

Planiranje ispiranja vodovodnih mreža: okvir za optimizaciju efikasnosti učinka i troškova implementacije

Damjan Ivetić, mast.građ.inž.

Željko Vasilić, mast.građ.inž.

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
divetic@grf.bg.ac.rs

Rezime

Ispiranje vodovodne mreže je osnovna aktivna fizička mera za čišćenje cevi vodovodne mreže sa ciljem održavanja i unapređenja kvaliteta vode za piće. Najčešće se primenjuju tradicionalna, odnosno konvencionalna, tehnika ispiranja i takozvana tehnika ispiranja u jednom pravcu. U ovom radu fokus je stavljen na tehniku ispiranja u jednom pravcu budući da se poslednjih decenija primarno ona koristi zbog određenih prednosti u odnosu na tradicionalnu tehniku. Ispiranje u jednom pravcu se može koristiti u formi reaktivnog odgovora nakon akcidenta sa kvalitetom vode (npr pojava zamućenja vode) ili kao deo protokola za održavanje kvaliteta pijaće vode u redovnim operativnim uslovima. Dobra praksa je pokazala da je neophodno imati plan ispiranja kojim se definiše sekvenca poteznih ispiranja za efikasno ispiranje određenog dela vodovodne mreže. Definisanje plana ispiranja se i dalje najčešće vrši „ručno“ uprkos činjenici da to predstavlja složen i dugotrajan proces. U ovom radu se identifikuju i analiziraju ključni kriterijumi za planiranje ispiranja: geometrijski, hidraulički i ekonomski. Predlaže se okvir za optimizaciju efikasnosti učinka i troškova implementacije, kojim se obezbeđuje bolja kontrola i ujednačenost efikasnosti ispiranja kao i realna procena troškova implementacije plana. Predstavljen je i razvijeni hidroinformatički alat (algoritam) za planiranje ispiranja i analizirani su rezultati primene na primeru jedne zone za ispiranje u gradu Amsterdamu u Holandiji.

Ključne reči: Vodovodni sistemi, Ispiranje mreže, Ispiranje u jednom pravcu, plan ispiranja, kvalitet vode

Water distribution networks flushing planning: framework for optimization of implementation efficiency and cost

Abstract

Water distribution network flushing is one of the basic active physical activities for pipe cleaning aiming to preserve and enhance the drinking water quality. Most frequently used techniques are traditional, or conventional, flushing and unidirectional flushing. In this paper, focus is placed on the unidirectional flushing as in past decades, well-equipped water utilities are preferring this technique due to the several advantages over traditional flushing. Unidirectional flushing can be applied in the form of the reactive response after the water quality accident (e.g. discoloration) or within a regular maintenance protocol, under regular operating conditions. Either way, good flushing practice has shown that a flushing plan is needed to define the sequence of the designed flushing operations aiming to allow for effective and efficient discoloration risk mitigation. Design of a flushing plan is still, commonly, a "manual" job, despite the fact that is complex and time-consuming task. Here key criteria for flushing planning are identified and analyzed: geometric, hydraulic and economic. A framework for efficiency and cost optimization is suggested, enabling better control and uniformity of the flushing effectiveness, and providing realistic estimates of the flushing cost. Developed hydroinformatic tool (algorithm) for flushing planning is presented and results of the application on the flushing zone in Amsterdam, Netherlands, are analyzed.

Keywords: Water distribution systems, Network flushing, Unidirectional flushing, Flushing plan, Water quality

1. UVOD

Zamućenje pijaće vode u vodovodnim sistemima je najčešći razlog žalbi potrošača u većini zemalja [1]. Jednom kada se identifikuje zamućenje vode u određenom delu, odnosno zoni, vodovodne mreže, nadležna komunalna preduzeća uobičajeno reaguju primenom nekih od metoda za ispiranje cevi mreže. Poslednjih decenija, pored reaktivnog delovanja, u redovne aktivnosti razvijenijih vodovoda uključen je i koncept upravljanja rizikom od zamućenja.

Sama ideja o upravljanju rizikom od zamućenja, kao i prevenciji pojave ovakvih akcidenata, se zasniva na razumevanju mehanizama i procesa koji dovode do pojave zamućene vode u vodovodnim mrežama. U opštem slučaju, promena boje vode u vodovodnoj mreži je rezultat akumuliranja čestičnih materija u cevima i njihovoj naknadnoj remobilizaciji koja se javlja usled određenih hidrauličkih promena ili poremećaja [2,3]. Smanjenje rizika od

zamućenja se zasniva na primeni tri raspoložive strategije [3]: 1) unapređenje kvaliteta pripremljene vode za piće (sa ciljem smanjenja unosa čestične materije u vodovodnu mrežu) 2) projektovanje i izvođenje vodovodne mreže sa mogućnošću samo-ispiranja (radi sprečavanja akumuliranja materije u cevima) i 3) čišćenje mreže (kako bi se lokalno uklonio akumulirani materijal u cevima pre nego što količine budu previsoke). Međutim, treba imati u vidu da su navedene strategije do sada bile samo delimično uspešne.

Pod čišćenjem mreže se podrazumevaju tri različita postupka: 1) ispiranje mreže vodom, 2) čišćenje (podlokavanje) vazduhom ili ledom i 3) čišćenje provlačenjem mehaničkog uređaja kroz cevovod (eng. swabbing/pigging [1]). Vremenom se od navedenih tehnika, uprkos određenim manama [4], ispiranje mreže vodom nametnulo kao najjednostavnija i najrobusnija metoda čišćenja mreže [5].

Ispiranje mreže vodom se uglavnom sprovodi primenom tehnike tzv. Tradicionalnog ispiranja (TI) mreže ili ispiranjem u jednom pravcu (IJP) [6]. Kod tehnike IJP, određena zona mreže se ispira kroz više uzastopnih poteznih ispiranja cevi, tako da se tok čiste vode u mreži propušta kroz segment ispirane cevi i izbacuje u atmosferu preko hidranta. U svakom poteznom ispiranju, manipulacijom grupe zatvarača i otvaranjem odgovarajućeg hidranta, tok vode se usmerava kroz ciljane cev. Skup uzastopnih poteznih ispiranja mreže čini plan ispiranja. Definisane plan ispiranja je standardno komplikovan i složen zadatak koji zahteva dosta radnog vremena inženjera nadležnog komunalnog preduzeća, budući da se uobičajeno ručno sprovodi [7]. Probleme predstavljaju veliki broj mogućih rešenja, strogi hidraulički kriterijumi koje treba zadovoljiti u svakom poteznom ispiranju, kao i potreba da razvijeni plan ispiranja bude ekonomičan kako u pogledu utrošenih resursa tako i u pogledu potrebnog vremena za realizaciju.

U ovom radu se identifikuju i detaljnije analiziraju ključni kriterijumi kojima se treba rukovoditi pri pravljenju plana ispiranja. Predlaže se okvir za optimizaciju efikasnosti postupka ispiranja, sa ciljem poboljšanja kontrole i ujednačenosti efekata ispiranja odnosno minimizacije realnih troškova implementacije. Ukratko je predstavljen i primer implementacije navedenog okvira u hidroinformatički alat za planiranje ispiranja vodovodne mreže „FPA“ (eng. Flushing Planning Algorithm) kao i rezultati njegove primene na primeru dela vodovodne mreže grada Amsterdama u Holandiji.

2. METODOLOGIJA

2.1. Ispiranje u jednom pravcu

Tok vode, kojim se cevi ispiraju, mora biti „čist“, odnosno dolaziti od tzv. fronta čiste vode (eng. clearwater front). Ideja je da se sa svakim ispranim segmentom mreže, front čiste vode pomera, smanjujući zagađenu zonu dok se ona u potpunosti ne očisti. Ispiranjem cevi se uklanja akumulirani čestični materijal (glina, pesak, rđa itd.) iz mreže, eliminiše se ukus i miris, smanjuje mutnoća, obezbeđuje se porast rezidualnih koncentracija hlora i omogućava se bolja kontrola rasta mikroorganizama [8]. Razlikuju se dva postupka: tradicionalno ispiranje (TI) i ispiranje u jednom pravcu (IJP) [6].

U slučaju postupka TI, otvara se jedan ili više hidranata, kroz koje voda ističe iz mreže, dok se kvalitet vode u samoj mreži ne vrati na neki zadovoljavajući nivo. Usled otvaranja hidranata, povećava se „potrošnja“ i lokalno se u cevima povećavaju brzine tečenja.

U slučaju postupka IJP, koji je ovde u fokusu analize, segmenti mreže se u potezima izoluju i ispiraju, manipulacijom zatvarača i otvaranjem barem jednog hidranta za ispuštanje vode (nekada se radi povećavanja brzine tečenja otvaraju i dodatni hidranti). U više sistematski organizovanih uzastopnih poteznih ispiranja, cela mreža ili njen deo (zona) se ispiraju. IJP se sprovodi od fronta čiste vode ka cevima koje treba isprati. U odnosu na TI, IJP ima određene prednosti kao što su veće brzine tečenja, manja potrošnja i prekidi u vodosnabdevanju, zbog čega se i u praksi češće koristi .

IJP se primenjuje u slučaju pojave zamucenja, ili zagađenja, u formi reaktivne mere za uklanjanje „zagađivača“ iz mreže, ali i u formi pro-aktivne mere za smanjenje rizika, kroz primenu planskih ispiranja mreže na nivou dela ili cele mreže. Razvijenija i veća, odnosno finansijski dobrostojeća, komunalna preduzeća imaju podeljene vodovodne mreže na tzv. zone ispiranja (eng. Flushing zones), koje se planski ispiraju [7]. Učestalost ispiranja se definiše prema merenjima mutnoće, učestalosti prethodnih incidenata i opštem stanju vodovodne infrastrukture u određenoj zoni.

Za primenu postupka IJP potrebna je terenska ekipa, odgovarajući alat za manipulaciju i poželjno adekvatna merna oprema za kontrolisanje učinka ispiranja. Na slici 1, prikazan je kofer sa mernom opremom koji se koristi u Holandskom gradu Amsterdamu, u okviru kojeg se nalazi elektromagnetno

merilo protoka, pjezorezistivni senzor pritiska i optički senzor mutnoće. Na ovaj način, terenska ekipa na svakom izlaznom hidrantu poteznog ispiranja, može da kontroliše da li je dostignuta željena brzina za ispiranje, kao i kada je front čiste vode stigao do hidranta.



Slika 1. Kofer sa opremom za merenje protoka, pritiska i mutnoće pri primeni IJP (Amsterdam, Holandija)

Figure 1. Casing with equipment for flow, pressure and turbidity measurements during the uni-directional flushing (Amsterdam, Netherlands)

Za planiranje ispiranja određene zone vodovodne mreže, metodom IJP, potrebno je raspolagati GIS i/ili hidrauličkim modelom sa osnovnim podacima o sistemu. Za definisanje planova za IJP, u primeru obrađenom u ovom radu, korišćeni su podaci o matematičkom modelu vodovodnog sistema definisani u EPANET okruženju, odnosno u formi .inp fajla. Potreban je određen nivo detaljnosti matematičkog modela, takav da su svi relevantni elementi odgovarajuće predstavljeni (cevi, zatvarači i hidranti). Takođe, pretpostavlja se da je matematički model, kao osnovni ulazni podatak za algoritam, kalibrisan.

2.2. Kriterijumi za ispiranje mreže

Planiranje ispiranja vodovodne mreže, ili njenog određenog dela, se vrši prema sledećim kriterijuma: 1. Geometrijski, 2. Hidraulički i 3. Ekonomski. Načelno, geometrijski kriterijumi definišu koje cevi treba ispirati, hidraulički definišu neophodne uslove tokom ispiranja kojim se obezbeđuje poželjan nivo

efikasnosti ispiranja, dok sveprisutni ekonomski kriterijumi nameću da se ispiranje sprovede sa minimalnim utroškom resursa.

Geometrijski kriterijumi

„Idealno“ ispiranje vodovodne mreže bi podrazumevalo ispiranje svih cevi distributivne vodovodne mreže, u ciljanoj zoni. Međutim, imajući u vidu ograničenu raspoloživu potencijalnu energiju koju treba prevesti u kinetičku, zarad ostvarivanja minimalne brzine ispiranja, kao i druga praktična ograničenja (broj hidranata na određenom potezu, stanje hidranata) to često nije fizički moguće ostvariti ili pak nije ekonomski opravdano. Zbog toga se uobičajeno definiše maksimalni prečnik cevi koji se može ispirati. [6], navode primere iz SAD-a i Kanade, gde se za maksimalni prečnik uzima vrednost od 300 mm. Treba napomenuti da se cevi ovih prečnika takođe ispiraju, ali se to mora sprovesti u zasebnom poteznom ispiranju (ne treba se kombinovati sa cevima manjeg prečnika) otvaranjem više ispusnih hidranata [9]). Sa druge strane, „dobra inženjerska praksa“ u Holandiji, prepoznaje da plan ispiranja treba obuhvatiti sekundarnu i tercijernu distributivnu mrežu, odnosno cevi prečnika jednakog ili većeg od 50 mm, dok vrednosti maksimalnog prečnika variraju od 150 mm (grad Amsterdam, preduzeće „Waternet“) do 300 mm.

Takođe, treba napomenuti da postupak IJP treba sprovoditi tako da se napreduje od cevi većih prečnika ka cevima manjih prečnika, koliko je to moguće. U suprotnom slučaju, neretko je teško ostvariti traženu minimalnu brzinu na celoj deonici, zbog energetskih gubitaka.

Hidraulički kriterijumi

Zadatak je da se u procesu IJP ukloni zamućena voda, naslage čestičnog sedimenta a u određenim situacijama i cementirane naslage. U zavisnosti od prirode zagađenja, tok vode treba da obezbedi potreban smičući napon kako bi se omogućilo pokretanje sedimenta ili cementiranih naslaga. U literaturi se za IJP empirijski definišu minimalne brzine tečenja u opsegu od 0.9 do 1.8 m/s [2,6]. Međutim, većina autora se slaže da su za efikasno uklanjanje zamućenja i čestičnih materija dovoljne brzine od 1.0 do 1.6 m/s, dok se brzine veće od 1.6 m/s mogu koristiti za skidanje cementiranih naslaga, pored mehaničkih, hemijskih ili enzimskih metoda čišćenja [10]. Primera radi u Kvebeku, Kanadi, kompanija „Aqua Data“ koristi uslov 1 m/s [6], dok u Amsterdamu, Holandiji, „Waternet“ ima uslov 1.5 m/s minimalne brzine duž

segmenta cevi koji se ispira [7]. U slučajevima kad se ispiraju neobložene liveno gvozdene cevi, treba uzeti u obzir i činjenicu da primena velikih brzina za ispiranje može pokrenuti proces tzv. „krvarenja“ cevi [11], odnosno ispuštanje čestica gvožđa i propratnih čestica korozije u dužem vremenskom periodu. Tada se preporučuje ispitivanje jačine korozivne „kore“ na unutrašnjem delu cevi, korišćenjem manjih brzina ispiranja.

Maksimalna ostvariva brzina u određenom segmentu cevi će zavisiti od [12]: 1.) prečnika cevi, 2.) raspoloživog protočnog kapaciteta dela mreže kojim se dovodi voda kao i samog ispusta na hidrantu, 3.) pritiska u mreži (pre primene IJP) i 4.) rezidualnog pritiska koji treba održavati tokom IJP (minimalnog pritiska koji ne ugrožava vodosnabdevanje).

U literaturi se često empirijski predlažu maksimalne dužine deonica između 500 i 1500 m, koje se ispiraju kako bi se izbegli preveliki gubici energije u cevima manjih prečnika [13]. Ponegde, kao što je slučaju u Amsterdamu, kriterijumi su strožiji tako da je maksimalna dužina deonice koja se ispira u jednom potezu jednaka 300 m, što je uslovljeno niskim prosečnim pritiskom u vodovodnoj mreži. Takođe, predlaže se da vrednost rezidualnog pritiska ne pada ispod 140 kPa, dok se u praksi opet tolerišu vrednosti između 20 i 70 kPa. Vrednost 20 kPa služi da bi se sprečilo prodiranje podzemne vode u cevi, pretpostavljajući da su cevi ukopane na dubini do 2 m [6]. Minimalni protok $Q_{IJP,min}$ se određuje na osnovu uslova da je u celoj deonici koja se ispira u jednom potezu, ostvarena minimalna zahtevana brzina.

Konačno, potrebno je usvojiti i minimalno vreme trajanja ispiranja u jednom potezu. Slično, u zavisnosti od dostupne opreme i stepena zagađenja, može se usvojiti polu-empirijski ili empirijski pristup. Ukoliko postoje merenja mutnoće, ili odgovarajućeg zagađenja (kao na slici 1.), može se pratiti trenutak kada se vrednost odgovarajućeg parametra spusti ispod neke kritične vrednosti, nakon čega se postupak IJP nastavi još kraći vremenski period, npr. 5 min. Međutim, u fazi planiranja ovakav uslov nije moguće implementirati eksplicitno, stoga se usvaja potpuno empirijski uslov o broju zamena vode u cevi. Za jednu zamenu vode u cevi i , usvaja se vreme $t_{zvc,i}$ potrebno da fluidni delić prođe put duž celog poteza koji se ispira. Uslov koji se najčešće koristi, a primenjen je i u ovom radu je da vreme trajanja ispiranja $t_{IJP,i}$ bude veće ili jednako od $3 \cdot t_{zvc,i}$.

Ekonomski kriterijumi

Za jednu zonu vodovodne mreže moguće je razviti veliki broj različitih planova ispiranja, gde svaki zadovoljava gore navedene hidrauličke i geometrijske kriterijume. Stoga, potrebno je uspostaviti način valorizacije, koji bi diktirao odabir optimalnog rešenja. Od rešenja se zahteva da bude optimalno u pogledu ekonomičnosti odnosno utroška resursa (kako ljudskih tako i ostalih) i vremena za realizaciju. U opštem smislu, to podrazumeva što efikasniji upotrebu raspoložive potencijalne energije, minimizaciju broja poteznih ispiranja, kao i broja manipulacija (otvaranje ili zatvaranje) zatvaračima kao i minimalan utrošak pijaće vode za ispiranje.

Kako bi se kvantifikovali troškovi realizacije plana ispiranja, potrebno je proceniti vreme i ljudstvo, potrebno za obavljanje određenih aktivnosti, da bi se zatim svi troškovi monetarizovali, odnosno sveli na neku novčanu vrednost. Ovde su predloženi jednostavni obrazci za procenu trajanja implementacije jednog poteznog ispiranja $t_{tot,IJP}$, ukupne implementacije plana $t_{tot,plan IJP}$ kao i za proračun troškova implementacije plana ispiranja $C_{tot,plan IJP}$:

$$t_{tot,IJP,i} = t_{prip,IJP} + N_{man,i} \cdot t_{man} + t_{IJP,i} \quad (1)$$

$$t_{tot,plan IJP} = \sum_{i=1}^N t_{tot,IJP,i} \quad (2)$$

$$C_{tot,plan IJP} = t_{tot,plan IJP} \cdot N_{teh} \cdot C_{teh.sat} + V \cdot C_{vode} \quad (3)$$

Gde je $t_{prip,IJP}$ vreme potrebno za pripremu poteznog ispiranja (bez manipulacija zatvaračima, uključujući otvaranje hidranata, pozicioniranje osoblja, povezivanje opreme itd.), $N_{man,i}$ broj manipulacija (otvaranje ili zatvaranje) zatvaračima u i -tom IJP, t_{man} vreme potrebno za jednu manipulaciju zatvaračem, N_{teh} broj tehničara koji sprovodi postupak ispiranja, $C_{teh.sat}$ cena radnog sata tehničara, V ukupna zapremina vode iskorišćena za ispiranje i C_{vode} jedinična cena pijaće vode. U ovom radu su u skladu sa informacijama dobijenim kroz razgovor sa zaposlenima preduzeća „Waternet“ za test primer grada Amsterdama usvojene vrednosti za određene veličine, prikazane u tabeli 1.

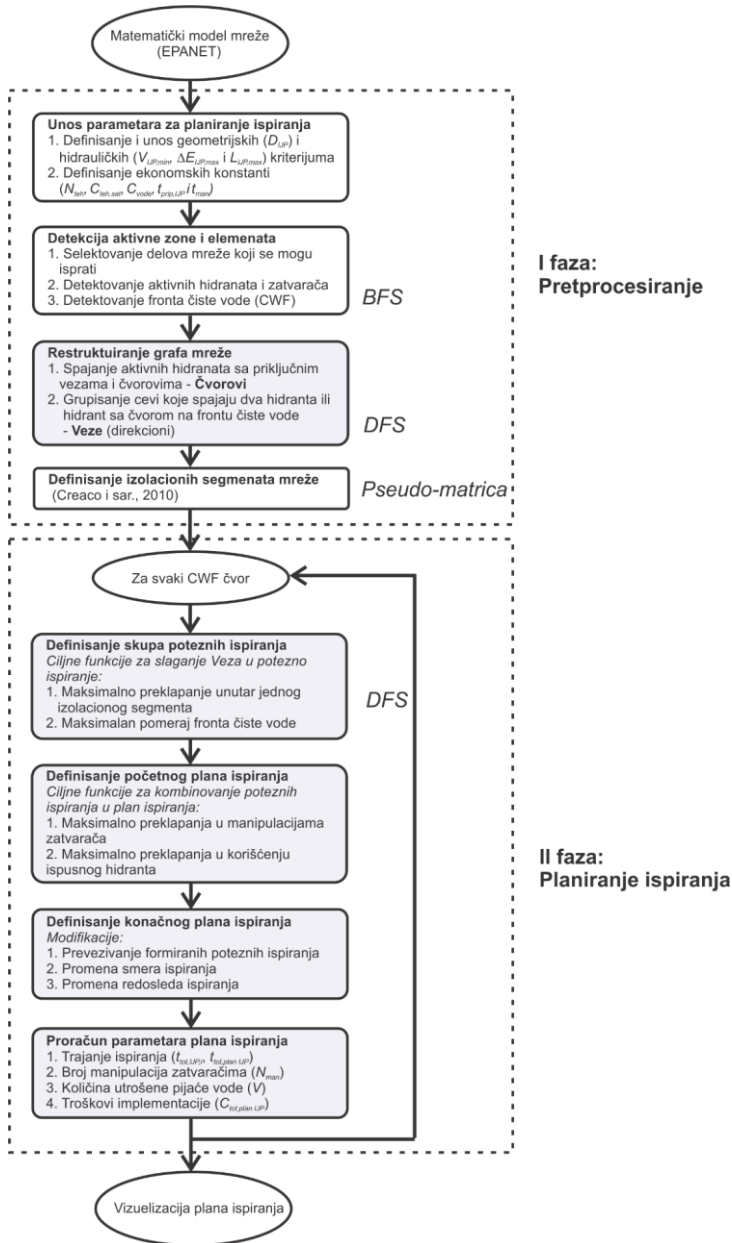
Tabela 1. Procenjene konstante za proračun troškove implementacije plana ispiranja.

Table 1. Estimated constant values for the assessment of the cost of the flushing plan implementation.

<i>Opis</i>	<i>Oznaka</i>	<i>Usvojena vrednost</i>
Broj tehničara koji sprovode IJP	N_{teh}	2
Cena radnog sata tehničara	$C_{teh.sat}$	60.00 €
Cena kubika pijaće vode	C_{vode}	1.54 €/m ³
Trajanje pripreme	$t_{prip,IJP}$	900 s
Trajanje jedne manipulacije zatvaračem	t_{man}	450 s

2.3. Okvir za optimizaciju efikasnosti učinka i troškova implementacije

Ručno definisanje planova ispiranja, uzimajući u obzir prethodno analizirane kriterijume, je isuviše komplikovan posao i uglavnom ne dovodi do optimalnih rešenja u pogledu efikasnosti i utrošenih resursa. U ovom radu je prikazan primer integracije kriterijuma u programski kod nazvan „Flushing Planning Algorithm“ (FPA), koji služi da automatski generiše plan ispiranja za određenu zonu vodovodne mreže. FPA kao ulazni podatak koristi matematički model vodovodne mreže (.inp fajl) i vrši obradu modela u dve faze, 1) Predprocesiranje i 2) Planiranje ispiranja, kroz koje razvija grafički prikaz plana ispiranja za traženu zonu i računa relevantne podatke (trajanje ispiranja, broj manipulacija zatvaračima, količina utrošene vode i troškove implementacije). Shematski prikaz algoritma (eng. Flow chart) je dat na Slici 2, gde su isprekidanom linijom označene dve faze implementacije algoritma. Više detalja o pojedinim koracima algoritma se mogu naći u radu [7].



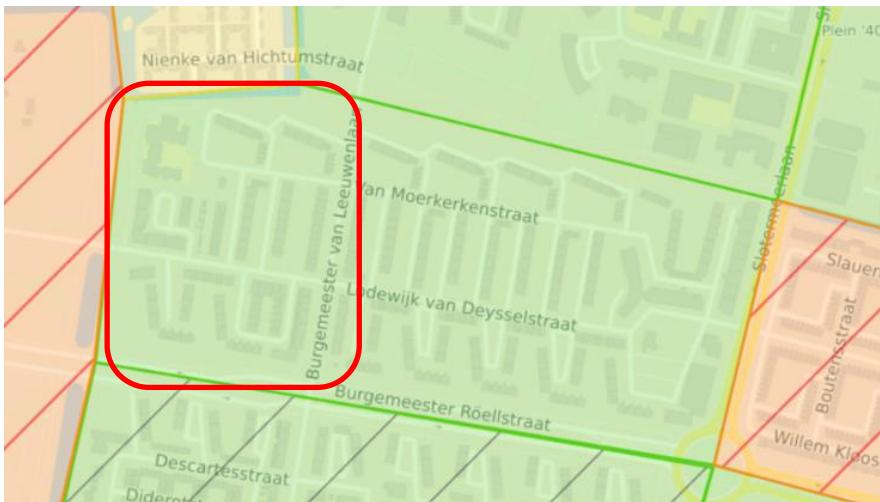
Slika 2. Shematski prikaz FPA algoritma (algoritma za planiranje IJP vodovodne mreže) .

Figure 2. FPA algorithm flow-chart (Uni-directional flushing planning algorithm).

3. PRIMER PRIMENE: AMSTERDAM

Algoritam FPA je razvijen u sklopu međunarodnog naučnog projekta „Wat-qual“, čiji je cilj unapređenje shvatanja mehanizama koji dovode do smanjenja kvaliteta vode za piće kao i postupaka i metodologija za uklanjanje zamućenja ili zagađenja u vodovodnoj mreži. Jedan od particijanata na projektu je bilo i komunalno preduzeće grada Amstedama „Waternet“, pa je upravo i test primer za validaciju i proveru funkcionalnosti razvijenog algoritma, deo vodovodne mreže grada Amstedama.

Cela vodovodna mreža grada Amstedama podeljena je na zone za ispiranje, relativno uravnotežene veličine, a za analizu je izabrana zona pod nazivom Jan Goeverneurhof 4 (Slika 4.). Razlog leži u činjenici da su autori fizički prisustvovali ispiranju ove zone kao i u tome što je za ovu zonu postojao ručno razvijen plan ispiranja. Radi preglednosti, fokus u ovom radu je stavljen samo na zapadnu stranu zone. Ručno razvijeni plan za ispiranje zapadne strane može se naći u [7].



Slika 3. Prikaz iz softvera MapKit test zone za ispiranje Jan Goeverneurhof 4, u gradu Amstedamu, Holandiji. Crvenom bojom je uokviren zapadni deo test zone.

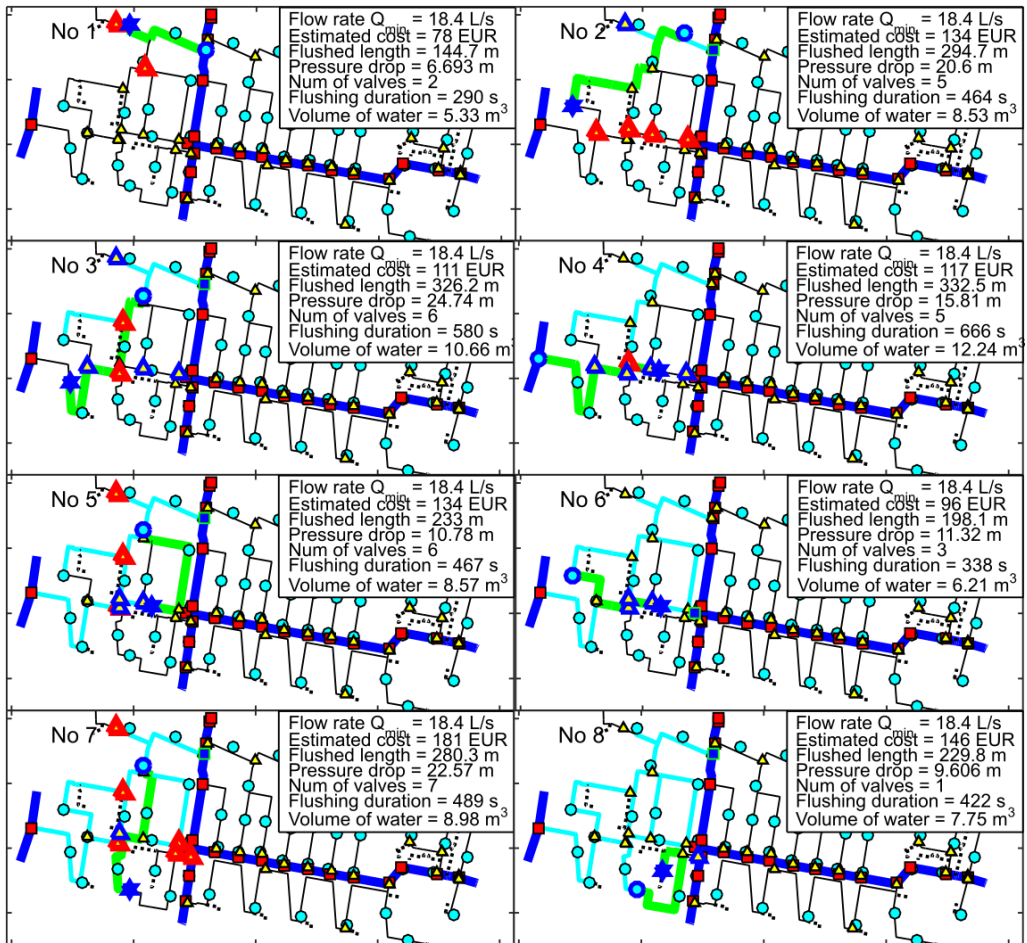
Figure 3. MapKit representation od the test flushing zone Jan Goeverneurhof 4, in the city of Amstedam, Netherlands. The west side of the flushing zone is in red frame.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Primenom FPA algoritma, dobijena su dva plana za ispiranje zapadnog dela zone Jan Goeverneurhof 4, koji će se na dalje nazivati FPA^{CE} plan i FPA^{CL} plan. Vizuelni prikaz FPA^{CL} plana, dobijen kao rezultat algoritma je dat na Slici 4. FPA^{CL} plan je direktno uporediv sa ručno izvedenim planom, budući da koristi isti kriterijum za definisanje maksimalne dužine ispiranja ($L_{JJP,max} = 300$ m). Poređenjem ručno izvedenog plana sa FPA^{CL} planom mogu se uočiti direktne dobiti od postupka optimizacije planiranja ispiranja, sa aspekta ekonomičnosti.

Rezultati prikazani na slici 4 predstavljaju plan ispiranja tj. uređenu seriju poteznih ispiranja. Za svako potezno ispiranje u gornjem desnom uglu su navedeni osnovni podaci kao: minimalan protok kojim se ispira potez, trošak implementacije poteznog ispiranja, dužina cevi koje se ispiraju, energetski pad na potezu, broj zatvarača koje treba zatvoriti (ne broj manipulacija zatvaračima), efektivno trajanje ispiranja i utrošak pijaće vode. Takođe, zelenom linijom su prikazana aktuelna potezna ispiranja, a svetlo plavom prethodna. Crveni trouglovi predstavljaju trenutno zatvorene zatvarače, plavi trouglovi prethodno zatvorene a obični žuti trouglovi, otvorene zatvarače. Ispusni hidrant je prikazan plavom zvezdom.

Poređenje indikatora performansi planova za ispiranje, za celu zonu od interesa, a između ručno napravljenog plana i dve varijante dobijene primenom algoritma za planiranje, može ukazati na određene zaključke. Obe varijante planova kreiranih FPA algoritmom, FPA^{CE} i FPA^{CL} , ekonomičnije, sa relativnim razlikama od 5,5% i 15,7%, respektivno. Interesantno je da varijanta plana FPA^{CE} daje manje povoljnije rešenje od plana FPA^{CL} . To je posledica činjenice da je, uzimajući u obzir pad energije kao kriterijum, bilo potrebno 11 poteznih ispiranja, umesto 8. Međutim, FPA^{CE} plan rezultuje fizički prihvatljivim planom koji zadovoljaju hidrauličke kriterijume za ispiranje, za razliku od ručno izvedenog plana kao i FPA^{CL} plana. Sa stanovišta broja manipulacija zatvaračima, efektivnog trajanja ispiranja i utroška pijaće vode, FPA^{CE} i FPA^{CL} planovi su superiorniji od postojećeg plana. Uprkos većem broju poteznih ispiranja najmanji broj manipulacija je dobijen za FPA^{CE} plan, dok je najmanje trajanje i utrošak pijaće vode dobijeno za FPA^{CL} plan. Ovim je potvrđeno da se predloženim algoritmom mogu dobiti znatno povoljniji planovi za ispiranje nego u slučaju ručnog definisanja.



Slika 4. Prikaz plana za ispiranje, dobijenog pomoću FPACL varijante algoritma za planiranje IJP, zapadne dele zone Jan Goeverneurhof 4, u gradu Amsterdamu, Holandiji.

Figure 4. Flushing plan, derived with FPACL variant of the flushing planning algorithm, for the western part of the test flushing zone Jan Goeverneurhof 4, in the city of Amsterdam, Netherlands.

5. ZAKLJUČCI

Najpraktičnija strategija u upravljanju rizicima od zamućenja i zagađenja vode u vodovodnim mrežama se bazira na pro-aktivnom i reaktivnom ispiranju vodovodne mreže. Izdvaja se metoda ispiranje mreže u jednom pravcu, pri kojoj se manipulacijom određene grupe zatvarača, tok čiste vode usmerava kroz deo vodovodne mreže ka ispusnom hidrantu. Tok čiste vode kojim se cev ispira, mora da zadovolji kriterijum u pogledu minimalne brzine i da potiče od tzv. fronta čiste vode odnosno od dela vodovodne mreže koja nije „zagađena“. Sam postupak IJP se obično planira, tako da se u jednoj kampanji obuhvati šira zona vodovodne mreže. Planiranje IJP je kompleksan zadatak, uzimajući u obzir skup kriterijuma koje je neophodno zadovoljiti, kao i ekonomska ograničenja u pogledu troškova implementacije ovih planova.

U ovom radu su detaljnije analizirani geometrijski, hidraulički i ekonomski kriterijumi kojima se inženjeri rukovode pri formiranju plana ispiranja. Definisana je okvir za optimizaciju efikasnosti ispiranja koji je implementiran u algoritam za planiranje IJP, nazvan FPA, kojim se omogućava automatizacija planiranja IJP. FPA algoritam je razvijen u MATLAB programskom okruženju i kao ulazni podatak koristi kalibrisan EPANET model vodovodne mreže. FPA algoritam je primenjen na test primeru zapadnog dela zone za ispiranje Jan Goeverneurhof 4, u gradu Amsterdamu, Holandiji. Primenjene su dve varijante algoritma, osnovna FPA^{CE} koja koristi kriterijum maksimalnog pada pritiska, i modifikovana FPA^{CL} koja koristi kriterijum maksimalne dužine cevi u poteznom ispiranju. Dobijeni rezultati su upoređeni, kroz indikatore performansi, sa ručno razvijenim planom za ispiranje, koji je dobijen koristeći isti kriterijum kao FPA^{CL} . Obe varijante su se pokazale da mogu da razviju ekonomičnije planove za ispiranje nego u slučaju ručno određenih planova. FPA^{CE} i FPA^{CL} planovi zahtevaju manje manipulacija zatvaračima, manje trajanje ispiranja i manji utrošak pijaće vode. Ovim primerom je pokazano da se primenom FPA^{CE} algoritma omogućava i bolja kontrola hidrauličkih kriterijuma. Konačno, za razvoj plana za ispiranje, primenom FPA algoritma, potrebno je nekoliko minuta, dok se prema rečima zaposlenih „Waternet“ kompanije za ručni razvoj planova potroši dan ili više.

LITERATURA

1. Vreeburg, I.J. and Boxall, J.B., 2007. *Discolouration in potable water distribution systems: A review*. Water research, 41(3), pp.519-529.
2. Vreeburg, J.H.G., 2007. *Discolouration in drinking water systems: a particular approach*.
3. van Summeren, J. and Blokker, M., 2017. *Modeling particle transport and discoloration risk in drinking water distribution networks*. Drinking Water Engineering and Science Discussions.
4. Richardt, S., Korth, A. and Wricke, B., 2009. *Model for the calculation of optimised flushing concepts*. *TECHNEAU: Safe Drinking Water from Source to Tap State of the Art & Perspectives*, p.295.
5. Ellison, D., Duranceau, S. G., Ancel, S., Deagle, G., and McCoy, R., 2003. *Investigation of pipe cleaning methods*, AWWA Research Foundation, Denver.
6. Poulin, A., Mailhot, A., Periche, N., Delorme, L. and Villeneuve, J.P., 2010. *Planning unidirectional flushing operations as a response to drinking water distribution system contamination*. Journal of Water Resources Planning and Management, 136(6), pp.647-657.
7. Ivetić, D., Vasilić, Ž., 2020. *Report on Flushing Planning Algorithm testing on the flushing zones of the drinking water distribution system of the city of Amsterdam*. [Online]. Available from: doi:10.15131/shef.data.12444815.v1 [Accessed: 1 September 2021].
8. Hasit, Y. K., DeNadai, A. J., Gorrill, H. M., McCammon, S. B., Raucher, R. S., and Withcomb, J., 2004. *Cost and benefit analysis of flushing*, AWWA Research Foundation, Denver.
9. Antoun, E. N., Dyksen, J. E., and Hildebrand, D. J., 1999. *Unidirectional flushing: A powerful tool*. J. Am. Water Works Assoc., 91 (7), 62–71.
10. DeFrank, J. J., 2006. *Catalytic enzyme-based methods for water treatment and water distribution system decontamination—1*. Literature survey, U.S. Army Research, Development and Engineering Command, Edgewood Chemical Biological Center, Edgewood, Md.
11. Speight, Vanessa; Quintiliani, Claudia; Bosch, Arne; Rajnochova, Marketa; Schaap, Peter; Husband, Stewart; et al., 2020. *Guidance Manual: Water Quality in Drinking Water Distribution Systems*. The University of Sheffield. Report. <https://doi.org/10.15131/shef.data.11889861.v2>
12. Walski, T.M., Chase, D.V., Savic, D.A., Grayman, W., Beckwith, S. and Koelle, E., 2003. *Advanced water distribution modeling and management*. Haestad Press, Waterbury, Conn.
13. Oberoi, K., 1994. Distribution flushing program: The benefits and results. AWWA Annual Conf., AmericanWaterWorks Association, New York, 579–597.