

ANALIZA UTJECAJA REŽIMA RADA CRPNE STANICE NA POTREBNI VOLUMEN VODOSPROME

ANALYSIS OF THE IMPACT OF PUMPING STATION OPERATING REGIME ON REQUIRED WATER RESERVOIR VOLUME

Bojan Đurin¹, Jure Margeta², Luka Jambrović¹

¹ Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, bojan.djurin@gfv.hr, jambrovic.luka@gmail.com

² Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Matice hrvatske 15, Split, HRVATSKA, margeta@gradst.hr

Sažetak: Tema ovog rada je analiza utjecaja režima rada crpne stanice, pogonjene različitim izvorima električne energije, na potrebni volumen gradske vodoopskrbne vodospreme, kapacitet crpne stanice i na emisiju stakleničkih plinova. Zbog sve većih štetnih utjecaja klimatskih promjena na ljude i okoliš, primjena obnovljivih izvora energije (fotonaponskog sustava), te racionalizacija potrošnje energije postaje važan zadatak i za vodoopskrbne sustave. Prijelaz na druge izvore i režim korištenja električne energije ima značajan utjecaj na održivost vodoopskrbnog sustava. Stoga se u radu analizira ova problematika i mogući drugačiji koncepti dimenzioniranja vodospreme i crpne stanice. Problematika će se, zbog nedostataka stvarnih mjerenih podataka, analizirati na temelju tipičnog primjera i dostupnih podataka. Bez razlike na takav pristup, dobiveni rezultati omogućavaju donošenje znanstvenih zaključaka i time imaju širi značaj za struku. Analiziraju se tri režima rada crpne stanice i time dotjecanja vode u vodospremu: kontinuirano jednoliko kroz 24 sata, u periodu insolacije i u periodu jeftine električne energije od 22 do 8 sati. Dobiveni rezultati analizirani su u odnosu na ekonomske, socijalne i ekološke kriterije. Utvrđeno je da je primjena FN sustava moguća i korisna, ali da ima značajan utjecaj na potrebni kapacitet crpne stanice i volumen vodospreme. Zbog toga korištenje ovih izvora zahtjeva detaljniju analizu i drugačiji pristup u odnosu na uobičajene inženjerske postupke, a koji vodi računa o promjenjivosti veličine dnevne insolacije.

Ključne riječi: vodosprema, crpna stanica, energija, ekonomski, ekološki i socijalni pokazatelji.

Abstract: Topic of this paper is analysis of the impact of pumping station work regime, driven by different sources of electric energy, to the required volume of the city's water supply storage tanks, pumping stations capacity and to Greenhouse gas emissions. Due to the increasing adverse impacts of climate change on people and environment, applications of renewable energy sources (photovoltaic system) and the rationalization of energy consumption becomes an important task for the water supply systems. The transition to other sources and regime of using of the electricity has a significant impact on the sustainability of the water supply system. Therefore, paper analyzes this problems and possible different concepts of the sizing of storage tank and pumping station. The issue will be, due to the lack of actual measured data, analyzed on the basis of typical example and available data. Regardless of this approach, the obtained results enable enactment of the scientific conclusions and thus they have broader implications for the profession. Three regime of pumping stations and thus inflow of water in the water tank has been analyzed: continuously uniformly over 24 hours, during typical insolation and during the period of the cheap electric energy from 10 PM till 8 AM. The results were analyzed in relation to economic, social and environmental criteria. It was determined that the application of a PV system is possible and useful, and it also has a significant impact on the required capacity of the pump station and the storage tank volume. Therefore, the use of these resources requires a more detailed analysis and a different approach in regards to conventional engineering methods, which take into account the variability of the size of insolation per day.

Keywords: storage tank, pump station, energy, economic, ecologic and social indicators.

Received: 19.03.2015 / Accepted: 22.05.2015

Published online: 19.06.2015

Stručni rad / Technical paper

1. UVOD

Vodoopskrbni sustav naselja sastoji se od više objekata povezanih u funkcionalnu cjelinu na način da naselju trajno osiguraju dovoljne količine kvalitetne vode na što ekonomičniji način uz minimalni negativni utjecaj na okoliš. Cilj upravljanja sustavom je postići tehnološki siguran i ekonomski učinkovit vodoopskrbni sustav koji osigurava:

- neprekinutu opskrbu potrošača s potrebnim količinama;
- vodu standarda vode za piće;
- tlak u traženim granicama;

- potrebnu sigurnost u odnosu na količine, kakvoću i tlak;
- minimalne troškove, cijenu vode i negativni utjecaj na okoliš.

Vodoopskrbni sustav sastoji se od zahvata, postrojenja za obradu vode, glavnog dovodnog cjevovoda, vodospreme, glavnog opskrbnog cjevovoda, te vodovodne mreže. Osim ovih osnovnih objekata/elementa u vodovodu se koristi i cijeli niz drugih, uglavnom manjih, kao što su prekidne komore, ventili, zasuni i sl. Najznačajniji objekti sa stanovišta

sigurnosti rada su crpne stanice i vodospreme. Njihov raspored i broj najviše ovisi od topografskih i prostornih značajki vodoopskrbnog sustava, kao i o njegovom kapacitetu. Crpna stanica koja u sustavu ima posebni značaj je glavna crpna stanica kojom se pitka voda precrpljuje u vodospremu iz koje se voda gravitacijski distribuira potrošačima. Crpna stanica je najčešće najveći potrošač električne energije u vodoopskrbnom sustavu i zbog toga značajno utječe na troškove rada vodovoda i njegovu ekonomsku održivost. Naime, sve vode se moraju precrpiti na više kote terena u vodospremu koja svojim visinskim položajem osigurava potrebni tlak u vodoopskrbnoj mreži.

Raspored objekata određuje konfiguraciju vodoopskrbnog sustava koji, kao i svaki drugi sustav, ima svoje granice, ulaze, izlaze te elemente i procese. Glavni fizički ulazi u sustav su sirova voda i energija nužna za podizanje vode na određenu kotu terena, a izlazi voda zahtijevane količine, kvalitete i tlaka, te također gubici i energija. Dakle, gubici su komponenta vodoopskrbnog sustava, koja ulazi u bilancu vode u sustavu. Što se tiče energije, izlaz je tlak na mjestu korištenja, te gubici energije, odnosno topline, u procesima transformacije električne u mehaničku, te mehaničke u hidrauličku energiju, te gubici nastali tečenjem vode kroz vodoopskrbnu mrežu (cijevni sustav). Gubici vode u vodoopskrbnom sustavu mogu biti, a) stvarni (fizički) gubici: gubici na transportu i distribuciji čiste vode, gubici od istjecanja i prelijevanja iz vodospreme, gubici na priključcima do vodomjera i sl., te, b) prividni gubici: neodobrena potrošnja, greške mjerenja i sl. Generalno se može reći da su zahtijevani (željeni) izlazi iz sustava usluge koje poboljšavaju ljudski život i zdravlje: sigurnost, higijena, rekreacija, ugodnost i komfor, rast proizvodnih procesa (dohodak) te zdravlje i cjelovitost ekosustava. Glavni izlaz iz sustava je vodoopskrbna usluga/servis kojeg korisnici plaćaju.

Cilj dobrog gospodarenja vodovodom je minimizacija gubitaka vode i energije, te maksimizacija prihoda nastalih korištenjem vode iz sustava (Ramos et al., 2010). Uz ove tradicionalne kriterije, danas se javljaju i novi širi zahtjevi vezani uz ostvarenje ciljeva održivosti. U današnjim vodovodima koristi se energija proizvedena iz fosilnih goriva. Rezultat proizvodnje takve energije su staklenički plinovi koji negativno utječu na klimatske promjene i održivost. Zbog toga se smanjenjem potrošnje energije, a samim time i gubitaka, smanjuje ispuštanje stakleničkih plinova, što je jedan od ciljeva održivosti (Cabrera et al., 2010), (Zhou et al., 2013). Zamjena energije proizvedene iz fosilnih goriva sa Obnovljivim Izvorima Energije (OIE) naročito ide u prilog postizanju održivosti (Đurin & Margeta, 2014). Smanjenjem gubitaka vode direktno se doprinosi održivosti i očuvanju vodnih resursa. Sve su to važne teme, kao i problemi koje treba rješavati u vodoopskrbnim sustavima. Dakle, nužne su nove metodologije i rješenja (Ramos et al., 2010).

Objekti kojima se može značajno utjecati na ostvarenje ovih ciljeva su glavna crpna stanica (najčešće najveći potrošač energije u sustavu) i vodosprema kojom se bilancira voda i time energija u sustavu. Visinski

položaj vodospreme u odnosu na zahvat vode i vodovodnu mrežu (a samim time i tlačni odnosi u sustavu), i raspoloživi volumen su varijable koje izravno utječu na veličinu potrošnje energije. Uz navedeno, tlak u vodoopskrbnom sustavu direktno utječe na gubitke vode i energije, a samim time posredno i na veličinu ispuštanja stakleničkih plinova. Zbog toga je analiza i optimalizacija spregnutog rada glavne crpne stanice, vodospreme i vodovodne mreže od velike važnosti za svaki vodoopskrbni sustav.

Svaka promjena ulaznih veličina kao i izlaznih mijenja značajke sustava, ekonomske, ekološke i društvene. U ovom radu se analizira utjecaj promjene izvora i režima potrošnje električne energije na značajke sustava.

Za pretpostavljenu konfiguraciju sustava analizira se spregnuti rad glavne crpne stanice i vodovoda za različite izvore i režim korištenja energije. Rad je izrađen u sklopu završnog rada studenta Luke Jambrovića tijekom preddiplomskog studija Geoinženjerstva na Geotehničkom fakultetu u Varaždinu i predstavlja dorađenu verziju tog rada.

Uobičajeni metodološki pristup pri rješavanju problema dimenzioniranja vodospreme i crpne stanice bazira se na zadovoljavanju pretpostavljenih vršnih (maksimalnih) veličina potrošnje vode za odabranu konfiguraciju sustava. Ovakvim pristupom se objekti predimenzioniranju ali se zato dobije pouzdano rješenje. Dotok vode u vodospremu je konstantan tijekom 24 sata. Ovakav dotok vode kao rezultat daje najmanji potrebni instalirani kapacitet crpne stanice i time troškove građenja. Troškovi rada crpne stanice ovisi o cijeni električne energije tijekom 24 sata rada, niske i visoke tarife, i količini vode koja se precrpljuje. Potrebnu električnu energiju osigurava elektroenergetski sustav.

Ako se kod dimenzioniranja koristi/planira drugačiji režim rada crpne stanice rezultat će biti veći kapacitet crpne stanice ali i drugačiji troškovi rada, kao i potrebni kapacitet vodospreme. No, ukoliko se kao izvor energije koristi Sunčevo zračenje, tada je problem složeniji jer u obzir potrebno uzeti stohastičku prirodu njegove jakosti i trajanja. Navedeno iziskuje potrebu za naprednijim (inovativnijim) pristupom dimenzioniranja koji će u obzir uzeti režim potrošnje vode kao i raspoloživu insolaciju u planskom periodu.

U radu se obrađuje hipotetski primjer u cilju dobivanja informacija koje bi mogle biti od koristi kod upravljanja vodoopskrbnim sustavima. Analiza varijantnih rješenja spregnutog rada glavne crpne stanice i vodospreme, kao i provedena ekonomska i druga analiza radi se u svrhu dobivanja informacija i osnovnih indikatora održivosti za pojedine alternative, te utvrđivanja potrebne metodologije za njihovo planiranje. Cilj je utvrditi osnovne prednosti i nedostatke mogućih alternativnih rješenja napajanje električnom energijom na rad spregnutog sustava crpna stanica-vodosprema. Na ovaj način bi se dobile osnovne smjernice za daljnja istraživanja i moguću primjenu, bez razlike da li se radi o planiranju novog sustava ili upravljanju već izgrađenim sustavom.

2. METODOLOGIJA PRORAČUNA VODOSPROME I CRPNE STANICE

2.1. Funkcija vodospreme u vodoopskrbnom sustavu

Vodosprema je objekt koja se nalazi između postojane dobave vode i opskrbnog područja, tj. između glavne crpne stanice i potrošača. Osnovne funkcije vodospreme u vodoopskrbnom sustavu su:

1. spremanje vode;
2. osiguranje potrebnog pogonskog tlaka u vodoopskrbnoj mreži;
3. sigurnost opskrbe.

Spremanje vode odnosi se na:

i. Spremanje vode vezano uz izravnjanje veličina protoke koja dotječe u vodospremu s količinama koje se troše u naselju, odnosno režima dotjecanja i potrošnje vode tijekom jednog dana (Volumen V_1 (m^3)). V_1 se kontinuirano mijenja ovisno o potrošnji i dotjecanju.

ii. Spremanje vode koja je nužna za gašenje požara u skladu s važećim Pravilnikom (Pravilnik, 2006) (Volumen V_2 (m^3)). V_2 mijenja se i troši od požara do požara;

iii. Spremanje vode za sve slučajeve poremećaja opskrbe koje se mogu javiti, odnosno to je rezervna količina vode za vodospremu (Volumen V_3 (m^3)). V_3 troši se samo kada se javi incidentne situacije koje ugrožavaju normalnu opskrbu naselja. Ovaj volumen se osigurava uglavnom radi mogućeg prekida dotjecanja vode zbog problema na zahvatu ili kvara crpnog sustava, a ponekad i zbog mogućeg prekida ili smanjenja opskrbe energijom;

iv. Spremanje vode vezano uz takozvani „mrtvi volumen“ koji predstavlja minimalno dozvoljenu razinu vode za osiguranje pogonskog tlaka u vodoopskrbnom sustavu (Volumen V_4 (m^3)). V_4 se iznimno troši kad je rezervna količina vode u vodospremi (V_3) potrošena.

Tlak u vodoopskrbnoj mreži ovisi o razini vode u vodospremi, odnosno o visinskom položaju vodospreme, te o veličini hidrauličkih gubitaka u vodoopskrbnom sustavu. U vodoopskrbnom području definiran je minimalni i maksimalni dozvoljeni tlak koji vodoopskrbni sustav mora osigurati. Minimalni slobodni tlak, koji treba osigurati u najvišem izljevnom mjestu u zgradama, reguliran je propisima i preporukama i uglavnom iznosi 5 m u satu maksimalne potrošnje. To je tlak koji omogućava nesmetano istjecanje vode na svim izljevnim mjestima i priključcima kućnih uređaja. Minimalni tlak u vodovodnoj mreži mora biti u skladu sa zahtjevima Pravilnika (Pravilnik, 2006) koji zahtijeva minimalni tlak od 2.5 bara u satu maksimalne potrošnje vode u naselju. Maksimalno dozvoljeni tlak u kritičnim točkama vodoopskrbne mreže (najniže geodetske kote cjevovoda) najčešće iznosi 6 - 8 bara (Margeta, 2010). Zadovoljavanje ovih tlakova postiže se izborom visinskog položaja vodospreme i hidrauličkih značajki opskrbnog cjevovoda i vodoopskrbne mreže. S obzirom da se vodospreme skoro uvijek nalaze iznad postrojenja za obradu sirove vode, odnosno zahvata sirove vode, nužno je koristiti crpnu stanicu za transport vode u vodospremu. U tom slučaju radi se o glavnoj crpnoj stanici pitke vode vodoopskrbnog sustava.

Vodosprema mora imati dovoljan volumen, mora osigurati kontinuitet opskrbe, biti nepropusna, sačuvati proizvodnu kakvoću vode, te biti ekonomski prihvatljiva za gradnju, održavanje i rad. Razlikujemo ukopane, poluukopane te vodospreme na terenu i iznad terena (koje se nazivaju vodotornjevima). Vodosprema, po svom položaju i funkciji, može biti ispred mjesta potrošnje ili iza mjesta potrošnje. Položaj vodospreme u vodoopskrbnom sustavu je rezultat optimalizacije rada sustava.

Vodosprema uz prikazane klasične funkcije i utjecaje u vodoopskrbnom sustavu ima veći i širi značaj koji danas sve više dolazi do izražaja. Njome se može kontrolirati proizvodnja i potrošnja energije, korištenje OIE te utjecati na ukupnu održivost sustava.

2.2. Dimenzioniranje vodospreme

Ukupni volumen vodospreme V_{uk} (m^3) čine efektivni volumeni vodospreme koji se sastoje četiri volumena:

$$V_{uk} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (1)$$

Ove veličine različite su od slučaja do slučaja jer svaki vodoopskrbni sustav je različit u odnosu na potrebe stanovništva, industrije i javnih ustanova, a posebno bolnica i vojarni, mogućih požara, te načina i mogućnosti rješavanja incidentnih situacija.

Volumen vodospreme V_1 izračunava se u skladu s planiranim režimom dotjecanja vode u vodospremu i planiranim režimom istjecanja vode iz vodospreme. Dimenzioniranje se obično obavlja grafički ili numerički odgovarajućim postupkom u skladu s potrebama, odnosno traženom preciznošću proračuna i valjanosti ulaznih podataka. U slučaju kad je poznat režim dotjecanja i istjecanja u grafičkom ili numeričkom obliku, potrebni volumen može se izračunati metodom integralne krivulje (Margeta, 2010). U ovom postupku sva voda koja u periodu bilanciranja dotječe ujedno i isteče, tako da je volumen vode u vodospremi na početku i na kraju perioda bilanciranja jednak. Uobičajeno se koristi metoda Riplea (Margeta, 2010). Metoda se sastoji u proračunu maksimalnog odstupanja između uzastopnih ispuštanja iz vodospreme Q_{izt} i dotjecanja u vodospremu Q_{ult} . Ukoliko se pretpostavi da je V_1 pozitivna ili negativna razlika ($Q_{ult} - Q_{izt}$) u vremenu t , maksimalna će vrijednost razlike V_1 između ispuštanja i dotjecanja u vremenu t do T biti jednaka:

$$V_1 = \max V_t = \max \left[\sum_{i=1}^j (Q_{ult} - Q_{izt}), 1 \leq j \leq t \right] \quad (2)$$

Ova relacija vrijedi samo ako u analiziranom vremenu istjecanje iz vodospreme u prosjeku nije veće ili manje od prosječnog dotjecanja, što je slučaj vodosprema u naselju. T u pravilu iznosi 1 dan, no za gradske vodospreme može biti najviše u rasponu do tjedan dana maksimalno (Margeta, 2010).

Određivanje protupožarne rezerve V_2 provodi se prema Pravilnik, 2006. Pri tome je potrebni volumen:

$$V_2 = \text{broj istovremenih požara} \times Q_{pož} \times T_{pož} \quad (3)$$

Volumen za incidentne situacije V_3 predviđa se za slučaj prekida dotoka vode u vodospremu. Ovaj volumen se koristi za vodoopskrbu za vrijeme dok se ne otkloni prekid (kvar, oštećenje, prekid napajanja električnom energijom). Volumen V_3 računa se kao:

$$V_3 = \text{broj dana prekida rada} \times \text{broj stan. (M)} \times q_{rez} \quad (4)$$

Mrtvi volumen V_4 je volumen, odnosno dubina vode nužna za održavanje pogonskog tlaka u vodoopskrbnom

sustavu. Obično je to dubina od 0.5 m do 1 m. Ovaj volumen će se zanemariti s obzirom na svoju malu veličinu.

Veličina operativnog volumena vodospreme V_1 je funkcija dotoka vode u vodospremu i istjecanja vode iz vodospreme. 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 1.



Slika 1. Shematski prikaz režima ulaza i izlaza vode iz vodospreme

2.3. Dimenzioniranje crpne stanice

Uloga crpke je transport vode s jednog mjesta na drugo, odnosno najčešće s niže kote na višu kotu terena. Crpne stanice najviše se koriste za transport vode: (i) od zahvata do postrojenja za preradu sirove vode, te (ii) od postrojenja za preradu sirove vode do vodospreme. Uglavnom se koriste centrifugalne crpke koje putem tlačnih cjevovoda omogućuju dizanje vode na više kote terena i prebacivanje vode na veće udaljenosti.

U ovom radu crpke imaju veliku ulogu zbog svojeg ekonomskog značaja na cijeli projekt. Zbog toga će se u nastavku rada izračunati potrošne količine energije tokom cijele godine i odabrati najbolji i najjeftiniji režim rada crpne stanice. Potrebni kapacitet crpne stanice Q_{CS} (m^3/h), (l/s) jednak je:

$$Q_{CS} = Q_{dnev,max} / T_{CS} \quad (5)$$

gdje je $Q_{dnev,max}$ maksimalna dnevna potrošnja vode (m^3/dan), T_{CS} je trajanje rada crpne stanice (h).

Potrebna ulazna snaga crpke P_{CS} (W) dobije se pomoću:

$$P_{CS} = \frac{\rho \times g \times Q_{dnev,max}}{\eta} \quad (6)$$

gdje je ρ gustoća tekućine (kg/m^3), H je manometarska visina dizanja (m), η je učinkovitost crpke (%).

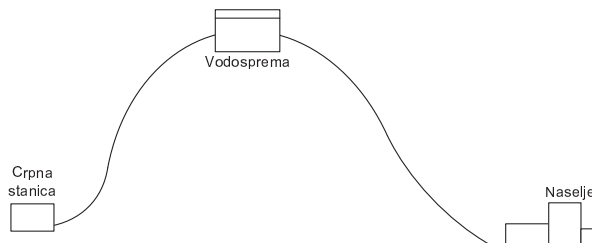
Dnevna potrošnje električne energije crpnih stanica N_{dnev} (kWh) dobije se pomoću:

$$N_{dnev} = P_{CS} \times T_{CS} \quad (7)$$

3. ANALIZA I RASPRAVA

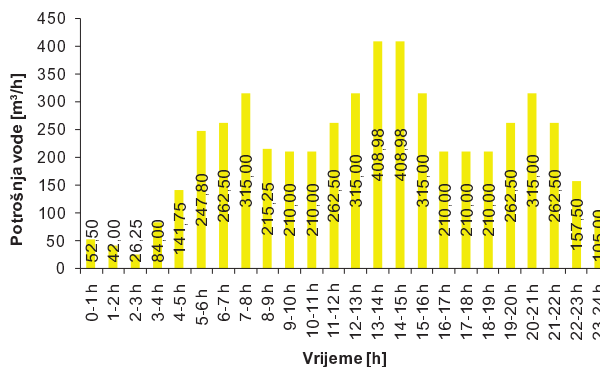
3.1. Ulazni podaci

Proračun se radi za jedan pretpostavljeni vodoopskrbni sustav, odnosno naselje, Slika 2. Pri tome je broj stanovnika $M = 30000$, specifična potrošnja vode $q_{spec} = 125$ $l/stan/dan$, maksimalni koeficijent dnevne neravnomjernosti $K_{D,N} = 1.4$, a maksimalni koeficijent satne neravnomjernosti $K_{S,N} = 1.87$.



Slika 2. Shema primjera koji se obrađuje

Ove veličine dobivene su iz pretpostavljenih režima potrošnje vode u naselju, dnevne i satne, Slika 3.



Slika 3. Prikaz stvarne potrošnje vode u vremenu od 0 do 24 h

Usvojena manometarska visina H_{CS} crpne stanice iznosi 30 m, dok je usvojena vrijednost učinkovitosti crpne stanice η jednaka 90 %.

Srednja dnevna potrošnja je $Q_{dnev,sred} = 3750 \text{ m}^3/\text{dan}$, dok je maksimalna dnevna potrošnja $Q_{dnev,max} = 5250 \text{ m}^3/\text{dan}$. Srednja satna potrošnja u maksimalnom danu potrošnje je $218.75 \text{ m}^3/\text{h}$, dok je maksimalna satna potrošnja jednaka $409.06 \text{ m}^3/\text{h}$. Ovo su tražene veličine na mjestu potrošnje vode. Međutim, svaki sustav ima određene gubitke vode tako da se isti moraju uzeti u obzir kako bi svi korisnici dobili tražene količine vode.

Usvojena ukupna duljina svih vodovodnih cijevi iznosi $SL = 36000 \text{ m}$. Usvojeni gubici vode u vodoopskrbnoj mreži po metru dužinom jednaki su $q_{spec,gub} = 0.0008 \text{ l/s/m}$. Znači, dnevni gubici jednaki su $2488.32 \text{ m}^3/\text{dan}$, dok su satni gubici vode jednaki $103.68 \text{ m}^3/\text{h}$. Ovo su prosječne veličine gubitaka. Stvarne veličine variraju iz sata u sat s obzirom na promjenu tlaka u mreži, koja je posljedica potrošnje vode. Ukupna dnevna potrebna količina vode za dimenzioniranje vodospreme je $7738.32 \text{ m}^3/\text{dan}$.

3.2. Varijante

Analiziraju se tri režima dotjecanja vode u vodospremu, odnosno s obzirom na moguću potrošnju energije: (a) kontinuirano jednoliko 24 sata, (b) u periodu tipične insolacije te (c) u periodu jeftine električne energije, od 22 do 8 sati. Zbog promjenjivog trajanja insolacije tijekom godine, razmatraju se tri varijante trajanja insolacije; (b1) u periodu od 6 do 20 sati, b2 u periodu od 8 do 18 sati te (b3) u periodu od 10 do 16 sati. Trajanje insolacije kao i trajanje crpljenja vode ima direktan utjecaj na rad crpne stanice i time potrebni volumen vodospreme. U ovom radu su se crpile iste količine vode u svim analiziranim varijantama. Normalno, trajanje insolacije i količina vode koja se mora prepumpati imaju i direktan utjecaj na potrebnu snagu FN postrojenja i snagu crpne stanice. Isto tako i režim tj. trajanje crpljenja uz korištenje energije iz energetskog sustava utječe na potrebnu snagu dobave energije i same crpne stanice.

U prvom slučaju (a) energija se troši kontinuirano bez razlike na cijenu tijekom dana. Ovo je varijanta u kojoj je najmanja veličina kapaciteta, odnosno angažirane snage crpnog sustava. U drugom slučaju (b) izvor energije je

Sunce, stoga je energija besplatna, ali je potrebno izgraditi FN postrojenje. U trećem slučaju (c) energija se troši u periodu jeftine električne energije. Normalno, kraći period crpljenja rezultira većim kapacitetom, odnosno većom angažiranom snagom crpnog sustava. Potpuna analiza varijantnih rješenja je složen zadatak koji je prelazio okvire i završnog i ovog rada. Zato je u ovom radu samo obavljen proračun kapaciteta glavnih dijelova sustava bez detaljne ekonomske analize.

U proračunu i analizama se uzimaju u obzir volumeni V_1 , V_2 i V_3 . Pri tome će se volumen V_1 dobiti korištenjem jednadžbe (2) i on će biti promjenjiv za sve tri varijante. Volumen V_2 dobiti će se korištenjem jednadžbe (3) i on će biti jednak za sve tri varijante. Pri tome se pretpostavlja prekid rada u dotoku koji iznosi dva dana, specifična vodoopskrbna količina iznosi $q_{rez} = 0.007 \text{ m}^3/\text{stan}/\text{dan}$. Proračunati volumen V_2 iznosi 420 m^3 . Pretpostavlja se da je broj istovremenih požara jednak 2. Količina vode za gašenje požara: $Q_{pož} = 2 \times 25 = 50 \text{ l/s} = 180 \text{ m}^3/\text{h}$. Pretpostavlja se vrijeme trajanja požara: $T_{pož} = 2 \text{ sata}$. Potrebni volumen za protupožarne rezerve V_3 , dobiven korištenjem jednadžbe (4) je 360 m^3 . Ukupni volumen V dobiti će se korištenjem jednadžbe (1).

3.3. Rezultati

3.3.1. Varijanta sa konstantnim dotokom vode u vodospremu u periodu od 24 h

Korištenjem jednadžbe (2) dobiveno je da je volumen V_1 jednak 1359 m^3 , dok je ukupni volumen vodospreme, prema jednadžbi (1) jednak $V_{uk1} = 2139 \text{ m}^3$. Potrebni kapacitet crpne stanice Q_{CS} , dobiven korištenjem jednadžbe (5), jednak je $322 \text{ m}^3/\text{h}$.

3.3.2. Varijanta sa konstantnim dotokom vode u vodospremu u vrijeme insolacije (od 8 do 18 h)

Rad crpne stanice u svakom danu omogućen je samo za period trajanja Sunčevog zračenja, izraženo u satima. Rezultati proračuna za tri različita trajanja crpljenja uz korištenje jednadžbi (1-5) prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Kapaciteti crpne stanice i volumeni vodospreme za različita trajanja Sunčevog zračenja

Trajanje insolacije (h)	Kapacitet crpne stan. Q_{CS} (m^3/h)	Volumen vodospreme V (m^3)
b1) 6 do 20 (14 h)	553	2894
b2) 8 do 18 (10 h)	774	4442
b3) 10 do 16 (6 h)	1290	5688

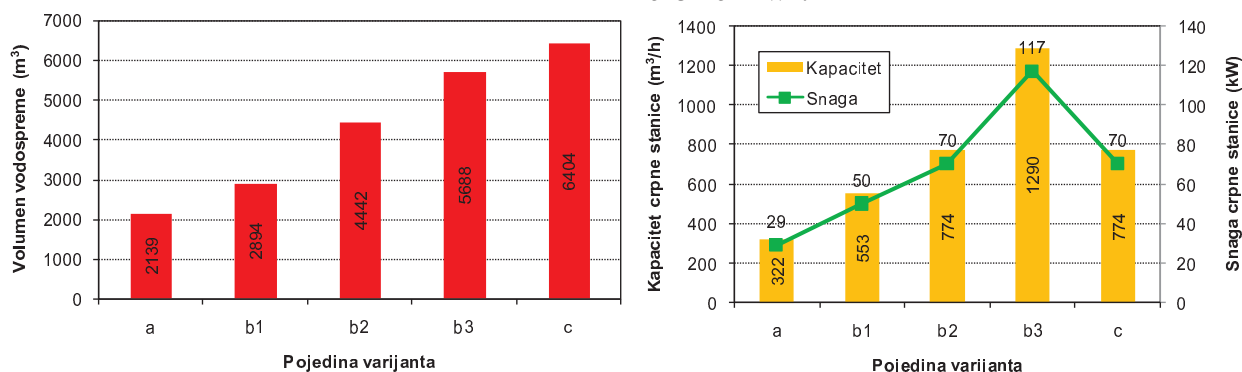
3.3.3. Varijanta sa konstantnim dotokom vode u vodospremu u vrijeme jeftinije električne energije (od 22 do 8 h)

Ukoliko se usvoji da će crpna stanica raditi tijekom perioda u kojem je električna energija jeftinija, dakle od 22 do 8 sati ($T_{CS} = 10$ sati), režim dotoka vode u vodospremu je drugačiji, a kapacitet glavne crpne stanice

veći u odnosu na kapacitet crpne stanice tijekom crpljenja vode u trajanju od 24 h (varijanta a). Korištenjem jednadžbe (2) dobiveno je da je volumen V_1 jednak 5624 m^3 , dok je ukupni volumen vodospreme prilikom dotoka vode tokom jeftine struje (22-8 h) $V_{uk3} = 6404 \text{ m}^3$, jednadžba (1). Potrebni kapacitet crpne stanice Q_{CS} , dobiven korištenjem jednadžbe (5), jednak je $774 \text{ m}^3/\text{h}$.

3.3.4. Sumarni prikaz rezultata

Slika 4. prikazuje ukupne potrebne veličine volumena vodospreme te kapaciteta i snage crpne stanice za sve analizirane varijante.



Slika 4. Potrebne veličine volumena vodospreme, kapaciteta i snage crpne stanice za svaku varijantu

4. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

4.1. Ekonomske značajke

Ekonomske značajke sustava crpna stanica - vodosprema sagledati će se preko kapitalnih troškova crpne stanice i vodospreme. Izračunati će se samo osnovna

cijena (kapitalni troškovi) crpne stanice bez cijene energije.

Usvojiti će se prosječne vrijednosti iz literature i proračunati snaga crpke po vrijednostima koje iznose 1 € (7.5 Kn) za 1 W snage crpne stanice i 400 € (3000 Kn) za 1 m³ vodospreme (Hidroing, 2004), (Hrvatske vode, 2008), (Penstar, 2012), (White International, 2012). Proračun je prikazan u Tablici 2.

Tablica 2. Proračun troškova crpne stanice i vodospreme

Režim rada crpke	Troškovi crpne stanice (Kn)	Troškovi vodospreme (Kn)	Ukupni troškovi (Kn)
(a) 0 do 24 sati	219655	6418080	6637735
(b1) od 6 do 20 sati	376554	8682420	9058974
(b2) od 8 do 18 sati	527172	13325250	13852422
(b3) od 10 do 16 sati	878629	17063100	17941729
(c) od 22 do 8 sati	527172	19212690	19739862

Proračun pokazuje da cjelodnevni rad crpke (Varijanta a) ima najmanje investicijske troškove. Ovo je varijanta u kojoj je i najmanja veličina angažirane snage crpnog sustava.

U trećem slučaju (Varijanta c) troši se energija u periodu jeftine električne energije. U ovom slučaju je kraći period crpljenja što rezultira većom angažiranom snagom crpnog sustava i većim potrebnim volumenom vodospreme što rezultira i većim investicijskim troškovima.

U slučaju primjene FN postrojenja i korištenja solarne energije vidljivo je da period trajanja insolacije ima bitan utjecaj na kapacitet objekata i troškove. Sunce isijava tijekom dana kada je i najveća potrošnja vode zbog čega su potrebni znatno manji volumeni vodospreme. Međutim, što su kraći periodi potrebne su veće snage crpne stanice i time FN postrojenja.

Daje se pojednostavljeni proračun i prikaz troškova energije (Tablica 3) za sve tri varijante dotoka vode u vodospremu za sljedećih 20 godina. Slijedeće cijene tarifa odabrati će se iz (Hrvatska Elektroprivreda, 2014) te proračunati cijene električne energije za razdoblje od 20 godina za sve tri varijante dotoka vode u vodospremu. Pri tome se razmatraju dva slučaja insolacije.

Prvi je za teoretski slučaj potencijalne insolacije za svaki dan u godini s pretpostavkom da nema oblačnih i/ili kišnih dana. Drugi slučaj je za usvojeni broj dana bez prirodne insolacije odnosno nedovoljne insolacije (oblačni i/ili kišni dani), koji za Hrvatsku iznosi u prosjeku 80 dana godišnje (Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana, 2015) (*). U skladu s time, potrebno je osigurati dodatnu potrebnu količinu električne energije.

U pravilu, proračun bi se trebao izvršiti primjenom metode Neto Sadašnje vrijednosti, uzevši u obzir vremensku vrijednost novca. No, s obzirom na opseg i

sadržaj ovog rada, kao i s obzirom da je rad zamišljen na konceptualnoj razini analiziranog problema, spomenuta metoda neće se primijeniti. Cijena je odabrana na osnovu aktualnih podataka iz (Hrvatska Elektroprivreda, 2014).

Pri tome je za nisku tarifu usvojen plavi model (jedinstvena tarifa, od 0 do 24 h, koja iznosi 1.07 Kn/kWh

i bijeli model za jeftinu tarifu, od 22 do 8 h, koja iznosi 0.63 Kn/kWh. U obzir se uzima i naknada za mjernu uslugu koja iznosi 41.30 Kn/mjesecu za obje tarife. Također se u obzir uzima naknada za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora i kogeneracije u iznosu od 0.035 Kn/kWh.

Tablica 3. Proračun troškova energije u razdoblju od 20 godina

Režim rada crpke	God. cijena el. energije (Kn)	Cijena el. energije za 20 god. (Kn)
(a) 0 do 24 sati	283992	5679834
(b1) od 6 do 20 sati	0 (*62632)	0 (*1252641)
(b2) od 8 do 18 sati	0 (*62632)	0 (*1252641)
(b3) od 10 do 16 sati	0 (*62632)	0 (*1252641)
(c) od 22 do 8 sati	171106	3422119

4.2. Ekološke značajke

Ekološke značajke sagledati će se preko ekvivalentne količine CO₂ koje se oslobađaju korištenjem fosilnih goriva, odnosno koje se neće ispustiti primjenom solarne energije. Ta količina iznosi 0.95 kg CO₂/kWh ukoliko se pretpostavi da je električna energija proizvedena u termoelektrani koja koristi ugljen (Glasnović i Margeta, 2011). Pošto varijanta sa dotokom vode i radom crpne stanice za vrijeme insolacije (b) ne proizvodi i ne ispušta CO₂, proračun će se odnositi samo na varijantu sa konstantnim dotokom (a) i dotokom vode u vodospremu za vrijeme jeftine struje (c). Proračun je izvršen za jednu godinu, pri čemu je emisija CO₂ jednaka 244 t, te za plansko razdoblje od 20 godina, pri čemu je emisija CO₂ jednaka 4875 t. Jasno je da je korištenje OIE sa ekološkog stanovišta najpovoljnije zbog čega se isto predlaže u svim strategijama održivosti.

4.3. Socijalne značajke

Za društvenu zajednicu su najvažnije socijalne značajke koje integralno sagledavaju cijenu usluge vodoopskrbe i održivost. To znači da bi trebalo proračunati cijenu vode i socijalni trošak klimatskih promjena i s tim u svezi smanjenje ispuštanja CO₂. U završnom i u ovom radu takav proračun nije napravljen. Održivost podrazumijeva i sigurnost opskrbe, a što je u slučaju vode za opskrbu stanovništva od izuzetne važnosti. Zato se svaki vodoopskrbni sustav opskrbljuje rezervnim elementima kojima se zadovoljava propisana sigurnost opskrbe vodom.

Ako se solarna energija koristi kao izvor napajanja crpne stanice, tada je potrebno u obzir uzeti i izvjestan rizik koji se može pojaviti zbog naoblake tj. nedovoljne ili premale jakosti insolacije. U tom slučaju može doći do prekida ili smanjenja opskrbe električnom energijom te time mogućeg ugrožavanja sigurnosti vodoopskrbe. Slično se razmatra i u slučajevima kada se koriste klasični izvori energije. Zato se kao rezerva za incidentne situacije uvijek instaliraju dizel agregati te se volumen vodospreme povećava. U slučaju napajanja sa solarnom energijom problem se otklanja osiguranjem solarnih akumulatora (baterija) uglavnom za dio redovitih potreba, dizel agregatom ili korištenjem električne energije putem klasične elektroenergetske mreže. Ovisno o instaliranom

kapacitetu rezervnog sustava napajanje električnom energijom dimenzionira se i rezervni volumen vodospreme iz kojeg se pokriva razlika u redovitoj opskrbi. Instaliranje rezervnih kapaciteta povećava ukupnu cijenu izvedbe i održavanja sustava.

Međutim, u slučaju korištenja solarne energije nužna rezerva za nedostatak insolacije se može riješiti i odgovarajućom metodologijom dimenzioniranja sustava FN postrojenje-Crpna stanica-Vodosprema. U ovom slučaju dimenzioniranje sustava se treba provesti za cijeli planski period. Znači, dimenzioniranje treba da uzme u obzir izmjerene dnevne vrijednosti insolacije kako su zabilježene u prošlom periodu, te dnevne vrijednosti potreba za vodom kako su planirane tijekom godine. Potrebni kapaciteti fotonaponskog postrojenja, crpne stanice i vodospreme su najveći izračunati kapaciteti u vremenskom nizu raspoloživih podataka. Kako su godišnji hodogrami raspoložive insolacije i potrebnih količina vode dinamički/trendovski slični, proizlazi da će sustav ljeti imati višak kapaciteta FN postrojenja jer je isti dimenzioniran na kritične (minimalne) zimske insolacije, a zimi višak volumena vodospreme jer je isti dimenzioniran na najveće ljetne potrebe za vodom. Koliki je taj višak, te je li dovoljan za planiranu sigurnost opskrbe treba utvrditi za svaki konkretni slučaj koji se rješava.

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana pojednostavljena analiza utjecaja električne energije na značajke sustava crpna stanica-vodosprema i održivost sustava, odnosno na njegove ekonomske, ekološke i socijalne ciljeve. Dobivene veličine kapaciteta crpne stanice i volumena vodospreme proračunate su s obzirom na tri različita načina korištenja električne energije za crpljenje vode u gradsku vodospremu. To je rad crpne stanice konstantno tijekom cijelog dana (24 h), zatim uz korištenje solarne energije (uz tri različita trajanja insolacije), te uz rad crpne stanice tijekom perioda jeftinije električne energije (od 22 do 8 h).

Kontinuirani rad tijekom 24 sata (varijanta a)) osigurava najmanji instalirani kapacitet crpne stanice, dok volumen vodospreme ovisi o režimu potrošnje vode u naselju, a najviše o vršnoj potrošnji vode. Ovaj režim rada crpne stanice troši jeftinu energiju tijekom noći, dok tijekom dana u periodu vršne energije troši najskuplju energiju. Pri tome je kapacitet crpne stanice ove varijante

tri puta manji od varijante b3 tj. najvećeg kapaciteta i najmanji je u odnosu na sve varijante. U ovom slučaju je volumen vodospreme također najmanji, pri čemu je raspon vrijednosti između ovog i najvećeg volumena (varijanta c)) jednak 33 %.

Rad crpne stanice samo tijekom noći (varijanta c), tj. tijekom perioda u kojem je jeftina energija za rezultat ima značajno veći potrebni kapacitet crpne stanice i vodospreme s obzirom na varijantu a) jer crpna stanica radi tijekom noći kada je potrošnja vode najmanja tako da se tijekom noći sve dnevne potrošne količine (najveće) moraju precrpiti i spremi u vodospremu. U ovom slučaju, troškovi električne energije su najmanji s obzirom na sve varijante, pri čemu ukupni raspon između ove potrošnje i najveće iznosi 50 %. U oba navedena slučaj koristi se energija iz elektroenergetskog sustava, pretežito bazirana na fosilnim gorivima, pa su zbog toga i utjecaji na klimatske promjene najveći.

Korištenje solarne energije rezultira različitim kapacitetima crpne stanice i vodospreme ovisno o trajanju perioda insolacije i potrošnje vode. U ovom slučaju ulazna energija je besplatna, ali treba izgraditi FN postrojenje. U radu su razmotrena tri različita perioda rada bez analize kapaciteta i troškova izgradnje FN postrojenja. S obzirom da u ovom slučaju crpna stanica radi tijekom dana kada je potrošnja vode najveća potrebni su veliki kapaciteti crpne stanice (generalno gledano - uvijek manji nego u slučaju c), ali su potrebni vrlo mali volumeni vodospreme. U ovom slučaju proizvodnja energije ne utječe negativno na klimatske promjene, već naprotiv doprinosi njihovom smanjenju.

Dobiveni rezultati pojednostavljeno pokazuju osnovne prednosti i nedostatke korištenja različitih električnih energija. Najpogodniji oblik energije bitno ovisi o preferencijama donositelja odluke. Ako se preferiraju i minimiziraju troškovi investicije, tada je očito varijanta (a) najprihvatljivija. Ako se preferiraju troškovi potrošnje energije, tada je vjerojatno varijanta (c) najjeftinija. Ako se preferiraju ekološki kriteriji tada je očito varijanta (b) najprihvatljivija.

Uzevši u obzir trenutno ekonomsko stanje u društvu, razumljivo je da će ekonomski kriterij biti dominantan i da će se na osnovu njega prvenstveno birati najjeftinija rješenja (investicija + pogon). Međutim, uzevši u obzir negativne klimatske promjene, aktualne zakonske smjernice i odredbe za smanjenje emisija CO₂ (European Commission, 2009), (European Commission, 2014) kao i aktualne trendove realizacije održivih odnosno "pametnih" gradova, tada ekološki i socijalni kriteriji, kao i rizik i sigurnost u radu crpne stanice moraju biti obuhvaćeni u izboru konačne varijante rješenja. Primjenom višekriterijskih metoda te detaljnom SWOT analizom cjelovito obrađenih varijanti, dobio bi se stvarni uvid u njihov ukupni poredak, no navedeno prelazi opseg i namjenu ovog rada.

Dobiveni rezultati pokazuju da je uvođenje FN sustava za rad crpnih sustava u spregnutom radu s vodosprema

izvedivo te ekološki te dijelom i društveno opravdano. Takovi sustav je pouzdan ako se dimenzionira odgovarajućom metodologijom koja uzima u obzir promjenjivost potreba za vodom i insolacije tijekom godine. Uzimajući u obzir stalni pad cijene FN sustava te povećanje njihove ekonomičnosti proizlazi da bi vrlo skoro ovakvi sustavi mogli biti ekonomski i društveno opravdani.

6. LITERATURA

- 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
- Đurin, B., Margeta, J., (2014) Analysis of the Possible Use of Solar Photovoltaic Energy in Urban Water Supply Systems. *Water*, 6: 1546-1561
- European Commission, (2014) 2030 framework for climate and energy policies, Bruxelles, Belgija
- European Commission, (2009) Directive 2009/29/EC, Bruxelles, Belgija
- Glasnović, Z., Margeta, J., (2011) Vision of total renewable electricity scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (4): 1873-1884
- Hidroing d.o.o. Split, (2004) Regionalni vodoopskrbni sustav: Neretva, Pelješac, Korčula, Lastovo, Mljet - Novelacija pred-investicijskog programa, Split, Hrvatska. Hrvatska elektroprivreda, <http://www.hep.hr/ods/kupci/poduzetnistvo.aspx> (datum pristupa web stranici 03.09.2014.)
- Hrvatske vode, (2008) Vodoopskrbni plan Splitsko-Dalmatinske županije, Split, Hrvatska
- Margeta, J., (2010) Vodoopskrba naselja: planiranje, projektiranje, upravljanje, obrada vode, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet
- Penstar Ltd., (2012) Cjenik, Penstar Ltd., Cardigan, UK
- Pravilnik o hidrantskoj mreži za gašenje požara, (2006) NN 8/06, Zagreb
- 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
- White International, (2012) CNP Industrial Pumps 2011, cjenik, Mippera, Australia
- Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana, <http://jadrana.gfz.hr/naoblaka.html>, datum pristupa 30.04.2015
- 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