

Primljen / Received: 8.4.2017.

Ispravljen / Corrected: 1.8.2017.

Prihvaćen / Accepted: 10.8.2017.

Dostupno online / Available online: 10.9.2017.

Utjecaj opružnog ventila na učinkovitost vodoopskrbnih sustava

Autori:



Doc.dr.sc. **Dražen Vouk**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
dvouk@grad.hr



Vladimir Poljak, dipl.ing.građ.
Hidroprojekt-ing d.o.o.
vpoljak@hp-ing.hr



Jurica Kovač, konzultant za gubitke vode
Aqua Libera d.o.o.
jurica.kovac@mail.com



Luka Jelić, dipl.ing.građ.
Hidroprojekt-ing d.o.o.
ljelic@hp-ing.hr

Stručni rad

Dražen Vouk, Vladimir Poljak, Jurica Kovač, Luka Jelić

Utjecaj opružnog ventila na učinkovitost vodoopskrbnih sustava

Analizirane su karakteristike rada i učinkovitost ventila za regulaciju nizvodnog tlaka s posebnim osvrtom na mehaničke opružne ventile. Iznesene su teoretske osnove rada opružnih ventila s kritičkim osvrtom na njihovu funkcionalnost i učinkovitost u usporedbi s hidrauličkim ventilima. Na konkretnim primjerima dan je usporedni prikaz rada opružnih i hidrauličkih ventila za regulaciju tlakova s aspekta generiranja određenih hidrauličkih stanja i učinkovitost u upravljanju vodnim gubitcima. Dobiveni rezultati upućuju na potrebu da se opružni ventili zamijene hidrauličkim.

Ključne riječi:

vodoopskrbni sustav, regulacijski ventil, opružni ventil, tlak, vodni gubitci

Professional paper

Dražen Vouk, Vladimir Poljak, Jurica Kovač, Luka Jelić

The influence of spring valve on the efficiency of water supply systems

The operating characteristics and efficiency of the valve used for regulation of downstream pressure are analysed, and a special emphasis is placed on mechanical spring valves. Theoretical notions about operation of spring valves are given, with a critical review of their functionality and efficiency as compared to hydraulic valves. Spring valves and hydraulic valves are compared on real-life examples with regard to their use for regulation of pressure from the aspect of generation of specific hydraulic states and efficiency in water loss management. The results obtained in this research point to the need to replace spring valves with hydraulic valves.

Key words:

water supply system, regulation valve, spring valve, pressure, water losses

Fachbericht

Dražen Vouk, Vladimir Poljak, Jurica Kovač, Luka Jelić

Auswirkung des federbelasteten Ventils auf die Effizienz von Wasserversorgungssystemen

Analysiert wurden die Merkmale des Betriebs und der Effizienz des nachgeschalteten Druckregelventils, mit einem besonderen Rückblick auf mechanische federbelastete Ventile. Dargestellt werden die theoretischen Grundlagen der Funktion von federbelasteten Ventilen mit einem kritischen Rückblick auf ihre Funktionalität und Effizienz im Vergleich zu hydraulischen Ventilen. An konkreten Beispielen wird eine vergleichende Darstellung von federbelasteten und hydraulischen Ventilen bei der Druckregelung vom Aspekt der Generierung von bestimmten hydraulischen Zuständen und der Effizienz in der Steuerung von Wasserverlusten gegeben. Die gewonnenen Ergebnisse weisen auf die Notwendigkeit hin, federbelastete Ventile durch hydraulische zu ersetzen.

Schlüsselwörter:

Wasserversorgungssystem, Regelventil, federbelastetes Ventil, Druck, Wasserverluste

1. Uvod

Odgovarajuća opskrba stanovništva vodom iz javnih vodoopskrbnih sustava te unapređivanje gospodarenja postojećim sustavima zauzimaju sve značajnije mjesto u cjelokupnoj problematici vodnoga gospodarstva u Hrvatskoj. U svim se naseljima koja se pitkom vodom opskrbljuju iz sustava javne vodoopskrbe, neovisno radi li se o regionalnim ili lokalnim, javlja potreba za detaljnom provjerom i analizom postojećeg stanja na temelju kojih bi se prepoznale eventualne nepravilnosti u dosadašnjem radu, ali i mogućnosti unapređenja i poboljšanja. Pritom se ističe sklonost za postizanje povoljnijih hidrauličkih i pogonskih uvjeta tečenja, osiguravanje redovne opskrbe korisnika uz smanjene troškova dobave vode, ali i za smanjivanje vodnih gubitaka koji mogu znatno financijski opteretiti isporučitelje vodnih usluga [1-3].

Poseban problem mnogih vodoopskrbnih sustava u Hrvatskoj jesu neracionalno visoki tlakovi u cjevovodnim mrežama te stoga neodrživo velike količine vodnih gubitaka. Prosječna je vrijednost tih vodnih gubitaka u Hrvatskoj približno 40 %, s tim da u nekim sustavima udio vodnih gubitaka dostiže vrijednosti i veće od 80 % u odnosu na zahvaćene količine vode [4]. Sve to upućuje na mogućnosti i potrebe unapređivanja postojećih vodoopskrbnih sustava. Pri provođenju analiza sadašnjeg stanja važno je prepoznati uzroke svakoga uočenog nedostatka, što prije svega podrazumijeva poznavanje rada svakoga karakterističnog elementa sustava.

Izrada i razvoj ventila za regulaciju tlakova potaknula je znatne promjene u stajalištima kako projektirati, graditi, rekonstruirati i unapređivati vodoopskrbne sustave. Ugradnja ventila za regulaciju tlakova omogućila je znatno bolju kontrolu rada vodoopskrbnih sustava u cijelosti ili u dijelovima i osigurala kvalitetniju opskrbu vodom krajnjih korisnika, ali i povećala učinkovitosti upravljanja vodnim gubitcima. Ventili za regulaciju tlakova omogućuju kontinuirano održavanje minimalno potrebnih tlakova u nizvodnim dijelovima sustava, osiguravaju kvalitetniju uslugu dobave vode, smanjuju količine vodnih gubitaka i povećavaju trajanje cjevovodne mreže. Danas se upotrebljavaju dva osnovna tipa ventila za regulaciju tlakova: opružni i hidraulički. U Hrvatskoj prevladava primjena opružnih ventila. Prema analizama većeg broja vodoopskrbnih sustava, koje su proveli autori ovog rada, uočene su određene nepravilnosti u radu opružnih ventila. Stoga se pojavila potreba da se detaljno analizira rad opružnih ventila i usporedi s hidrauličkim, ali i da se prouče njihove hidrauličke i pogonske karakteristike i učinkovitost u upravljanju vodnim gubitcima.

Radi boljšega razumijevanja problematike vodnih gubitaka i njihovim učinkovitijim upravljanjem, Međunarodno udruženje za vode (eng. *International Water Association* - IWA) razvilo je tzv. IWA metodologiju. Inače je i u Hrvatskoj tijekom posljednjih godina uspješno primijenjena ta metodologija [1, 3, 5-8]. U radu su na konkretnim primjerima u provođenju hidrauličkih analiza i analiza vodnih gubitaka primijenjene osnovne smjernice IWA metodologije.

Današnji tehnološki razvoj omogućuje da se mjerenjima protoka i tlakova te hidrauličkim analizama, koristeći sofisticirane matematičke modele, mogu detaljno analizirati načini rada i učinci opružnih i hidrauličkih ventila za regulaciju tlaka. U okvirima svjetske prakse [9], primjenom različitih matematičkih modela napušta se koncept konvencionalnih metoda analiza vodoopskrbnih sustava i njihovih pojedinih dijelova i elemenata, a koje u praksi izuzetno teško mogu opisati određena hidraulička stanja. Isto tako napušta se i koncept analize vodoopskrbnih sustava na temelju trenutačnih podataka, već se primjenjuju duža razdoblja koja uključuju dugotrajnija mjerenja protoka i tlakova (od nekoliko sati do nekoliko dana), i koja rezultiraju pouzdanijim rezultatima i donošenjem pouzdanijih zaključaka.

U radu su provedene kvalitativne komparativne analize opružnog i hidrauličkog ventila na konkretnim vodoopskrbnim sustavima za koja su izrađeni detaljni matematički modeli da se mogu donijeti pravilni zaključci o usporednom radu opružnih i hidrauličkih ventila za regulaciju tlaka. Kako bi se potvrdile prethodne teoretske pretpostavke, na terenu su provedena i konkretna mjerenja protoka i tlakova. Dobiveni rezultati su naknadno korišteni kako bi se kvantificirao utjecaj opružnih i hidrauličkih ventila na učinkovitost vodoopskrbnih sustava u upravljanju vodnim gubitcima.

2. Metodologija

2.1. Regulacijski ventili za snižavanje tlaka nizvodno od ventila

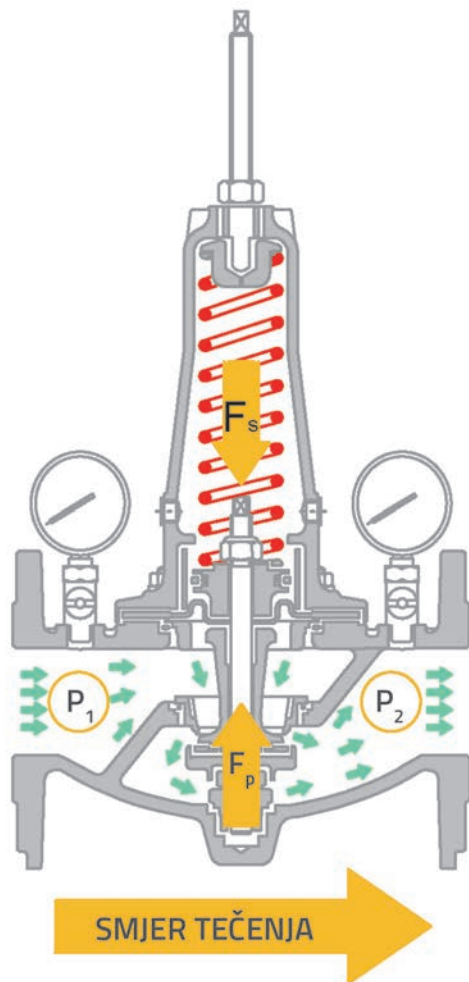
Da bi se u dijelovima vodoopskrbnih sustava izbjegle situacije u kojima zbog nepovoljnih terenskih prilika dolazi do pojave neželjenih hidrauličkih i pogonskih stanja koji se prije svega očituju kroz pojavu visokih tlakova, a posljedično i povećanih količina vodnih gubitaka, učestalije pojave kvarova, smanjivanja vijeka trajanja cjevovodne mreže i slično, najčešće se ugrađuju ventili za regulaciju tlakova. Funkcija je ventila za regulaciju održavanje minimalnih nizvodnih tlakova u mreži potrebnih za normalnu opskrbu korisnika. Drugim riječima, ventili za regulaciju tlakova kontroliraju tlakove u nizvodnom dijelu sustava tako da ne dopuštaju pojavu nepotrebno visokih tlakova.

Ventili za regulaciju tlaka razlikuju se ovisno o konstrukcijskim karakteristikama i načinu rada, ali ih se općenito može podijeliti u nekontrolirane i kontrolirane. U ovom su radu analizirana dva osnovna tipa regulacijskih ventila za snižavanje tlakova – opružni (nekontrolirani) i hidraulički (kontrolirani) ventili za redukciju tlaka.

2.1.1. Opružni ventili

Osnovna je prednost opružnih ventila relativno niska cijena. Upravo je to osnovni razlog njihove učestale primjene u vodoopskrbnim sustavima u Hrvatskoj. Analizom povijesnog razvoja opružnih ventila može se zaključiti da su početno razvijeni za regulaciju tlakova u sustavima navodnjavanja.

Potom je počela njihova primjena i u vodoopskrbnim sustavima, ponajprije na kraćim ograncima cjevovodne mreže i kućnim priključcima, da bi se nakon toga počeli primjenjivati i na glavnim vodoopskrbnim mrežama (slika 1.).



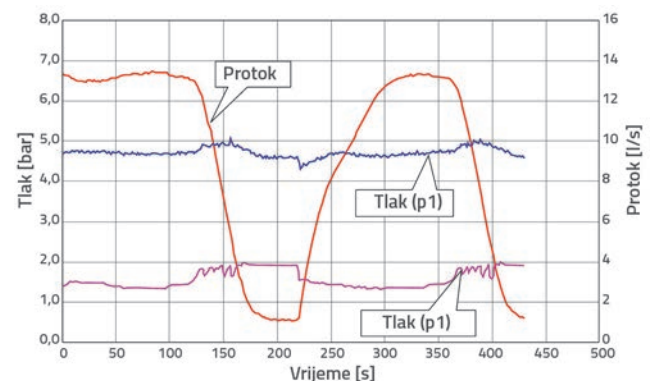
Slika 1. Presjek opružnog ventila

Na postavljenoj vrijednosti sila opruge F_s je iste vrijednosti kao i sila F_p . Kada se dolazni tlak P_1 povećava i odlazni tlak P_2 ima tendenciju povećanja, ali se pladanj ventila zatvara i održava konstantnim nizvodni tlak P_2 .

Na slici 2. je uočljivo da pri promjeni protoka, a time i promjeni ulaznih tlakova, dolazi i do određene promjene nizvodnih tlakova, što se podudara s vremenom trajanja tih promjena. Znači da se smanjivanje uzvodnih tlakova odražava i na smanjivanje nizvodnih tlakova. Vrijedi i obrnuto pravilo da kada uzvodni tlakovi rastu, rastu i nizvodni tlakovi. Takva stanja utječu na hidrauličke i pogonske uvjete nizvodno u sustavu, gdje se, primjerice, zbog većih protoka (poput požarnog opterećenja), mogu pojaviti nedostatni tlakovi, dok se s druge strane u uvjetima manje potrošnje (noćno razdoblje) mogu pojavljivati nepotrebno visoki tlakovi,

s nepovoljnim utjecajem na povećanje broja puknuća, vodnih gubitaka i dr. Iz tog razloga opružne se ventile svrstava u kategoriju nekontroliranih ventila. Odabiru tipa opružnih ventila na konkretnoj lokaciji potrebno je pridati posebnu pozornost. Karakteristike rada ventila su u funkciji osjetljivosti ventila na vanjske faktore (promjene protoka te uzvodnih i nizvodnih tlakova) što u konačnici utječe na učinkovitost ventila. Osjetljivost se ventila znatno povećava u radu izvan nominalnog područja djelovanja, pa pritom ventil radi s manjom učinkovitošću.

Za opružne ventile različitih proizvođača laboratorijskim su testiranjima utvrđeni hidraulički odnosi slični onima prikazanim na slici 2.

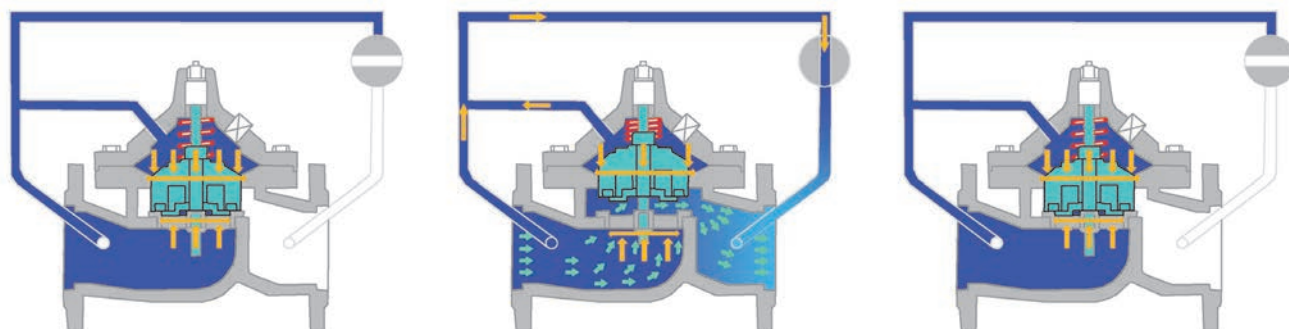


Slika 2. Odnosi protoka i tlaka uzvodno i nizvodno od opružnog ventila (p1 – tlak uzvodno od opružnog ventila; p2 – tlak nizvodno od opružnog ventila)

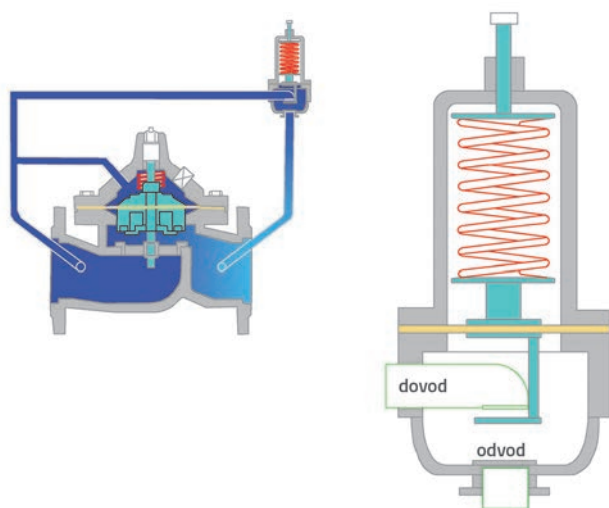
2.1.2. Hidraulički ventili

Daljnijim tehnološkim razvojem i kao odgovor na nedostatke rada i učinkovitosti opružnih ventila konstruirani su hidraulički ventili za regulaciju tlakova (slika 3.), a princip je njihova rada opisan u nastavku teksta. U početnim su uvjetima izjednačeni tlakovi u dolaznom cjevovodu i membranskoj komori pa je glavni membranski ventil zatvoren. Otvaranjem ventila na obilaznom vodu (uska kontrolna cijev) pokreće se protok u kontrolnoj cijevi i pritom se pojavljuju linijski i lokalni gubitci tlaka koji rezultiraju smanjenjem tlaka u membranskoj komori te se zbog razlike tlakova u dovodnoj cijevi i komori otvara glavni ventil. Kada se pokusni ventil zatvara, prestaje i protok kroz kontrolnu cijev, ne dolazi do gubitaka tlaka, izjednačavaju se tlakovi u dovodnoj cijevi i membranskoj komori pa se zbog veće površine sa strane membranske komore glavni ventil potiskuje i zatvara.

Sofisticiraniji oblici hidrauličkih ventila na uskoj kontrolnoj cijevi imaju dodatno ugrađen pokusni ventil. Taj je ventil opružnog tipa i ima funkciju dodatne regulacije nizvodnog tlaka jer kontrolira tok vode kroz kontrolnu cijev tako da se pokusni ventil zatvara kada nizvodni tlak raste, a otvara se kada nizvodni tlak pada (slika 4.).

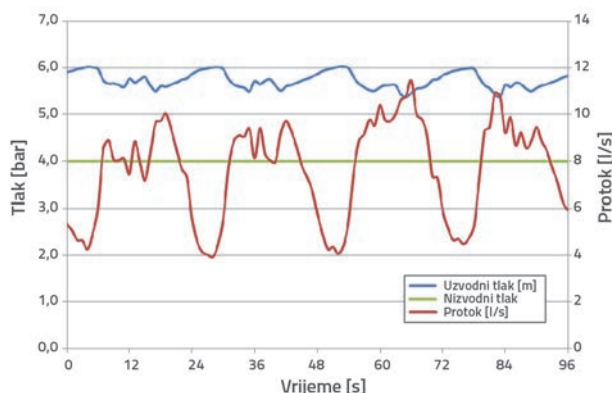


Slika 3. Presjeci hidrauličkog ventila za regulaciju nizvodnog tlaka



Slika 4. Presjek pokusnog opružnog ventila

Takvom se konstrukcijom hidrauličkih ventila, s kombinacijom glavnoga membranskog i pokusnog opružnog ventila, postižu optimalni uvjeti rada, pa se nizvodni tlakovi mogu održavati konstantnim, neovisno o promjenjivosti uzvodnih (slika 5.).



Slika 5. Usporedni prikaz rada hidrauličkog ventila za regulaciju tlaka u uvjetima promjenjivosti protoka i uzvodnih tlakova

Hidraulički se ventili u odnosu na specifičnosti i učinkovitost rada svrstavaju u kontrolirane ventile za regulaciju nizvodnih tlakova

i zbog dobivanja konstantnog nizvodnog tlaka utječu na bolju funkcionalnost u postizanju optimalnih hidrauličkih parametara u vodoopskrbnim sustavima. Moguće su i elektroničke nadogradnje takvih ventila koji omogućuju promjene željenih parametara ovisno o protoku ili određenom tlaku u sustavu,

2.2. Matematičko modeliranje vodoopskrbnih sustava

Matematičkim modeliranjem vodoopskrbnih sustava omogućen je prikaz hidrauličkih i pogonskih uvjeta tečenja, odnosno prikaz realnih stanja protoka i tlakova unutar vodoopskrbne mreže. U današnje vrijeme zbog raspoloživosti i mogućnosti matematičkih modela [10-14], ali i njihove lake dostupnosti i jednostavne primjene, svaki bi se drukčiji oblik analize na kojoj bi se zasnivao kritički osvrt na postojeći rad sustava u cijelosti, ali i njegovih pojedinih dijelova, smatrao neprihvatljivim. Posebno bi bilo neprihvatljivo na tome određivati mjere unapređenja sustava, a pogotovo pri analizi složenijih sustava (mnogobrojnih u prstene povezanih dionica te veći broj vodosprema, crpnih stanica, regulacijskih elemenata i sl.). Matematičko modeliranje postojećeg stanja uz provođenje kalibracije modela osnova je planiranja svih budućih aktivnosti, odnosno odabira ispravnih tehničkih rješenja ne samo za proširivanja sustava već i provođenje odgovarajućih mjera unapređenja sustava (osiguranje kvalitetnije opskrbe vodom krajnjih korisnika kroz kontrolu protoka i tlakova te smanjivanje vodnih gubitaka). Primjenom matematičkih modela znatno je olakšano i ubrzano provođenje hidrauličkih analiza vodoopskrbnih sustava uz smanjenu vjerojatnost pogreške. Modeli nude jednostavnu mogućnost ispitivanja velikog broja složenih scenarija radi dobivanja što kvalitetnijih rješenja. Složenost se problema odnosi na simuliranje i ispitivanje različitih realnih dinamičkih stanja (u neograničenom razdoblju):

- ispitivanje različite dinamike potrošnje vode kroz proizvoljni period (mesečna, dnevna ili satna neravnomjernost potrošnje), a u istom čvoru je moguće definirati više različitih kategorija potrošača s različitim neravnomjernostima potrošnje
- usporedbu rezultata s različito određenom dinamikom rada tlačnih jedinica (crpki)

- modeliranje s konstantnim i promjenjivim brzinama crpki (frekvencijska promjena broja okretaja)
- proračun pogonskih troškova pri radu crpki (iz proračuna potrebne energije za rad crpki)
- modeliranje utjecaja različitih regulacijskih armatura – ventil za regulaciju tlakova (opružni i hidraulički), ventil za održavanje uzvodnog tlaka, ventil za regulaciju nizvodnog protoka i dr.
- modeliranje složenih (višezonskih) sustava s većim brojem vodosprema, gdje je za svaku vodospremu moguće odabrati dinamiku punjenja i pražnjenja
- modeliranje starosti vode
- provođenje analize gubitaka
- modeliranje vodnih gubitaka u realnom vremenu.

Ovdje posebno valja istaknuti programski paket *Epanet* koji je razvila Američka agencija za zaštitu okoliša USEPA (eng. *United States Environmental Protection Agency*). Velika prednost *Epanet* modela je njegova laka dostupnost jer se kao besplatni alat može slobodno preuzeti s interneta. Dodatno se ističu i komercijalni modeli poput *WaterGEMS*-a i *WaterCAD*-a kompanije *Bentley*, te *Mike-Urban* koji je razvijen na *DHI*-u, međunarodnoj softverskoj i inženjerskoj tvrtki sa središtem u Danskoj. Svi modeli između ostalog nude i kvalitetnu grafičku prezentaciju dobivenih rezultata, što olakšava njihov pregled i kontrolu.

Za svaki matematički model izrađen za postojeće sustave, čiji se osnovni projektni parametri i karakteristike sustava usvajaju na temelju raspoložive projektne dokumentacije i obilascima terena, a nemaju detaljnije podloge (snimak izvedenog stanja, geodetske podloge, poznavanje raspodjele potrošnje vode, neravnomjernost potrošnje...) obvezno se preporučuje provesti njegovu kalibraciju. Kalibracija modela postojećeg stanja preporučuje se i u odnosu na vremenski promjenjive karakteristike pojedinih elemenata sustava, između ostalog i ventila za regulaciju tlakova.

Kalibracija modela se provodi tako da se u njega interpoliraju vrijednosti tlakova i protoka dobiveni mjerenjima. U nizu iteracijskih koraka izmjene pojedinih ulaznih parametara, između ostalog i karakteristika ventila za regulaciju tlakova, nastoji se što je više moguće prilagoditi stvarnom stanju utvrđenom mjerenjima. Pritom se mijenjaju sljedeći parametri: ulazne veličine protoka u model, vlastita potrošnja vode u pojedinim čvorovima, hrapavost cijevi, veličina gubitaka po pojedinim zonama odnosno podzonama, koeficijenti lokalnih gubitaka tlaka duž cjevovodne mreže ili na pojedinim elementima sustava (npr. ventilima za regulaciju tlakova).

Ipak se pri izradi matematičkih modela za novo projektirane sustave ili dijelove sustava ne može dobiti konačna potvrda da će rezultati dobiveni na modelu odgovarati realnim stanjima, što prije svega može biti uvjetovano kvalitetom gradnje, ali i drugim specifičnostima. Neovisno o tome, korištenje matematičkih modela nudi mogućnost uvida u približno realne hidrauličke i pogonske uvjete u sustavu. Time je omogućeno brzo i učinkovito ispitivanje različitih varijantnih rješenja te donošenje pouzdanijih

zaključaka i usvajanje boljih tehničkih rješenja. Matematički modeli također omogućuju kvalitetan uvid u raspone vrijednosti pojedinih hidrauličkih veličina (protoka i tlakova) što znatno olakšava određivanje potrebnih karakteristika ventila za regulaciju tlaka, a time i odabir tipa s tvornički podešenim postavkama uz koje će biti bolje prilagođen stvarnim potrebama i uvjetima rada.

Na matematičkim modelima se opružni i hidraulički ventili različito odabiru uz različito određivanje ključnih karakteristika. Opružni ventil se na modelu odabire kao PBV (eng. *Pressure Breaking Valve*), a hidraulički ventil kao PRV (eng. *Pressure Reducing Valve*). Osnovne karakteristike rada oba ventila na matematičkim modelima jednake su prethodno opisanim u poglavlju 2.1, što će biti potvrđeno i rezultatima dobivenim na konkretnim primjerima analiziranim u ovom radu.

3. Analize i rezultati

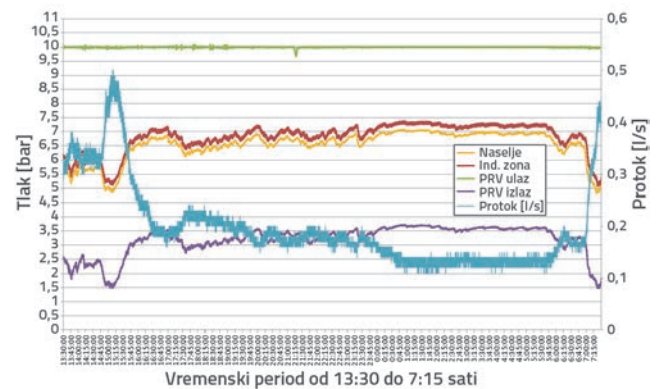
3.1. Provedba mjerenja

Za potrebe provođenja mjerenja korištena je oprema za mjerenje protoka njemačkog proizvođača Flexim, Fluxus F601, koji ima mogućnost mjerenja brzina u rasponu od 0,01 do 25 m/s, s rezolucijom promjene brzine od 0,025 cm/s. Mjerenje tlaka je provedeno uređajima hrvatskog proizvođača SMTech, Leakless PDL-AG, s mogućnošću mjerenja tlaka u rasponu 0-20 bara s točnošću 0,5 %.

3.1.1. Prva kampanja mjerenja

Za potrebe rada odabrana je zona u brežuljkastom području s približno 800 stanovnika i ukupne duljine cjevovodne mreže 7140 m. Razmatrana zona ima dva ulaza, od kojih je jedan zatvoren, a drugi aktivan preko opružnog ventila za regulaciju nizvodnog tlaka.

Prvi je dan postavljena mjerna oprema s ciljem utvrđivanja realnih stanja u zoni. Mjerač je protoka postavljen na cijev uz ventil za regulaciju tlaka, dok su mjerači tlaka stavljani uz ventil (s uzvodne i nizvodne strane) te na dva kontrolna mjesta u mreži.

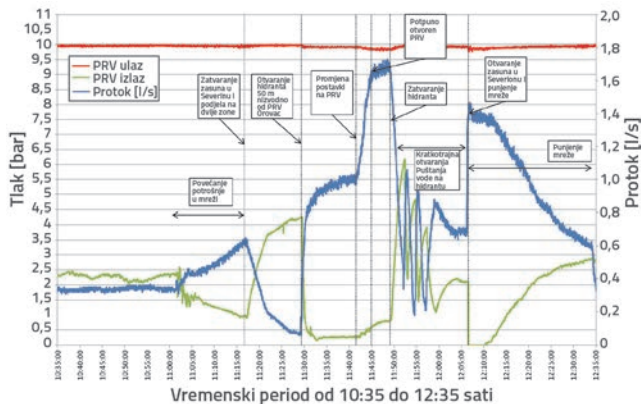


Slika 6. Rezultirajući dijagrami protoka i tlaka preliminarnog testiranja zone

Iz mjerenja se može zaključiti sljedeće:

- Na mjernom mjestu pojavljuje se relativno mali raspon protoka od 0,15 l/s do 0,5 l/s u zoni s približno 800 stanovnika.
- Na uzvodnoj strani regulatora tlaka nema oscilacija, tj. održava se relativno stabilan tlak od približno 10 bara.
- Promjena tlaka evidentirana je istim trendom na svim nizvodnim lokacijama mjerenja tlaka.
- Ventil za regulaciju tlaka (opružni ventil – DN50) inicijalno bi trebao održavati konstantan nizvodni tlak. Međutim, uočava se da čak i u uvjetima konstantnog uzvodnog tlaka promjene protoka utječu na promjene izlaznog tlaka, čime se rad konkretnog ventila može ocijeniti nekontroliranim. Naime, s povećanjem se protoka vrijednost tlaka na izlazu iz ventila smanjuje, što može rezultirati nedostatnim tlakovima za normalnu opskrbu korisnika vodom, a tijekom smanjenog protoka (noćno razdoblje s minimalnom potrošnjom) vrijednost se tlaka na izlazu iz ventila nepotrebno povećava, uzrokujući pritom povećanje vrdnih gubitaka.

Tijek provedbe testiranja rada opružnog ventila: Nakon pregleda podataka, obavljene su pripremne radnje na odabranom hidrantu i odabrano je mjesto podjele zone u dvije kako bi se sa sigurnošću izolirao rad samo razmatranoga opružnog ventila za regulaciju tlaka (zona je podijeljena u dvije oko 11:17 sati). Nakon zatvaranja zasuna, odnosno podjele u dvije zone, došlo je do znatnog smanjivanja protoka sve do vrijednosti od otprilike 0,07 l/s. Istodobno sa smanjenjem protoka došlo je do povećanja tlaka na vrijednost od gotovo 4 bara. Prateći trend konstantnog povećanja tlaka i protoka, zaključeno je kako opružni ventil nema mogućnost potpunog zatvaranja kod doseganja vrijednosti izlaznog tlaka na koju je podešen, pa bi u slučaju zadržavanja takvih uvjeta tlak na nizvodnoj strani vjerojatno dosegnoo vrijednost uzvodne strane, što bi moglo rezultirati puknućima cjevovoda na nižim kotama zone.



Slika 7. Rezultirajući dijagrami provedenog testiranja opružnog ventila u prvoj kampanji terenskih mjerenja

S obzirom na to da se zona prostirala i na kotama približno 35 m nižim od lokacije ventila za regulaciju tlaka, zaključeno je da tijekom testiranja treba voditi računa da tlak na nizvodnoj strani ventila ne dosegne vrijednost veću od 6 bara.

Nešto prije 11:30 uslijedilo je prvo otvaranje mlaznice na hidrantu. Otvaranjem hidranta očekivani su protoci od nekoliko l/s, no tlak je pao na vrijednosti od približno 0,3 bara, dok je protok postupno, tijekom 13 minuta, narastao do 1 l/s. Tada (11:42) se prišlo otvaranju opružnog ventila odnosno smanjivanju sile u opruzi, čime se očekivala znatno veća propusnost. Međutim, tijekom idućih 8 minuta protok je narastao na vrijednost približno 1,7 l/s, a istodobno se s protokom povećavao i tlak do vrijednosti otprilike 0,8 bara. U 11:49 zatvorena je mlaznica na hidrantu nakon čega je uslijedio nagli porast tlaka na vrijednosti veće od 6 bara, pa se pristupilo otvaranju mlaznice radi smanjivanja tlaka. U sljedećem razdoblju (do 12:07) podešavao se opružni ventil na početnu vrijednost, što je i ostvareno u 12:05, kada je za konstantan protok od 0,65 l/s ostvaren konstantan nizvodni tlak na regulatoru približno 2,1 bar.

U 12:07 ponovno je otvoren sekcijski zasun, čime je ponovo formirana jedna zajednička zona, pa je došlo do naglog



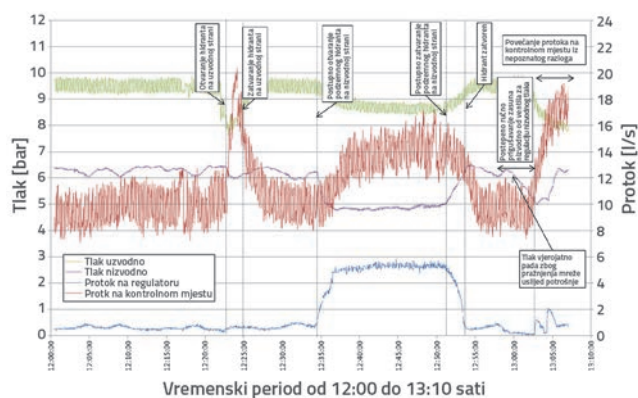
Slika 8. Testirani opružni regulatori u prvoj (lijevo) i drugoj (desno) kampanji

povećanja protoka do 1,5 l/s i pada tlaka na nizvodnoj strani opružnog ventila na vrijednost nula. U idućem je razdoblju uočljivo smanjenje protoka i povećanje tlaka, iz čega se može zaključiti da se dio volumena vode iz testirane zone "prebacio" u drugu, te da je nakon što su se cijevi napunile vodom došlo do povratka na projektirano stanje toka, odnosno pada protoka i povećanje tlaka.

Na konkretnom je primjeru iz prakse potvrđena konstatacija da opružni ventili za regulaciju tlaka ne omogućuju kontrolirane uvjete rada i da se pojavljuju određeni problemi koji mogu ometati opskrbu korisnika vodom (značajan nekontrolirani pad nizvodnog tlaka), ali uzrokuju i neželjena povećanja tlaka (a time i vodnih gubitaka) u uvjetima minimalne potrošnje kada su i minimalni tlakovi dostatni za neometanu vodoopskrbu.

3.1.2. Druga kampanja mjerenja

Drugo je terensko ispitivanje provedeno u ravničarskom području, u dijelu sustava s 326 stanovnika i duljinom mreže od 5560 m. Ispitivanje je planirano da bi se upozorilo na nepravilnosti u radu opružnog ventila za regulaciju nizvodnog tlaka (DN65) na glavnom opskrbnom cjevovodu, što se ogleda u činjenici da dolazi od promjene nizvodne vrijednosti tlaka uslijed promjena uzvodnih vrijednosti (protoka i tlaka). Metodologija se testiranja sastojala od postavljanja mjerne opreme i simuliranja pojačane potrošnje otvaranjem bliskoga uzvodnoga nadzemnog hidranta, odnosno otvaranjem podzemnog hidranta nizvodno od opružnog ventila za regulaciju tlaka.

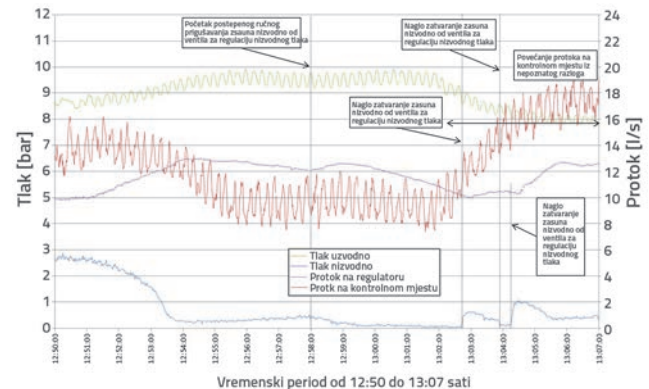


Slika 9. Rezultirajući dijagrami provedenog testiranja opružnog ventila u drugoj kampanji terenskih mjerenja

Kako se vidi na slici 9., u 12:22 otvoren je hidrant na uzvodnoj strani, no nije uočen pad tlaka u mreži nizvodno od opružnog ventila, iako je zabilježen pad tlaka na uzvodnoj strani.

Postupnim je otvaranjem podzemnog hidranta na nizvodnoj strani, u 12:35 (slika 10.) došlo do smanjivanja tlaka i s uzvodne i nizvodne strane. Za utvrđenu pojavu nije moguće sa sigurnošću tvrditi da je izravna posljedica smanjivanja uzvodnog tlaka. S druge strane uzvodni tlak nije pao na

vrijednost nizvodnog, tako da se zaključuje da ventil nije reagirao u skladu sa svojom namjenom. Autori rada opisanu pojavu tumače zasićenjem hvatača nečistoća na kojem je izvedeno mjerenje tlaka na uzvodnoj strani regulatora tlaka. Također je bitno istaknuti da je prisutna i pojava lokalnog gubitka tlaka na samome opružnom ventilu, ali za taj tip ventila proizvođač kataloški tvrdi kako je lokalni hidraulički gubitak pri 6 l/s približno 0,18 bara.



Slika 10. Rezultirajući dijagrami provedenog testiranja opružnog ventila u 2. kampanji terenskih mjerenja (izdvojeno razdoblje tijekom ispuštanja vode na hidrantu na nizvodnom dijelu ispitivanog regulatora tlaka)

3.2. Usporedne analize opružnog i hidrauličkog ventila na konkretnom primjeru

Za potrebe rada formirani su hipotetski scenariji pogona dijela jednoga realnog sustava u Slavoniji, za koji je izrađen i kalibriran detaljan matematički model postojećeg stanja. Matematički model, *Epanet 2*, korišten ovdje za hidrauličke analize, opisuje izgrađenu vodoopskrbnu mrežu od plastičnih cijevi dugu 15.205 m. Analizirani se dio mreže (slika 11.) sastoji od 139 cijevi, 123 čvora i jednog ventila za regulaciju nizvodnog tlaka čiji je način rada temeljni dio ovih hidrauličkih analiza. Ukupan broj priključenih stanovnika na tom je području 820 (362 kućanstva/priključka), s ukupnom fakturiranom količinom vode od stanovništva u iznosu 34.405 m³/godina i privrede 5020 m³/godina.

Razmatrana su tri osnovna scenarija potrošnje vode u sustavu, svaki s drugačijom vrijednosti minimalnoga noćnog protoka (MNP) na ulazu u sustav, ovisno o različitim vrijednostima vodnih gubitaka. Sva tri scenarija pretpostavljaju jednak broj priključenih stanovnika (820) s jednakom minimalnom noćnom potrošnjom vode u iznosu približno 0,6 l/stanovnika. Iz navedenog slijedi da je minimalna noćna potrošnja vode od stanovništva jednaka 0,13 l/s. U odnosu na minimalnu noćnu potrošnju vode od stanovništva, svaki scenarij pretpostavlja različite vrijednosti vodnih gubitaka uslijed curenja koji se generiraju unutar razmatranog sustava u trenutku minimalne noćne potrošnje (1, 3 i 5 l/s).



Slika 11. Shematski prikaz analiziranog vodoopskrbnog sustava (izvod iz kreiranog Epanet modela)

Opis metode izračuna gubitaka vode za odabrane podscenarije

Za izračun ušteta u analiziranim scenarijima korištena je prilagođena tablica u MSExcel formatu s formulama i proračunima na temelju IWA metodologije za analizu minimalnog noćnog protoka i FAVAD metode utjecaja tlaka na intenzitet istjecanja vode [15-18]. U tablici 1. predstavljena je projekcija gubitaka vode uslijed curenja u slučajevima primjene opružnog ventila (s postojećim radnim uvjetima) i primjene hidrauličkog ventila u modu rada sa željenim kontinuiranim izlaznim tlakom. Isti princip proračuna usporedbe učinaka je korišten za sve analizirane podscenarije.

Metoda proračuna podrazumijevala je sljedeću proceduru (primjer prvog podscenarija; usporedba opružnog ventila s hidrauličkim koji kontinuirano snižava nizvodni tlak tijekom 24 sata):

1. Poznata su polazišta, odnosno radne karakteristike dviju promatranih vrsta regulacijskih ventila i kroz modeliranje u matematičkom modelu, učinci djelovanja, odnosno vrijednosti noćnog tlaka u vremenu minimalnog noćnog protoka, ali i promatrane stabilnosti u održavanju izlaznog tlaka tijekom 24 sata (stupci 4 i 17 u tablici 1.)
 - Opružni ventil; noćni tlak 6,20 bara, faktor promjene noć-dan (NDF) iznosi 22,51
 - Hidraulički ventil: noćni tlak 4,09 bara, faktor promjene noć-dan (NDF) iznosi 24
2. Izvršen je proračun smanjenja curenja uslijed promjene noćnog tlaka (stupac 8; projekcija A) s faktorom promjene

prema FAVAD metodi; $N1=1,5$ (odabrana vrijednost s obzirom na materijale cjevovoda u promatranoj zoni; prevladavaju plastični materijali cjevovoda)

3. Podrazumijeva se da nema promjene u minimalnoj potrošnji korisnika (njihova potrošnja nije pod utjecajem tlaka – punjenje vodokotliča)
4. Minimalni protok u projekciji A (stupac 3) izračunava se zbrajanjem nove vrijednosti curenja (opisano pod točkom 3.) i postojeće vrijednosti minimalne potrošnje (stupac 7)
5. Ukupno curenje na dan (i potom projekcije na bazi mjeseca ili godine) izračunava se na temelju vrijednosti curenja u vremenu minimalnog noćnog protoka (stupac 8) množenog s vrijednosti faktora promjene noć-dan (kolona 17)
6. Ušteta se računa usporedbom curenja na godišnjem nivou između dva promatrana slučaja, odnosno promatranih učinaka dvaju uspoređivanih regulacijskih ventila (Ušteta = Početno – Projekcija A; stupac - Ukupno curenje godina)

U prvom je scenariju kao početno stanje odabran ulaz u sustav preko opružnog ventila za regulaciju tlaka koji u trenucima minimalne noćne potrošnje iznosi 1,13 l/s. Sustav je analiziran na osnovi standardne prakse prema IWA metodologiji, za podscenarije korištenja hidrauličkog ventila za regulaciju tlaka s konstantnim izlaznim tlakom, te hidrauličkog ventila za regulaciju tlaka s vremenski promjenjivim izlaznim tlakom koji se modulira u odnosu dan/noć (od 6:00 do 21:00 regulirana vrijednost nizvodnog tlaka iznosi 35 m vodnog stupca, dok od

Tablica 1. Proračun ušteda analizom minimalnog noćnog protoka

Datum mjerenja	Minimalni protok	Minimalni protok	Izmjeren prosječni tlak pri min. protoku	Minimalna potrošnja (3-kuć.,8-priv.)	Dodatna noćna potrošnja	Ukupna min. potrošnja	Ukupno curenje uz tlak	Ukupno curenje [dan]	Ukupno curenje [mjesec]	Ukupno curenje [godina]
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		3=7+8								
	Vs	[m ³ /h]	[bar]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /h]	[m ³ /dan]	[m ³ /mjesec]	[m ³ /godina]
Početno	1,13	4,07	6,20	0,51	0,00	0,51	3,56	80,15	2.404,37	28.852,38
Projekcija A	0,67	2,42	4,09	0,51	0,00	0,51	1,91	45,78	1.373,52	16.482,19
Promjena	-0,46	-1,65	-2,11	0,00	0,00	0,00	-1,65	-34,36	-1.030,85	-12.370,19
Smanjenje	-40,63 %	-40,63 %	-34,03 %				-46,42 %	-42,87 %	-42,87 %	-42,87 %

Neizbježna curenja IWA ICF=1	Neizbježna curenja mjesec	Curenja iznad neizbježnih	Curenja iznad neizbježnih na dan	Curenja iznad neizbježnih na dan	Indikator ukupnih curenja	NDF	Snapshot ILI (ICF=1)
11	12	13	14	15	16	17	18
		13=8-11					
[m ³ /h]	[m ³ /mjesec]	[m ³ /h]	[m ³ /dan]	[m ³ /mjesec]	Vpriklj. [vod/dan]	h	
1,14	769,76	2,42	54	1,635	164	22,51	2,07
1,04	746,09	0,87	21	627	93	24	1,68
-0,10	-23,67	-1,55	-34	-1,007	-70	1,49	-0,39
-9,09%	-3,08 %	-64,00 %	-61,62 %	-61,62 %	-42,87 %		

21:00 do 6:00 regulirana vrijednost nizvodnog tlaka iznosi 25 m vodnog stupca). Ukupan raspon protoka na ulazu u sustav u prvom scenariju, prije implementacije mjera regulacije tlaka, iznosi 1,13 do 3,5 l/s, a tlak varira od 53 m do 62 m, sa srednjom dnevnom vrijednosti 58 m visine vodnog stupca. U drugom je scenariju kao početno stanje odabran ulaz u sustav preko opružnog ventila za regulaciju tlaka koji u trenutcima minimalne noćne potrošnje iznosi 3,13 l/s. Na temelju toga su ispitane mogućnosti uštede u istim podscenarijima (hidraulički ventil za regulaciju tlaka s konstantnim izlaznim tlakom i vremenski promjenjivim vrijednostima izlaznog tlaka) kao i kod prvog scenarija. Ukupan raspon protoka na ulazu u sustav u drugom scenariju, prije implementacije mjera regulacije tlaka,

iznosi 3,13 do 5,5 l/s, a tlak varira od 42 m do 60 m, sa srednjom dnevnom vrijednosti 52 m visine vodnog stupca. U trećem je scenariju kao početno stanje odabran ulaz u sustav preko opružnog ventila za regulaciju tlaka koji u trenutcima minimalne noćne potrošnje iznosi 5,13 l/s. Na temelju toga su ispitivane mogućnosti uštede u istim podscenarijima (hidraulički ventil za regulaciju tlaka s konstantnim izlaznim tlakom i vremenski promjenjivim vrijednostima izlaznog tlaka) kao i kod prvog i drugog scenarija. Ukupan raspon protoka na ulazu u sustav u trećem scenariju, prije implementacije mjera regulacije tlaka, iznosi 5,13 do 7,5 l/s, a tlak varira od minimalnih 41 m do 56 m, sa srednjom dnevnom vrijednosti 48 m visine vodnog stupca.

Tablica 2. Generiranje vodnih gubitaka uslijed curenja u promatranom sustavu

Minimalni noćni protok (MNP)	Minimalna noćna potrošnja	Vodni gubitak u minimalnoj noćnoj potrošnji	Podscenariji načina regulacije nizvodnog tlaka		
			Opružni ventil (postojeće)	Hidraulički ventil (1. podscenarij unapređenja)	Hidraulički ventil (napredna regulacija (2. podscenarij))
			Godišnji vodni gubitak uslijed curenja		
[l/s]	[l/s]	[l/s]	[m ³ /godina]	[m ³ /godina]	[m ³ /godina]
1,13	0,13	1,00	28.852	16.482	12.812
3,13	0,13	3,00	80.923	53.463	41.711
5,13	0,13	5,00	135.577	98.775	77.346

Tablica 3. Smanjivanje vodnih gubitaka (ušteta godišnjih količina vode) u dvije promatrane varijante s hidrauličkim ventilima za regulaciju tlaka u odnosu na postojeće stanje s ugrađenim opružnim ventilom

Minimalni noćni protok (MNP)	Varijante unapređenja postojećega opružnog ventila (zamjena s hidrauličkim ventilima)	
	Hidraulički ventil (1. podscenarij unapređenja)	Hidraulički ventil s naprednom regulacijom (2. podscenarij unapređenja)
	Uštedena godišnja količina vode	
[l/s]	[m ³ /godina]	[m ³ /godina]
1,13	12.370	16.040
3,13	27.459	39.212
5,13	36.802	58.230

Tablica 4. Ekonomske uštede uslijed smanjivanja vodnih gubitaka u dvije varijante s hidrauličkim ventilima za regulaciju tlaka u odnosu na postojeće stanje s ugrađenim opružnim ventilom

Hidraulički ventil	Hidr. ventil (napredna regulacija)	Hidraulički ventil	Hidr. ventil (napredna regulacija)	Hidraulički ventil	Hidr. ventil (napredna regulacija)
1. podscenarij	2. podscenarij	1. podscenarij	2. podscenarij	1. podscenarij	2. podscenarij
Uštede uz dobavnu cijenu vode 0,25 kuna/m ³		Uštede uz dobavnu cijenu vode 1,00 kuna/m ³		Uštede uz dobavnu cijenu vode 4,00 kuna/m ³	
[kuna/godina]	[kuna/godina]	[kuna/godina]	[kuna/godina]	[kuna/godina]	[kuna/godina]
3.093	4.010	12.370	16.040	49.480	64.160
6.865	9.803	27.459	39.212	109.836	156.848
9.201	14.558	36.802	58.230	147.208	232.920

Svaki od prethodno opisanih scenarija i podscenarija kreiran je kao zasebna datoteka, koristeći isti matematički model (EPANET sučelje). Na temelju rezultata dobivenih na modelu utvrđene su vrijednosti srednjih tlakova u razmatranoj vodoopskrbnoj mreži, u odnosu na koje je računana prosječna vrijednost vodnih gubitaka na godišnjoj razini za svaki scenarij i podscenarij pojedinačno, koristeći FAVAD metodu prema primijenjenoj IWA metodologiji (tablica 2.). Iz prikazanih rezultata može se uočiti znatno smanjivanje vodnih gubitaka uz primjenu hidrauličkih ventila u odnosu na opružni ventil. Dodatno je u tablici 3. prikazano smanjivanje vodnih gubitaka u obliku godišnjih ušteta količina vode, za obje varijante s primjenom hidrauličkih ventila (običnog s nepromjenjivom izlaznom vrijednosti tlaka i naprednog s vremenski promjenjivom izlaznom vrijednosti tlaka na principu noć/dan) u odnosu na postojeće stanje s ugrađenim opružnim ventilom.

Na temelju dobivenih rezultata u obliku godišnjih ušteta u količinama vode, provedena je dodatna ekonomska analiza s ciljem prikaza ekonomskih ušteta uslijed smanjenja vodnih gubitaka u dvije promatrane varijante s hidrauličkim ventilima za regulaciju tlaka u odnosu na postojeće stanje s ugrađenim opružnim ventilom (tablica 4.). Pritom su razmatrana dodatna tri podscenarija s različitim jediničnim dobavnim cijenama vode (0,25 i 1,00 i 4,00 kuna/m³), koja uključuju isključivo troškove koji su relevantni za vodne gubitke (crpljenje i kondicioniranje vode). Sve je to provedeno s ciljem obuhvata šireg raspona realnih stanja na području Hrvatske s različitim jediničnim dobavnim cijenama vode, kako bi se dobio što bolji uvid u veličine

potencijalnih ušteta u različitim okolnostima. Dobiveni rezultati upućuju na mogućnost ostvarivanja značajnih ekonomskih ušteta, osobito kod sustava s većim količinama vodnih gubitaka i s većim jediničnim dobavnim cijenama vode.

4. Zaključak

S obzirom na široku primjenu opružnih ventila u funkciji regulacije tlakova u sustavima javne vodoopskrbe u većini vodoopskrbnih sustava u Hrvatskoj, u radu je dan kritički osvrt na njihov rad i učinkovitost, uz direktnu usporedbu sa znatno kvalitetnijim rješenjima koja podrazumijevaju korištenje hidrauličkih ventila. U radu je na konkretnim primjerima dan usporedni prikaz rada opružnih i hidrauličkih ventila za regulaciju tlakova iz aspekta generiranja određenih hidrauličkih stanja i općenitu učinkovitost u upravljanju vodnim gubitcima.

Dobiveni rezultati upućuju na mogućnost ostvarivanja znatnog smanjivanja vodnih gubitaka, a time i ekonomskih ušteta uz primjenu hidrauličkih ventila, osobito kod sustava s većim količinama vodnih gubitaka i s većim jediničnim dobavnim cijenama vode. Prikazani rezultati pokazuju opravdanost razmatranja zamjene opružnih ventila s hidrauličkim. Pritom se preporučuju dodatne hidrauličke i ekonomske analize koje će dokazati da se uz ugradnju hidrauličkih ventila postižu zadovoljavajući uvjeti tečenja te da su ekonomske koristi dugoročno veće u odnosu na troškove zamjene i razliku troškova pogona i održavanja između opružnih i hidrauličkih ventila.

LITERATURA

- [1] Vouk, D., Vuković, Ž., Halkijević, I., Malus, D.: *Ekonomska analiza vodnih gubitaka*, stručni seminar Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji, Bol, pp. 111-120, 2012.
- [2] Vouk, D., Malus, D., Baričić, D.: *Je li ILI pouzdan pokazatelj uspješnosti upravljanja vodnim gubitcima?*, stručni seminar Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji, Cavtat, pp. 133-144, 2014.
- [3] Vouk, D., Martinac, T., Nakić, D.: *Usporedba različitih načina iskazivanja vodnih gubitaka uz osvrt na hrvatsku praksu*, Hrvatske vode, 25 (2017) 99, pp. 17-26
- [4] Kolovrat, I.: *Metodologija izrade konceptijskih rješenja vodoopskrbnih sustava u RH*. Hrvatska vodoprivreda, (2015) 210, pp. 15-19
- [5] Kovač, J.: *Kontrola gubitaka vode kontrolom tlaka. Gubici vode u vodoopskrbi i odvodnji*, Hrvatska grupacija vodovoda i kanalizacija, Hrvatske vode, Hrvatski savez građevinskih inženjera, pp. 171 – 177, 2007.
- [6] Kovač, J.: *Introduction of IWA-WLSG Methodology of Water Loss Analysis*, (Croatian only - Uvod u IWA-WLSG metodologiju analize gubitaka vode), 2010, http://juricakovac.com/images/nsSpace/Documents/Uvod_u_IWA_WLTF_metodologiju_analize_gubitaka_vode_v231210v1.pdf, 24.03.2017.
- [7] Halkijević, I., Vuković, Ž., Vouk, D.: *Optimalno upravljanja gubicima vode javne vodoopskrbe u Republici Hrvatskoj*, Proceedings of the 2nd International natural gas, heat and water conference, Osijek, 2011.
- [8] Vouk, D., Halkijević, I., Malus, D., Vuković, Ž.: *Praktične analize vodnih gubitaka s naglaskom na ekonomski aspekt*, Strategija razvoja vodoopskrbe i odvodnje Grada Zagreba, Društvo građevinskih inženjera Zagreb, pp.111-122, 2016.
- [9] Sethaputra, S., Limanond, Z., Wu, Z. Y., Thungkanapak, P., Areekul, K.: *Experiences using Water Network Analysis Modeling for Leak Localization*, IWA Water Loss 2009 Congress, Cape Town, pp. 469-476, 2009.
- [10] Rossman, L.A.: *EPANET 2 – Users Manual*, EPA/600/R-00/057, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, 2000.
- [11] Yi Wu, Z.: *Innovative Optimization Model for Water Distribution Leakage Detection*, Water Loss Seminar & Workshop, Marbella, 2008.
- [12] Trifunovic, N., Sharma, S., Pathirana, A.: *Modelling Leakage in Distribution System using EPANet*, IWA Water Loss 2009 Congress, Cape Town, pp. 482-489, 2009.
- [13] Fontanazza, M.C., Freni, G., La Loggia, G.: *Implementation of a Numerical Model for the Evaluation of Potential Apparent Losses in a Distribution Network*. IWA Water Loss 2009 Congress, Cape Town, pp. 381-389, 2009.
- [14] Vouk, D., Halkijević, I., Malus, D., Vuković, Ž.: *Matematičko modeliranje kao neizostavan segment analize vodnih gubitaka u vodoopskrbnim sustavima*, Aktualna problematika u vodoopskrbi i odvodnji, Velika Gorica, pp. 177-190, 2012.
- [15] Thornton, J., Sturm, R., Kunkel, G.: *Water Loss Control*, second edition, *Modeling the Effects of Changing System Pressure on Leakage Flow Rates and Volumes Using FAVAD*, McGraw Hill, odlomak: 10.6.3, 2002.
- [16] <http://www.leakssuite.com/concepts/favad/>
- [17] Fanner, P.V., Sturm, R., Thornton, J.: Liemberger R., *Leakage Management Technologies*, odlomak: FAVAD Principles pp. 34 - 43, 2007.
- [18] Lambert A., Fantozzi M., Thornton J.: *Practical approaches to modeling leakage and pressure management in distribution systems – progress since 2005*, 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, 2013.