uključivanjem drugih kriterija, od kojih su pouzdanost opskrbe vodom ili smanjenje ispuštanja stakleničkih plinova najvažniji.

Ciljevi održivosti povezani su sa ekonomskim, društvenim i okolišnim aspektima problema. Korištenjem "Zelene" energije umjesto klasične, većina ciljeva s obzirom na okolišne ciljeve je ispunjena. Socijalni ciljevi u pravilu se odnose na ostvarenje održivog "Zelenog grada", te zapošljavanje ljudi na lokalnoj razini, kao i smanjenje troškova zbog klimatskih promjena. No, zadovoljavanje ovih dvaju kriterija također je povezano sa ekonomskim karakteristikama rješenja, tako da je u današnje vrijeme ekonomski kriterij ipak dominantan i zbog tog razloga taj kriterij je za sada najmjerodavniji za procjenu i odabir dobivenih alternativa rješenja.

Međutim, korištenje OIE se ekonomski stimulira raznim propisima i zakonima kojima se ispuštanje stakleničkih plinova kažnjava, primjerice porez na ispuštenu količinu CO_2, sustav poreza i naknade (plaćanje poreza, a nakon toga vraćanje dijela poreza, cijelog poreza ili čak iznosa većeg od poreza, ovisno o smanjenju količine ispuštenog CO_2) [C3], i sl. Time se novčano stimulira smanjenje ispuštanja CO_2, te se potiče korištenje OIE i ujedno se smanjuje ovisnost o klasičnim (fosilnim) gorivima. Navedeno mijenja klasičnu ekonomsku analizu rješenja, te se izbor rješenja zasniva na odgovarajućoj višekriterijalnoj analizi.

5.3.3. Ekonomska analiza

Ekonomski pristup, u skladu sa konceptom Ciklusa Životnih Troškova *LCC* ("Life Cycle Cost") (€), [B2, G1], predstavlja najbolji pokazatelj ekonomske učinkovitosti analize troškova promatranog sustava. *LCC* uzima u obzir sadašnju vrijednost kapitalnih troškova $C_{kapital}$, sadašnju vrijednost troškova zamjene $C_{zamjena}$ i sadašnju vrijednost troškova upravljanja i održavanja $C_{(U\&O)}$:

$$LCC = C_{kapital} + C_{zamjena} + C_{(U\&O)} \tag{5.9.}$$

Kapitalni trošak svakog dijela sustava sastoji se od komponente cijene, troškova građevinskih radova, montaže i spajanja. Sadašnja vrijednost kapitalnih troškova (troškova ulaganja) je:

$$C_{kapital} = C_{PV} \cdot c_{PV} + C_V \cdot c_V + C_{CS} \cdot c_{CS} + C_{konst} \tag{5.10.}$$

gdje su C_{PV}, c_{PV} ukupna snaga (W) i jedinična cijena (€/W) PV postrojenja, C_{Vop}, c_{Vop} su potrebni volumen (m^3) i jedinična cijena (€/m^3) volumena vodospreme, C_{CS}, c_{CS} su ukupna snaga (W) i jedinična cijena (€/W) crpne stanice, C_{konst} je ukupni konstantni trošak uključujući sve moguće konstantne troškove koji se mogu pojaviti (projektiranje, cijena zemljišta, porezi,...).

U ovom istraživanju c_{PV} uključuje ukupne troškove PV generatora i invertora, c_V obuhvaća ukupni trošak vodospreme, c_{CS} uključuje ukupne troškove crpne stanice i pripadne opreme

Svi troškovi zamjene, nastali tijekom perioda funkcioniranja sustava, moraju se uračunati u skladu s posebnim periodom funkcioniranja svake komponente. Sadašnja vrijednost troškova zamjene $C_{zamjene}$ može se odrediti preko [B2, S4]:

$$C_{zamjena} = C \cdot c \sum_{i=1}^{N_{zam}} \left[\frac{(1+f_0)}{(1+k_d)} \right]^{N_i / N_{zam}+1} \tag{5.11.}$$

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

Sadašnja vrijednost troškova upravljanja i održavanja $C_{(U\&O)}$ izračunava se pomoću [B2, G6]:

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

$$C_{(U\&O)} = C_{(U\&O)_0} \cdot L_p ; \text{za } k_d = f_1 \tag{5.12.}$$

gdje je f_1 stopa inflacije, k_d je kamatna stopa, a L_p je razdoblje funkcioniranja sustava u godinama. $C_{(U\&O)0}$ su troškovi upravljanja i održavanja u prvoj godini; oni se mogu izračunati kao postotak k kapitalnih troškova $C_{kapital}$:

$$C_{(U\&O)_0} = C_{kapital} \cdot k \tag{5.13.}$$

Ukoliko se *LCC* proračunava za klasični UVODS, tada je potrebno izostaviti sve troškove vezane uz PV generator i invertor. Samim time je vidljivo da već u početku, tj. u kapitalnim troškovima klasični UVODS ima prednost pred EOUVS-om. Međutim, klasični UVODS zahtijeva

električnu energiju iz regionalnog energetskog sustava, što za sobom povlači i troškove energije. Kod EOUVS-a to nije slučaj, budući da je solarna energija besplatna, a također postoji i mogućnost prodaje viška električne energije ukoliko postoji veza između podsustava PV i regionalnog energetskog sustava.

Zbog toga je u ovakvim situacijama uz *LCC* potrebno uključiti i Neto sadašnju vrijednost *NPV* ("Net Present Value") zarade/troškova električne energije. Novac s vremenom gubi svoju vrijednost [N1], što znači da je potrebno uzeti u obzir njegovu vremensku vrijednost. Drugim riječima, vrijednost *NPV* pokazuje koliko će novac vrijediti na kraju određenog perioda vremena. Prema [K1, S6], Neto sadašnja vrijednost *NPV* definirana je preko izraza:

$$NPV = \sum_{i=1}^{N} \frac{F}{(1+d)^N} \tag{5.14.}$$

gdje je F buduća vrijednost novca (pozitivna ili negativna) u planskom periodu N, s obzirom na određenu diskontnu stopu d. Diskontna stopa d odražava mjeru koliko novac vrijedi na kraju nekog određenog vremenskog perioda u odnosu na njegovu današnju vrijednost [N1]. Diskontna stopa d može biti nominalna ili realna. U nominalnoj diskontnoj stopi inflacija se uzima u obzir, dok se u realnoj diskontnoj stopi inflacija ne uzima u obzir [D1]. U ovoj disertaciji razmatrati će se nominalna diskontna stopa, budući da ona prikazuje stvarnu situacija zbog toga jer je u nju uključena i inflacija.

Također je potrebno definirati i ukupnu vrijednost LCC_{UK} (€), kod koje se vrijednosti *LCC*-a, jednadžba (5.9.), oduzima zarada od prodane energije L_{Zarada} (€), dobivena korištenjem jednadžbe (5.14.):

$$LCC_{UK} = LCC - L_{Zarada} \tag{5.15.}$$

U slučaju EOUVS -a, ekonomski cilj je što više smanjiti moguće ekonomske gubitke koji se javljaju zbog toga jer se ne koristi klasična energija, koja su još uvijek generalno gledajući, jeftinija u odnosu na korištenje OIE. Ipak, za očekivati je da ekonomski gubici s vremenom budu sve manji, budući da PV sustavi postaju sve jeftiniji, a klasična energija postaje sve skuplja [C2, S3].

5.3.4. Višekriterijska analiza

Ostvarenje ciljeva održivosti podrazumijeva, kod izbora rješenja, primjenu višekriterijskog odlučivanja uz sudjelovanje svih dionika, a posebno lokalnog stanovništva za koje se sustav gradi. Ključni ekološki doprinos, kao i globalni doprinos održivosti prvenstveno je vezan uz smanjenje ispuštanja stakleničkih plinova [M4], no ne smije se zanemariti niti zauzimanje prostora, stvaranje buke, ispuštanje čestica onečišćenja, i sl., [W1].

Kod primjene ovih rješenja potrebno je sagledati količine emisija ugljičnog dioksida CO_2, nastalih korištenjem klasičnih (fosilnih) goriva (ugljen, nafta i plin), koje se nebi proizvele ukoliko bi umjesto fosilnih goriva koristili PV tehnologiju [G2]. Dakle, potrebno je odrediti ekvivalentne količine CO_2 s obzirom na različite periode bilanciranja t_b.

Potrebno je odrediti proizvedenu količinu električne energije, izraženu u kWh od strane podsustava PV, te izračunati ekvivalentnu količinu CO_2 koja bi se proizvela korištenjem klasičnih goriva u svrhu proizvodnje iste te količine električne energije. CO_2 nastao korištenjem klasičnih goriva predstavlja 57 % u omjeru ostalih stakleničkih plinova [I1] i zbog toga je najdominantniji u odnosu na ostale stakleničke plinove.

Ako se koristi PV energija, masa CO_2 koje se neće ispustiti u okoliš, a koja je nastala korištenjem fosilnih goriva iznosi za dizel-gorivo $M_{CO2,DIZEL}$ 0.893 kg CO_2/kWh, za ugljen $M_{CO2,UGLJEN}$ 0.955 kg CO_2/kWh i za plin $M_{CO2,PLINA}$ 0.599 kg CO_2/kWh [G2].

PV ćelije tijekom korištenja proizvode određenu količinu stakleničkih plinova, koja se također izražava u ekvivalentnoj količini CO_2/kWh. No, te količine su zanemarivo male, u prosjeku oko 30 g CO_2 po jednom kWh-u [D3].

Društveni kriterij sagledava se kroz društvenu prihvatljivost EOUVS-a, stvaranje novih radnih mjesta, te mogućnost stjecanja različitih socijalnih koristi. Društvena prihvatljivost EOUVS-a podrazumijeva mišljenje stanovništva s njihovog gledišta kao mogućih korisnika sustava. Prihvaćanje ili odbijanje od strane stanovništva može produljiti vrijeme ostvarenja EOUVS-a ili ga čak i spriječiti. Projektiranje, izgradnja, korištenje, upravljanje i održavanje EOUVS-a ne samo da koriste postojeća radna mjesta, već iziskuju i otvaranje novih, što definitivno povećava socijalno blagostanje zajednice. Tu se misli na socijalne koristi kao što je razvoj regije, veći obrtaj financijskih sredstava, podizanje standarda življenja, veća samostalnost s obzirom na energiju i sl., [W1].

Višekriterijska analiza provodi se cijelim nizom metoda shodno značajkama problema koji se rješava, odnosno vrsti kriterija. Kriteriji mogu biti kvantitativno mjerljivi, ali i kvalitativno. Rezultat analize ovisi i o preferencijama koje se daju određenom kriteriju. Primjena ovakvog postupka vrjednovanja rješenja je složena, te se mora sustavno provoditi.

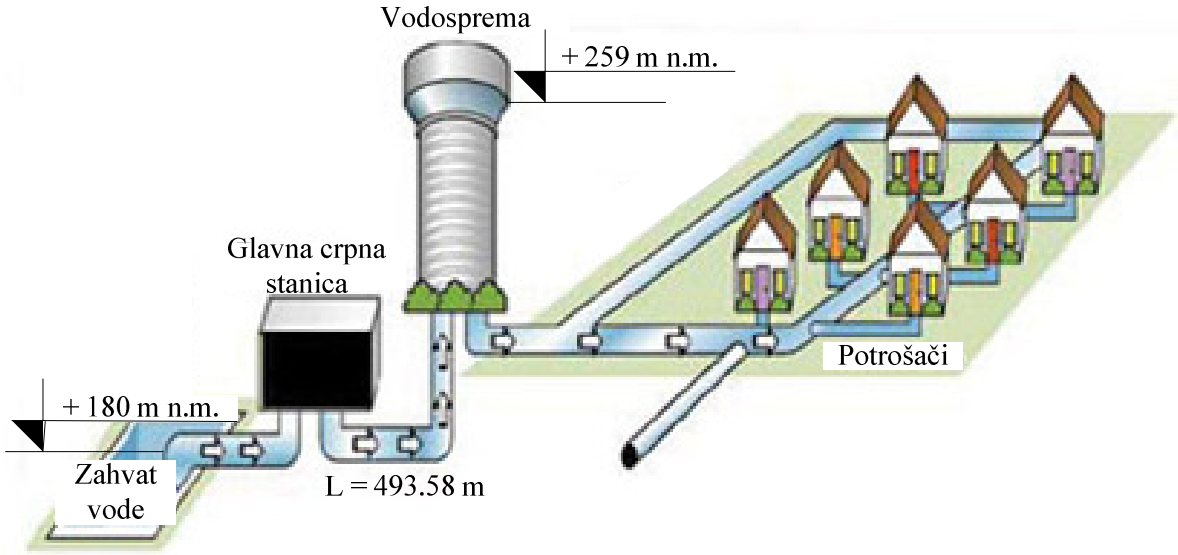
6. PRIMJER I ANALIZA REZULTATA

U ovom poglavlju izračunavaju se veličine analiziranog Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava (EOUVS-a), u skladu sa predloženom metodologijom, nužne za njegovo dimenzioniranje, a to su: snaga podsustava PV (PV generator i invertor) $P_{el,PV}$, kapacitet Q_{CS} odnosno snaga P_{CS} podsustava CS (Crpna stanica), te operativni volumen podsustava V (Vodosprema) V_{op}, zajedno sa pripadnim kritičnim periodom (periodima) za dimenzioniranje podsustava PV, $t^*_{Pel(i)}$, podsustava CS, $t^*_{CS(i)}$ i podsustava V, $t^*_{Vop(i)}$. Još se proračunava i potrebna površina solarnih ćelija A_{PV}. Navedeno se radi za dva opisana načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana. Također se određuju ekonomske, ekološke i društvene značajke dobivenog rješenja.

Sve prethodno navedeno provodi se u svrhu provjere valjanosti prikazane i opisane metodologije, kao i svih pretpostavki koje su sadržane u njoj, te utvrđivanje značajki predloženog koncepta EOUVS-a. U računalnom programu Excel© razvijen je model "EOUVS" kojim se proračunavaju sve potrebne veličine vezane za dimenzioniranje EOUVS-a.

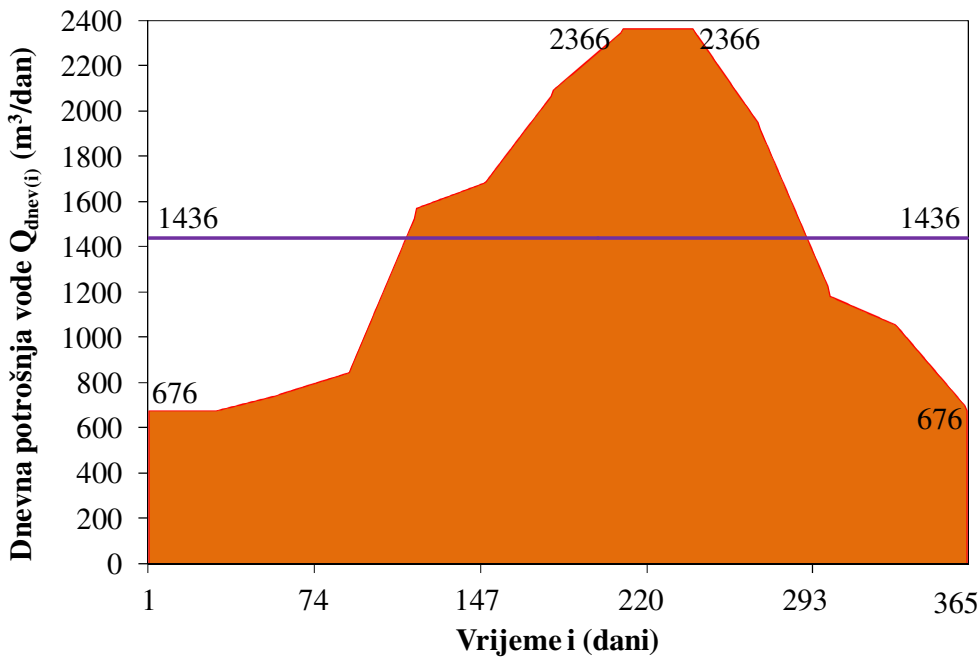
6.1. Ulazne veličine

Analizira se primjer u kojem se sva proizvedena električna energija, potrebna za rad Glavne Crpne Stanice (GCS), osigurava iz podsustava PV (PV generator i invertor). Razmatra se hipotetski primjer naselja koje ima populacijski ekvivalent od 8970 stanovnika i koje se nalazi u mediteranskom dijelu Hrvatske. Naselje je smješteno na brdovitom području i ima jednu vodospremu koja se nalazi na nadmorskoj razini od 259 m n.m. Voda dotječe u vodospremu iz crpnog bazena glavne crpne stanice, koja se nalazi na nadmorskoj visini od 180 m n.m. Voda dotječe u mokri bazen crpne stanice gravitacijski iz izvora, tako da nije potrebno precrpljivanje. Manometarska visina crpne stanice je 82.41 m. Kvaliteta vode je zadovoljavajuća tako da nije potrebna dodatna obrada. Kapacitet izvora zadovoljava sve potrebe za vodom. Položaj glavnih dijelova vodoopskrbnog sustava prikazan je na slici 6.1.



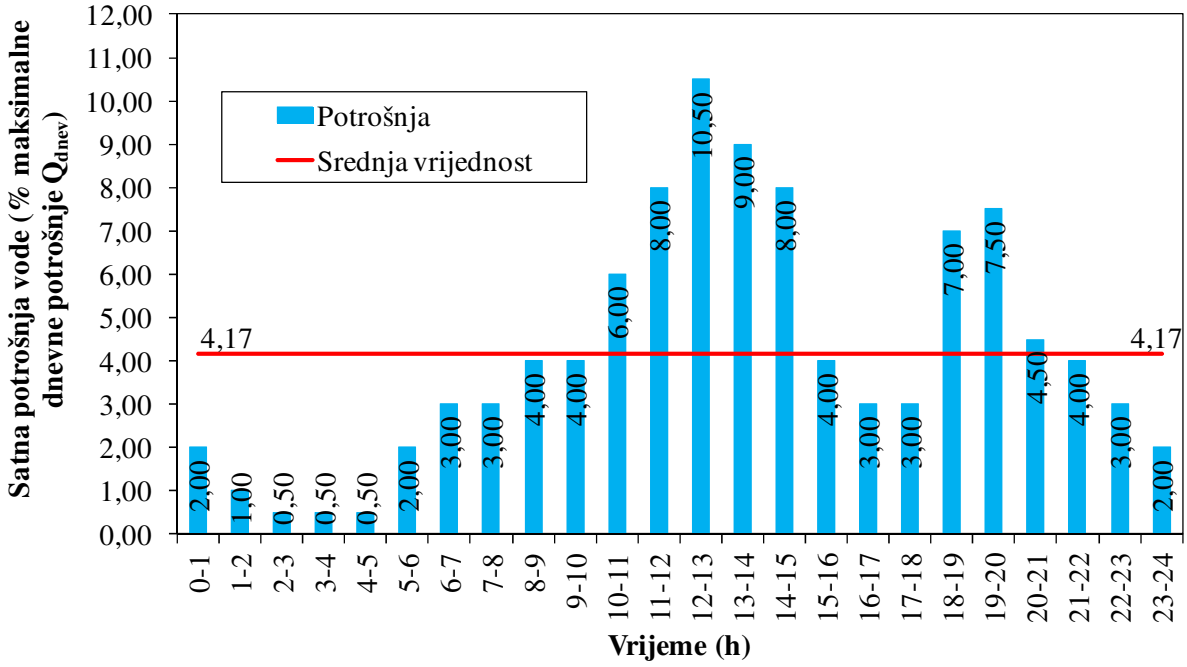
Slika 6.1. Shematski prikaz analiziranog urbanog vodoopskrbnog sustava (modificirano iz [D4])

Usvojeni planski period iznosi N = 25 godina. Specifična potrošnja vode je q_{spec} = 160 l/stan/dan. Maksimalni koeficijent dnevne neravnomjernosti jednak je $K_{D,max}$ = 1.65, dok je maksimalni koeficijent satne neravnomjernosti $K_{H,max}$ = 2.52. Režim dnevne potrošnje vode $Q_{dnev(i)}$ u jednoj godini za svaki pojedini dan i u toj godini, prikazan je na slici 6.2. i u prilogu P1.



Slika 6.2. Režim dnevne potrošnje vode tijekom godine

Satna potrošnja vode u naselju određena je na osnovu dnevnog režima potrošnje vode, slika 6.3.

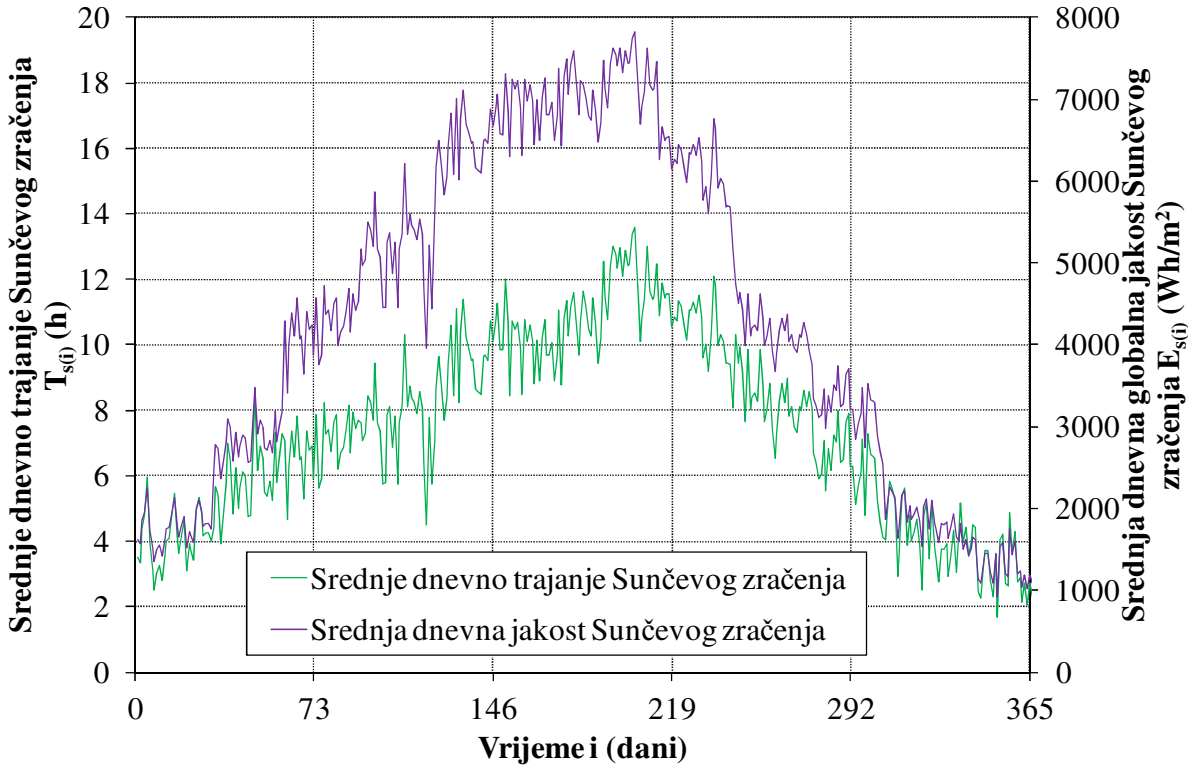


Slika 6.3. Režim satne potrošnje vode tijekom dana

Za razmatranu lokaciju, proračunata prosječna manometarska visina H_{PS} iznosi 82.41 m, prosječna učinkovitost invertera je η_I = 0.83, dok je prosječna učinkovitost crpne stanice η_{CS} = 0.90. Prosječna učinkovitost invertera i crpke je, s obzirom na jednadžbu (4.9.), η_{CSI} = 0.75,

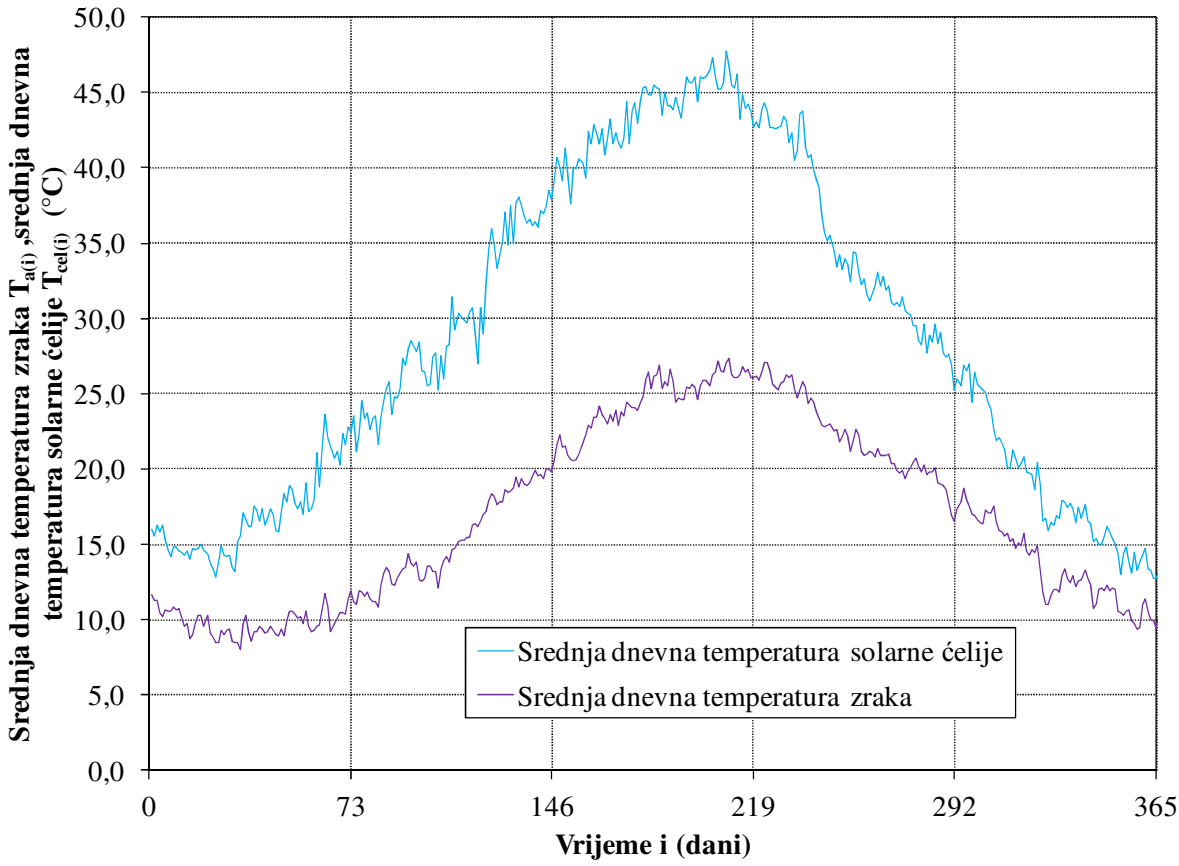
temperaturni koeficijent solarne ćelije iznosi α_C = 0.005 °C^{-1}, dok je temperatura solarne ćelije u Standardnim Testnim Uvjetima T_0 = 25 °C. Usvojena učinkovitost podsustava PV iznosi η_{PV} = 0.15. Gubici vode u ovoj analizi već su ubrojeni u ukupne količine vode koje zahtijeva stanovništvo.

Prosječna dnevna jakost globalnog Sunčevog zračenja $E_{s(i)}$ na horizontalnu plohu i prosječno dnevno trajanje Sunčevog zračenja $T_{s(i)}$ prikazani su na slici 6.4.



Slika 6.4. Prosječna dnevna jakost i trajanje Sunčevog zračenja, [D5]

Na slici 6.5. prikazane su srednje dnevne temperatura zraka $T_{a(i)}$ (°C), kao i srednja dnevna temperatura solarnih ćelija $T_{cel(i)}$ (°C), proračunata korištenjem jednadžbe (4.8.).



Slika 6.5. Prosječna dnevna temperatura zraka i solarne ćelije, [D5]

Sve navedene ulazne veličine dane su u prilogu P1. Navedeni i prikazani podaci predstavljaju ulazne veličine za dimenzioniranje podsustava PV, podsustava CS, te podsustava V. Podsustav VM (vodoopskrbna mreža) na ovoj konceptualnoj razini neće se dimenzionirati.

6.2. Rezultati

6.2.1. Kritični period

Na osnovu prikazanih ulaznih podataka, te primjenom Metode Kritičnog Perioda (MKP) uz korištenje jednadžbi (5.3. - 5.5.), određen je kritični period (periodi) za dimenzioniranje podsustava PV (PV generator i invertor) $t^*_{Pel(i)}$, podsustava CS (Crpna Stanica) $t^*_{CS(i)}$, te podsustava V (Vodosprema). Kritični periodi određeni su za oba načina bilanciranja (1. i 2. način bilanciranja) i prikazani u tablici 6.1. Prvi način bilanciranja označen je sa MKP-1 (Metoda

Kritičnog Perioda 1), dok je drugi način bilanciranja označen sa MKP-2 (Metoda Kritičnog Perioda 2), budući da su se vremenske serije formirale na dva načina.

U skladu s time, kao rezultat dobije se pet varijanti rješenja, s obzirom na pet perioda bilanciranja t_b (od 1 do 5 dana), za svaki od oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2.

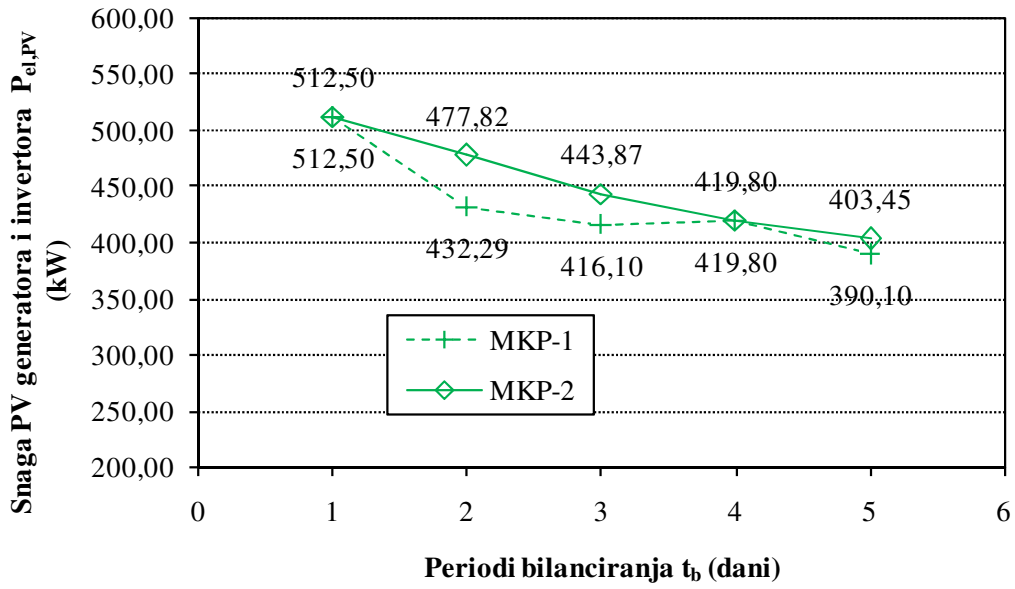
Tablica 6.1. Kritični periodi za određivanje snage PV generatora i invertora $P_{el,PV}$, kapaciteta crpne stanice Q_{CS} i volumena vodospreme V_{op} za dva načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Period bilanciranja t_b (dani)		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Kritični period (dani u godini) za podsustav PV $t^*_{Pel(i)}$	MKP-1	352	349-350	343-345	349-352	346-350
	MKP-2	352	344-345	344-346	349-352	348-352
Kritični period (dani u godini) za podsustav CS $t^*_{CS(i)}$	MKP-1	352	345-346	343-345	349-352	341-345
	MKP-2	352	344-345	344-346	344-347	343-347
Kritični period (dani u godini) za podsustav V $t^*_{Vop(i)}$	MKP-1	244	243-244	244-246	241-244	241-245
	MKP-2	244	244-245	243-245	243-246	242-246

Kao što se može vidjeti, kritični periodi se razlikuju, osim (očekivano) kod perioda bilanciranja t_b = 1 dan. Jasno se vidi da za dimenzioniranje podsustava PV i CS presudni utjecaj ima veličina jakosti Sunčevog zračenja E_s, koja je u zimskom periodu najmanja. Za dimenzioniranje podsustava V kritični period je tijekom ljetnog perioda, kada su potrošnja vode, ali i jakost Sunčevog zračenja E_s, te trajanje Sunčevog zračenja T_s najveći.

6.2.2. Veličina podsustava PV (PV generator i invertor)

S obzirom na dobivene kritične dane prikazane u tablici 6.1., korištenjem jednadžbi (4.6.), (4.8.) i (4.9.) proračunata je potrebna snaga podsustava PV, $P_{el,PV}$, za oba načina formiranja vremenskih serija MKP-1 i MKP-2, slika 6.6.



Slika 6.6. Proračunate snage podsustava PV $P_{el,PV}$ za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Proračun je napravljen s 50 % iskorištenja ulaznog solarnog zračenja, budući da je u obzir uzimana određena sigurnost zbog aproksimacije stvarnog profila dnevnog trajanja Sunčevog sijanja u pojednostavljeni (u praksi primjenjiv) pravokutni profil. S obzirom da je za potrebe ove disertacije jedino bilo moguće nabaviti prosječne dnevne vremenske nizove za određeni niz godina [D5], za lokaciju Palagruže i Komiže od 1995. do 2006. godine, za proračune se koristi navedena vrijednost srednje dnevne globalne jakosti Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu $E_{s,sred(i)}$.

Budući da u [D5] satne veličine jakosti direktnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu nisu bile na raspolaganju, te veličine su dobivene iz [S2]. Pri tome su korištene vrijednosti za raspoložive lokacije u blizini Palagruže i Komiže (područje južnog Mediteranskog dijela Hrvatske), prilog P2. Analizom podataka sa spomenutih lokacija (Hvar, Lastovo, Komiža, Korčula) utvrđeno je da je za zimski period odnos površine profila A_A i površine profila A_S približno jednak 50 %:

$$A_A/A_S = 0.5\ (50\ \%) \qquad (6.1.)$$

Navedeno predstavlja određenu rezervu (sigurnost) s obzirom na osnovu koje se proračunava potrebna snaga PV generatora $P_{el,PV}$. U ljetnom periodu taj odnos iznosi i do 75 %, no ipak se preporuča usvojiti 50 % zbog same stohastičke prirode Sunčevog zračenja, čime se ide na stranu sigurnosti. Dakle, jakost globalnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu $E_{s(i)}$ (odnosno, u daljnjem tekstu - jakost Sunčevog zračenja) koja se koristi u izrazu za snagu podsustava PV u

jednadžbi (4.6.) je u stvari pomnožena sa 0.5, čime se postigla određena sigurnost (pouzdanost) dimenzioniranja.

Iz slike 6.6. vidljiv je trend pada vrijednosti snaga podsustava PV, $P_{el,PV}$ s povećanjem perioda bilanciranja t_b za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2. Kod vrijednosti snaga $P_{el,PV}$ za MKP-1 primjećuje se skok kod perioda bilanciranja t_b = 4 dana, dok kod MKP-2 nema skokova.

Za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, kod Varijante 1 dobivene su najveće snage podsustava PV, koje za MKP-1 i MKP-2 iznose $P_{el,PV}$ = 512.50 kW. Najmanje snage za MKP-1 i MKP-2 dobivene su za Varijantu 5, te one iznose za MKP-1 $P_{el,PV}$ = 390.10 kW, te za MKP-2 $P_{el,PV}$ = 403.45 kW. Razlike između najveće i najmanje vrijednosti snage $P_{el,PV}$ iznose 24 % za MKP-1, odnosno 21 % za MKP-2 %, dakle radi se o značajnim razlikama. Najveća razlika između snaga $P_{el,PV}$ dobivenih za različite periode bilanciranja t_b za MKP-1 i MKP-2 dobivena je za t_b = 2 dana i ona iznosi 45.53 kW, odnosno 10 %, dakle ta razlika nije značajna.

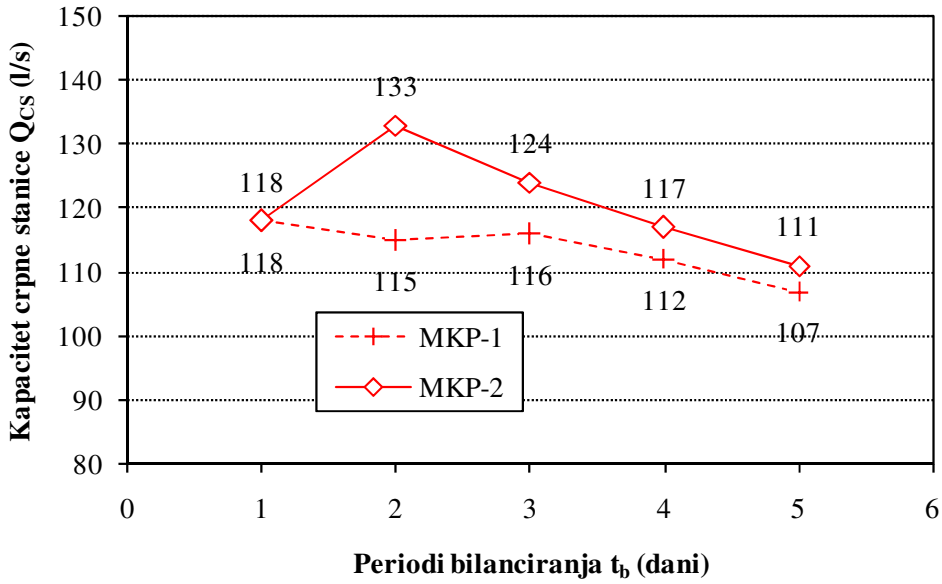
Trend smanjenja snage $P_{el,PV}$ u funkciji perioda bilanciranja t_b kod MKP-2 je približno linearan, $P_{el,PV} = -27.612 \times t_b + 534.324$, pri čemu je kvadrat koeficijenta korelacije jednak R^2 = 0.979. Kod MKP-1, dobivene veličine su takve da nisu pogodne za primjenu linearnog trenda, odnosno općenito nekog pretpostavljenog trenda. Iz ovih dobivenih rezultata zorno se vidi prednost korištenja MKP-2 jer je očito da je ovaj način formiranja vremenskih serija prirodniji. Kod MKP-1 pri periodu bilanciranja t_b = 4 dana primijećen je skok, odnosno povećanje vrijednosti snage $P_{el,PV}$ u odnosu na povećanje perioda bilanciranja t_b, slika 6.6. Navedeno se objašnjava povećanjem pripadne srednje vrijednosti i standardnog odstupanja vremenske serije jakosti Sunčevog zračenja E_s za period bilanciranja t_b = 4 dana za MKP-1, tablica 6.2.

Tablica 6.2. Srednja vrijednost i standardno odstupanje vremenske serije jakosti Sunčevog zračenja E_s za oba načina formiranja vremenskih serija (MKP-1 i MKP-2) za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Period bilanciranja t_b (dani)	**MKP-1**		**MKP-2**	
	Sred. vrij.	**St. odstup.**	**Sred. vrij.**	**St. odstup.**
1	4.30	2.05	4.30	2.05
2	3.63	1.72	4.01	1.90
3	3.49	1.66	3.73	1.76
4	3.51	1.68	3.52	1.67
5	3.24	1.55	3.39	1.60

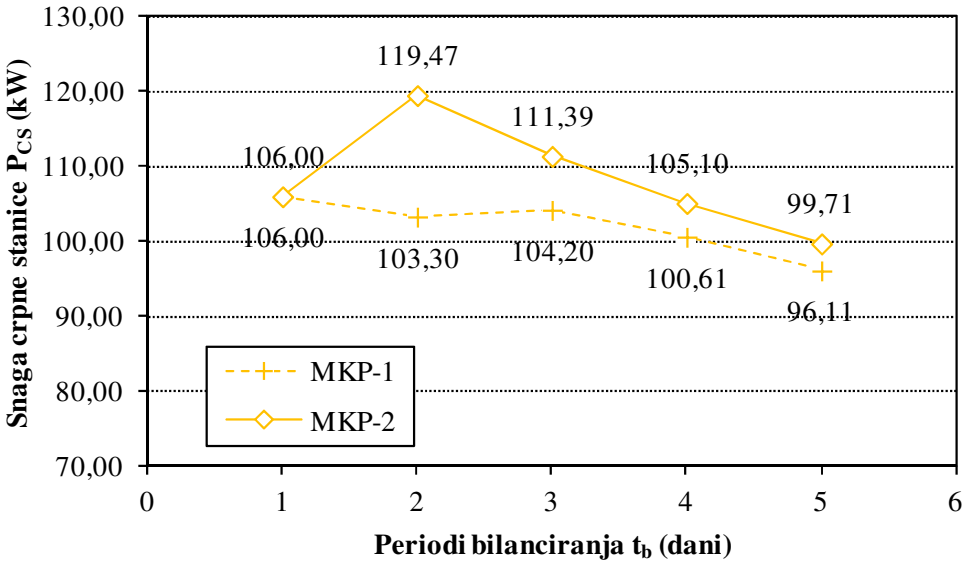
6.2.3. Veličina podsustava CS (Crpna stanica)

Korištenjem jednadžbi (4.14. – 4.15.) dobiveni su kapaciteti crpne stanice Q_{CS} za oba načina formiranja vremenskih serija (MKP-1 i MKP-2) za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana, slika 6.7.



Slika 6.7. Proračunati kapaciteti crpne stanice Q_{CS} za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Korištenjem jednadžbe (4.16.) dobivene su snage crpne stanice P_{CS} za oba načina formiranja vremenskih serija (MKP-1 i MKP-2) za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana, slika 6.8.



Slika 6.8. Proračunate snage crpne stanice P_{CS} za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Veza između potrebnog kapaciteta crpne stanice Q_{CS} i snage crpne stanice P_{CS} je linearna, jednadžba (4.16.). Iz slika 6.7. i 6.8., vidljivi su trendovi pada vrijednosti kapaciteta Q_{CS} i snage crpne stanice P_{CS} za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2. Kod vrijednosti snaga Q_{CS} i P_{CS} za MKP-1 nisu zamijećena prevelika odstupanja, dok kod MKP-2 za period bilanciranja t_b = 2 dana dolazi do izraženog skoka (povećanja vrijednosti). Ovaj izraženi skok je posljedica kratkog trajanja jakosti Sunčevog zračenja T_s, odnosno smanjenja T_s unutar kritičnog perioda za dimenzioniranje podsustava CS, $t^*_{CS(i)}$, kod t_b = 2 dana, što je posljedica stohastičke naravi Sunčevog zračenja.

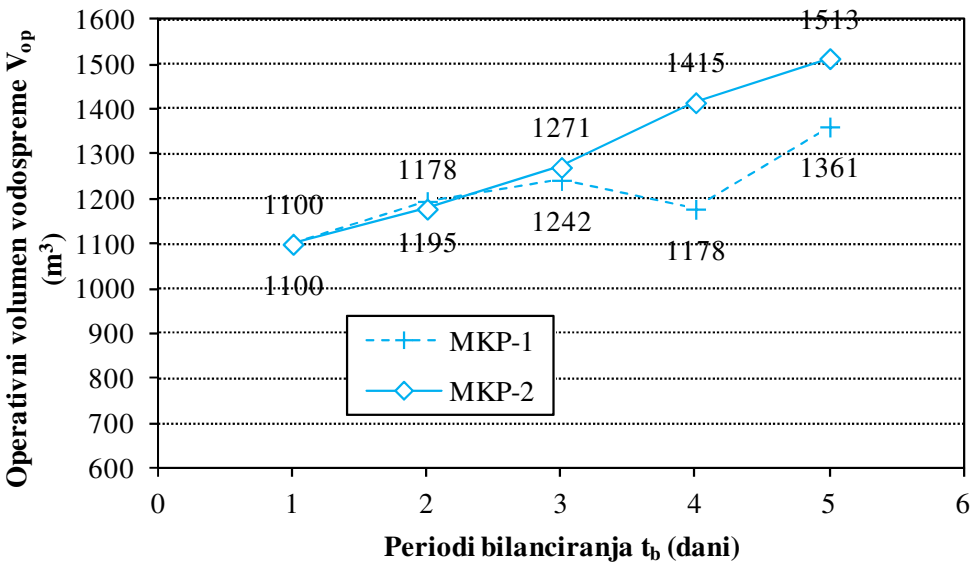
Veličine kapaciteta Q_{CS} i i snage P_{CS} crpne stanice, prikazane na slikama 6.7. i 6.8., su takve naravi da nisu pogodne za primjenu linearnog trenda, odnosno općenito nekog pretpostavljenog trenda za MKP-1 i MKP-2.

Za MKP-1 kod Varijante 1 dobiven je najveći kapacitet, a samim time i snaga crpne stanice, koja iznosi Q_{CS} = 118 l/s, odnosno P_{CS} = 106 kW. Najmanji kapacitet, odnosno snage crpne stanice kod MKP-1 dobivene su za Varijantu 5, te oni iznose Q_{CS} = 107 l/s, odnosno P_{CS} = 96.11 kW. Razlike između najveće i najmanje vrijednosti kapaciteta Q_{CS}, odnosno snage P_{CS} za MKP-1 iznose 9 %, dakle međusobno se ne razlikuju značajno.

Za MKP-2 kod Varijante 2 dobiven je najveći kapacitet, a samim time i snaga crpne stanice, koja iznosi Q_{CS} = 133 l/s, odnosno P_{CS} = 119.47 kW. Najmanji kapacitet, odnosno snaga crpne stanice za MKP-2 dobiveni su za Varijantu 5 i oni iznose Q_{CS} = 111 l/s, odnosno P_{CS} = 99.71 kW. Razlike između najveće i najmanje vrijednosti kapaciteta Q_{CS}, odnosno snage P_{CS} iznose 17 % za MKP-2, dakle radi se o razlici koja nije pretjerano veća s obzirom na razliku kod MKP-1 (9 %). Najveća razlika između kapaciteta Q_{CS} odnosno snaga P_{CS} crpne stanice dobivenih za različite periode bilanciranja t_b za MKP-1 i MKP-2 dobivena je za t_b = 2 dana i ona iznosi 18 l/s tj. 16.17 kW, odnosno 14 %, dakle ta razlika nije zanemariva.

6.2.4. Veličina podsustava V (Vodosprema)

Korištenjem jednadžbe (4.18.) dobiveni su operativni volumeni vodospreme V_{op} za oba načina formiranja vremenskih serija (MKP-1 i MKP-2) za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana, slika 6.9.



Slika 6.9. Proračunati operativni volumeni vodospreme V_{op} za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

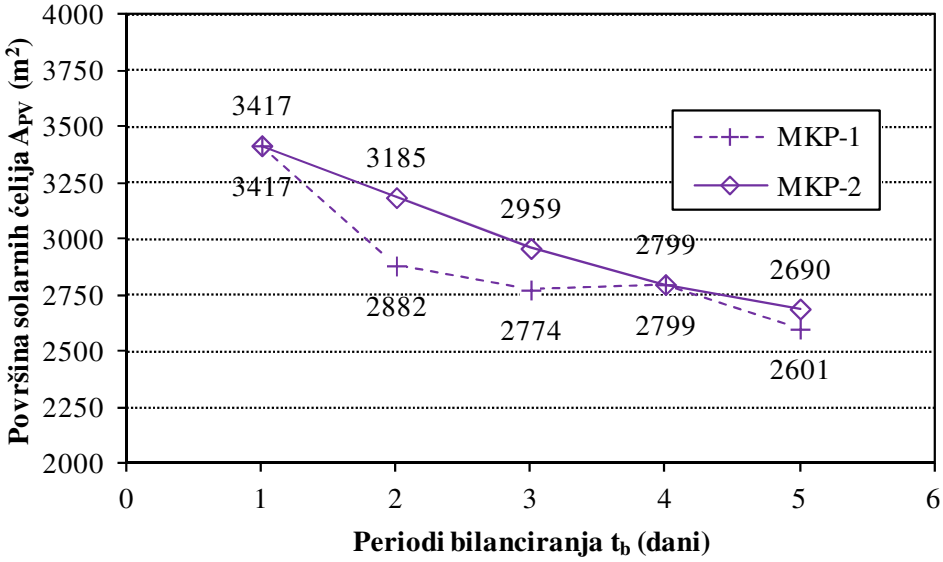
Iz slike 6.9. vidljivi su trendovi povećanja vrijednosti operativnog volumena vodospreme V_{op} s povećanjem perioda bilanciranja t_b, za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2. Pri tome je trend povećanja volumena vodospreme V_{op} u funkciji perioda bilanciranja t_b kod MKP-2 približno linearan, $V_{op} = 106.3 \times t_b + 976.5$, pri čemu je kvadrat koeficijenta korelacije jednak $R^2 = 0.989$. Kod MKP-1, dobivene veličine su takve da nisu pogodne za primjenu linearnog trenda, odnosno općenito nekog pretpostavljenog trenda. Dakle, način formiranja vremenskih serija može značajno utjecati na rezultat.

Kod vrijednosti V_{op} za MKP-1 primijećen je pad vrijednosti V_{op} kod perioda bilanciranja t_b = 4 dana, dok kod MKP-2 nema takvih skokova. Ovaj izraženi skok je posljedica kratkog trajanja jakosti Sunčevog zračenja T_s, odnosno smanjenja T_s unutar kritičnog perioda za dimenzioniranje podsustava V, $t^*_{Vop(i)}$, kod t_b = 4 dana, što je posljedica stohastičke naravi Sunčevog zračenja.

Za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, kod Varijante 1 dobivena je najmanja vrijednost volumena vodospreme, koja za MKP-1 i MKP-2 iznosi V_{op} = 1100 m^3. Najveći V_{op} za MKP-1 i MKP-2 dobiveni su za Varijantu 5, te oni za MKP-1 iznose V_{op} = 1361 m^3, te za MKP-2 V_{op} = 1513 m^3. Razlike između najveće i najmanje vrijednosti snage V_{op} iznose 19 % za MKP-1, odnosno 27 % za MKP-2 %, dakle radi se o značajnim razlikama. Najveća razlika između volumena vodospreme V_{op} dobivenih za različite periode bilanciranja t_b za MKP-1 i MKP-2 dobivena je kod t_b = 4 dana i ona iznosi 237 m^3, odnosno 17 %, dakle ta razlika nije zanemariva.

6.2.5. Površina solarnih ćelija

Korištenjem jednadžbe (4.11.), proračunate su potrebne površine solarnih ćelija A_{PV} za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2 za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana, slika 6.10. Veličina A_{PV} je u proporcionalnoj vezi sa snagom podsustava PV, $P_{el,PV}$.



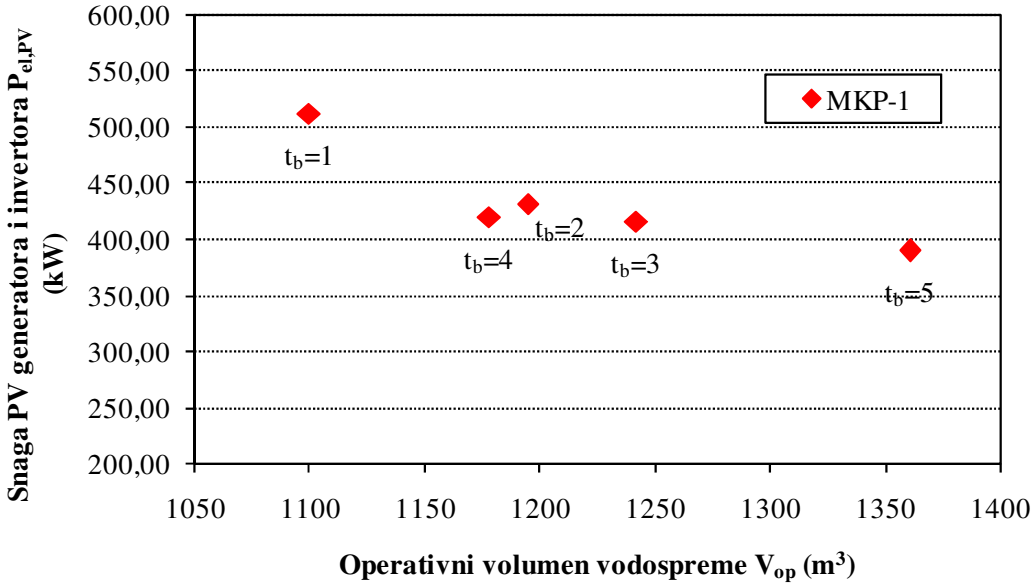
Slika 6.10. Proračunate površine solarnih ćelija A_{PV} za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Analiza vrijednosti površina solarnih ćelija A_{PV}, prikazanih na slici 6.10. istovjetna je analizi dobivenih rezultata snage podsustava PV, $P_{el,PV}$. Dakle, vidljiv je trend pada vrijednosti površina solarnih ćelija A_{PV} za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, s obzirom na povećanje perioda bilanciranja t_b. Kod vrijednosti snaga A_{PV} za MKP-1 primjećuje se skok kod perioda bilanciranja t_b = 4 dana, dok kod MKP-2 nema skokova. Također je vidljivo da je zadovoljena i pretpostavka da je drugi način formiranja vremenskih serija, MKP-2, prirodniji i da su odstupanja A_{PV} manja u odnosu na MKP-1.

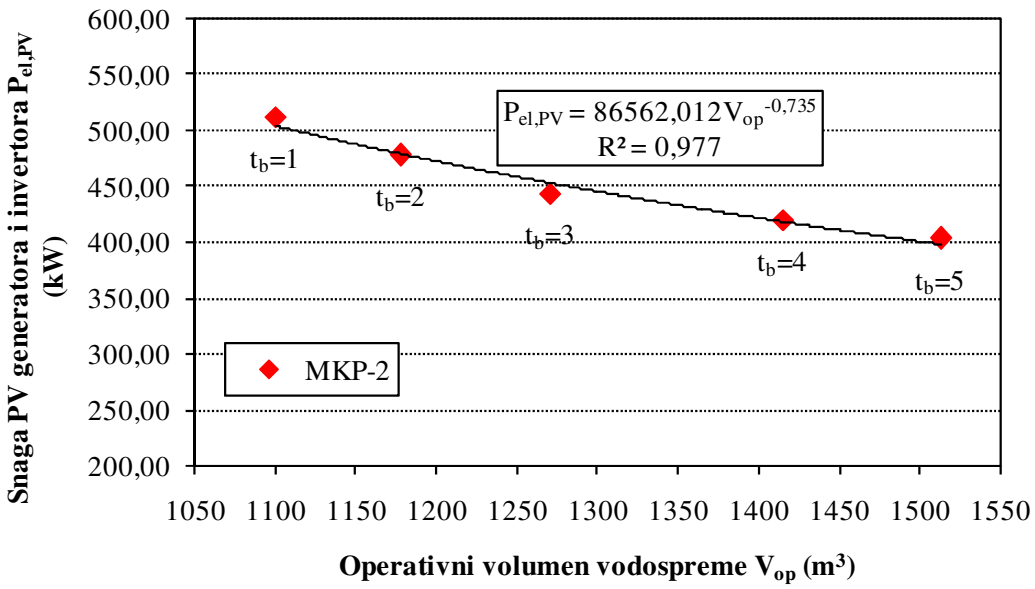
Za oba načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, kod Varijante 1 dobivene su najveće površine solarnih ćelija, koje za MKP-1 i MKP-2 iznose A_{PV} = 3417 m^2. Najmanje snage za MKP-1 i MKP-2 dobivene su za Varijantu 5, te one iznose za MKP-1 A_{PV} = 2601 m^2, te za MKP-2 A_{PV} = 2690 m^2. Razlike između najveće i najmanje vrijednosti A_{PV} iznose 24 % za MKP-1, odnosno 21 % za MKP-2 %, dakle međusobno se značajno razlikuju. Najveća razlika između površina A_{PV} dobivenih za različite periode bilanciranja t_b za MKP-1 i MKP-2 je kod t_b = 2 dana i ona iznosi 304 m^2 odnosno 10 %, dakle ta razlika nije značajna.

6.2.6. Međusobna ovisnost dobivenih veličina

Temeljem dobivenih rezultata analizirati će se ovisnost veličina sustava u funkciji perioda bilanciranja t_b, kako bi se utvrdila moguća zakonitost. Na osnovu dobivenih rezultata veličina podsustava PV (snage PV generatora i invertora $P_{el,PV}$) te potrebnih veličina podsustava V (operativnog volumena vodospreme V_{op}), radi osiguranja vodoopskrbe utvrđena je funkcionalna zavisnost tih dviju veličina s obzirom na period bilanciranja t_b. Rezultati za dvije metode formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, grafički su prikazani na slikama 6.11. i 6.12. Vidljivo je da u slučaju vremenskih serija formiranih postupkom MPK-1 ne postoji zakonitost. Naime, za t_b = 4 dana dolazi do odstupanja u redosljedu poretka rezultata. Proizlazi da ovakav način formiranja vremenskih serija ne omogućava utvrđivanje generalizirane zakonitosti varijabli $P_{el,PV}$ i V_{op}. Isto je donekle očekivano jer je serija dosta razlomljena i neprirodna, te kao takva ne osigurava kontinuitet funkcije kojom se opisuje.



Slika 6.11. Funkcionalna zavisnost snage PV generatora i invertora $P_{el,PV}$ i operativnog volumena vodospreme V_{op} za MKP-1

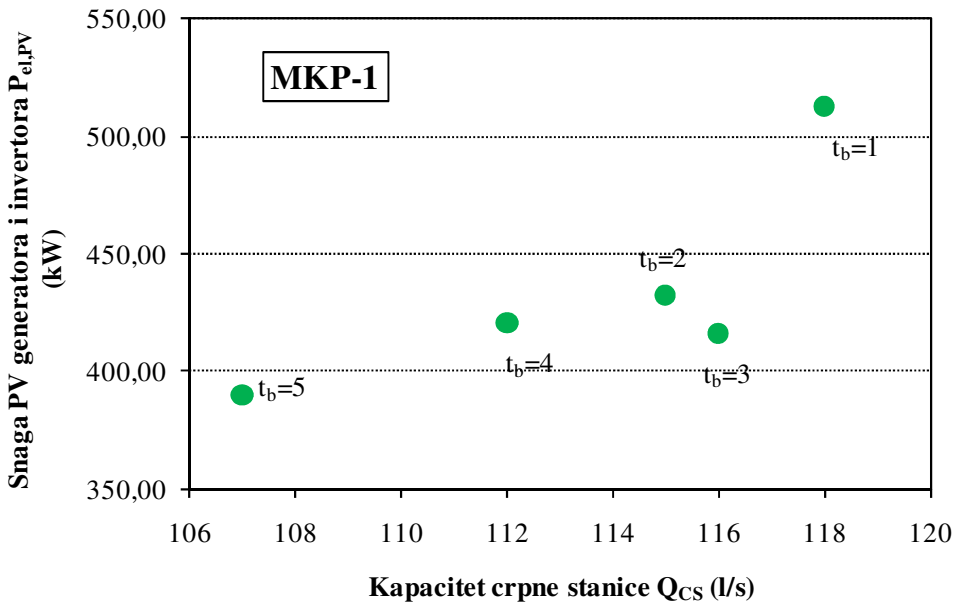


Slika 6.12. Funkcionalna zavisnost snage PV generatora i invertora $P_{el,PV}$ i operativnog volumena vodospreme V_{op} za MKP-2

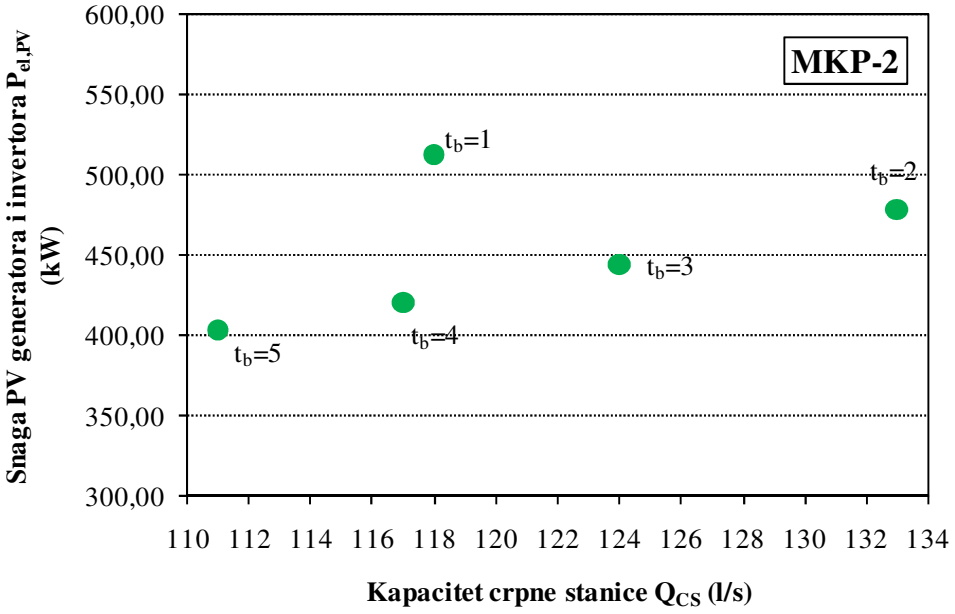
U drugom slučaju formiranja vremenskih serija MPK-2 zavisnost je očita kao i kontinuitet. Utvrđeno je da eksponencijska zavisnost najbolje povezuje parove vrijednosti $P_{el,PV}$ i V_{op} a što je utvrđeno i u prijašnjim istraživanjima, iako se u suštini ne radi o istom tipu problema [M6].

Funkcionalna eksponencijska veza između $P_{el,PV}$ i V_{op} je značajnija, što pokazuje koeficijent korelacije R, odnosno kvadrat njegove vrijednosti R^2 = 0.977. Drugi način formiranja vremenskih serija MKP-2 je očito prirodniji, a i time pravilniji te daje realnije rezultate u funkciji veličine perioda bilanciranja t_b. Dobivena funkcionalna zavisnost omogućava empirijsku ekstrapolaciju te omogućava analizu mogućih rezultata za veće veličine t_b. Vidljivo je da produljenjem perioda bilanciranja opada veličina potrebne snage PV generatora i invertora, $P_{el,PV}$, a raste veličina potrebnog volumena vodospreme V_{op}. Trend promjena je sve manji i teži konačnoj veličini koja bi se dobila ako bi period bilanciranja t_b bio jednak periodu analize (godina dana ili više godina). Međutim, kod tog ne treba zaboraviti da su dobiveni parovi varijabli $P_{el,PV}$ i V_{op} za veličinu t_b diskretne veličine u funkciji diskretne veličine t_b, a ne kontinuirane tako da je utvrđena funkcionalna zavisnost samo indikativna, a ne i potpuno točna. Ovakav odnos između stohastične ulazne veličine energije i determinističke izlazne veličine energije je očekivan jer veći volumeni vodospreme umanjuju utjecaj pojedinih ekstremnih veličina vremenske serije ulazne jakosti Sunčevog zračenja (Sunčeve energije).

Kod podsustava CS, odnosno kod kapaciteta crpne stanice Q_{CS} (a samim time i pripadnih snaga crpne stanice P_{PS}) nema kontinuiteta poretka vrijednosti parova snage $P_{el,PV}$ i kapaciteta Q_{CS}, slike 6.13. i 6.14., stoga nema potrebe analizirati trend.



Slika 6.13. Funkcionalna zavisnost snage PV generatora i invertora $P_{el,PV}$ i kapaciteta crpne stanice Q_{CS} za MKP-1

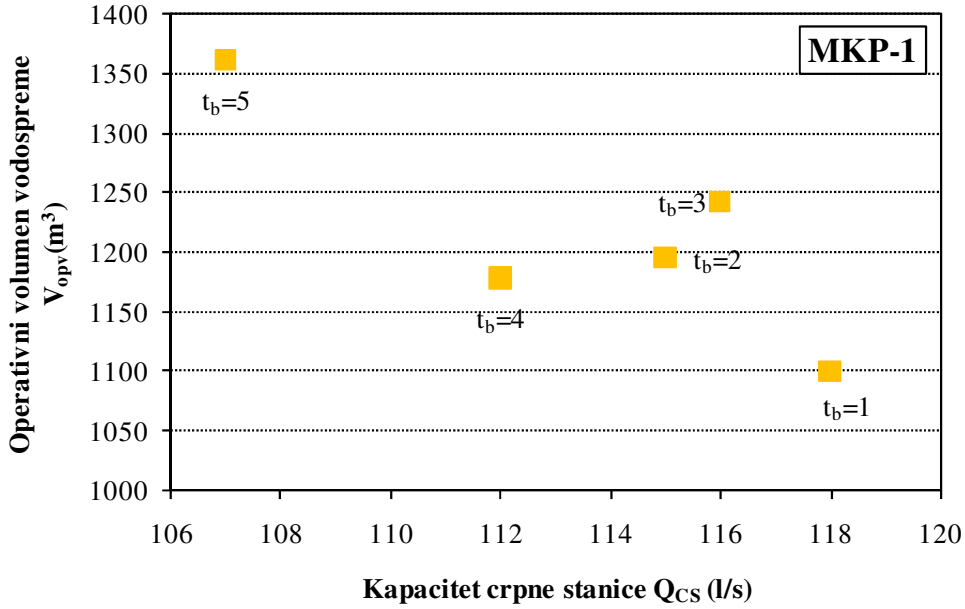


Slika 6.14. Funkcionalna zavisnost snage PV generatora i invertora $P_{el,PV}$ i kapaciteta crpne stanice Q_{CS} za MKP-2

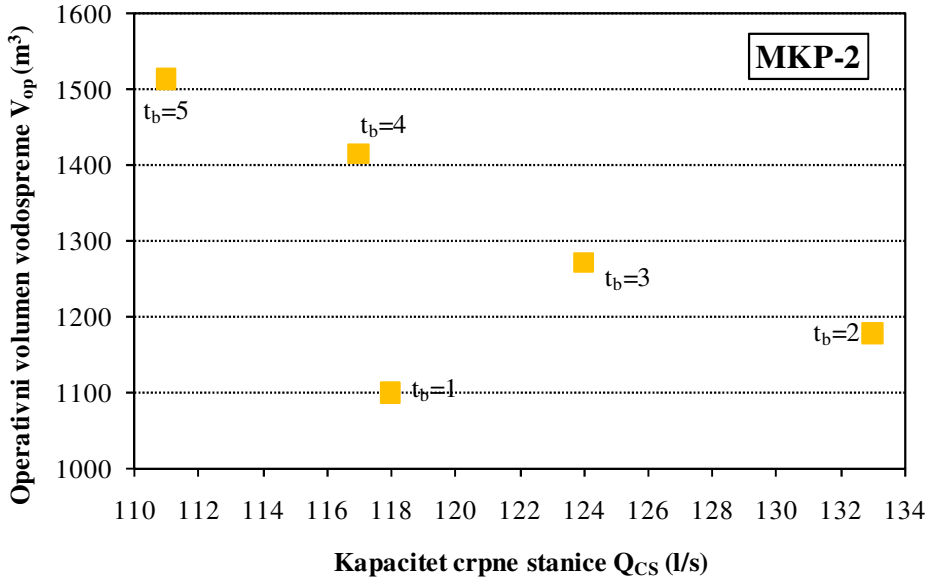
Međutim, iz prikazanih rezultata je vidljiva osnovna i logična zakonitost između snage $P_{el,PV}$ i kapaciteta Q_{CS}, koja proizlazi iz funkcije crpne stanice u sustavu. Navedena ovisnost je proporcionalna. Veća snaga $P_{el,PV}$ znači i veći kapacitet Q_{CS}, odnosno dulji period bilanciranja t_b znači manju snagu $P_{el,PV}$, a time i manju potrebnu snagu Q_{CS}.

Slično se može zaključiti i za vezu između operativnog volumena vodospreme V_{op} i kapaciteta crpne stanice Q_{CS} (a samim time i pripadnih snaga crpne stanice P_{PS}). Nema

kontinuiteta poretka vrijednosti parova tih dviju spomenutih vrijednosti, slike 6.15. i 6.16., stoga nema potrebe analizirati trend, odnosno korelaciju između tih dviju vrijednosti.



Slika 6.15. Funkcionalna zavisnost operativnog volumena vodospreme V_{op} i kapaciteta crpne stanice Q_{CS} za MKP-1



Slika 6.16. Funkcionalna zavisnost operativnog volumena vodospreme V_{op} i kapaciteta crpne stanice Q_{CS} za MKP-2

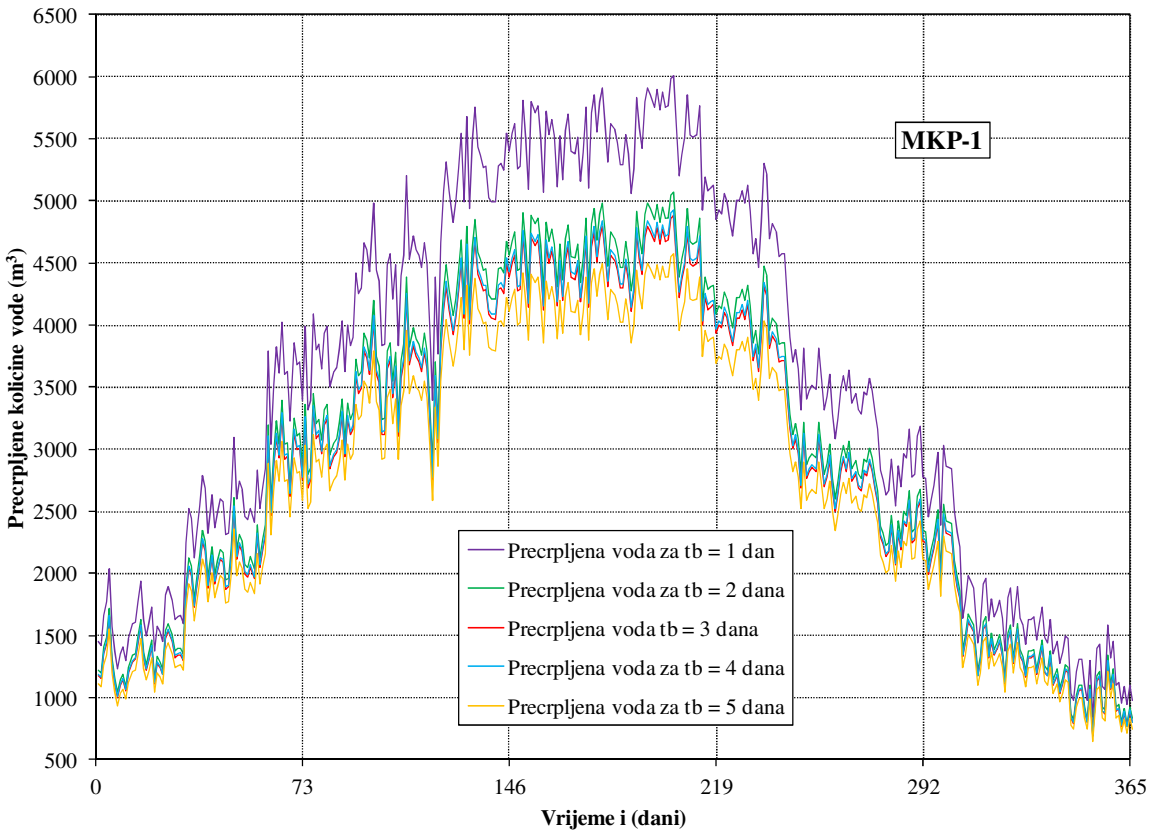
Međutim, iz prikazanih rezultata vidljiva je osnovna i logična zakonitost između operativnog volumena vodospreme V_{op} i kapaciteta crpne stanice Q_{CS}, koja proizlazi iz funkcije crpne stanice u sustavu povezanosti kapaciteta Q_{CS} sa snagom $P_{el,PV}$. Veći kapacitet Q_{CS} znači

manji operativni volumen V_{op}, odnosno dulji period bilanciranja t_b znači veći operativni volumen V_{op}, a time i manju potrebnu snagu $P_{el,PV}$.

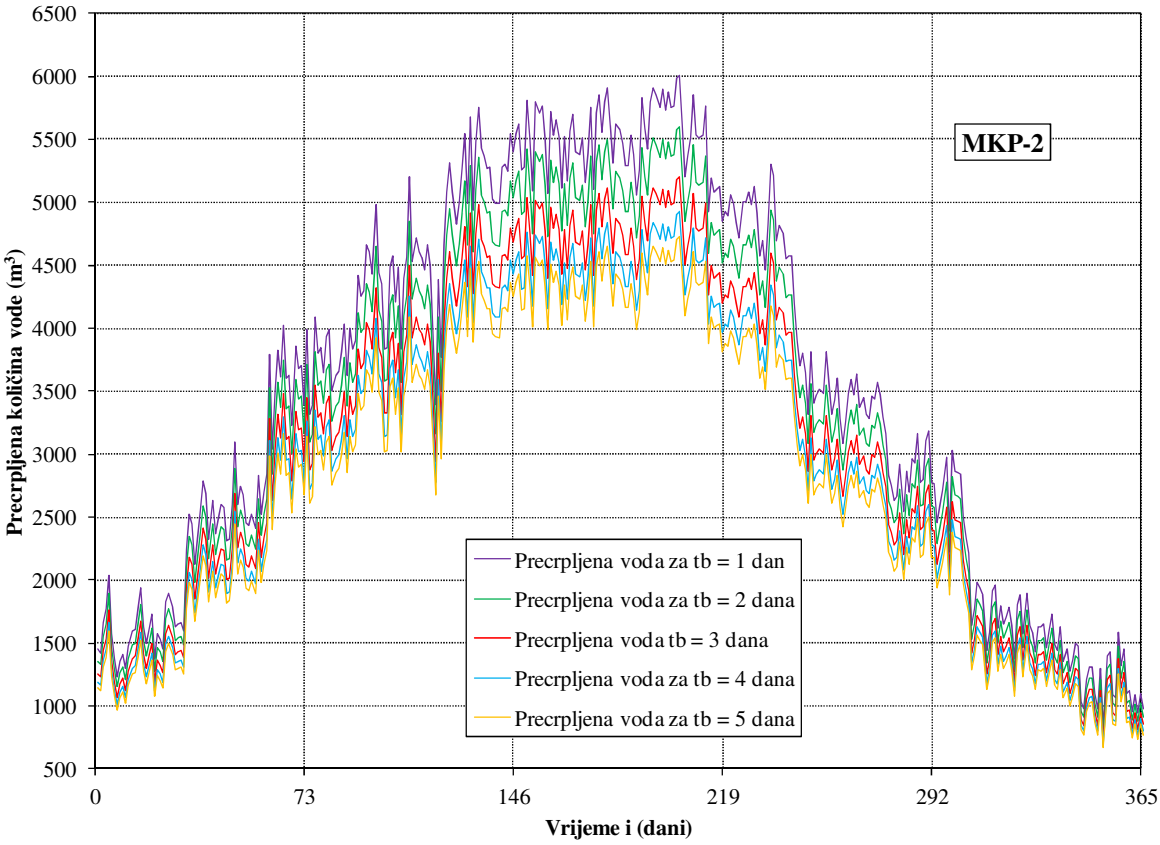
Iz navedenog prikaza vidljivo je da period bilanciranja ima značajan utjecaj na veličine objekata u sustavu. Isto se može očekivati i u slučaju drugačijih klimatskih regija, ali s drugačijim veličinama. Stoga su prikazani rezultati dobar pokazatelj ponašanja sustava i metode dimenzioniranja sustava.

6.2.7. Hidraulički kapacitet Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava

Na slici 6.17. i slici 6.18. prikazane su precrpljene količine vode za svaki period bilanciranja t_b, s obzirom na MKP-1 i MKP-2. Ove količine također su dane u prilogu P3. Sa obje slike vidljivo je da je najveća količina precrpljene vode u ljetnom periodu godine, odnosno u periodu u kojem je jakost Sunčevog zračenja E_s najveća, što je i očekivano. Također je vidljivo da što je manja snaga podsustava PV, $P_{el,PV}$, količina precrpljene vode također je manja, što je isto tako očekivano (jednadžba 4.10.).



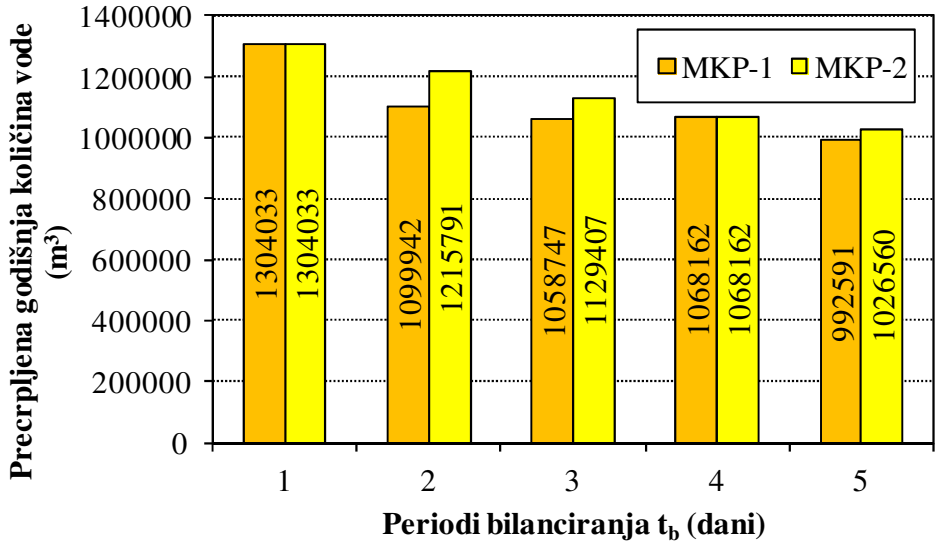
Slika 6.17. Precrpljene količine vode za svaki period bilanciranja t_b za MKP-1



Slika 6.18. Precrpljene količine vode za svaki period bilanciranja t_b za MKP-2

Ovakvo ponašanje sustava je vrlo povoljno za vodoopskrbne sustave kod kojih je godišnji hodogram potrošnje vode sličan hodogramu kapaciteta crpnog sustava. To znači da povećana potrošnja vode ne utječe značajno na povećanje potrebne snage podsustava PV.

Dobivene su i veličine ukupne godišnje precrpljene količine vode za MKP-1 i MKP-2, slika 6.19.



Slika 6.19. Ukupne veličine godišnje precrpljene količine vode za oba načina formiranja vremenskih serija (MKP-1 i MKP-2) za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Kao što se moglo pretpostaviti, za Varijantu 1 je godišnja količina precrpljene količine vode najveća i ona iznosi 1304033 m^3 godišnje za oba načina formiranja vremenskih serija MKP-1 i MKP-2, budući da je za tu varijantu snaga podsustava PV najveća. Najmanje količine precrpljene vode su za Varijantu 5 i one iznose 992591 m^3 za MKP-1, te 1026560 m^3 za MKP-2. Pri tome razlike između najveće i najmanje precrpljene količine vode za MKP-1 iznose 24 %, a za MKP-2 21 %. Ponovno je MKP-2 povoljniji jer su kod njega razlike između najveće i najmanje količine precrpljene vode manje u odnosu na MKP-1. Zakonitost je očita, a trend je opadajući s porastom perioda bilanciranja t_b. To znači da je sustav racionalniji.

6.2.8. Energetski kapacitet Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava

Proizvedena i potrebna energija za EOUVS dobije se tako da se potrebna snaga podsustava PV, $P_{el,PV}$ (kW) odnosno snaga podsustava CS, P_{CS} (kW) pomnože sa brojem sati trajanja Sunčevog zračenja unutar godine T_s koji je jednak 2721 sati. Pri tome se za podsustav PV dobije kolika je količina proizvedene električne energije u kWh, odnosno za podsustav CS kolika je količina potrebne električne energije također u kWh.

Potrebno je konstatirati da EOUVS proizvodi višak električne energije tijekom ljetnog dijela godine, kod kojeg je veća jakost i trajanje Sunčevog zračenja u odnosu na preostali dio godine, slika 6.4., budući da je on dimenzioniran tako da zadovolji potrebe u kritičnom periodu, koji je u

zimskom dijelu godine. U tu svrhu prvo će se prikazati kolika je proizvedena, te kolika je potrebna količina električne energije za rad EOUVS-a za oba načina bilanciranja, MKP-1 i MKP-2.

U tablici 6.3. prikazane su proizvedene i potrebne količine električne energije za EOUVS unutar jedne godine.

Tablica 6.3. Proizvedena i potrebna količina energije za EOUVS unutar jedne godine za oba načina formiranja vremenskih serija (MKP-1 i MKP-2) za periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana

Period bilanciranja t_b (dani)	**MKP-1 (kWh)**			**MKP-2 (kWh)**		
	Ukupno	**Potrebno**	**Višak**	**Ukupno**	**Potrebno**	**Višak**
1	1394513	288414	1106099	1394513	288414	1106099
2	1176261	281082	895179	1300148	325077	975071
3	1132208	283526	848682	1207770	303080	904690
4	1142276	273749	868527	1142276	285970	856306
5	1061462	261528	799934	1097787	271305	826482

U tablici 6.3. vidljiva je tendencija smanjenja godišnjeg viška proizvedene električne energije iz podsustava PV s obzirom na povećanje perioda bilanciranja t_b za oba načina formiranja vremenskih serija MKP-1 i MKP-2. To je očekivano jer korištenje duljih perioda bilanciranja t_b smanjuje utjecaj ekstremnih vrijednosti jakosti Sunčevog zračenja E_s na potrebnu snagu podsustava PV, $P_{el,PV}$, tako da je rješenje racionalnije s obzirom na potrebnu energiju za rad vodoopskrbnog sustava. Kod toga je najveća razlika između viška za Varijantu 1 i za Varijantu 5, koja iznosi 28 %. Primjećuje se skok, odnosno povećanje vrijednosti viška proizvedene električne energije za MKP-1 kod t_b = 4 dana. Budući da je kod snage podsustava PV, $P_{el,PV}$, kod MKP-1 za period bilanciranja t_b = 4 dana primijećen skok u njezinoj vrijednosti, a snage crpne stanice su relativno jednakih veličina za sve t_b-ove, zaključuje se da je snaga $P_{el,PV}$ dominantan čimbenik u proizvodnji električne energije. Drugim riječima, veća snaga $P_{el,PV}$ proizvodi i veći višak električne energije. Kod MKP-2 nema skokova u veličinama viškova, za razliku od MKP-1. I ovdje je najveća razlika između viška za Varijantu 1 i za Varijantu 5, koja iznosi 25 %.

Još jednom je pokazano da je metoda formiranja vremenskih serija MKP-2 prirodnija (realnija) u odnosu na MKP-1, budući da nema prekidanja trenda smanjenja viškova proizvedene električne energije s obzirom na povećanje perioda bilanciranja t_b. Generalni zaključak je taj da povećanje perioda bilanciranja t_b racionalizira cjelokupni EOUVS, budući da viškovi proizvedene električne energije iz podsustava PV postaju sve manji.

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je drugi način formiranja vremenskih serija, MKP-2, prikladniji i daje pouzdanije rezultate. Zbog toga će se samo taj način koristiti u nastavku ove analize.

6.3. Ekonomske značajke Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava

Korištenjem podataka iz literature ([B2, F4, H7, H10, P2, S3, W3]), te jednadžbi (5.9. - 5.13.), izvršiti će se *LCC* analiza. U tablici 6.4. prikazani su troškovi i životni vijek trajanja dijelova pojedinih podsustava Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava (EOUVS-a).

Tablica 6.4. Troškovi i životni vijek trajanja dijelova pojedinih podsustava Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava

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
PV 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

Životni period PV 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. To znači da se invertor kroz tih 25 godina mora 2 puta mijenjati (prvi put nakon 10 godina, drugi put nakon 20 godina). 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, tako da se ni ona ne treba mijenjati. Ostali dijelovi (ventili, cijevi, strojarska oprema) nije toliko značajna da se mora uzeti u obzir, pogotovo jer se analiza radi na konceptualnoj razini, a ne na izvedbenoj pa se u stvari niti ne znaju karakteristike i veličine pojedinih dijelova (cijevi, kablovi, ventili, fazonski komadi i slično). Dakle, samo se razmatra betonska konstrukcija vodospreme, a njezin volumen je u stvari i proračunat.

Za crpnu stanicu, prema podacima iz navedene literature (a oni variraju od 10 do 20 godina, pa čak i više), usvaja se osrednjena vrijednost trajanja crpne stanice od 15 godina. To znači da se crpna stanica mijenja jedanput kroz 25 godina; prvi put se mijenja nakon 15 godina. Ovdje se također samo razmatra sama konstrukcija odnosno crpni agregat s elektromotorom, budući da se analiza radi na konceptualnoj (idejnoj) razini.

Također se u obzir neće uzimati troškovi troškovi rada zaposlenika na izgradnji razmatranog sustava, svih administrativno-zakonskih dozvola i uvjerenja, kao i cijena zemljišta. Razrada ovog idejnog rješenja prvo na razini idejnog projekta, zatim na razini glavnog projekta, a poslije i na razini izvedbenog projekta dala bi potpuniju sliku o prijedlogu ponuđenog rješenja, no to prelazi granice ovakve znanstvene razine, a što je prvenstveno namjena ove disertacije, odnosno to bi se radilo ukoliko bi se koncept razrađivao dalje na inženjerskoj razini problema. Prema podacima iz literature [B2], realna kamatna stopa iznosi k_d = 8 %, dok su stope inflacije f_0 i f_1 = 4 %.

U tablici 6.5. prikazani su rezultati provedene *LCC* analize za EOUVS s obzirom na periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana za drugi način formiranja vremenskih serija, MKP-2.

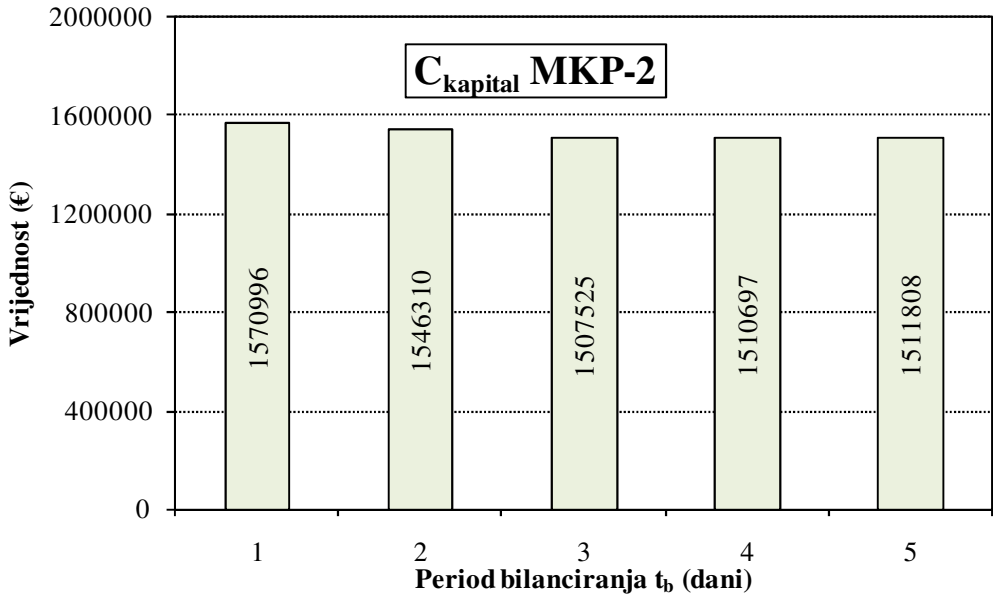
Tablica 6.5. Troškovi različitih dobivenih varijanti za Energetski Održivi Urbani Vodoopskrbni Sustav s obzirom na periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana za MKP-2

Period bilanciranja t_b (dani)	**Snaga $P^*_{el,PV}$ (kW)**	**Volumen V^*_{op} (m^3)**	**Snaga P^*_{PS} (kW)**	**$C_{kapital}$ (€)**	**$C_{zamjene}$ (€)**	**$C_{(U\&O)}$ (€)**	***LCC* (€)**
1	512.50	1100	106.00	1570996	554084	263418	2388498
2	477.82	1178	119.47	1546310	526705	269198	2342213
3	443.87	1271	111.39	1507525	489479	261567	2258572
4	419.80	1415	105.10	1510697	462815	260740	2234252
5	403.45	1513	99.71	1511808	444154	259436	2215398

U ovom slučaju, Varijanta 1 je najnepovoljnija (najskuplja), dok je Varijanta 5 najpovoljnija (najjeftinija) s obzirom na vrijednost *LCC*-a za MKP-2, dakle istovjetna situacija kao i kod MKP-1. Razlika između najskuplje i najjeftinije varijante u ovom je slučaju je 7 %. U svrhu boljeg prikaza veličine pojedinih troškova koji sačinjavaju *LCC*, na osnovu podataka iz tablice 6.4., prikazani su kapitalni troškovi (slika 6.20.), troškovi zamjene (slika 6.21.), te troškovi upravljanja i održavanja (slika 6.22.).

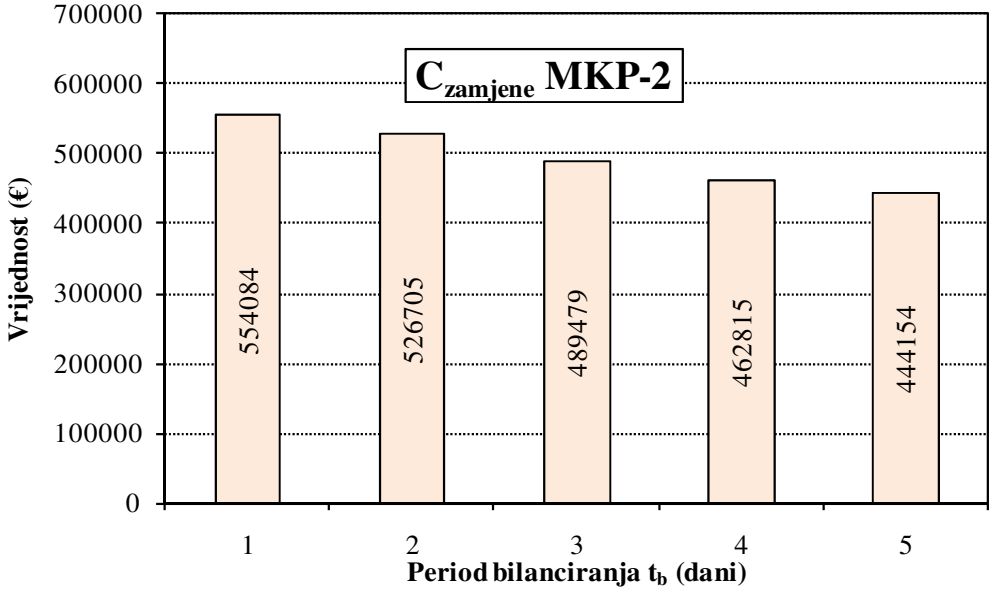
Iz tablice 6.5. vidljivo je da, s obzirom na vrijednost *LCC*-a, kapitalni troškovi $C_{kapital}$ čine u prosjeku dvije trećine troškova (od 66 % za Varijante 1 i 2, 67 % za varijantu 3, dok je za

Varijantu 4 i 5 68 %). Troškovi zamjene, $C_{zamjene}$, iznose 20 % za Varijantu 5, 21% za Varijantu 4, te 22 % za Varijante 2, 3 i 23 % za Varijantu 1. Troškovi upravljanja i održavanja, $C_{(U\&O)}$, iznose 11 % za Varijante 1 i 2, dok za preostale Varijante 3, 4 i 5 iznose 12 %. Vidljivo je da su i u ovom slučaju kapitalni troškovi dominantni u odnosu na troškove zamjene i troškove upravljanja i održavanja.



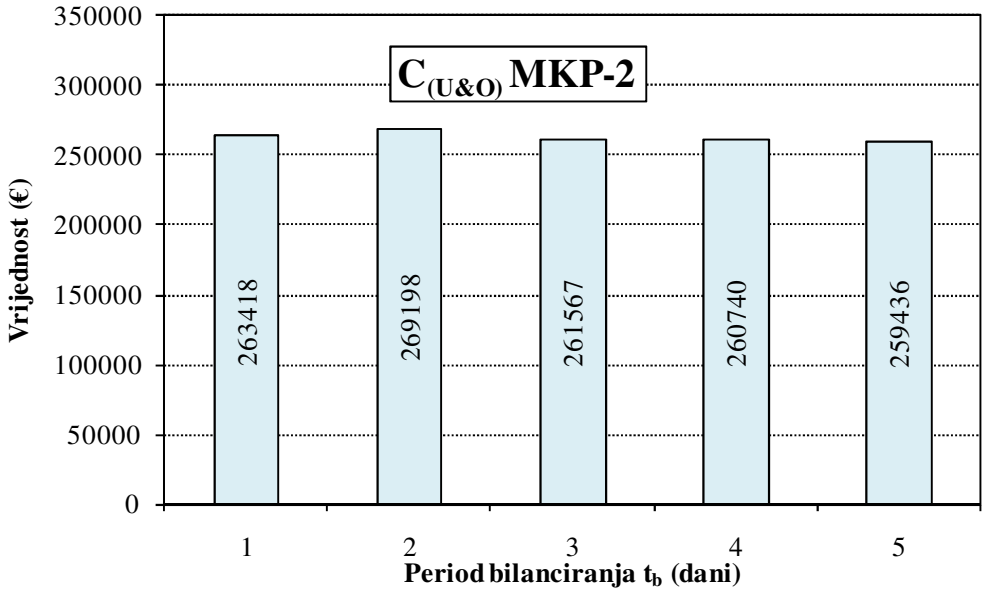
Slika 6.20. Kapitalni troškovi s obzirom na periode bilanciranja t_b od 1 d 5 dana za MKP-2

Što se tiče kapitalnih troškova s obzirom na periode bilanciranja t_b, razlika između najveće vrijednosti (Varijanta 1) i najmanje vrijednosti (Varijanta 3) je 4 %. Očito je da će sa smanjenjem cijene PV generatora i invertora ta razlika biti manja, jer se ne očekuje značajnije povećanje troškova gradnje crpne stanice i vodospreme.



Slika 6.21. Troškovi zamjene s obzirom na periode bilanciranja t_b od 1 d 5 dana za MKP-2

Vezano uz troškove zamjene s obzirom na periode bilanciranja t_b, razlika između najveće vrijednosti (Varijanta 1) i najmanje vrijednosti (Varijanta 5) je 20 %.

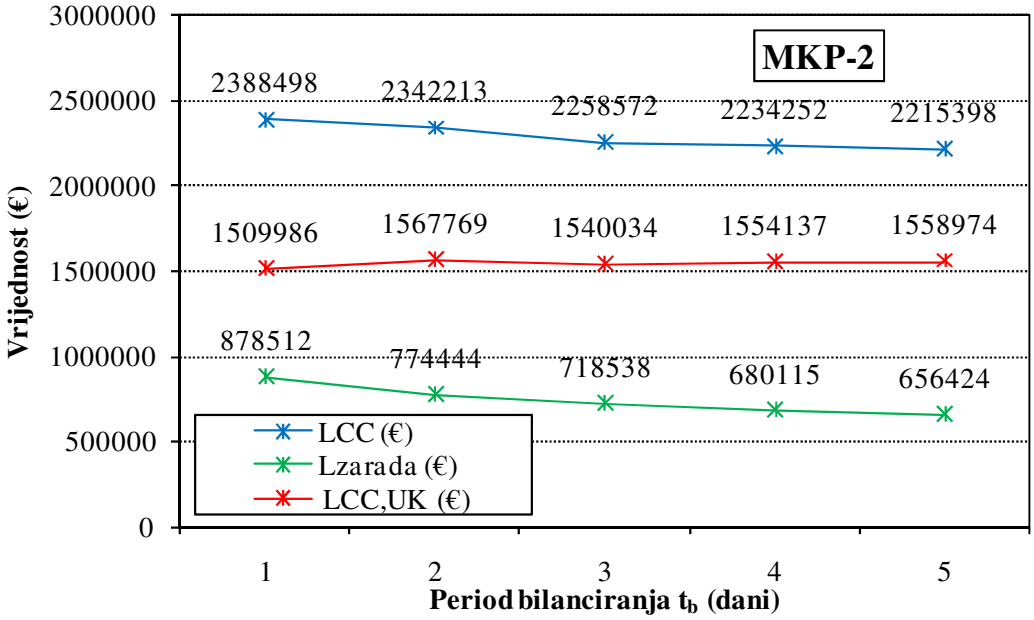


Slika 6.22. Troškovi pogona i održavanja s obzirom na periode bilanciranja t_b od 1 d 5 dana za MKP-2

Kod troškova upravljanja i održavanja s obzirom na periode bilanciranja t_b, razlika između najveće vrijednosti (Varijanta 2) i najmanje vrijednosti (Varijanta 5) je 4 %.

Dodatan uvid u ekonomski kriterij omogućen je ukoliko se u obzir uzme i mogućnost prodaje viška proizvedene električne energije, L_{Zarade}, slika 6.23. L_{Zarade} dobiven je korištenjem Neto sadašnje vrijednosti, *NPV*, jednadžba (5.14.). Pri tome je prodajna jedinična cijena električne

energije 0.07 €/kWh [H9], dok nominalna diskontna stopa d iznosi 10 % [U1]. Ukoliko se od vrijednosti LCC-a oduzme vrijednost zarade od prodaje viška električne energije (L_{Zarade}), dobiju se ukupne vrijednosti LCC_{UK}, jednadžba (5.15.), slika 6.23.



Slika 6.23. Prikaz vrijednosti LCC-a, zarade od prodaje energije L_{Zarada}, te ukupne vrijednosti LCC_{UK} za različite periode bilanciranja t_b od 1 do 5 dana za Energetski Održivi Urbani Vodoopskrbni Sustav za MKP-2 za planski period od N = 25 godina

Sa povećanjem perioda bilanciranja t_b, odnosno sa smanjenjem snage podsustava PV, $P_{el,PV}$, primjećuje se trend smanjenja vrijednost zarade od prodaje viška proizvedene električne energije, L_{Zarade}. Najveća vrijednost L_{Zarade} je za Varijantu 1, dok je najmanja vrijednost L_{Zarade} za Varijantu 5. Razlika između najveće (Varijanta 1) i najmanje vrijednosti (Varijanta 5) iznosi 25 %.

Što se tiče ukupne vrijednosti LCC_{UK}, ona je najveća za Varijantu 2, a najmanja za Varijantu 1. Razlika između najveće (Varijanta 2) i najmanje vrijednosti (Varijanta 1) iznosi 4 %, što je praktički zanemarivo. Sa slike 6.23. vidljivo je da se vrijednost LCC_{UK} stabilizira sa povećanjem perioda bilanciranja t_b.

Prodaja viška proizvedene električne energije u određenoj mjeri utječe na smanjenje LCC-a. Ta smanjenja LCC-a iznose 30 % za Varijante 4 i 5, 32 % za Varijantu 3, 33 % za Varijantu 2, te 37 % za Varijantu 1.

Ove ekonomske značajke predloženog koncepta omogućavaju primjenu različitih strategija gradnje EOUVS-a. Ako su povoljni uvjeti za gradnju podsustava PV, te ako su povoljni uvjeti na

tržištu za prodaju "Zelene energije", tada je možda povoljno instalirati veće snage podsustava PV. Time se ostvaruje veća proizvodnja električne energije i veća pouzdanost vodoopskrbnog sustava.

6.4. Ekološke značajke Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava

Ekološki kriterij prikazan je u skladu s prikazanom metodologijom u Podpoglavlju *Višekriterijska analiza*. Za svaku varijantu, tj. za svaki pripadni period bilanciranja proračunati će se godišnji ekvivalent CO_2, odnosno količina CO_2 koja se neće ispustiti u atmosferu zbog korištenja solarne fotonaponske energije. U ovom postupku proračunu posebno će se proračunati ekvivalentne količine CO_2 za ukupno proizvedenu količinu električne energije iz podsustava PV, a posebno će se proračunati ekvivalentne količine CO_2 za onu količinu proizvedene električne energije iz podsustava PV koja je potrebna za podsustav CS.

Ekvivalentne količine CO_2, MKP-2, koje nastaju korištenjem klasičnih goriva (dizel - goriva, ugljena i plina) prikazane su u tablici 6.6. Korištenje ugljena proizvodi najveću emisiju CO_2, a nakon njega slijede dizel - gorivo i plin. Što je veća količina proizvedene električne energije iz podsustava PV, to je i godišnja ekvivalentna količina CO_2 koja se neće ispustiti također veća. Isto vrijedi i za količinu električne energije potrebne za rad crpne stanice.

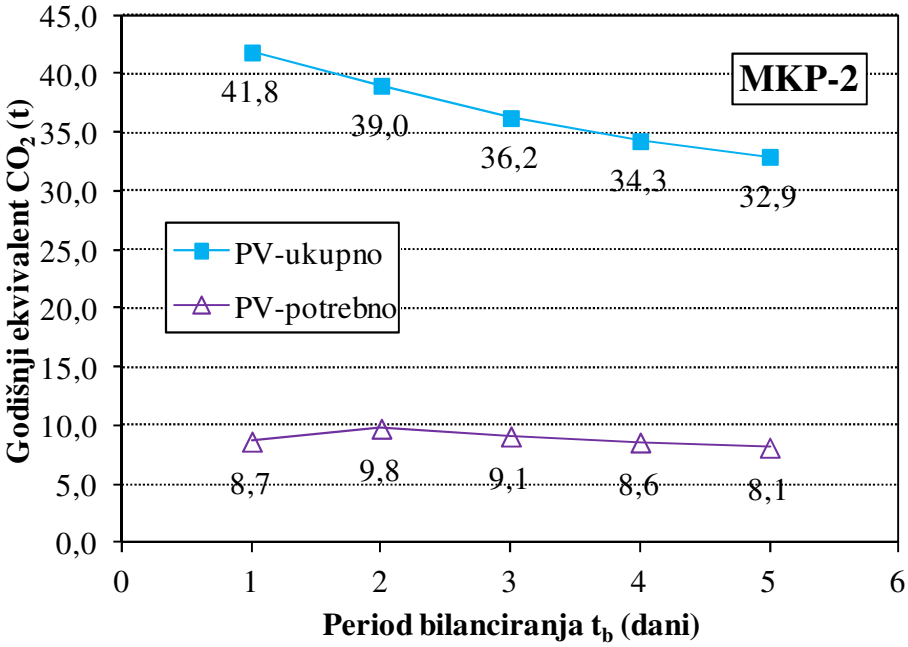
Tablica 6.6. Proračunate godišnje ekvivalentne količine CO_2 za ukupno proizvedenu i za ukupno potrebnu količinu električne energije za MKP-2

Period bilanciranja t_b (dani)	**Ekvivalent CO_2 (t)**					
	Dizel-gorivo		**Ugljen**		**Plin**	
	Ukupno-PV	**Potrebno-CS**	**Ukupno-PV**	**Potrebno-CS**	**Ukupno-PV**	**Potrebno-CS**
1	1245.3	257.6	1331.8	275.4	835.3	172.8
2	1161.0	290.3	1241.6	310.4	778.8	194.7
3	1078.5	270.7	1153.4	289.4	723.5	181.5
4	1020.1	255.4	1090.9	273.1	684.2	171.3
5	980.3	242.3	1048.4	259.1	657.6	162.5

Kod ukupno proizvedene električne energije, za sva tri načina korištenja klasičnih goriva (dizel, ugljen, plin) kod Varijante 1 se najviše, a kod Varijante 5 najmanje smanjuje emisija CO_2. Kod ukupno potrebne električne energije, za sva tri načina korištenja klasičnih goriva (dizel, ugljen, plin) kod Varijante 2 se najviše, a kod Varijante 5 najmanje smanjuje emisija CO_2. Za

ukupno proizvedenu električnu energiju iz PV sustava razlika između Varijante 1 i 5 je 21 %, dok je za potrebnu proizvedenu električnu energiju razlika 17 %.

Krajnji zaključak je taj da svaka od pet varijanti analiziranog sustava doprinosi zaštiti okoliša jer se u atmosferu puštaju značajno manje količine CO_2, što nebi bio slučaj kod korištenja klasičnih goriva. Proračunate godišnje ekvivalentne količine CO_2 koje proizvodi podsustav PV, a samim time i EOUVS za ukupno proizvedenu i za ukupno potrebnu količinu električne energije prikazane su na slici 6.24.



Slika 6.24. Proračunate godišnje ekvivalentne količine CO_2 koje proizvodi podsustav PV za ukupno proizvedenu i za ukupno potrebnu količinu električne energije

Kod Varijante 1 je najveća količina nastalog CO_2, dok je kod Varijante 5 najmanja količina nastalog CO_2 za ukupno proizvedenu količinu električne energije. Pri tome najveća razlika između ispuštenih količina CO_2 iznosi 21 %. Ukoliko se razmatra ona količina električne energije koja je potrebna za rad crpne stanice, kod Varijante 2 je najveća količina nastalog CO_2, dok je kod Varijante 5 najmanja količina nastalog CO_2. Tada razlika između između ispuštenih veličine za te varijante iznosi 17 %. Ne treba zaboraviti da se smanjenje CO_2 honorira (financijski stimulira), što znači da je osim ekoloških učinaka moguće osigurati i dodatnu zaradu.

6.5. Društvene značajke Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava

Kao što je već rečeno u podpoglavlju *Višekriterijska analiza*, društveni kriterij sagledava se prema [W1] kroz društvenu prihvatljivost EOUVS-a, stvaranje novih radnih mjesta, te mogućnost stjecanja različitih društvenih koristi. Društvena prihvatljivost EOUVS-a podrazumijeva mišljenje stanovništva s njihovog gledišta kao mogućih korisnika sustava. Prihvaćanje ili odbijanje od strane stanovništva može produljiti vrijeme ostvarenja EOUVS-a ili ga čak i spriječiti.

Projektiranje, izgradnja, korištenje, upravljanje i održavanje EOUVS-a ne samo da koriste postojeća radna mjesta, već iziskuju i otvaranje novih radnih mjesta, što definitivno povećava socijalno blagostanje zajednice. Tu se misli na socijalne koristi kao što je razvoj regije, veći obrtaj financijskih sredstava, podizanje standarda življenja, i sl.

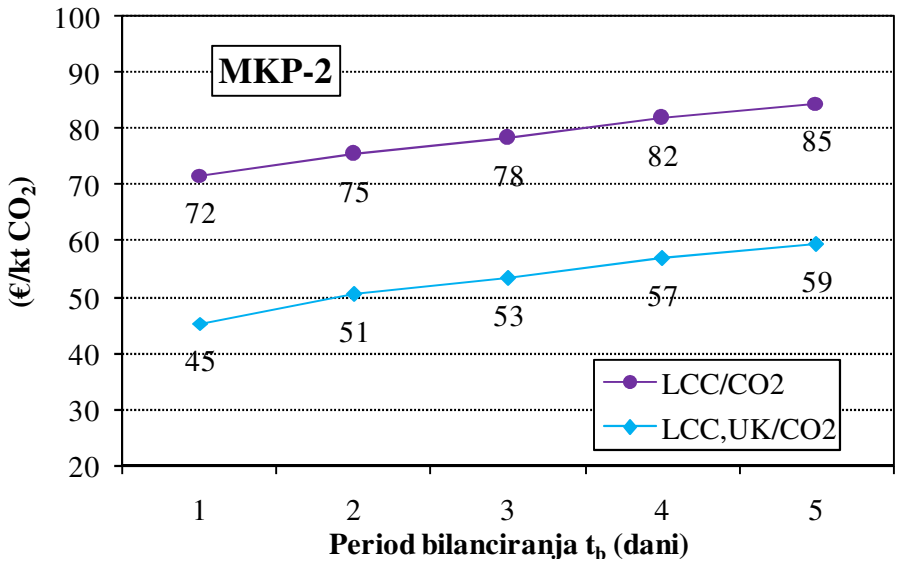
Društvene značajke ne smiju se izostaviti, jer socijalne ili čak i kulturološke prepreke mogu u konačnici dovesti do odbijanja EOUVS-a. Konkretno, upravna, pa čak i tehnička tijela u vodoprivrednim poduzećima, kao i u gradskim upravama imaju odbojnost naspram obnovljivih izvora energije, a samim time u ovom slučaju i prema EOUVS-u jer uobičajeni način prihvaćanja rješenja vodoopskrbe dosad je bio korištenje energije iz klasičnih energetskih postrojenja [Z1]. U samoj ljudskoj naravi ponašanja je već urođena tendencija držanja "neutralne pozicije" u odlučivanju ("status quo"), tako da je potreban određeni period vremena da se ljudi upoznaju kako novi sustav, tj. u ovom slučaju EOUVS funkcionira, kakva su iskustva postojećih korisnika, itd. Nakon toga očekuje se prihvaćanje i korištenje novog sustava [F1]. Vidljivo je da su ove značajke definirane opisno.

U odnosu na ostale OIE, [W2], primjena solarne fotonaponske (PV) energije povećava broj novih radnih mjesta, direktno vezanih uz PV. Izraženo u broju novih radnih mjesta godišnje po jednom GWh-u proizvedene električne energije, ta veličine jednaka je 0.87. Kod toga se podrazumijeva da se ta radna mjesta odnose na samu gradnju, postavljanje instalacija i proizvodnju pojedinih dijelova PV sustava, te zamjenu pojedinih dijelova, kao i upravljanje i održavanje sustavom. Pri tome za PV energiju najveći dio se odnosi na gradnju, postavljanje instalacija i proizvodnju pojedinih dijelova PV sustava.

Društvene koristi odnose se na poboljšanje standarda ljudi, koje nastaje korištenjem solarne fotonaponske energije (PV sustava). Ovo je u stvari zaključni pokazatelj, koji izražava krajnje zadovoljstvo ljudi korištenjem PV sustava. U ovom slučaju, PV postrojenje proizvodi električnu energiju za pogon GCS koja crpi vodu u vodospremu, koja pak omogućava dostupnost vode

stanovništvu. Dakle, osigurana je voda za slobodno korištenje, što omogućava visoku kvalitetu života stanovništva. Također se sa smanjenjem emisija stakleničkih plinova, prvenstveno CO_2, povećava i razina zdravlja ljudi i druge dobrobiti za društvo.

Navedene značajke definirane su opisno, no radi boljeg usvajanja opisanih značajki društvenih koristi potrebno je uvesti određene indikatore društvenog uređenja, odnosno društvene zajednice. Oni će se definirati kao omjer između vrijednosti *LCC* i količine CO_2 koja se neće ispustiti u okoliš (za primjer korištenja ugljena), te kao omjer između vrijednosti LCC_{UK} i navedene količine CO_2, slika 6.25.



Slika 6.25. Indikatori društvenog uređenja

Prikazani indikatori integriraju financijsku korist i ekološku korist, čime se na jednostavan i usporediv način dobiva indikator društvenog uređenja zajednice. Logično je da veća vrijednost podrazumijeva veću korist za društvenu zajednicu. U ovom slučaju, Varijanta 5 je najpovoljnija. Ovakvi indikatori naročito su pogodni za uspoređivanje dvaju EOUVS-a na geografski i klimatski različitim lokacijama.

7. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

7.1. SWOT analiza

7.1.1. Prednosti EOUVS-a

Tehnologija rada podsustava "PV generator i invertor" (PV), koji proizvodi električnu energiju za pogon Glavne Crpne Stanice (GCS) u Energetski Održivom Urbanom Vodoopskrbnom sustavu (EOUVS) je jednostavna i primjenjiva na svakoj lokaciji u svijetu, ovisno o pripadnim klimatskim karakteristikama, kao i karakteristikama vodoopskrbnog sustava. Pri tome je električna energija dostupna na mjestu njezinog nastanka, tako da se time smanjuju, odnosno otklanjaju mogući energetski, a samim time i ekonomski gubici koji bi nastali zbog prijenosa električne energije na daljinu, budući da su klasična postrojenja za proizvodnju električne energije (primjerice hidroelektrane ili termoelektrane) često smješteno izvan urbanih sredina.

Ulazna solarna energija je besplatna i dostupna na gotovo svakoj lokaciji u svijetu, čime se već u samom startu otklanja potreba za traženjem drugih prikladnih obnovljivih i neobnovljivih

izvora energije koji bi pokretali GCS. Samim time, PV energija može se kombinirati sa spomenutim izvorima energije, a također može poslužiti kao dodatni izvor energije u svrhu povećanja sigurnosti opskrbe energijom. EOUVS proizvodi višak električne energije tijekom godine, budući da je dimenzioniran da zadovolji potrebe u kritičnom periodu za dimenzioniranje podsustava PV. S većom snagom podsustava PV, raspoloživi višak je također veći. Ukoliko postoji veza sa elektroenergetskom mrežom, spomenuti višak električne energije može biti distribuiran drugim potrošačima, a može biti i prodan. Također se taj višak može iskoristiti ukoliko postoje turistička naselja, za koja je značajna povećana potrošnja kako električne energije, tako i vode tijekom trajanja turističke sezone. Isti taj višak može se iskoristiti (ukoliko postoji veza sa elektroenergetskom mrežom) ako iz bilo kojeg razloga dođe do prekida proizvodnje električne energije u podsustavu PV, pa se taj višak natrag vraća u podsustav CS. Osim toga, postoji mogućnost korištenja viška precrpljene količine vode i za navodnjavanje tijekom ljetnih mjeseci kada za time postoji povećana potreba zbog visokih temperatura, perioda bez oborina i povećanog rasta vegetacije. Solarne ćelije postaju sve učinkovitije, čime se povećava njihova isplativost.

EOUVS, odnosno podsustav PV proizvodi zanemarivo malu emisiju stakleničkih plinova. Općenito, primjena PV energije značajno pridonosi smanjenju ispuštanja stakleničkih plinova, prvenstveno CO_2, ukoliko se ona koristi umjesto klasičnih goriva (ugljen, dizel-gorivo, plin). Podsustav PV ne proizvodi buku, neugodne mirise i otrovne spojeve, stoga je prikladan za lokacije blizu urbanih sredina.

Korištenjem Metode Kritičnog Perioda (MKP) postižu se značajne rezerve u EOUVS-u, odnosno postiže se pouzdanost u energetskom i hidrauličkom pogledu. Odabrana potrebna veličina podsustava PV (snaga PV generatora i invertora $P_{el,PV}$), koja je određena s obzirom na pripadni kritični period $t^*_{Pel(i)}$, koji je u zimskom periodu godine, otklanja eventualna odstupanja (povećanja) potrebe vode koja se mogu javiti u ljetnom periodu godine. Odabrana (potrebna) veličina podsustava V (operativnog volumena vodospreme V_{op}), koja je određena s obzirom na pripadni kritični period $t^*_{Vop(i)}$, otklanja eventualna odstupanja (smanjenja) jakosti Sunčevog zračenja E_s koja se mogu javiti u zimskom periodu godine. Potrebni kapacitet, odnosno snaga GCS-e, koji su određeni s obzirom na pripadni kritični period $t^*_{Vop(i)}$ osiguravaju potreban dotok vode u vodospremu. Sa produljenjem perioda bilanciranja t_b povećava se i pouzdanost rada EOUVS-a, a samim time i njegova održivost, ali i društvena korist.

Podsustav PV, a prvenstveno solarne ćelije, mogu se postavljati na lokacije koje nisu predviđene za poljoprivredu ili koje nisu predviđene za društvene aktivnosti (parkovi, šetnice, i

sl.), a mogu se postavljati i na krovove, pa čak i na pročelja zgrada. Ovo je naročito pogodno u područjima unutar kojih se nalaze zapuštena zemljišta ili zemljišta koja se ne obrađuju. Uz sve navedeno, vidljivo je da je ovakav sustav društveno prihvatljiv.

7.1.2. Nedostaci EOUVS-a

Prvi i najveći nedostatak je tehnološki. Naime, uvijek je prisutna mogućnost smanjenja dnevne jakosti i trajanja Sunčevog zračenja zbog naoblake ili magle, što negativno djeluje na sigurnost rada vodoopskrbnog sustava. Međutim, korištenje opisane Metode Kritičnog Perioda (MKP) smanjuje, odnosno otklanja taj problem. Drugi nedostatak je ekonomske naravi. Cijena podsustava PV je (još uvijek) visoka u odnosu na klasične izvore energije, što u konačnici rezultira da je, usprkos besplatnoj ulaznoj (solarnoj) energiji, ovakav EOUVS skuplji od Urbanog Vodoopskrbnog Sustava (UVODS-a) pokretanog klasičnom energijom. No, postizanje održivosti UVODS-a ima svoju cijenu, tako da je tu činjenicu potrebno uzeti u obzir.

Nedostatak je vidljiv i u velikoj površini potrebnoj za postavljanje solarnih ćelija. Navedeno može predstavljati problem, naročito u urbanim sredinama. Ukoliko za navedenu svrhu nije na raspolaganju građevno zemljište, jedino preostaje zauzimanje određenog dijela (ili u potpunosti) zelenih površina, tako da se osim društvenih mogu pojaviti i ekološki problemi. Također se mogu javiti problemi zbog zasjenjenosti u nepogodnom brdskom ili planinskom reljefu.

Međutim, očekuju se povećanja učinkovitosti solarnih ćelija, s današnjih 15 % na 30 % u narednih 30 godina [G4], pri čemu je već u laboratorijskim uvjetima dosegnuto 44 % učinkovitosti [T2]. Ta povećanja učinkovitosti solarnih ćelija proporcionalno smanjuju potrebnu površinu koju one zauzimaju.

7.1.3. Mogućnosti EOUVS-a

EOUVS doprinosi Smjernicama Europske Komisije (EU 20-20-20), pri čemu se podrazumijeva smanjenje emisije stakleničkih plinova za 20 % s obzirom na razinu od 1990. godine, povećanje proizvodnje energije iz Obnovljivih Izvora Energije (OIE) za 20 %, te povećanje energetske učinkovitosti za 20 %, sve do 2020. godine. Predloženi EOUVS je u tom pogledu obećavajući, no on u velikoj mjeri ovisi o klimatskim karakteristikama promatranog područja, podsustava PV, podsustava V i podsustava CS, te u konačnici i o EOUVS-a od strane društvene zajednice. Poticaj intenzivnijem uključivanja OIE, odnosno PV energije u UVODS

predstavlja i najnoviji paket prijedlog Europske Komisije [E4], kod kojeg se, između ostaloga, do 2030. godine predlaže smanjenje emisije stakleničkih plinova za 40 % s obzirom na razinu iz 1990. godine, povećanje udjela OIE u ukupnoj količini proizvedene energije za 27 %, te nastavak već postojećeg cilja povećanja energetske učinkovitosti za 20 %.

Potrebno je uzeti u obzir i trend povećanja cijene električne enegije iz regionalnih energetskih sustava, koja se povećava sa povećanjem cijene nafte i ostalih fosilnih goriva [K2]. Taj trend će se i dalje nastavljati u budućnosti, otprilike 0.2 % godišnje unutar narednih 25 godina [N2]. Navedeno dodatno opravdava mogućnost primjene OIE, a samim time i PV energije. Porezi na emisije CO_2, koje nastaju korištenjem klasičnih (fosilnih) goriva, također doprinose sve većoj i većoj primjeni OIE.

EOUVS se može formirati (izgraditi) i iz postojećih UVODS-a na način da već izgrađene crpne stanice umjesto električne energije iz postojeće elektroenergetske mreže koriste električnu energiju iz podsustava PV. Budući da su crpne stanice i vodospreme u UVODS-u već izgrađene, tada jedini trošak može predstavljati samo izgradnja podsustava PV. Uzevši u obzir trend smanjenja cijena PV ćelija i povećanje njihove učinkovitosti, ovakva opcija je vrlo obećavajuća i ostvariva. To pogotovo dolazi do izražaja s obzirom da kapitalni troškovi čine u prosjeku dvije trećine vrijednosti *LCC*-a.

Pozitivna činjenica koja ide u prilog izgradnji i korištenju EOUVS-a je i nepromjenjivost otkupne cijene električne energije proizvedene iz podsustava PV (konkretno, u Hrvatskoj otkupne cijene vrijede za 14 godina proizvodnje), što omogućava pouzdanije planiranje prihoda i rashoda EOUVS-a.

Naročito je korisno što u svim segmentima aktivnosti vezanih uz EOUVS (projektiranje, istraživanje, savjetovanje, marketing, izvođenje radova, održavanje i upravljanje, prodaja proizvedene električne energije) dolazi do stvaranja novih i povećanja postojećih radnih mjesta. To je posebno pogodno kod zemalja u tranziciji, kao što je Hrvatska, jer se potiče razvoj slabije razvijenih regija i pri tome se povećava gospodarski prosperitet društvene zajednice.

7.1.4. Moguće prijetnje EOUVS-u

Najveću prijetnja EOUVS-u predstavljaju sumnja i skeptičnost od strane rukovodioca i inženjera u vodoprivrednim poduzećima. Bez obzira na činjenicu da je prikazani koncept EOUVS-a tehnološki jednostavan i prikladan, te nema nikakvih tehnoloških prepreka za primjenu,

on je drugačiji u odnosu na uobičajeni koncept vodoopskrbe. Naftni i nuklearni lobiji također mogu imati negativan utjecaj na primjenu OIE, a time i na PV izvor električne energije, budući da im OIE predstavljaju konkurenciju, a samim time im oduzimaju i dio zarade.

Ne smiju se izostaviti subvencije za proizvodnju električne energije iz Obnovljivih izvora energije (OIE), koje variraju u odnosu na cijeli svijet, budući da se za svaku državu u svijetu te subvencije (tarife) donose zasebno. Usprkos imperativu stimuliranja proizvodnje PV energije, u posljednje vrijeme se događa da veliki broj zemalja ima tendenciju smanjenja ili čak i ukidanja subvencija. Također se u Europskoj Uniji planiraju ukinuti subvencije, što se objašnjava time da su se troškovi ulaganja u određene obnovljive izvore energije dosta smanjili posljednjih godina i da znatne subvencije za tu vrstu energije izazivaju ozbiljne poremećaje na tržištu i povećavaju cijenu električne energije za potrošače. Potencijalnu opasnost predstavljaju i prijedlozi o smanjenju prodajnih cijena električne energije iz OIE u dogledno vrijeme, što podupiru vladajuća tijela brojnih zemalja u svijetu.

7.2. Zaključci

7.2.1. Koncept i primjena

Koncept korištenja solarne fotonaponske (PV) energije u Urbanom Vodoopskrbnom Sustavu (UVODS), pri čemu je nastao Energetski Održivi Urbani Vodoopskrbni Sustav (EOUVS) ima opravdanu primjenu. Time UVODS postaje "Zeleni urbani vodoopskrbni sustav". Također je pokazano da je EOUVS održiv u energetskom i hidrauličkom smislu. Pri tome je ulazna Sunčeva energija besplatna i neiscrpna. Prikazani rezultati pokazuju da je dobiveno rješenje pouzdano i da može kontinuirano opskrbljivati Glavnu Crpnu Stanicu (GCS) sa električnom energijom, odnosno urbanu sredinu (naselje) sa vodom. Korištenjem prikazanog koncepta poboljšavaju se dosadašnji (uobičajeni) načini funkcioniranja UVODS-a, odnosno korištenja električne energije iz podsustava PV za pogon UVODS-a.

Predloženo rješenje može se koristiti kao samostalni sustav ili u kombinaciji sa električnom energijom iz klasične elektroenergetske mreže, koja proizvodi električnu energiju iz klasičnih (konvencionalnih) izvora. Iz navedenoga je vidljivo da analizirano rješenje može biti vrlo korisno i primjenjivo u svim situacijama gdje je korištenje električne energije iz elektroenergetskog sustava ograničeno ili čak spriječeno u potpunosti, kao što su izolirana područja, otoci ili

pustinjska područja. Ovo rješenje može se primijeniti kod novih, kao i kod djelomično ili potpuno izgrađenih vodoopskrbnih sustava.

Prikazano rješenje također se može u potpunosti i/ili djelomično koristiti i u kombinaciji sa unutarnjim i/ili vanjskim Obnovljivim Izvorima Energije (OIE). Jasno je da postoji cijeli raspon mogućih kombinacija primjene EOUVS-a, pri čemu će odabrano rješenje ovisiti o značajkama samog problema koji se analizira i u konačnici rješava. U svakom slučaju, predloženi i opisani koncept EOUVS-a omogućava sustavnu održivost gradova, odnosno okruženje koje formira "pametne gradove - Smart Cities". Osim pouzdane i kontinuirane opskrbe vodom, EOUVS povećava ekološku i društvenu korist užoj i široj društvenoj zajednici koja se nalazi unutar urbane sredine.

7.2.2. Ulazne pretpostavke i metodologija

Analiza provedena na hipotetskom primjeru EOUVS-a pokazala je da je takav sustav ostvariv i održiv. Također je pokazano da su ulazne pretpostavke ispunjene i da opisana Metoda Kritičnog Perioda (MKP) omogućava održivost EOUVS-a. MKP se pokazala inovativnom u znanstvenom pogledu, te primjenjivom u inženjerskom pogledu. MKP, odnosno uvođenje i definiranje perioda bilanciranja, triju kritičnih dana i dvaju načina formiranja vremenskih serija predstavljaju znanstveni i inženjerski doprinos ove disertacije jer omogućavaju postizanje sustavne održivosti UVODS-a pokretanog Solarnom Fotonaponskom (PV) energijom. Pokazano je da vodosprema, uz svoju uobičajenu hidrauličku ulogu, ima i energetsku ulogu jer ona preko funkcionalne zavisnosti (veze) sa PV generatorom i invertorom predstavlja spremnik energije, te se izborom veličine spremnika može utjecati na izvor energije.

7.2.3. Period bilanciranja

Pokazano je da se produljenjem perioda bilanciranja t_b od jednog dana pa do pet dana povećava pouzdanost rada EOUVS, jer se smanjuje mogućnost utjecaja odstupanja vrijednosti pojedinih članova ulaznih (zadanih) vremenskih serija. Također je pokazano da se produljenjem perioda bilanciranja uspostavlja funkcionalna (eksponencijalna) zavisnost između potrebne veličine podsustava PV (snage PV generatora i invertora $P_{el,PV}$) i veličine podsustava V (operativnog volumena vodospreme V_{op}), što omogućava širu analizu mogućih rješenja.

7.2.4. Kritični period za dimenzioniranje podsustava PV (PV generator i invertor), podsustava CS (Crpna Stanica) i podsustava V (Vodosprema)

Novitet, odnosno razlika između dosadašnjeg načina dimenzioniranja klasičnog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava (UVODS-a) i načina dimenzioniranja prikazanog i analiziranog Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava (EOUVS-a) je u tome što se umjesto jednog kritičnog perioda, koji se odnosi na maksimalnu dnevnu potrošnju vode, $t^*_{klasika(i)}$, u EOUVS-u razmatraju tri kritična perioda. To su kritični period (periodi) za dimenzioniranje podsustava PV, $t^*_{Pel(i)}$, podsustava CS, $t^*_{CS(i)}$ i podsustava V, $t^*_{Vop(i)}$, pri čemu je svaki od njih određen s obzirom na period (periode) bilanciranja t_b.

7.2.5. Formiranje vremenskih serija

Opisana su dva načina formiranja vremenskih serija, MKP-1 i MKP-2, s obzirom na periode bilanciranja t_b. Kod prvog načina, MKP-1, nove vremenske serije formiraju se kao skup od t_b dana pri čemu ne dolazi do preklapanja tih skupova. Kod drugog načina, MKP-2, nove vremenske serije formiraju se na način u kojem se takvi skupovi pomiču za jedan dan, dakle dolazi do preklapanja skupova. Pokazano je da je drugi način, MKP-2, prihvatljiviji i samim time pogodniji jer se novi članovi vremenskih serija formiraju tako da se eventualna odstupanja članova zadanih vremenskih serija smanjuju zbog preklapanja pojedinih perioda tijekom formiranja novih serija. Time se postiže kontinuitet dobivanja vrijednosti članova novih vremenskih serija. Kod MKP-1 to nije slučaj jer se kod njega nove vremenske serije formiraju bez tih preklapanja, čime ne dolazi do kontinuiteta dobivanja novih članova serija. Pokazano je da primjena pojedinog načina formiranja vremenskih serija ima utjecaj na dobivene rezultate.

7.3. Smjernice za daljnja istraživanja

Ova disertacija nema cilj, a niti mogućnost da cjelokupno istraži integriranje Obnovljivih Izvora Energije (OIE) u Urbani Vodni Sustav (UVS). Napravljena su osnovna istraživanja na temelju kojih je moguće nastaviti sa daljnjim istraživanjem ove problematike.

U daljnjim istraživanjima planira se istražiti moguća integracija vanjskih i unutarnjih izvora energije prvo u Urbanom Vodoopskrbnom Sustavu (UVODS-u), a zatim i u UVS-u. Ujedno bi se

istražili energetski, kao i hidraulički problemi u UVODS-u i UVS-u, te utvrdilo na koji način ih riješiti. Analiziralo bi se na koji način i u kojoj mjeri klimatske promjene utječu na UVS.

U konačnici, istraživalo bi se uklapanje Energetski Održivog Urbanog Vodoopskrbnog Sustava (EOUVS-a) u problematiku održivosti velikih urbanih sredina (velikih gradova), kao i moguće interakcije koje bi time nastale.

8. BIBLIOGRAFSKE JEDINICE

[A1] ABB Sace, (2010.): Technical Application Papers No.10, Photovoltaic plants, 2010.

[A2] Allianze to save energy, (2002.): Watergy: http://www.ase.org/projects/watergy, datum pristupa 10.12.2013.

[A3] Allianze to save energy, (2007.): WATERGY: Energy and Water Efficiency in Municipal Water Supply and Wastewater Treatment, Cost-Effective Savings of Water and Energy. Washington, SAD.

[B1] Badescu, V., (2003.): Time dependent model of a complex PV water pumping system. Renewable Energy, 28(4): 543-560.

[B2] Bakelli, Y., Hadj-Arab, A. Azoui, B., (2011.): Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept. Solar Energy, 85(2): 288-294.

[B3] Bouzidi, B., Haddadi, M., Belmokhtar, O., (2009.): Assessment of a photovoltaic pumping system in the areas of the Algerian Sahara. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(4): 879-886.

[B4] Brandt, M., Middleton, R., Wheale, G., Frans Schulting, F., (2011.): Energy efficiency in the water industry, a global research project, Water Practice & Technology, 6(2): 1-15.

[C1] Cabrera, E., Pardo, M., Cobacho, R., Cabrera, E., Jr., (2010.): Energy Audit of Water Networks. Journal of water resources planning and management, 136(6): 669-677.

[C2] Campoccia, A., Dusonchet, L., Telaretti, E., 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.

[C3] Carbon Tax Center, New York, SAD, http://www.carbontax.org/, datum pristupa: 12.3.2014.

[C4] Chankong, V.; Haimes, Y., (1983.): Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology, 1. Izdanje, Elsevier - North Holland, Washington, USA.

[C5] Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., Ding, Y., (2009.): Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural Science, 19(3): 291-312.

[C6] Coelho, B., Andrade-Campos, A., (2014.): Efficiency achievement in water supply systems-A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30: 59-84.

[C7] Commission Of The European Communities, (2006.): GREEN PAPER, A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy, Brisel, Belgija.

[D1] Darling, S. B., You, F., Veselka, T., Velosa, A., (2011.): Assumptions and the levelized cost of energy for photovoltaics, Energy & Environmental Science, 4, 3133-3139.

[D2] Daud, A.-K., Mahmoud, M. M., (2005.): Solar powered induction motor-driven water pump operating on a desert well, simulation and field tests. Renewable Energy, 30(5): 701-714.

[D3] de Wild-Scholten, M. J., (2013.): Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems. Solar Energy Materials and Solar Cells, 119: 296-305.

[D4] District of Columbia Water and Sewer Authority, About Drinking Water Quality in Washington D.C., Washington, SAD, http://www.dcwater.com/drinking_water/about.cfm, datum pristupa 3. 7. 2013.

[D5] Državni hidrometeorološki zavod Hrvatske (DHMZ), (2007.): Klimatski podaci za Palagružu Komižu - od 1995. do 2006. godine, Zagreb, Hrvatska.

[E1] Ebaid, M. S. Y., Qandil, H., Hammad, M., (2013.): A unified approach for designing a photovoltaic solar system for the underground water pumping well-34 at Disi aquifer. Energy Conversion and Management, 75: 780-795.

[E2] Escudero-Pascual, A., (2005.): Sizing of standalone PV systems based on the "worst month" method, u: Manual de Energía Solar Fotovoltaica y Cooperación al Desarrollo, 1998. Engineering without Borders (Spanish Federation).

[E3] European Commission, (2009.): Directive 2009/29/EC, Brisel, Belgija.

[E4] European Commission, (2014.): 2030 framework for climate and energy policies, Brisel, Belgija.

[E5] European Renewable Energy Council (EREC), (2010.): Renewable energy in Europe: markets, trends, and technologies, Bruxelles, Belgija.

[E6] European Small Hydropower Association (ESHA), Mini-hydraulics laboratory (MHYLAB), (2010.): Energy Recovery in Existing Infrastructure with Small Hydropower Plants: Multipurpose Schemes-Overview and Examples.

[F1] Farhar, B., Coburn, T. A., (2000.): Market assessment of residential grid-tied PV system in Colorado. National Renewable Energy Laboratory, Washington, SAD.

[F2] Feldman, M., (2009.): Aspects of energy efficiency in water supply systems, u Proceeedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference 2009., Cape Town, Južnoafrička Republika.

[F3] Firatoglu, Z. A., Yesilata, B., (2004.): New approaches on the optimization of directly coupled PV pumping systems. Solar Energy, 77(1): 81-93.

[F4] Four Peaks Technologies, Inc. - Solar electricity costs, Scottsdale, SAD, http://solarcellcentral.com/cost_page.html, datum pristupa 2.1.2014.

[G1] Ghoneim, A. A., (2006.): Design optimization of photovoltaic powered water pumping system. Energy Conversion and Management, 47(11-12): 1449-1463.

[G2] Glasnović, Z., Margeta, J. (2011.): Vision of total renewable electricity scenario. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(4): 1873-1884.

[G3] Global Energy Network Institute (GENI), (2011.): Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies, San Diego, SAD.

[G4] Goetzberger, A, Luther, J., Willeke, G., (2002.): Solar cells: past, present, future. Solar Energy Materials & Solar Cells, 74(1-4): 1-11.

[G5] Gomes, H. P. Pumping systems: energy efficiency. (2009.): Editora Universitária UFPB, Paraiba, Brazil. (izvornik - na portugalskom jeziku).

[G6] Groumpos, P. P., Papageorgiou, G., (1987.): An optimal sizing method for stand-alone photovoltaic power systems. Solar Energy, 38(5): 341-351.

[H1] Hadj Arab, A., Chenlo, F., Benghanem, M., (2004.): Loss-of-load probability of photovoltaic water pumping systems. Solar Energy, 76(6): 713-723.

[H2] Hadj Arab, A., Chenlo, F., Mukadam, K., Balenzategui, J. L., (1999.): Performance of PV water pumping systems. Renewable Energy, 18(2): 191-204.

[H3] Hamidat, A., Benyoucef, B., (2008.): Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems. Renewable Energy, 33(5): 933-942.

[H4] Hamidat, A., Benyoucef, B., (2009.): Systematic procedures for sizing photovoltaic pumping system, using water tank storage. Energy Policy, 37(4): 1489-1501.

[H5] Hammad, M. A., (1999.): Characteristics of solar water pumping in Jordan. Energy, 24(2): 85-92.

[H6] Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., Lo, K., (2010.): Global surface temperature change, Reviews of Geophysics, (48)RG4004: 1-29.

[H7] Hidroing, d.o.o., (2004.): Regionalni vodoopskrbni sustav: Neretva, Pelješac, Korčula, Lastovo, Mljet, Novelacija pred-investicijskog programa. Split, Croatia.

[H8] Hiessl, H., Walz, R., Toussaint, D., (2001.): Design and Sustainability Assessment of Scenarios of Urban Water Infrastructure Systems: 119-120, u: Herder, P. M., Thissen, W.A.H., Final Programme & Book of Abstracts of "5th International Conference on Technology, Policy and Innovation: Critical Infrastructures, Delft, Nizozemska, 2001.

[H9] Hrvatska Energetska Regulatorna Agencija (HERA), (2013.): Metodologija za određivanje iznosa tarifnih stavki za opskrbu električnom energijom u okviru univerzalne usluge. Zagreb, Hrvatska.

[H10] Hrvatske Vode, d.d., (2008.): Vodoopskrbni plan splitsko-dalmatinske županije, Split, Hrvatska.

[I1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007.): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Velika Britanija; New York, SAD.

[I2] International Rivers, Berkeley, SAD, (2013.): http://www.internationalrivers.org/resources/greenhouse-gas-emissions-from-dams-faq-4064, datum pristupa: 14.1.2014.

[J1] Jafar, M., (2000.): A model for small-scale photovoltaic solar water pumping. Renewable Energy, 19(1-2): 85-90.

[K1] Kenna, J., Gillett, B., (1985.): Solar Water Pumping: A Handbook. 1. izdanje., Intermediate Technology Publications, London, Velika Britanija.

[K2] Kerr, R. A., (2012.): An oil gusher in the offing, but will it be enough?. Science, 338(6111): 1139.

[K3] Kim, R., (2011.): Eco-efficient Water Infrastructure in the Context of Urban Planning, u 3rd Asia-Pacific Mayor's Forum on Environmentally Sustainable Urban Infrastructure, Suncheon City, Republika Koreja.

[K4] Kolhe, M., Joshi, J. C., Kothari, D. P., (2004.): Performance Analysis of a Directly Coupled Photovoltaic Water-Pumping System. IEEE Transactions On Energy Conversion, 19(3): 613-618.

[K5] Kucukaly, S., (2011.): Water supply lines as a source of small hydropower in Turkey: A Case study in Edremit, in: Linköping Electronic Conference Proceedings, Volume 6, Hydropower Applications, World Renewable Energy Congress - Sweden: 1400-1407.

[L1] Lenzi, C., Bragalli, C., Bolognesi, A., Artina, S., (2013.): From energy balance to energy efficiency indicators including water losses. Water Science & Technology: Water Supply, 13(4): 889-895.

[M1] Malus, D., Vouk, D., Grljak, A., (2011.): Primjena Pravilnika o hidrantskoj mreži za gašenje požara u ruralnim područjima. Građevinar, 63(11): 953-960.

[M2] Margeta, J., (1993.): Uvod u sistemsko inženjerstvo u projektiranju i upravljanju volumenima akumulacija, 1. izdanje, Građevinski fakultet Split, Split, Hrvatska.

[M3] Margeta, J., (2010.): Vodoopskrba naselja: planiranje, projektiranje, upravljanje, obrada vode, 1. izdanje, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split, Hrvatska.

[M4] Margeta, J., Glasnović, Z., (2011.): Exploitation of temporary water flow by hybrid PV-hydroelectric plant. Renewable Energy, 36(8): 2268-2277.

[M5] Margeta, J., Glasnović, Z., (2010.): Feasibility of the green energy production by hybrid solar + hydropower system in Europe and similar climate areas. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(6), 1580-1590.

[M6] Margeta, J., Glasnović, Z., (2012.): Theoretical settings of photovoltaic-hydro energy system for sustainable energy production. Solar Energy, 86(3), 972-982.

[M7] Martínez-Duart, J. M., Hernández-Moro, J., (2013.): Commentary: Photovoltaics firmly moving to the terawatt scale, Journal of Nanophotonics, 7(1): 1-4.

[M8] Matić, Z., (2007.): Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske, Energetski institut "Hrvoje Požar", Zagreb, Hrvatska.

[M9] Meah, K., Fletcher, S., Ula, S., (2008.): Solar photovoltaic water pumping for remote locations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(2): 472-487.

[M10] Ministarstvo Unutarnjih Poslova (MUP), (2006.): Pravilnik o hidrantskoj mreži za gašenje požara. Narodne Novine (NN), 8/2006.

[M11] Mo, W., Nasiri, F., Eckelman, M. J., Zhang, Q., Zimmerman, J. B., (2010.): Measuring the Embodied Energy in Drinking Water Supply Systems: A Case Study in The Great Lakes Region, Environmental Science & Technology, 44 (24): 9516–9521.

[M12] Moodia - the price research company, London, Velika Britanija. http://www.moodia.com/article/stc-vs-ptc-power-ratings-solar-panels, datum pristupa 7.12.2013.

[N1] National Renewable Energy Laboratory (NREL), (1995.): A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies, Colorado, SAD.

[N2] National Renewable Energy Laboratory (NREL), (2011.): FEMP Commercial Electricity Cost Escalation Rates for 25-Year Analysis for 2013.

[N3] Nazif, S., Karamouz, M., Tabesh, M., Moridi, A., (2010.): Pressure Management Model for Urban Water Distribution Networks, Water Resources Management, 24(3): 437-458.

[O1] Odeh, I., Yohanis, Y. G., Norton, B., (2006.): Influence of pumping head, insolation and PV array size on PV water pumping system performance. Solar Energy, 80(1): 51-64.

[O2] Olmstead, S. M., (2013.): Climate change adaptation and water resource management: A review of the literature. Energy Economics, (in press).

[O3] Omer, A. M., (2001.): Solar water pumping clean water for Sudan rural areas. Renewable Energy, 24(2): 245-258.

[O4] Ould-Amrouche, S., Rekioua, D., Hamidat, A., (2010.): Modelling photovoltaic water pumping systems and evaluation of their CO_2 emissions mitigation potential. Applied Energy, 87(11): 3451-3459.

[P1] Parkin, S., Sommer, F., Uren, S., (2003.): Sustainable development: understanding the concept and practical challenge. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Engineering Sustainability 156: 19-26.

[P2] Penstar Ltd., (2012.): Price book. Cardigan, Velika Britanija.

[P3] Perrone, D., Murphy, J., Hornberger, G. M., (2011.): Gaining Perspective on the Water-Energy Nexus at the Community Scale. Environmental Science & Technology, 45(10): 4228–4234.

[P4] Physics Stack Exchange, New York, SAD, http://physics.stackexchange.com/questions/65682/given-mean-insolation-can-one-place-an-upper-bound-on-the-daily-peak-insolation, datum pristupa: 17.12.2013.

[P5] Practical action, (2010.): Solar (photovoltaic) water pumping. 2. izdanje, Rugby, Velika Britanija.

[R1] Ramos, H. M., Mello, M., De, P. K., (2010.): Clean power in water supply systems as a sustainable solution: from planning to practical implementation, Water Science & Technology: Water Supply, (10)1: 39-49.

[R2] Ramos, H. M., Vieira, F., (2009.): Environmental hybrid solution for energy optimization in water supply systems, u: Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, Tsinghua University Press, Peking, Kina.

[R3] Ramos, J. S., Ramos, H. M., (2009.): Sustainable application of renewable sources in water pumping systems: Optimized energy system configuration, Energy Policy, 37(2): 633-643.

[R4] Rashid, M. H., (2001.): Power Electronics Handbook. Academic Press, London, Velika Britanija.

[S1] Service, R.F., (2013.): Space Solar Cells With a Down-to Earth Cost. Science, 339(6115): 21.

[S2] Soda-Solar radiation dana, Solar Energy Services for Professionals, http://www.soda-is.com/eng/services/services_radiation_free_eng.php, datum pristupa: 4.11.2013.

[S3] SolarServer - PVX spot market price index solar PV modules, Reutlingen, Njemačka, http://www.solarserver.com/service/pvx-spot-market-price-index-solar-pv-modules.html, datum pristupa: 8.1.2014.

[S4] Soras, C., Makios, V., (1988.): A novel method for determining the optimum size of stand-alone photovoltaic systems. Solar Cells, 25(2): 127-142.

[S5] Sorensen, B., Breeze, P., Storvick, T., Shang-Tian Yang. S.-T., da Rosa, A., Gupta, H., Sukanta, R., Doble, M., Maegaard, P., Pistoia, G., Kalogirou, S., (2009.): Renewable Energy Focus Handbook, Elsevier Inc., Academic Press, Amsterdam, Nizozemska.

[S6] Stevanovic, S., Pucar, M., (2012.): Investment appraisal of a small, grid-connected photovoltaic plant under the Serbian feed-in tariff framework. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(3): 1673-1682.

[T1] Tarquin, A. J., Dawdy, J., (1989.): Optimal Pump Operation in Water Distribution. Journal of Hydraulic Engineering, 115(2): 158-168.

[T2] The National Center for Photovoltaics (NCPV). Research Cell Efficiency Records, Golden, SAD. http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg, datum pristupa: 16.4.2014.

[T3] The Priority Actions Programme Regional Activity Centre (PAP/RAC) (2007.): Integrated Coastal Urban Water System Planning in Coastal Areas of the Mediterranean - VOLUME I, Principles and Planning. Split, Hrvatska.

[U1] U.S. Department of Energy, (2010.): The Prospect for $1/Watt Electricity from Solar. $1/W Workshop, Washington, USA.

[U2] U.S. Energy Information Administration (EIA), (2013.).: The International Energy Outlook 2013. Washington, SAD.

[U3] United Nations, (2012.): Resolution adopted by the General Assembly, United Nations Conference on Sustainable Development RIO + 20, Rio de Janeiro, Brazil.

[U4] Union of Concerned Scientists, (2013.): http://www.climatehotmap.org/global-warming-effects/water-supply.html, datum pristupa: 21.11.2013.

[V1] van Sark, W. G. J. H. M., (2012.): Introduction to Photovoltaic Technology, u: Comprehensive Renewable Energy, Elsevier, Amsterdam, Nizozemska.

[V2] Varkom d.d. (2013.): Podaci o potrošnji vode za područje grada Varaždina, Varaždin, Croatia.

[V3] Vertical Research Partners: http://www.verticalresearchpartners.com/research-note.cfm/the-vertical-view-water-the-slow-drip-of-pent-up-demand, datum pristupa 20.12.2013.

[V4] Vilanova, M. R. N., Balestieri, J. A. P., (2014.): Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30: 701-714.

[W1] Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., Zhao, J.-H., (2009.): Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9): 2263-2278.

[W2] Wei, M., Patadia, S., Kammen, D. M., (2010.): Putting renewable and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US?. Energy Policy, 38(2): 919-931.

[W3] White International, (2012.): CNP industrial pumps - price list 2011, Mippera, Australia.

[Y1] Yüksel, I., (2010.): Hydropower for sustainable water and energy development, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14(4): 462-469.

[Z1] Zhai, P., Williams, E. D., (2012.): Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model. Renewable Energy, 41: 350-357.

[Z2] Zhou, Y., Zhang, B., Wang, H., Bi, J., (2013.): Drops of Energy: Conserving Urban Water to Reduce Greenhouse Gas Emissions. Environmental Science & Technology, Special Issue Design Options for More Sustainable Urban Water Environment, (47): 10753-10761.

PRILOZI

PRILOG P-1

Ulazne veličine

PRILOG P1-1: Srednja dnevna jakost Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu, E_s (kWh/m^2)

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1.61	2.48	4.30	5.17	5.60	6.29	7.18	6.27	4.76	3.92	1.87	1.60
2	1.57	2.78	3.41	4.96	6.17	7.24	7.03	6.67	4.51	3.76	2.02	1.82
3	1.85	2.72	3.99	5.04	6.50	7.13	6.80	6.49	4.64	3.34	2.26	1.51
4	1.95	2.37	4.39	5.49	6.18	7.23	6.74	6.53	4.43	3.25	2.20	1.63
5	2.25	2.59	4.11	5.40	5.82	6.89	7.11	6.54	4.00	3.10	2.14	1.41
6	1.73	2.81	4.57	5.20	6.05	6.31	6.87	6.15	4.62	3.14	1.63	1.51
7	1.51	3.10	4.08	5.86	6.42	7.25	6.47	6.26	4.10	3.46	1.79	1.65
8	1.35	2.99	4.11	5.17	6.83	6.98	6.71	6.21	4.21	2.98	2.17	1.63
9	1.49	2.58	3.64	5.07	6.08	7.18	7.48	6.45	4.24	3.38	2.21	1.13
10	1.55	2.93	4.40	4.45	7.00	6.98	7.13	6.38	4.17	3.17	1.83	1.08
11	1.43	2.62	4.19	4.46	6.01	6.45	6.90	6.18	4.62	3.51	2.03	1.34
12	1.62	2.77	4.24	5.25	6.76	6.99	7.43	5.98	4.31	3.44	1.87	1.45
13	1.75	2.90	3.88	5.36	7.11	6.49	7.63	6.34	4.00	3.74	1.93	1.45
14	1.77	2.86	4.57	4.87	6.70	7.03	7.54	6.34	4.10	3.25	2.01	1.21
15	1.94	2.56	3.76	5.25	6.59	7.25	7.41	6.45	4.33	3.27	1.85	1.08
16	2.13	2.58	3.87	4.45	6.46	6.81	7.62	6.32	3.92	3.63	1.54	1.43
17	1.79	2.89	4.72	5.17	6.48	6.81	7.33	6.53	3.68	3.71	2.04	0.93
18	1.65	3.47	4.36	5.36	6.16	6.96	7.59	6.25	3.89	3.21	2.11	1.53
19	1.78	2.91	4.42	6.21	6.13	6.49	7.43	5.77	4.17	3.21	1.74	1.58
20	1.90	3.08	4.17	5.35	6.10	6.80	7.45	5.94	4.33	2.85	2.10	1.20
21	1.51	3.00	4.51	5.61	6.50	7.37	7.75	5.59	4.17	3.03	1.81	1.17
22	1.72	2.74	4.58	5.47	6.52	6.43	7.82	6.07	4.37	3.16	1.76	1.74
23	1.67	2.71	3.98	5.41	6.46	7.28	7.25	6.75	4.04	3.47	1.59	1.44
24	1.59	2.82	4.16	5.28	6.87	7.49	6.69	6.65	4.13	2.75	1.81	1.60
25	2.00	2.68	4.22	5.54	6.68	7.05	6.91	5.91	3.95	3.53	1.81	1.21
26	2.09	3.19	4.41	5.35	6.89	7.42	7.10	6.04	3.91	3.33	1.84	1.23
27	1.96	2.81	4.69	4.69	7.06	7.60	7.63	5.97	4.13	3.31	1.63	1.04
28	1.79	3.01	4.16	3.96	6.58	7.23	7.18	5.69	4.09	3.29	1.78	1.19
29	1.81	3.17	4.61	5.22	6.57	6.81	7.10	5.70	4.27	2.89	1.93	1.03
30	1.82	-	4.43	4.44	7.32	7.22	7.12	5.68	4.13	2.69	1.65	1.19
31	1.75	-	4.52	-	6.85	-	7.45	5.15	-	2.54	-	1.08

PRILOG P1-2: Srednje dnevno trajanje jakosti Sunčevog zračenja, T_s (h)

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	3	4	7	8	7	8	12	11	10	9	4	4
2	3	6	5	7	9	11	11	12	9	8	5	5
3	4	5	6	7	10	10	10	11	10	7	6	4
4	5	4	7	8	9	11	10	12	9	6	6	4
5	6	5	7	8	8	10	11	12	8	6	5	4
6	4	6	8	8	8	8	11	11	10	6	3	4
7	3	7	6	9	9	11	9	11	8	7	4	5
8	3	7	7	8	11	10	10	11	8	6	5	4
9	3	5	5	7	8	11	13	11	9	7	6	2
10	3	6	7	6	11	10	11	11	8	6	4	2
11	3	5	7	6	8	9	11	11	10	7	5	3
12	4	6	7	8	10	10	12	10	9	7	4	4
13	4	6	6	8	11	9	13	11	8	8	4	4
14	4	6	8	7	10	10	13	11	8	6	5	3
15	5	5	6	8	10	11	12	11	9	6	4	2
16	5	5	6	6	10	10	13	11	7	8	3	4
17	4	6	8	8	10	10	12	12	7	8	5	2
18	4	9	7	8	9	10	13	11	7	6	5	4
19	4	6	7	10	9	9	12	10	8	6	3	4
20	5	7	7	8	9	10	12	10	9	5	5	3
21	3	7	8	9	10	11	13	9	8	6	4	3
22	4	6	8	8	10	9	14	10	9	6	4	5
23	4	5	6	8	10	11	12	12	8	7	3	4
24	3	6	7	8	11	11	10	12	8	5	4	4
25	5	5	7	9	10	10	11	10	7	7	4	3
26	5	7	7	8	11	11	11	10	7	7	4	3
27	5	6	8	6	11	12	13	10	8	7	3	2
28	4	7	7	5	10	11	12	9	8	7	4	3
29	4	7	8	8	10	10	11	9	9	5	4	2
30	4	-	7	6	12	11	11	9	8	5	3	3
31	4	-	8	-	11	-	12	8	-	4	-	2

PRILOG P1-3: Srednja dnevna temperatura zraka, T_a (°C)

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	11.7	8.5	9.5	13.4	17.2	20.6	26.1	26.2	22.8	19.8	17.6	12.2
2	11.3	8.1	9.6	13.5	17.9	20.5	26.3	26.8	22.9	20.1	16.4	12.5
3	11.3	9.8	10.8	14.3	18.4	20.7	26.8	26.4	23.0	20.5	15.9	12.7
4	10.5	10.3	11.8	13.7	18.1	21.0	25.3	26.6	22.6	20.7	15.8	13.2
5	10.2	9.2	11.0	13.5	17.6	21.7	25.8	26.1	22.7	20.1	15.5	12.7
6	10.6	8.6	9.2	13.8	17.8	22.2	25.6	26.1	21.8	19.8	15.7	12.2
7	10.5	9.2	9.7	12.6	17.8	22.9	26.6	26.1	22.2	20.3	15.2	10.7
8	10.5	9.2	10.1	12.6	18.6	22.7	25.8	25.9	22.6	19.6	15.4	11.0
9	10.8	9.6	10.5	12.8	18.5	23.5	24.5	26.4	22.2	19.8	14.7	12.0
10	10.7	9.4	10.5	13.5	18.6	23.5	24.7	27.0	21.1	19.8	15.1	12.1
11	10.7	9.2	10.3	13.6	18.7	24.1	24.6	27.1	21.9	20.1	14.9	11.9
12	10.1	9.2	11.4	13.2	19.4	23.7	24.7	26.5	22.6	19.1	15.7	12.3
13	9.5	9.6	11.9	13.2	18.8	23.3	25.4	25.6	22.3	19.0	14.6	11.9
14	9.8	9.3	11.2	12.1	19.4	23.0	25.3	25.5	21.2	18.9	14.3	12.1
15	8.7	9.0	11.0	13.4	19.0	23.7	25.6	25.3	20.9	18.6	14.6	12.0
16	9.0	8.9	11.9	13.9	18.9	23.2	25.5	25.7	21.0	17.8	14.4	10.5
17	9.8	9.4	11.8	14.2	19.1	23.9	24.6	25.8	21.2	16.9	14.9	10.5
18	10.3	9.0	11.6	13.8	19.5	22.9	25.5	26.2	21.1	16.6	13.3	10.3
19	10.2	9.9	11.8	14.6	19.9	23.8	25.9	26.1	20.8	17.3	11.9	10.5
20	9.5	10.6	11.4	14.8	19.5	23.6	25.9	26.3	21.4	17.9	11.1	10.6
21	10.3	10.5	11.2	15.2	19.6	24.5	25.5	25.3	20.9	18.8	11.1	9.9
22	9.1	10.3	11.2	15.3	19.4	24.2	26.2	24.7	20.9	18.0	11.7	9.7
23	8.9	10.1	10.9	15.3	20.0	24.1	26.5	25.3	20.9	17.6	12.0	9.4
24	8.5	10.2	12.3	15.4	20.0	24.0	27.1	25.8	21.0	17.0	12.0	9.5
25	8.4	9.8	13.1	15.5	19.8	23.9	26.5	25.4	20.4	16.9	11.8	11.0
26	9.3	10.5	13.4	16.3	20.6	24.3	26.5	24.3	20.3	16.7	12.9	11.4
27	9.0	9.6	13.2	16.4	21.6	24.8	27.1	24.7	19.9	16.5	13.4	10.6
28	9.3	9.2	12.4	16.2	22.3	25.9	27.3	24.5	19.7	16.4	12.7	10.0
29	9.4	9.3	12.3	16.6	21.4	26.4	26.3	23.8	19.9	17.3	12.5	10.0
30	8.5	-	12.7	17.0	21.5	25.3	26.0	23.3	19.4	17.1	12.9	9.5
31	8.5	-	13.1	-	20.9	-	26.1	22.9	-	17.1	-	10.3

PRILOG P1-4: Srednja dnevna temperatura solarne ćelije, T_{cel} (°C)

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	16.0	15.2	21.1	27.3	32.3	37.6	45.5	43.2	35.6	30.4	22.6	16.5
2	15.5	15.6	18.9	26.9	34.6	40.1	45.3	44.8	35.1	30.3	21.9	17.5
3	16.3	17.1	21.5	28.0	35.9	39.9	45.2	44.0	35.5	29.5	22.0	16.8
4	15.8	16.7	23.6	28.6	34.8	40.5	43.5	44.2	34.5	29.5	21.7	17.6
5	16.3	16.2	22.1	28.1	33.3	40.3	45.0	43.7	33.5	28.5	21.3	16.5
6	15.3	16.2	21.5	27.8	34.2	39.3	44.1	42.7	34.2	28.2	20.1	16.3
7	14.6	17.6	20.7	28.5	35.1	42.4	44.1	43.0	33.3	29.6	20.0	15.2
8	14.2	17.3	21.2	26.6	37.1	41.5	43.9	42.7	34.0	27.7	21.2	15.4
9	14.9	16.6	20.3	26.4	34.9	42.8	44.7	43.8	33.6	28.9	20.7	15.0
10	14.9	17.3	22.4	25.5	37.5	42.3	43.9	44.3	32.4	28.4	20.1	15.0
11	14.6	16.2	21.7	25.6	35.0	41.5	43.3	43.7	34.4	29.6	20.4	15.5
12	14.5	16.7	22.8	27.4	37.7	42.5	44.7	42.7	34.3	28.4	20.8	16.2
13	14.2	17.4	22.4	27.7	38.0	40.8	46.0	42.7	33.0	29.1	19.8	15.8
14	14.5	17.0	23.6	25.3	37.5	42.0	45.7	42.6	32.2	27.7	19.7	15.4
15	14.0	15.9	21.2	27.5	36.8	43.2	45.6	42.7	32.6	27.4	19.6	15.0
16	14.7	15.9	22.4	25.9	36.3	41.6	46.0	42.8	31.6	27.6	18.6	14.4
17	14.6	17.2	24.5	28.1	36.6	42.3	44.4	43.4	31.1	26.9	20.4	13.0
18	14.7	18.3	23.4	28.3	36.1	41.7	46.0	43.1	31.6	25.2	19.0	14.4
19	15.0	17.8	23.7	31.4	36.4	41.3	45.9	41.6	32.1	26.0	16.6	14.8
20	14.7	18.9	22.6	29.2	36.0	41.9	46.0	42.3	33.0	25.6	16.7	13.8
21	14.3	18.6	23.4	30.3	37.1	44.4	46.4	40.4	32.2	26.9	16.0	13.1
22	13.8	17.8	23.5	30.1	37.0	41.6	47.3	41.1	32.7	26.5	16.4	14.4
23	13.4	17.4	21.6	29.9	37.4	43.7	46.0	43.5	31.9	27.0	16.3	13.3
24	12.8	17.8	23.5	29.7	38.5	44.3	45.2	43.8	32.1	24.4	16.9	13.8
25	13.8	17.0	24.5	30.4	37.8	42.9	45.2	41.4	31.0	26.4	16.7	14.3
26	15.0	19.1	25.3	30.7	39.2	44.3	45.6	40.6	30.9	25.6	17.9	14.7
27	14.3	17.2	25.8	29.1	40.7	45.3	47.7	40.9	31.1	25.4	17.8	13.4
28	14.2	17.3	23.6	26.9	40.1	45.4	46.7	39.8	30.7	25.3	17.5	13.3
29	14.3	17.9	24.8	30.7	39.1	44.8	45.5	39.2	31.5	25.1	17.7	12.7
30	13.4	-	24.7	29.0	41.3	44.8	45.3	38.7	30.5	24.4	17.4	12.7
31	13.2	-	25.3	-	39.4	-	46.2	36.8	-	24.0	-	13.2

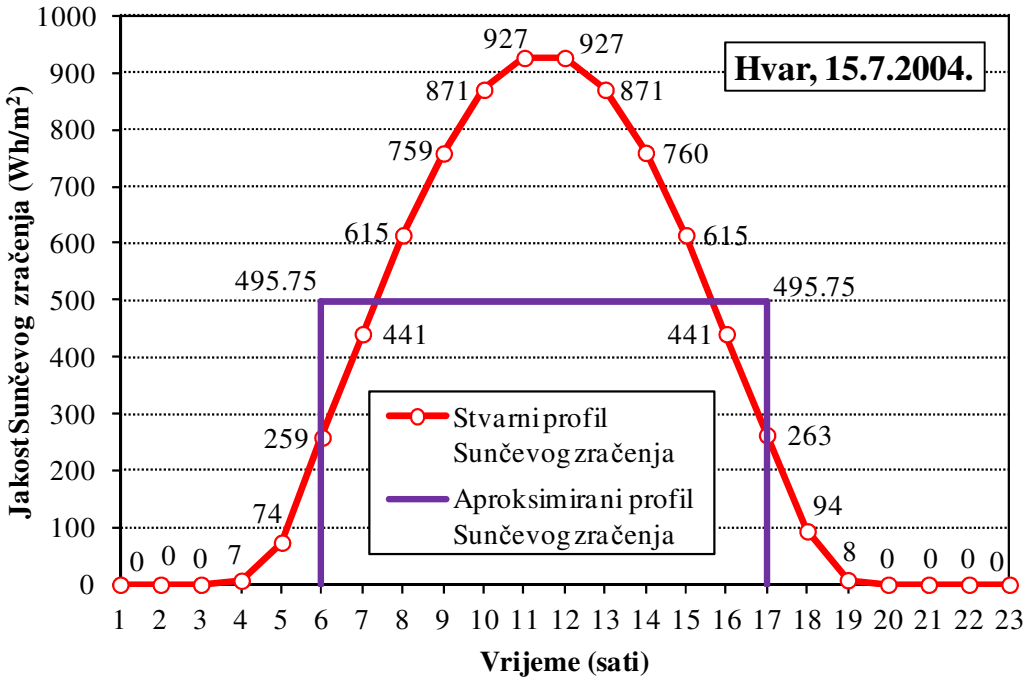
PRILOG P1-5: Dnevne potrebne količine vode, V_{dnev} (m^3)

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	676	678	723	869	1575	1703	2104	2366	2351	1897	1178	1036
2	676	679	727	893	1579	1716	2113	2366	2337	1874	1174	1024
3	676	681	731	916	1583	1729	2121	2366	2322	1851	1170	1012
4	676	682	735	939	1586	1743	2129	2366	2308	1828	1165	1001
5	676	684	739	963	1590	1756	2138	2366	2294	1805	1161	989
6	676	685	743	986	1594	1769	2146	2366	2279	1782	1157	978
7	676	687	747	1010	1598	1782	2155	2366	2265	1759	1152	966
8	676	688	751	1033	1601	1795	2163	2366	2251	1736	1148	954
9	676	690	755	1057	1605	1808	2172	2366	2236	1713	1144	943
10	676	692	759	1080	1609	1821	2180	2366	2222	1690	1139	931
11	676	693	763	1103	1612	1834	2188	2366	2208	1667	1135	920
12	676	695	767	1127	1616	1847	2197	2366	2193	1644	1131	908
13	676	696	770	1150	1620	1860	2205	2366	2179	1621	1126	896
14	676	698	774	1174	1623	1873	2214	2366	2165	1598	1122	885
15	676	699	778	1197	1627	1886	2222	2366	2150	1575	1118	873
16	676	701	782	1220	1631	1899	2231	2366	2136	1551	1113	862
17	676	702	786	1244	1635	1912	2239	2366	2122	1528	1109	850
18	676	704	790	1267	1638	1925	2247	2366	2107	1505	1104	838
19	676	706	794	1291	1642	1938	2256	2366	2093	1482	1100	827
20	676	707	798	1314	1646	1952	2264	2366	2079	1459	1096	815
21	676	709	802	1338	1649	1965	2273	2366	2064	1436	1091	804
22	676	710	806	1361	1653	1978	2281	2366	2050	1413	1087	792
23	676	712	810	1384	1657	1991	2290	2366	2036	1390	1083	780
24	676	713	814	1408	1660	2004	2298	2366	2021	1367	1078	769
25	676	715	818	1431	1664	2017	2306	2366	2007	1344	1074	757
26	676	716	821	1455	1668	2030	2315	2366	1993	1321	1070	745
27	676	718	825	1478	1672	2043	2323	2366	1978	1298	1065	734
28	676	719	829	1501	1675	2056	2332	2366	1964	1275	1061	722
29	676	722	833	1525	1679	2069	2340	2366	1950	1252	1057	711
30	676	-	837	1572	1683	2095	2349	2366	1921	1229	1048	699
31	676	-	845	-	1690	-	2366	2366	-	1183	-	676

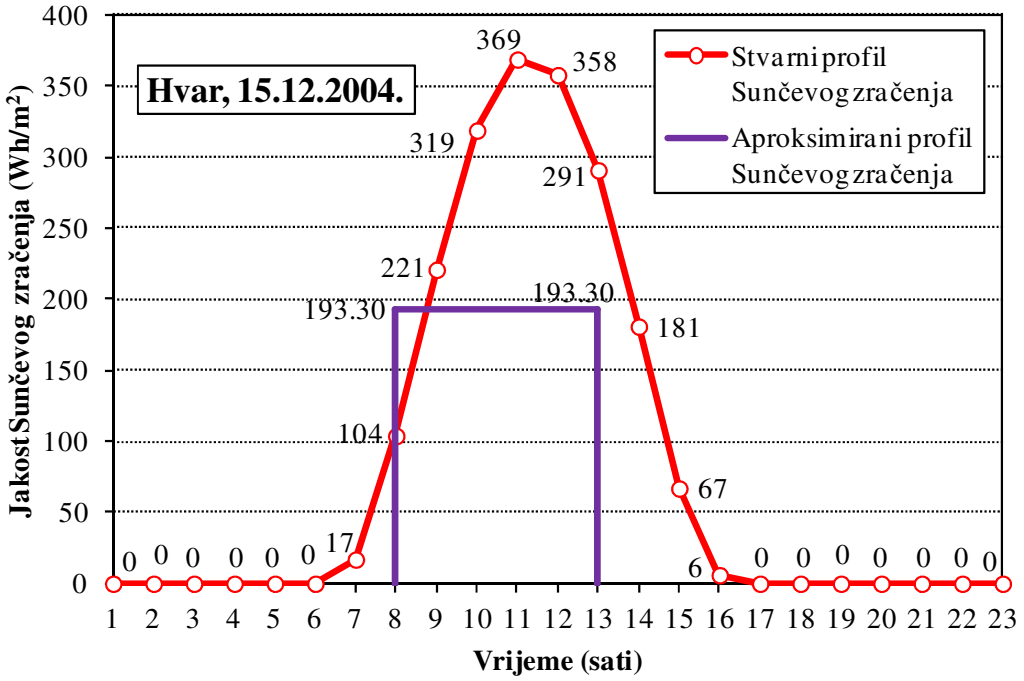
PRILOG P-2

Stvarni i aproksimirani profili Sunčevog zračenja tijekom dana

PRILOG P2-1: Stvarni i aproksimirani profili Sunčevog zračenja tijekom dana za Hvar

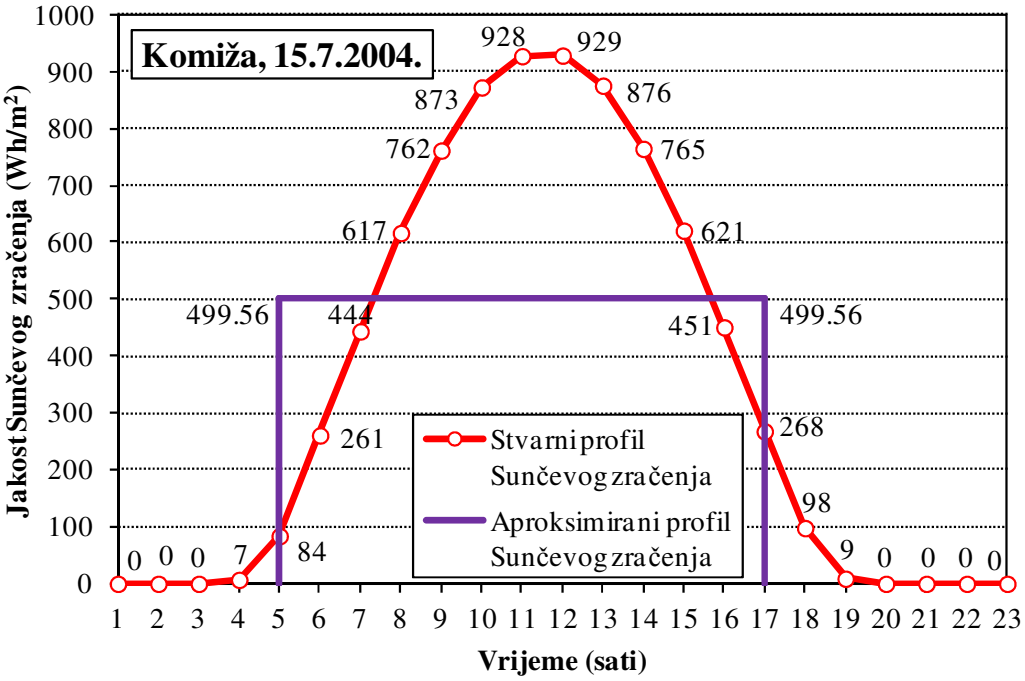


Omjer između aproksimirane (A_A) i stvarne površine (A_S) profila Sunčevog zračenja: 75 %

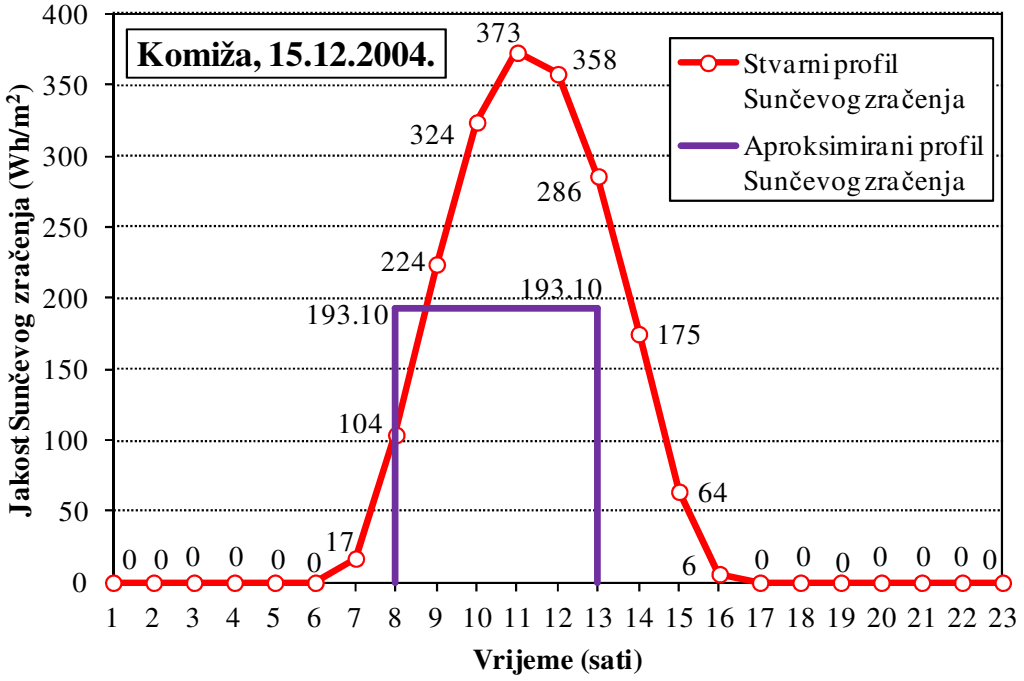


Omjer između aproksimirane (A_A) i stvarne površine (A_S) profila Sunčevog zračenja: 50 %

PRILOG P2-2: Stvarni i aproksimirani profili Sunčevog zračenja tijekom dana za Komižu

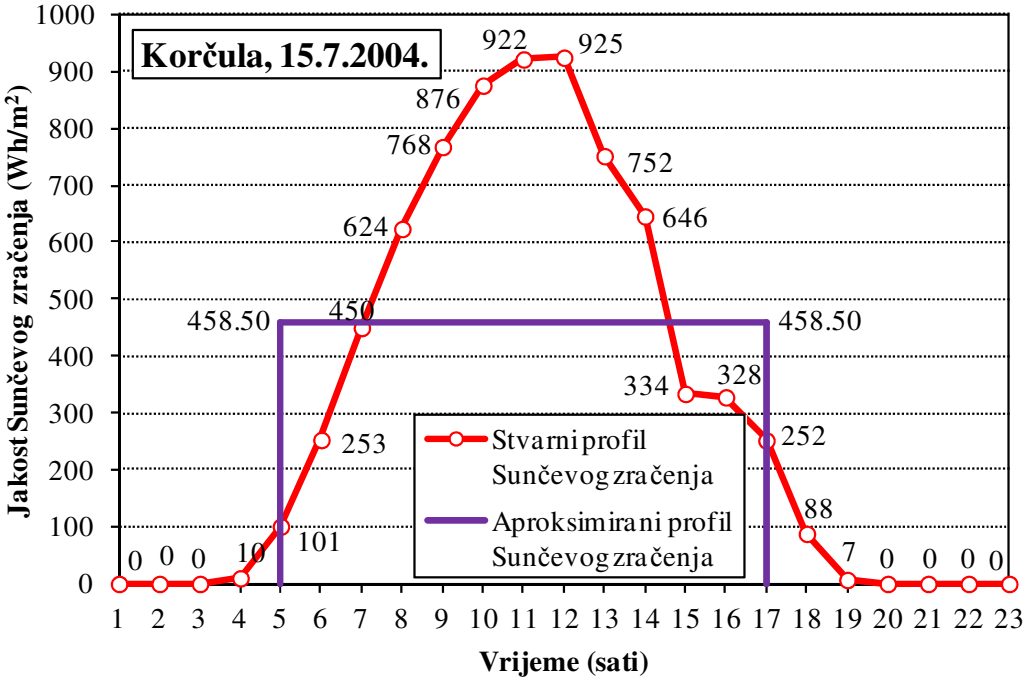


Omjer između aproksimirane (A_A) i stvarne površine (A_S) profila Sunčevog zračenja: 75 %

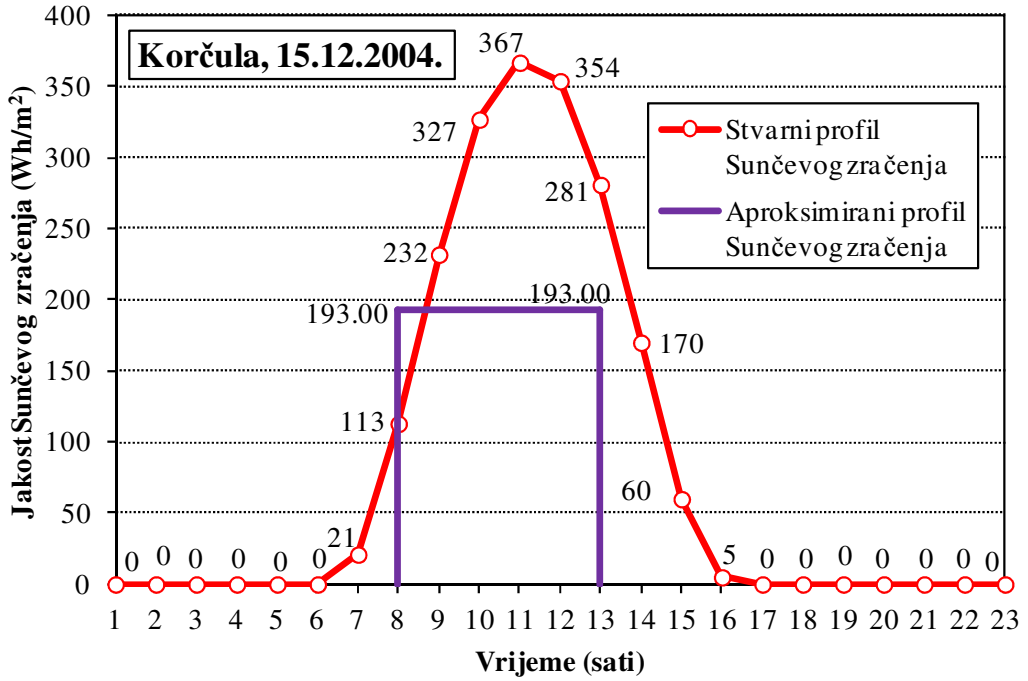


Omjer između aproksimirane (A_A) i stvarne površine (A_S) profila Sunčevog zračenja: 50 %

PRILOG P2-3: Stvarni i aproksimirani profili Sunčevog zračenja tijekom dana za Korčulu

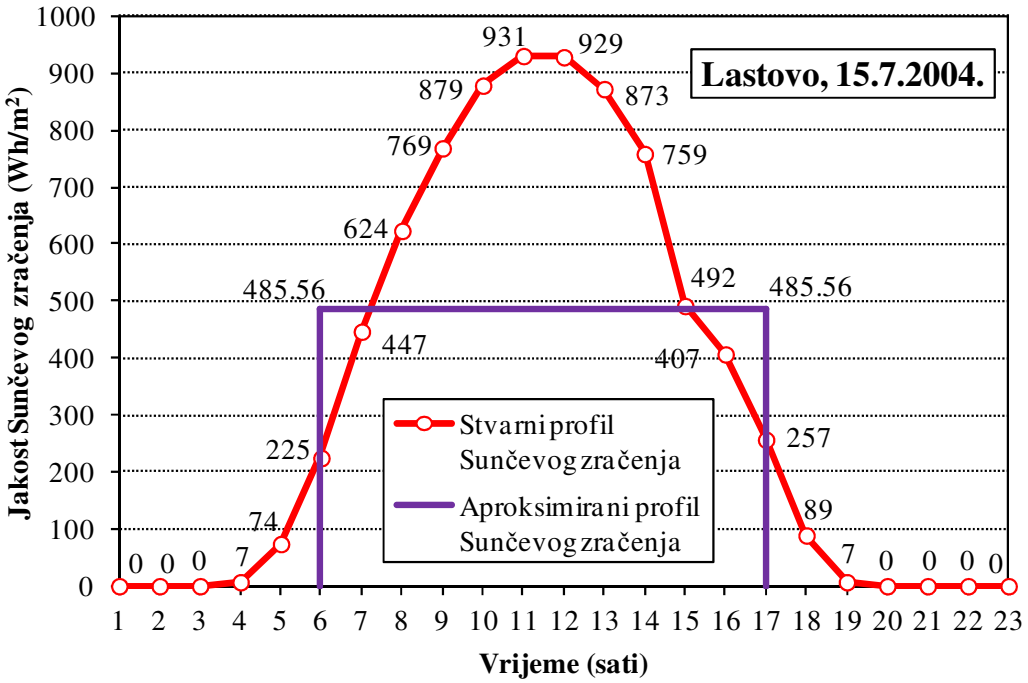


Omjer između aproksimirane (A_A) i stvarne površine (A_S) profila Sunčevog zračenja: 75 %

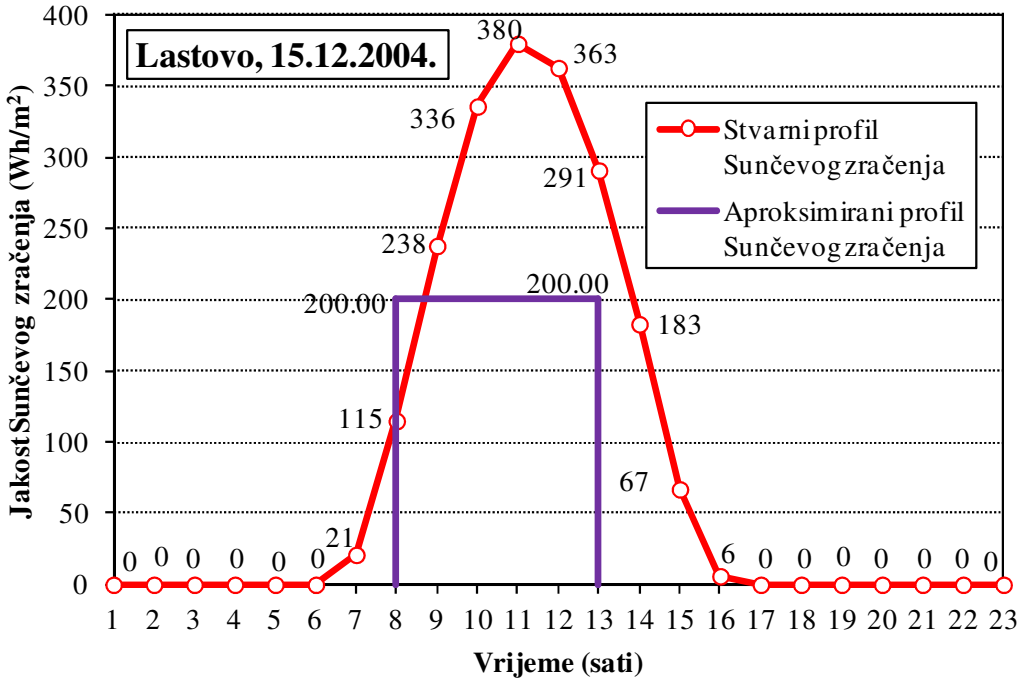


Omjer između aproksimirane (A_A) i stvarne površine (A_S) profila Sunčevog zračenja: 50 %

PRILOG P2-4: Stvarni i aproksimirani profili Sunčevog zračenja tijekom dana za Lastovo



Omjer između aproksimirane (A_A) i stvarne površine (A_S) profila Sunčevog zračenja: 75 %



Omjer između aproksimirane (A_A) i stvarne površine (A_S) profila Sunčevog zračenja: 50 %.

PRILOG P-3

Dnevne precrpljene količine vode

PRILOG P3-1: Dnevne precrpljene količine vode V_{CS} (m^3) za period bilanciranja t_b = 1 dan za 1. način formiranja vremenskih serija MKP-1

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1455	2252	3787	4421	4664	5097	5571	4929	3899	3297	1638	1444
2	1425	2519	3044	4253	5080	5792	5467	5195	3701	3166	1771	1633
3	1667	2449	3508	4296	5313	5708	5287	5080	3805	2827	1986	1357
4	1768	2131	3826	4666	5081	5766	5289	5107	3652	2751	1937	1457
5	2034	2335	3610	4601	4827	5504	5536	5124	3311	2636	1882	1273
6	1572	2540	4019	4434	4995	5071	5375	4846	3814	2669	1444	1366
7	1376	2782	3602	4984	5272	5721	5063	4927	3403	2922	1582	1500
8	1235	2684	3623	4439	5547	5537	5253	4894	3476	2545	1912	1473
9	1358	2324	3225	4352	4997	5657	5833	5053	3512	2868	1955	1029
10	1408	2629	3856	3836	5678	5518	5584	4990	3477	2697	1624	981
11	1297	2367	3685	3847	4937	5114	5423	4843	3811	2965	1796	1216
12	1477	2493	3705	4489	5478	5518	5795	4717	3558	2926	1648	1306
13	1592	2600	3395	4575	5750	5167	5906	4999	3319	3166	1709	1311
14	1609	2576	3985	4208	5431	5564	5850	5000	3421	2772	1784	1101
15	1769	2311	3316	4480	5366	5699	5749	5082	3600	2795	1640	983
16	1937	2330	3389	3831	5270	5402	5895	4976	3281	3102	1375	1301
17	1625	2600	4091	4401	5278	5380	5727	5125	3082	3180	1803	850
18	1502	3101	3805	4558	5029	5514	5872	4920	3255	2777	1884	1396
19	1612	2604	3843	5197	4996	5154	5756	4572	3480	2766	1572	1433
20	1732	2745	3648	4533	4987	5384	5765	4690	3592	2459	1894	1094
21	1376	2673	3932	4719	5279	5758	5981	4463	3474	2593	1641	1073
22	1574	2458	3989	4608	5298	5098	6007	4825	3635	2713	1584	1588
23	1531	2432	3504	4562	5243	5705	5608	5300	3376	2974	1437	1316
24	1458	2527	3623	4461	5540	5854	5201	5211	3445	2386	1630	1457
25	1823	2410	3661	4658	5403	5553	5372	4691	3314	3027	1628	1101
26	1900	2837	3809	4492	5539	5797	5506	4813	3280	2868	1648	1122
27	1786	2524	4037	3971	5625	5903	5850	4753	3461	2855	1462	954
28	1633	2701	3624	3396	5261	5613	5536	4556	3435	2842	1593	1089
29	1652	2841	3995	4389	5279	5310	5514	4578	3570	2499	1733	943
30	1661	-	3834	3763	5812	5625	5537	4576	3471	2333	1485	1096
31	1600	-	3900	-	5498	-	5760	4193	-	2212	-	985

PRILOG P3-2: Dnevne precrpljene količine vode V_{CS} (m^3) za period bilanciranja t_b = 2 dana za 1. način formiranja vremenskih serija MKP-1

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1227	1899	3194	3729	3934	4299	4699	4158	3288	2781	1382	1218
2	1202	2125	2567	3587	4285	4885	4611	4382	3122	2671	1494	1378
3	1406	2065	2959	3623	4481	4814	4459	4285	3209	2384	1675	1145
4	1492	1797	3227	3936	4286	4863	4461	4307	3080	2320	1633	1229
5	1716	1969	3045	3881	4072	4642	4669	4322	2793	2224	1587	1074
6	1326	2143	3390	3740	4213	4277	4534	4087	3217	2251	1218	1152
7	1161	2347	3039	4204	4447	4826	4271	4156	2871	2464	1335	1265
8	1042	2264	3056	3744	4679	4671	4430	4128	2932	2147	1613	1243
9	1145	1960	2720	3671	4215	4772	4920	4262	2963	2419	1649	868
10	1188	2217	3253	3236	4789	4654	4710	4209	2933	2275	1370	827
11	1094	1997	3108	3245	4164	4314	4574	4085	3214	2501	1515	1026
12	1246	2102	3125	3786	4621	4654	4888	3979	3001	2468	1390	1102
13	1343	2193	2863	3859	4850	4358	4981	4217	2799	2671	1441	1106
14	1357	2173	3361	3549	4581	4693	4935	4217	2886	2338	1505	929
15	1492	1950	2797	3779	4526	4807	4850	4287	3037	2357	1383	829
16	1634	1965	2858	3232	4446	4556	4972	4197	2768	2617	1160	1097
17	1371	2193	3451	3712	4452	4538	4831	4323	2600	2683	1521	717
18	1267	2616	3210	3845	4242	4651	4953	4150	2746	2343	1589	1177
19	1360	2196	3241	4384	4214	4347	4855	3857	2935	2333	1326	1209
20	1461	2315	3077	3824	4206	4541	4863	3956	3030	2074	1597	923
21	1160	2255	3316	3980	4453	4856	5045	3764	2931	2187	1384	905
22	1327	2074	3365	3887	4468	4300	5067	4070	3066	2289	1336	1339
23	1291	2052	2955	3848	4422	4812	4730	4471	2848	2508	1212	1110
24	1230	2132	3056	3762	4673	4938	4387	4395	2906	2012	1375	1229
25	1538	2033	3088	3929	4558	4684	4531	3956	2795	2553	1373	928
26	1602	2393	3213	3789	4672	4890	4645	4060	2767	2419	1390	946
27	1506	2129	3405	3349	4745	4979	4935	4009	2920	2408	1233	805
28	1378	2278	3057	2864	4438	4735	4670	3843	2897	2397	1344	918
29	1393	2396	3370	3702	4453	4479	4651	3861	3011	2108	1462	795
30	1401	-	3234	3174	4902	4745	4670	3860	2928	1968	1252	924
31	1349	-	3290	-	4637	-	4859	3537	-	1865	-	831

PRILOG P3-3: Dnevne precrpljene količine vode V_{CS} (m^3) za period bilanciranja t_b = 3 dana za 1. način formiranja vremenskih serija MKP-1

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1181	1828	3075	3590	3787	4138	4523	4002	3165	2677	1330	1173
2	1157	2046	2471	3453	4124	4702	4438	4218	3005	2571	1438	1326
3	1353	1988	2848	3488	4313	4634	4292	4125	3089	2295	1612	1102
4	1436	1730	3106	3789	4125	4681	4294	4146	2965	2234	1572	1183
5	1652	1896	2931	3736	3919	4468	4495	4160	2689	2141	1528	1033
6	1276	2063	3263	3600	4055	4117	4364	3934	3096	2167	1172	1109
7	1117	2259	2925	4046	4280	4645	4111	4001	2763	2372	1285	1218
8	1003	2179	2942	3604	4503	4496	4265	3974	2822	2066	1552	1196
9	1102	1887	2618	3533	4057	4593	4736	4103	2852	2329	1587	836
10	1143	2134	3131	3115	4610	4480	4534	4051	2823	2190	1319	796
11	1053	1922	2992	3123	4008	4152	4403	3932	3094	2407	1458	987
12	1200	2024	3008	3645	4448	4480	4705	3830	2889	2376	1338	1060
13	1292	2111	2756	3715	4668	4195	4795	4059	2694	2571	1387	1064
14	1306	2092	3235	3417	4409	4517	4750	4059	2778	2250	1449	894
15	1436	1877	2692	3637	4357	4627	4668	4126	2923	2269	1332	798
16	1573	1892	2751	3111	4279	4386	4786	4040	2664	2519	1117	1056
17	1319	2111	3322	3573	4285	4368	4650	4161	2502	2582	1464	690
18	1220	2518	3089	3701	4083	4477	4768	3994	2643	2255	1530	1133
19	1309	2114	3120	4220	4056	4184	4673	3712	2825	2246	1276	1163
20	1406	2229	2962	3681	4049	4371	4680	3808	2916	1997	1538	888
21	1117	2170	3192	3831	4286	4675	4856	3623	2821	2105	1332	871
22	1278	1996	3239	3741	4301	4139	4877	3917	2951	2203	1286	1289
23	1243	1975	2845	3704	4257	4632	4553	4303	2741	2414	1167	1068
24	1184	2052	2942	3621	4498	4753	4222	4230	2797	1937	1323	1183
25	1480	1957	2972	3782	4387	4508	4361	3808	2691	2457	1322	894
26	1542	2303	3092	3647	4497	4707	4471	3908	2663	2328	1338	911
27	1450	2049	3278	3224	4567	4792	4750	3859	2810	2318	1187	775
28	1326	2193	2943	2757	4272	4557	4495	3699	2789	2307	1294	884
29	1341	2306	3244	3564	4286	4311	4477	3717	2898	2029	1407	765
30	1348	-	3113	3055	4718	4567	4495	3715	2818	1894	1205	890
31	1299	-	3167	-	4463	-	4677	3405	-	1796	-	800

PRILOG P3-4: Dnevne precrpljene količine vode V_{CS} (m^3) za period bilanciranja t_b = 4 dana za 1. način formiranja vremenskih serija MKP-1

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1195	1849	3109	3630	3829	4184	4574	4047	3201	2707	1345	1186
2	1170	2068	2499	3492	4170	4755	4488	4265	3038	2600	1454	1341
3	1368	2010	2880	3527	4362	4686	4340	4171	3124	2321	1630	1114
4	1452	1749	3141	3831	4171	4734	4342	4193	2998	2259	1590	1196
5	1670	1917	2964	3778	3963	4518	4545	4207	2719	2165	1545	1045
6	1291	2086	3299	3640	4101	4163	4413	3978	3131	2191	1186	1121
7	1130	2284	2958	4092	4328	4697	4157	4045	2794	2399	1299	1231
8	1014	2203	2975	3644	4554	4546	4312	4018	2854	2090	1570	1209
9	1115	1908	2647	3573	4102	4644	4789	4148	2884	2355	1605	845
10	1156	2158	3166	3149	4662	4530	4584	4097	2854	2215	1333	805
11	1065	1943	3025	3158	4053	4199	4452	3976	3129	2434	1475	998
12	1213	2046	3042	3685	4497	4530	4757	3873	2921	2403	1353	1072
13	1307	2134	2787	3756	4721	4242	4848	4104	2725	2600	1403	1076
14	1321	2115	3271	3455	4459	4568	4803	4105	2809	2275	1465	904
15	1452	1898	2723	3678	4406	4679	4720	4172	2956	2294	1346	807
16	1591	1913	2782	3146	4327	4435	4840	4086	2694	2547	1129	1068
17	1334	2135	3359	3613	4333	4417	4702	4207	2530	2611	1480	698
18	1233	2546	3124	3742	4129	4527	4821	4039	2672	2280	1547	1146
19	1324	2138	3155	4267	4102	4231	4726	3754	2857	2271	1290	1176
20	1422	2254	2995	3722	4094	4420	4733	3850	2949	2019	1555	898
21	1129	2195	3228	3874	4334	4727	4911	3664	2852	2129	1347	881
22	1292	2018	3275	3783	4349	4186	4932	3961	2984	2228	1300	1303
23	1257	1997	2876	3746	4305	4684	4604	4351	2772	2441	1180	1080
24	1197	2075	2975	3662	4548	4806	4270	4278	2828	1959	1338	1196
25	1497	1979	3006	3825	4436	4559	4410	3851	2721	2485	1336	904
26	1559	2329	3127	3688	4547	4760	4521	3951	2693	2355	1353	921
27	1466	2072	3315	3260	4618	4846	4803	3902	2842	2344	1200	784
28	1341	2217	2976	2788	4319	4609	4545	3741	2820	2333	1308	894
29	1356	2332	3280	3604	4334	4359	4527	3758	2931	2052	1423	774
30	1363	-	3148	3089	4771	4618	4546	3757	2850	1915	1219	900
31	1313	-	3202	-	4513	-	4729	3443	-	1816	-	809

PRILOG P3-5: Dnevne precrpljene količine vode V_{CS} (m^3) za period bilanciranja t_b = 5 dana za 1. način formiranja vremenskih serija MKP-1

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1108	1714	2883	3365	3550	3880	4240	3752	2967	2509	1247	1099
2	1085	1918	2317	3237	3866	4408	4161	3954	2817	2410	1348	1243
3	1269	1864	2670	3270	4044	4344	4024	3867	2896	2152	1511	1033
4	1346	1622	2912	3552	3867	4389	4026	3887	2780	2094	1474	1109
5	1549	1777	2748	3502	3674	4189	4214	3900	2521	2007	1432	969
6	1197	1934	3059	3375	3802	3860	4092	3688	2903	2031	1099	1040
7	1047	2118	2742	3794	4013	4355	3854	3751	2590	2224	1204	1141
8	940	2043	2758	3379	4222	4215	3998	3725	2646	1937	1455	1121
9	1033	1769	2454	3313	3803	4306	4440	3846	2674	2183	1488	783
10	1072	2001	2935	2920	4322	4200	4250	3798	2646	2053	1236	747
11	987	1802	2805	2928	3758	3893	4128	3686	2901	2257	1367	926
12	1125	1897	2820	3417	4170	4200	4411	3591	2708	2227	1254	994
13	1212	1979	2584	3483	4377	3933	4495	3805	2526	2410	1300	998
14	1225	1961	3033	3203	4134	4235	4453	3806	2604	2110	1358	838
15	1347	1759	2524	3410	4085	4338	4376	3868	2741	2127	1248	748
16	1475	1773	2579	2916	4012	4112	4487	3788	2498	2361	1047	990
17	1237	1979	3114	3350	4017	4095	4359	3901	2346	2421	1372	647
18	1143	2361	2896	3470	3828	4197	4470	3745	2478	2114	1434	1062
19	1227	1982	2925	3956	3803	3923	4381	3480	2649	2106	1196	1091
20	1318	2090	2777	3451	3796	4098	4388	3570	2734	1872	1441	833
21	1047	2035	2993	3592	4018	4382	4553	3397	2645	1974	1249	816
22	1198	1871	3036	3507	4032	3881	4572	3672	2767	2065	1205	1208
23	1165	1851	2667	3473	3991	4343	4269	4034	2570	2263	1094	1001
24	1110	1924	2758	3395	4217	4456	3959	3966	2622	1816	1241	1109
25	1388	1835	2787	3546	4113	4227	4089	3570	2523	2304	1239	838
26	1446	2159	2899	3419	4216	4413	4191	3663	2497	2183	1255	854
27	1359	1921	3073	3022	4282	4493	4453	3617	2635	2173	1113	726
28	1243	2056	2759	2585	4005	4273	4214	3468	2614	2163	1213	829
29	1257	2162	3041	3341	4018	4042	4197	3484	2717	1902	1319	717
30	1264	-	2919	2864	4424	4282	4214	3483	2642	1776	1130	834
31	1218	-	2969	-	4185	-	4385	3192	-	1683	-	750

PRILOG P3-6: Dnevne precrpljene količine vode V_{CS} (m^3) za period bilanciranja t_b = 1 dan za 2. način formiranja vremenskih serija MKP-2

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1455	2252	3787	4421	4664	5097	5571	4929	3899	3297	1638	1444
2	1425	2519	3044	4253	5080	5792	5467	5195	3701	3166	1771	1633
3	1667	2449	3508	4296	5313	5708	5287	5080	3805	2827	1986	1357
4	1768	2131	3826	4666	5081	5766	5289	5107	3652	2751	1937	1457
5	2034	2335	3610	4601	4827	5504	5536	5124	3311	2636	1882	1273
6	1572	2540	4019	4434	4995	5071	5375	4846	3814	2669	1444	1366
7	1376	2782	3602	4984	5272	5721	5063	4927	3403	2922	1582	1500
8	1235	2684	3623	4439	5547	5537	5253	4894	3476	2545	1912	1473
9	1358	2324	3225	4352	4997	5657	5833	5053	3512	2868	1955	1029
10	1408	2629	3856	3836	5678	5518	5584	4990	3477	2697	1624	981
11	1297	2367	3685	3847	4937	5114	5423	4843	3811	2965	1796	1216
12	1477	2493	3705	4489	5478	5518	5795	4717	3558	2926	1648	1306
13	1592	2600	3395	4575	5750	5167	5906	4999	3319	3166	1709	1311
14	1609	2576	3985	4208	5431	5564	5850	5000	3421	2772	1784	1101
15	1769	2311	3316	4480	5366	5699	5749	5082	3600	2795	1640	983
16	1937	2330	3389	3831	5270	5402	5895	4976	3281	3102	1375	1301
17	1625	2600	4091	4401	5278	5380	5727	5125	3082	3180	1803	850
18	1502	3101	3805	4558	5029	5514	5872	4920	3255	2777	1884	1396
19	1612	2604	3843	5197	4996	5154	5756	4572	3480	2766	1572	1433
20	1732	2745	3648	4533	4987	5384	5765	4690	3592	2459	1894	1094
21	1376	2673	3932	4719	5279	5758	5981	4463	3474	2593	1641	1073
22	1574	2458	3989	4608	5298	5098	6007	4825	3635	2713	1584	1588
23	1531	2432	3504	4562	5243	5705	5608	5300	3376	2974	1437	1316
24	1458	2527	3623	4461	5540	5854	5201	5211	3445	2386	1630	1457
25	1823	2410	3661	4658	5403	5553	5372	4691	3314	3027	1628	1101
26	1900	2837	3809	4492	5539	5797	5506	4813	3280	2868	1648	1122
27	1786	2524	4037	3971	5625	5903	5850	4753	3461	2855	1462	954
28	1633	2701	3624	3396	5261	5613	5536	4556	3435	2842	1593	1089
29	1652	2841	3995	4389	5279	5310	5514	4578	3570	2499	1733	943
30	1661	-	3834	3763	5812	5625	5537	4576	3471	2333	1485	1096
31	1600	-	3900	-	5498	-	5760	4193	-	2212	-	985

PRILOG P3-7: Dnevne precrpljene količine vode V_{CS} (m^3) za period bilanciranja t_b = 2 dana za 2. način formiranja vremenskih serija MKP-2

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1357	2099	3531	4122	4348	4752	5194	4596	3635	3074	1527	1347
2	1329	2349	2838	3965	4736	5400	5097	4843	3450	2952	1651	1523
3	1554	2283	3271	4005	4953	5321	4929	4737	3547	2636	1851	1265
4	1649	1987	3567	4351	4737	5375	4931	4761	3405	2565	1805	1359
5	1897	2177	3366	4290	4501	5131	5161	4777	3087	2458	1754	1187
6	1466	2369	3747	4134	4657	4727	5012	4518	3556	2488	1346	1274
7	1283	2594	3359	4647	4915	5334	4720	4594	3173	2724	1475	1398
8	1151	2502	3378	4139	5171	5163	4897	4563	3241	2373	1783	1373
9	1266	2167	3006	4058	4658	5274	5438	4711	3275	2674	1823	960
10	1313	2451	3595	3577	5294	5144	5206	4652	3242	2515	1514	915
11	1210	2207	3435	3587	4603	4768	5056	4515	3553	2764	1674	1134
12	1377	2324	3454	4185	5107	5145	5403	4398	3317	2728	1537	1218
13	1484	2424	3165	4266	5361	4817	5506	4661	3094	2952	1593	1222
14	1500	2402	3715	3923	5063	5187	5454	4661	3190	2584	1664	1027
15	1649	2155	3092	4177	5003	5314	5360	4738	3357	2605	1529	917
16	1806	2172	3159	3572	4914	5036	5496	4640	3059	2892	1282	1213
17	1515	2424	3815	4103	4921	5016	5340	4778	2873	2965	1681	793
18	1401	2891	3548	4250	4689	5141	5475	4587	3035	2589	1756	1301
19	1503	2427	3583	4845	4658	4805	5367	4263	3244	2579	1465	1336
20	1615	2559	3401	4226	4649	5020	5375	4372	3349	2293	1766	1020
21	1282	2492	3665	4399	4922	5368	5577	4161	3239	2418	1530	1000
22	1467	2292	3719	4296	4939	4753	5601	4498	3389	2530	1476	1480
23	1427	2268	3267	4254	4888	5319	5228	4942	3148	2772	1340	1227
24	1359	2356	3378	4159	5165	5458	4849	4858	3212	2224	1519	1358
25	1700	2247	3413	4343	5038	5177	5008	4373	3090	2822	1518	1026
26	1771	2645	3551	4188	5164	5405	5134	4487	3058	2674	1537	1046
27	1665	2353	3764	3702	5244	5503	5454	4431	3227	2661	1363	890
28	1523	2518	3379	3166	4905	5233	5162	4248	3202	2649	1485	1015
29	1540	2648	3725	4092	4922	4950	5141	4268	3328	2330	1616	879
30	1548	-	3575	3508	5418	5244	5162	4266	3237	2175	1384	1022
31	1491	-	3636	-	5126	-	5370	3910	-	2062	-	918

PRILOG P3-8: Dnevne precrpljene količine vode V_{CS} (m^3) za period bilanciranja t_b = 3 dana za 2. način formiranja vremenskih serija MKP-2

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1260	1950	3280	3829	4039	4414	4825	4269	3377	2855	1419	1251
2	1234	2182	2636	3684	4399	5016	4735	4499	3205	2742	1534	1415
3	1444	2121	3039	3721	4601	4943	4579	4400	3295	2448	1720	1175
4	1532	1845	3314	4042	4401	4994	4580	4423	3163	2383	1677	1262
5	1762	2022	3127	3985	4181	4767	4795	4438	2868	2283	1630	1102
6	1361	2200	3481	3840	4326	4392	4656	4197	3303	2311	1251	1183
7	1192	2410	3120	4317	4566	4955	4385	4268	2948	2530	1370	1299
8	1070	2324	3138	3845	4804	4796	4549	4239	3010	2204	1656	1276
9	1176	2013	2793	3769	4327	4900	5052	4376	3042	2484	1693	891
10	1219	2277	3340	3322	4918	4779	4836	4322	3011	2336	1407	850
11	1124	2050	3191	3332	4276	4430	4697	4194	3300	2568	1556	1053
12	1280	2159	3209	3888	4744	4779	5019	4085	3082	2534	1427	1131
13	1379	2252	2940	3963	4980	4475	5115	4329	2874	2742	1480	1135
14	1393	2231	3451	3645	4703	4819	5067	4330	2963	2400	1545	954
15	1532	2002	2872	3880	4648	4936	4979	4402	3118	2420	1420	852
16	1678	2018	2935	3318	4565	4678	5105	4310	2842	2687	1191	1126
17	1407	2252	3544	3812	4571	4660	4960	4438	2669	2754	1561	736
18	1301	2686	3296	3948	4356	4775	5086	4261	2819	2405	1632	1209
19	1396	2255	3328	4501	4327	4463	4985	3960	3014	2396	1361	1241
20	1500	2378	3159	3926	4319	4663	4993	4062	3111	2130	1640	948
21	1191	2315	3405	4087	4572	4987	5180	3865	3009	2246	1421	929
22	1363	2129	3455	3991	4588	4416	5203	4179	3148	2350	1372	1375
23	1326	2107	3034	3951	4541	4941	4857	4590	2924	2575	1244	1140
24	1263	2189	3138	3863	4798	5070	4504	4513	2983	2066	1412	1262
25	1579	2088	3171	4035	4680	4809	4652	4062	2870	2621	1410	953
26	1645	2457	3299	3890	4797	5021	4769	4168	2841	2484	1428	971
27	1547	2186	3497	3439	4872	5112	5067	4116	2998	2472	1266	827
28	1415	2339	3139	2941	4557	4862	4795	3946	2975	2461	1380	943
29	1430	2460	3460	3801	4572	4599	4775	3965	3092	2164	1501	816
30	1438	-	3321	3259	5033	4872	4795	3963	3007	2021	1286	949
31	1385	-	3378	-	4761	-	4989	3632	-	1915	-	853

PRILOG P3-9: Dnevne precrpljene količine vode V_{CS} (m^3) za period bilanciranja t_b = 4 dana za 2. način formiranja vremenskih serija MKP-2

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1192	1844	3102	3622	3820	4175	4563	4038	3193	2700	1342	1183
2	1167	2064	2493	3484	4161	4744	4478	4255	3031	2594	1450	1338
3	1365	2006	2874	3519	4352	4675	4331	4161	3117	2316	1626	1112
4	1448	1745	3134	3822	4162	4723	4332	4183	2991	2253	1586	1194
5	1666	1912	2957	3769	3954	4508	4535	4197	2713	2160	1541	1043
6	1288	2081	3292	3632	4091	4153	4403	3969	3124	2186	1183	1119
7	1127	2279	2951	4082	4319	4686	4147	4036	2788	2393	1296	1228
8	1012	2198	2968	3636	4543	4536	4302	4009	2847	2085	1566	1207
9	1112	1904	2641	3565	4093	4634	4778	4139	2877	2349	1601	843
10	1153	2153	3159	3142	4651	4520	4574	4087	2848	2210	1330	804
11	1063	1939	3018	3151	4044	4189	4442	3967	3121	2429	1471	996
12	1210	2042	3035	3677	4487	4520	4747	3864	2915	2397	1350	1070
13	1304	2130	2781	3748	4710	4232	4837	4095	2718	2594	1399	1074
14	1318	2110	3264	3447	4448	4558	4792	4095	2802	2270	1462	902
15	1449	1893	2716	3669	4396	4668	4709	4163	2949	2289	1343	805
16	1587	1908	2776	3138	4317	4425	4829	4076	2688	2541	1127	1065
17	1331	2130	3351	3605	4323	4407	4691	4198	2525	2605	1477	696
18	1230	2540	3117	3734	4120	4517	4810	4030	2666	2275	1543	1143
19	1321	2133	3148	4257	4093	4221	4715	3745	2850	2266	1288	1174
20	1419	2249	2988	3713	4085	4410	4722	3841	2942	2014	1551	896
21	1127	2190	3220	3865	4324	4716	4900	3656	2846	2124	1344	879
22	1289	2014	3267	3775	4339	4176	4921	3952	2977	2223	1297	1300
23	1254	1992	2870	3737	4295	4673	4594	4341	2765	2436	1177	1078
24	1194	2070	2968	3654	4538	4795	4260	4268	2822	1954	1335	1193
25	1493	1974	2999	3816	4426	4548	4400	3842	2715	2479	1333	901
26	1556	2324	3120	3679	4537	4749	4510	3942	2687	2349	1350	919
27	1463	2068	3307	3253	4608	4835	4792	3893	2835	2338	1197	782
28	1338	2212	2969	2781	4309	4598	4535	3732	2813	2328	1305	892
29	1353	2327	3273	3595	4324	4349	4516	3750	2924	2047	1419	772
30	1360	-	3141	3082	4760	4608	4535	3748	2844	1911	1216	898
31	1310	-	3195	-	4503	-	4718	3435	-	1812	-	807

PRILOG P3-10: Dnevne precrpljene količine vode V_{CS} (m^3) za period bilanciranja t_b = 5 dana za 2. način formiranja vremenskih serija MKP-2

	Mjeseci											
Dani	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
1	1145	1773	2981	3481	3671	4012	4386	3880	3069	2595	1290	1137
2	1122	1983	2396	3348	3999	4559	4303	4089	2913	2493	1394	1286
3	1312	1928	2762	3382	4182	4493	4162	3999	2995	2225	1563	1068
4	1392	1677	3012	3673	4000	4539	4163	4020	2875	2166	1524	1147
5	1602	1838	2842	3622	3800	4332	4358	4034	2607	2075	1481	1002
6	1237	2000	3164	3490	3932	3992	4232	3814	3002	2101	1137	1075
7	1083	2190	2836	3923	4150	4504	3986	3879	2679	2300	1246	1180
8	972	2113	2852	3494	4367	4359	4135	3853	2736	2004	1505	1160
9	1069	1829	2538	3426	3933	4453	4592	3978	2765	2258	1539	810
10	1108	2070	3036	3020	4470	4344	4396	3928	2737	2124	1278	772
11	1021	1863	2901	3029	3887	4026	4269	3812	3000	2334	1414	957
12	1163	1962	2917	3534	4312	4344	4562	3713	2801	2304	1297	1028
13	1253	2047	2672	3602	4526	4068	4649	3935	2612	2493	1345	1032
14	1267	2028	3137	3313	4275	4380	4605	3936	2693	2182	1405	867
15	1393	1820	2611	3526	4224	4487	4526	4001	2834	2200	1291	774
16	1525	1834	2668	3016	4149	4252	4640	3917	2583	2442	1083	1024
17	1279	2047	3221	3465	4155	4235	4508	4034	2426	2504	1419	669
18	1183	2441	2995	3588	3959	4341	4623	3873	2562	2186	1483	1099
19	1269	2050	3025	4091	3933	4057	4531	3599	2739	2178	1237	1128
20	1364	2161	2872	3569	3926	4238	4538	3692	2828	1936	1491	861
21	1083	2104	3095	3715	4156	4532	4709	3513	2735	2041	1292	844
22	1239	1935	3140	3627	4170	4014	4729	3798	2861	2136	1247	1250
23	1205	1915	2758	3592	4127	4491	4415	4172	2658	2341	1131	1036
24	1148	1990	2852	3511	4361	4608	4094	4102	2712	1878	1283	1147
25	1435	1897	2882	3667	4254	4371	4229	3693	2609	2383	1281	866
26	1495	2233	2998	3536	4360	4564	4335	3789	2582	2258	1298	883
27	1406	1987	3178	3126	4428	4647	4605	3741	2725	2247	1151	751
28	1286	2126	2853	2673	4142	4419	4358	3587	2704	2237	1254	857
29	1300	2236	3145	3455	4156	4180	4341	3604	2810	1967	1364	742
30	1307	-	3018	2962	4575	4428	4359	3602	2733	1837	1169	863
31	1259	-	3070	-	4328	-	4535	3301	-	1741	-	775

Životopis

Bojan Đurin, dipl. ing.geoteh., rođen je 30. srpnja 1981. godine u Varaždinu gdje je završio osnovnu školu, kao i srednju Rudarsku i kemijsku školu, zanimanje građevinski tehničar. Akademske godine 2000./2001. upisao je Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu na kojem je diplomirao 26. studenog 2007. godine te stekao stručni naziv diplomirani inženjer geotehnike. 2005. godine nagrađen je Rektorovom nagradom za najbolji studentski rad, a od iste godine sudjeluje u nastavi kao demonstrator na kolegijima Tehnička mehanika, Teorija konstrukcija, Vodoopskrba i odvodnja, te Pročišćavanje otpadnih voda. Također sudjeluje u izradi triju internih skripata za kolegije Tehnička mehanika, Teorija konstrukcija, te Pročišćavanje otpadnih voda.

Od 1. lipnja 2008. zasniva radni odnos u svojstvu znanstvenog novaka na Zavodu za hidrotehniku Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Sudjeluje u nastavi održavajući vježbe iz kolegija Projektiranje hidrotehničkih objekata na dodiplomskom studiju Geotehnike, Mehanika fluida, Hidraulika, Vodoopskrba i odvodnja, te Hidrologija na preddiplomskom studiju Geoinženjerstva, Primijenjena hidrologija i Hidrologija okoliša na diplomskom studiju Geoinženjerstva, te kolegija Mehanika fluida na preddiplomskom studiju Inženjerstva okoliša. Također sudjeluje u izradi završnih i diplomskih radova na preddiplomskom studiju Geoinženjerstva kao neposredni voditelj. Obnaša funkciju Tajnika Zavoda za hidrotehniku i člana tehničkog uredništva časopisa "Inženjerstvo okoliša", kojega izdaje Geotehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Akademske godine 2008./2009. na Fakultetu Građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu upisao je Poslijediplomski znanstveni doktorski studij iz znanstvenog područja Tehničkih znanosti, znanstveno polje Građevinarstvo, smjer Hidrotehnika. U dosadašnjem periodu kao autor i koautor objavio je ukupno 10 znanstvenih i stručnih radova u časopisima i zbornicima znanstvenih i stručnih skupova u zemlji i inozemstvu, pri čemu je izlagao rad na četiri skupa. Koristi se engleskim jezikom u govoru, čitanju i pisanju.