

PROCENA KOEFICIJENTA OPTEREĆENJA ZAGAĐENJEM POVRŠINSKOG OTICAJA SA URBANIH POVRŠINA U BEOGRADU

Ognjen Govedarica, Aleksandar Đukić,
Vladana Rajaković-Ognjanović

*Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73,
Beograd. Email: ogvedarica@grf.bg.ac.rs*

REZIME

Na urbanim površinama dolazi do akumuliranja različitih zagađujućih materija, koje se tokom kišnih perioda spiraju sa površine i nose ih površinski oticaj. Koncentracije parametara kvaliteta oticaja stalno variraju zbog čega procena koeficijenta opterećenja predstavlja izazov u stručnom i naučnom pogledu. U radu je opisan postupak određivanja koeficijenta opterećenja zagađenjem površinskog oticaja na jednom eksperimentalnom slivu u Beogradu, kao i kritički osvrt na zakonsku regulativu u ovoj oblasti. Prikazani su rezultati i dati predlozi za poboljšanje budućih istraživanja.

KLJUČNE REČI: koeficijent opterećenja, padavine, površinski oticaj, urbana površina, akumuliranje zagađenja

THE LOAD COEFFICIENT EVALUATION OF SURFACE RUNOFF POLLUTION FROM URBAN SURFACES IN BELGRADE

ABSTRACT

Various polluting compounds accumulate on urban surfaces. These compounds get washed off the surface during rainy periods and carried by the surface runoff. Concentrations of quality parameters are constantly changing, which is why the assessment of the value of load coefficient represents a significant challenge. This paper presents the determination of the pollution load coefficient of surface runoff in an experimental watershed in Belgrade, as well as a critical review of the legal regulations in this area. The obtained results and suggestions for improving future research have also been covered.

KEYWORDS: load coefficient, precipitation, surface runoff, urban surface, pollution's accumulation

UVOD - O AKUMULIRANJU ZAGAĐUJUĆIH MATERIJA NA URBANIM POVRŠINAMA

Akumuliranje različitih materija na urbanim površinama je složen proces koji se sastoji od taloženja materija iz atmosfere, taloženja čestica donetih vetrom, sakupljanja materija

na površini usled ljudskih aktivnosti i dr. Tako se vremenom povećava količina prašine, zagađujućih i drugih materija na urbanim površinama. Zagađujuće materije se akumuliraju na urbanim površinama tokom perioda bez padavina. Tokom kiše akumulirane materije odvajaju se sa površine i nosi ih površinski oticaj, tako da se količina zagađujućih materija na urbanim površinama stalno menja kroz vreme u zavisnosti od smene sušnih i kišnih perioda (Hvitved-Jacobsen et al., 2010). Znatno je veća akumulacija zagađujućih materija na urbanim nego na ruralnim površinama (Hvitved-Jacobsen et al., 2010; Djukic, 2016). Različiti su izvori zagađenja i nosioci različitih zagađujućih materija. U atmosferi su zagađujuće materije najčešće u formi sitnih čestica ili su vezane za površinu čestica i potiču iz lokalnih i udaljenih izvora zagađenja. Atmosfersko zagađenje se može transportovati na velike udaljenosti (Hvitved-Jacobsen et al., 2010; Đukic, 2016).

Prema istraživanjima u SAD, autoputevi su izvor čestica većih od 6 μm sa visokim koncentracijama teških metala, pri čemu se ove čestice talože na površinu terena na udaljenostima i do 150 m od autoputa (Sabin et al., 2006).

Pored akumuliranja zagađenja, postoje i procesi i pojave koji uklanjaju zagađenje sa nepropusnih površina. Ti procesi su: nošenje vetrom, razgradnja (degradacija) materija, čišćenje ulica, itd. (Hvitved-Jacobsen et al., 2010). Koncentracije parametara kvaliteta u oticaju variraju u veoma širokim opsezima i razlikuju se prema slivovima. Prisutne su i varijacije koncentracija u oticaju na istom slivu, u toku jedne kišne epizode (Hvitved-Jacobsen et al., 2010). Pojava prvog spiranja (*eng.* first flush) predstavlja pojavu pri kojoj je maseni prinos zagađujućih materija veći na početku kišne epizode. Pored opšte definicije fenomena prvog spiranja, postoje i statističke metode koje se koriste za određivanje ovog fenomena (Bach et al. 2010). Istraživanja koja se bave ovom temom pokazala su da postoji izražena pojava prvog spiranja u kanalizaciji po opštem sistemu (Gupta & Saul, 1996). Erozija i resuspenzija nataloženog materijala u kolektorima opšteg sistema tokom suvog vremena glavni je izvor povećanog zagađenja iz opšteg sistema kanalizacije na početku kišnog oticaja (Chebbo & Gromairea, 2004). Utvrđeno je da je pojava prvog spiranja u kanalizaciji po opštem sistemu veoma izražena i da prvih 20 % zapremine oticaja nosi oko 40 % ukupnih zagađujućih materija (Barco et al., 2008).

U klimatskim zonama koje odlikuje smena kišnih i sušnih perioda godine, na početku kišnog perioda je uočen lošiji kvalitet oticaja, usled spiranja zagađenja akumuliranog tokom dugog sušnog perioda. Ova pojava je identifikovana na nekim slivovima (Grupta & Saul, 1996; Lee et al., 2002; Le et al., 2004; Göbel et al., 2007) i naziva se sezonsko prvo spiranje. Teški metali su prisutni u oticaju sa urbanih površina i sa saobraćajnica, a blizina saobraćajnice i intenzitet saobraćaja utiču na povećanje količine teških metala u oticaju (Lee et al., 2002). Pojava prvog spiranja je veoma izražena kod oticaja sa krovova, (Francey et al. 2010) a materijal krovne obloge utiče na kvalitet oticaja (Athanasiadis et al. 2010).

REGULATIVA U REPUBLICI SRBIJI KOJA SE ODNOSI NA URBANO ODVODNJAVANJE

Skupština Republike Srbije je 2010. godine usvojila Zakon o vodama koji uključuje veći deo osnovnih postavki iz Okvirne direktive o vodama EU (*eng.* WFD), uključujući obavezu dostizanja dobrog statusa vodnih tela površinskih voda. Međutim, još uvek kasni izrada i

usvajanje podzakonskih akata i planova upravljanja vodama. Redovna kontrola (monitoring) količina i kvaliteta vode u sistemima za urbano odvodnjavanje do danas nije uspostavljena. Na osnovu člana 31. prema stavu 1. Zakona o vodama („Službeni glasnik RS”, br. 30/10, 93/12 i 101/16) i člana 45. prema stavu 1. Zakona o Vladi („Službeni glasnik RS”, br. 55/05, 71/05 – ispravka, 101/07, 65/08, 16/11, 68/12 – US, 72/12, 7/14 – US i 44/14), Vlada je donela Strategiju upravljanja vodama na teritoriji Republike Srbije do 2034. godine. U okviru ove Strategije opisana je regulativa koja se odnosi na zaštitu vode od zagađivanja. U prethodnom periodu u Republici Srbiji nije bio uspostavljen adekvatan odnos prema zaštiti voda od zagađivanja, iako je koncept zaštite prema postojećoj zakonskoj regulativi bio dobro osmišljen.

POKRETANJE I TRANSPORT ZAGAĐUJUĆIH MATERIJA OTICAJEM SA URBANIH POVRŠINA

Spiranje zagađujućih materija predstavlja rezultat erozije, resuspenzije i transporta materija površinskim oticajem, koji se javlja tokom padavina. Znanje o procesima spiranja zagađenja sa površine i koncentracije zagađenja u oticaju su od fundamentalnog značaja u predviđanju opterećenja zagađenjem u oticaju sa nekog sliva (Hvitved-Jacobsen et al., 2010). Empirijska jednačina koja opisuje odnos između količine spranog zagađenja W (masa) sa nepropusne površine A (površina) tokom kišnog događaja koji je proizveo prosečni specifični oticaj q (dužina · vreme⁻¹) prikazuje se kao (1):

$$W = a \cdot A \cdot \left(\frac{q}{A}\right)^b \quad (1).$$

U jednačini (1) su a , b empirijski koeficijenti i odnose se na određeni sliv, i vrednosti koeficijenata a i b variraju u širokim granicama između različitih slivova. Do sada je napravljeno samo nekoliko pokušaja da se opiše proces spiranja na konceptualni način. Primer takvog opisa je kompleks modela koji je razvijen na osnovu teorije za transport taloga u kanalima (Hvitved-Jacobsen et al., 2010). U okviru ovog modela povezano je odvajanje čestica od podloge sa energijom kišnih kapi pri udaru o površinu, a transport čestica u oticaju je proporcionalan protoku i tangencijalnom naponu na dnu. Model još uvek nije dovoljno razvijen da bi bio pogodan za korišćenje. U upotrebi su najčešće empirijske jednačine spiranja i odnošenja zagađenja.

EKSPERIMENTALNI DEO – ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA OTICAJA SA URBANIH POVRŠINA ODABRAN NA EKPERIMENTALNOM SLIVU

U cilju sprovođenja istraživanja i određivanja koeficijenta oticaja sa urbanih površina odabran je postojeći ekperimentalni sliv na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu (slika 1) lociran u centru Beograda, između ulica Bulevar kralja Aleksandra, Ruzveltove ulice i ulice 27. marta.

Eksperimentalni sliv obuhvata interne saobraćajnice (asfalt), parkirališta (asfalt ili kamena kocka zalivena cementom), trotoar (betonske ploče zalivene cementom), metalni krov i zelene površine. Eksperimentalni sliv se nalazi oko 30 m od okolnih gradskih ulica i odvojen

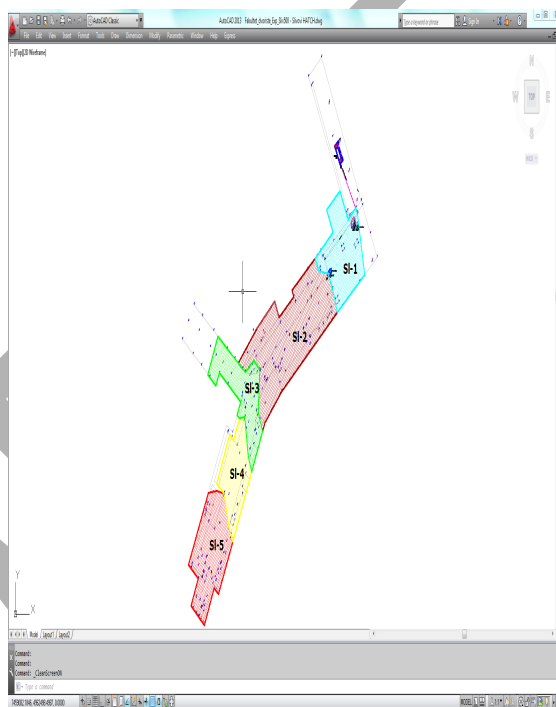
je od njih 0,7 m visokim betonskim zidom i, delimično, zelenilom.

Na eksperimentalnom slivu postoji ukupno 4 vrste (tipa) površina:

- saobraćajne površine za motorna vozila (asfalt, kamen),
- pešačke staze (beton),
- krovovi (pocinkovani lim) i
- zelene površine.

Sa svakog tipa površina zahvatani su uzorci.

Na slici 1 jedan prikazana je šema eksperimentalnog sliva. Slivna površina SI-1, ukupne površine 584 m², se sastoji od travnatih površina, betonskih staza i dela krova zgrade Instituta za fiziku, čiji oticaj se preko oluka izliva na betonsku stazu, koji se drenira u kanal. Slivne površine SI-2, SI-3 SI-4 i SI-5, čije su ukupne površine redom 1229 m², 483,9 m², 410,2 m², 624,4 m², obuhvataju kolovozne površine, pešačke staze i zelene površine.



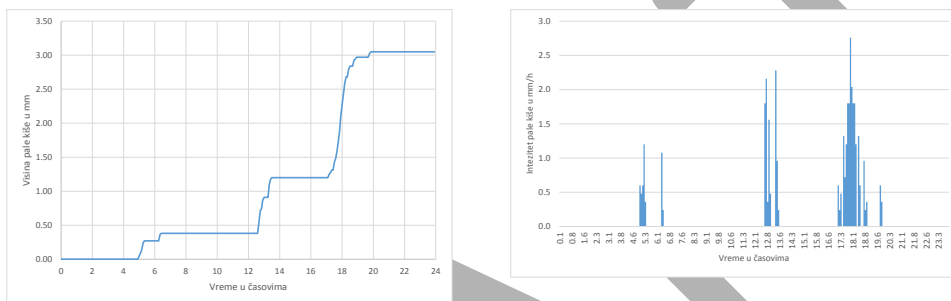
Slika 1. Šema eksperimentalnog sliva
Figure 1. The experimental catchmen's layout

Na eksperimentalnom slivu, u podslivu SI-1 instaliran je automatski kišomer – pluviograf tip PLUVIO 2 (proizvođač: OTT Messtechnik GmbH & Co, Kempten, Germany), koji se bazira na merenju mase padavina. Izvori zagađenja na slivu su: motorni saobraćaj na samoj površini sliva i aerozagađenje iz okolnih prometnih gradskih ulica.

MERENJE PADAVINA

Korišćeni podaci su podaci o kišama registrovani na kišomeru koji je lociran na slivu, unutar dvorišta Građevinskog fakulteta.

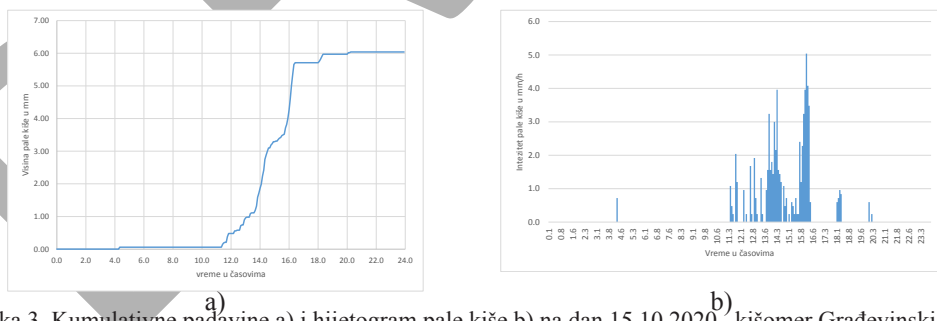
Ukupna visina pale kiše 30. septembra 2020. g. je bila 3,05 mm. Ovog dana nije bilo moguće uzorkovati oticaj sa zelenih površina jer je poznato da je potrebno da padne nekoliko mm kiše pre nego što započne oticaj sa zelenih površina. Kumulativne padavine i hijetogram za dan 30. septembar 2020. su dati na slici 2.



Slika 2. Kumulativne padavine a) i hijetogram pale kiše b) na dan 30.09.2020., kišomer Građevinski fakultet

Figure 2. Cumulative rainfall curve a) and hyetograph b) 30.09.2020., rain gauge Faculty of Civil Engineering

Ukupna visina pale kiše 15. oktobra je bila 6,00 mm. Uzorkovanje je izvršeno sa svih površina jer je sa svih površina generisan kišni oticaj. Kumulativne padavine i hijetogram za dan 15. septembar 2020. su dati na slici 3.



Slika 3. Kumulativne padavine a) i hijetogram pale kiše b) na dan 15.10.2020., kišomer Građevinski fakultet

Figure 3. Cumulative rainfall curve a) and hyetograph b) 15.10.2020., rain gauge Faculty of Civil Engineering

REZULTATI – PROCENA OPTEREĆENJA OTICAJA SA URBANIH POVRŠINA ZA ANALIZIRANE EPIZODE

Za određivanje ukupnih zagađenja sa analiziranog sliva usvojeni su sledeći ukupni koeficijenti oticaja, prema preporukama iz literature:

- metalni krov: 0,95
- asfalt, beton, obloga od kamena zalivena u cementnom malteru: 0,80
- zelene površine: 0,20.

Karakteristike oticaja od 30. septembra 2020.

U tabeli 1 date su ukupne količine pojedinih zagađujućih materija koje su sprane kišnim oticajem tokom kišne epizode 30. septembra sa eksperimentalnog sliva na Građevinskom fakultetu.

Tabela 1. Količine odnetog zagađenja sa eksperimentalnog sliva 30. septembra 2020.
Table 1. Pollution removed from the experimental basin on 30. September 2020.

Parametar	Količina materijala odneta oticajem (kg)			Ukupno
	Krov	Pešačke staze	Saobraćane površine	
TSS	0,0010	0,0123	0,2029	0,2162
TDS	0,0439	0,1425	0,6551	0,8416
BPK ₅	0,0011	0,0075	0,0778	0,0863
TOC	0,0024	0,0135	0,1057	0,1215
Ukupan azot	0,0009	0,0031	0,0021	0,0061
Ukupan fosfor	8,95E-06	0,0004	0,0006	0,0011
Hloridi	0,0008	0,0050	0,0182	0,0240
Sulfati	0,0029	0,0077	0,0355	0,0460
Ukupni cink	0,0002			

U uzorcima nije detektovano gvožđe, bakar, hrom, naftni ugljovodonici, živa, kadmijum i olovo. Koristeći podatke iz tabele 1, mogu se proceniti godišnje količine zagađenja koje se spiraju sa jednog hektara neke površine. Ovu procenu treba uzeti sa velikom rezervom, jer uslovi koji vladaju tokom jedne kišne epizode se ne mogu ekstrapolovati na period od jedne godine, ali ova procena je rađena sa prvenstvenom namerom da se uporede dobijeni rezultati sa literaturnim podacima. U tabeli 2 date su procenjene vrednosti koeficijenata opterećenja za različite materije u kg/ha/god, prema merenjima od 30. septembra 2020. godine.

Tabela 2. Koeficijenti opterećenja - godišnje količine odnetih materija sa različitih površina u kg/ha/god (procena prema podacima od 30. septembra)

Table 2. Load coefficients - annual amounts of substances introduced from different areas in kg/ha/year (estimated according to data from September 30)

Parametar	Godišnja količina materija odneta oticajem (kg/ha/god)		
	Krov	Pešačke staze	Saobraćajne površine
TSS	22,2	61,6	268,8
TDS	968,7	711,2	868,0
BPK ₅	24,2	37,2	103,0
TOC	52,5	67,2	140,0
Ukupan azot	20,1	15,4	2,8
Ukupan fosfor	0,2	2,1	0,8
Hloridi	17,3	24,9	24,1
Sulfati	63,0	38,4	47,0
Ukupni cink	3,6		

Karakteristike oticaja od 15. oktobra 2020.

Slično kao i za prethodno opisane kiše, u tabeli 3 date su ukupne količine pojedinih zagađujućih materija koje su sprane kišnim oticajem tokom kišne epizode 15. oktobra sa eksperimentalnog sliva na Građevinskom fakultetu, a u tabeli 4 date su procenjene vrednosti koeficijenata opterećenja za različite materije u kg/ha/god, prema merenjima od 15. oktobra 2020. godine.

Tabela 3. Količine odnetog zagađenja sa eksperimentalnog sliva 15. oktobra 2020.

Table 3. Pollution removed from the experimental basin on 15. october 2020.

Parametar	Količina materija odneta oticajem (kg)				Ukupno
	Krov	Pešćane staze	Saobraćajne površine	Zelene površine	
TSS	0,0096	0,3629	3,4652	0,2651	4,1029
TDS	0,0424	0,3955	1,0044	0,1376	1,5799
BPK ₅	0,0015	0,0185	0,0795	0,0313	0,1308
TOC	0,0036	0,0328	0,1088	0,0188	0,1640
Ukupni azot	0,0007	0,0091	0,0069	0,0055	0,0223
Ukupni fosfor	0,0007	0,0021	0,0136	0,0016	0,0181
Hloridi	0,0009	0,0112	0,0557	0,0039	0,0716
Sulfati	0,0053	0,0291	0,0540	0,0099	0,0983
Ukupni cink	0,0003	0,0002	0,0004	0,0001	0,0010
Naftni ugljovodonici	-	-	0,0015	0,0001	0,0016

Tabela 4. Koeficijenti opterećenja - godišnje količine odnetih materija sa različitih površina u kg/ha/god (procena prema podacima od 15. oktobra)

Table 4. Load coefficients - annual amounts of substances introduced from different areas in kg/ha/year (estimated according to data from October 15)

Parametar	Godišnja količina materija odneti oticajem (kg/ha/god)			
	Krov	Pešačke staze	Saobraćajne površine	Zelene površine
TSS	106.40	914.67	2318.40	296.80
TDS	472.15	996.80	672.00	154.00
BPK ₅	16.63	46.67	53.20	35.00
TOC	39.90	82.69	72.80	21.00
Ukupan azot	8.25	22.96	4.65	6.16
Ukupan fosfor	8.01	5.21	9.13	1.82
Hloridi	9.64	28.19	37.24	4.34
Sulfati	59.19	73.36	36.12	11.06
Ukupan cink	3.86	0.43	0.28	0.12
Naftni ugljovodonici			1.01	0.15

Poređenjem sa podacima za 30. septembar, može se primetiti da je TSS višestruko uvećan, dok je TDS prisutan u nižim koncentracijama. Nešto niže vrednosti su dobijene za BPK₅, TOC i ukupan azot, dok su izmerene vrednosti za ukupni fosfor su nekoliko puta veće 15. oktobra nego 30. septembra, što treba dodatno ispitati i proveriti.

Za razliku od 30. septembra, 15. oktobra u uzorcima sa svih površina detektovan je cink. Iako su koncentracije niske (osim u uzorcima oticaja sa krova, što je očekivano jer krov ima metalnu oblogu), ipak je cink prisutan. Takođe u jednom uzorku sa kolovoza i jednom uzorku sa zelenih površina detektovani su naftni ugljovodonici, što verovatno ukazuje na pojavu akcidentnog curenja goriva/maziva iz nekog vozila, ili neovlašćenog odlaganja na asfaltnim/zelenim površinama.

Kao ni u prvoj seriji uzorkovanja, u uzorcima nije detektovano gvožđe, bakar, hrom, živa, kadmijum i olovo.

Poređenjem dve serije merenja može se zaključiti da postoji manje ili veće rasipanje rezultata, kao što su i ranija istraživanja prezentovana u literaturi pokazala.

REZULTATI – PRIMENA MERENIH REZULTATA NA PROCENU GODIŠNJIH KOLIČINA SPRANIH MATERIJIA SA URBANIH POVRŠINA.

Mereni rezultati mogu biti upotrebljeni za procenu količina pojedinih materija koji se spiraju sa urbanih slivova, pod pretpostavkom da je poznat udeo pojedinih tipova površina na slivu. Za pouzdaniju ocenu i procenu vrednosti ovih veličina potrebno je sprovesti više merenja na različitim urbanim slivovima i u različitim sezonama.

U tabeli 5, date su ponderisane vrednosti koeficijenata opterećenja, po razmatrana 4 tipa urbanih površina prema rezultatima ispitivanja.

Tabela 5. Ponderisane vrednosti koeficijenata opterećenja - godišnje količine odnetih materija sa različitih površina analiziranog sliva u kg/ha/god za obe serije merenja

Table 5. Estimated values of loading coefficients - annual quantities of substances removed from different areas of the analyzed catchment in kg/ha/year for both series of measurements

Параметар	Godišnja količina materija odneta oticajem (kg/ha/god)			
	Krov	Pešačke staze	Saobraćajne površine	Zelene površine
BPK ₅	19,15	43,50	69,92	35,00
TOC	44,14	77,49	95,35	21,00
Ukupan azot	12,22	20,42	4,03	6,16
Ukupan fosfor	5,39	4,18	6,35	1,82
Hloridi	12,21	27,09	32,82	4,34
Sulfati	60,45	61,62	39,78	11,06
Ukupan cink	3,77	0,29	0,19	0,12

U tabeli nisu priloženi rezultati za TSS, TDS zbog velike varijabilnosti izmerenih podataka, odnosno zbog malog broja uzoraka gde su materije detektovane (naftni ugljovodonici).

Korišćenjem vrednosti iz tabele 5, uz poznate udele pojedinih površina na slivu mogu se dobiti zbirne vrednosti koeficijenata opterećenja za celi konkretan sliv u jedinicama kg/ha/god.

ZAKLJUČAK

Merenja su pokazala da u zavisnosti od površine sa koje dolazi do spiranja kišnog oticaja zavisi i kvalitet oticaja. Primećeno je veliko rasipanje podataka, što je i očekivano prema dosadašnjim istraživanjima i podacima iz literature. Merenjima kvaliteta uzoraka urbanog oticaja nisu detektovani gvožđe, bakar, hrom, živa, kadmijum i olovo u oticaju. Naftni ugljovodonici su detektovani u samo dva uzorka. Neophodna je znatno veća baza podataka, odnosno veći broj merenja za izvođenje pouzdanijih zaključaka. Potrebno je nastaviti sa merenjima, obuhvatiti sve sezone i tek tada dati ocenu i izračunati koeficijente opterećenja. Poželjno je odrediti i intervale poverenja za koeficijente opterećenja za pojedine materije.

LITERATURA

- Athanasiadis K., Horn H., Helmreich B. (2010) A field study on the first flush effect of copper roof runoff. *Corrosion Science* 52 (2010) 21–29
- Bach P.M., McCarthy D.T., Deletic A. (2010) Redefining the stormwater first flush phenomenon. *Water Research* 44 (2010) 2487–2498
- Barco J., Papiri S., Stenstrom M.K. (2008) First flush in a combined sewer system. *Chemosphere* 71 (2008) 827–833

- Chebbo G., Gromairea M.C. (2004) The experimental urban catchment 'Le Marais' in Paris: what lessons can be learned from it? *Journal of Hydrology* 299 (2004) 312–323
- Đukić A.R., Modeliranje emisije zagađenja kišnog oticaja sa urbanih slivova, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultat, Beograd. 2016
- Francey M., Fletcher T.D., Deletic A., Duncan H. (2010) New Insights into the Quality of Urban Storm Water in South Eastern Australia. *Journal of Environmental Engineering* 136, 381-390
- Göbel P., Dierkes C., Coldewey W.G. (2007) Storm water runoff concentration matrix for urban areas, *Journal of Contaminant Hydrology* 91 (2007) 26 – 42
- Gupta K. and. Saul A.S. (1996) Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. *Water Research* 30, 1244-1252
- Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A. (2010) *Urban and Highway Stormwater Pollution-concepts and Engineering*. CRC Press. Taylor&Francis Group, Boca Raton, FL, USA.
- Lee H., Lau S.L., Kayhanian M., Stenstrom M.K. (2004) Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges. *Water Research* 38 (2004) 4153–4163
- Lee J.H., Bang K.W., Ketchum L.H., Choe J.S., Yu M.J. (2002) First flush analysis of urban storm runoff. *The Science of the Total Environment* 293 (2002) 163–175
- Sabin L.D., Lim J.H., Venezia M.T., Winer A.M., Schiff K.C., Stolzenbach K.D. (2006) Dry deposition and resuspension of particle-associated metals near a freeway in Los Angeles. *Atmospheric Environment* 40 (2006) 7528–7538