

## Optimizacija postupka ispiranja vodovodne mreže

Damjan Ivetić<sup>1</sup>  
Željko Vasilčić<sup>2</sup>

**APSTRAKT:** Ispiranje vodovodne mreže se sprovodi nakon što se za određeni deo mreže, ili zone za ispiranje, ustanovi da je voda izložena visokom riziku od zamućenja (promene boje). Uobičajeno se planiranje ispiranja sprovodi ručno i u većini slučajeva predstavlja dugotrajan postupak. Za definisanje plana ispiranja određene zone mreže, neophodno je napraviti skup uzastopnih poteznih ispiranja kojim se ceo deo mreže ispira. U svakom poteznom ispiranju se ispira deo sekundarne (i tercijarne) mreže. Za svako potezno ispiranje potrebno je uz pomoć niza manipulacija zatvaračima na mreži, usmeriti tok vode od fronta čiste vode ka ispušnom hidrantu. Frontovi čiste vode predstavljaju granice dela mreže koji je okarakterisan kao „čist“. Mogu se definisati kroz merenje mutnoće na licu mesta, ili nakon ispiranja konkretnog čvora (odnosno dela mreže u kom se nalazi čvor). Tokom ispiranja cevi, tok vode koji se koristi za ispiranje, mora da ispuni određen skup hidrauličkih kriterijuma, kako bi se promena mutnoće vode, ili zagađenje, adekvatno otklonilo. Sa stanovišta nadležnog komunalnog preduzeća, plan ispiranja mreže treba da bude ekonomičan u pogledu minimalnog utroška vremena i resursa (npr. pijaće vode) za njegovu implementaciju. U ovom radu, mogućnost automatizacije i optimizacije planiranja ispiranja, uz pomoć novo razvijenog FPA (eng. Flushing Planning Algorithm) algoritma je testirana i analizirana. FPA algoritam je napravljen kako bi na adekvatan način odgovorio na gore navedene zahteve.

**Ključne reči:** Vodovodni sistemi, Ispiranje vodovodne mreže, Optimizacija, Kvalitet vode

## Optimization of the water distribution network flushing

**ABSTRACT:** Flushing of the drinking water distribution systems is conducted after a certain part of the water distribution network, or the flushing zone, is identified to be a subject to a high risk of discoloration. Typically, flushing planning is performed manually and is usually time-consuming. To derive a flushing plan for a flushing zone, a set of sequential flushing operations needs to be defined. In each flushing operation the parts of the secondary and tertiary network, meeting multiple criterion, will be flushed. For each flushing operation a set of valves manipulations is needed to converge the water flow, from a clearwater front, through the pipes that are set to be flushed, and out of the system via output hydrant. Clearwater fronts are network nodes on the boundary of the network which is deemed as “clean”. They can be defined through in-situ turbidity measurements, or after the actual flushing of the node (part of the network containing the node). To perform the pipe flushing, the water flow used to flush a pipe, needs to meet a set of hydraulic criteria, in order to allow for the discoloration to be appropriately addressed and removed. From the water utility perspective, the flushing plan should be economical in terms of the minimal expenditure of the time and resources (e.g. drinking water) for the implementation. Here, a possibility for the automatization of the flushing planning with the newly developed FPA (Flushing Planning Algorithm) algorithm, was tested and analyzed. The FPA algorithm was designed to address the flushing planning by taking into the account all the above-mentioned criteria.

**Keywords:** Water distribution systems, Water distribution network flushing, Optimization, Water quality

---

<sup>1</sup>Dr Damjan Ivetić, Građevinski fakultet Beograd, docent, [divetic@grf.bg.ac.rs](mailto:divetic@grf.bg.ac.rs)

<sup>2</sup>Dr Željko Vasilčić, Građevinski fakultet Beograd, docent, [zvasilic@grf.bg.ac.rs](mailto:zvasilic@grf.bg.ac.rs)

## 1 Uvod

Promena boje pijaće vode, iliti zamućenje pijaće vode, u vodovodnim sistemima je najčešći razlog žalbi potrošača u većini zemalja (Vreeburg i Boxall, 2007). 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. Međutim, kada je već prijavljen problem sa bojom pijaće vode, percepcija potrošača o kvalitetu vode kao i o kvalitetu usluga nadležnog komunalnog preduzeća se može značajno narušiti. U razvijenim zemljama, i šire, pozitivna percepcija potrošača o pruženim uslugama je ključni pokretač komunalnih preduzeća (van Dijk i Van der Kooij, 2004), zbog čega je poslednjih decenija fokus na sprečavanju pojave zamućenja i upravljanju 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 (Vreeburg, 2007; Blokker i Schaap, 2011; van Summeren i Blokker, 2017). Iako su skorija istraživanja u ovom polju doprinela značajnom unapređenju poznavanja ključnih međuzavisnosti koje određuju proces stvaranja, pokretanja, akumuliranja i ponovnog pokretanja čestične materije u vodovodnim cevima, i dalje postoje nepoznanice.

Smanjenje rizika od zamućenja se zasniva na primeni različitih raspoloživih strategija (van Summeren i Blokker, 2017): 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 samo delimično uspešne, npr. napredni postupci pripreme vode za piće smanjuju količinu čestica koje ulaze u sistem, ali ne mogu u potpunosti da ih uklone. Slično, u Holandiji, samoispirajuće vodovodne mreže su se pokazale efikasnim u smanjenju rizika od zamućenja (Blokker i sar., 2009) ali se u praksi retko primenjuju u novoizgrađenim vodovodnim mrežama. Imajući navedeno u vidu, uobičajeno se rizik kontroliše primenom postupka čišćenje mreže, pro-aktivno i reaktivno. 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 (Vreeburg i Boxall, 2007)). Vremenom se od navedenih tehnika, uprkos određenim manama (Richardt i sar., 2009), ispiranje mreže vodom nametnulo kao najjednostavnija i najrobusnija metoda čišćenja mreže (Ellison i sar., 2003; Boxall i sar., 2004).

Ispiranje mreže vodom se uglavnom sprovodi primenom tehnike tzv. Tradicionalnog ispiranja (TI) mreže ili ispiranjem u jednom pravcu (IJP) (Poulin i sar., 2010). Kod tehnike IJP, određena zona mreže za koju se ustanovi visok rizik od zamućenja, 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, se tok vode usmerava kroz cev koja se čisti. Skup uzastopnih poteznih ispiranja mreže čini plan ispiranja. Definisanje plana ispiranja je standardno komplikovan i složen zadatak koji zahteva dosta radnog vremena inženjera nadležnog komunalnog preduzeća, budući da se uobičajeno ručno sprovodi (Ivetić i Vasilić, 2020). 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, predstavljen je algoritam za planiranje ispiranja vodovodne mreže FPA (eng. Flushing Planning Algorithm), primenom tehnike IJP, koji omogućava automatizaciju procesa planiranja ispiranja, kao i minimizaciju, odnosno optimizaciju, troškova za sprovođenje plana ispiranja. Algoritam definiše plan ispiranja, kroz više faza, i u zavisnosti od specifičnih uslova u analiziranoj vodovodnoj mreži. Restruktuiranjem matematičkog modela vodovodne mreže, i definisanjem izolacionih segmenata mreže, omogućava se primena modifikovanih algoritama za pretraživanje grafova, kojima se definišu potezna ispiranja, njihov redosled i odgovarajuće manipulacije zatvaračima. U radu su prikazani i rezultati primene algoritma na test zoni vodovodne mreže grada Amsterdama, u

Holandiji, gde je izvršeno poređenje dobijenih rezultata sa prethodno ručno definisanim planom ispiranja.

## 2 Metodologija

Pod postupkom ispiranja mreže vodom se podrazumeva aktivnost na vodovodnoj mreži, u okviru koje se manipulacijom određenim zatvaračima tok pijaće vode preusmerava kroz cev, ili cevi koje se ispiraju. Tok vode, kojim se cevi ispiraju, mora biti „čist“, odnosno dolaziti od tzv. fronta čiste vode (eng. clearwater front). Sa svakim ispranim segmentom mreže, front čiste vode se pomera, smanjujući zagađenu zonu. 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 (Friedman i sar., 2005, Hasit i sar., 2004). Uobičajeno se postupak ispiranja mreže sprovodi primenom tradicionalnog ispiranja (TI) ili ispiranja u jednom pravcu (IJP) (Poulin i sar., 2010).

U slučaju postupka TI, otvara se jedan ili više hidranata, kroz koje će voda isticati 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. TI se sprovodi od fronta čiste vode ka periferiji mreže (Friedman i sar., 2003).

U slučaju postupka IJP, 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. Slično kao TI, IJP se sprovodi od fronta čiste vode ka cevima koje treba isprati. U odnosu na TI, IJP ima određene prednosti zbog čega se i u praksi češće koristi (Ellison i sar., 2003, Oberoi, 1994):

- Veće brzine tečenja se ostvaruju u cevima čime se omogućava bolje čišćenje
- IJP se planira tako da se voda kojom se cevi ispiraju uvek obezbeđuje iz fronta čiste vode, čime se sprečava mešanje zamućene i čiste vode
- Aktivnosti na održavanju zatvarača i hidranata se mogu kombinovati sa IJP,
- Manja je potrošnja vode,
- Smanjeni su poremećaji u snabdevanju potrošača.

IJP se primenjuje u slučaju pojave zamućenja, 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 (Ivetić i Vasilić, 2020). 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 kontrolisanja 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, pijezeorezistivni 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.

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 konkretnom slučaju se koriste podaci o matematičkom modelu vodovodnog sistema definisani u EPANET okruženju, odnosno u formi .inp fajla. Imajući u vidu da se standardno ispiraju cevi u opsegu prečnika od 50 do 200 mm, nekada i većeg prečnika, 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 tako da hrapavosti cevi u modelu verno reprodukuju stvarno stanje na terenu.



Slika 1. Kofer sa mernom 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).

## 2.1 Kriterijumi za ispiranje mreže

Nakon identifikacije zone ili dela mreže koji treba ispirati, prilikom planiranja IJP primenjuju se sledeći kriterijumi:

1. Geometrijski – definišu prečnike cevi u zoni koje će se ispirati,
2. Hidraulički – definišu hidrauličke uslove potrebne za uklanjanje zamućenja (ili zagađenja) odnosno smanjenje rizika od zamućenja, kao i dužinu trajanja ispiranja - dovoljnu da front čiste vode napreduje u željenom pravcu i
3. Ekonomski – definišu faktore kojima se obezbeđuje ekonomičnost same implementacije plana IJP.

Postupak identifikacije potrebe za ispiranjem određenog dela vodovodne mreže, nije predmet ovog rada, ali se u opštem slučaju zasniva na adekvatnom praćenju parametara kvaliteta vode, u realnom vremenu (Ostfeld i Salomons, 2004; Zhang i sar., 2020). Sa druge strane, geometrijski, hidraulički i ekonomski kriterijumi se razlikuju između nadležnih komunalnih preduzeća, gradova i država. Brojni faktori utiču na „dobru inženjersku praksu“ koja se koristi u različitim preduzećima, među kojima su ključni nivo razvoja komunalnog preduzeća, veličina, topologija i stanje vodovodne mreže kao i zakonske regulative koja definiše potreban kvalitet vode za piće i uslove rada vodovodnog sistema. U ovom poglavlju, navedeni kriterijumi su definisani u opštem smislu, sa osvrtom na primere i specifičnosti koji se nalaze u literaturi. Posebno su apostrofirani kriterijumi koji su korišćeni kao merodavni pri razvoju plana ispiranja za, ovde analiziran, test primer grada Amsterdama.

### 2.1.1 Geometrijski kriterijumi

U idealnom slučaju, plan IJP podrazumeva 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. Problem ekonomske opravdanosti se nameće kod cevi većih prečnika iz razloga

što je količina vode potrebna za ispiranje, kao i posledični poremećaj u vodosnabdevanju, neretko prevelik. Stoga se tipično definiše maksimalni prečnik cevi za ispiranje.

Poulin i sar. (2010), navode primere iz SAD-a i Kanade, gde se minimalni prečnik ne definiše eksplicitno, dok se za maksimalni prečnik navodi 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 (Antoun i sar., 1999). 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 se vrednosti maksimalnog prečnika razlikuju od grada do grada. Za grad Amsterdam, pravilnici komunalnog preduzeća „Waternet“ empirijski definišu 150 mm kao maksimalni prečnik cevi za ispiranje. Tako su i primeru obrađenom u ovom radu korišćeni navedeni prečnici  $D_{IJP}$  za detekciju cevi za koje treba planirati IJP, primenom FPA:

$$50 \text{ mm} \leq D_{IJP} \leq 150 \text{ mm} \quad (1)$$

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 energetske gubitaka.

### 2.1.2 Hidraulički kriterijumi

Tok vode, kojim se ispiraju cevi, mora se prostirati od fronta čiste vode (eng. Clearwater front). U kontekstu uklanjanja zamućenja, front čiste vode se može definisati lokalnim merenjima mutnoće. U slučaju pojave neke vrste zagađenja, neophodna su merenja odgovarajućih parametara kvaliteta vode.

Zadatak toka vode je da u procesu IJP ukloni zamućenu vodu, 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 (Friedman i sar., 2005; Vreeburg, 2007; Poulin i sar., 2010). 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 (DeFrank i sar., 2007). Primera radi u Kvebeku, Kanadi, kompanija „Aqua Data“ koristi uslov 1 m/s (Poulin i sar., 2010), dok u Amsterdamu, Holandiji, „Waternet“ ima uslov 1.5 m/s minimalne brzine duž segmenta cevi koji se ispira (Ivetić i Vasilčić, 2020). 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 (Speight i sar., 2020), 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. Alternativa empirijskom određivanju uslova minimalne brzine je proračun vrednosti kritičnog smičućeg napona, i definisanje odgovarajuće brzine ispiranja za svaki segment ponaosob. U ovom radu, na test primeru grada Amsterdama, korišćena je odgovarajuća lokalna preporuka za minimalnu brzinu tečenja tokom IJP  $V_{IJP,min}$ :

$$V_{IJP,min} \geq 1.5 \text{ m/s} \quad (2)$$

Maksimalna ostvariva brzina u određenom segmentu cevi će zavistiti od (Walski i sar., 2003): 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).

Sa aspekta potrebnog pritiska u mreži (3.), u literaturi se često empirijski predlažu maksimalne dužine deonice između 500 i 1500 m, koje se ispiraju kako bi se izbegli preveliki gubici energije u cevima manjih prečnika (Oberoi, 1994; Friedman i sar., 2005). 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, najčešće se predlaže 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 (Poulin i sar., 2010). U ovom radu, napravljen je iskorak, tako da su na test primeru grada Amsterdama korišćena dva uslova, maksimalne dužine  $L_{IJP,max} = 300$  m i maksimalnog pada energije  $\Delta E_{IJP,max}$  koji je dobijen hidrauličkim proračunom za minimalni protok za ispiranje  $Q_{IJP,min}$ . Minimalni protok  $Q_{IJP,min}$  se određuje na osnovu uslova da je u celoj deonici koja se ispira u jednom potezu, ostvarena brzina (jednačina 2). Kako se prečnici cevi obično razlikuju u jednom potezu, u nekim cevima će brzine biti i veće. Za određivanje vrednosti  $\Delta E_{IJP,max}$  usvojena je pretpostavka da je u svakoj tački mreže pritisak barem 200 kPa, odnosno da vrednost rezidualnog pritiska (na izlaznom hidrantu) bude barem 40 Kpa:

$$\Delta E_{IJP,max}(Q_{IJP,min}) \leq 160 \text{ kPa} \quad (3)$$

Usvojena vrednost  $\Delta E_{IJP,max}$  je karakteristična za ravničarski grad sa niskim srednjim pristicima u vodovodnoj mreži, kakav je slučaj sa Amsterdamom.

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. Vreme putovanja  $t_{zvc,i}$  se određuje na osnovu brzina sračunatih u cevima, korišćenjem protoka  $Q_{IJP,min,i}$ . Uslov koji se najčešće koristi, a primenjen je i u ovom radu je da vreme trajanja ispiranja  $t_{IJP,i}$  bude:

$$t_{IJP,i} = 3 \cdot t_{zvc,i} \quad (4)$$

### 2.1.3 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, odnosno odabira optimalnog rešenja. Ovde se od rešenja 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, u algoritmu za planiranje ispiranja procenjeno je vreme, i ljudstvo, potrebno za obavljanje određenih aktivnosti, da bi se zatim svi troškovi monetarizovali, odnosno sveli na neku novčanu vrednost. Takođe, predloženi su 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  $C_{tot,plan IJP}$ :

$$t_{tot,IJP,i} = t_{prip,IJP} + N_{man,i} \cdot t_{man} + t_{IJP,i} \quad (4)$$

$$t_{tot,plan IJP} = \sum_{i=1}^N t_{tot,IJP,i} \quad (5)$$

$$C_{tot,plan IJP} = t_{tot,plan IJP} \cdot N_{teh} \cdot C_{teh.sat} + V \cdot C_{vode} \quad (6)$$

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 <sup>3</sup>
Trajanje pripreme jednog poteznog ispiranja	$t_{prip,IJP}$	900 s
Trajanje jedne manipulacije zatvaračem	$t_{man}$	450 s

## 2.2 Konceptualna šema algoritma FPA

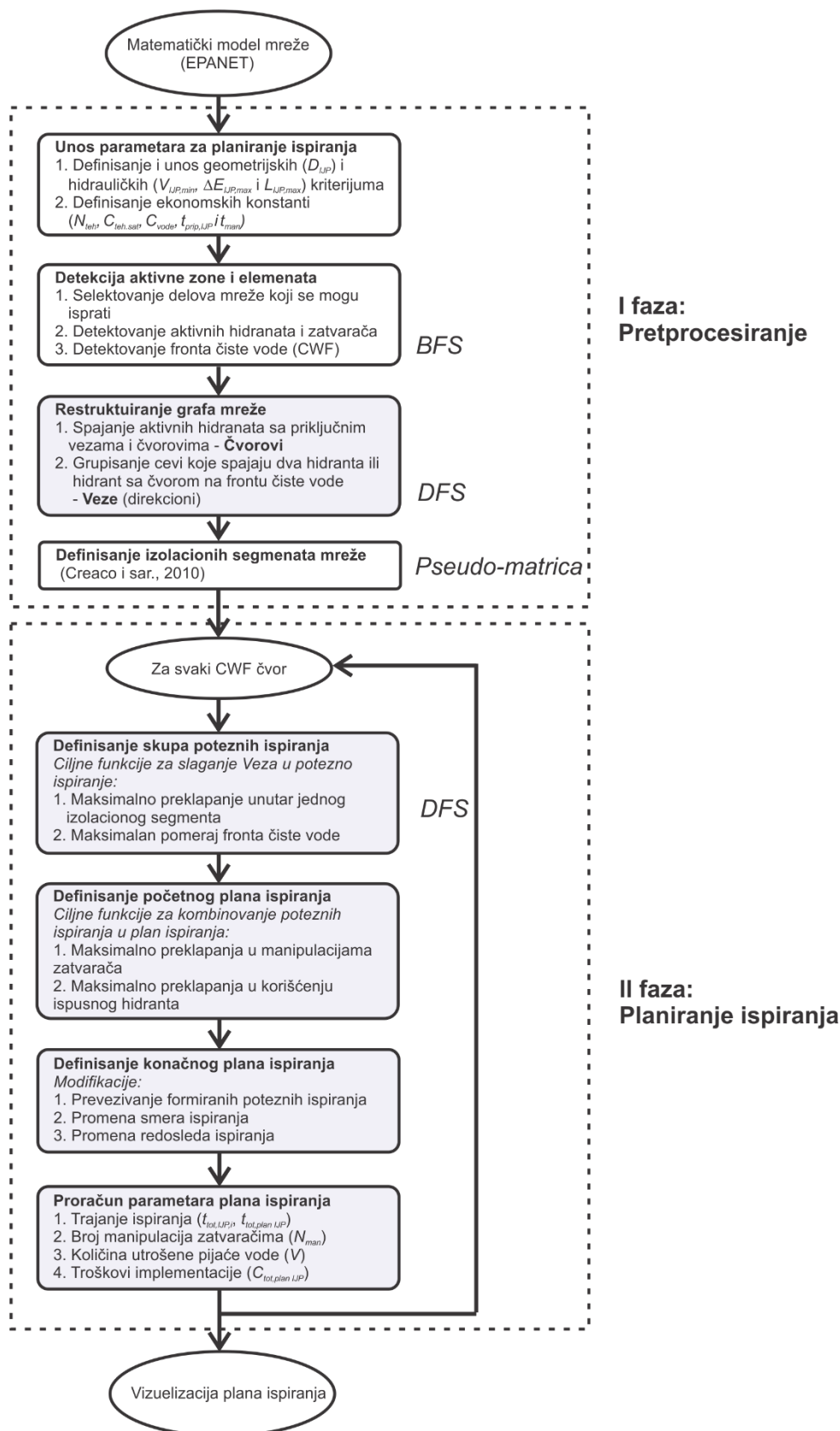
Algoritam FPA, predstavljen u ovom radu, služi da automatski generiše plan ispiranja za određenu zonu vodovodne mreže, u skladu sa prethodno navedenim geometrijskim, hidrauličkim i ekonomskim kriterijumima. FPA algoritam kao ulazni podatak koristi matematički model vodovodne mreže (.inp fajl) i sastoji se iz dve faze, 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. U narednim poglavljima su faze analizirane pojedinačno sa posebnim akcentom na osenčene „kućice“ koje predstavljaju ključne elemente metodologije.

### 2.2.1 Pretprocesiranje

U prvom koraku, u fazi pretprocesiranja, korisnik definiše hidrauličke ( $V_{IJP,min}$ ,  $L_{IJP,max}$ ,  $\Delta E_{IJP,max}$ ) i geometrijske ( $D_{IJP}$ ) kriterijume za IJP, zajedno sa parametrima za monetarizaciju troškova implementacije plana ispiranja ( $N_{teh}$ ,  $C_{teh.sat}$ ,  $C_{vode}$ ,  $t_{prip,IJP}$ ,  $t_{man}$ ). Na osnovu geometrijskih kriterijuma, u narednom koraku, algoritam odabira i izdvaja iz matematičkog modela delove mreže koji se mogu isprati i koji će biti obuhvaćeni planom ispiranja. Posebno se detektuju aktivni elementi u odgovarajućem delu mreže, neophodni za sprovođenje IJP, hidranti i zatvarači. Ukoliko je određeni hidrant ili zatvarač van funkcije, potrebno ga je ručno isključiti iz selekcije dok se odgovarajućim aktivnostima ne povрати njegova funkcionalnost.

Takođe, definišu su i čvorovi u mreži koji opisuju položaj fronta čiste vode, odnosno čvorovi iz kojih će se „dovoditi“ voda, zadovoljavajućeg kvaliteta, za ispiranje delova mreže koji su u riziku od zamućenja. Ovde se pretpostavlja da se front čiste vode nalazi na granici zone koja se može ispirati, pa se čvorovi fronta čiste vode (CWF, crveni kvadrati na Slici 3) na početku definišu kao mesta gde se delovi mreže koji se mogu, i trebaju, isprati povezuju sa ostatkom sistema.

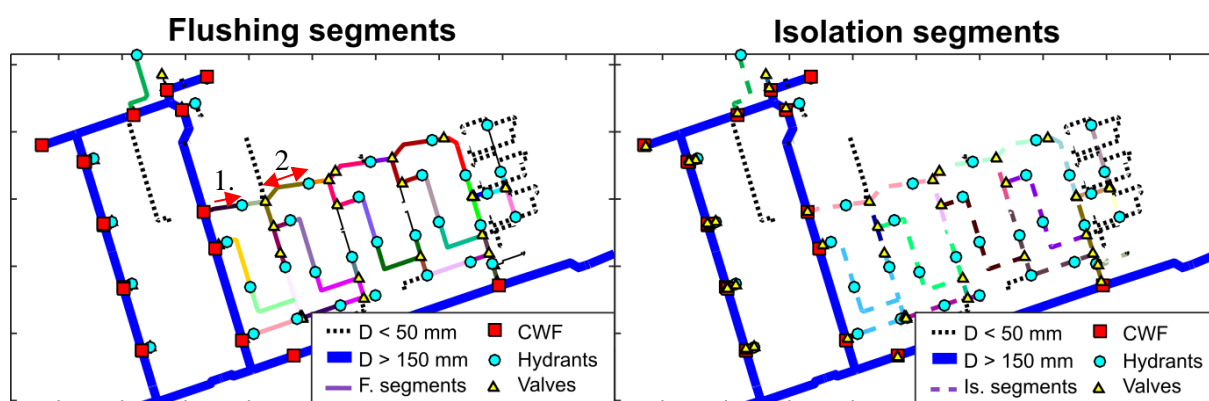
Za potrebe lakšeg manipulisanja podacima o mreži, FPA vrši restruktuiranje grafa vodovodne mreže koja se ispira. Naime, umesto uobičajenog konceptualnog prikaza mreže u EPANET-u pomoću veza (cevi, zatvarači i pumpe) i čvorova (potrošački/nepotrošački čvorovi i rezervoari), ovde se deo mreže koji se ispira deli na Segmente za ispiranje. U restruktuiranom grafu segmenti za ispiranje predstavljaju veze, dok frontovi čiste vode (CWF) i hidranti predstavljaju čvorove. Kako se hidranti u detaljnom matematičkom modelu mreže prikazuju zajedno sa priključnom cevi, ovde se priključak i hidrant spajaju, čineći celinu odnosno čvor.



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

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





Slika 3. Faza pretprocesiranja FPA algoritma, (Levo) Podela dela vodovodne mreže na Segmente za ispiranje; (Desno) Podela dela vodovodne mreže na Izolacione segmente

Figure 3. Preprocessing phase in the FPA algorithm, (Left) Dividing the network in the Flushing segments; (Right) Dividing the network in the Isolation segments

Segmenti za ispiranje se definišu primenom DFS (eng. Depth-First Search) algoritma, propagacijom iz svih CWF čvorova. Segmenti za ispiranje mogu imati direkcioni karakter, odnosno omogućiti ispiranje samo u jednom smeru, što će zavistiti od tipa čvorova koje povezuju (Slika 3, Levo). Tako se mogu definisati dva tipa segmenta za ispiranje:

1. Segment za ispiranje između fronta čiste vode i hidranta – direkcioni segment jer je moguće ispiranje samo od fronta čiste vode ka hidrantu i
2. Segment za ispiranje između dva hidranta – bidirekcioni segment jer je moguće ispiranje u oba smera.

Kombinovanjem segmenata za ispiranje formira se jedno potežno ispiranje vodovodne mreže, tako da se ovi segmenti mogu koncipirati kao gradivni blokovi poteznih ispiranja, dok sama potezna ispiranja čine gradivne blokove plana ispiranja (Ivetić i Vasilić, 2020). Podaci o cevima koje čine jedan segment za ispiranje, kao što su prečnik, dužina i hrapavost, se moraju sačuvati za drugu fazu algoritma, budući da će se na osnovu njih modelirati tečenje tokom ispiranja, odnosno računati relevantni parametri ispiranja. U fazi planiranja ispiranja, ključno je kombinovati segmente za ispiranje na adekvatan način, uzimajući u obzir usmerenost segmenata, kao i ostale relevantne parametre, kako bi se dobila odgovarajuća potezna ispiranja.

Kako je jedan od izazova u planiranju adekvatan izbor zatvarača kojim će se usmeriti tok vode u željenom pravcu, matematički model vodovodne mreže se takođe deli i na izolacione segmente. Izolacioni segmenti mreže predstavljaju delove mreže koji se mogu izolovati od ostatka mreže zatvaranjem određenog skupa zatvarača. Za potrebe definisanja izolacionih segmenata mreže, ovde je korišćena metodologija predstavljena od strane Creaco i saradnika (2010), koja se zasniva na proračunu rešenja pseudo-matrice. Primer podele mreže na izolacione segmente, u okviru predstavljenog algoritma je dat na Slici 3. Desno.

### 2.2.2 Planiranje ispiranja

Druga faza FPA algoritma se sastoji od sledećih koraka: 1. slaganje Segmenata za ispiranje, kao gradivnih blokova, zarad formiranja poteznih ispiranja, 2. konstruisanje inicijalnog plana ispiranja, 3. formiranje konačnog plana ispiranja modifikovanjem inicijalnog i 4. proračun parametara konačnog plana ispiranja tj. njegova valorizacija. Plan ispiranja se definiše za svaki početni CWF čvor, dela vodovodne mreže koji će se ispirati. Razlog je praktične prirode – terenske ekipe koje sprovode IJP će proceniti na osnovu uslova na terenu (merenja, pristup aktivnim elementima, frekvencija saobraćaja) odakle će početi ispiranje određene zone. Zbog toga je potrebno pre samog izlaska na teren razviti planove za sve moguće varijante.

U prvom koraku, primenom modifikovanog DFS algoritma, definiše se skup poteznih ispiranja za analiziranu zonu vodovodne mreže. Za definisanje poteznih ispiranja, ključni su hidraulički

kriterijumi ( $V_{IJP,min}$ ,  $L_{IJP,max}$ ,  $\Delta E_{IJP,max}$ ) koji su implementirani u modifikovani DFS algoritam, gde se iterativnim proračunom Bernulijeve jednačine proverava njihova ispunjenost u jednom poteznom ispiranju. Kako sam algoritam, ima preferirani pravac propagacije po dubini što nije nužno i adekvatno za formiranje poteznih ispiranja, potrebne su određene korekcije dodavanjem dodatnih uslova ili ciljnih funkcija. Pre opisa samih ciljnih funkcija, definišće se bezdimenzionalni parametri  $TFPI$  (eng. Total Flushing Progress Index) i  $\Delta FPI_n$  (eng. Delta Flushing Progress Index), koji opisuju ukupan napredak u realizaciji IJP i priraštaj napretku u realizaciji IJP, respektivno, određene zone vodovodne mreže:

$$TFPI = \frac{\sum_{j=1}^{NPF} L_{fp,j}}{\sum_{k=1}^{NP} L_{p,k}} \quad (7)$$

$$\Delta FPI_n = \frac{\sum_{m=1}^{NPF_n} L_{fp,m}^n}{\sum_{k=1}^{NP} L_{p,k}} \quad (8)$$

gde su  $NP$ ,  $NPF$  i  $NPF_i$  ukupan broj cevi, ukupan broj „ispranih“ cevi i ukupan broj „ispranih“ cevi u  $n$ -tom segmentu za ispiranje, respektivno, a  $L_{p,k}$ ,  $L_{fp,j}$  i  $L_{fp,m}^n$ , dužine cevi iz skupa svih cevi ( $k = 1$  do  $NP$ ), iz skupa svih ispranih cevi ( $j = 1$  do  $NPF$ ) i iz skupa svih ispranih cevi u  $n$ -tom segmentu za ispiranje ( $m = 1$  do  $NPF_n$ ), respektivno. Parametar  $TFPI$  opisuje ukupan napredak u ispiranju analizirane zone vodovodne mreže, i može imati vrednosti od 0 (zona uopšte nije pokrivena poteznim ispiranjima) do 1 (cela zona je pokrivena poteznim ispiranjima). U FPA algoritmu se  $TFPI$  koristi kao uslov za izlazak iz petlje u formi  $TFPI = 1$  (cela zona isprana) pri formiranju plana poteznih ispiranja.

Sa druge strane parametar  $\Delta FPI_n$  opisuje koliki je priraštaj u pokrivenosti zone poteznim ispiranjima, dodavajući  $n$ -ti segment za ispiranje. Kako postoje određena preklapanja u segmentima za cevi, odnosno iste cevi se nalaze u više segmenata, vrednost  $\Delta FPI_n$  nije konstantna za jedan segment za ispiranje, tokom izvršavanja algoritma za planiranje ispiranja.

U kontekstu korekcije propagacije modifikovanog DFS algoritma kojim se formiraju potezna ispiranja, integrišu se dve ciljne funkcije (uslova) prema kojima se vrši odabir segmenta za ispiranje, odnosno pravca propagacije, a sve u skladu sa hidrauličkim kriterijumima:

1. *Uslov zadržavanja u istom izolacionom segmentu* – Cilj ovog uslova je da se minimizuje broj manipulacija zatvaračima u jednom poteznom ispiranju,
2. *Maksimalan  $\Delta FPI_n$*  – Ovim uslovom se smanjuje broj poteznih ispiranja, odnosno maksimizuje se iskorišćenje raspoloživog kapaciteta potencijalne energije.

Koristeći gore definisane uslove, algoritam definiše skup poteznih ispiranja, kojim je pokrivena cela zona za ispiranje. Za svako potezno ispiranje, na osnovu podataka o izolacionim segmentima, određuju se zatvarači čijim zatvaranjem se voda usmerava kroz željene cevi.

U narednom koraku, ove faze, definiše se početni plan ispiranja. Naime, sada se kombinuju gradivni elementi, odnosno potezna ispiranja iz prethodno definisanog skupa, kako bi se formirao inicijalni plan ispiranja. Plan ispiranja u ovoj fazi, nije konačan, iako ispunjava sve hidrauličke i geometrijske kriterijume, budući da se daljim korekcijama može popraviti njegova ekonomičnost. Treba napomenuti da se pri formiranju plana ispiranja vrše operacije odabira poteznih ispiranja kao i određivanja redosleda poteznih ispiranja. Odabir i formiranje redosleda operacija se vrši korišćenjem dve ciljne funkcije:

1. *Maksimalna preklapanja u manipulacijama zatvaračima* – Cilj ovog uslova je da se minimizuje broj manipulacija zatvaračima u okviru plana ispiranja, odnosno da se jednom zatvoreni zatvarači iskoriste za više poteznih ispiranja,
2. *Maksimalna preklapanja u korišćenju ispusnog hidranta* – Ovim uslovom se utiče na pravac napredovanja u planu ispiranja, tako da se izbegne pojavljivanje „džepova“ koji se ispiraju na kraju plana.

Kada se formira početni plan ispiranja, njega će činiti skup po redosledu uređenih poteznih ispiranja, kojim se može ispratiti određena zona vodovodne mreže. U narednom koraku, vrši se dodatno unapređenje inicijalnog plana ispiranja, gde se uz pomoć heurističkih manipulacija poboljšava

učinkovitost odnosno ekonomičnost plana. U ovom koraku algoritam vrši sledeće tri operacije, iterativno:

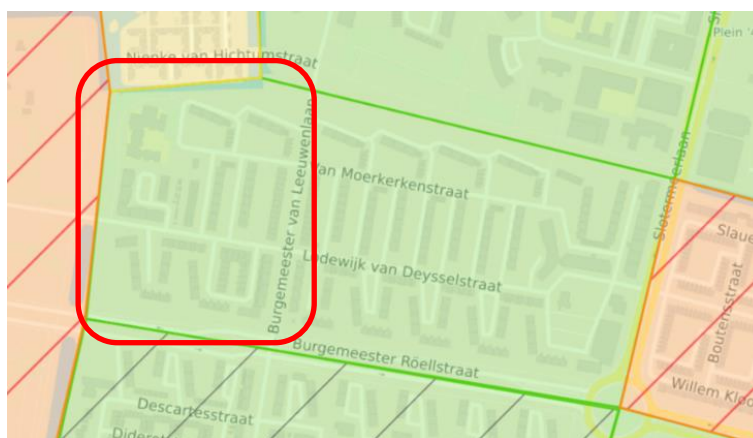
1. *Prevezivanje formiranih poteznih ispiranja* – Postoji mogućnost da se usled dispozicije mreže i načina formiranja, javne neuravnotežena potezna ispiranja gde je jedno na granici ispunjenja kriterijuma dužine ( $L_{IJP,max}$ ) ili maksimalnog pada energije ( $\Delta E_{IJP,max}$ ) a drugo dosta daleko od navedenih kriterijuma.
2. *Promena smera ispiranja* – U određenim uslovima je moguće unaprediti efikasnost plana za ispiranje, samo promenom smera ispiranja određenog poteznog ispiranja. Ukoliko je potežno ispiranje sastavljeno od bidirekcionih segmenta za ispiranje, proverava se učinkovitost primene ove operacije.
3. *Promena redosleda poteznih ispiranja* – Nakon prethodne dve korekcije, opravdano je proveriti da li se promenom redosleda može unaprediti ekonomičnost plana ispiranja.

Konačan plan ispiranja za određeni čvor CWF, koji je dobijen u ovoj fazi, treba valorizovati. Koristeći prethodno definisane konstante (npr Tabela 1.) kao i obrazce (4, 5 i 6), odnosno rezultate hidrauličkog proračuna koji je obavljen u koracima formiranja i korekcije poteznih ispiranja, računaju se merodavne vrednosti za procenu adekvatnosti i ekonomičnosti izvedenog plana ispiranja. Računaju se trajanja ispiranja, kako na nivou poteznog ispiranja ( $t_{tot,IJP,i}$ ) tako i na nivou implementacije celog plana ( $t_{tot,plan IJP}$ ), zatim broj manipulacija zatvaračima ( $N_{man,i}$ ), utrošak pijaće vode ( $V_i$ ) kao i troškove implementacije ( $C_{tot,plan IJP}$ ).

### 2.3 Test primer: Amsterdam

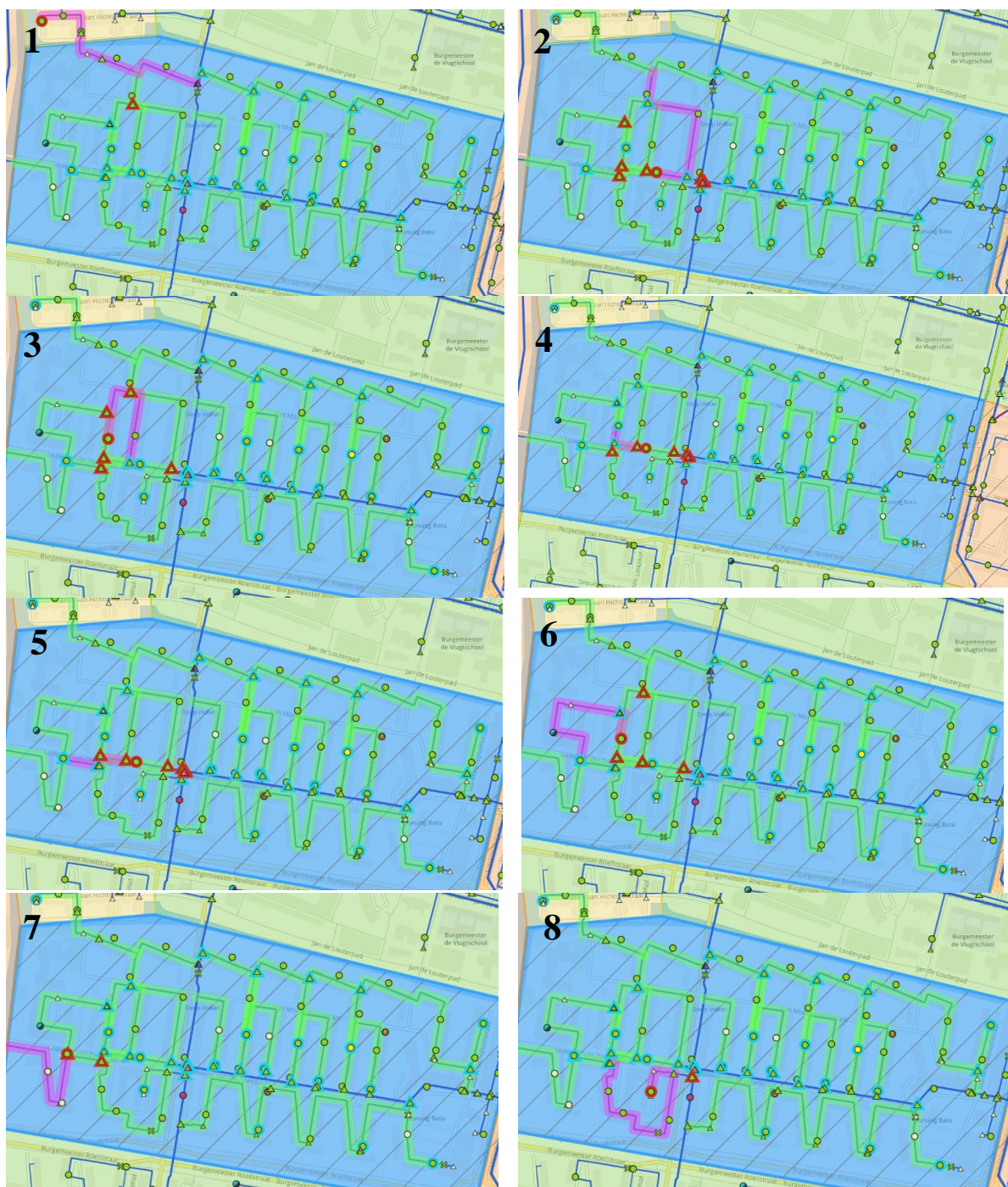
Algoritam FPA je razvijen u sklopu realizacije međunarodnog naučnog projekta „Wat-qual“, čiji je fokus bio na unapređenju shvatanja mehanizama koje dovode do smanjenja kvaliteta vode za piće kao i postupaka i metodologije za uklanjanje zamućenja ili zagađenja u vodovodnoj mreži. Jedan od particijanata 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 Amsterdama.

Kako je cela vodovodna mreža grada Amsterdama podeljena na zone za ispiranje, relativno uravnotežene veličine, 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. Poređenjem plana ispiranja dobijenog pomoću predloženog algoritma za ispiranje sa planom koji su ručno razvili iskusni tehničari i inženjeri „Waternet“ preduzeća, omogućava se nepristrasno sagledavanje mogućnosti i prednosti primene FPA algoritma.



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

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



Slika 5. Prikaz iz softvera MapKit ručno razvijenog plana za ispiranje zapadne dele zone Jan Goeverneurhof 4, u gradu Amsterdamu, Holandiji.

Figure 5. MapKit representation of the manually developed flushing plan for the western part of the test flushing zone Jan Goeverneurhof 4, in the city of Amsterdam, Netherlands.

Radi preglednosti, fokus u ovom radu je stavljen samo na zapadnu stranu zone. Ručno razvijeni plan za ispiranje zapadne strane zone je prikazan na Slici 5, u formi serije poteznih ispiranja ucrtanih u softveru MapKit, koji se koristi u „Waternet-u“. Na slici su ljubičastom bojom obojena potezna ispiranja, crvenim trouglovima zatvarači koje je potrebno zatvoriti, a crvenim krugom ispusni hidrant.

Za razvoj ovog plana korišćeni su isti kriterijumi (1, 2 i 4) dok je za maksimalnu dužinu ispiranja korišćen empirijski kriterijum  $L_{IJP,max} = 300$  m.

Planovi za ispiranje zapadne strane test zone su razvijeni primenom FPA algoritma, primenom dva različita kriterijuma za maksimalnu dužinu poteznog ispiranja. U prvoj varijanti, nazvanoj  $FPA^{CE}$  korišćen je uslov maksimalnog pada energije  $\Delta E_{IJP,max}$ , koji se zasniva na hidrauličkom proračunu, dok je u drugoj varijanti  $FPA^{CL}$ , korišćen istovetan uslov kao i kod ručno razvijenih planova ( $L_{IJP,max} = 300$  m). Za poređenje između različitih planova, kao indikatori performansi, korišćeni su ukupan broj manipulacija zatvaračima ( $N_{man}$ ), efektivno trajanje ispiranja ( $\sum_{i=1}^n t_{IJP,i}$ ), utrošak pijaće vode ( $V$ ) i troškovi implementacije ( $C_{tot,plan IJP}$ ).

### 3 Rezultati i diskusija

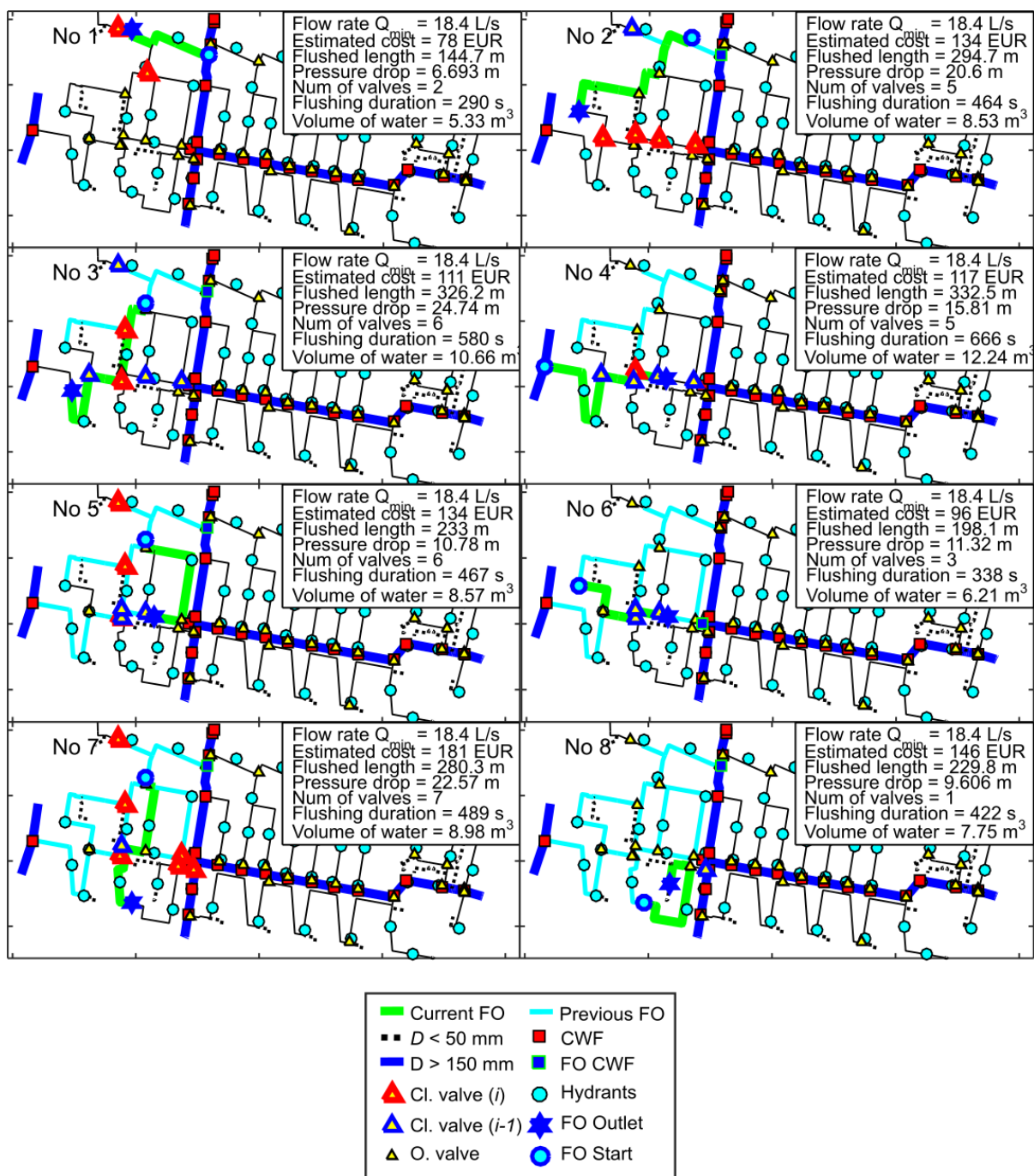
Primenom FPA algoritma, dobijena su dva plana za ispiranje zapadnog dela zone Jan Goeverneurhof 4, koji će se na dalje nazivati  $FPA^{CE}$  plan i  $FPA^{CL}$  plan. Vizuelni prikaz  $FPA^{CL}$  plana, dobijen kao rezultat algoritma je dat na Slici 6, dok je  $FPA^{CE}$  plan izostavljen radi preglednosti rezultata i analiziran je samo kroz poređenje vrednosti indikatora performansi.  $FPA^{CL}$  plan je praktično direktno uporediv sa ručno izvedenim planom, budući da koristi isti kriterijum za definisanje maksimalne dužine ispiranja ( $L_{IJP,max} = 300$  m). Poređenjem ručno izvedenog plana sa  $FPA^{CL}$  planom mogu se uočiti direktne dobiti od postupka optimizacije planiranja ispiranja, sa aspekta ekonomičnosti, dok bi poređenjem sa  $FPA^{CE}$  planom diskusija bila više fokusirana na unapređenja efekta planiranja, zbog bolje kontrole hidrauličkih kriterijuma.

Rezultati prikazani na slici 6, su dobijeni iz MATLAB okruženja i predstavljaju uređenu seriju poteznih ispiranja. Za svako potezno ispiranje u gornjem desnom uglu su navedeni osnovni podaci kao: minimalan protok kojim se ispira potez ( $Q_{IJP,min,i}$ ), trošak implementacije poteznog ispiranja ( $t_{tot,IJP,i}$ ), dužina cevi koje se ispiraju ( $L_{IJP,i}$ ), energetski pad na potezu ( $\Delta E_{IJP,i}$ ), broj zatvarača koje treba zatvoriti (ne broj manipulacija zatvaračima), efektivno trajanje ispiranja ( $t_{IJP,i}$ ) i utrošak pijaće vode ( $V_i$ ). 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.

Na prikazanim rezultatima, može se uočiti da je u određenim slučajevima  $L_{IJP,i} > 300$  m (3 i 4). Naime, ovakvo, slobodnije tumačenje uslova o maksimalnoj dužini ispiranja je predloženo od strane „Waternet-a“, budući da oni koriste isto tako ovaj uslov, a sve u cilju nepristrasnog poređenja sa ručno dobijenim planovima. Ono što je sa aspekta primenljivosti dobijenih poteznih ispiranja veći problem, je činjenica da je pad energije u nekoliko poteznih ispiranja (2, 3 i 7) veći od dozvoljenog pada pritiska odnosno veći od raspoloživog kapaciteta potencijalne energije. Naime, u praksi to znači da se u navedenim poteznim ispiranjima ne može dostići željena minimalna brzina, odnosno da efekat ispiranja verovatno neće biti zadovoljavajući. Svakako, ovo je jedan od ključnih razloga za prelazak na uslov maksimalnog pada energije, u daljem istraživanju.

Poređenje indikatora performansi planova za ispiranje, za celu zonu od interesa, a između ručno napravljenog plana i dve varijante dobijene primenom algoritma za planiranje, dato je u Tabeli 2. Poslednje dve vrste, daju podatke o relativnom smanjenju određenih indikatora performansi u odnosu na ručno izvedene planove (smanjenje vrednosti znači manji utrošak, odnosno bolje rešenje). Uočava se da su obe varijante planova kreiranih FPA algoritmom,  $FPA^{CE}$  i  $FPA^{CL}$ , ekonomičnije, sa relativnim razlikama od 5,5% i 15,7%, respektivno. Interesantno je uočiti 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 rezultate koji zadovoljavaju 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<sup>CL</sup> plan. Ovim je potvrđeno da se predloženim algoritmom mogu dobiti znatno povoljniji planovi za ispiranje nego u slučaju ručnog definisanja.



Slika 6. Prikaz plana za ispiranje, dobijenog pomoću FPA<sup>CL</sup> varijante algoritma za planiranje IJP, zapadne dele zone Jan Goeverneurhof 4, u gradu Amsterdamu, Holandiji.

Figure 6. Flushing plan, derived with FPA<sup>CL</sup> variant of the flushing planning algorithm, for the western part of the test flushing zone Jan Goeverneurhof 4, in the city of Amsterdam, Netherlands.

Tabela 2. Poređenje indikatora performansi planova za IJP, između ručno dobijenih planova i planova dobijenih primenom FPA (FPA<sup>CE</sup> i FPA<sup>CL</sup>).

Table 2. Uni-directional flushing plan indicators comparison between the manual plans and plans obtained with FPA (FPA<sup>CE</sup> and FPA<sup>CL</sup>).

Indikatori performansi	Broj manipulacija zatvaračima ( $N_{man}$ ) [l]	Efektivno trajanje ispiranja ( $\sum_{i=1}^n t_{IJP,i}$ ) [h]	Utrošak pijaće vode ( $V$ ) [m3]	Troškovi implementacije ( $C_{tot,plan IJP}$ ) [EUR]
Ručni:	40	1.5	99.9	1174
FPA <sup>CE</sup> :	33	1.15	72	1109
FPA <sup>CL</sup> :	35	1.03	68.3	990
$\Delta$ [%] - FPA <sup>CE</sup> :	<b>17.50</b>	<b>23.26</b>	<b>27.93</b>	<b>5.52</b>
$\Delta$ [%] - FPA <sup>CL</sup> :	<b>12.50</b>	<b>31.30</b>	<b>31.63</b>	<b>15.66</b>

## 4 Zaključci

Promena boje vode u vodovodnim sistemima je jedan od najčešćih prijavljenih problema u vodosnabdevanju. Sprečavanje pojave zamucenje, kao i uklanjanje nakon pojave istog, se zasniva na primeni više strategija. Najpraktičnija se bazira na pro-aktivnom i reaktivnom ispiranju vodovodne mreže. Dominantna je metoda ispiranje mreže u jednom pravcu, pri kojoj se manipulacijom određene grupe zatvarača, tok čiste vode usmerava kroz deo vodovodne mreže ka ispusnom hidrantu. Uobičajeno se ispiraju cevi sekundarne i tercijerne mreže, prečnika manjeg od 300 mm. 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 je predstavljen algoritam za planiranje IJP, nazvan FPA, kojim se omogućava automatizacija planiranja IJP kao i optimizacija dobijenih planova. FPA algoritam je razvijen u MATLAB programskom okruženju i kao ulazni podatak koristi kalibrisan EPANET model vodovodne mreže. Sam algoritam se sastoji od dve faze: 1.) preprocesiranje i 2.) planiranje ispiranja. U prvoj fazi vrši se detekcija dela mreže koji se može isprati, aktivnih elemenata i fronta čiste vode, odnosno CWF čvorova, kao i podela mreže na izolacione segmente. Takođe, definiše se restrukturirana mreža u kojoj veze čine segmenti za ispiranje, a čvorovi su hidranti ili CWF čvorovi. U drugoj fazi, segmenti za ispiranje se prvo koriste kao gradivni elementi za „slaganje“ i formiranje poteznih ispiranja. Zatim se potezna ispiranja „slažu“ tako da se dobije inicijalni plan za ispiranje, koji se potom koriguje osnovnim manipulacijama, kako bi se dobio konačan plan za ispiranje. Na kraju, računaju se relevantne vrednosti za potezna ispiranja i plan ispiranja.

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<sup>CE</sup> koja koristi kriterijum maksimalnog pada pritiska, i modifikovana FPA<sup>CL</sup> 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<sup>CL</sup>. Obe varijante su se pokazale da mogu da razviju ekonomičnije planove za ispiranje nego u slučaju ručno određenih planova. FPA<sup>CE</sup> i FPA<sup>CL</sup> planovi zahtevaju manje manipulacija zatvaračima, manje trajanje ispiranja i manji utrošak pijaće vode. Primenom FPA<sup>CL</sup> varijante potvrđen je ključni nedostatak primene kriterijuma maksimalne dužine, koji se ogleda u prevelikim padovima energije duž jednog poteznog ispiranja. Takođe, ovim primerom je pokazano da se primenom FPA<sup>CE</sup> 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.

## Zahvalnica

Rezultati istraživanja predstavljeni u ovom radu su dobijeni u sklopu međunarodnog naučnog projekta Wat-Qual, poziva Horizon 2020 MSCA-RISE-2017 sheme. Autori žele da se ovom prilikom zahvale rukovodiocima projekta na podršci u sprovođenju istraživačkih aktivnosti.

## Literatura

1. 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.
2. Blokker, E. J. M., Schaap, P. G., and Vreeburg, J. H. G., 2009. *Selfcleaning networks put to the test*, Invited papers from the IWA Leading Edge conference on Strategic Asset Management (LESAM), Lisbon, October 2007, edited by: Alegre, H. and Almeida, M. d. C.
3. Boxall, J.B., Skipworth, P.J. and Saul, A.J., 2003. *Aggressive flushing for discoloration event mitigation in water distribution networks*. Water Science and Technology: Water Supply, 3(1-2), pp.179-186.
4. Creaco, E., Franchini, M. and Alvisi, S., 2010. *Optimal placement of isolation valves in water distribution systems based on valve cost and weighted average demand shortfall*. Water resources management, 24(15), pp.4317-4338.
5. DeFrank, J. J., 2006. *Catalytic enzyme-based methods for water treatment and water distribution system decontamination—I. Literature survey*, U.S. Army Research, Development and Engineering Command, Edgewood Chemical Biological Center, Edgewood, Md.
6. Ellison, D., Duranceau, S. G., Ancel, S., Deagle, G., and McCoy, R., 2003. *Investigation of pipe cleaning methods*, AWWA Research Foundation, Denver.
7. Friedman, M., et al., 2003. *Establishing site-specific flushing velocities*, AWWA Research Foundation, Denver.
8. Friedman, M., et al., 2005. *Development of distribution system water quality optimization plans*, AWWA Research Foundation, Denver.
9. 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.
10. Ivetić, D., Vasilčić, 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].
11. Oberoi, K., 1994. *Distribution flushing program: The benefits and results*. AWWA Annual Conf., AmericanWaterWorks Association, New York, 579–597.
12. Ostfeld, A. and Salomons, E., 2004. *Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security*. Journal of water resources planning and management, 130(5), pp.377-385.
13. 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.
14. 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.
15. 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>
16. Van Dijk, J.C. and Van der Kooij, D., 2004. *Water Quality 21 research programme for water supplies in The Netherlands*. Water Science and Technology: Water Supply, 4(5-6), pp.181-188.
17. van Summeren, J. and Blokker, M., 2017. *Modeling particle transport and discoloration risk in drinking water distribution networks*. Drinking Water Engineering and Science Discussions.
18. Vreeburg, I.J. and Boxall, J.B., 2007. *Discolouration in potable water distribution systems: A review*. Water research, 41(3), pp.519-529.
19. Vreeburg, J.H.G., 2007. *Discolouration in drinking water systems: a particular approach*.



# 19. Savetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021. Conference SDHI & SDH - Belgrade, Serbia

20. 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.
21. Zhang, Q., Zheng, F., Kapelan, Z., Savic, D., He, G. and Ma, Y., 2020. *Assessing the global resilience of water quality sensor placement strategies within water distribution systems*. *Water research*, 172, p.115527.