

## KONTROLA CIKLUSA FILTRIRANJA KROZ MODELIRANJE

Suvada JUSIĆ i Zoran MILAŠINOVIĆ  
Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, Bosna i Hercegovina

### REZIME

U cilju praćenja novih svjetskih trendova, vezano za pripremu vode za piće, i uvida u pozitivne mogućnosti uvođenja modeliranja u sistem vodosnabdijevanja, istražena je primjena modela u pravcu kontrole procesa filtriranja. Primjena modela provedena je na filter stanici »Crkvice« u Zenici (BiH), gdje se koriste konvencionalni brzi pješčani filteri. Korišteno je Stimela okruženje modeliranja razvijeno na Tehničkom univerzitetu u Delftu, Holandija. Efikasnom primjenom modela određen je optimalni ciklus filtriranja za različite ulazne mutnoće sirove vode. Ovim je omogućena optimalnija kontrola ciklusa filtriranja, kao operativnog parametara, i time mogućnost smanjenja potrošnje vode za pranje, mogućnost smanjenja troškova prepumpavanja te vode, kao i smanjenje potrošnje koagulanta.

**Ključne reči:** priprema vode za piće, vrijeme ciklusa filtriranja, Stimela okruženje modeliranja, kontrola filtriranja

### 1. UVOD

Prisutna problematika u radu filter stanica / postrojenja (FS), odnosno pripreme vode u sklopu sistema vodosnabdijevanja, zahtijeva potrebu boljeg razumijevanja samog procesa (to jest, uticaja raznih parametara na proces). Također, složeni mehanizmi, na primjer procesa filtriranja, koji još uvijek nisu u potpunosti rasvijetljeni, mogu se bolje razumjeti primjenom modeliranja (*Busuladžić, 2009*) (*Ljubisavljević i Jonović, 2013*). Matematsko modeliranje procesa je odraz poznavanja, odnosno razumijevanja samog procesa, to jest mehanizama po kojima taj proces djeluje (*van Schagen 2009*). Poznavanje procesa i razumijevanje mehanizama njegovog djelovanja preduslov je za poboljšanje procesa. Poboljšanja procesa moguća su u fazi planiranja i projektovanja odabirom optimalnih

vrijednosti projektnih parametara ili u eksploataciji izborom operacionih (manipulativnih) parametara koji se mogu mjenjati, a zavise od ulaznih parametara i, u ustaljenoj praksi, najviše od iskustva i odgovornosti operatera. Cilj je i izazov, da se projektovanje i kontrola procesa na filter stanice (FS) bazira više na znanju, a manje na iskustvu. U tu svrhu primjenjuju se matematski modeli.

Filter stanica ima osnovni zadatak da obezbjedi odgovarajuću količinu i kvalitet vode za piće u skladu sa standardima zdravstvene organizacije (vodu sigurnu po zdravlje). Pri tome cilj je minimizirati operacione troškove i negativan uticaj na okruženje (na primjer, smanjiti potrošnju hemikalija, električne energije, smanjiti produkciju otpadne vode itd). Činjenica je da bolji kvalitet vode uglavnom znači i veće troškove, odnosno veći negativan uticaj na okruženje. Primjena modela može smanjiti taj negativan uticaj uz obezbjeđenje istog kvaliteta vode. U ovom radu pokazan je efekat primjene modela u pravcu kontrole, odnosno odabira optimalnih vrijednosti operacionih parametara, procesa filtriranja. Model je primjenjen na FS »Crkvice« u Zenici (BiH), gdje se koriste konvencionalni brzi pješčani filteri. S ozirom da je na ovim filterima jedan od značajnijih problema neadekvatna kontrola procesa, zasnovana na iskustvu operatera i nedovoljne količine vode za pranje filtera, primjena modela je usmjerena na rješavanje ovog problema. Ciklus filtriranja, odnosno vrijeme između dva povratna pranja filtera, jeste operacioni parametar procesa filtriranja, koji se može mijenjati u cilju efikasnije kontrole i poboljšanja efekata filtriranja. U dosadašnjoj praksi kontrole procesa filtriranja, vrijeme između dva pranja usvaja se iskustveno, bazirano najviše na iskustvu operatera, i u slučaju ove FS iznosi uglavnom 24 sata. Benefiti mjenjanja vrijednosti operacionih parametara, u skladu sa kvalitetom sirove vode i na taj nači odabir optimalnih vrijednosti operacionih parametara, se ne koriste.

## 2. MODELIRANJE PROCESA FILTRIRANJA U STIMELA OKRUŽENJU

### 2.0. Osnovno o strukturi Stimela modela

Za simuliranje procesa pripreme vode za piće razvijena su različita okruženja modeliranja. Jedno od njih je i Stimela okruženje, razvijeno na Tehničkom univerzitetu u Delftu (TU Delft) Holandija. Modeliranje u Stimela okruženju je bazirano na numeričkoj integraciji parcijalnih diferencijalnih jednačina (Kaluderović, 2012) (Milišić i Kalajđisalihović, 2012). Parcijalne diferencijalne jednačine simuliraju karakteristike pojedinih procesa u sklopu stanice za pripremu vode za piće. Programiranje numeričkog rješenja, prethodno definisanih parcijalnih diferencijalnih jednačina, u Stimela okruženju modeliranja, vrši se u programskom jeziku MATLAB (Worm, 2012). Najšire korišten alatni okvir jeste simulacioni alat Simulink. Simulink je proširenje MATLAB-a, koje se koristi za simulaciju dinamičkih sistema. Upravo ovaj okvirni alat – MATLAB / Simulink - koristi Stimela. Korištenje MATLAB / Simulink-a čini modele Stimela okruženja jednostavnim i pristupačnim, struktura modela je otvorena i fleksibilna, grafička vizuelizacija rezultata je također dostupna i nije neophodno da korisnik uči MATLAB ili Simulink.

Blokovi pojedinih procesa prerade vode, smješteni su u biblioteci modela Stimela okruženja. Biblioteka Stimela okruženje modeliranja sadrži baznu biblioteku (basic modules library), kontrolnu (control) i biblioteke pojedinačnih procesa, kao što su aeracija (aeration library), filtracija (filtration library), omekšavanje (softening library) itd (Jusić, 2016). Model, odnosno blok, pojedinačnog procesa, u Stimela okruženju, u osnovi se sastoji od 6 datoteka putem kojih su definisani odgovarajući parametri. Početna datoteka (file započinjanja) definisana je ulaznim parametrima, te uobičajenim diferencijalnim jednačinama. Dodatno, parametri kvaliteta, koji su od interesa za proces, su također definisani ovom datotekom. U procesnoj datoteci su obrađeni odgovarajući parametri procesa. Otvaranjem, na primjer, procesne datoteke zadaju se projektni i kalibracioni parametri, karakteristični za taj proces. Projektni parametri, u već izgrađenoj FS, su fiksni. Parametri kalibracije zavise od procesa i mogu biti dobiveni eksperimentima (Rietveld i Dudley, 2006). Sistemska datoteka je srce modela. U ovoj datoteci diferencijalne jednačine su date u matričnom zapisu. Također, putem grafičke izlazne datoteke definisani su izlazni (kontrolni) parametri. Grafička izlazna datoteka daje mogućnost vizuelizacije izlaza iz numeričke

integracije. Kontrolna datoteka može se koristiti za daljnje podešavanje, odnosno rukovanje blokovima procesa, variranjem/promjenama kalibracionih ili operacionih parametara.

### 2.1. Parametri procesa filtriranja

Stimela modeli procesa pripreme vode za piće zahtijevaju definisanje različitih parametara - parametri ovisni od konkretnog procesa. Svaki blok, prethodno pomenut, sadrži datoteke, odnosno parametre koji su relevantni za taj blok i proces prerade. U zaglavlju Tabele 2 navedeni su parametri Stimela okruženja, koji karakterišu proces filtriranja na konvencionalnim brzim pješčanim filterima. Ovi parametri su sistematizirani kroz tri grupacije: ulazni – projektni i parametri poremećaja; manipulativni parametri i izlazni - kontrolni parametri (Jusić, 2011). Pri modeliranju, osim prethodno definisane tri grupacije parametara, treba definisati i grupaciju kalibracionih parametara, s ciljem testiranja modela. Ulazni, operacioni i kalibracioni parametri moraju biti definisani kako bi se pokrenula simulacija procesa i dobili izlazni, to jest, kontrolni parametri. U postupku testiranja modela određeni parametri (kalibracioni, odnosno operacioni) se mogu korigovati/mijenjati, a sve u cilju vjerodostojnijeg simuliranja procesa, a s krajnjim ciljem efikasne primjene modela, odnosno optimiziranja procesa. Osnovni reper za eventualne promjene i korekcije parametara jesu izlazni, odnosno kontrolni parametri. U slučaju procesa filtriranja to su koncentracija zagađenja (suspendovanih, odnosno koloidnih čestica) ( $c$ ) i pad pritiska kroz ispunu ( $H$ ), odnosno gradijent pada pritiska ( $I$ ). Ukoliko oni nisu u propisanim granicama, pristupa se odgovarajućim korekcijama, na primjer promjenama operacionih parametara.

U ovom radu razmatrana je promjena vremena ciklusa filtriranja u cilju kontrole procesa. Ciklus filtriranja, kao jedan od operacionih parametara procesa filtriranja, detaljnije je razmatran u nastavku.

#### *Ciklus filtriranja kao operacioni parametar*

Vrijeme između dva pranja filtera je ciklus filtriranja (engl. *filter run time*). To je operacioni / manipulativni parametar procesa filtriranja, koji se mijenja kada ulazni projektni parametri poremećaja (Tabela 2) negativno utiču na kontrolne parametre, u smislu da su kontrolni parametri van definisanih granica. Teoretski, upravljanje, odnosno regulacija filtriranja se najčešće vrši na jedan od tri načina: održavanje konstantnog

nivoa vode iznad ispune, konstantne brzine filtriranja ili opadajuće brzine filtriranja (Ljubisavljić i Jonović, 2013). U praksi, pranje, odnosno regulisanje filtriranja, uslovljeno je sa jednim ili više faktora navedenih u nastavku.

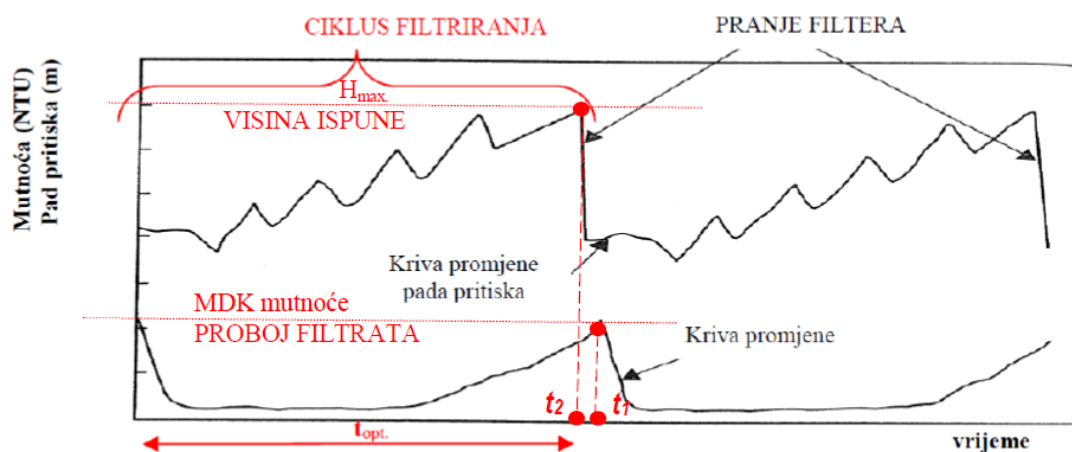
**Gubici pritiska** – Ako gubici rastu, automatski raste nivo vode iznad filterske ispune, brzine opadaju, što inicira potrebu za pranjem.

**Mutnoća** – Ukoliko mutnoća filtrata počne da raste, to upućuje da nečistoće prethodno odstranjene, odnosno zadržane u filterskoj ispuni, bivaju ponovo zahvaćene tokom vode i ponesene kroz ispunu u filtrat. Ovo naravno upućuje na hitno pranje filtera.

**Vrijeme** – Mnoge stanice peru filtere po ustaljenom rasporedu, prilagođenom karakteristikama vode koja se obrađuje.

**Proticaj** – Neke stanice određuju količinu vode koja treba biti filtrirana između dva pranja.

Nažalost, u ustaljenoj praksi, vrlo često je regulisanje filtriranja uslovljeno faktorom vremena, odnosno proticaja (ustaljena praksa). Osnovni uslov za odabir optimalnog ciklusa filtriranja veže se za kontrolne parametre, odnosno za vrijeme za dostizanje njihovih graničnih vrijednosti. Vrijeme potrebno da se dostignu granične vrijednosti kontrolnih parametara mutnoće ( $t_1$ ) i pada pritiska ( $t_2$ ) zavise najviše od načina rada filtera (ciklus filtriranja, brzina filtriranja...), ali i od predtretmana sirove vode. Da bi filter radio optimalno, potrebno je na adekvatan način uskladiti ova dva vremena ( $t_1$  i  $t_2$ ), odnosno ova dva kontrolna parametra – koncentraciju čestica zagađenja i pada pritiska. Ovo optimiziranje znači u stvari iznalaženje optimalnog vremenskog perioda rada između dva pranja ( $t_{opt.}$  - Slika 1) i za najekonomičnije projektovan filter trebalo bi da je  $t_{opt.} = t_1 = t_2$ . Ipak, iz praktičnih razloga, važno je da se vrijednost pada pritiska dostigne u vremenu  $t_2$  kraćem od vremena  $t_1$ , koje odgovara proboju filtrata. Ovaj uslov se poštovao pri primjeni modela na FS „Crkvice“.



Slika 1: Dijagram promjene mutnoće filtrirane vode i pada pritiska u vremenu (Jusić, 2016)

## 2.2. Osnovno o matematskom formulisanju procesa filtriranja

Proces konvencionalnog brzog filtriranja je proces čija je matematska formulacija, pri razvoju modela u Stimela okruženju, bazirana na Marodas-ovoj jednačini (za promjenu koncentracije čestica zagađenja) i Carman Kozeny-ovoj jednačini (za određivanje gubitaka u filterskoj ispuni) (Rietveld, 2005). Samo matematsko formulisanje procesa, te rješavanje ovih matematskih jednačina, podrazumijeva pretpostavljanje idealnih uslova tečenja u reaktoru u kom se odvija proces (Đorđević, 2015). U Stimela okruženju modeliranja,

koristi se PFR - Plug Flow Reactor, odnosno model sa idealnim hidrodinamičkim uslovima tečenja, u kome se razmatraju promjene (kontrolnih) parametara procesa. U PFR-u tipu modela, odnosno reaktoru, parametri filtriranja se mijenjaju po dubini, a u jediničnom elementu su konstantni.

Kao što je prethodno već napomenuto, Maroudas-ovu jednačinu (1) koristi Stimela model konvencionalnog brzog filtriranja pri matematskom opisu promjene koncentracije čestica zagađenja pri filtriranju. Ova jednačina detaljnije razmatra stvaranje depozita, odnosno akumuliranje čestica u tijelu ispune –

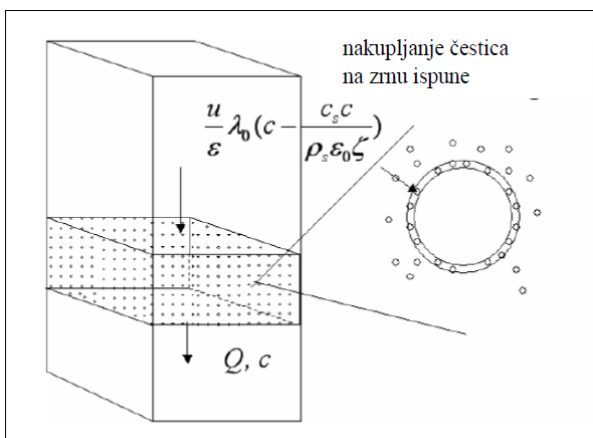
kolmaciju ispune (Milašinović, 2004) (Slika 2). Maroudas-ova jednačina je, u stvari, jedna od jednostavnijih obrada Ivesove jednačine, a glasi:

$$k_2 = \frac{u}{\varepsilon} \lambda_0 \left( 1 - \frac{c_{si}}{c_{s,u}} \right) \Rightarrow k_2 = \frac{u}{\varepsilon} \lambda_0 \left( 1 - \frac{c_{si}}{\rho_s \varepsilon_0 \zeta} \right) \quad .. (1)$$

$$c_{s,u} = \varepsilon_0 \rho_s \zeta$$

Pri čemu je:

- $k_2$  – koeficijent transfera (stepen filtriranja) ( $s^{-1}$ ),
- $u$  – brzina vode ( $ms^{-1}$ ),
- $c_s$  – koncentracija čestica u ispuni u čvrstoj fazi (depozit) ( $g/m^3$ ),
- $c_{s,u}$  – koncentracija zasićenja ispune česticama (depozit zasićenja) ( $g/m^3$ ),
- $\varepsilon_0$  – porozitet čiste ispune (-),
- $\varepsilon$  – porozitet kolmirane ispune (-),
- $\zeta$  – maksimalno kolmiranje pora (-),
- $\rho_s$  – gustoća čestica ( $kg/m^3$ ),
- $\lambda$  – koeficijent filtriranja kolmirane ispune ( $m^{-1}$ ),
- $\lambda_0$  – koeficijent filtriranja čiste ispune ( $m^{-1}$ ).



Slika 2: Šematska prikaz nakupljanja čestica u tijelu ispune / reaktora (Rietveld, 2005)

U slučaju čistog filtera gubitak (H), odnosno gradijent promjene pritiska (I) proračunava se prema Karman-Kozenijevoj (Carman Kozeny's) jednačini za laminarni tok – jednačina (2):

$$I_i = I_0 \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0 - \frac{c_{si}}{\rho_s}} \right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

$$I_0 = 180 \frac{\nu}{g} \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \frac{\nu}{d_0^2}$$

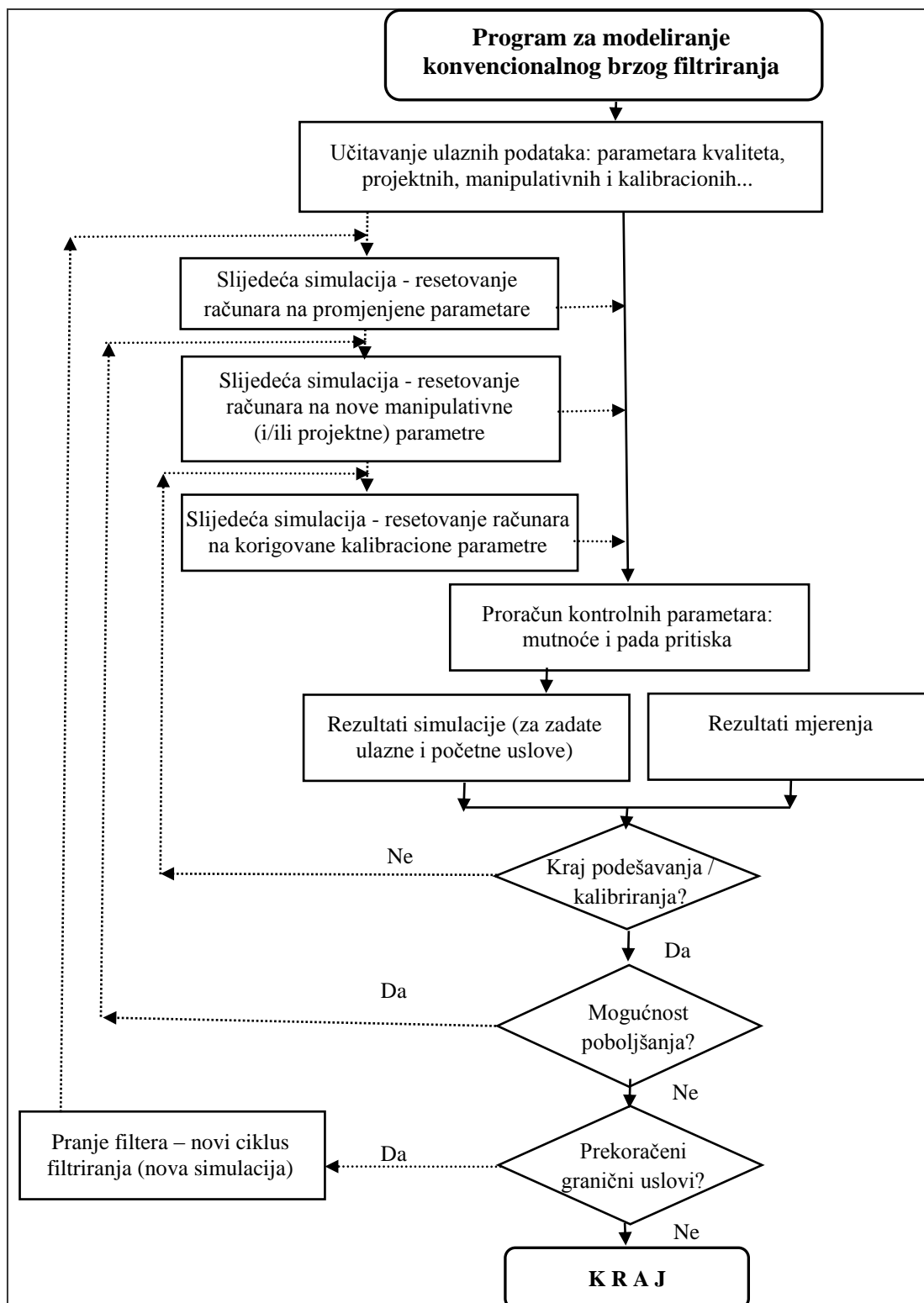
Gdje je:

- $I_0$  – početni gradijent promjene (pada) pritiska (za čistu ispunu) (-),
- $I$  – gradijent promjene pritiska po jedinici dubine ispune (-),
- $d_p$  – dijametar čestice zrna ispune (m),
- $\nu$  – kinematski viskozitet ( $m^2/s$ ).

### 2.3. Algoritam rješavanja konvencionalnog brzog filtriranja

Naredni korak u razvoju matematskog modela jeste formiranje odgovarajućeg algoritma rješavanja prethodno matematski formulisanog procesa. Dijagram toka je grafički prikaz algoritma, odnosno prikaz postupaka za rješavanje procesa (problema). Slika 3 prikazuje blok dijagram, odnosno algoritam rješavanja problematike konvencionalnog brzog filtriranja pri njegovom modeliranju, odnosno simuliranju. Ovaj algoritam se koristi u Stimela modelu filtriranja. U ovom dijagramu, odnosno numeričkoj integraciji u programu MATLAB/Simulink, najprije se učitavaju ulazni parametri, te manipulativni i kalibracioni, kako bi se došlo do odgovarajućih kontrolnih parametara. Nakon odgovarajućih proračuna rezultati se printaju u vidu grafičke vizuelizacije izlaznih / kontrolnih parametara.

U slučaju filtriranja rješenje problema znači proračun/određivanje kontrolnih parametara – mutnoće filtrata i pada pritiska u ispuni na kraju ciklusa filtriranja, koji moraju biti u definisanim granicama. Kraj blok dijagrama jeste završna/posljednja radnja koja znači dobivanje zadovoljavajućeg rješenja, to jest neprekoračene granične vrijednosti kontrolnih parametara, uz prethodno provedenu kalibraciju i verifikaciju i ostvareno određeno poboljšanje (npr. izbor optimalnog ciklusa filtriranja, to jest, odabir odgovarajućih projektnih ili manipulativnih parametara koji će povećati efikasnost procesa). Tako na primjer, ukoliko su izlazni kontrolni parametri van granica ili u znatnoj mjeri odstupaju od izmjerenih vrijednosti, simulaciju treba ponoviti, tako što će se korigovati određeni (kalibracioni ili operacioni) parametri i ponovo izvršiti resetovanje računara na nove izmjenjene parametre, odnosno početne uslove.



Slika 3: Blok dijagram toka programa za modeliranje konvencionalnog brzog filtriranja (Jusić, 2011)

## 2.4. Programiranje algoritma i grafička prezentacija rezultata

Stimela okruženje modeliranja, pri programiranju algoritma, koristi programski jezik MATLAB/Simulink. MATLAB/Simulink nudi brojne programske razvojne alate za numeričku integraciju jednačina filtriranja (Ulinici i dr, 2014). Istraživanja interesantna sa aspekta hidrotehnike nisu programski jezici / softver. Stručnjaci informatičke struke zaduženi su za numerička istraživanja i programiranje, s tim da saradnja informatičara i hidrotehničara treba postojati kako bi se program što efikasnije definisao (izradio, doradio, kontrolisao) i iskoristio u davanju jasne i korisne (grafičke) prezentacije rezultata.

Završni korak programiranja jeste interpretacija rezultata - izlaznih, odnosno kontrolnih parametara. Grafička vizuelizacija izlaznih rezultata simuliranja procesa je posebno bitna jer omogućava uvid u izlaz numeričke integracije ulaznih podataka. Rezultati simuliranja operacije filtriranja, posebno interesantni za hidrotehničara, analiziraju se s ciljem izvještavanja i poređenja rezultata analize. Dobiveni rezultati jasno pokazuju efikasnost filtriranja i kao takvi daju smjernice za eventualne korekcije, odnosno efikasnije promjene pojedinih parametara u cilju efikasnije primjene modela.

Grafička prezentacija izlaznih rezultata, pri primjeni modela filtriranja (dvoslojni – dual medija) iz Stimela okruženja (DHV Water BV, 2016) na FS „Crkvice“, data je u 3. poglavlju ovog rada (Slike: 4 i 6). U nastavku je dat uopšten osvrt na grafičku interpretaciju rezultata, odnosno kontrolnih parametara koju daje model. U gornjem desnom uglu, grafičke prezentacije rezultata, odnosno izlaza modeliranja, prikazuje se Lindquist – ov dijagram, odnosno dijagram promjene pritiska kroz tijelo ispune. Na apscisi su vrijednosti pada pritiska (*Head* (mWk)), a na ordinati visina od dna filtera (*Height from the botton of the filterbed* (m)), uključujući prikaz visina oba filterska sloja (*Height lower filter bed layer* i *Total filterbed height*) i prikaz visine vode iznad filterskog sloja (*Water level above the filter bed*). Verzija modela koji se koristi u ovom radu daje prikaz pada pritiska samo za čistu ispunu ( $H_0$ ). U gornjem lijevom uglu grafičke prezentacije modela dobiva se prikaz promjene pada pritiska (*Pressure drop* (mWk)) u vremenu (*Time* (hour)). U donjem lijevom uglu dobiva se prikaz promjene koncentracije čestica zagađenja (*concentration suspended solids* (mg/l)) u vremenu (*Time* (hour)). U donjem desnom uglu daje se prikaz vrijednosti karakterističnih parametara (Tabela 2) koji

se odnose na prikazani grafički izlaz. Ti parametri su: vrijeme ciklusa filtriranja (*filterrun time* (hour)), površina filtera (*filter surface* (m<sup>2</sup>)), nivo vode iznad filterske ispune (*Water level above filter bed* (m)), proticaj (*Water flow* (m<sup>3</sup>/h)), Gustoća flokula (*Massdensity of the flocs* (kg/m<sup>3</sup>)), Konstante začepjenja 1. i 2. sloja (*Clogging constant* (-)). Vezano za samu ispunu dati su pri dnu parametri i njihove vrijednosti posebno za gornji i donji sloj ispune (*Upper layer*, *Lower layer*). Ti parametri su visina ispune (*Bed height* (m)), Veličina zrna (*Grainsize* (mm)), porozitet (*Porosity* (%)), kao kalibracioni parametri *Lambda* (1/s) i broj kompletno izmješanih reaktora (*Completely mixed reactors* (-)).

## 3. KONTROLA CIKLUSA FILTRIRANJA NA FS "CRKVICE" ZENICA

### 3.0. Uvod u efikasnu primjenu modela

Primjena modela podrazumjeva poznavanje modela, zatim karakteristika samog procesa koji se modelira, te raspolaganje sa odgovarajućom bazom podataka same FS. Raspolaganje odgovarajućom bazom podataka znači definisanje ulaznih i operacionih parametara, i razumjevanje i evaluaciju kalibracionih parametara (parametri definisani u Tabeli 2). Naravno, baza podataka uključuje i definiranje, prikupljanje i analizu mjerenih ulaznih i izlaznih parametara. Ovi podaci su potrebni pri testiranju modela (Slika 3 – korak podešavanja / kalibriranja). Tek nakon koraka provedene kalibracije i verifikacije (testiranja) može se pristupiti efikasnoj primjeni modela. Prema tome, u cilju efikasne primjene modela, u ovom slučaju u cilju kontrole ciklusa filtriranja, neophodno je prethodno:

- definisati osnovne karakteristike stanice, odnosno procesa (filtriranja),
- definisati bazu podataka za modeliranje (prema Tabeli 2),
- testirati model (provođenjem kalibracije i verifikacije),
- dati diskusiju rezultata modeliranja u svrhu efikasne primjene modela.

### 3.1. Osnovne karakteristike FS "Crkvice"

Primjena modela (iz Stimela okruženja) je provedena na FS koja koristi konvencionalne brze pješčane filtere – FS "Crkvice" u Zenici, BiH (kapacitet stanice: 720 m<sup>3</sup>/d = 200 l/s) (Jusić, 2011). Problemi, vezani za filtriranje na ovoj stanici, su nedostatak adekvatne kontrole filtriranja i s tim u vezi, nedovoljne količine vode za

povratno pranje filtera. Ovo je usmjerilo primjenu modela na analizu promjene operacionih parametara, vezano za pranje filtera i ciklus filtriranja, a s ciljem rješenja aktuelnog problema na ovoj FS.

Optimiziranje ciklusa filtriranja znači u stvari pronalženje optimalnog vremenskog perioda (filtriranja) između dva pranja ( $t_{opt}$ ) (Slika 1). Tako, da bi filter radio optimalno, važno je da pad pritiska ( $I_{max}$ ) bude postignut u vremenu  $t_2$ , koje je jednako ili nešto kraće od vremena  $t_1$  ( $t_1$  je vrijeme dostizanja maksimalno dozvoljene koncentracije (MDK) suspendovanih, odnosno koloidnih materija, to jest tzv. vrijeme dostizanja proboja filtrata). Ovaj uslov je zadovoljen pri primjeni modela na FS „Crkvice“. Također, poštovana su i druga ograničenja, na primjer, vezana za vrijeme simulacije modela ili ograničenja vezana za vrijednosti pojedinih kalibracionih parametara (Rietveld, 2005), i naravno ograničenja kontrolnih parametara. Tako je ograničenje MDK za koloidne materije 1,2 NTU (prema zakonskoj regulativi) i maksimalni pad pritiska ( $I_{max}=H_{max}$ ) na ovoj FS je 1,7 m. Ova ograničenja naznačena su isprekidanom (crvenom) linijom na Slici 4.

### 3.2. Definisanje parametra modeliranja FS "Crkvice"

Koje je podatke potrebno definisati u cilju efikasne primjene modela Stimela okruženja nevedeno je u zaglavlju Tabele 2 (parametri za različite blokove modela). Svi ovi podaci skupljeni su na licu mjesta, obilaskom na terenu, iz laboratorije (odgovarajuća raspoloživa mjerenja za jednu kalendarsku godinu), pregledom raspoložive projektne dokumentacije, a u nedostatku podataka primjenjene su i neke procjene (iskustvene ili/i iz odgovarajuće literature).

- *ulazni – parametri poremećaja (model blok: Water Quality)*

Proticaj:

max 709,2; prosjek 219,6; min 54 ( $m^3/h$ ),

Temperatura vode:

max 20; prosjek 11; min 1,8 ( $^{\circ}C$ ),

Suspendovane čestice:

max 350; prosjek 22; min 1 ( $mg/l$ ),

Mutnoća:

max 1270; prosjek 22,4; min 0,6 (NTU),

Boja:

max 1300; prosjek 58; min 0 ( $^{\circ}Co-Pt$  skale).

- *ulazni – projektni parametri (block: Filter)*

Površina filtera:

168 ( $m^2$ ),

Visina vode iznad ispune:

1,3 (m),

Visina filterske ispune (gornji sloj):

0,2 (m),

Visina filterske ispune (donji sloj):

0,5 (m),

Veličina zrna (gornji sloj):

0,6 (mm),

Veličina zrna (donji sloj):

0,7 (mm),

Porozitet filtera (gornji i donji sloj):

40 (%).

- *operacioni / manipulativni parametri (block: Backwash)*

Ciklus filtriranja:

24 (h),

Vrijeme povratnog pranja:

5 - 6 (min),

Vrijeme odvajanja prvog filtrata:

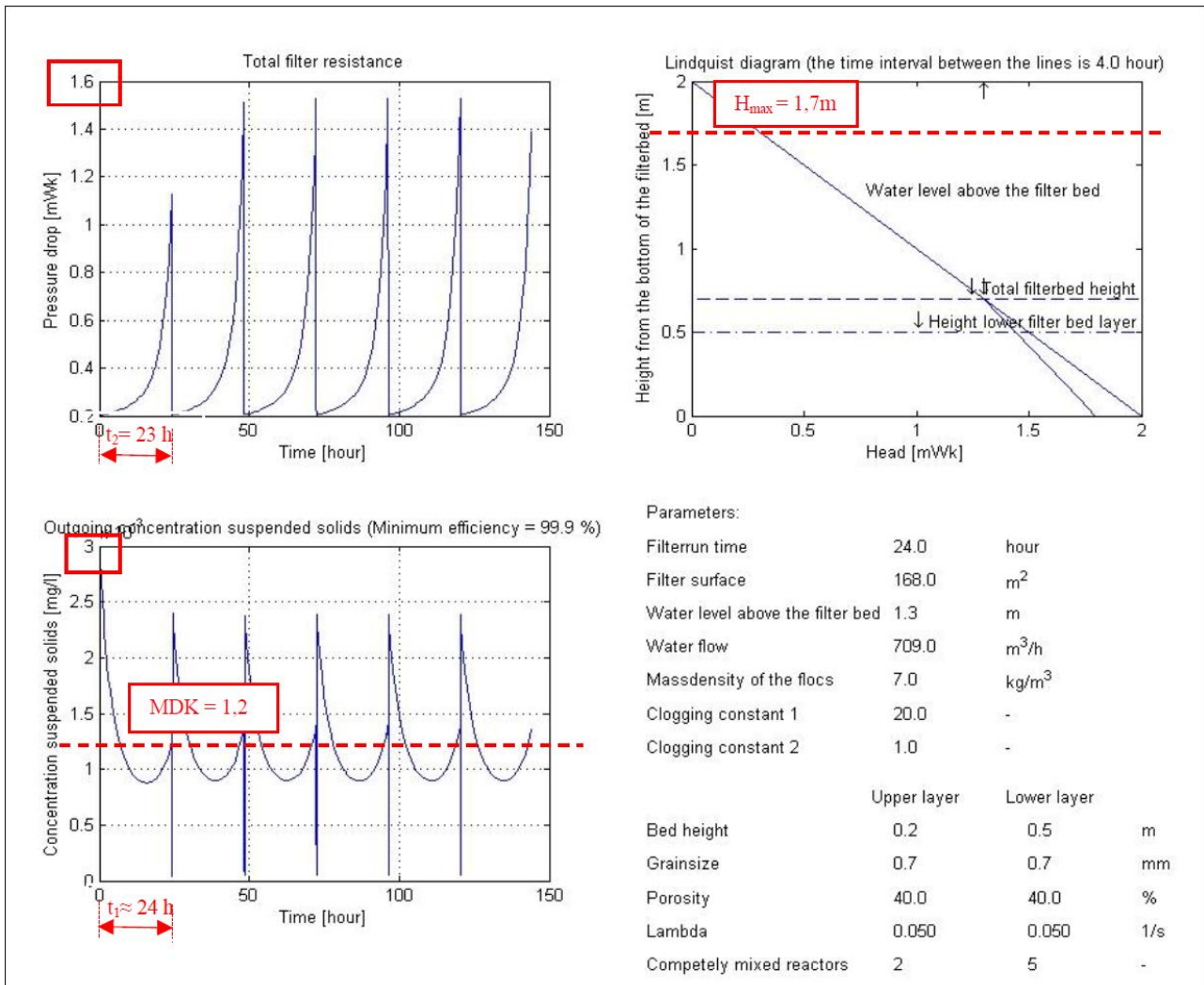
0,3 (h) (=20 min).

- *kalibracioni parametri (block: Filter) su definisani testiranjem modela (Poglavlje 3.3).*

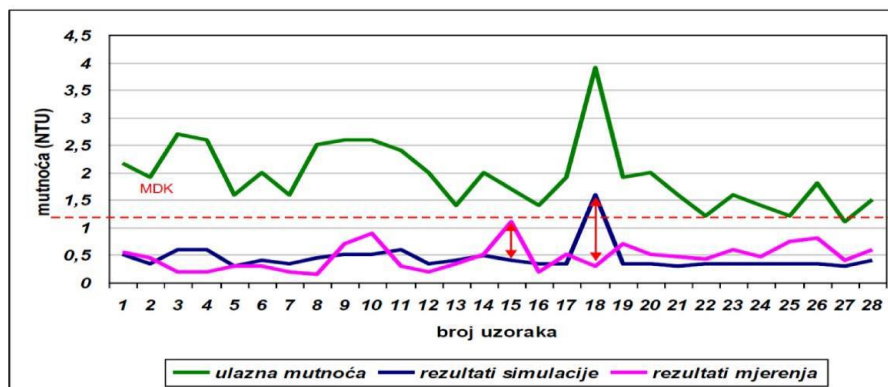
### 3.3. Testiranje modela

Koristeći prethodno definisanu bazu podataka, neke pretpostavke (u vezi nedostatka nekih podataka) i određene granične uslove (na primjer, u vezi kontrolnih parametara i uslova  $t_2 < t_1$ ) model je testiran. Provedeno je niz simulacija u cilju odabira adekvatnih vrijednosti kalibracionih parametara koji će dati prihvatljivu grešku, odnosno razliku između mjerenih i simuliranih vrijednosti koju daje model (slika 3). Slika 4 prikazuje grafički prikaz izlaznih (kontrolnih) parametara kalibriranog modela FS "Crkvice".

U svrhu dodatne provjere pouzdanosti kalibriranog modela, provedena je i njegova verifikacija. Korišteni su podaci mjerenja, uzeti pri različitim uslovima protoka, temperature i opterećenja filtra, a koji nisu bili korišteni pri kalibraciji. Slika 5 prikazuje promjene mutnoće tokom mjeseca januara. Analizom ovog dijagrama, može se uvidjeti da prethodno kalibriran model daje zadovoljavajuće rezultate i u promijenjenim uslovima filtriranja koji nisu korišteni pri kalibraciji (prihvatljiva greška - Slika 3).



Slika 4: Zadovoljavajuća procjena kalibracionih parametara – podešene granične vrijednosti (Jusić, 2011)



Slika 5: Validacija modela na podatke mutnoće (Jusić, 2011)



Tek nakon uspješno provedenog testiranja moguća je efikasna primjena modela. U slijedećem poglavlju prikazan je rezime rezultata efikasne primjene modela na FS „Crkvice“ u pravcu kontrole procesa kroz odabir optimalnog ciklusa filtriranja (*Filterrun time*), kao operacionog parametra modela.

### 3.4. Diskusija rezultata modeliranja u svrhu efikasne primjene modela

Kao što je prethodno već naglašeno cilj optimalnijeg filtriranja jeste, pored ostalog i produženje *Vremena ciklusa filtriranja*. Ova činjenica korištena je tokom primjene modela na FS »Crkvice«. U tom pravcu, istraživana je uticaj promjene manipulativnih parametara na izlazne kontrolne parametre. Tabela 1 daje rezimiran

prikaz ovog utjecaja, odnosno pregled uočenih zakonitosti ponašanja izlaznih parametara, pri promjenama manipulativnih parametara.

Generalno, može se konstatovati da produženje *Vremena ciklusa filtriranja* i smanjenje *Vremena povratnog pranja* znače značajno povećanje pada pritiska. Rezultati prikazani u Tabeli 1 daju doprinos modeliranja u pravcu boljeg razumijevanja zakonitosti uticaja i interakcija među različitim parametrima procesa. Promjenom operacionih parametara može biti predviđen/simuliran način promjene izlaznih parametara, to jest, omogućena pouzdanija kontrola procesa (pouzdanija u odnosu na ustaljenu praksu kontrole zasnovanu na iskustvu uposlenih).

Tabela 1: Uticaj izmjene operacionih parametara na izlazne parametre procesa filtriranja (*Jusic 2012*)

OPERACIONI PARAMETRI		IZLAZNI / KONTROLNI PARAMETRI		KOMENTAR:
		Pad pritiska	Koncentracija zagađenja	
Vrijeme ciklusa filtriranja (h)	↗	↗	↗	Značajno povećanje pritiska
	↘	↘	↘	-
Vrijeme povratnog pranja (min)	↗	↘	-	Bez promjene koncentracije
	↘	↗	↗	Značajno povećanje pritiska

U narednoj fazi primjene modela, a polazeći od prethodno uočenih zakonitosti interakcije manipulativnih i izlaznih parametara, optimizirano je *Vrijeme ciklusa filtriranja* za različite ulazne mutnoće (nefiltrirane vode), naravno uz zadovoljenje propisanih graničnih vrijednosti kontrolnih parametara i prethodno pomenutog uslova optimalnog rada filtera (da se pad pritiska  $H_{max}$  dostigne u vremenu  $t_2$  jednakom, odnosno nešto kraćem od vremena  $t_1$ , koji odgovara proboju filtrata).

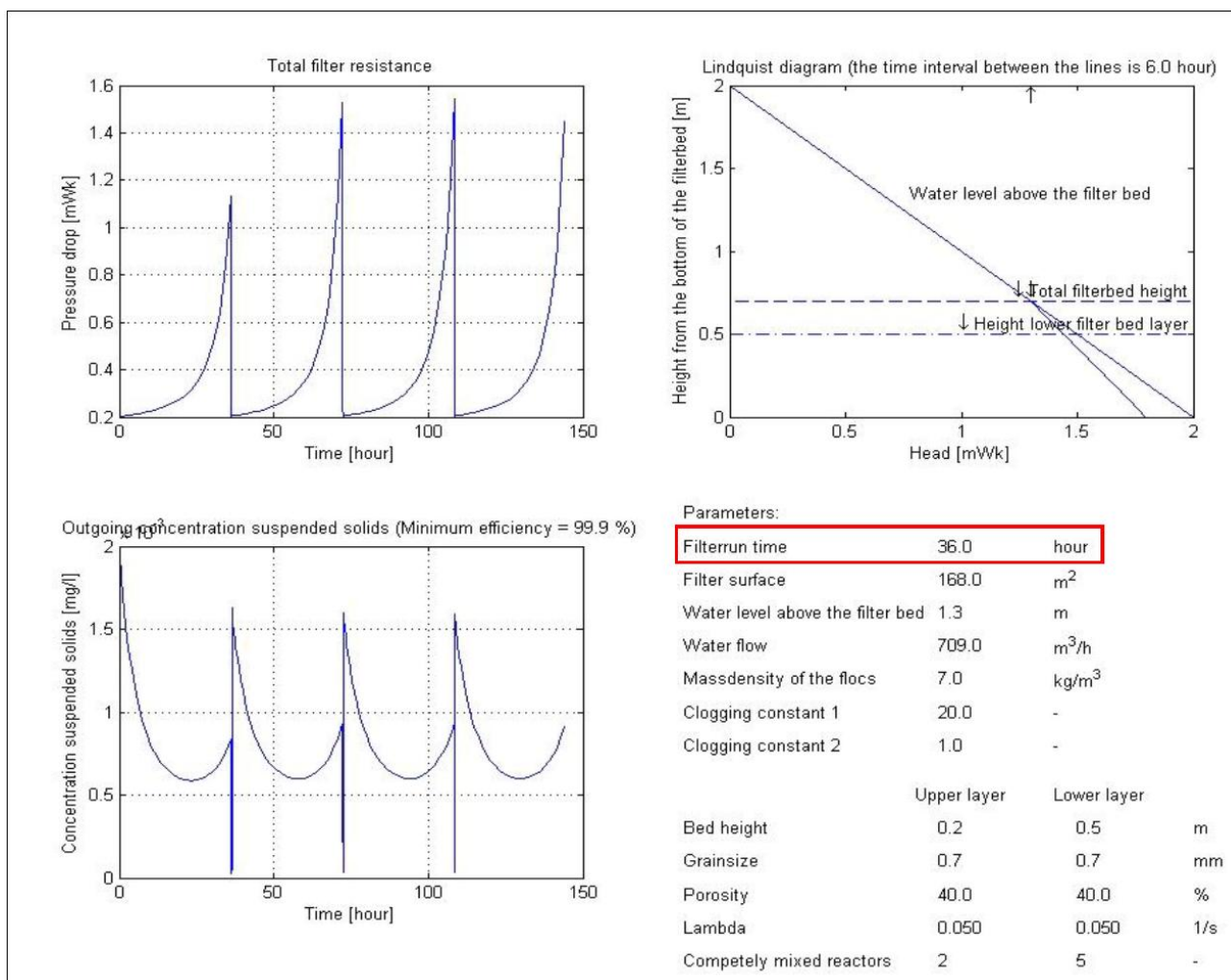
U skladu sa provedenim simulacijama efikasne primjene modela, Tabela 2, daje prikaz / pregled interesantnijih rezultata podešenih / optimalnih vrijednosti operacionih parametara. U zaglavlju ove tabele navedeni su svi parametri modela filtriranja (Stimela okruženja) razvrstani prema blokovima. Zadržano je postojeće *Vrijeme povratnog pranja* od 5 minuta za sve simulacije. Naime, promjena ovog operacionog parametra prema većim vrijednostima, podrazumijevala bi obezbjeđenje većih količina vode za pranje, veću potrošnju energije za prepumpavanje, te veće količine vode, i naravno izgradnju novog rezervoara za

skladištenje te dodatne količine. Osim toga, utvrđeno je prethodno (Tabela 1), da produženje *vremena pranja*, pri postojećim uslovima sistema, skoro da nema utjecaj na smanjenje izlazne mutnoće. Promjena ovog parametra značila bi također, promjenu postojećih uslova na FS, što povlači odstupanje između stvarnog sistema i već kalibriranog modela. Na ovaj način, prilikom primjene modeliranja korišteni su principi jednostavnosti, ekonomičnosti, to jest, korištenje raspoloživih kapaciteta.

Vezano za provedene simulacije i rezultate, konstatovano je, da za mutnoće veće od 3,0 NTU (što je mutnoća na koju je model kalibriran) dobiveno *vrijeme ciklusa filtriranja* dosta kraće, jer nije uzet u obzir efekat hemije (Tabela 2, 1.simulacija). Preporuka je da za ovu FS, za mutnoće veće od 3,0 NTU, treba zadržati postojeće operacione parametre, to jest postojeće *vrijeme ciklusa filtriranja* i koristiti propisanu količinu koagulantna, to jest koristiti efekte hemije, što je i trenutna praksa. Za mutnoće niže od 3,0 NTU, utvrđeno je da su mogući znatno duži *ciklusi filtriranja*, uz zadržavanje kontrolnih parametara u propisanim

granicama (Tabela 2). U ustaljenoj praksi *Vrijeme ciklusa filtriranja* na ovoj FS iznosi 24 h. Na primjer, za ulaznu mutnoću 2,5NTU produženi *ciklus filtriranja* iznosi 29h, za ulaznu mutnoću 2,0, produženi *ciklus filtriranja* je 36 h (Slika 6), a za ulaznu mutnoću 1,5 NTU *ciklus filtriranja* iznosio bi 40h. Također, ove niže mutnoće zahtijevaju minimalno korištenje hemikalija – koagulanta.

Osnovni problem, vezano za FS „Crkvice“, kao što je prethodno pomenuto jeste nedostatak adekvatne kontrole/regulisanja rada filtera i nedovoljna količina vode za pranje. Kontrolom baziranom na modeliranju, ovaj problem može biti riješen. Duži ciklus filtriranja, koji je moguć za niže mutnoće – dokazano primjenom modela, znači manju potrošnju vode za pranje.



Slika 6: Rezultati testiranog modela za ulaznu mutnoću 2,0 NTU – vrijeme ciklusa filtriranja 36h (Jusić, 2011)

Tabela 2: Pregled vrijednosti parametara modela za različite vrijednosti ulazne mutnoće FS "Crkvice"

BLOK	KVALITET VODE			FILTER									POVRAT. PRANJE			MJERENJA			
	Broj simulacije	Ulazni - poremećaja		Ulazni – projektni					Kalibracioni				Operacioni/ manipulativni			Izlazni / kontrolni			
		Proticaj (m <sup>3</sup> /h)	Temperatura (°C)	Mutnoća (NTU)	Površina filtera (m <sup>2</sup> )	Visina vode iznad ispušne (m)	Visina ispušne (gomjji+donji sloj) (m)	Veličina zrna (mm)	Porozitet ispušne (%)	Lambda (1/s)	Konstanta začepljenja 1 i 2 (-)	Gustoća flokula (kg/m <sup>3</sup> )	Broj kompletno izmješanih reaktora (gomj i idonji) (-)	Ciklus filtriranja (h)	Povratno pranje (min)	Odvajanje 1. filtrata (h)	Pad pritiska (m)	Mutnoća (NTU) ulaz-izlaz	Pad pritiska (m)
1.	709	14	<b>4.0</b>	168	1.3	0,2+ 0,5	0.7	40	0.05	22 i 1	7	2 - 5	<b>14</b>	5	0.3	0.5	4.0 - 1.2	1.7	1.2
2.	709	14	<b>3.0</b>	168	1.3	0,2+ 0,5	0.7	40	0.05	20 i 1	7	2 - 5	<b>24</b>	5	0.3	1.6	3.0 - 1.2	1.7	1.2
3.	709	14	<b>2.5</b>	168	1.3	0,2+ 0,5	0.7	40	0.05	16 i 1	7	2 - 5	<b>29</b>	5	0.3	1.6	2.5 - 1.0	1.7	1.2
4.	709	14	<b>2.0</b>	168	1.3	0,2+ 0,5	0.7	40	0.05	10 i 1	7	2 - 5	<b>36</b>	5	0.3	1,5	2.0 - 0.9	1.7	1.2
5.	709	14	<b>1.8</b>	168	1.3	0,2+ 0,5	0.7	40	0.05	16 i 1	7	2 - 5	<b>40</b>	5	0.3	1.5	2.5 - 0.8	1.7	1.2
6.	709	14	<b>1.5</b>	168	1.3	0,2 +0,5	0.7	40	0.05	16 i 1	7	2 - 5	<b>48</b>	5	0.3	1.5	2.5 - 0.7	1.7	1.2

#### 4. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Rezultati primjene modela do kojih se došlo primjenom prethodno testiranog modela (rezultati rezimirani u Tabelama 1 i 2) potvrdili su moguć doprinos uvođenja modeliranja na način boljeg razumjevanja i pouzdanije i efikasnije kontrole procesa. Prema tome, jedan od rezultata primjene modela je i edukacioni doprinos. Uvidom u međusobni utjecaj različitih parametara

omogućeno je bolje razumjevanje samog procesa i time odabir optimalnih vrijednosti pojedinih parametara. Naime, primjenom prethodno testiranog modela moguće je provesti niz simulacija (brzo i jeftino) i uočiti zakonitosti uticaja raznih parametara međusobno i konačno predvidjeti njihov uticaj na izlaz. Pored ostalog, rezultati koji se mjere na stanici, primjenom modeliranja, mogu se efikasnije koristiti u pravcu razumjevanja i povećanja efekata procesa.

Dalje, adekvatnom izmjenom operacionih parametara, koju omogućava efikasna primjena modela dokazana je mogućnost produženja *Vremena ciklusa filtriranja*, što znači efikasnije filtriranje, to jest, manju potrošnju vode za pranje, manju potrošnju električne energije, manju produkciju otpadne vode/vode od pranja. Modeliranje, odnosno simuliranje uticaja izmjene na primjer, operacionih parametara na izlazne parametre procesa prerade vode, može podržati operatera u donošenju odluka pri upravljanju, odnosno kontroli rada FS, i time izbjeći veliko oslanjanje na ustaljenu praksu.

#### LITERATURA

- [1] Busuladžić, H. (2009): Konvencionalne metode prečišćavanja voda za piće, *Vodoprivreda*, N0 237-239, s.61-67
- [2] DHV Water BV (2016): Stimela Online Dynamic – Stimela. Web stranica za modeliranje procesa pripreme vode za piće (<http://www.stimela.com>).
- [3] Đorđević, D., Stojanić, F. i Muhić, F. (2015): Prikaz modela linijskog tečenja u koritu za veliku vodu zasnovanog na razmeni količine kretanja između glavnog korita i plavnih površina, *Vodoprivreda* N0 273-275, str.79-91
- [4] Jusić, S. (2011): Modeliranje konvencionalnog brzog filtriranja. Doktorski rad (mentor: H.Bajraktarević Dobran), Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, 149.
- [5] Jusić, S. (2012): "Improving the Management of Rapid Sand Filtration Process through Modeling". Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of Structural Economics and Management, Institute of Water Structures. International Scientific Conference: PEOPLE, BUILDINGS AND ENVIRONMENT 2012, Lednice, November 7-9(2012). Check Republic, Conference web page: [www.fce.vutbr.cz/ekr/pbe](http://www.fce.vutbr.cz/ekr/pbe) pp 558-566.
- [6] Jusić, S. (2016): Osnove modeliranja pripreme vode za piće - konvencionalno brzo filtriranje, Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, str.158.
- [7] Kaluderović, D. (2012): Prilog kalibraciji i i oceni parametara matematičkih modela podzemnih voda, *Vodoprivreda*, 258-260, s.233-240
- [8] Ljubisavljević D. i Jonović M. (2013): Matematičko modeliranje brzih pješčanih filtera, *Vodoprivreda*, N0 264-266 s.231-256
- [9] Milašinović, Z. (2004): Upojni bunari u vodosnabdijevanju. Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, 150.
- [10] Milišić, H., Kalajdžisalihović, H. I Jaćimović, N. (2012): Numeričko modeliranje i simulacija transporta zagađenja Neretvom, *Vodoprivreda*, 258-260, s. 199-206.
- [11] Rietveld, L. i Dudley, J. (2006): Models for Drinking Water Treatment: Review State-of-the-Art, TECHNEAU Integrated Project Funded by the European Commission, s. 19.
- [12] Rietveld, L.C. (2005): Improving Operation of Drinking Water Treatment through Modelling, PhD Thesis (doktorski rad), Faculty of Civil Engineering and Geosciences, University of Technology, Delft, 141.
- [13] Ulinici, S.C., Vlad, G., Vâju, D., Balint, I., Băisan, G., Mihaela Hetvary, M. (2014): Numerical modeling of processes in water treatment plants as a basis for an optimal design. *ECOTERRA - Journal of Environmental Research and Protection*, Vol. 11, No.3, 41-57.
- [14] van Schagen, K.M. (2009): Model-Based Control of Drinking-Water Treatment Plants. PhD Thesis (doktorski rad), Faculty of Civil Engineering and Geosciences, University of Technology, Delft, 169.
- [15] Worm, G.I.M. (2012): Integration of drinking water treatment plant process models and emulated process automation software. PhD Thesis (doktorski rad), Tehnički univerzitet u Delftu TU Delft, 128.

## CONTROL OF FILTER RUN TIME THROUGH MODELING

by

Suvada JUSIĆ i Zoran MILAŠINOVIĆ

Faculty of Civil Engineering University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

### Summary

In this article it has researched control of filter run time through modeling in order to be informed about the state of the art in the modeling of water treatment and the possibility of the positive effect of model application in water supply systems. Model was applicated at the filter station "Crkvice" in Zenica (Bosnia and Herzegovina), where it is used conventional rapid sand filters. It is used Stimela modeling environment, developed at the Technical University in Delft, Netherlands. By application of the model (before tested)

it is determined optimum filter run time for a different input turbidity of raw water. By model based control of filter run time it is proved possibility of reduction the consumption of water for backwashing, the reduction of energy for that water pumping and also reduction of coagulant consumption.

Key words: drinking water treatment, filter run time, Stimela environment modeling, filter control

Redigovano 14.10.2017.