

Primljen / Received: 5.4.2017.
Ispravljen / Corrected: 29.6.2017.
Prihvaćen / Accepted: 14.7.2017.

Dostupno online / Available online: 10.9.2017.

Vodni udar u sustavima navodnjavanja

Autori:



Martina Tadić Ananić, dipl.ing.građ.
Hidroprojekt-ing projektiranje d.o.o.
mtadic@hp-ing.hr



Prof.dr.sc. **Goran Gjetvaj**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
goran@grad.hr

Stručni rad

Martina Tadić Ananić, Goran Gjetvaj

Vodni udar u sustavima navodnjavanja

U sustavima navodnjavanja se često koriste samohodni sektorski raspršivači (tifoni) i samohodni automatizirani uređaji za linijsko ili kružno navodnjavanje na kojima uslijed naglog zatvaranja zasuna na ulazu u uređaj može doći do pojave neželjenog predtlaka. Sustav se štiti od neželjenog predtlaka postupnim zatvaranjem zasuna. U radu je na primjeru hidrauličkog proračuna nestacionarnih stanja na sustavu navodnjavanja Blata – Cerna definirana zaštita sustava od prevelikih i premalnih tlakova te utjecaj istodobnog zatvaranja zasuna na rubnim dijelovima mreže.

Ključne riječi:

vodni udar, podtlak, predtlak, zračni kotao, sustavi navodnjavanja, Blata – Cerna

Professional paper

Martina Tadić Ananić, Goran Gjetvaj

Water hammer in irrigation systems

Self-propelled sectorial rain guns (typhones) and self-propelled automated devices for linear or circular irrigation are often used in irrigation systems. However, unwanted overpressure can occur due to sudden closure of valves at the entrance segment of these devices. The system is protected against such overpressure by gradual closure of valves. The protection of the system against excessive and insufficient pressures, and the impact of simultaneous closure of valves at peripheral parts of the network, are defined in the paper based on an example of hydraulic calculation of unsteady flows at the Blata - Cerna Irrigation System.

Key words:

water hammer, underpressure, overpressure, air vessel, irrigation systems, Blata – Cerna

Fachbericht

Martina Tadić Ananić, Goran Gjetvaj

Wasserschlag in Bewässerungssystemen

In den Bewässerungssystemen kommen häufig selbstfahrende Flächenberegnungsanlagen (Typhone) und selbstfahrende automatisierte Anlagen für die Linear- oder Kreisberegnung zum Einsatz, bei welchen es infolge eines schlagartigen Schließens der Absperrarmatur am Geräteeingang zu einem unerwünschten Überdruck kommen kann. Das System schützt sich vor einem unerwünschten Überdruck durch ein langsames Schließen der Absperrarmatur. In der Arbeit wurden am Beispiel einer hydraulischen Kalkulation von nicht stationären Zuständen am Bewässerungssystem Blata – Cerna der Schutz des Systems vor zu hohen und zu niedrigen Drücken festgelegt und die Auswirkung des Schließens der Absperrarmatur auf die Randbereiche des Netzes dargestellt.

Schlüsselwörter:

Wasserschlag, Unterdruck, Überdruck, Wasserkessel, Bewässerungssysteme, Blata – Cerna

1. Uvod

Sustavi navodnjavanja planiraju se i grade radi stvaranja i održavanja potrebnoga vodnog režima u tlu, ovisno o zahtjevima optimalnog razvoja biljnih kultura i postizanju njihovoga punoga biološkog potencijala, tj. ostvarivanja najvećih mogućih prinosa. Projektiranje sustava za navodnjavanje podrazumijeva iznalaženje optimalnog rješenja u funkcionalnom i ekonomskom kontekstu kako bi se ispunili zahtjevi maksimalnog razvoja biljnih kultura. U ovom radu se razmatra sustav navodnjavanja Blata-Cerna koji se sastoji od srednjetačnih crpki, distribucijske vodovodne mreže, lineara i tifona.

U sustavima navodnjavanja, gdje se odvija tečenje pod tlakom, zbog naglog zatvaranja zasuna i/ili ispada crpke iz pogona dolazi do nagle promjene brzine toka koja uzrokuje vodni udar. U okviru projektiranja potrebno je izraditi i hidraulički proračun nestacionarnih stanja kako bi se odredili maksimalni i minimalni tlakovi i po potrebi predvidjela zaštita od nepovoljnih tlačnih opterećenja.

Probleme u sustavu može uzrokovati i zarobljeni zrak u cjevovodu. Zrak je vrlo stlačiv te njegovo sabijanje i širenje u cjevovodu može rezultirati promjenama brzina tečenja, a time i značajnim varijacijama tlaka u sustavu [1]. Hidrauličkim se proračunima razmatraju i analiziraju sve situacije koje mogu uzrokovati takve promjene, pa se predviđa zaštita sustava kako bi se izbjegle neželjene posljedice uslijed pojave vodnog udara.

U ravničarskim područjima postoji mogućnost pojave podtlaka. Pri ispadu crpke iz pogona dolazi do pada tlaka odmah uz crpnu stanicu i duž trase. Za zaštitu od podtlaka uz crpnu se stanicu ugrađuje zračni kotao, a na cjevovodima zračni ventili.

U radu su predloženi problemi koji se mogu javiti u sustavima navodnjavanja pri ispadu crpki iz pogona i naglog zatvaranja zasuna od strane korisnika. Za sustav navodnjavanja Blata – Cerna simuliran je ispad crpki iz pogona za sustav bez zaštite, ispad crpki iz pogona za sustav zaštićen zračnim kotlom i za slučaj naglog zatvaranja zasuna od strane korisnika. Simulirani su i analizirani scenariji istodobnoga naglog zatvaranja zasuna od strane korisnika te postupnog zatvaranja, čime je određeno minimalno vrijeme potrebno za zatvaranje zasuna kako u sustavu ne bi došlo do neželjenih tlačnih stanja. Analiziran je utjecaj promjene tlaka u karakterističnim čvorovima uslijed istodobnog zatvaranja zasuna.

2. Matematički model i istaknute jednadžbe

2.1. Model, jednadžbe i osnovni parametri

Matematički je model izrađen u računalnom programu Bentley Hammer koji metodom karakteristika opisuje nestacionarno tečenje. Istaknute jednadžbe za izračun nestacionarnih pojava su zakon očuvanja mase (1) i zakon očuvanja količine gibanja (2), [2]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

gdje je:

- a - brzina vodnog vala (L/T)
- v - prosječna brzina u cijevi, paralelna s x -osi (L/T)
- H - piezometarska visina (L)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (2)$$

gdje je:

- f - Darcy-Weisbachov koeficijent trenja (1)
- D - unutarnji promjer cijevi (L)
- v - brzina tekućine

Karakteristike modelirane tekućine (vode):

- temperatura vode, 4 °C
- kinematička viskoznost, $1,566 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- modul elastičnosti, $0,2188 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
- tlak vodenih para, -1,0 bara.

Vremenski parametri:

- vremenski inkrement, 0,01 s
- vrijeme simulacije, 300 s.

2.2. Opis analiziranog sustava

Sustav navodnjavanja Blata – Cerna obuhvaća površinu od približno 500 ha [3, 4] na kojoj se razgranata nalazi cjevovodna mreža u duljini od 13.955 m (slika 1.). Sustav se sastoji od vodozahvata, crpne stanice i mreže cjevovoda koja će biti izgrađena cijevima modularnog lijeva i PEHD (PE100 PN10 SDR17) cijevima. Sustav se nalazi na ravničarskom terenu gdje je najniža kota terena 77,2 m n.m., a najviša 83,3 m n.m.

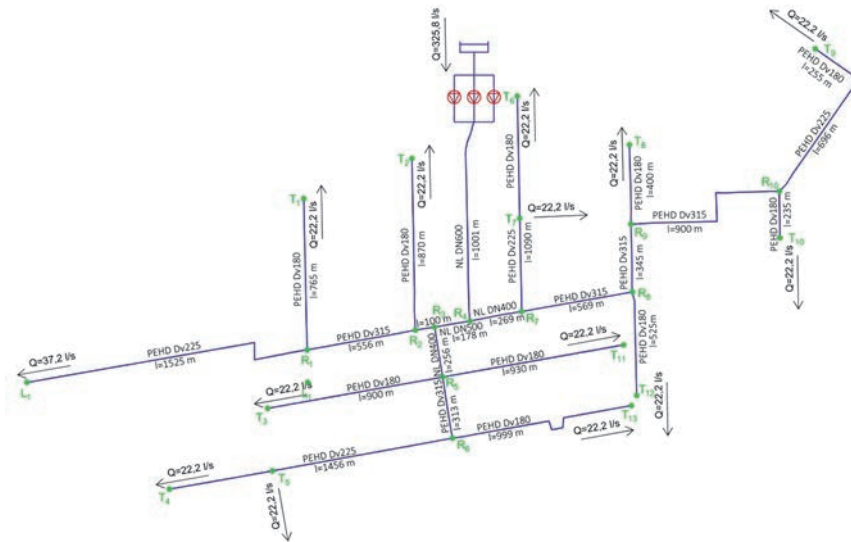
Iz vodozahvata voda se transportira gravitacijski prema građevini crpne stanice. U crpnoj se stanici nalaze tri radne crpke ukupnog kapaciteta 325,8 l/s i jedna rezervna s manometarskom visinom dizanja $H = 80 \text{ m}$. Iza svake se crpke (na tlačnoj strani) nalazi nepovratni ventil čija je funkcija zaštita crpke kad nije u pogonu.

Predviđena oprema za navodnjavanje su tifoni s protokom $Q = 22 \text{ l/s}$ na 13 lokacija i linear na jednoj lokaciji s protokom $Q = 37 \text{ l/s}$. Potrebno je uzeti u obzir i mogućnost navodnjavanja načinom "kap na kap", tj. lokalizirano navodnjavanje. S obzirom na predviđeni tip navodnjavanja, potrebno je osigurati minimalan tlak od šest bara u svim dijelovima sustava.

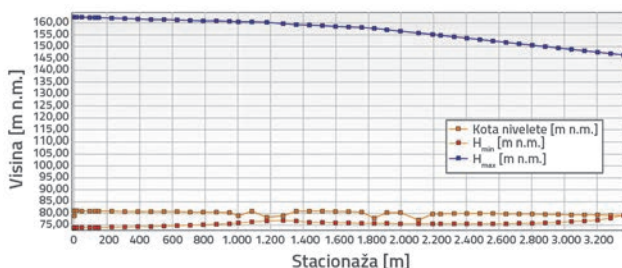
3. Simulacije i rezultati matematičkog modela

3.1. Sustav bez tlačne zaštite

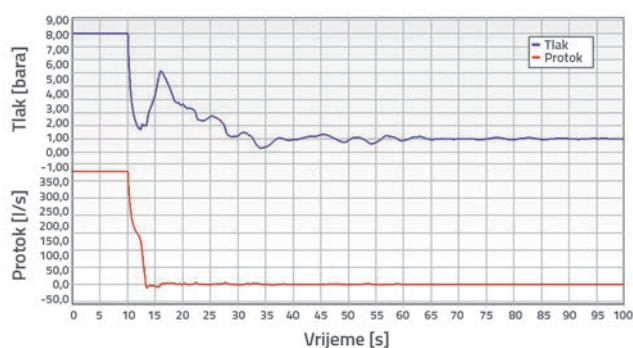
Za opisani sustav navodnjavanja obavljena je simulacija ispada 3 crpke iz pogona pri maksimalnom ukupnom protoku $Q = 325,8 \text{ l/s}$ kroz 10 sekundi. Sustav nije zaštićen od tlačnih prekoračenja. Shematski prikaz sustava dan je na slici 1.



Slika 1. Shematski prikaz sustava navodnjavanja bez tlačne zaštite



Slika 2. Anvelope minimalnih i maksimalnih tlačnih visina na dionici od crpne stanice do lineara – nezaštićen sustav



Slika 3. Protok i tlak s tlačne strane crpke – nezaštićen sustav

Ispadom crpki iz pogona protok se smanjuje dok se voda ne zaustavi, a nakon toga se počinje kretati u suprotnom smjeru. Povratni tok vode prema crpki spriječen je nepovratnim ventilom. U trenutku ispada crpke iz pogona počinje propagacija negativnoga tlačnog vala duž mreže. Kada na tlačnu visinu prije svega utječe trenje, što je slučaj u dugim cjevovodima, pri ispadi crpke iz pogona može se pojaviti tlak vodenih para, a time i prekid vodnog stupca. Prekid se najčešće javlja pri ispadi crpke iz pogona na najvišim kotama nivelete cjevovoda [5]. Pad tlaka

može uzrokovati pojavu pjene i ispuštanje mjehurića zraka iz tekućine koji se skupljaju na najvišoj točki u cjevovodu. Mjehurići zraka mogu putovati duž cjevovoda i uzrokovati udare, pogotovo kada vodna masa oscilira i stlačuje zračni jastuk s obje strane [6].

Slika 2. prikazuje anvelope minimalnih i maksimalnih tlačnih visina na dionici sustava crpna stanica – linear (od čvora CS do čvora L1). S ispadom crpki iz pogona (u desetoj sekundi simulacije) dolazi do nestacionarnog tečenja u sustavu. Najmanje vrijednosti tlaka pojavljuju se izravno ispred crpke, a varijacije tlaka su prikazane na slici 3. Ispadom crpki iz pogona zatvara se nepovratni ventil, što rezultira naglim padom tlaka odmah ispred crpne stanice

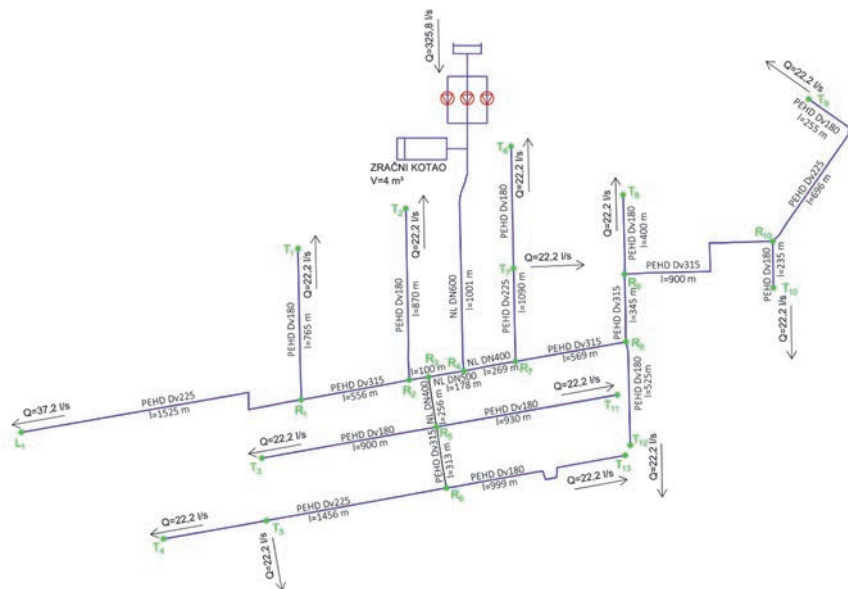
i propagacijom negativnog vala duž mreže. Najmanja vrijednost tlaka na promatranom cjevovodu iznosi -0,7 bara, a najviša vrijednost 8,2 bara.

3.2. Sustav zaštićen zračnim kotlom

Najučinkovitiji način za sprječavanje pojave negativnih tlakova i smanjivanja prekomjernih tlakova jest ugradnja zračnih kotlova [5]. Zračni kotao predstavlja učinkovitu zaštitu jer pri ispadi crpke iz pogona, kada se protok na tlačnoj stani crpke smanjuje i dolazi do pojave opadanja tlaka, stlačeni zrak u kotlu tjera vodu iz kotla u mrežu. Također, u trenutku pojave povratnog strujanja, voda utječe u kotao onoliko koliko dopušta stlačeni zrak u kotlu. Na taj se način usporava promjena brzina vode u cjevovodu, a time i prateće oscilacije tlaka.

Propagacija negativnog tlačnog vala odvija se duž cijele cjevovodne mreže i zbog toga može doći i do pojave podtlaka na pojedinim lokacijama. Ugradnja zračnih ventila je učinkovita zaštita od te neželjene pojave. Zračnim se ventilima reguliraju količine zraka u cjevovodu radi smanjivanja ili sprječavanja potencijalno razornih posljedica pokretnog i zarobljenog zraka [7]. Na promatranom sustavu na trasi se nalaze zračni ventili koji služe za odzračivanje sustava u svakodnevnom radu, upuštanje zraka u uvjetima kad je tlak u cjevovodu manji od atmosferskog i ispuštanje zraka iz cjevovoda u uvjetima ponovnog punjenja vodom.

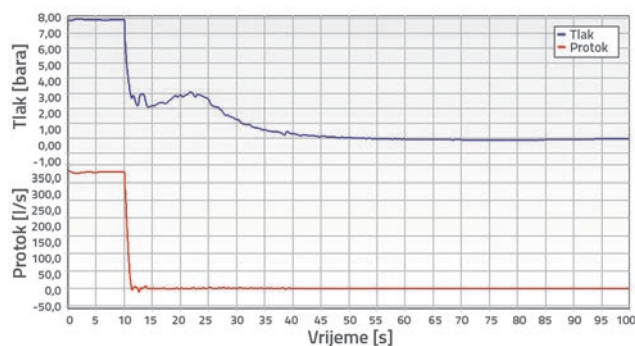
Nizom simulacija određeni su potrebni parametri zračnog kotla. Specifičnost opisanog sustava je u tome što će instalirani zračni kotao imati dvostruku funkciju. S obzirom na to da je trebalo predvidjeti mogućnost navodnjavanja poljoprivrednih površina i sustavom "kap na kap", a predviđene crpke ne mogu raditi s malim protocima, u redovnom pogonu zračni kotao će osiguravati dostatne količine vode pri minimalnim protocima, tj. bit će u funkciji vodospreme, dok će u iznimnim situacijama ispada crpke iz pogona štiti sustav od tlačnih prekoračenja. Iz navedenih



Slika 4. Shematski prikaz sustava navodnjavanja zaštićenog zračnim kotlom

razloga je i odabran zračni kotao većeg volumena nego što je potrebno za zaštitu od tlačnih prekoračenja. Predviđeni volumen zračnog kotla je 4 m³. Odnos volumena zraka i volumena vode je $V_z/V_v = 0,25/0,75$, tj. volumen vode u posudi iznosi $V = 3 \text{ m}^3$. Na slici 4. shematski je prikazan sustava sa zaštitom.

Učinkovitost zračnog kotla se može vidjeti na dijagramu prikazanom na slici 5. Pri ispadu crpke iz pogona, minimalan tlak ispred crpke iznosi -0,1 bar, dok maksimalni iznosi 8 bara. Stoga predviđena zaštita sustava navodnjavanja zračnim kotlom i zračnim ventilima duž trase zadovoljava pri ispadu crpki iz pogona postavljene kriterije.



Slika 5. Protok i tlak s tlačne strane crpke – zaštićen sustav

3.3. Naglo zatvaranje zasuna na tifonima i linearu

Potrošači na krajnjim točkama sustava navodnjavanja su tifoni s protocima 22,2 l/s i linear s protokom 37,2 l/s. Simulacijama matematičkog modela ispitana je dostatnost predviđene zaštite i prilikom zatvaranja zasuna od strane korisnika.

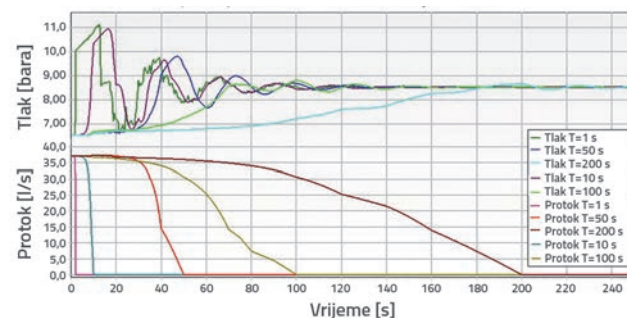
Tijekom zatvaranja zasuna, duž cjevovoda raste tlak. Maksimalno tlačne visine može se dosegnuti pri zatvaranju zasuna ili u

trenutku kada je zasun zatvoren. Veličina i trenutak pojavljivanja maksimalne tlačne visine znatno ovise o brzini zatvaranja zasuna. Trenutačno zatvaranje zasuna odnosi se na zatvaranje zasuna kada vrijeme zatvaranja teži k nuli, dok se termin naglo zatvaranje odnosi na vrijeme manje od $2L/a$ (gdje je: L - duljina cijevi, a - brzina vodnog vala). Općenito, što je kraće vrijeme zatvaranja zasuna to je veći porast tlačne visine [8].

Slika 6. prikazuje promjene tlaka i protoka u čvoru L1 pri različitim brzinama zatvaranja zasuna ($T = 1 \text{ s}$, $T = 10 \text{ s}$, $T = 50 \text{ s}$, $T = 100 \text{ s}$, $T = 200 \text{ s}$), pri početnom protoku $Q = 37,2 \text{ l/s}$. Naglo zatvaranje zasuna u čvoru L1 dovodi do sabijanja vode, a time i do povećanja tlaka. Iz dijagrama je vidljivo da vrijednost maksimalnog tlaka može porasti i na više od 11 bara, što može imati za posljedicu

puknuće na tom dijelu mreže. Zato se postupnim zatvaranjem zasuna može spriječiti pojava neželjenih maksimalnih tlakova u sustavu.

Pri nestacionarnom tečenju, u slučaju pojave znatno većih tlakova od tlačne nosivosti elemenata sustava, sustav se može zaštititi i odušnim ventilima. Postavljanje odušnih ventila treba podesiti na način da se otvaraju kada tlak prijeđe vrijednost radnog tlaka za 5 m vodnog stupca. Iskustveno je određeno da odušne ventile treba ugraditi približno 500 m od zasuna na svakoj grani i u razmacima od 2 km na glavnom cjevovodu [9].



Slika 6. Tlakovi i protoci pri različitim brzinama zatvaranja zasuna u čvoru L1

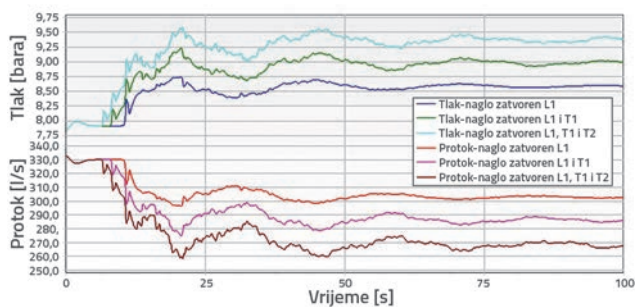
Simulacijama matematičkog modela ispitana je međusobni utjecaj istodobnog naglog zatvaranja zasuna. Na slikama od 7. do 9. prikazani su rezultirajući tlakovi u karakterističnim čvorovima: čvor CS na tlačnoj strani crpke, čvor R3 koji se nalazi na račvanju cjevovoda i u čvoru T1 na rubnom dijelu sustava na lokaciji zatvaranja zasuna.

Zatvaranje zasuna u čvoru L1 uzrokuje maksimalan tlak u čvoru T1 od 9,5 bara, dok istodobno zatvaranje zasuna u čvorovima L1 i T1 uzrokuje povećanje tlaka na 11,25 bara. Isto tako zatvaranje

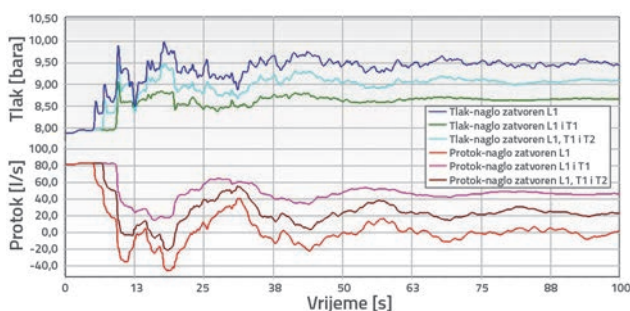
zasuna u čvorovima L1, T1 i T2 uzrokuje pojavu maksimalnih tlakova i do 12 bara u čvoru T1. Naglo istodobno zatvaranje zasuna uzrokuje promjene tlaka u svim čvorovima duž sustava, pa tako i u čvoru odmah ispred crpki i na račvanju. Zatvaranje jednog zasuna uzrokuje maksimalne tlakove i za 1,5 bara manje nego zatvaranje tri zasuna istodobno. Veličina maksimalnih tlakova ovisi o lokaciji promatranog čvora u odnosu na lokaciju zasuna koji se zatvara. Razmatran je utjecaj udaljenosti zasuna koji se istodobno zatvaraju na promjenu tlaka u čvoru ispred crpne stanice (CS) i u čvoru na kojem se zatvara zasun(L1), tablica 1. U čvoru L1 najveći utjecaj na promjenu tlaka ima istodobno zatvaranje zasuna u čvoru L1 i T1, gdje promjena tlaka iznosi $\Delta p = 4,35$ bara. Na istom se ogranku nalazi i zasun u čvoru T2, no njegovo istodobno zatvaranje uzrokuje znatno manju promjenu tlaka u čvoru L1 ($\Delta p = 2,52$ bara). Promjena tlaka uslijed zatvaranja ostalih zasuna u mreži je gotovo jednaka. U čvoru CS ne dolazi do značajnijih promjena uslijed istodobnog zatvaranja dva zasuna neovisno o njihovoj udaljenosti. Najveća je promjena tlaka $\Delta p = 0,49$ bara pri istodobnom zatvaranju zasuna u čvorovima L1 i T1.

Tablica 1. Utjecaj istodobnog zatvaranja zasuna na povećanje tlaka u čvoru L1 i CS

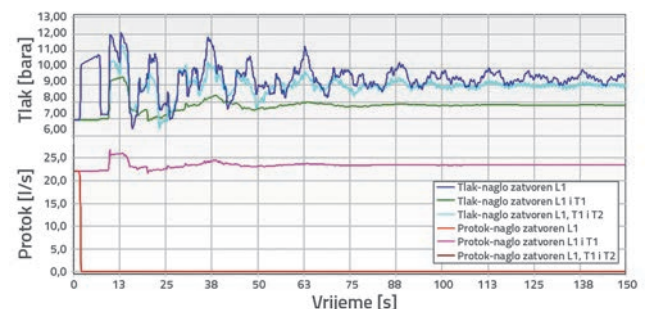
Čvor	Udaljenost čvorova [m]	Čvor L1		S tlačne strane CS	
		P_{max} [bara]	Δp_{max} [bara]	P_{max} [bara]	Δp_{max} [bara]
L1		11,1		8,74	
L1-T1	2290	13,09	4,35	9,23	0,49
L1-T2	2951	11,26	2,52	9,13	0,39
L1-T3	3337	11,1	2,36	9,06	0,32
L1-T4	4206	11,1	2,36	9,08	0,34
L1-T5	3680	11,1	2,36	9,07	0,33
L1-T6	3718	11,1	2,36	9,08	0,34
L1-T7	3083	11,22	2,48	9,07	0,33
L1-T8	3942	11,1	2,36	9,06	0,32
L1-T9	5393	11,1	2,36	9,09	0,35
L1-T10	4677	11,1	2,36	9,05	0,31
L1-T11	3367	11,1	2,36	9,06	0,32
L1-T12	3722	11,1	2,36	9,08	0,34
L1-T13	3749	11,1	2,36	9,11	0,37



Slika 7. Protok i tlak s tlačne strane crpki pri naglom zatvaranju zasuna



Slika 8. Protok i tlak u čvoru R3 pri naglom zatvaranju zasuna

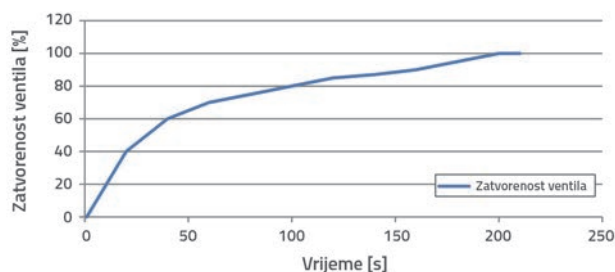


Slika 9. Protok i tlak u čvoru T1 pri naglom zatvaranju zasuna

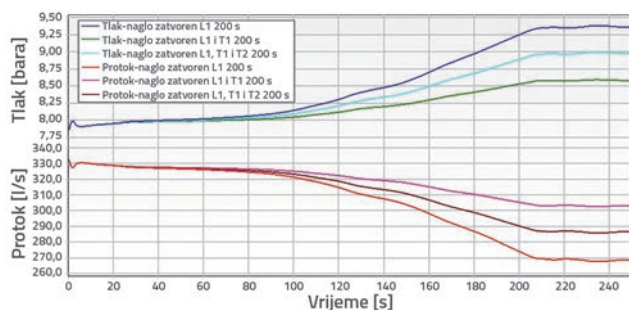
3.4. Postupno zatvaranje zasuna na tifonima i linearu u periodu od 200 s

Naglo zatvaranje zasuna uzrokuje neželjene promjene tlaka u sustavu. U čvoru L1 (linear) ustanovljena je najveća potrošnja odnosno najveći protok 37,2 l/s. Trenutačno zatvaranje zasuna u tom čvoru uzrokuje najveće promjene tlaka u sustavu. Naglim zatvaranjem zasuna u čvoru L1 dolazi do najvećih promjena tlaka u blizini čvora pa se javljaju tlakovi i s više od 11 bara. Utjecaj zatvaranja zasuna slabi duž trase, tako da u čvoru ispred crpne stanice maksimalni tlakovi iznose 8,8 bara.

Na matematičkom modelu simulirani su scenariji postupnog zatvaranja zasuna, vrijeme zatvaranja $t = 200$ s, slika 10. Slike od 11. do 13. prikazuju dijagrame tlakova pri postupnom zatvaranju jednog zasuna (zasun L1), dva zasuna istodobno (zasuni L1 i T1) i tri zasuna istodobno (zasuni L1, T1 i T2). Postupno zatvaranje zasuna također uzrokuje tlačne promjene na sustavu, ali one više nisu tako nagle i u okvirima su dopuštenih vrijednosti.



Slika 10. Postupno zatvaranje zasuna T = 200 s

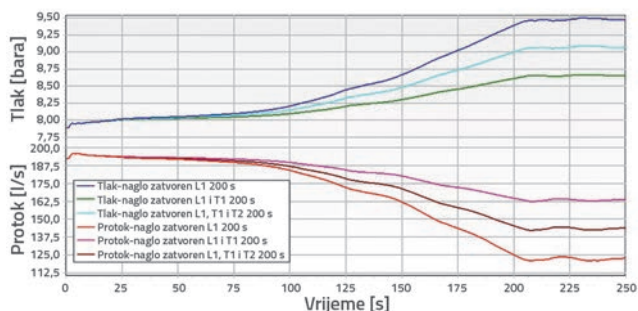


Slika 11. Protok i tlak na tlačnoj strani crpki pri zatvaranju zasuna u T = 200 s

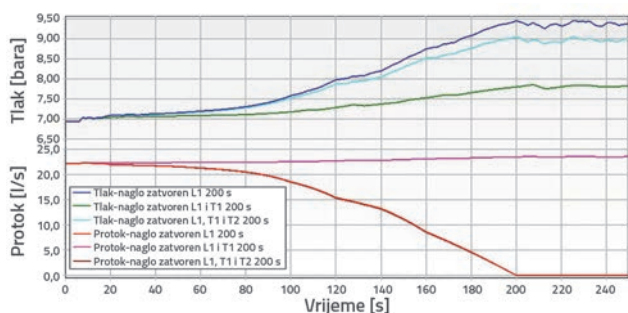
4. Zaključak

Na primjeru sustava navodnjavanja Blata – Cerna prikazana je važnost provedbe hidrauličkog proračuna nestacionarnih pojava u razgranatom sustavu navodnjavanja. Pri ispadu crpke iz pogona dolazi do značajnog pada tlaka na tlačnoj strani crpke i duž trase te može doći do pojave podtlaka. Tlačni sustavi se od neželjenih posljedica vodnog udara mogu štititi zračnim kotlom i zračnim ventilima. Na sustavu navodnjavanja Blata – Cerna predviđena je zaštita zračnim kotlom i zračnim ventilima duž trase, te je pokazana učinkovitost takve zaštite.

U radu je upozoreno na problem prirasta tlaka uslijed naglog zatvaranja zasuna na krajnjim čvorovima mreže. Predviđena



Slika 12. Protok i tlak u čvoru R3 pri zatvaranju zasuna u T = 200 s



Slika 13. Protok i tlak u čvoru T1 pri zatvaranju zasuna u T = 200 s

zaštita zračnim kotlom nije dostatna za zaštitu od naglog zatvaranja zasuna pa je predviđeno potrebno vrijeme zatvaranja zasuna kako bi se ublažile oscilacije i smanjile promjene u tlačnim visinama.

Analizom istodobnog zatvaranja više zasuna utvrđen je utjecaj na promjenu maksimalnog tlaka u sustavu, ali i to da udaljenost zasuna koji se zatvaraju utječe na promjenu tlaka do određene granice, a potom ta promjena teži konstantnoj vrijednosti.

S obzirom na nepoznavanje točnog rada zasunskih ventila, momenta inercije crpki koji će biti ugrađeni i ostalih parametara koji su usvojeni u proračunu, predviđa se ugradnja mjerne opreme kojom će se pratiti rad sustava te na osnovi toga verificirati proračuni i izraditi pogonski pravilnik, a po potrebi ugraditi i dodatni odzračni ventili.

LITERATURA

- [1] Clark, G.A., Smajstrla, A.G., Haman, D.Z.: *Water Hammer In Irrigation Systems*, EDIS, University of Florida, Circular 828, (1994), <http://edis.ifas.ufl.edu/ae066> (12. 04.2017.)
- [2] Walski, T.M., Chase, D.V., Savic, D.A., Grayman, W., Beckwith, S., Koelle, E.: *Advanced water distribution modeling and management*, First edition, Bentley systems, Exton, 2007.
- [3] Sustav navodnjavanja Blata – Cerna, idejni projekt, knjiga 1 i knjiga 2, *Vodoprivreda Vinkovci d.d.*, 2010.
- [4] Sustav navodnjavanja Blata – Cerna, glavni projekt, *Hidroprojektiranje d.o.o.*, 2014.
- [5] Elsaheed, G.H., Ali, A.E.M., Elgani, E.F.A.: *Improved design for irrigation pipeline networks*, Journal of Applied Sciences Research, 7 (2011), pp. 2127-2139
- [6] Stephenson, D.: *Simple Guide for Design of Air Vessels for Water Hammer Protection of Pumping Lines*, Journal of Hydraulic Engineering, 128 (2002), pp. 792-797, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:8\(792\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:8(792))
- [7] Ramezani, L., Karney, B., Malekpour, A.: *The Challenge of Air Valves: A Selective Critical Literature Review*, Journal of Water Resources Planning and Management, 141 (2015), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000530)
- [8] Karney, B.W., Ruus, E.: *Charts for water hammer in pipelines resulting from valve closure from full opening only*, Canadian Journal of Civil Engineering, 12 (1985), pp. 241-264, <https://doi.org/10.1139/l85-027>
- [9] Labye, Y., Olson, M.A., Galand, A., Tsiourtis, N.: *Design and optimization of irrigation distribution networks*, Rim, 1988.