

МЕРЕЊЕ ПРОТОКА У КАНАЛИЗАЦИОНИМ СИСТЕМИМА БЕОГРАДА: ХИДРОТЕХНИЧКА ФОРЕНЗИКА

DISCHARGE MEASUREMENTS IN BELGRADE SEWER SYSTEMS: FORENSIC HYDRAULICS

ДАМЈАН ИВЕТИЋ¹
ДУШАН ПРОДАНОВИЋ²
МИЛОШ СТАНИЋ³
БРАНИСЛАВ БАБИЋ⁴
РОБЕРТ ЉУБИЧИЋ⁵

Прегледни стручни рад
DOI: 10.5937/VIK244811

Резиме: Једна од последица интензивирањем развоја и додатне урбанизације Београда је повећање оптерећења постојеће комуналне инфраструктуре, које даље води ка раду изван пројектних критеријума. Канализациони системи, за одвођење употребљене и/или кишне воде, су управо примери система који се налазе у оваквој ситуацији. Како би се адекватно проценио капацитет постојећих система, идентификовале слабе тачке и предвидели адекватни кораци за унапређење и даљи развој неопходне су опсежне и детаљне анализе, које морају укључити мониторинг рада система као и развој, калибрацију и употребу одговарајућих хидрауличких модела. У овом раду су приказани поједини аспекти Студије која се спроводи за Београдски водовод и канализацију, а покрива канализационе системе за употребљене воде и кишне воде на територији општине Нови Београд. Акцент је стављен на прикупљање улазних података, развој математичког модела и примере добре праксе у формирању мерних места.

¹ Дамјан Иветић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, divetic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0001-7475-6108

² Душан Продановић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, dprodanovic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-0156-7271

³ Милош Станић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, mstanic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3296-5224

⁴ Бранислав Бабић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, babic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-1224-6297

⁵ Роберт Љубичић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, rljubicic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-0218-2843

Кључне речи: канализациони системи, мониторинг, мерење протока, хидротехничка форензика

Abstract: The load increase on the existing municipal infrastructure, leading to the system operation outside the design criteria, is a side-effect of the intense development and over urbanization of the city of Belgrade. Sewer and urban drainage systems are experiencing this situation. To allow for the adequate evaluation of the existing systems' capacity, identification of the bottlenecks and definition of the appropriate steps for the system development and improvements, detailed and complex analysis is needed. System operation monitoring, as well as the design, calibration and application of the suitable hydraulic models, are deemed as mandatory parts of the analysis. In this paper, several aspects of the study, currently being carried out for Belgrade Waterworks and Sewerage, which covers the municipality of New Belgrade. Focus is placed on the input data collection, hydraulic model development and examples of good practice in design of the measurement places.

Key Words: sewer systems, monitoring, discharge measurements, forensic hydraulics.

1. Увод

Главни задатак канализационих система је безбедно прикупљање и одвођење употребљених и атмосферских вода са урбаних сливова у оближњи реципијент. Они треба да функционишу 24 сата дневно, сваки дан у недељи, без прекида. Како би се одржао задовољавајући ниво функционалности, развој ових комуналних инфраструктурних система мора да прати промене на урбаном сливу који опслужује. Међутим, неретко динамика развоја канализационих система не прати динамику урбанизације, што може довести до преоптерећености постојећих делова система, односно разних хазардних ситуација које се последично јављају.

У општем случају, урбанизација је једна од најзначајних антропогених модификација природне средине [1, 2]. Неки од негативних аспеката урбанизације, а од интереса за овде представљену анализу, су: пораст количина отечких вода проузрокован повећањем коефицијента отицаја, пораст у количинама употребљених вода (повећање потрошње пијаће воде), деградација квалитета површинског отицаја и реципијента [3, 4]. Уколико канализациони системи нису довољног капацитета, додатне количине отпадних вода узрокују појаву течења под притиском у колекторима и изливања канализације у урбаним срединама. Такође, тамо где не постоји постројење за прераду отпадних вода (ППОВ), додатна урбанизација доводи до линеарног пораста загађања реке или језера у које се изливају отпадне воде и даљег убрзања деградације животне средине и квалитета живота. Стручна и научна јавност су се последњих деценија фокусирале на прецизније одређивање негативних последица урбанизације на рад канализационих система [5] као и на развој различитих приступа за њихову минимизацију [6]. Примера ради, у срединама

где постоје „историјски“ комбиновани канализациони системи, додатне количине отпадних вода у канализационим системима воде ка чешћем активирању комбинованих прелива (енг. Combined Sewer Overflows – CSO) односно неконтролисаном испуштању отпадних вода у реципијент.

Заједничко за све типове канализационих система је да се негативни ефекти урбанизације морају минимизирати одговарајућим техничким решењима, како би се одржао, или евентуално унапредио, претходно достигнут ниво функционалности. Треба имати у виду да се са урбанизацијом и смањењем расположивог простора, скраћује и спектар могућих техничких решења, док се истовремено подиже цена њихове имплементације. Свакако, полазна тачка за разматрање одговарајућих техничких решења, односно даљих корака развоја, представља добро познавање тренутног стања, услова и рада канализационих система.

Град Београд нема ППОВ и последњих година доживљава додатну, станоградњом подстакнуту, урбанизацију. Нови Београд је једна од општина града Београда која предњачи у овом процесу. Имајући у виду промене које је доживела општина последњих година, заједно са планираним развојем тог дела града, Београдски водовод и канализација (БВК) спроводи Студију са циљем поузданог квантификовања тренутног оптерећења система. Студијом су предвиђене и опсежне кампање геодетског снимања постојеће инфраструктуре, мониторинг релевантних хидрауличких и хидролошких величина као и развој, калибрација и употреба математичког модела канализационе мреже.

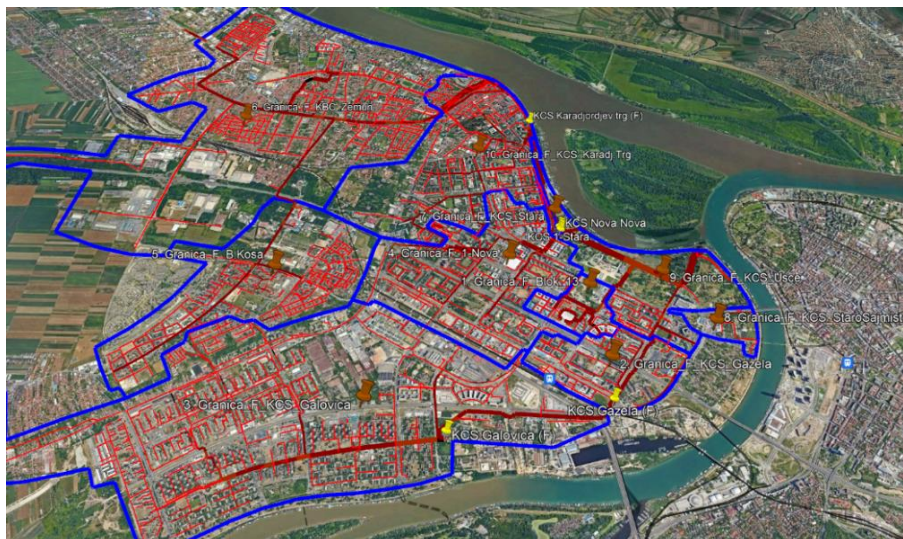
У овом раду су представљени поједини аспекти ове Студије коју спровode Геопут и Грађевински факултет Универзитета у Београду. Разматрани су почетни кораци, првенствено са аспекта прикупљања постојећих података и организовање кампања за допуну недостајућих података. Такође, илустрована је потреба за синергијским радом на развоју математичког модела и спровођењу мерних кампања. Посебан акценат је стављен на квалитет измерених хидролошко/хидрауличких података, односно на примерима добре праксе у организовању мерних кампања и формирању мерних места унутар канализационих мрежа.

2. Почетна фаза – прикупљање улазних података

У разматрању канализационих система, кључно је добро познавати положај, стање и геометријске карактеристике постојећих инфраструктурних средстава. Такође, неопходно је упознати се са радом система, искуствима запослених, логиком и принципом управљања активним елементима (канализационе црпне станице КЦС, уставе и затварачи).

2.1. Инфраструктурна средства

Прегледом и анализом доступних података, укључујући географски информациони систем (ГИС) и пројектну документацију (историјску и новијег датума) добијених од БВК, формирана је основа обе канализационе мреже (слика 1). Детаљном анализом, која укључује аутоматизовану проверу повезаности компонената, доследности у падовима (кроз наменски софтвер 3D Net развијен на Грађевинском факултету Универзитета у Београду ГРФУБ) али и емпиријску оцену смислености (имајући у виду начела пројектовања хидротехничких објеката и грубо процењене количине вода), утврђено је да постоје одређени недостаци. Упркос редовним активностима БВК, одређен број шахтова, сливника и цеви није био унет у ГИС, док су се код још већег броја јављали нелогични подаци. Примера ради, коте дна шахтова, где неки шахтови или немају уопште дубину (кота дна једнака коти поклопца), или још опасније (јер је теже открити) немају добро унете коте дна, па се јављају цеви са исувише благим или чак негативним нагибом.



Слика 1. Основа канализационог система за употребљене воде, са поделом на подсливове, на територији општине Нови Београд

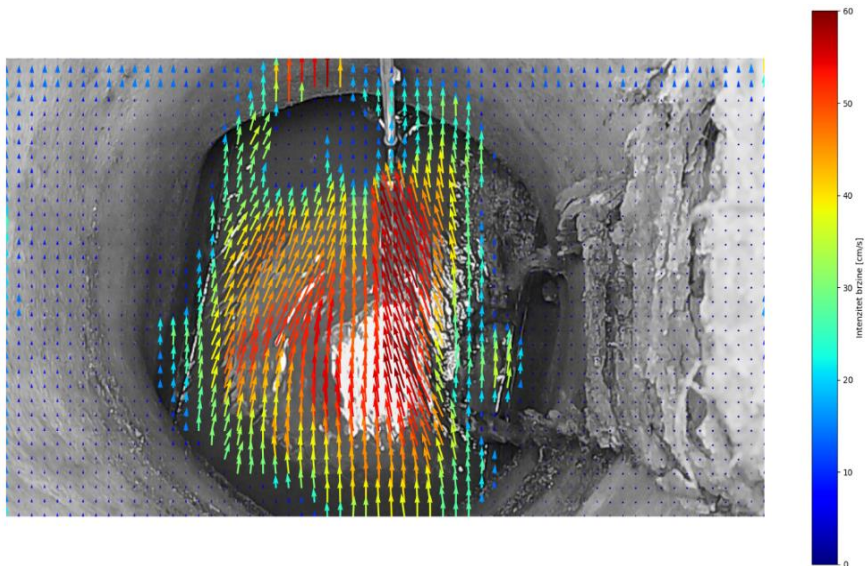
Figure 1. Sewer system layout, divided on sub catchments, in the municipality of New Belgrade

С тим у вези, организована је опсежна геодетска кампања са циљем прикупљања и допуне недостајућих података о канализационим инфраструктурним средствима. Кључни корак у организацији ове кампање је било дефинисање методологије за снимање недостајућих података, које укључује и

прављење видео-фото записа унутрашњости шахтова, будући да се ради о подземној инфраструктури у којој се јављају агресивни и токсични гасови, а која има ограничен приступ. Један од проблема који се јавио током реализације, се односи на немогућност приступа због непрописно паркираних возила или нелегално изграђених објеката. Међутим, прикупљена је велика количина квалитетних података, неопходних за спровођење Студије.

2.2. Рад канализационих система

БВК је оформио одређен број мерних места унутар канализационе мреже и на КЦС за стална мерења као и за повремена, контролна мерења. Иако је већи број мерних места процесног карактера, односно служи за давање података за аутоматско управљање агрегатима на бројним КЦС, ови подаци су веома важни и за разумевање рада, односно упознавање са карактеристикама система. Самим подацима треба приступити критички и обиласком постојећих мерних места утврдити да ли су успостављени сви неопходни услови за квалитетан мониторинг. Пожељно је редундантним мерилима извршити и валидацију. Поред мерених података, у овом процесу веома битну улогу имају и искуства запослених и познавање локалне мреже, поготово теренских екипа и реонских оператера.



Слика 2. Резултат видеометријске обраде видео снимка са приказом распореда вектора површинских брзина у једном шахту
Figure 2. Photogrammetric analysis of video with surface velocity distribution in a manhole

У ванредним ситуацијама (нпр у условима интензивних падавина) када се прекорачи капацитет сливника, канализационих колектора или других елемената система, јављају се хазардне ситуације као што су нпр урбане поплаве. У данашње време, грађани уз помоћ паметних телефона снимају ове појаве и постављају на интернет, односно разне друштвене мреже. Ови снимци такође представљају важан извор информација, јер указују на слабе тачке и дају слику о размерама настале штете. Снимци се могу накнадно и обрадити неким од метода видеометријске анализе [7] како би се квантификовали распореди површинских брзина, дубине течења... (слика 2).

3. Синергија у развоју математичког модела и спровођењу мерних кампања

Развој математичког модела рада канализационих система се мора тумачити као итеративан и континуалан процес. Конкретно, за разматрану Студију, иницијална (нулта) верзија математичког модела је формирана на основу постојећих непотпуних података преузетих из ГИС-а и допуњених претпостављеним и негде интерполованим информацијама. Са напретком геодетске кампање модел је постепено допуњаван и коригован.

Још битније, концептуално разумевање рада система је развијано паралелно са организацијом и прогресом кампања за мерења хидрауличких величина унутар канализационих мрежа. Одабир мерних локација, о чему ће бити више речи у наредном поглављу, је вршен на основу података из иницијалног математичког модела. Међутим, неретко се након обиласка терена и извиђања специфичности будућих мерних локација, уоче нови детаљи према којима се врши корекција математичког модела. Још чешће се на основу снимљених временских серија дубина или протока, схвати да је концептуална претпоставка о нпр повезаности цеви на одређеној микролокацији била погрешна. Овиме се потврђује нужност синергијског развоја математичког модела и мерних кампања унутар канализационе мреже, у склопу процеса анализе комуналних инфраструктурних система.

4. Како обезбедити поузданост измерених хидролошко/хидрауличких величина?

Измерени подаци о интензитету и висини падавина (хидролошки) на сливу, као и дубинама, брзинама и протоцима (хидраулички) на карактеристичним деоницама мреже, у већини случајева представљају најпоузданији извор информација о раду канализационог система. Међутим, обезбеђивање поузданости измерених података, поготово унутар канализационе мреже и на мерним локацијама које нису специјално прилагођене мерењима, је захтеван

посао. Једно прилично конзервативно, али корисно правило, је да се измереним подацима не верује све док се не потврди да сви потенцијални узроци проблема у мерењима нису имали утицај на рад мерила. Мање конзервативно правило је да се подацима не верује док се редувантном методом/мерилом не добију исте или сличне (у границама мерне несигурности) вредности. Користан алат представља и анализа мерне несигурности која се мора спровести према дефинисаним правилима [8].

4.1. Одабир мерних локација и мерне методе

Кључан аспект у обезбеђивању поузданости измерених хидрауличких података је избор мерне локације и одговарајуће мерне опреме. Код одабира мерне локације, најбитније је добити репрезентативне податке, односно податке меродавне за анализу која се спроводи. На нивоу Студије која обухвата целу општину као што је Нови Београд, мерне (макро)локације су одабране тако да се ухвати биланс вода у канализационим системима за употребљене и кишне воде, па су тако одабране локације на испустима и највећим КЦС-ама.



Слика 3. Мерно место на прагу унутар сабирне грађевине на потисима ЦС Стара и ЦС Нова, опремљено са мерилом дубине и редувантним мерилима брзине и дубине

Figure 3. Measurement location inside the manhole with inflows from PS Stara and PS Nova, equipped with a level gauge and redundant velocity and level sensor

Поред тога поједина мерна места су формирана како би се створила адекватнија слика на идентификованим „уским грлима“. Други део овог поступка представља одабир микро локације односно положаја мерила који је уско повезан са избором мерне методе. Овде треба имати у виду да не постоји „сребрни метак“ односно универзално решење које ће увек поуздано радити, већ се овај деликатан посао ради у зависности од хидрауличких услова на микролокацији, карактеристика флуида, геометријских карактеристика проводника, услова средине и цене [9]. Када год постоји могућност, треба искористити предности постојећих објеката у мрежи, па је тако током спроведене Студије формирано неколико мерних места на локацијама где постоји једнозначна веза између дубине и протока – пример оваквог места је праг у сабирној грађевини на потисима ЦС Стара и ЦС Нова (слика 3). У овом случају се познавањем хидраулике и уз помоћ контролног мерења са редувантним мерилом, може формирати стабилна и поуздана зависност између висине преливног млаза и протока, чиме се обезбеђује посредно мерење протока помоћу једног мерила дубине. Тамо где услови не дозвољавају овакву везу, неопходно је поставити и мерило дубине и мерило брзине, како би се дошло до протока!

4.2. Формирање редувантних мерних места

Посебан детаљ у метролошкој пракси у канализационим системима је потреба за формирањем привремених, редувантних мерних места кад год се раде мерења унутар канализационе мреже. Током Студије је оформљено једанаест мерних места где је постављена опрема која је радила континуално, у периоду од месец дана, и преко петнаест привремених редувантних мерних места, на којима су рађена привремена (до две недеље) и ad-hoc, тренутна мерења. Континуална мерна места су пружала податке, који су коришћени у калибрацији математичког модела, док су редувантна мерна места вршила привремену али неопходну контролу квалитета. Примера ради за мерно место приказано на слици 3, основна Q-H веза је формирана на основу геометрије прага и теоријског познавања феномена непотопљеног и потопљеног преливања преко прага. Редувантним мерењем брзине и дубине на самом прагу, извршена је корекција коефицијента преливања (смањен је за 3%) за непотопљено преливање, а и поузданије је одређен коефицијент преливања за потопљено преливање. Анализом мерне несигурности дефинисана је укупна мерна несигурност од свега 6% за непотопљено преливање.

5. Закључак

Додатна урбанизација Београда, са акцентом на општину Нови Београд, доводи до пораста оптерећења на канализационе системе. Како би се обезбедио

адекватан рад канализационих система и проценило тренутно стање, односно одредиле будуће неопходне активности БВК спроводи тренутно Студију која обухвата опсежну геодетску кампању снимања инфраструктурних средстава, кампање мерења хидролошко/хидрауличких величина и развој, калибрацију и употребу математичких модела рада канализационих система. У овом раду су анализирани поједини аспекти ове Студије, за које се сматра да су неопходни како би Студија дала сврсисходне резултате. Акцент је стављен на прикупљање улазних података, синергију у развоју математичког модела и спровођењу мерних кампања као и на начине обезбеђивања поузданости измерених хидрауличких података. Посебно је апострофирана потреба за формирањем редувантних мерних места са циљем унапређења поузданости мерења.

6. Захвалница

Аутори се захваљују колегама и колегиницама из БВК на подршци и сарадњи током реализације Студије. Посебну захвалност упућују сарадницима из Геопута, Стефану Миљковићу и Немањи Гајићу, као и колегама са Грађевинског факултета Драгутину Павловићу, Жељку Василићу, Милошу Милашиновићу и Ивору Кокотовићу.

7. Литература

- [1] Antrop M, Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and urban planning*, 67(1-4), pp.9-26, 2004.
- [2] Wu J, Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. *Landscape and urban planning*, 125, pp.209-221, 2014.
- [3] Vietz G. J, Rutherford I. D, Fletcher T. D. and Walsh C. J, Thinking outside the channel: Challenges and opportunities for protection and restoration of stream morphology in urbanizing catchments. *Landscape and Urban Planning*, 145, pp.34-44, 2016.
- [4] Semadeni-Davies A, Hernebring C, Svensson G. and Gustafsson L.G, The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system. *Journal of Hydrology*, 350(1-2), pp.100-113, 2008.
- [5] Braud I, Breil P, Thollet F, Lagouy M, Branger F, Jacqueminet C, Kermadi, S. and Michel K Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. *Journal of hydrology*, 485, pp.5-23, 2013.
- [6] Locatelli L, Gabriel S, Mark O, Mikkelsen P. S, Arnbjerg-Nielsen K, Taylor H, Bockhorn B, Larsen H, Kjølbj M. J, Blicher A. S. and Binning, P. J, Modelling the impact of retention–detention units on sewer surcharge and peak and annual runoff reduction. *Water Science and Technology*, 71(6), pp.898-903, 2015.

- [7] Ivetić D, Ljubičić R, Milašinović M, Prodanović D. and Pavlović D, Merenje protoka otpadnih voda u kanalizacionim mrežama: Kombinovanje inovativnih sa konvencionalnim mernim metodama. In *44. međunarodna konferencija "Vodovod i kanalizacija'23"*, Zlatibor, 10-13. oktobar 2023.
- [8] Bertrand-Krajewski J. L, Uhl M. and Clemens-Meyer F. H, *Uncertainty assessment in: Metrology in Urban Drainage and Stormwater Management* (Eds Bertrand-Krajewski J. L, Clemens-Meyer F. H, Lepot, M). IWA Publishing, 2021.
- [9] Godley A, Flow measurement in partially filled closed conduits. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5-6), pp.197-201, 2002.