

UDK: 628.17; 532.11  
Оригинални научни рад

## ПРОЦЕНА УКУПНИХ ПОТРЕБА ЗА ВОДОМ ПРИ СМАЊЕЊУ ПРИТИСКА

Бранислав БАБИЋ, Душан ПРОДАНОВИЋ, Милош СТАНИЋ  
Универзитет у Београду - Грађевински факултет, e-mail: [babic@grf.bg.ac.rs](mailto:babic@grf.bg.ac.rs)

### РЕЗИМЕ

Многа водоводна предузећа и даље неефикасно управљају водоводним дистрибутивним системима (ВДС) са значајним губицима воде и прихода. Овај рад приказује једну од методологија за прорачун ефеката имплементације управљања притиском у зонама ВДС (ОЗБ), на примеру Пожаревца. Акцент је на процени уштеда у потребама за водом услед смањења притиска. Резултати показују да примена методе, која претпоставља да су и губици воде и потрошња воде зависни од притиска, даје боља предвиђања укупних уштеда услед смањења притиска.

**Кључне речи:** водоснабдевање, губици воде, притисак, потрошња, уштеда воде

### 1. УВОД

Заоштравање проблема у снабдевању водом насеља, интензивира истраживања којима се траже ефикаснији начини експлоатације водоводних система. Један правац истраживања је усмерен ка повећању капацитета и заштити расположивих изворишта (*Хаџић, 2013, Полочкић и др., 2013*) као и ефикаснијим поступцима пречишћавања воде у ППВ (*Љубисављевић и др., 2012, 2013, Јовановић и др., 2011*). Други правац истраживања је усмерен ка бољој контроли и рационализацији употребе преузетих количина воде од стране потрошача (*Ховањ, 2012, 2013*) и оптималном коришћењу мрежа под притиском (*Иветић и др., 2013*). У овој групи су и напори да се смање велики губици воде, који су резултат многобројних: старење инфраструктуре, висок радни притисак и велике осцилације, неадекватна заштита цевовода, преливање резервоара, неадекватно извођење радова и уградња цеви лошег квалитета, грешке на

водомерима, илегални прикључци, лоше управљање и одржавање ВДС, итд.

Радна група међународне асоцијације за воду (*International Water Association – IWA*) је развила методологију за одређивање водног биланса (*BB*) и његових компоненти (*Alegre и др., 2006*). Према тој методологији, губици воде се састоје од стварних и привидних. Стварни, или физички, губици воде обухватају запремину воде која је истекла из транспортних и дистрибутивних цевовода, цурења и преливања воде из резервоара и запремину воде која је истекла из пукотина и оштећења на цевима кућних прикључака, од места прикључења на дистрибутивну цев до водомера. Привидни губици воде обухватају нелегалну потрошњу воде, све врсте грешака мерења потрошње потрошача (грешке водомера), грешке у обради и руковању подацима о количини унете воде у систем и потрошње воде.

Према *Savic и Walters, (1995)*, управљање притиском је најефикаснији проактивни метод којим се могу смањити стварни губици воде (*Ulanicki и др., 2000*). Међутим, смањењем притиска утиче се и на смањење легалне и нелегалне потрошње воде, па се самим тиме смањују и привидни губици. У литератури је ова веза мање истражена па постоји потреба за развојем одговарајућих метода. Овај рад приказује LCP (*Leakage-Consumption-Pressure*) методу за процену стварних уштеда у потрошњи воде услед смањења, односно, управљања притисцима у водоводним системима (*Бабић, 2014a*). LCP метода се заснива на методи минималне ноћне потрошње. Метода обезбеђује добру процену укупног смањења потреба за водом ВДС, што је од посебног значаја у ВДС-има са недовољном количином воде на извориштима и где постоји вишак притиска и нерационална потрошња воде. У другом делу рада се даје пример употребе LCP методе у граду Пожаревац.

## 2. МЕТОД LCP – ПОТРОШЊА И ГУБИЦИ ВОДЕ ЗАВИСНИ ОД ПРИТИСКА

Основна претпоставка у LCP (Leakage-Consumption-Pressure) методи је да је укупан измерени доток у ВДС или у одређену зону билансирања (ОЗБ – Основна Зона Билансирања) зависан од притиска, односно да нису само стварни губици воде зависни од притиска већ и потрошња воде. Ова претпоставка важи само у случају да се мери тренутни доток воде у ВДС или ОЗБ (што је најчешће случај), а не запремина дотекле воде у неком временском интервалу. На дневном нивоу постоји одређена запремина коришћене воде, која је независна од притиска (водокотлићи у тоалету, машина за веш, машина за судове итд.). Међутим, уколико се на доводној цеви у ОЗБ мери тренутни доток воде, онда је у том тренутку и пуњење водокотлића и машина за прање веша и суђа зависно од притиска.

У наставку се прво даје укратко преглед стандардне методе за процену укупних губитака воде преко минималне ноћне потрошње воде, као и утицај управљања притиском на губитке. Након тога се даје приказ LCP методе.

### 2.1 Метода минималне ноћне потрошње воде

Метода минималне ноћне потрошње воде (*Minimum Night Flow - MNF*) је широм света прихваћена као најтачнија за процену стварних губитака воде у некој мањој ОЗБ. Током ноћи, најчешће између 2 и 4 часа ујутро, потрошња воде је најмања и радни притисак је највећи, па је вероватно да су губици воде највећи део *MNF*. Ноћна потрошња воде зависи од дана у недељи, доба године, навике потрошача итд. Сprovedена истраживања у свету показала су да је око 6% становништва активно у време *MNF* и да њихова потрошња износи у просеку 1,7 L/domaćinstvu.čas, односно 0,6 L/stanovniku.čas (*WSA/WCA, 1994, McKenzie, 2001*). Наравно, ова вредност варира у различитим регионима и потребно је спровести мониторинг потрошње воде репрезентативног узорка потрошача. За категорију великих потрошача (индустрија и др.), потрошача мале привреде и установа, пожељно је извршити, такође на основу пилот мерења, статистичку анализу ноћне потрошње воде.

Процес мерења треба организовати у периоду када нема потребе за изузетном потрошњом воде (не треба да се спроводи у летњем периоду, најбоље је касна јесен или рано пролеће у нашим климатским

условима), како би регистровани ноћни протоци садржали највећим делом губитке воде (у табели 1. приказане су компоненте минималног ноћног дотока воде у ОЗБ).

На основу резултата мерења, статистичком анализом одређује се ноћна потрошња воде свих категорија потрошача (становништво у индивидуалним кућама и стамбеним зградама, велики потрошачи, установе и мала привреда). Вредност стварних ноћних губитака воде  $WL_{night}$  ( $m^3/h$ ) износи:

$$WL_{night} = MNF - \text{ноћна потрошња воде свих категорија потрошача} \quad (1)$$

где је  $MNF$  ( $m^3/h$ ) - минимални ноћни доток воде у ОЗБ.

### 2.2 Управљање притиском за контролу губитака воде

Управљање притиском, односно, редукацију притиска могуће је спровести на два начина (*WSA/WCA, 1994*): фиксним излазним притиском који се остварује редуцирања притиска или прекидним коморама, или, регулисањем притиска по протоку контролним вентилима или контролом броја обраћаја пумпи у пумпној станици, што даје ефикаснију контролу.

Управљање притиском у ВДС је кључна основа за ефикасну контролу стварних губитака воде (*Thornton и др., 2008*). Веза између притиска и стварних губитака воде се најчешће моделира према FAVAD (Fixed and Variable Area Discharge) принципима (*May, 1994, Lambert и Fantozzi, 2010*) где се однос стварних губитака воде, при иницијалном и редукованом притиску, мења пропорционално односу притисака на степен  $N1$  (*McKenzie, 2001, Lambert, 2002*):

$$\frac{L_1}{L_o} = \left( \frac{p_1}{p_o} \right)^{N1} \quad (2)$$

где је  $L_o$  ( $m^3/h$ ) је иницијални губитак воде при иницијалном притиску  $p_o$  (m),  $L_1$  ( $m^3/h$ ) нови губици воде при новом притиску  $p_1$  (m) и  $N1$  експонент притиска. Вредност  $N1$  може износити од 0,5 (процуривања кроз оштећења која су настала услед корозије), преко 1-1,5 (процуривања се дешавају на спојевима цеви) па чак до 2,5 (услед уздужног оштећења пластичне цеви па се отвор повећава и по ширини и по дужини).

Поуздана вредност експонента губитака воде може се добити само "степ тест" мерењима (редуковањем притиска) током минималне ноћне потрошње воде. Вредност  $N1$  израчунава се на основу промене вредности ноћних губитака воде у ОЗБ и вредности притиска у тачки која репрезентује просечан притисак у ОЗБ, коришћењем следеће једначине:

$$N1 = \frac{\log\left(\frac{WL_{night}^{ini}}{WL_{night}^{red}}\right)}{\log\left(\frac{AZNP^{ini}}{AZNP^{red}}\right)} \quad (3)$$

где су  $WL_{night}^{ini}$  и  $WL_{night}^{red}$  ноћни стварни губици воде при просечним притисцима  $AZNP^{ini}$  (просечан притисак у ОЗБ за време минималне ноћне

потрошње при иницијалном притиску) и  $AZNP^{red}$  (просечан притисак у ОЗБ за време минималне ноћне потрошње при редукованом притиску).

### 2.3 Основе LCP методе

Укупан доток воде може се поделити на стварне губитке и на потрошњу воде, у складу са табелом 1. Веза између просечног притиска у ВДС или ОЗБ и губитака/потрошње воде описана је једначином (2). У LCP методи се усваја да експонент притиска има различите вредности за стварне губитке воде у дистрибутивној водоводној мрежи узводно од водомера ( $N1$ ), потрошњу воде (иза водомера,  $N2$ ) и цурења иза водомера ( $N3$ ). У табели 1. приказан је концепт процене експонената притиска, за различите компоненте ноћне потрошње воде.

Табела 1. Концепт одређивања експонента притиска

Мерени минимални ноћни доток воде у ОЗБ за време <b>MNF</b>	Потрошња воде (после водомера)	Коришћење воде за време MNF	Становништво - количина воде која је коришћена за стварне потребе	$N2 = 0$
			Процењена ноћна потрошња воде - велики потрошачи	$N2 = 0,5$
Стварни губици воде на главним цевима и прикључцима (до водомера)	Цурење воде код корисника - ноћу	Унутар објекта	$N3$	
		Ван објекта		
	Прслине	Нерегистроване	$N1$	
		Регистроване, али још нису поправљене		
Базна (позадинска) цурења	На главним цевима			
	На прикључцима			

У овој методи, укупна просечна дневна потрошња воде у ВДС или ОЗБ ( $q_{tot}$ ) дели се на потрошњу воде коју су потрошачи стварно користили за своје потребе ( $q_{wc}$ ) и цурења воде иза водомера ( $q_{lib}$ ) која се јављају због лошег одржавања инсталација, што је приказано једначином (4):

$$q_{tot} = q_{wc} + q_{lib} \quad (4)$$

где се  $q_{tot}$  добија из података којим располажу водоводна предузећа.

Усвојено је да стварна ноћна потрошња воде становништва у време  $MNF$  ( $q_{wc, res}^{night}$ ) износи 0,6 L/stan.h, или 1,7 L/domać.h и усвојено је да је ова потрошња независна од притиска (McKenzie, 2001) и она се може израчунати коришћењем једначине (5):

$$q_{wc, res}^{night} = N_{pop}^{rb} \cdot 0,6 \frac{L}{st. \cdot h} + N_{conn}^h \cdot 1,7 \frac{L}{domać \cdot h} \quad (5)$$

где је  $N_{pop}^{rb}$  - укупан број становника у стамбеним зградама,  $N_{conn}^h$  - укупан број прикључака индивидуалних кућа (односи се на ОЗБ или ВДС).

Уколико се не располаже податком о броју становника у стамбеним зградама, већ само бројем станова, онда се користи једначина (6) (коригована једначина (5)):

$$q_{wc, res}^{night} = (N_{prop}^{rb} + N_{conn}^h) \cdot 1,7 \frac{L}{domać \cdot h} \quad (6)$$

где је  $N_{prop}^{rb}$  - укупан број станова у стамбеним зградама.

У методи LCP усваја се да категорије корисника за које се не очекује да ноћу користе воду за своје потребе (мала привреда, установе, комерцијала итд.) немају потрошњу воде независну од притиска у време  $MNF$ , већ да је сва процењена ноћна потрошња воде зависна од притиска и износи  $Q_{sc, night}$  (придружује се  $q_{lib}$ ).

Ноћна потрошња воде, у време  $MNF$ , корисника који ноћу користе воду за своје потребе (индустрија, болнице итд.) одређује се на основу мерења њихове потрошње воде.

Укупна ноћна потрошња воде у некој ОЗБ или ВДС ( $Q_{inc,night}$ ), у време  $MNF$ , рачуна се коришћењем једначине (7):

$$Q_{inc,night} = q_{wc,res}^{night} + q_{lib} + Q_{sc,night} + Q_{lc,night} \quad (7)$$

где је  $Q_{lc,night}$  - ноћна потрошња воде великих потрошача воде који ноћу користе воду за своје потребе и код којих се мери потрошња воде (индустрија, болнице итд.).

За прорачуне су потребни и подаци о укупном броју прикључака по категоријама потрошача, броју становника ( $N_{pop}$ ) или домаћинства ( $N_{prop}$ ), подаци мерења протока и притиска на доводу у ОЗБ при нерегулисаном притиску и по могућству мерењима при редукованом улазном притиску.

Непознати параметри у LCP методи су:  $q_{wc}$ ,  $q_{lib}$ ,  $N1$ ,  $N2$  и  $N3$ . Прва три параметра ( $q_{wc}$ ,  $q_{lib}$  и  $N1$ ) рачунају се на основу резултата мерења или прорачуна, док преостала два параметра ( $N2$  и  $N3$ ) треба усвојити тако да се добије најбоље слагање са укупним потребама за водом при иницијалном притиску, односно резултатима мерења у постојећем режиму притисака.

Овај метод захтева одређивање вредности  $q_{lib}$ , односно колико је процентуално учешће проциривања од  $q_{tot}$ . Начин одређивања иницијалних вредности  $q_{lib}$  зависи од расположивих података и могућа су два различита случаја:

1. нису извршена мерења ноћне потрошње воде различитих категорија потрошача па се до стварне ноћне потрошње воде мора доћи прорачунима, итеративним поступком.
2. извршена су мерења ноћне потрошње воде становништва, установа и привреде на репрезентативном статистичком узорку и на основу тога је одређена меродавна вредност ноћне потрошње воде.

У наредном тексту биће приказана LCP метода за 2. случај када постоје мерења ноћне потрошње воде.

У другом случају извршена су мерења ноћне потрошње воде становништва, установа и привреде на репрезентативном статистичком узорку и на основу тога је одређена меродавна вредност ноћне потрошње воде. За категорију потрошача, становништво, стварна ноћна потрошња воде становништва у време  $MNF$  ( $q_{wc,res}^{night}$ ) рачуна се

применом једначина (5) или (6). Уколико је мерењима добијена већа вредност ноћне потрошње воде ( $q_{res,mer}^{night}$ ), вишак се придружује цурењима иза водомера -  $q_{lib}^{res}$  (зависни од притиска, експонент притиска  $N3$ ), односно:

$$q_{lib}^{res} = q_{res,mer}^{night} - q_{wc,res}^{night} \quad (8)$$

Ноћна потрошња воде, за време  $MNF$ , категорија корисника за које се не очекује да ноћу користе воду за своје потребе (мала привреда, установе итд.) придружује се проциривању воде иза водомера.

На основу усвојених претпоставки укупна проциривања воде иза водомера у ОЗБ или ВДС, за време  $MNF$  ( $Q_{waste,night}^{ini}$ ) могу се израчунати коришћењем једначине (9):

$$Q_{waste,night}^{ini} = q_{lib}^{res} + Q_{sc,night}^{ini} \quad (9)$$

Укупна ноћна потрошња воде за време  $MNF$  ( $Q_{inc,night}^{ini}$ ) рачуна се, применом једначине (10), тако што се на већ израчунате вредности додаје и ноћна потрошња воде корисника који ноћу користе потребе за своје потребе (индустрија, болнице итд.).

$$Q_{inc,night}^{ini} = q_{wc,res}^{night} + Q_{waste,night}^{ini} + Q_{lc,night}^{ini} \quad (10)$$

Процењени укупни стварни ноћни губици воде  $WL_{night}^{ini}$  добијају се тако што се од измереног дотока воде у ОЗБ или ВДС, за време  $MNF$  ( $MNF^{ini}$ ), одузме укупна ноћна потрошња воде, односно применом једначине (11).

$$WL_{night}^{ini} = MNF^{ini} - Q_{inc,night}^{ini} \quad (11)$$

Просечна дневна цурења иза водомера при нерегулисаном притиску ( $Q_{waste,day}^{ini}$ ), рачунају се применом једначине (12):

$$Q_{waste,day}^{ini} = Q_{waste,night}^{ini} \cdot \left( \frac{AZP_{day}}{AZNP^{ini}} \right)^{N3} \quad (12)$$

### 2.3.1 Услови при иницијалном (нерегулисаном) притиску

За сваки интервал током посматраног дана, просечан часовни доток воде у ОЗБ одређен је из резултата мерења, а просечан часовни притисак у ОЗБ из резултата калибрисаног и верификованог математичког модела (или из резултата мерења).

Стварни часовни губици воде,  $WL_h^{ini}$ , рачунају се применом једначине (13):

$$WL_h^{ini} = WL_{night}^{ini} \cdot \left( \frac{AZP_h^{ini}}{AZNP^{ini}} \right)^{N1} \quad (13)$$

где су  $WL_h^{ini}$  (L/h) - часовни стварни губици воде,  $WL_{night}^{ini}$  - стварни губици воде за време MNF,  $AZP_h^{ini}$  - часовни просечни притисак у ОЗБ,  $AZNP^{ini}$  - просечан ноћни притисак у ОЗБ (све вредности су при нерегулисаном притиску).

Укупна часовна потрошња воде ( $Q_{tot,h}^{ini}$ ) рачуна се одузимањем стварних губитака воде од измереног дотока воде у ОЗБ, једначином (14):

$$Q_{tot,h}^{ini} = Q_{inflow,h}^{ini} - WL_h^{ini} \quad (14)$$

где је  $Q_{inflow,h}^{ini}$  (L/h) - регистровани просечни часовни доток воде у ОЗБ или ВДС.

Затим се укупна запремина воде која је испоручена потрошачима (низводно од водомера) дели на стварну потрошњу воде и проциуривања иза водомера. Укупна проциуривања воде иза водомера, на часовној бази -  $Q_{waste,h}^{ini}$ , рачунају се коришћењем једначине (15):

$$Q_{waste,h}^{ini} = Q_{waste,day}^{ini} \times \left( \frac{AZP_h^{ini}}{AZP_{day}^{ini}} \right)^{N3} \quad (15)$$

Укупна стварна часовна потрошња воде,  $Q_{realcons,h}^{ini}$ , рачуна се коришћењем једначине (16):

$$Q_{realcons,h}^{ini} = Q_{tot,h}^{ini} - Q_{waste,h}^{ini} \quad (16)$$

### 2.3.2 Услови при регулисаном притиску (фиксни излазни притисак)

Прорачун укупних потреба за водом у ОЗБ при редукованом притиску ( $Q_{inflow,h}^{red}$ ) ради се итеративним поступком. За прорачун укупних хидрауличких губитака воде на трење између "улазног" чвора у ОЗБ и чворова у ОЗБ који репрезентују просечан притисак ( $AZP$ ) и "критичан" притисак могуће је користити два приступа. У првом користи се калибрисани математички модел,

а у другом приступу може да се користи следећа једначина (17) (McKenzie, 2001):

$$\Delta h = K \cdot Q^2 \quad (17)$$

где је  $Q$  (m<sup>3</sup>/h) просечан часовни доток у ОЗБ, а  $K$  (m<sup>-5</sup>h<sup>2</sup>) коефицијент хидрауличких губитака воде на трење. Часовни коефицијент  $K_h$  представља хидрауличке губитке на трење у ОЗБ за одређени сат посматраног дана. За анализу се користе два сета коефицијента  $K$ , један који представља хидрауличке губитке на трење од "улазног" чвора у ОЗБ до чвора који репрезентује  $AZP$ , и други који представља хидрауличке губитке на трење од "улазног" чвора у ОЗБ до "критичног" чвора. У овом поступку претпоставља се да коефицијент  $K$  варира током дана, али да има исту вредност у посматраном сату током сваког дана. Ова претпоставка нема значајан утицај на поузданост добијених резултата.

Два сета коефицијента  $K$  могу се израчунати за сваки сат коришћењем једначине (17), где је  $\Delta h$  разлика притисака између "улазне" тачке у ОЗБ и  $AZP$ , односно "улазне" тачке у ОЗБ и "критичне" тачке.

Обзиром да је укупан доток воде у ОЗБ подељен на различите компоненте потрошње и губитака воде (различити експоненти притиска  $N$ ), након одређивања коефицијента  $K$  за сваки сат посматраног дана, могуће је извршити тестирање утицаја управљања притиском на укупне потребе за водом. Разматрана је само опција управљања притиском са фиксним излазним притиском ( $PRV$ ), али се методологија на сличан начин може користити и за друге опције.

Инсталација  $PRV$  на "улазној" тачки треба да смањи притисак у ОЗБ, али тако да у "критичној" тачки буде задовољен минимални ниво услуге.

Прорачун смањења укупних потреба за водом при редукованом притиску ( $Q_{inflow,h}^{red}$ ) појединачних ОЗБ ради се итеративним поступком. На основу анализе рада постојећег ВДС, односно просечног и критичног притиска у ОЗБ, за сваку ОЗБ иницијално се одређује могуће смањење притиска ( $\Delta P_{tot}^0$ ) као разлика између постојећег и минимално прихватљивог притиска у "критичној" тачки. Ово иницијално могуће смањење притиска ( $\Delta P_{tot}^0$ ) затим се одузима од постојећег притиска на "улазној" тачки у ОЗБ током часа са максималним дотоком

воде. Међутим, у једначини (17) имамо две непознате величине  $\Delta h$  и  $Q_{inflow,h}^{red}$ , за стање при регулисаном притиску. Из наведеног разлога у првој итерацији усваја се да је  $\Delta h$  између "улазне" и "критичне" тачке исто као и при нерегулисаном притиску. На основу тако израчунаог притиска у "критичној" тачки могуће је израчунати стварне часовне губитке воде  $WL_h^{red}$ :

$$WL_h^{red} = WL_{night}^{ini} \cdot \left( \frac{AZP_h^{red}}{AZNP^{ini}} \right)^{N1} \quad (18)$$

где су  $WL_h^{red}$  (L/h) - стварни часовни губици воде, и  $AZP_h^{red}$  - часовни просечни притисци у ОЗБ или ВДС, при редукованом притиску.

Просечна часовна процуривања воде иза водомера при редукованом притиску  $Q_{waste,h}^{red}$  износе:

$$Q_{waste,h}^{red} = Q_{waste,h}^{ini} \times \left( \frac{AZP_h^{red}}{AZP_{day}^{ini}} \right)^{N3} \quad (19)$$

Стварна часовна потрошња воде при редукованом притиску ( $Q_{realcons,h}^{red}$ ) износи:

$$Q_{realcons,h}^{red} = Q_{realcons,h}^{ini} \times \left( \frac{AZP_h^{red}}{AZNP^{ini}} \right)^{N2} \quad (20)$$

а укупан доток воде ( $Q_{inflow,h}^{red}$ ) у ОЗБ:

$$Q_{inflow,h}^{red} = WL_h^{red} + Q_{waste,h}^{red} + Q_{realcons,h}^{red} \quad (21)$$

На основу израчунате вредности  $Q_{inflow,h}^{red}$  израчуна се нова вредност  $\Delta h$  између "улазне" и "критичне" тачке. Уколико постоји разлика прорачун се понавља у следећој итерацији са предходно срачунатим вредностима  $\Delta h$ . Прорачун се понавља све док се не добије разлика  $\Delta h^{iter} - \Delta h^{iter-1} < 0,1$  m. Прорачун брзо конвергира, најчешће су потребне 3-4 итерације. Након добијених резултата проверава се да ли постоји могућност за додатно повећање  $\Delta P_{tot}^0$ , односно смањење притиска на доводу у ОЗБ. Уколико постоји могућност, прорачун се понавља са новом вредношћу фиксног излазног притиска на доводу све док вредност притиска у "критичној" тачки не задовољи минимални ниво услуге.

Израчунати нови излазни притисак примењује на све сате током дана. Обзиром на нову, константну вредност излазног притиска током дана неопходно

је израчунати нови  $AZP$  (на основу меродавног протока који се услед редукације притиска смањује у односу на иницијални).

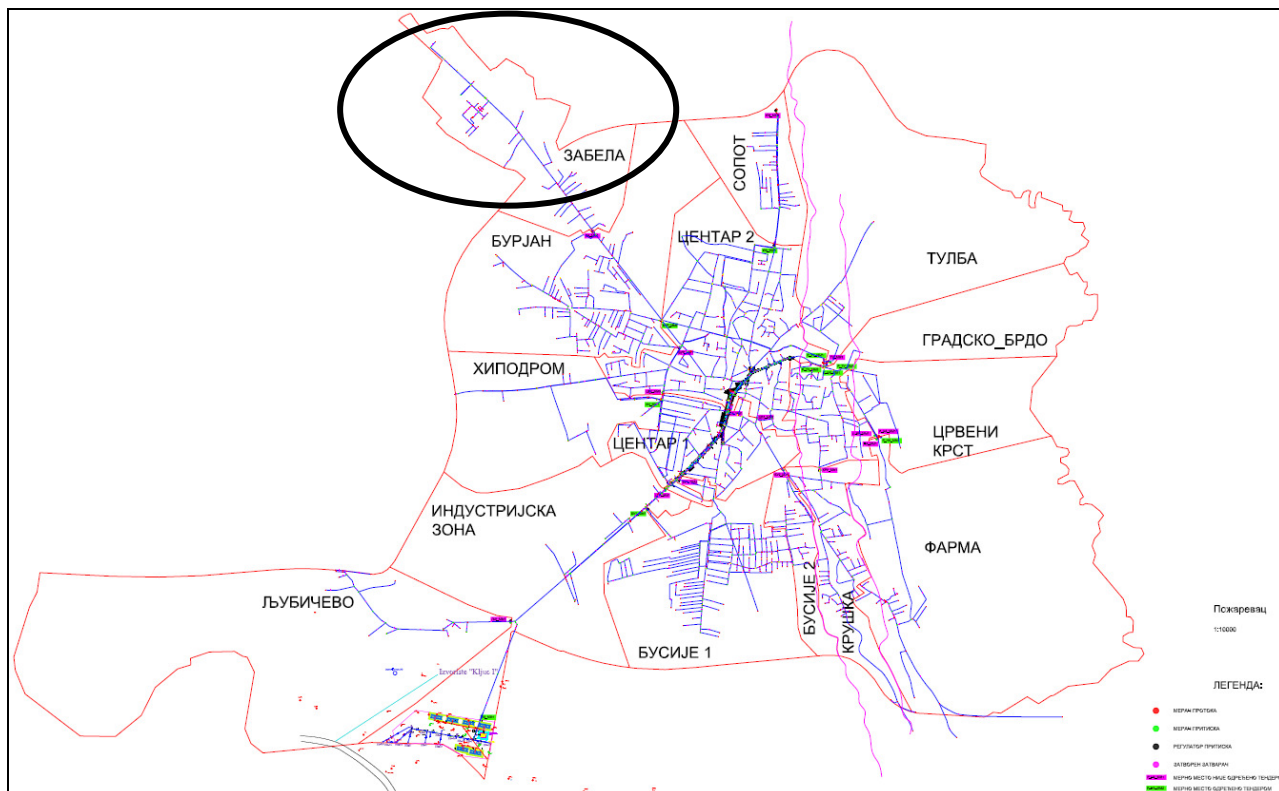
Коначан резултат LCP методе је прорачун дотока воде ( $Q_{inflow,h}^{red}$ ) у ОЗБ или ВДС (укупне потребе за водом) при редукованом притиску, применом једначине (21).

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА – ВДС ПОЖАРЕВАЦ

ВДС Пожареваца (централна Србија) снабдева водом око 50.000 становника, индустрију на територији града и и све градске институције. Крајем 2008. године започет је свеобухватни пројекат реконструкције и побољшања ефикасности ВДС града Пожаревац. Пројекат се састојао од реконструкције и изградње нових цевовода и резервоара, а посебна компонента пројекта је била имплементација програма повећања ефикасности водовода, укључујући и смањење губитака воде. Целокупан пројекат је имплементиран у периоду 2008-2013 (*Екстинг, 2013*).

ВДС Пожареваца подељен је у 3 висинске зоне: прва је испод 100 mm, друга од 100 mm до 150 mm а трећа изнад 150 mm. Највећи број потрошача налази се у првој висинској зони. Вода се обезбеђује црепљем подземне воде из шљунковите водоносне средине алувиона Велике Мораве. Вода се из бунара доводи до резервоара Кључ ( $V=5000$  m<sup>3</sup>), а затим ПС Кључ кроз потисно-дистрибутивни цевовод  $\varnothing 600/\varnothing 500$ , са притиском од 5,0 – 5,4 bar (просечно 5,2 bar) потискује воду према граду и резервоару I висинске зоне - Тулба ( $V = 2.000$  m<sup>3</sup>). Из резервоара Тулба вода се потискује цевоводом пречника  $\varnothing 250$  ка резервоару II висинске зоне - Чачалица ( $V = 500$  m<sup>3</sup>), а одатле хидрофорским постројењем пласира воде у III висинску зону. На наредној слици 1 приказана је шема ВДС Пожареваца.

ВДС Пожареваца је подељен на 15 ОЗБ (слика 1) у којима се мониторише проток, са циљем да се одреде компоненте водног биланса, као и приоритетне зоне у којима би требало приступити смањењу губитака воде. За сваку ОЗБ из базе података (ГИС) одређен је укупан број корисника по категоријама потрошача, као и њихова дневна потрошња, на нивоу средње годишње потрошње (статистичком анализом резултата мерења сваког водомера).



Слика 1. ВДС Пожаревца са поделом на ОЗБ

За потребе одређивања компоненти водног биланса и минималне ноћне потрошње воде, потрошачи су подељени у неколико категорија: велики потрошачи, индивидуалне куће периферија, индивидуалне куће центар, кућни савети, мала привреда, јавне установе, школе, итд. За сваку ОЗБ одређен је број потрошача по категоријама потрошача и њихова средња годишња потрошња воде из базе потрошача. За сваку категорију потрошача израчуната је укупна минимална ноћна потрошња воде као и њена неодређеност.

Мерењима на терену, за сваку ОЗБ је одређен минимални ноћни доток воде. Методом минималне ноћне потрошње воде одређени су ноћни стварни губици воде  $WL_{night}$  у свакој ОЗБ, као и у целом ВДС, за време  $MNF$  и при просечном притиску  $AZNP$  у ОЗБ у том периоду. На жалост, није рађен "степ тест" за одређивање експонента притиска стварних губитака воде  $N1$  у појединим зонама, па је он процењен на основу података о заступљености различитих ценовода (Бабић и др., 2014б). Усвојена је вредност експонента притиска за стварне губитке воде  $N1$  за ВДС Пожаревца од 1,40.

Из резултата калибрисаног математичког модела, у свакој ОЗБ одређен је часовни просечан притисак током посматраног дана,  $AZP_h$ . На основу једначине (1) одређени су ноћни стварни губици воде ( $WL_{night}$ ). Након тога, на основу дијаграма просечног часовног притиска у ОЗБ током дана, одређени су и часовни стварни губици. На крају, на основу анализе резултата рада постојећег ВДС, односно просечног и критичног притиска по ОЗБ, за сваку ОЗБ одређено је могуће смањење притиска. Обзиром на конфигурацију ВДС Пожаревца редукација притиска могућа је у периферних 9 ОЗБ.

### 3.1 Примена LCP методе на процену смањења потреба за водом у ОЗБ Забела

У наредном тексту, приказаће се примена LCP методе на ОЗБ Забела (слика 1), пошто у овој зони постоје све категорије потрошача (табела 2), па је могуће детаљно приказати примену наведене методе.

Статистичком анализом резултата мерења одређен је минимални ноћни проток у ОЗБ Забела и он

Табела 2. Број потрошача по категоријама потрошње и њихова средња годишња потрошња воде у ОЗБ Забела

Категорија потрошача из математичког модела	Бр.потрош. (-)	Потрошња (m <sup>3</sup> /dan)	Потрошња (l/s)	Потрошња	
				l/priklj.dan	l/priklj.h
Индивидуалне куће периферија	336	139,1	1,610	412	17
Кућни савети	93	28,8	0,333	309	13
КПЗ Забела	1	1190,8	13,783	1.190.843	49.618
Школе	1	0,1	0,001	115	5
Мала привреда	9	10,8	0,125	1203	50
Велика привреда	1	0,3	0,003	276	12
<b>Укупно:</b>	<b>441</b>	<b>1.370,0</b>	<b>15,856</b>		

износи 15,8 L/s (56,9 m<sup>3</sup>/h). На основу процењеног минималног ноћног протока и минималне ноћне потрошње воде израчунати су стварни ноћни губици воде од 2,8 L/s (табела 3). Просечан дневни притисак (AZP) износи 3,6 bar, а притисак за време MNF (AZNP) износи 4,2 bar.

Минимална ноћна потрошња воде за време MNF износи 46,6 m<sup>3</sup>/h, а ноћни стварни губици воде 10,2 m<sup>3</sup>/h.

На основу резултата мерења добијен је дијаграм промене протока и притиска на доводу воде у ОЗБ Забела. Из резултата калибрисаног и верификованог математичког модела, одређен је часовни просечан притисак током посматраног дана  $AZP_h$ , као и часовна промена „критичног“ притиска. На основу анализе резултата рада постојећег ВДС, односно просечног и критичног притиска у ОЗБ, процењено је могуће смањење притиска на доводу од око  $\Delta P_{tot}^0 = 0,7 \text{ bar}$  ( $AZP^{red} \approx 2,9 \text{ bar}$ ).

Табела 3. Минимална ноћна потрошња воде по категоријама потрошача

	MNF (l/s)	MNF (l/h)
Доток у ОЗБ	15.80	56.880
Мала привреда	0,050	180
Велика привреда	0,001	5
КПЗ Забела	12,000	43.200
Школе	0,001	4
Индивидуалне куће	0,764	2.751
Кућни савети	0,140	504
<b>Укупна мин.ноћна потрошња воде</b>	<b>12,957</b>	<b>46.644</b>
<b>Укупни ноћни губици воде</b>	<b>2,84</b>	<b>10.236</b>

Применом једначине (13) одређени су часовни стварни губици воде, једначине (15) часовна процуривања воде иза водомера и једначине (16)

часовна стварна потрошња воде - све за нерегулисани (иницијални) притисак.

Израчуната су два сета коефицијента  $K$ , за сваки сат, коришћењем једначине (17), где је  $\Delta h$  разлика притисака између "улазне" тачке у ОЗБ и AZP, односно "улазне" тачке у ОЗБ и "критичне" тачке.

Након одређивања иницијалне вредности могућег смањења притиска ( $\Delta P_{tot}^0$ ), у првој итерацији ова вредност је одузета од регистрованог притиска на "улазној" тачки у ОЗБ током часа са максималним дотоком воде. Као што је претходно поменуто, у првој итерацији усваја се да је  $\Delta h$  између "улазне" и "критичне" тачке исто као и при нерегулисаном притиску. Стварни часовни губици воде  $WL_h^{red}$  рачунају се применом једначине (18), просечна часовна процуривања воде иза водомера при редукованом притиску  $Q_{waste,h}^{red}$  једначине (19), стварна часовна потрошња воде при редукованом притиску  $Q_{realcons,h}^{red}$  једначине (20) и укупан доток воде  $Q_{inflow,h}^{red}$  у ОЗБ једначине (21). На основу

израчунате вредности  $Q_{inflow,h}^{red}$  израчуна се нова вредност  $\Delta h$  између "улазне" и "критичне" тачке. Уколико постоји разлика прорачун се понавља у следећој итерацији са предходно срачунатим вредностима  $\Delta h$ . Прорачун се понавља све док се не задовољи услов да  $\Delta h^{iter} - \Delta h^{iter-1} < 0,1 \text{ m}$ . Након добијених резултата проверава се да ли постоји евентуална могућност за додатно повећање  $\Delta P_{tot}^0$ , односно смањење притиска на доводу у ОЗБ. Уколико постоји могућност, прорачун се понавља са новом вредношћу фиксног излазног притиска на доводу све док вредност притиска у "критичној" тачки не задовољи минимални ниво услуге.



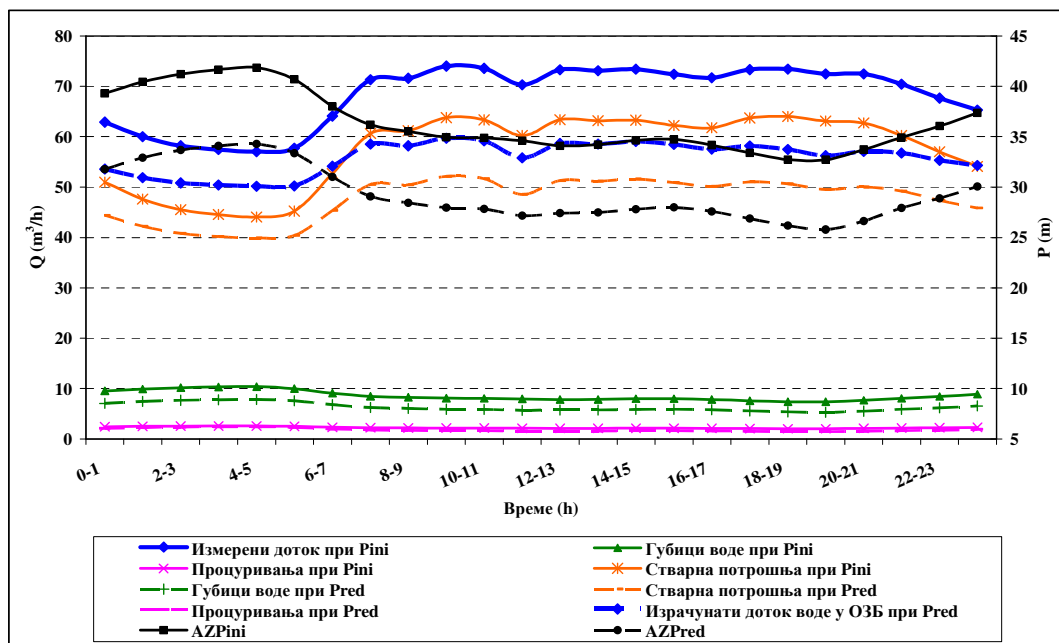
Израчунати нови излазни притисак примењује на све сате током дана. Обзиром на нову, константну, вредност излазног притиска током дана неопходно је израчунати нови  $AZP$ , на основу меродавног протока који се услед редукције притиска смањује у односу на иницијални.

Коначан резултат LCP методе је прорачун дотока воде ( $Q_{inflow,h}^{red}$ ) у ОЗБ или ВДС (укупне потребе за водом) при редукованом притиску. Нова вредност просечног притиска у ОЗБ Забела је  $AZP^{red} = 2,9 \text{ bar}$ . У табели 4. и на слици 2. су дати сумарни прикази резултата прорачуна LCP методом, смањење потреба за водом у ОЗБ Забела услед смањења притиска на доводном цевоводу.

При коришћењу LCP методе, потребно је спровести и анализу осетљивости на варијацију улазних параметара  $N1$ ,  $N2$ ,  $N3$  и просечних дневних процуривања воде иза водомера. За Забелу, спроведена је анализа осетљивости за посматрани дан при редукованом притиску. Претпостављена је нормална расподела улазних параметара са просечним вредностима:  $N1=1,40$ ,  $N2=0,5$ ,  $N3=1,0$  и  $q_{lib}=2,24 \text{ m}^3/\text{h}$ , и са стандардном девијацијом 15 % од просечних вредности. Хиљаду пута су случајно генерисани параметри (метода Monte Carlo). Добијен је доток воде у ОЗБ, у форми 95% интервала поверења, са минималним протоком од  $46 \text{ m}^3/\text{h}$  и максималним од  $64 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Табела 4. Резултати прорачуна LCP методом – ОЗБ Забела

	Нерегулисан притисак	Регулисан притисак	Смањење ( $\text{m}^3/\text{dan}$ )	Смањење (%)
Доток воде у ОЗБ - ( $\text{m}^3/\text{dan}$ )	1.637	1.340	297	18,1
Стварни губици воде - ( $\text{m}^3/\text{dan}$ )	205	151	54	26,1
Стварна потрошња воде - ( $\text{m}^3/\text{dan}$ )	1.378	1.145	233	16,9
Процуривања воде - ( $\text{m}^3/\text{dan}$ )	54	44	10	18,9
Укупна потрошња воде - ( $\text{m}^3/\text{dan}$ )	1.432	1.189	243	17,0



Слика 2. Регистровани доток у ОЗБ, израчуната потрошња и стварни губици воде при иницијалном и редукованом притиску на доводу (LCP метод)

### 3.2 Примена LCP методе на процену смањења потреба за водом у осталим ОЗБ

Коначан резултат LCP методе је прорачун дотока воде ( $Q_{inflow,h}^{red}$ ) у ОЗБ или ВДС (укупне потребе за водом) при редукованом притиску. Прорачуни за осталих 8 зона извршени су на сличан начин као и за ОЗБ Забела, а у табели 5. дат је сумарни приказ резултата прорачуна.

Из резултата приказаних у табели 5. може се закључити да укупно смањење потреба за водом, услед редуковања притиска у 9 ОЗБ (обухваћено 30 % од укупног броја потрошача) износи 1.696 m<sup>3</sup>/dan,

односно 8,50 % у односу на укупни доток воде у ВДС Пожареваца. Међутим, треба напоменути да је у 5 ОЗБ смањење просечног притиска мање од 1 bar. Просечан притисак у целом ВДС Пожаревац смањен је за само 0,5 bar (са 4,3 bar на 3,8 bar).

Укупно смањење стварних губитака воде износи 842 m<sup>3</sup>/dan, односно 10,50 % у односу на укупне стварне губитке воде у целом ВДС Пожаревац. Смањење стварне потрошње воде износи 662 m<sup>3</sup>/dan, а проценување воде иза водомера 192 m<sup>3</sup>/dan (смањење укупне потрошње воде износи 854 m<sup>3</sup>/dan, односно 7,1 % у односу на укупну стварну потрошњу воде у целом ВДС Пожареваца).

Табела 5. Резултати прорачуна LCP методом – 9 ОЗБ у ВДС Пожаревац

ОЗБ	Смањење дотока воде (m <sup>3</sup> /dan)	Смањење губитака воде (m <sup>3</sup> /dan)	Смањење потрошње воде (m <sup>3</sup> /dan)	Смањење проценувања воде (m <sup>3</sup> /dan)	% СМАЊЕЊА			Pini	Pred	ΔAZP (m)
					Доток воде	Губици воде	Укупна потрошња	AZP (m)	AZP (m)	
Бурјан	354	222	103	29	22%	26%	17%	38,5	31,1	7,4
Бусије 1	519	330	144	45	18%	20%	14%	33,8	28,7	5,1
Црвени крст	14	6	6	2	10%	14%	8%	30,8	27,8	3,0
Фарма	53	18	23	12	22%	33%	19%	38,2	28,7	9,5
Хиподром	84	48	26	10	39%	54%	28%	48,5	27,9	20,6
Крушка	222	90	81	51	46%	67%	38%	60,5	27,8	32,7
Љубичево	64	33	16	14	43%	58%	33%	50,6	27,2	23,3
Тулба	90	42	30	19	40%	60%	31%	52,3	28,3	24,0
Забела	297	54	233	10	18%	25%	17%	36,3	29,3	7,1

### 4. ЗАКЉУЧАК

Приказана LCP метода развијена је под претпоставком да нису само губици воде зависни од притиска, већ и потрошња воде. Ова претпоставка важи у случају мерења тренутног дотока воде у посматрану област. Такође, претпостављено је да се мерена потрошња воде састоји од стварне потрошње и цурења иза водомера. Ово је чест случај у ВДС у земљама у развоју. У водоводним системима са високим притисцима, као и варијацијама притиска, његов утицај на потрошњу воде не може се занемарити. Усвојене вредности експонента притиска иза водомера подложне су даљим истраживањима.

Смањење притиска је само једна од метода активне контроле стварних губитака воде. За побољшање ефикасности ВДС, неопходна је примена свих метода активне контроле стварних губитака воде. Редукијом притиска постижу се уштеде у потребама за водом, услед смањења стварних губитака и потрошње воде, продужава се животни

век инфраструктуре и смањује учестаност појаве нових места цурења воде.

### ЗАХВАЛНОСТ

Аутори се захваљују Министарству науке, просвете и технолошког развоја Републике Србије на подршци у реализацији пројекта TR37010 под називом: „Системи за одвођење кишних вода као део урбане и саобраћајне инфраструктуре“, чији је саставни део било истраживање у проблематици редукије губитака и рационализацији потрошње воде, као значајној компоненти у билансу базног отицаја у канализацији.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Alegre, H., Baptista, J.M., Cabrera, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W. and Parena, R. (2006): Performance Indicators for Water Supply Services. - Second Edition, Manual of Best

- Practice, IWA Publishing, London, UK. ISBN: 1843390515.
- [2] Бабић, Б. (2014а). „Унапређење методологије за вредновање и побољшање перформанси водоводних система“, докторат. Грађевински факултет Београд.
- [3] Babić, B., Dukić, A., and Stanić, M. (2014b). "Managing water pressure for water savings in developing countries" *Water SA*, 40(2), 221-232.
- [4] Ehting, (2013). "Program za povećanje efikasnosti smanjenja gubitaka vode u vodovodnom sistemu Požarevca". Beograd.
- [5] Хацић, Е. (2013): "Дефинисање оптималних количина воде које се могу захватити са изворишта подземних вода", *Водопривреда*, N<sup>0</sup> 261-263, с.69-80.
- [6] Ховањ, Ј. (2012): "Импулсни пропусни вентил у водоводу једног домаћинства", *Водопривреда*, N<sup>0</sup> 258-2260, с.155-162
- [7] Ховањ, Ј. (2013): "Тачност мерења баждарених протицаја воде водомером", *Водопривреда*, N<sup>0</sup> 264-266, с.257-264
- [8] Иветић, Д, Ж. Василић, М. Станић и Д.Продановић (2013): "Оптимизација мрежа под притиском моделирањем  $\Delta Q$  методом", *Водопривреда*, N<sup>0</sup> 264-266, с. 265-274
- [9] Јовановић, Б., Д. Љубисављевић и Љ. Рајаковић (2011): "Уклањање арсена из воде адсорпцијом на неконвенционалним материјалима", *Водопривреда*, N<sup>0</sup> 252-254, с.127-150
- [10] Lambert, A. O. (2002). "International Report: Water losses management and techniques." *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4).
- [11] Lambert, A. O., and Fantozzi, M. (2010). "Recent Developments in Pressure Management." *Proc. of the 6th IWA Water Loss reduction Specialist Conference*, June 6-9, Sao Paulo, Brazil.
- [12] Љубисављевић, Д. и М. Јонових (2013): "Математичко моделирање брзих пешчаних филтера", *Водопривреда*, N<sup>0</sup> 264-266, с.231-256
- [13] Љубисављевић, Д и В. Рајаковић (2012): "Уклањање нитрита из воде за пиће применом биолошке денитрификације", *Водопривреда*, N<sup>0</sup> 258-260, с.163-174
- [14] May, J. (1994). "Pressure Dependent Leakage." *World Water and Environmental Engineering*, October 1994, 13.
- [15] McKenzie, R. (2001). *PRESMAC: Pressure Management Program*, WRC, Report TT 152/01, South Africa.
- [16] Поломчић, Д. и други (2013): "Хидродинамичке карактеристике изворишта Пештан", *Водопривреда*, N<sup>0</sup> 261-263, с.55-68
- [17] Savic, D. A., and Walters, G. A. (1995). "An Evolution Program for Optimal Pressure Regulation in Water Distribution Networks." *Engineering Optimization*, 24(3), 197-219.
- [18] Thornton, J., Sturm, R., and Kunkel, G. (2008). *Water Loss Control*, McGraw-Hill, New York.
- [19] Ulanicki, B., Bounds, P. L. M., Rance, J. P., and Reynolds, L. (2000). "Open and Closed Loop Pressure Control for Leakage Reduction." *Urban Water*, 2, 105-114.
- [20] WSA/WCA Engineering and Operations Committee (1994). *Managing Leakage: UK Water Industry Managing Leakage Reports A-J. Report A – Summary Report; Report B – Reporting Comparative Leakage Performance; Report C - Setting Economic Leakage Targets; Report D – Estimating Unmeasured Water Delivered; Report E - Interpreting Measured Night Flows; Report F - Using Night Flow Data; Report F - Managing Water Pressure; Report h – Dealing With Customer’s Leakage; Report J – Techniques, Technology and Training.* London: WRc/WSA/WCA, London

## ESTIMATING DEMANDS FOR WATER SUPPLY UNDER REDUCED PRESSURE

by

Branislav BABIĆ, Dušan PRODANOVIĆ, Miloš STANIĆ  
University of Belgrade - Faculty of Civile Engineering, bane@grf.bg.ac.rs

### Summary

Many water utilities, continue to operate inefficient water distribution systems (WDSs) with a significant amount of water and revenue losses. This paper investigates the potentials of the available pressure management methodologies and its implementation in the district metering area (DMA) case study in Požarevac. Additionally, focus is given to assessment of water savings due to reduction of pressures. The results

indicate that the method which assumes that both consumption and leakage are pressure dependent lead to better prediction of the total amount of water savings under reduced pressures.

Keywords: water supply, water losses, pressure, consumption, water savings

Redigovano 23.11.2014.