

UNIVERZITET U BEOGRADU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Aleksandar R. Đukić

**MODELIRANJE EMISIJE ZAGAĐENJA  
KIŠNOG OTICAJA SA  
URBANIH SLIVOVA**

doktorska disertacija

Beograd, 2016.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Aleksandar R. Đukić

**MODELING OF POLLUTION EMISSIONS  
FROM URBAN CATHMENTS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

## PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor: Dr Branislava Lekić, docent  
Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Komentor: Dr Dušan Prodanović, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Članovi komisije: Dr Ljubinka Rajaković, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Tehnološko-metalurški fakultet

Dr Miloš Stanić, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Dr Zorana Naunović, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Datum odbrane doktorske disertacije: \_\_\_\_\_

## ZAHVALNICA

Želim da izrazim veliku zahvalnost svom mentoru, doc. dr Branislavi Lekić na dragocenim savetima i velikoj pomoći tokom izrade disertacije. Zahvalan sam komentoru prof. dr Dušanu Prodanoviću i članovima komisije prof. dr Ljubinki Rajaković, v.prof. dr Milošu Staniću i v.prof. Zorani Naunović na korisnim savetima i podršci.

Svoju zahvalnost na pomoći u realizaciji istraživanja dugujem i:

- doc. dr Vladani Rajaković-Ognjanović i Mirjani Kmezić na pomoći u realizaciji laboratorijskih istraživanja,
- v.prof. dr Jovanu Despotoviću na pomoći u organizaciji eksperimentalnih istraživanja,
- prof. dr Tatjani Vulić sa Univerzitetu u Novom Sadu, Tehnološki fakultet i dr Đorđu Veljoviću sa Univerziteta u Beogradu - Tehnološko-metalurški fakultet na pomoći u sprovođenju analiza čvrste faze uzoraka,
- v.prof. dr Branislavu Bajatu na pomoći u pripremi geodetskih podloga eksperimentalnog sliva na kojem su vršena istraživanja u okviru ove disertacije,
- osoblju Laboratorije za mehaniku tla Građevinskog fakulteta u Beogradu na pomoći u sprovođenju granulometrijskih analiza.

Zahvalan sam doc. dr Branislavu Babiću na prijateljskim savetima i pomoći tokom izrade disertacije.

Posebnu zahvalnost dugujem supruzi Aleksandri na bezgraničnom razumevanju i podršci.

## MODELIRANJE EMISIJE ZAGAĐENJA KIŠNOG OTICAJA SA URBANIH SLIVOVA

### Rezime

U cilju istraživanja procesa emisije zagađenja sa urbanih slivova u okviru ove disertacije izvršena je teorijska i eksperimentalna analiza i modeliranje kišnog oticaja sa eksperimentalnog sliva koji je formiran u dvorištu Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Sliv pokriva preko 3300 m<sup>2</sup>, od čega skoro dve trećine su nepropusne površine. Metodom mokrog usisavanja su izvršene serije zahvatanja uzoraka sa nepropusnih površina sliva, u cilju određivanja akumulisanja i priraštaja zagađenja na površinama od asfalta (saobraćajne površine), betona (trotoar namenjen pešacima) i kamena (nije u direktnom kontaktu sa bilo kojim vidom saobraćaja). U zahvaćenim uzorcima su određivani pH, elektroprovodljivost, suvi ostatak, suspendovane materije, hemijska potrošnja kiseonika, mutnoća, ukupni azot i fosfor, katjoni i teški metali, a u nekim uzorcima i organska jedinjenja. Deo uzoraka je podvrgnut separaciji čvrste i tečne faze, određen je granulometrijski sastav izdvojene čvrste faze i sadržaj zagađenja u svakoj granulometrijskoj frakciji. Zatim su frakcije čvrstih čestica ispitivane savremenim analitičkim metodama karakterizacije u cilju definisanja njihove specifične površine, veličine i zapremine pora, karakteristika i sastava površina čestica i mineraloškog sastava.

Ispitivanja akumulisanja zagađenja su ukazala da postoji trend usporavanja akumulisanja zagađenja tokom vremena, odnosno da masa zagađenja po jedinici nepropusne površine teži zasićenju. Najveća masa zagađenja je izmerena na asfaltnim površinama, zatim na betonu a najmanja na kamenu. Ovo ukazuje na to da je akumulisanje zagađenja veće na površinama sa većom hrapavošću. Od ispitivanih površina, površine pod direktnim uticajem motornog saobraćaja imaju najveću akumulaciju zagađenja. Izvršena je detaljna analiza merenih podataka u cilju modeliranja akumulisanja i priraštaja zagađenja na nepropusnim površinama. Pored već poznatih i korišćenih funkcija, ispitani su i novi oblici funkcija koje su pokazale dobro prilagođavanje mernim rezultatima. Poredeći dobijene rezultate u pogledu mase akumulisanih materija po jedinici površine sa rezultatima drugih istraživanja datih u literaturi, može se zaključiti da je akumulisanje zagađenja na ispitanom eksperimentalnom slivu znatno veće nego na drugim lokacijama, što je posledica odsustva redovnog održavanja i čišćenja.

Rezultati ispitivanja ukazuju da su dnevni priraštaji zagađenja na površinama ispitanog sliva znatno veće u letnjim meseima nego u jesen. Pri tome su dnevni priraštaji zagađenja na asfaltu znatno veći nego na betonu, a najmanji su na kamenu, što je u skladu sa načinom korišćenja ovih površina.

Utvrđena je veoma dobra korelacija između pojedinih parametara kvaliteta: mutnoća, suvi ostatak i suspendovane materije su u dobroj korelaciji. Mutnoća i suspendovane materije su takođe dobro korelisani sa hemijskom potrošnjom kiseonika, ukupnim fosforom, sadržajem teških metala i sulfatima. S obzirom na jednostavan način merenja suspendovanih materija i mutnoće, oni su predloženi za parametre preko kojih bi se procenjivalo zagađenje kišnog oticaja sa eksperimentalnog sliva u realnom vremenu. Takođe u diseraciji je pokazano da se preko suspendovanih materija može uspešno modelirati emisija niza drugih parametara zagađenja sa sliva. Analiza glavnih komponenti (PCM) ukazuje na to da se rezultati merenja grupišu u odnosu na tip površine, što ukazuje na specifičnosti zagađenja izdvojenih na pojedinim površinama.

Ispitivanja su ukazala na znatno više koncentracije svih zagađenja u sitnijim frakcijama čvrstih čestica, uz veoma dobro razdvajanje čvrste i tečne (rastvorene) faze teških metala u uzorcima. Ispitivane čvrste čestice su makroporozni prirodni materijali niske specifične površine, pa je zaključeno da bi glavni uzrok dobrog razdvajanja čvrste i rastvorene faze teških metala u ispitivanim uzorcima mogao biti proces taloženja.

Za potrebe modeliranja procesa padavine-oticaaj, akumulisanja, pokretanja i transporta zagađenja sa eksperimentalnog sliva, razvijena su dva modela: (a) 1,5D model površinskog tečenja sa detaljnom mrežom površinskih kanala i nizom slivnih površina u skladu sa digitalnim modelom terena sliva, i (b) uprošćeni model sliva gde je površinsko tečenje sa sliva shematizovano preko osam slivnih površina i isto toliko površinskih kanala. Modeliranje je urađeno u okruženju programskog paketa EPA SWMM. Modeliranje akumulisanja i spiranja zagađenja izvršeno je korišćenjem zavisnosti dobijenih eksperimentalnim ispitivanjima, a transport zagađenja po površini terena, do ulaska u kanalizaciju, je modeliran metodom dinamičkog talasa. Rezultati ukazuju da je 1,5D modelom moguće uspešno modelirati površinski oticaj i spiranje zagađenja, uključujući procese transporta dominantnim pravcima i lokalna zadržavanja vode i zagađenja na površini terena. Uprošćeni model može sa prihvatljivom tačnošću modelirati ukupnu emisiju zagađenja, uz znatno kraće trajanje proračuna u odnosu na 1,5D model.

**Ključne reči:** urbani slivovi, oticaj, zagađenje, akumulisanje, razdvajanje, modeliranje, dinamički talas

**Naučna oblast:** Građevinarstvo

**Uža naučna oblast:** Komunalno i sanitarno inženjerstvo, Ekološko inženjerstvo

**UDK:** 628.2/.3(043.3)

## **MODELLING OF POLLUTION EMISSIONS FROM URBAN CATCHMENTS**

### **Abstract**

An experimental catchment was established on the grounds of the University of Belgrade - Faculty of Civil Engineering. Theoretical and experimental rainfall-runoff analysis and modelling were performed in an experimental catchment within the framework of this thesis for the purpose of conducting research on pollution emissions from urban catchments. The experimental catchment covers an area of over 3300 m<sup>2</sup>, of which almost two thirds are comprised of impervious surfaces. Using the wet vacuum sweeping method, a series of samples were taken from the impervious catchment surfaces in order to determine pollution build-up and accumulation rates on asphalt (road surfaces), concrete (pedestrian walkways) and stone (not in direct contact with any type of traffic) surfaces. The samples were analysed for pH, conductivity, total solids, total suspended solids, chemical oxygen demand, turbidity, total nitrogen, total phosphorus, cations and heavy metals, while some samples were analysed for specific organic compounds. A portion of the samples was subjected to liquid-solid phase separation where the grain size distribution of the separated solids and pollutant content in each particle size fraction were determined. Solid particle fractions were then tested using advanced analytical characterization techniques to determine their composition, specific surface area, pore volume and size, surface characteristics and composition, and mineralogical composition.

Pollution build-up analysis has shown that there is a gradual decrease in pollution build-up on impervious surfaces over time, when the mass of pollution per unit of surface area approaches saturation point. The greatest amount of accumulated pollution was measured on asphalt, followed by concrete and finally, the lowest amount was detected on stone surfaces. This indicates that accumulation was greater on surfaces with higher roughness. Among the investigated surfaces, the highest contaminant accumulation was detected on surfaces directly exposed to motor vehicle traffic. A detailed analysis of the measured data was conducted for the purpose of modelling of pollution build-up on impervious surfaces using previously known and tested equations alongside new equations, which have shown a good fit to the measured results. By comparing the surface results of contaminant accumulation with the results of other studies presented in the literature, it can be concluded that pollution accumulation in the investigated experimental catchment in Belgrade is significantly greater than at other locations, which may be attributed to a lack of regular maintenance and cleaning.

Investigation results indicate that the daily pollution build-up rate on the examined catchment surface is significantly higher in summer than in autumn. In addition, the daily pollution build-up rate on asphalt is significantly higher than on concrete, while stone had the lowest rate, which is consistent with the type of surface use.

A good correlation was found between turbidity, total solids and total suspended solids. Turbidity and suspended solids are also well correlated with chemical oxygen demand, total phosphorus, heavy metal content and sulphates. Therefore these parameters have been proposed as surrogate parameters for the assessment of runoff pollution loads from the experimental catchment in real time. Additionally, the conducted research has proven that suspended solids can be used as a surrogate parameter for modelling of emissions of other pollutants from the catchment with reasonable accuracy. Principal component analysis (PCA) reveals the grouping of the measurement results according to the surface type, indicating the specificity of pollution on certain types of surfaces, which should be further explored.

Tests have determined significantly higher concentrations of pollution in finer particle size fractions, with a strong partition between the solid and liquid phases of heavy metals in all samples. The examined solid particles were macro porous natural materials with a low specific surface area, and it was concluded that precipitation was the phenomenon responsible for good partitioning of the solid and liquid phase of heavy metals in the analyzed samples.

For analyses of rainfall-runoff, build-up, wash-off and pollution transport on the experimental catchment, two models have been developed: (a) 1.5D surface runoff flow model with a detailed surface channel network and a number of catchment areas in accordance with a digital terrain model of the catchment, and (b) a simplified model of the catchment with a total of eight subcatchments and surface channels as conduits. The modelling was done in the EPA SWMM software package environment. Modelling of pollution build-up and wash-off was performed using the build-up and wash-off functions obtained in the investigation of the samples taken from impervious surfaces within the catchment. Surface runoff flow was modelled using the dynamic wave method. The results indicated that the 1.5D model can successfully predict surface runoff and pollutant wash-off, including surface flow along routes with the highest slopes and local surface retention of water and pollutants. The simplified model can, with reasonable accuracy, assess the total emission of pollution from the catchment, in a much shorter computational time compared to the 1.5D model.

**Key words:** urban catchments, runoff, pollution, build-up, partitioning, modelling, dynamic wave

**Research Area:** Civil Engineering

**Specific Research Areas:** Municipal Hydraulic Engineering, Environmental Engineering

**UDC:** 628.2/.3(043.3)



Radovi koji su proistekli iz ove disertacije

Rad u vrhunskom međunarodnim časopisu (M21):

**Đukić A.**, Lekić B., Rajaković-Ognjanović V., Veljović Đ, Vulić T., Đolić M., Naunović Z., Despotović J., Prodanović D., (2016), Further Insight into the Mechanism of Heavy Metals Partitioning in Stormwater Runoff, Journal of Environmental Management, 168, 104-110. doi:10.1016/j.jenvman.2015.11.035 (IF: 3.895)

Rad na međunarodnom skupu (M33):

Naunovic Z., Randelović A., Kostić D., Rajaković-Ognjanović V., Jovanović B., **Đukić A.**, Pavlović D., Prodanović D., (2012), Water Quality Monitoring and Treatment in an Experimental Catchment, 9th International Conference on Urban Drainage Modelling", Belgrade, 2012, ISBN 978-86-7518-156-9

Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja (M51):

**Đukić A.**, Krunić B., Lekić B., Rajaković Ognjanović V., Naunović Z., (2015), Contaminant Buildup and Distribution on Urban Impervious Surfaces at Parking Lots, Water Research and Management, Vol. 5, No 4, Serbian Water Pollution Control Society, 25-33, ISSN 2217-5237

Radovi na skupovima nacionalnog značaja (M63):

**Đukić A.**, Lekić B., Rajković-Ognjanović V. (2014), Karakteristike materijala akumuliranih na urbanim površinama i kvalitet kišnog oticaja, 43. konferencija "VODA 2014", 3.-5. jun 2014., Tara, Izdavač: Srpsko društvo za zaštitu voda, ISBN 978-86-916753-1-8, 373-376

**Đukić A.**, Lekić B., Prodanović D., Rajaković-Ognjanović V., Ljubisavljević D., Vasilić Ž., (2013), Eksperimentalno izučavanje kišnog oticaja u urbanim područjima, 42. konferencija "VODA 2013", 4.-6. jun 2013., Perućac, Izdavač: Srpsko društvo za zaštitu voda, ISBN 978-86-916753-0-1, 321-328

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. PREDMET NAUČNOG ISTRAŽIVANJA .....	1
1.2. CILJ NAUČNOG ISTRAŽIVANJA.....	3
1.3. ZADACI ISTRAŽIVANJA.....	4
1.4. POLAZNE HIPOTEZE.....	5
<b>2. PREGLED SAZNANJA IZ OBLASTI ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>6</b>
2.1. KOLIČINE I POREKLO ZAGAĐENJA NA URBANIM POVRŠINAMA....	6
2.1.1. Akumulisanje zagađenja na urbanim površinama.....	6
2.1.2. Pokretanje i transport zagađenja oticajem sa urbanih površina.....	8
2.2. KVALITET OTICAJA SA URBANIH POVRŠINA I SAOBRAĆAJNICA .....	10
2.2.1. Procesi u vodama od značaja za kvalitet oticaja.....	10
2.2.2. Koncentracije zagađenja u oticaju.....	12
2.2.3. Ukupne količine zagađenja u oticaju sa urbanih površina .....	14
2.2.4. Efekti zagađenja u urbanom oticaju na životnu sredinu.....	15
2.3. ZAHTEVI U POGLEDU ZAŠTITE VODNIH RESURSA OD ZAGAĐENJA .....	18
2.3.1. Regulatorika u SAD.....	19
2.3.2. Regulatorika u Evropskoj Uniji .....	21
2.3.3. Regulatorika u Republici Srbiji .....	22
2.4. KRITIČKI OSVRT NA REZULTATE DO SADA OBAVLJENIH ISTRAŽIVANJA.....	23
<b>3. EKSPERIMENTALNI DEO.....</b>	<b>25</b>
3.1. UZORKOVANJE MATERIJALA SA NEPROPUSNIH POVRŠINA .....	25
3.1.1. Lokacija uzorkovanja .....	25
3.1.2. Metode uzorkovanja .....	28
3.1.3. Prethodna ispitivanja, uzorkovanje sa asfaltnih površina (Serija I) .....	31

3.1.4.	Uzorkovanje površinskih slojeva snega (Serija II).....	31
3.1.5.	Uzorkovanje sa asfalta, betona i kamena (Serije III, IV i V) .....	32
3.2.	<b>METODOLOGIJA ANALIZE UZORAKA .....</b>	<b>36</b>
3.2.1.	Analiza zbirnih uzoraka i tečne faze.....	36
3.2.2.	Analiza čvrste faze zahvaćenih uzoraka.....	38
<b>4.</b>	<b>MODELIRANJE OTICAJA I EMISIJE ZAGAĐENJA .....</b>	<b>41</b>
4.1.	<b>OSNOVNE POSTAVKE .....</b>	<b>41</b>
4.1.1.	Opšti postupak modeliranja .....	41
4.1.2.	Vrste modela za transport i transformaciju sastojaka.....	42
4.1.3.	Tipovi modela urbanog odvodnjavanja .....	46
4.2.	<b>MODELIRANJE POJEDINIH PROCESA OD ZNAČAJA ZA KVALITET OTICAJA.....</b>	<b>48</b>
4.2.1.	Površinsko oticanje.....	48
4.2.2.	Infiltracija .....	49
4.2.3.	Evaporacija .....	50
4.2.4.	Akumulisanje zagađenja na površini.....	50
4.2.5.	Spiranje zagađenja oticajem sa površine .....	52
4.2.6.	Modeliranje tečenja u mreži kanala i cevi.....	53
4.2.7.	Modeliranje tečenja po površini terena i u mreži kanala.....	56
4.2.8.	Transport i transformacije zagađenja .....	56
4.3.	<b>RAČUNARSKI PROGRAM SWMM .....</b>	<b>57</b>
4.3.1.	Opšte mogućnosti modeliranja .....	58
4.3.2.	Površinsko oticanje.....	60
4.3.3.	Infiltracija .....	60
4.3.4.	Akumulisanje zagađenja na površini.....	60
4.3.5.	Spiranje zagađenja oticajem sa površine .....	61
4.3.6.	Modeliranje tečenja u mreži kanala i cevi.....	61
4.3.7.	Transport i transformacije zagađenja .....	62
4.4.	<b>MODELIRANJE EKSPERIMENTALNOG SLIVA.....</b>	<b>62</b>
4.4.1.	Formiranje shematizovanog modela eksperimentalnog sliva.....	62

4.4.2.	Metodologija za formiranje 1,5D modela za modeliranje površinskog oticanja .....	63
4.4.3.	Formiranje 1,5D modela.....	66
<b>5.</b>	<b>REZULTATI I DISKUSIJA.....</b>	<b>70</b>
5.1.	PRETHODNA ISPITIVANJA, SERIJA I .....	70
5.2.	ANALIZA UZORAKA SNEGA, SERIJA II.....	73
5.3.	ANALIZA UZORAKA ZAHVAĆENIH SA NEPROPUSNIH POVRŠINA, SERIJE III i IV .....	74
5.4.	ANALIZA UZORAKA ZAHVAĆENIH SA NEPROPSUNIH POVRŠINA, SERIJA V .....	79
5.5.	ANALIZA AKUMULISANJA ZAGAĐENJA, SERIJA III .....	81
5.5.1.	Funkcije akumulisanja zagađenja EXP, POW i SAT .....	84
5.5.2.	Nove fukcije akumulisanja zagađenja L-P, L-E i LIN .....	87
5.6.	DNEVNI PRIRAŠTAJI MATERIJNA NA POVRŠINI, SERIJE IV I V .....	91
5.6.1.	Količine zagađenja prema rezultatima merenja uzoraka Serije IV i V ..	91
5.6.2.	Diskusija rezultata i određivanje dnevnih priraštaja zagađenja.....	97
5.7.	ISPITIVANJE ČVRSTE FAZE UZORAKA SA POVRŠINA EKSPERIMENTALNOG SLIVA, SERIJE III I IV.....	103
5.7.1.	Granulometrijska ispitivanja .....	103
5.7.2.	Određivanje specifične površine i veličine pora čestica.....	104
5.7.3.	Morfologija i sastav površine čestica (SEM i EDS analize) .....	106
5.8.	KORELACIJA IZMEĐU MERENIH PARAMETARA .....	112
5.8.1.	Linearna korelacija .....	112
5.8.2.	Analiza glavnih komponenti (PCA) .....	116
5.9.	DISKUSIJA O MOGUĆIM MEHANIZMIMA RAZDVAJANJA FAZA TEŠKIH METALA U ANALIZIRANIM UZORCIMA .....	124
5.10.	MODELIRANJE OTICAJA I EMISIJE ZAGAĐENJA.....	126
5.10.1.	Modeliranje oticaja.....	126
5.10.2.	Modeliranje zagađenja.....	130
5.10.3.	Rezultati modela - akumulisanje zagađenja .....	131
5.10.4.	Rezultati modela - spiranje zagađenja .....	131

5.10.5.	Uticaj trajanja kiše .....	133
5.10.6.	Uticaj intenziteta kiše .....	133
5.10.7.	Uticaj visine pale kiše.....	134
5.10.8.	Ukupna emisija zagađenja i preostalo zagađenje na površini za kiše istog povratnog perioda .....	134
5.10.9.	Uticaj oblika hijetograma na emisiju zagađenja.....	136
5.10.10.	Modeliranje emisije zagađenja surogat parametrom.....	136
5.10.11.	Osetljivost modela na promenu ulaznih parametara.....	140
<b>6.</b>	<b>ZAKLJUČCI.....</b>	<b>142</b>
6.1.	AKUMULISANJE ZAGAĐENJA .....	142
6.2.	DNEVNI PRIRAŠTAJ ZAGAĐENJA .....	143
6.3.	ISPITIVANJA ČVRSTE FAZE.....	144
6.4.	KORELACIJA PARAMETARA .....	145
6.5.	RAZDVAJANJE FAZA TEŠKIH METALA U ISPITANIM UZORCIMA	146
6.6.	MODELIRANJE OTICAJA I ZAGAĐENJA .....	146
6.7.	PREPORUKE ZA IZBOR MERA ZA KONTROLU OTICAJA.....	147
6.8.	PREDLOG ZA DALJA ISTRAŽIVANJA .....	149
<b>7.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>150</b>

Biografija

Izjava o autorstvu

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Izjava o korišćenju

## SPISAK SLIKA

Slika 1-1. Uticaji urbanizacije na količine kišnog oticaja .....	1
Slika 2-1. Shematski prikaz pomene ukupne količine zagađenja na površini kroz vreme usled smene perioda sa i bez padavina .....	6
Slika 2-2. $M(V)$ kriva zavisnosti $f_k$ i $f_q$ .....	13
Slika 2-3. Vremenska skala efekata na vode usled povremenog izlivanja zagađenja .....	16
Slika 2-4. Prostorne i vremenske skale efekata na vodoprijemnike .....	17
Slika 3-1. Pogled iz vazduha na deo parkinga u dvorištu Građevinskog fakulteta u Beogradu gde je formiran eksperimentalni sliv (izvor: <a href="http://www.bing.com/maps/">http://www.bing.com/maps/</a> ).....	25
Slika 3-2. Pregledna situacija eksperimentalnog sliva u Beogradu.....	26
Slika 3-3. Parking Građevinskog fakulteta gde se nalazi sliv (decembar 2012.) .....	26
Slika 3-4. Delineacija eksperimentalnog sliva .....	27
Slika 3-5. Karcher Puzzi 100 usisivač sa mlaznicom za vodu .....	29
Slika 3-6. Postavljanje rama na asfaltnu podlogu .....	29
Slika 3-7. Mokro usisavanje površine: levo usisno crevo, desno rezervoar prljave vode sa uzorkom .....	30
Slika 3-8. Lokacije uzorkovanja materijala sa asfaltnih površina.....	31
Slika 3-9. Raspored mesta za uzorkovanje sa asfalta i betona .....	33
Slika 3-10. Parking Građevinskog fakulteta u Beogradu sa označenim mestima uzorkovanja sa asfalta i betonskog trotoara.....	34
Slika 3-11. Mesto uzorkovanja sa kamena pored ulaza u zgradu Instituta za fiziku u Beogradu.....	35
Slika 3-12. Precizan položaj mesta za uzorkovanje .....	35
Slika 3-13. Algoritam sprovedenih eksperimentalnih procedura .....	38
Slika 4-1. Koncept površinskog oticaja (Rossman 2015) .....	48
Slika 4-2. Prikaz shematskog modela sliva obrazovanog u programskom paketu SWMM.....	63
Slika 4-3. Formiranje digitalnog modela terena.....	64
Slika 4-4. Formiranje slivnih površina i mreže površinskih tokova.....	65
Slika 4-5. Rezultat primene algoritma za formiranje slivnih površina i mreže površinskih tokova .....	66
Slika 4-6. 1,5D model eksperimentalnog sliva sa mrežom površinskih kanala kojom je aproksimirano tečenje po nepropusnim površinama.....	67

Slika 4-7. SWMM model eksperimentalnog sliva prikaz podela na podslivove (nizvodni deo podsliva SI-2).....	68
Slika 5-1. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane asfaltne površine parkinga prema merenjima akumulisanja zagađenja, Serija III (jul 2013.).....	82
Slika 5-2. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane površine trotoara od betonskih ploča prema merenjima akumulisanja zagađenja, Serija III (jul 2013.) .....	83
Slika 5-3. Dijagrami merenih vrednosti i funkcija POW, EXP i SAT, za parametre u uzorcima sa asfaltiranog parkinga (a) i sa betonskog trotoara (b) .....	86
Slika 5-4. Dijagrami merenih vrednosti i funkcija L-P, L-E i LIN, za parametre u uzorcima sa asfaltiranog parkinga (a) i sa betonskog trotoara (b) .....	90
Slika 5-5. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane asfaltne površine parkinga prema merenjima dnevnog priraštaja zagađenja, Serija IV (jul 2013.) .....	92
Slika 5-6. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane površine trotoara od betonskih ploča prema merenjima dnevnog priraštaja zagađenja, Serija IV (jul 2013.).....	93
Slika 5-7. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane asfaltne površine parkinga prema merenjima dnevnog priraštaja zagađenja, Serija V (oktobar 2013.).....	94
Slika 5-8. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane površine trotoara od betonskih ploča prema merenjima dnevnog priraštaja zagađenja, Serija V (oktobar 2013.) .....	95
Slika 5-9. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane površine kamenog podesta prema merenjima dnevnog priraštaja zagađenja, Serija V (oktobar 2013.).....	96
Slika 5-10. Komparativna analiza fitovanih krivih i rezultata merenja uzoraka Serije V zahvaćenih sa asfaltiranog parkinga (a), betonskog trotoara (b) i kamena (k) .....	101
Slika 5-11. Granulometrijska kriva ispitivane čvrste faze .....	103
Slika 5-12. Rezultati porozimetrije sa živom: distribucija veličine pora ispitivanih frakcija ....	106
Slika 5-13. FE-SEM mikrografija (a i b) i EDS spektar S1 frakcije (c).....	107
Slika 5-14. FE-SEM mikrografija (a i b) i EDS spektar S2 frakcije (c).....	108
Slika 5-15. FE-SEM mikrografija (a i b) i EDS spektar S3 frakcije (c).....	108
Slika 5-16. FE-SEM mikrografija (a) i EDS spektar S4 frakcije (b).....	109
Slika 5-17. FE-SEM mikrografija (a i b) i EDS spektar S5 frakcije (c).....	110
Slika 5-18. XRD spektar S3 frakcije .....	111
Slika 5-19. Analiza glavnih komponenti (PCA) – biplot za rezultate analiza akumulisanja zagađenja (Serija III, jul 2013.) .....	119
Slika 5-20. Analiza glavnih komponenti (PCA) – biplot za rezultate analiza priraštaja zagađenja (Serija IV, jul 2013.).....	120

Slika 5-21. Analiza glavnih komponenti (PCA) – biplot za rezultate analiza priraštaja zagađanja sa asflata, betona i kamena (Serija V, oktobar 2013.).....	123
Slika 5-22. HTP za pluviografsku stanicu Beograd-Vračar, period obrade 1925-1989.....	127
Slika 5-23. Hidrogrami na izlazu iz svakog podsliva i ukupni hidrogram sa celog eksperimentalnog sliva za kiše trajanja 10, 20 i 60 minuta povratnog perioda 5 godina, izračunati 1,5D modelom (levo) i shematizovanim modelom (desno) .....	129
Slika 5-24. Rezultati modela - akumulisanje materija na celoj nepropunskoj površini sliva.....	131
Slika 5-25. Dijagrami masenog pronosa parametara (polutogrami) za celi sliv za različite povratne periode kiše izračunati 1,5D modelom (levo) i shematizovanim modelom (desno) .....	132
Slika 5-26. Masa spranog i preostalog zagađenja na slivu u zavisnosti od trajanja kiše intenziteta 0,5 mm/min, pre početka kiše bilo je 10 dana bez padavina.....	133
Slika 5-27. Masa spranog i preostalog HPK i TSS na slivu u zavisnosti od intenziteta kiše trajanja 20 min, pre početka kiše bilo je 10 dana bez padavina.....	134
Slika 5-28. Masa spranog HPK i TSS sa sliva za iste visine padavina i različita trajanja kiše, pre početka kiše bilo je 10 dana bez padavina .....	134
Slika 5-29. Emisija zagađenja sa sliva od kiša povratnog perioda 2 godine u zavisnosti od broja uzastopnih dana bez kiše pre početka kišnog događaja .....	135
Slika 5-30. Zavisnost mase preostalog zagađenja na površini od trajanja kiše i broja uzastopnih dana bez kiše pre početka kišnog događaja .....	135
Slika 5-31. Masa zagađenja spranog sa sliva oticajem od kiša trajanja 10 i 30 minuta, različitog oblika hijetograma .....	136
Slika 5-32. Mase HPK u oticaju izračunate sa početnim, maksimalnim i minimalnim vrednostima koeficijenata koji definišu akumulisanje i spiranje zagađenja na površini sliva.....	141
Slika 5-33. Mase TSS u oticaju izračunate sa početnim, maksimalnim i minimalnim vrednostima koeficijenata koji definišu akumulisanje i spiranje zagađenja na površini sliva.....	141



## SPISAK TABELA

Tabela 2-1. Tipična godišnja opterećenja zagađenjem od oticaja sa jedinice površine različiih namena, izražena u kg/ha.god (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).....	15
Tabela 3-1. Površine i udeli različitih tipova površina po podslivovima eksperimentalnog sliva.....	27
Tabela 3-2. Usvojene vrednosti koeficijenta oticaja (Kd) po tipovima površina.....	28
Tabela 3-3. Srednji koeficijenti oticaja po podslivovima eksperimentalnog sliva.....	28
Tabela 3-4. Vreme i mesto zahvatanja uzoraka, avgust 2012. ....	31
Tabela 3-5. Lokacije zahvatanja uzoraka, jul 2013. (Serija III).....	32
Tabela 3-6. Parametri, metode i tehnike za karakterizaciju tečne i čvrste faze.....	36
Tabela 3-7. Metode i tehnike za karakterizaciju čvrste faze .....	40
Tabela 5-1. Klimatski podaci za jul i avgust 2012. za stanicu Vračar (izvor RHMZS).....	70
Tabela 5-2. Rezultati analize uzoraka Serije I - sadržaj teških metala preračunati na g/m <sup>2</sup> .....	71
Tabela 5-3. Rezultati analize uzoraka Serije I - ostali fizičko-hemijski parametri preračunati na g/m <sup>2</sup> .....	71
Tabela 5-4. Rezultati analize uzoraka Serije I - specifična organska jedinjenja preračunata na g/m <sup>2</sup> .....	72
Tabela 5-5. Rezultati ispitivanja uzoraka snega, Serija II.....	74
Tabela 5-6. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za isptivanje akumulisanja zagađenja na asfaltnim površinama parkinga (Serija III).....	75
Tabela 5-7. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za isptivanje akumulisanja zagađenja na betonskim površinama trotoara (Serija III).....	76
Tabela 5-8. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za isptivanje dnevnog priraštaja zagađenja na asfaltnim površinama parkinga (Serija IV).....	77
Tabela 5-9. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za isptivanje dnevnog priraštaja zagađenja na betonskim površinama trotoara (Serija IV).....	78
Tabela 5-10. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za isptivanje dnevnog priraštaja zagađenja na asfaltnim površinama parkinga (Serija V) .....	79
Tabela 5-11. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za isptivanje dnevnog priraštaja zagađenja na betonskim površinama trotoara, oktobar 2013.....	80
Tabela 5-12. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za isptivanje dnevnog priraštaja zagađenja na kamenim površinama, oktobar 2013.....	81

Tabela 5-13. Koeficijenti $C_1$ , $C_2$ , $C_3$ i suma kvadrata razlika ( $\sum R^2$ ) za funkcije akumulisanja zagađenja: POW, EXP i SAT .....	85
Tabela 5-14. Empirijski koeficijenti $C_{4b}$ , $C_{5b}$ , $C_{6b}$ i suma kvadrata razlika ( $\sum R^2$ ) za funkcije akumulisanja zagađenja: L-E, L-P i LIN .....	89
Tabela 5-15. Bruto dnevni priraštaj pojedinih parametra, prema funkciji L-E .....	91
Tabela 5-16. Procenjene vrednosti neto dnevnog priraštaja pojedinih parametra, prema ispitivanjima uzoraka Serije IV i izračunati parametar bruto priraštaja $B_d$ .....	97
Tabela 5-17. Koeficijenti $C_{t=0}$ i $C_{dn}$ i suma kvadrata razlika ( $\sum R^2$ ) za eksponencijalnu funkciju uklanjanja zagađenja uzorkovanjem.....	100
Tabela 5-18. Rezultati analiza sadržaja nutrijenata i teških metala u čvrstoj fazi.....	104
Tabela 5-19. Rezultati analiza specifične površine, veličine i zapremine pora čvrste faze .....	105
Tabela 5-20. Kvantitativni rezultati EDS analize frakcija čvrstih čestica.....	110
Tabela 5-21. Rezultati kvantitativne XRD analize frakcije S3 .....	111
Tabela 5-22. Korelacioni koeficijenti za rezultate merenja u svim uzorcima zahvaćenim sa asfaltnih površina (Serije III, IV i V).....	113
Tabela 5-23. Korelacioni koeficijenti za rezultate merenja u svim uzorcima zahvaćenim sa betonskih ploča trotoara (Serije III, IV i V).....	114
Tabela 5-24. Korelacioni koeficijenti za rezultate merenja u svim uzorcima zahvaćenim sa kamenog podesta (Serija V).....	114
Tabela 5-25. Korelacioni koeficijenti za sve rezultate merenja u svim uzorcima zahvaćenim tokom (Serije III, IV i V).....	115
Tabela 5-26. Intenziteti kiše različitog povratnog perioda i trajanja (ITP) za pluviografsku stanicu Beograd-Vračar, period obrade 1925-1989 .....	127
Tabela 5-27. Rezultati proračuna 1,5D modelom (levo) i shematizovanim modelom (desno)..	130
Tabela 5-28. Funkcije akumulisanja i spiranja zagađenja korišćene za modeliranje zagađenja	130
Tabela 5-29. Vrednosti koeficijenata $C_{sur}$ određenih iz podataka o akumulisanju zagađenja....	137
Tabela 5-30. Masa parametara spranih oticajem sa sliva pri kišama različitog trajanja i intenziteta, izračunatih modelom sa i bez surogat parametra (kalibracija parametara prema akumulaciji zagađenja) .....	138
Tabela 5-31. Vrednosti koeficijenata $C_{sur}$ određenih iz kvaliteta oticaja .....	139
Tabela 5-32. Masa parametara spranih oticajem sa sliva pri kišama različitog trajanja i intenziteta, izračunatih modelom sa i bez surogat parametra (kalibracija parametara prema kvalitetu oticaja).....	140

## SPISAK KORIŠĆENIH OZNAKA I SKRAĆENICA

- $\Delta B$  - razlika akumulisanog zagađenja pre i posle kiše  
 $\Delta t$  - vremenski period  
 $a$  - koeficijent  
 $A$  - površina  
 $b$  - koeficijent  
 $B$  - količina zagađenja na površini  
BET - Brunauer–Emmet–Teller metod određivanja specifične površine čestica  
BJH - Barret Joiner-Halenda (BJH) jednačina  
BMP - najbolja praksa (Best Management Practice)  
 $B_0$  - početna količina materije akumulisane na površini  
BPK<sub>5</sub> – petodnevna biohemijska potrošnja kiseonika  
 $c$  - koeficijent  
 $C$  - koncentracija  
 $C_{1b}$  – koeficijent u funkcijama akumulisanja zagađenja (maksimalna akumulacija zagađenja)  
 $C_{1w}$  - koeficijent spiranja,  
 $C_2$  - koeficijent razmere  
 $C_{2b}$  – koeficijent u funkcijama akumulisanja zagađenja  
 $C_{2u}$  - koeficijent uklanjanja zagađenja  
 $C_{2w}$  - eksponent spiranja,  
 $C_{3b}$  - vremenski eksponent u funkcijama akumulisanja zagađenja  
 $C_{4b}$  - početna količina zagađenja  
 $C_{5b}$  - bruto dnevni priraštaj zagađenja  
 $C_{6b}$  - koeficijent uklanjanja zagađenja  
 $C_b$  - koeficijent priraštaja zagađenja  
 $C_{dn}$  - dnevni neto priraštaj zagađenja, prosečni  
 $C_p$  - koncentracije parametra P u oticaju  
 $C_{sur}$  - bezdimenzionalni koeficijent razmere između  $C_p$  i  $C_{TSS}$   
 $C_{t=0}$  - ukupna količina materija zahvaćena u prvom uzorkovanju  
 $C_{TSS}$  - koncentracije parametra TSS u oticaju  
 $d$  - koeficijent  
 $d_s$  - kapacitet skladištenja vode na površini  
 $d_o$  - prečnik otvora sita  
DWF - protok u suvo vreme (Dry Weather Flow)  
EDS - Energijsko disperzivna spektroskopija (Energy Dissipative Spectroscopy)  
EMC - Srednja koncentracija tokom kišnog događaja (Event Mean Concentration).  
EU - Evropska Unija  
EXP - Eksponencijalna funkcija priraštaja zagađenja na površini  
 $F$  - ukupna količina infiltrirane vode  
 $F1, F2$  - glavne komponente u PCA analizi  
 $f_\infty$  - minimalna brzina infiltracija kojoj teži kroz vreme  
 $f_0$  - početna brzina infiltracije  
 $f_k$  - kumulativna relativne mase parametra kvaliteta  
 $f_p$  - brzina infiltracije  
 $f_q$  - kumulativna relativna zapremina oticaja  
 $g$  - ubrzanje zemljine teže

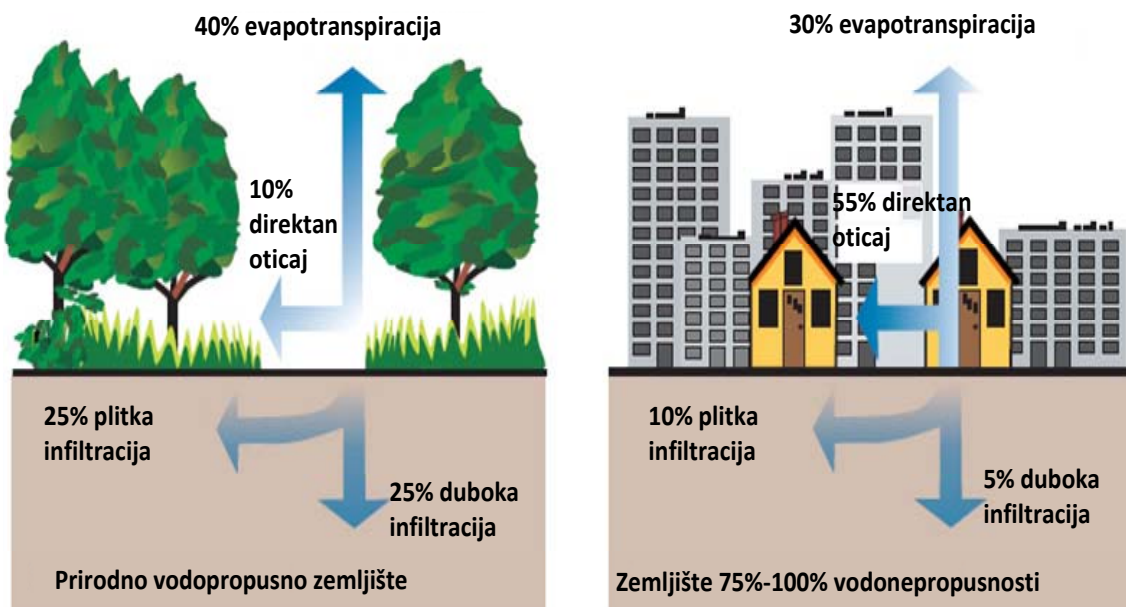
*H* - ukupna visina kiše  
 HPK - hemijska potrošnja kiseonika  
 HTP - visina pale kiše - trajanje - povratni period  
*I* - nagib linije energije  
*I<sub>max5</sub>* - maksimalni intenzitet kiše tokom 5 minuta  
*IMD* - početni deficit valge na početku padavina  
 ITP - intenzitet-trajanje-povratni period  
*Kd* - koeficijent oticaja  
*K<sub>s</sub>* - koeficijent filtracije  
 LID - smanjenje uticaja urbanizacije na oticaj (Low Impact Development)  
*M* – količina materije na jedinici površine  
*M(V)* - bezdimenzionalne krive zavisnosti *f<sub>k</sub>* i *f<sub>q</sub>*  
*n* - Manningov koeficijent hrapavosti  
 PAH - poliaromatični ugljovodonici  
 PCA - Analiza glavnih komponenti (Principal Component Analyses)  
 pH - mera kiselosti ili baznosti rastvora, negativni dekadni logaritam molarne koncentracije vodonikovih jona u rasvoru  
 POW - Stepena funkcija priraštaja zagađenja na površini  
 PSD - distribucija veličine pora (Pore Size Distribution)  
*q* - oticaj po jedinici površine  
*Q* - protok  
*q* - specifični oticaj  
*R* - hidraulički radijus  
*r* - koeficijent linearne korelacije (Pearson)  
*S* - prosečna visina kapilarnog sisanja na vlažnom frontu  
 SAT – Saturaciona funkcija priraštaja zagađenja na površini  
 SEM - Skeniranje elektronskim mikroskopom (Scanning Electron Microscopy)  
 SMC - Srednja koncentracija u oticaju (Site Mean Concentration)  
 Sum *R*<sup>2</sup> – suma kvadrata razlika  
 SWMM - programski paket za modleiranje oticaja (Storm Water Management Model)  
 TN - ukupni azot (Total N)  
 TOC - ukupni organski ugljenik (Total Organic Carbon)  
 TP - ukupni fosfor (Total P)  
 TS - suvi ostatak (Total Solids – TS)  
 TSS - suspendovane materije (Total Suspended Solids – TSS)  
 US EPA - Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (United States Environmental Protection Agency)  
*V* - zapremina  
*W* - masa spranog zagađenja  
 WFD - Okvirna Direktiva o Vodama EU (EU Water Framework Directive)  
*x, y* - promenljive  
 XRD - Defrakcija X zraka (X Ray Diffraction)

# 1. UVOD

## 1.1. PREDMET NAUČNOG ISTRAŽIVANJA

Predmet naučnog istraživanja su procesi akumulisanja zagađenja na površini terena urbanih slivova, njihovo pokretanje i spiranje sa urbanih nepropusnih površina tokom padavina.

Tradicionalni način urbanizacije menja hidrološke karakteristike sliva tako što povećava udeo nepropusnih površina, što povećava koeficijent oticaja sliva, odnosno povećava zapreminu i protok kišnog oticaja a smanjuje infiltraciju u zemljište i evapotranspiraciju. Shematski prikaz glavnih uticaja urbanizacije na oticaj je dat na slici 1-1 (prema: Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 1998). U isto vreme površinski oticaj se ubrzava tako da se maksimalni protoci površinskog oticaja javljaju ranije u odnosu na oticanje sa površina pre urbanizacije (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).



Slika 1-1. Uticaji urbanizacije na količine kišnog oticaja

Urbanizacija takođe utiče na kvalitet oticaja, na urbanim površinama se talože i akumuliraju materije iz atmosfere, materije donete sa susjednih površina, materije usled korišćenja motornih vozila i drugih izvora (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010). Deo materija

se zadržava na površini, deo biva odnešen vetrom ili saobraćajem na drugo mesto, a deo pretrpi transformacije ili degradaciju. Usled zagađivanja atmosfere izduvnim gasovima iz vozila, emisijom iz kotlova i industrije, materije koje se akumuliraju na urbanim površinama sadrže i produkte sagorevanja, materije nastale habanjem delova vozila, produkte industrijskog zagađenja i drugo. Tokom padavina ove materije bivaju odvojene od podloge i transportovane oticajem, pri čemu materije mogu prolaziti kroz niz transformacija. Ove materije mogu znatno narušiti kvalitet oticaja (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Kod urbanih slivova, dominantan udeo oticaja i zagađenja potiče sa nepropusnih površina, kao što su saobraćajnice, trotoari, parkinzi ili krovovi (Revitt i sar. 2014). Za kišni oticaj koji potiče sa urbanih nepropusnih površina karakteristično je da je kvalitet vode koja otiče lošiji tokom početka kiše nego na kraju kiše. Ova pojava se naziva prvo spiranje i povremeno je opažena na urbanim slivovima (Taebi i Droste 2004a; Flint i Davis 2007; Lee i sar. 2002; Deletic 1998; Barco i sar. 2008; Obermann i sar. 2009; Luo i sar. 2009; Bach i sar. 2010; Ma i sar. 2010).

Akumulacija zagađenja na nepropusnim površinama vrši se u periodima bez padavina, kada se mešavina materija prirodnog i antropogenog porekla sakuplja na površinama. Akumulacija materije se usporava tokom vremena tako da se masa zagađenja po jedinici površine asimptotski približava maksimumu, koji zavisi od niza lokalnih faktora, uključujući atmosfersko zagađenje, položaj površine u odnosu na izvore zagađenja, karakteristike same površine, način korišćenja površine i drugo (James i sar. 2010).

Pokretanje zagađenja sa površine je složen proces koji zavisi od niza faktora, uključujući i tip i osobine zagađujućih materija. Zbirno delovanje svih ovih uticajnih faktora dovodi do pojave spiranja zagađenja koje se odvija različitim intenzitetima tokom jedne kišne epizode, i može dovesti do pojave prvog spiranja zagađenja, ali postoje primeri slivova gde nije izražena pojava prvog spiranja (Deletic 1998).

U proteklih nekoliko decenija, na lokacijama širom sveta, sprovedena su raznovrsna istraživanja usmerena ka utvrđivanju dinamike spiranja i ispuštanja zagađenja sa nepropusnih urbanih površina (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010, James i sar. 2010). Istraživanja ukazuju da oticaj sa urbanih površina može sadržati niz zagađenja antropogenog porekla (Hvitved-Jacobsen 2010):

- uvećana organska zagađenja, iskazana kao hemijska potrošnja kiseonika (HPK), ukupni organski ugljenik (TOC) ili biohemijska potrošnja kiseonika za 5 dana (BPK<sub>5</sub>), su blago ili umereno izražena, i dobrim delom vode poreklo sa zemljišta i zelenih površina;
- suspendovane materije se smatraju najviše izraženim zagađenjem u kišnom oticaju sa urbanih površina jer su prisutne u značajnim koncentracijama i imaju tendenciju vezivanja, naročito na najsitnijim frakcijama čestica, drugih zagađenja kao što su teški metali, poliaromatični ugljovodonici (PAH) i druga specifična zagađenja;
- teški metali, kao što su bakar, olovo, kadmijum, nikl, hrom i cink mogu biti prisutni u kišnom oticaju u širokom opsegu koncentracija, prvenstveno u zavisnosti od načina korišćenja zemljišta na slivu, intenziteta saobraćaja i industrijskog zagađenja;
- ulja, masti i naftni ugljovodonici su povremeno prisutni u kišnom oticaju i njihovo prisustvo ukazuje na akcidentna zagađenja (curenje ulja i goriva iz motornih vozila, spiranje ulja sa površina u industrijskim postrojenjima na kojima je došlo do nekontrolisanog izlivanja ulja i dr.);
- jedinjenja azota i fosfora su prisutna u oticaju ukoliko postoji veće spiranje sa zelenih površina, ili specifična aerozagađenja koja sadrže ove materije;
- druga specifična zagađenja, kao što su PAH, volatilne materije i specifični polutanti mogu se javiti u površinskom oticaju u zavisnosti od načina korišćenja zemljišta, kvaliteta vazduha i drugih faktora.

Istraživanja ukazuju na veliku varijabilnost po prostoru i vremenu parametara zagađenja (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010; James i sar. 2010). Lokalne specifičnosti su izražene, tako da je neophodno sprovesti ispitivanja u svakom konkretnom slučaju.

## **1.2. CILJ NAUČNOG ISTRAŽIVANJA**

Cilj istraživanja u okviru ove disertacije je karakterizacija zagađenja na nepropusnim površinama i modeliranje procesa akumulisanja, pokretanja i transporta zagađenja sa urbanih površina tokom padavina. Istraživanja će biti fokusirana na nepropusne površine, jer one daju najveći doprinos zagađenju kišnog oticaja sa urbanih površina.

### 1.3. ZADACI ISTRAŽIVANJA

Ostvarenje postavljenih ciljeva podrazumeva ispunjenje sledećih zadataka:

- Pregled literature i sistematizacija dosadašnjih rezultata iz oblasti istraživanja procesa padavine-oticađ u urbanim sredinama vezanih za problematiku akumulisanja, pokretanja i transporta oticajem razliĉitih zagaĊenja sa urbanih površina tokom padavina.
- IzvoĊenje eksperimentalnih istraživanja na eksperimentalnom slivu na GraĊevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu za potrebe karakterizacije zagaĊenja, što ukljuĉuje:
  - definisanje metode zahvatanja uzoraka materijala akumuliranog na površini terena;
  - zahvatanje uzoraka materijala sa razliĉitih tipova površina i njihova analiza u laboratoriji na sadržaj materija koje utiĉu na kvalitet kišnog oticaja (suspendovane materije, teški metali, nutrijenti, masti i ulja, drugi karakteristiĉni elementi i jedinjenja);
  - sveobuhvatna analiza i karakterizacija ĉvrste i teĉne faze zahvaćenih uzoraka sa nepropusnih površina, analiza i tumaĉenje interakcija između pojedinih faza i/ili frakcije teĉne i ĉvrste faze;
  - analiza i kvantifikacija procesa akumulisanja zagaĊenja na razliĉitim tipovima nepropusnih površina;
  - analiza i kvantifikacija dnevnih priraštaja zagaĊenja na razliĉitim tipovima nepropusnih površina i u razliĉitim sezonama;
  - odreĊivanje karakteristika slivnih površina sa kojih se generiše oticaj;
- Modeliranje procesa akumulisanja zagaĊenja na nepropusnim površinama.
- Modeliranje pokretanja i transporta zagaĊenja po nepropusnoj površini, analiza uticaja pojedinih parametara modela na rezultate.
- Analiza rezultata eksperimentalnih istraživanja, izbor metoda za opisivanje procesa akumulisanja, pokretanja i transporta zagaĊenja oticajem sa urbanih slivova.
- Povezivanje pojedinih parametara kvaliteta oticaja, kako bi se pravilno definisao suženi set parametara koji posredno opisuju, sa dovoljnom pouzdanošću, preostale parametre kvaliteta, u cilju efikasnog sprovoĊenja daljih istraživanja na eksperimentalnom slivu.



- Formiranje preporuka u pogledu procene emisije zagađenja sa urbanih slivova koje nosi kišni oticaj, sa smernicama za metodološki pristup izboru mera zaštite vodoprijemnika od negativnih uticaja od urbanog oticaja, vodeći računa o lokalnim specifičnostima i zahtevima za zaštitu kvaliteta vodoprijemnika i životne sredine.

#### **1.4. POLAZNE HIPOTEZE**

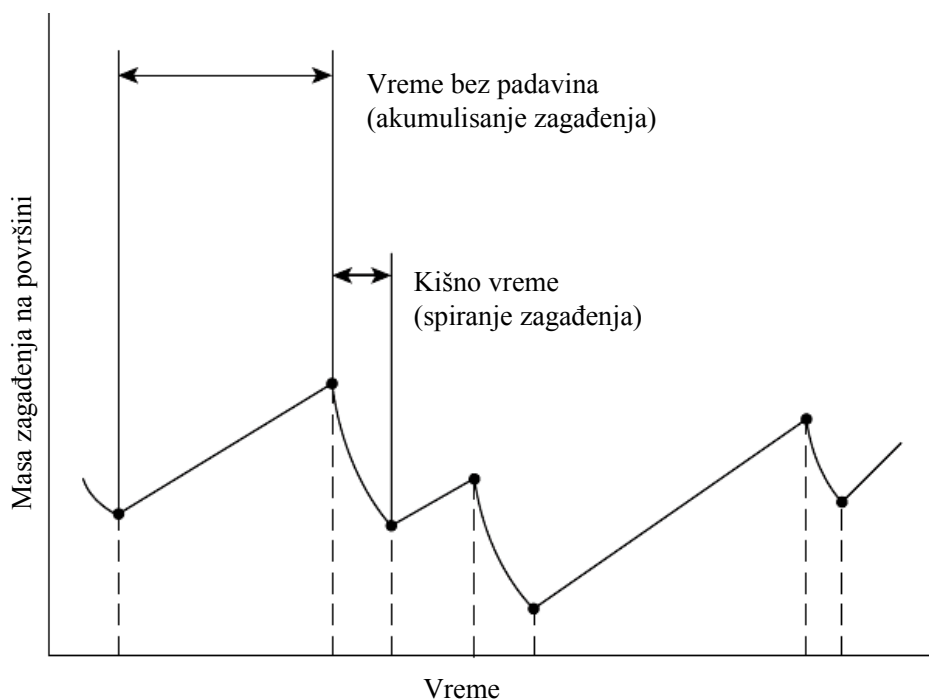
Osnovna hipoteza od koje se polazi u naučnom istraživanju je da akumulisanje zagađenja na urbanim nepropusnim površinama zavisi od meteoroloških faktora, fizičkih karakteristika površine i osobina zagađujuće materije. Konkretno zavisnosti između pojedinih veličina, koje odgovaraju lokalnim specifičnostima, biće ispitane u disertaciji.

Druga hipoteza je da se proces pokretanja i transport zagađenja po urbanoj nepropusnoj površini može modelirati korišćenjem fine diskretizacije prostora i rešavanjem jednačina dinamičkog talasa.

## 2. PREGLED SAZNANJA IZ OBLASTI ISTRAŽIVANJA

### 2.1. KOLIČINE I POREKLO ZAGAĐENJA NA URBANIM POVRŠINAMA

Različite materije koje sadrže zagađenja se akumuliraju na urbanim površinama tokom perioda bez padavina. Tokom kiše ove materije bivaju odvojene od površine i odnešene površinskim oticajem, tako da se količina zagađenja na urbanim površinama stalno menja kroz vreme u zavisnosti od dinamike smene sušnih i kišnih peiroda, kako je to shematski predstavljeno na slici 2-1(Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).



Slika 2-1. Shematski prikaz pomene ukupne količine zagađenja na površini kroz vreme usled smene perioda sa i bez padavina

#### 2.1.1. Akumulisanje zagađenja na urbanim površinama

Akumulisanje 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 (saobraćaj, i dr.). Tako se vremenom povećava količina prašine, zagađenja i drugih materija na urbanim površinama.

Zagađenja u atmosferi su najčešće u formi sitnih čestica ili su vezana za površinu čestica. Najveći deo taloženja čestica iz atmosfere se odvija na neki od sledeća tri načina (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010):

- akumulisanje u suvo vreme se odvija tako što se čestice talože po površini i adsorbuju zagađenja,
- akumulisanje tokom padavina gde čestice sa zagađenjima bivaju uhvaćene u kišnim kapima ili na pahuljama snega i tako dolaze do čvrste nepropusne površine,
- skriveno izdvajanje, gde se zagađenja uklanjaju iz atmosfere preko apsorpcije na sitnim kapljicama vode u oblacima i magli.

Pored toga, kapljice vode u oblacima i padavinama mogu adsorbovati prisutne gasove u atmosferi, kao što su ugljen dioksid, amonijak, sumpor dioksid i drugi.

Zagađenja u atmosferi potiču iz lokalnih i udaljenih izvora zagađenja, a zagađenje se može transportovati kroz atmosferu i na velike udaljenosti. Uočeno je znatno veće akumulisanje zagađenja na urbanim nego na ruralnim površinama (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Akumulisanje zagađenja na nepropusnim površinama je proces koji zavisi od mnogo faktora: taloženje iz atmosfere, erozija okolnih nepropusnih i propusnih (zelenih) površina, akcidentna izlivanja, emisije gasova iz motornih vozila i njihovo habanje, emisije zagađenja iz kotlova i industrije i drugo (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010). Prema istraživanjima sprovedenim u SAD, autoputevi su izvor čestica većih od 6  $\mu\text{m}$  sa visokim sadržajem teških metala pri čemu se ove čestice talože na površinu terena na udaljenostima i do 150 m od autoputa (Sabin i sar. 2006).

Osim toga, postoje i procesi koji uklanjaju zagađenje sa nepropusnih površina: odnošenja vetrom, razgradnja materija, čišćenje ulica i drugo (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010). Složenost interakcija je uzrok da se proces akumulisanja zagađenja na površini modelira isključivo empirijskim relacijama, i one najčešće opisuju promenu mase po jedinici površine  $B$  tokom vremena  $t$  na neki od sledeća četiri načina:

$$\text{Linearna funkcija:} \quad B = a \cdot t \quad (2-1)$$

$$\text{Stepena funkcija} \quad B = a \cdot t^b \quad (2-2)$$

$$\text{Eksponencijalna funkcija;} \quad B = B_{max}(1 - e^{-bt}) \quad (2-3)$$

$$\text{Kriva zasićenja (Michaelis-Menten):} \quad B = B_{max} (t / a + t) \quad (2-4)$$

U istraživanjima akumulisanja zagađenja na nepropusnim površinama koriste se različite metode zahvatanja uzoraka sa nepropusnih površina tokom suvog vremena. Metod mokrog usisavanja, gde se površina simultano kvasi i usisava je opisan u radu Delečić i Orr (2005). Ovaj metod je naročito pogodan za zahvatanje i najsitnijih frakcija čestica sa površine. U upotrebi su takođe i druge metode: kombinacija suvog i mokrog usisavanja korišćenjem usisivača sa rezervoarom sa vodom (Gunawardana i sar. 2012), metod suvog usisavanja korišćenjem usisivača sa četkom (Miguntanna i sar. 2010a), suvo usisavanje površine korišćenjem standardnog usisivača (Herngren i sar. 2006) ili ručnog usisivača (Vaze i Chiew, 2002), sakupljanje uzoraka prašine i čvrstog materijala sa ivičnjaka korišćenjem četki i prihvatnih posuda (Fujiwara i sar. 2011) i ispiranje površine krova dejonizovanom vodom uz korišćenje četke (Egodawatta i sar. 2009). U posebnu grupu metoda spadaju one koje uključuju uzorkovanje na prefabrikovanim pločama različitih vrsta površina i karakteristika, što je pogodan metod za zahvatanje atmosferskog depozita (Wicke i sar. 2012). Ove ploče se postavljaju na unapred određene lokacije i ostavljaju se izložene spoljnim uticajima i akumulisanju materija na njihovim površinama. Nakon određenog perioda vremena akumulisani materijal sa ploča se uklanja nekom od metoda usisavanja ili se spira veštačkom kišom (Wicke i sar. 2012).

### ***2.1.2. Pokretanje i transport zagađenja oticajem sa urbanih površina***

Spiranje zagađenja predstavlja eroziju, resuspenziju, i transport 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 i sar. 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  $\cdot$  vreme<sup>-1</sup>) glasi (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010):

$$W = a \cdot A \cdot \left( \frac{q}{A} \right)^b \quad (2-5)$$

gde su  $a$  i  $b$  empirijski koeficijenti. Jednačina 2-5 se odnosi 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 razvio Svensson (1987) na osnovu teorije za transport taloga u kanalima (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010). Svensson je povezoao 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. Ovaj model još uvek nije dovoljno razvijen da bi bio pogodan za praktične primene (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

U upotrebi su najčešće empirijske jednačine spiranja i odnošenja zagađenja. Primer empirijske formulacije spiranja zagađenja tokom vremenskog perioda kišne epizode sa urbanih i kolovoznih površina, u kojoj se zagađenje odneto oticajem prikazuje kao razlika akumulisanog zagađenja pre i posle kiše ( $\Delta B$ ), može se formulisati na sledeći način (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010):

$$\Delta B = B \cdot (1 - e^{-aH}) \quad (2-6)$$

gde su:

$\Delta B$  = ukupna masa spranog zagađenja tokom kišnog događaja (masa)

$a$  = koeficijent (dužina<sup>-1</sup>)

$H$  = ukupna visina pale kiše (dužina)

Postoji niz empirijskih jednačina spiranja koje se baziraju na jednačini 2-6, u kojima može figurisati i inicijalno zagađenje na površini koje predstavlja preostalo zagađenje nakon prethodnog kišnog događaja (Wang i sar. 2011).

Za razliku od navedenih jednačina, u upotrebi je i pristup procene ukupne mase spranog zagađenja  $W$  tokom vremenskog perioda  $t$  u zavisnosti od srednje koncentracije na lokalitetu SMC - Site Mean Concentration (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010):

$$W = SMC \cdot V_t \quad (2-7)$$

gde je  $V_t$  zapremina oticaja tokom vremena  $t$  tokom kišnog događaja.

Srednja koncentracija po kišnom događaju (EMC - Event Mean Concentration) može biti određena iz sledeće empirijske jednačine, pod uslovom da ima dovoljno eksperimentalnih podataka o EMC na slivu za potrebe kalibracije (Bertand-Krajewski 2007):

$$EMC = a \cdot H^b (I_{max5})^c \cdot t^d$$

gde su:  $H$  - visina kiše (dužina);  $I_{max5}$  - maksimalni intenzitet kiše tokom 5 minuta;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  - empirijski koeficijenti.

Istraživanja koja su sproveli Charbeneau i Barrett (1998) na slivu u Teksasu (SAD) ukazuju da procena ukupnog opterećenja zagađenjem oticaja sa slivova, koji se sastoje od samo jednog tipa i namene površina, može da bude uspešna korišćenjem EMC kao jedinog parametra, dok je korišćenje modela akumulisanja i spiranja osetljivo na izbor empirijskih koeficijenata koje prethodno treba kalibrisati.

Istraživanja spiranja zagađenja se najčešće vrše zajedno sa ispitivanjem njihovog akumulisanja na nepropusnim površinama, i postoje dva pristupa. Prvi uključuje zahvatanje i analizu uzoraka oticaja od prirodnih kišnih događaja (Vaze i sar. 2002; Zhu i sar. 2009). Drugi pristup podrazumeva primenu posebno konstruisanih i kalibrisanih uređaja za generisanje veštačke kiše (Egodawatta i Goonetilleke, 2008; Wicke i sar. 2012; Egodawatta i sar. (2007); Egodawatta i sar. (2009); Zhao i Li (2011).

## **2.2. KVALITET OTICAJA SA URBANIH POVRŠINA I SAOBRAĆAJNICA**

### ***2.2.1. Procesi u vodama od značaja za kvalitet oticaja***

Relativna raspodela između čvrste, tečne, i gasovite faze značajno utiče na osnovne karakteristike zagađenja u pogledu njihovog transporta, transformacije i efekata. Uslovi ravnoteže, kao i dinamičke karakteristike transporta zagađenja između faza, su bitni faktori u razumevanju aspekta kvaliteta površinskog oticaja sa urbanih površina (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Dinamičko ponašanje supstance, odnosno zagađenja, u pogledu njegovog transfera između dve faze je definisan kao razdvajanje faza (engl. partitioning). Krajnje stanje reakcije razdvajanja faza je ravnoteža. Razdvajanje faza je složen proces na koga utiču brojni fizičko-hemijski i hemijski procesi i faktori. Razdvajanje faza u suspenziji, odnosno prenos supstance koji se dešava između vode i čvrste faze, je bitan proces u svim vrstama površinskog oticaja (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Kao primer povezanosti procesa i karakteristika supstanci, važno je pomenuti transformacije supstanci između rastvorenog i čvrstog oblika. Rastvorljivost supstance određuje njen potencijal pojave u rastvoru. Rastvorljivost supstance je stoga blisko povezana sa njenom hemijskom reaktivnosti (odnosno potencijalom transformacije) i dostupnosti kao supstrata u biološkom sistemu. Na primer, rastvoreni teški metali u

tečnoj fazi su više biodostupni od metala u čvrstoj fazi, pri čemu metali u tečnoj fazi pokazuju i veću akutnu toksičnost (Dean i sar. 2005). Sa druge strane, čestice se mogu transportovati ili akumulirati (npr. putem sorpcije ili taloženja) u zavisnosti od karakteristika čestica i stanja u okolini. Interakcije između rastvorljivih i suspendovanih jedinjenja se javljaju u svakom sistemu za urbano odvodnjavanje.

Najbitniji procesi i faktori koji utiču na kvalitet oticaja i njegove promene su (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010):

- rastvorljivost i hemijska ravnoteža,
- taloženje,
- sorpcija (adsorpcija i apsorpcija),
- jonska izmena,
- prenos gasova,
- karbonatni sistem,
- disocijacija vode,
- alkalnost,
- karakteristike čestica,
- granulometrijski sastav čestica, i drugo.

Istraživanja su ukazala da često najsitnije frakcije čvrste faze imaju veću koncentraciju teških metala (Delečić i Orr 2005; Gunawardana i sar. 2012) i nutrijenata (Miguntanna i sar. 2010a). Visoke vrednosti specifične površine i ukupnog organskog ugljenika (TOC) su nađene u najsitnijim frakcijama čvrstih čestica u oticaju (Gunawardana i sar. 2012).

Način vezivanja metala na čvrstu fazu zavisi od oblika metala i njihovog porekla, gde su metali u antropogenom zagađenju vezani jonskom izmenom za suspendovane čestice, a metali iz prirode su vezani hemisorpcijom (Gunawardana i sar. 2012). Detaljnija istraživanja sorpcije teških metala na čestice čvrste faze je sproveo Gunawardana i sar. 2014 i 2015 godine. Adsorpcija se može koristiti i kao proces za uklanjanje teških metala iz površinskog oticaja (Liu i sar. 2005).

### 2.2.2. Koncentracije zagađenja u oticaju

Koncentracije parametara kvaliteta u oticaju variraju u veoma širokim granicama između različitih slivova (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010). Takođe, prisutne su i varijacije koncentracija u oticaju na istom slivu u toku jedne kišne epizode.

Merenja protoka i kvaliteta oticaja na nekom slivu, tokom jedne kišne epizode, daju niz parova podataka merenja o zapremini oticaja ( $V_j$ ) i koncentraciji nekog parametra ( $C_j$ ). U analizama ovih podataka, često se formiraju kumulativne krive relativne zapremine oticaja  $f_q$  i kumulativne relativne mase parametra kvaliteta  $f_k$  prema sledećim jednačinama (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010):

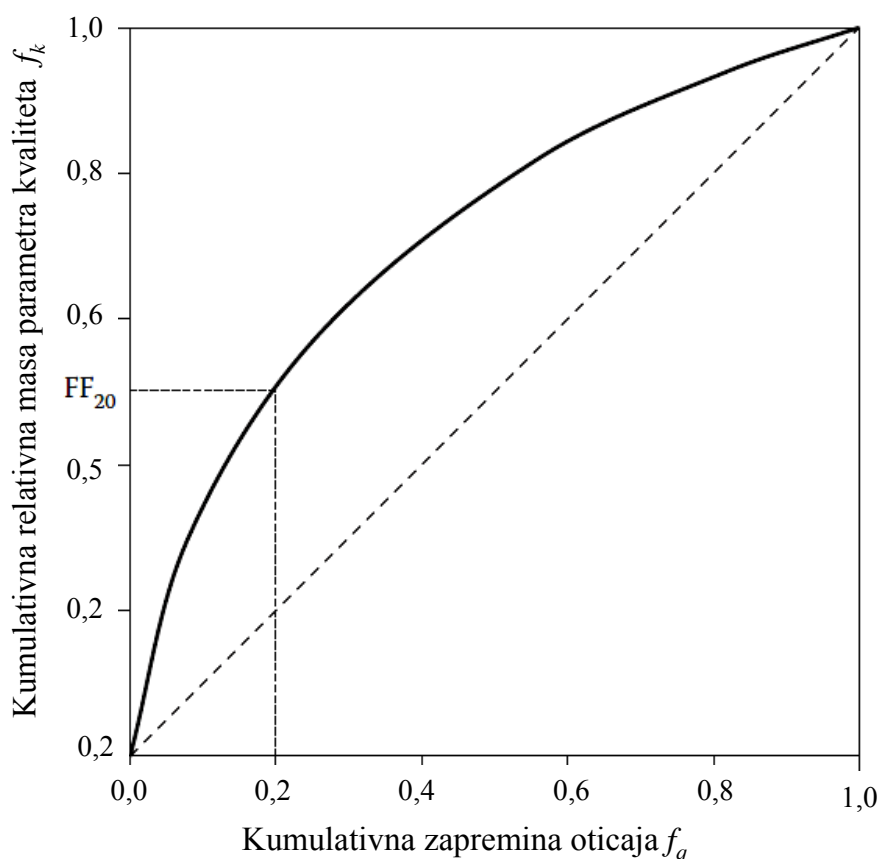
$$f_q = \frac{\sum_{j=1}^i V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (2-8)$$

$$f_k = \frac{\sum_{j=1}^i C_j \cdot V_j}{\sum_{j=1}^n C_j \cdot V_j} \quad (2-9)$$

Slika 2-2 prikazuje primer odnosa između  $f_k$  i  $f_q$  tokom jedne kišne epizode. Takve bezdimenzionalne krive zavisnosti  $f_k$  i  $f_q$  se nazivaju  $M(V)$  krive (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Ako je koncentracija zagađenja u oticaju konstantna tokom oticaja, dijagram  $M(V)$  će imati oblik prave linije iz koordinatnog početka do tačke sa koordinatama 1,0 i 1,0. Ako rezultati merenja daju dijagram koji odstupa na levu stranu u odnosu na ovu pravu liniju, kao što je prikazano na slici 2-2, onda možemo reći da postoji pojava prvog spiranja (engl. First Flush) za oticaj na razmatranom slivu i razmatranu kišnu epizodu (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010), odnosno da je maseni pronos razmatranog zagađenja veći na početku kišne epizode. Pored navedene definicije prvog spiranja, postoje i statističke metode u određivanju ovog fenomena (Bach i sar. 2010).





Slika 2-2.  $M(V)$  kriva zavisnosti  $f_k$  i  $f_q$

Više istraživača je ispitivalo pojavu prvog spiranja: Taebi i Droste (2004a); Lee i sar. (2002); Athanasiadis i sar. (2010); Zhang i sar. (2010); Deletić (1998). Rezultati se razlikuju od slučaja do slučaja i pojedini parametri kvaliteta pokazuju različite dinamike u kretanju koncentracija unutar istog kišnog događaja.

Gupta i Saul (1996) su pokazali da postoji izražena pojava prvog spiranja u kanalizaciji po opštem sistemu. Istraživanja Gromaire i sar. (2001) i Chebbo i sar. (2004) su pokazala da je erozija i resuspenzija nataloženog materijala u kolektorima opšteg sistema tokom suvog vremena glavni izvor povećanog zagađenja iz opšteg sistema kanalizacije na početku kišnog oticaja. Istraživanja su pokazala da je pojava prvog spiranja u kanalizaciji po opštem sistemu veoma izražena i da prvih 20% zapremine oticaja nosi oko 40% ukupnih zagađenja (Barco i sar. 2008; Park i sar. 2010).

U klimatima koji se odlikuju smenom kišnih i sušnih perioda godine, na početku kišnog perioda je uočen lošiji kvalitet oticaja, usled spiranja zagađenja akumulisanih

tokom dugog sušnog perioda. Ova pojava je identifikovana na nekim slivovima (Lee i sar. 2004) i naziva se sezonsko prvo spiranje.

Teški metali su prisutni u oticaju sa urbanih površina i saobraćajnica, a blizina saobraćajnice i intenzitet saobraćaja uvećavaju količinu teških metala u oticaju (Duong i Lee 2011).

Pojava prvog spiranja je veoma izražena kod oticaja sa krovova (Yufem i sar. 2008; Egodawatta i sar. 2009; Francey i sar. 2010) a materijal krovne obloge može uticati na kvalitet oticaja (Polkowska i sar. 2002; Athanasiadis i sar. 2010).

### ***2.2.3. Ukupne količine zagađenja u oticaju sa urbanih površina***

Za predviđanje, odnosno, modeliranje kvaliteta kišnog oticaja, generalno postoje dva pristupa:

- konceptualni model koji simulira različite procese od značaja za kvalitet oticaja, kao što su procesi padavine-oticaaj, akumulisanje zagađenja, spiranje zagađenja, transport i transformacije zagađenja (Chen i Adams 2006, Rossman 2015),
- empirijski izrazi čiji koeficijenti su kalibrisani prema podacima merenja količina i kvaliteta oticaja na slivu (primer je jednačina 2-5 u poglavlju 2.1.2.).

Modeliranje tečenja oticaja po površini se najčešće vrši metodom kinematskog talasa (Cheah i sar. 2008; Kang i sar. 2006; Kang i sar. 2008). Zbog kompleksnosti problema, velike varijabilnosti podataka i teškoća u dobijanju potrebnih slaganja između osmotrenih i računskih polutograma, čest je pristup da se koriste jedostavni konceptualni modeli i empirijski izrazi za modeliranje emisije zagađenja sa urbanih slivova (Cheah i sar. 2008; Dotto i sar. 2011; Ha i sar. 2008; May i Sivakumar 2008; Maniquiz i sar 2010; Vaze i Chiew 2003), naročito za predviđanja emisije zagađenja u dužem vremenskom periodu (McLeod i sar., 2006). Međutim, korišćenje empirijskih izraza je ograničeno samo na sliv za koji je izraz izveden, i ne treba ih koristiti za predviđanja emisije zagađenja sa drugih slivova bez prethodne kritičke provere i opsežne kalibracije (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Na osnovu obrade veoma obimnih istraživanja sprovedenih u SAD, u tabeli 2-1 su date tipične vrednosti godišnjih opterećenja zagađenjem od oticaja sa različitih tipova površina (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010)

Tabela 2-1. Tipična godišnja opterećenja zagađenjem od oticaja sa jednice površine različitih namena, izražena u kg/ha.god (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010)

Parametar	Tip površine - način korišćenja zemljišta						
	Komercijalna	Stanovanje (velika gustina)	Stanovanje (srednja gustina)	Stanovanje (niska gustina)	Industrija	Putevi	Parkirališta
TSS	1100	450	270	10	550	1000	450
TP	1,7	1,1	0,4	0,05	1,5	1,0	0,8
TKN	7,5	4,7	2,8	0,3	3,7	8,9	5,7
BPK <sub>5</sub>	70	30	15	1	-	-	53
HPK	470	190	60	10	230	-	300
Pb	3,0	0,9	0,06	0,01	0,2	5,0	0,9
Zn	2,3	0,8	0,1	0,05	0,4	2,3	0,9
Cu	0,4	0,03	0,03	0,01	0,1	0,4	0,07

Ukupne količine zagađenja u kišnom oticaju iz naselja zavise od brojnih faktora, uključujući i visinu padavina: prema istraživanjima koja su sproveli Taebi i Droste (2004b), ukupna godišnja emisija TSS i HPK iz kišnog oticaja u naselju sa sumom godišnjih padavina preko 500 mm može biti znatno veća od emisije ovih parametara iz postrojenja za sekundarno (mehaničko i biološko) prečišćavanje sanitarnih otpadnih voda tog naselja.

Shaw i sar. (2010) su analizom podataka o padavinama i oticaja sa urbanog sliva u SAD utvrdili da emisija suspendovanih materija prvenstveno zavisi od zapremine oticaja i kinetičke energije kišnih kapi.

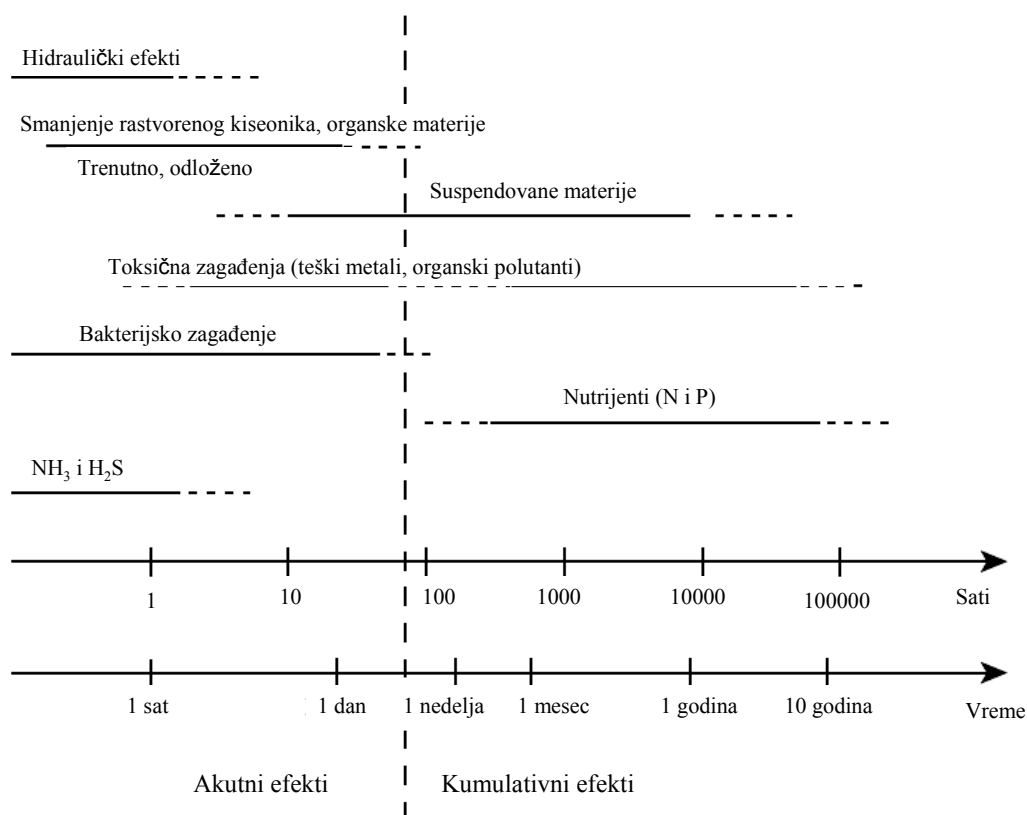
#### **2.2.4. Efekti zagađenja u urbanom oticaju na životnu sredinu**

Efekat zagađenja koji se unosi u vodna tela može biti akutan (trenutni, direktan) ili hroničan (kumulativan, dugoročan). Nepovoljan efekat zagađenja na određenoj lokaciji će se manifestovati ili kao neposredni poremećaj koji se smanjuje relativno brzo ili će se zagađenje akumulirati u sistemu što će rezultovati dugoročnim efektima (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

U slučaju kontinuiranih ispuštanja zagađenja u vode iz tačkastih izvora posle nekog vremena efekat dostigne neku vrstu ravnoteže u razmatranom okruženju. Međutim, kod povremenih ispuštanja zagađenja u vode, kao što je to slučaj sa kišnim oticajem koji se javlja samo povremeno, a za vreme sušnih perioda ne postoji,

vremenska komponenta uticaja zagađenja može biti veoma izražena (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Ako zagađenja imaju akutan efekat, uticaji iz pojedinačnih kišnih događaja su važni, posebno za one ekstremne i relativno česte pojave. Ako su efekti kumulativni, pri analizama je važno uzeti u obzir duži vremenski period, najmanje jednu sezonu ili hidrološku godinu. U ovom slučaju varijabilnost opterećanja zagađenjem pri različitim kišnim događajima nije od važnosti. Slika 2-3 prikazuje vremensku komponentu efekata pojedinih bitnih oblika zagađenja prisutnih u površinskom oticaju (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

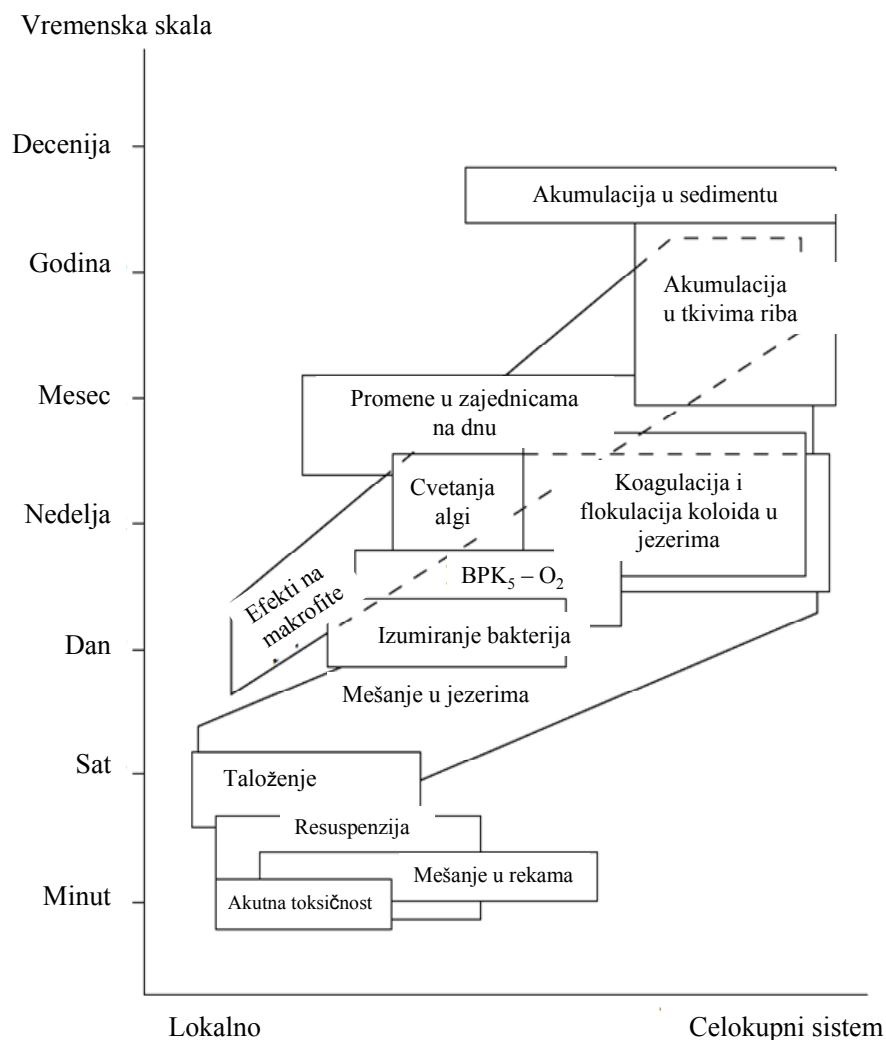


Slika 2-3. Vremenska skala efekata na vode usled povremenog izlivanja zagađenja

Na primer, na slici 2-3 potrošnja rastvorenog kiseonika usled unosa biorazgradljive organske materije će rezultirati u akutnim efektima smanjenja koncentracije rastvorenog kiseonika u vodi. Sa druge strane, nutrijenti dovode do eutrofikacije voda i daju dugoročne efekte po kvalitet voda (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010). Slika 2-3 pokazuje samo osnovne principe i stoga služi samo u svrhu osnovnog razumevanja i razlike između fenomena akutnih i hroničnih efekata na vode.

Krucijalnu ulogu u definisanju razlike između akutnih i kumulativnih efekata igra kinetika odvijanja procesa u kojima učestvuje razmatrano zagađenje. Pri tome treba voditi računa da pojedini parametri mogu biti podložni stalnim transformacijama i učestvovati u stalnom kruženju materije u vodenim ekosistemima, kao što je to slučaj sa nutrijentima (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Uticaj vremenske skale na prirodu efekata zagađenja, kao što je prikazano na slici 2-3, može da se proširi sa prostornom skalom koja varira od malog do velikog i kompleksnog ekosistema kako je prikazano na slici 2-4 (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010). Ova slika jasno pokazuje da, u zavisnosti od prirode postignutih efekata, treba prilagoditi i strategiju mera za praćenje i ublažavanje ovih efekata.



Slika 2-4. Prostorne i vremenske skale efekata na vodoprijemnike

Kada se analiziraju akutni efekti, potrebno je raspolagati detaljnijim informacijama o karakteristikama oticaja nego što je to za slučaj analize hroničnih

efekata (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010). Takođe, teži inženjerski zadatak je pronaći efikasnu meru za smanjenje zagađenja za slučaj jednog ekstremnog događaja nego što je to za slučaj smanjenja ukupnog opterećenja zagađenjem za sve kišne događaje. Sa druge strane, teže je izvršiti adekvatnu procenu hroničnih efekata urbanog oticaja na vode od akutnih efekata (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Izvedena istraživanja ukazuju na to da urbani oticaj, pored materija koje potiču od spiranja prirodnih materijala, može u zavisnosti od lokalnih uslova povremno sadržati i specifične toksične materije, koje mogu dovesti do toga da površinski oticaj bude toksičan za akvatični živi svet (Pitt i sar. 1995).

### **2.3. ZAHTEVI U POGLEDU ZAŠTITE VODNIH RESURSA OD ZAGAĐENJA**

Zagađenje od oticaja sa urbanih površina i saobraćajnica je kompleksna pojava zavisna od lokalnih specifičnosti. Stohastička priroda padavina, promenljivost izvora zagađenja i opterećenja, uticaj infrastrukture, različite vrste sistema koji upravljaju oticajem, i uticaji životnih navika stanovništva su samo primeri onoga što doprinosi ovoj kompleksnosti. Ove karakteristike su, na više načina, drugačije u poređenju sa odgovarajućim aspektima zagađenja sa urbanih površina tokom sušnog vremena. Posledice su da zakoni i propisi moraju biti posebno formulisani u skladu sa karakteristikama oticaja tokom kišnog vremena (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Promenljivost protoka u prostoru i vremenu i postojanje velikog broja tačaka izliva, koje obično postoje u okviru sliva, su u ovom pogledu od velikog značaja i moraju biti uzeti u obzir prilikom formulisanja regulative. Formulacija specifičnih standarda za kvalitet vode na ispustu ima centralno mesto u regulativi koja reguliše ispuštanje otpadnih voda tokom suvog vremena (DWF - Dry Weather Flow), što nije slučaj sa kišnim oticajem, odnosno protokom u kišno vreme (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Važno pitanje u vezi propisa u ovoj oblasti je pitanje ko je odgovoran za ispuštanja zagađenja usled kišnog oticaja sa urbanih i kolovoznih površina. Kod opšteg sistema kanalizacije za rad sistema su odgovorni nadležno javno komunalno preduzeće ili lokalna samouprava. Vlasništvo nad kišnom kanalizacijom kod separacionog sistema

kanalizacije je često manje dobro definisano, a često ovi sistemi pripadaju lokalnoj samoupravi ili se smatraju kao deo saobraćajnica.

Kvalitet oticaja vode sa urbanih područja i puteva je u proteklih 30-40 godina uključen u regulativu razvijenih zemalja. U nastavku su primeri zakonskih rešenja iz SAD i Evropske Unije.

### **2.3.1. *Regulativa u SAD***

U SAD se već niz decenija sprovode veoma obimna istraživanja kvaliteta kišnog oticaja sa urbanih površina i saobraćajnica. SAD su praktično prva zemlja koja je uvela u regulativu kontrolu i regulisanje oticaja, i ona postoji i na saveznom i na državnom nivou (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

#### **Zakon o čistoj vodi**

Savezni zakon za kontrolu zagađenja voda, poznatiji kao Zakon o čistoj vodi (CWA - Clean Water Act) datira iz 1972. godine, i njime je uspostavljen osnovni okvir za regulisanje ispuštanja zagađujućih materija u površinske vode. Američka agencija za zaštitu životne sredine (U.S. EPA - United States Environmental Protection Agency) je dobila ovlašćenje da sprovodi programe za kontrolu ispuštanja zagađenja, kao i postavljanje standarda kvaliteta vode u pogledu sadržaja zagađenja u površinskim vodama. Ovim je uspostavljen sistem kojim se kontroliše izlivanje zagađenja u vodoprijemnike iz tačkastih izvora bez dozvole.

Iako je CWA prvobitno bio fokusiran na hemijske aspekte kvaliteta vode, danas je težište stavljeno na obnovu i održavanje hemijskih, fizičkih i bioloških aspekata kvaliteta voda. Tokom godina, zagađenje od oticanja se sve češće rešava. Osim toga, postalo je jasno da učešće zainteresovanih strana i edukacija javnosti igraju centralnu ulogu, kako za širenje informacija, tako i za uspešnu realizaciju mera za smanjenje zagađenja (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

#### **Nacionalni program oticaja sa urbanih površina**

US EPA Nacionalni program oticaja sa urbanih površina (NURP - Nationwide Urban Runoff Program) je osnovan 1978. godine, a konačni izveštaj je napravljen u 1983. god. Program je uključio prikupljanje velike količine podataka o urbanom odvodnjavanju. Ovaj program je omogućio dostupnost veoma velike količine informacija koje su

uticale, ne samo na federalne i državne propise u SAD u vezi kontrole i smanjenja zagađivanja od urbanih oticaja, već i na formiranje zakonodavstva i u drugim zemljama. Iako je program merenja izvršen pre više od četiri decenije, rezultati su i dalje aktuelni (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

### **NPDES Dozvole i mere za upravljanje urbanim oticajem**

Zakon o čistoj vodi zahteva da svi tačkasti izvori koja ispuštaju zagađujuće materije u vodoprijemnike moraju dobiti dozvolu Nacionalnog sistema za eliminaciju ispuštanja zagađenja (NPDES - National Pollutant Discharge Elimination System). Većina ispuštanja atmosfere vode se smatra tačkastim izvorima zagađenja i stoga moraju biti pokriveni NPDES dozvolama. Kao posledica, uvode se mere za kontrolu ispuštanja atmosferskih voda u vodoprijemnike, i one se vezuju za primenu najbolje prakse upravljanja (BMP - Best Management Practice). Na ovaj način se obuhvataju i rešavaju problemi u pogledu povećanja zapremine i ubrzanja oticaja, kao i ispuštanja zagađujućih materija. Na nivou država su razrađeni programi za upravljanje, koji regulišu ispuštanja zagađenja poreklom iz urbanih difuznih izvora. Sa stanovišta regulative, niz mera za upravljanje urbanim oticajem je fokusirano na:

- Planove za urbanizaciju novih područja.

Ovi planovi su usmereni na zaštiti ekološki osetljivih područja, minimizaciji remećenja zemljišta i očuvanju prirodnog načina odvodnjavanja i vegetacije. Uređaji i mere za kontrolu i prevenciju zagađenja treba sprovesti tako da se dostigne nivo emisije zagađenja pre urbanizacije.
- Planovi za postojeća, već izgrađena naselja.

Takvi planovi uključuju strategiju postepenog uklanjanja zagađenja, počevši od smanjenja emisije prioriternih supstanci i završavajući sa obnovom ekoloških svojstava.
- Planovi odlaganja otpada.

Sistemi za odlaganje različitih vrsta otpada treba da budu propisno projektovani i održavani, i ne smeju se locirati blizu ekološki osetljivih oblasti i površinskih voda.
- Obrazovanje javnosti.

Programi obrazovanja javnosti mogu biti usmereni na sprečavanje zagađenja i očuvanju životne sredine, i realizuju se u školama i na nivou lokalne zajednice.



### **2.3.2. *Regulativa u Evropskoj Uniji***

Regulativa Evropske Unije (EU) se može podeliti na nekoliko nivoa. Na najvišem nivou su EU Propisi (EU Regulation), koje usvaja Evropski parlament i koji se direktno primenjuju u svim državama članicama. Drugi značajan tip EU regulative, su EU Direktive (EU Directives) koje takođe usvaja Evropski Parlament, najčešće na predlog Evropske Komisije. Za razliku od EU Propisa, EU Direktive se ne primenjuju direktno u zemljama članicama, već zemlje članice imaju obavezu da u zadatom roku prenesu obavezu dostizanja ciljeva iz EU Direktive u nacionalno zakonodavstvo. Na taj način EU ne diktira način sprovođenja EU Direktiva, već nacionalne vlade država članica same odlučuju o načinima primene. Generalno, EU Direktiva se odnosi na sve države članice i određuje rok u kome države članice moraju transponovati osnovne postavke, ciljeve i rokove iz Direktive u nacionalno zakonodavstvo. Evropski Sud pravde je obezbedio smernice za sudije u državama članicama o tome kako postupati u slučajevima gde EU Direktive nisu prenete u nacionalno zakonodavstvo ili su prenešene na pogrešan način (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

#### **Okvirna direktiva o vodama EU (WFD)**

Evropski Parlament i Evropska Komisija su 2000. godine usvojili Okvirnu direktivu o vodama EU (Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy - WFD). Ambicija ove direktive je bila da se uspostavi okvir za zaštitu kopnenih površinskih, priobalnih i podzemnih voda u Evropskoj Uniji. U tom smislu krajnji cilj je da se u vodama postignu koncentracije suspcanci koje su prirodno prisutne u vodama na nivou njihovih koncentracija u prirodi, i blizu nule za sintetičke supstance antropogenog porekla. WFD formuliše kao cilj dostizanje dobrog hemijskog i ekološkog statusa svih vodnih tela (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Da bi se postigli ovi ciljevi, WFD propisuje da je sliv osnovna jedinica za upravljanje vodama i na taj način se obuhvataju sve vrste zagađenja koje se unose u vodni ciklus, uključujući i zagađenja usled kišnog oticaja sa urbanih i kolovoznih površina. Namera je da WFD na taj način uspostavi strateški okvir za upravljanje vodama na holistički način. Prvobitno je WFD propisla da sva vodna tela površinskih voda u Evropi treba da ispune kriterijume za dostizanje dobrog statusa do kraja 2015. godine. Međutim, prihvaćeno je da u tom roku ne može biti dostignut dobar status u

svim vodnim telima, tako da je omogućeno produženje roka do 2027. godine. Osnovni način za primenu WFD je izrada i sprovođenje Planova upravljanja vodama po slivovima, koji se pripremaju za cikluse implementacije dužine 6 godina.

WFD ne sadrži detaljne planove o tome kako upravljati atmosferskim oticanjem i zagađenjima u njima. Međutim, zagađenje koje vodi poreklo sa urbanih i kolovoznih površina i njegov potencijalni uticaj na kvalitet vode bi trebalo da pridobije veću pažnju zbog uslova u pogledu upravljanja vodama i dostizanja dobrog statusa voda koje je postavila WFD (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Široko postavljene ciljevi uključeni u WFD obuhvaju mnoge pojedinačne standarde kvaliteta postavljenih preko posebnih propisa, kao što je Direktiva o nitratima i Direktiva o tretmanu komunalnih otpadnih voda. Na ovaj način WFD može doprineti integrisanim i racionalnijim merama za poboljšanje kvaliteta vode.

### **Kontrola i upravljanje količinama i kvalitetom kišnog oticaja**

Iako se koncentracije ili opterećenja zagađenjem teoretski mogu meriti na ispustima kišne kanalizacije i mestima upuštanja površinskog oticaja u vodoprijemnike, varijabilnost proticaja i parametara kvaliteta u okviru jednog događaja i između više događaja, čini kontrolu sa praktične tačke gledišta veoma teškom, ako ne i nemogućom. Stoga se obično ne uvode u praksu standardi kvaliteta vode na ispustima kišne kanalizacije, ili preliva iz opšteg sistema, već se regulatornim telima, koja su nadležna za upravljanje i kontrolu protoka u kanizacionim sistemima u kišno vreme, potrebni drugi načini kontrole i upravljanja. Najčešće se primenjuju procedure primene najboljih raspoloživih tehnologija (BAT - Best Available Technology) i procedure procene uticaja na životnu sredinu (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

### **2.3.3. *Regulativa u Republici Srbiji***

U zakonskoj regulativi Republike Srbije nigde se posebno ne obrađuje problematika kontrole količina i kvaliteta površinskog oticaja sa urbanih površina i saobraćajnica. Skupština Republike Srbije je 2010. godine usvojila Zakon o vodama koji uključuje veći deo osnovnih postavki iz WFD, uključujući obavezu dostizanja dobrog statusa vodnih tela. Međutim, kasni izrada i usvajanje podzakonskih akata i planova upravljanja vodama. Redovni monitoring količina i kvaliteta voda u sistemima za urbano odvodnjavanje do danas praktično nije uspostavljen.

## **2.4. KRITIČKI OSVRT NA REZULTATE DO SADA OBAVLJENIH ISTRAŽIVANJA**

Najveći broj objavljenih radova iz ove oblasti posvećen je analizi podataka o kvalitetu oticaja sa saobraćajnica i urbanih slivova. U svetu postoji veći broj urbanih slivova sa razvijenim monitoring sistemima za praćenje protoka i niza parametara zagađenja u oticaju. Na ovaj način stvoren je veliki fond podataka i ova istraživanja su usredsređena na analizu i statističku obradu podataka merenja, formiranje i testiranje empirijskih relacija ili stohastičkih modela koji opisuju pojave od značaja za ovu problematiku i analizu neodređenosti. Ovakav pristup je koristan i efikasan način da se sagledaju interakcije, proceni oticaj i emisija zagađenja sa razmatranog sliva, ali kako se ove metode ne zasnivaju na fizičkim zakonitostima, to rezultate ovih istraživanja nije preporučljivo primeniti na druge slivove bez prethodne kritičke analize i sprovedenih opsežnih postupaka kalibracije.

Veći broj radova je težište istraživanja stavilo na ispitivanje rezultata merenja kvaliteta kišnog oticaja tokom kišnih epizoda i opisivanje pojave prvog spiranja zagađenja. Za ove potrebe razvijeno je nekoliko metoda, uključujući i statističke i probabilističke pristupe. Ovo je razumljivo, jer na ovaj način je napravljen iskorak u smeru boljeg razumevanja pojave spiranja zagađenja i pokušaj da se kvantifikuju pokazatelji i kriterijumi za definisanje mera i dimenzionisanje uređaja za zaštitu vodoprijemnika od zagađivanja kišnim oticajem sa urbanih slivova. Međutim, sa izmenama zakonske regulative i prebacivanjem težišta na dostizanje ciljanog statusa vodnih tela, ova istraživanja postepeno ustupaju mesto kompleksnim istraživanjima pritisaka i uticaja usled izlivanja oticaja sa urbanih površina i unosa zagađenja ovim putem u vodna tela. Ovo uključuje multidisciplinarna istraživanja fizičko-hemijskih, bioloških, hidoroloških i morfoloških osobina vodnih tela, kao i ciljane studije (toksikološke analize, analize biodostupnosti i drugo). Još uvek je malo ovakvih kompleksnih studija prezentovano u literaturi.

Detaljni prikaz merenja akumulisanja i priraštaja zagađenja na različitim površinama su prikazani u samo nekoliko radova. Koristi se više različitih metoda uzorkovanja materijala sa površine, različite efikasnosti.

Suština interakcija između pojedinih faza ili sastojaka u oticaju je aktuelna istraživačka tema. U objavljenim radovima koji se bave ovom problematikom, često se polazi od pretpostavke da je neki proces odgovoran za neku pojavu a da nisu testirane druge mogućnosti. Primer za ovo je proces adsorpcije koja se često unapred usvaja kao proces odgovoran za dobro razdvajanje čvrste i tečne faze različitih parametara, naročito teških metala, bez dovoljno ispitivanja prirode i sastava čvrstih čestica u oticaju. Razdvajanje čvrste i tečne faze parametara kvaliteta u oticaju je od izuzetne važnosti u pogledu uticaja koji ovi parametri imaju na vodoprijemnike i životnu sredinu.

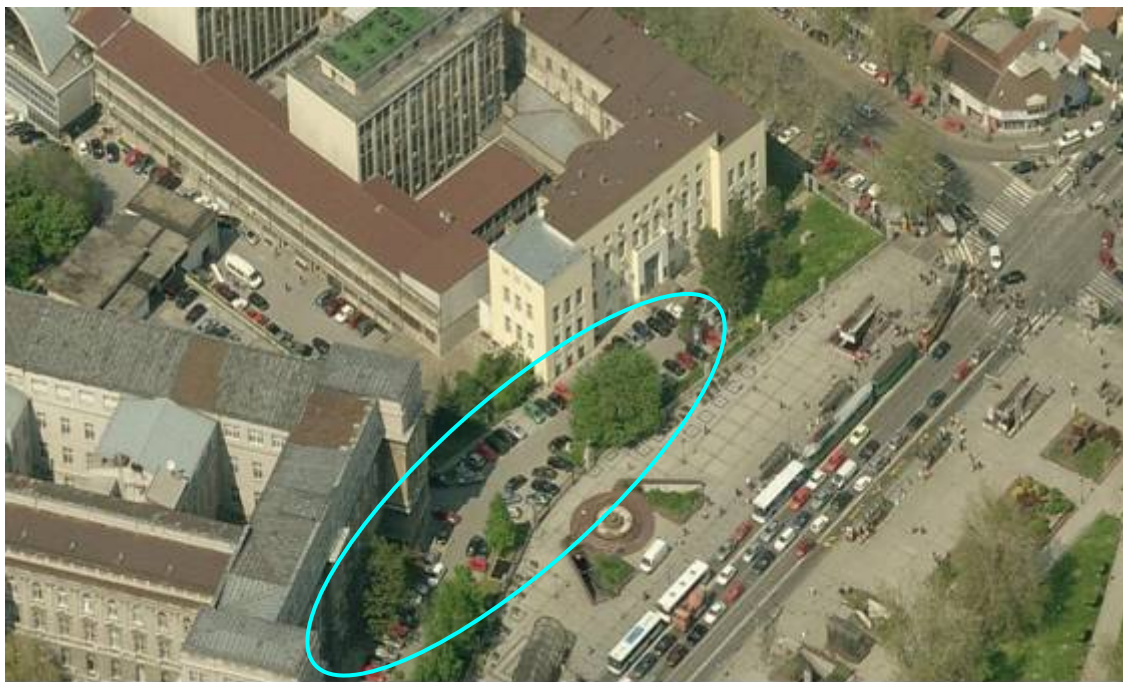
Za modeliranje oticaja i transporta zagađenja po terenu, uglavnom se koristi metoda kinematskog talasa. Ovo je opravdano kod pravilnih površina sa ujednačenim i blago promenljivim padovima kao što su, na primer, saobraćajnice. Međutim kod analiza realnih urbanih slivova koji najčešće imaju površine nepravilnog oblika sa neujednačenim nagibima, na kojima postoji mogućnost zadržavanja vode (formiranja malih akumulacija), kontranagibi i više izliva vode, za proračune pokretanja vode i zagađenja, tečenja i eventualnog istaložavanja zagađenja u oticaju, bolje je koristiti metodu dinamičkog talasa, pri čemu i stepen prostorne diskretizacije treba da bude prilagođen analiziranom problemu.

### 3. EKSPERIMENTALNI DEO

#### 3.1. UZORKOVANJE MATERIJALA SA NEPROPUSNIH POVRŠINA

##### 3.1.1. Lokacija uzorkovanja

U cilju sprovođenja istraživanja dinamike količina i kvaliteta kišnog oticaja sa urbanih površina formiran je ekperimentalni sliv na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu (slika 3-1). Ekperimentalni sliv obuhvata interne saobraćajnice (asfalt), parkirališta (asfalt ili kamena kocka zalivena cementom), trotoar (betonske ploče zalivene cementom), metalni krov i zelene površine (slika 3-2 i 3-3). Ekperimentalni sliv se nalazi oko 30 m od okolnih gradskih ulica i odvojen je od njih 0,7 m visokim betonskim zidom i, delimično, zelenilom.



Slika 3-1. Pogled iz vazduha na deo parkinga u dvorištu Građevinskog fakulteta u Beogradu gde je formiran ekperimentalni sliv (izvor: <http://www.bing.com/maps/>)

Najveći deo sliva u dvorištu Građevinskog fakulteta pripada nepropusnoj površini parkinga i trotoara od asfalta, kamena ili betona površine oko 2200 m<sup>2</sup>, dok

polupropusne zelene površine obuhvataju oko 1000 m<sup>2</sup>, a najmanji udeo imaju krovne površine zgrade Instituta za fiziku (100 m<sup>2</sup>) pokrivenne metalnim limom, (slika 3-2).



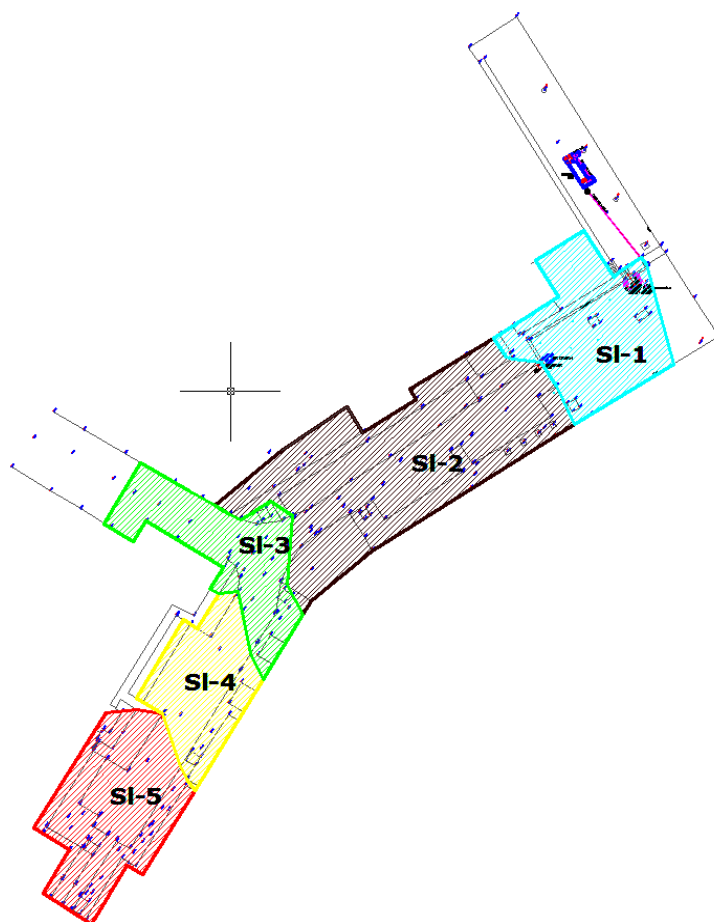
Slika 3-2. Pregledna situacija eksperimentalnog sliva u Beogradu

Kompletna površina sliva drenira se sa 4 slivnika koji su povezani na javnu kišnu kanalizaciju u obližnjim ulicama. Stoga površinu možemo podeliti na 4 podsliva S2, S3, S4 i S5 (slika 3-4). Slivna površina S1 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. Sliv je koncipiran tako da je moguće zatvaranjem pojedinih slivnika menjati udeo površina sa kojih površinski oticaj otiče, kako bi se pratila dinamika i kvantifikovao doprinos pojedinih površina.



Slika 3-3. Parking Građevinskog fakulteta gde se nalazi sliv (decembar 2012.)

Detaljno geodetsko snimanje eksperimentalnog sliva je izvršeno jula 2011. godine. Delineacija eksperimentalnog sliva na podslivove je prikazana na slici 3-4.



Slika 3-4. Delineacija eksperimentalnog sliva

Karakteristike slivnih površina i usvojeni koeficijenti oticaja su dati u narednim tabelama 3-1, 3-2 i 3-3.

Tabela 3-1. Površine i udeli različitih tipova površina po podslivovima eksperimentalnog sliva

OZNAKA SLIVA	POVRŠINA - $A$ (m <sup>2</sup> )				
	Ukupna - $A_i$ (m <sup>2</sup> )	Nepropusne			Propusne - zelenilo
		Asfalt	Beton, kamen	Metalni krov	
SI-1	584,0	0,0	102,9	104,1	377,0
SI-2	1229,0	441,1	465,0	0,0	322,9
SI-3	483,9	356,6	64,8	0,0	62,5
SI-4	410,2	135,3	188,8	0,0	86,1
SI-5	624,4	109,4	328,2	0,0	186,8
<b>Ukupno (m<sup>2</sup>)</b>	<b>3331,5</b>	<b>1042,4</b>	<b>1149,7</b>	<b>104,1</b>	<b>1035,3</b>
<b>%</b>	<b>100,0</b>	<b>31,3</b>	<b>34,5</b>	<b>3,1</b>	<b>31,1</b>



Tabela 3-2. Usvojene vrednosti koeficijenta oticaja (Kd) po tipovima površina

<b>Tip površine</b>	<b>Kd (-)</b>
Asfalt	0,90
Beton, kamen	0,85
Metalni krov	0,90
Zelene površina	0,15

Tabela 3-3. Srednji koeficijenti oticaja po podslivovima eksperimentalnog sliva

<b>OZNAKA</b>	<b>Kd,i (-)</b>	<b>Ai x Kd,i (m<sup>2</sup>)</b>
SI-1	0,407	237,7
SI-2	0,684	840,7
SI-3	0,796	385,4
SI-4	0,720	295,2
SI-5	0,649	405,5
<b>Prosečno, za celi sliv</b>	<b>0,650</b>	<b>2164,4</b>

### 3.1.2. Metode uzorkovanja

Tehnika uzorkovanja materijala sa urbanih nepropusnih površina usisavanjem je u literaturi označena kao najefikasnija metoda za sakupljanje finih čestica sa asfaltnih površina (Deletić i Orr 2005). Koriste se različiti tipovi industrijskih usisivača, a u primeni su metode suvog i mokrog usisavanja. Kod prve metode površina sa koje se uzima uzorak je suva i tokom usisavanja se ne vlaži. Kod metode mokrog usisavanja površina sa koje se usisava uzorak se vlaži vodom, pre i tokom usisavanja. Kod obe metode površina koja se usisava treba da bude precizno ograničena, što se postiže primenom okvira ili ramova odgovarajućih dimenzija koji se postavljaju na površinu pre uzorkovanja. Obe tehnike su veoma efikasne u sakupljanju finih i grubih frakcija materijala koje se akumuliraju na urbanim površinama, ali prema Deletić i Orr (2005) tehnika mokrog usisavanja ima bolju efikasnost sakupljanja najfinijih frakcija čvrstih čestica. Za vlaženje površine pri mokrom usisavanju koristi se destilovana ili dejonizovana voda, kako bi se što približnije podražavali uslovi pri padavinama i smanjili na minimum potencijalni uticaji vode za uzorkovanje na rezultate laboratorijskih analiza uzoraka.

Ranija istraživanja ukazuju da je značajan deo zagađenja u urbanom oticaju vezan za finije frakcije čvrstih materija, odnosno čestica prečnika manjeg od 150  $\mu\text{m}$



(Deletić i Orr, 2005; Fujiwara i sar. 2011; Hengren i sar. 2006;, Zhao i Li 2013). U skladu sa ovim, mokri metod usisavanja (Deletić i Orr, 2005) je korišćen za uzimanje uzoraka materijala sa nepropusnih površina eksperimentalnog sliva Građevinskog fakulteta u Beogradu. Ovaj metod je uključivao ograđivanje odabrane površine, simultano kvašenje površine vodom i uklanjanje formirane suspenzije industrijskim usisivačem "Karcher Puzzi 100 Super" (slika 3-5).



Slika 3-5. Karcher Puzzi 100 usisivač sa mlaznicom za vodu

Ograđivanje površine je vršeno kvadratnim metalnim ramom unutrašnjih dimenzija 707x707 mm (odnosno 0,5 m<sup>2</sup> površine unutar rama), čime je obezbeđeno da se uzorkovanje uvek vrši sa površine iste veličine. Da bi se sprečio gubitak suspenzije vode i materijala sa površine isticanjem na mestima spoja okvira i podloge, neposredno pre uzorkovanja metalni je okvir zaptivan za podlogu gitom (slika 3-6).

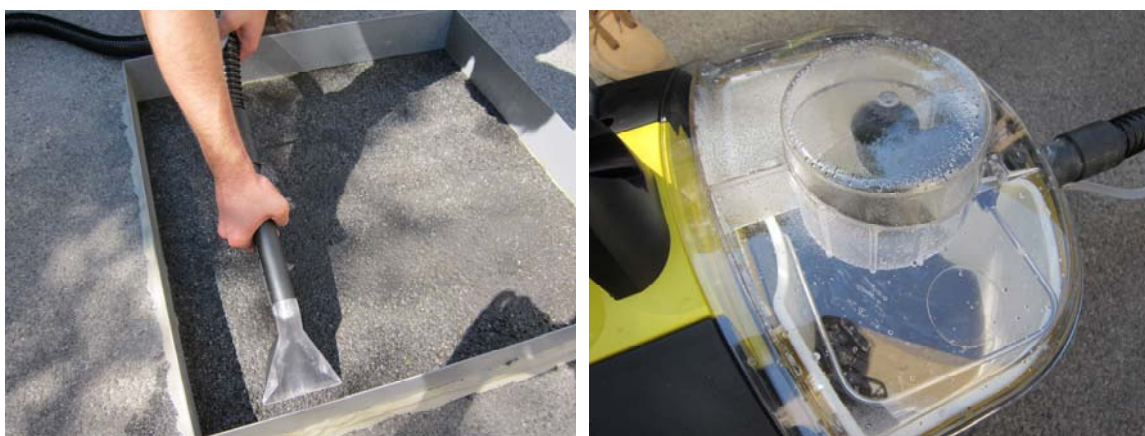


Slika 3-6. Postavljanje rama na asfaltnu podlogu

Na usisivaču postoje dve posude - posuda za čistu i za prljavu vodu, kapaciteta 10 i 9 litara. Uzorak se usisava preko papuče prikjučene na crevo za usisavanje na čijem kraju je dizna za usisavanje i mlaznica iz koje se prska voda iz posude za čistu vodu po

površini. Mlaznica za vodu se nalazi neposredno ispod otvora za usisavanje a voda se prska simultano sa usisavanjem po površini, pod pritiskom od 1 bar i u količini od oko 1 L/min. Na ovaj način mlaz vode pospešuje pokretanje finih frakcija koje mogu biti vezane za površinu. Pre početka usisavanja, oko 50 mL čiste vode je prskano po površini unutar rama sa koje se zahvata uzorak kako bi se izbeglo nenamerno iznošenje najfinijih frakcija čvrstih čestica van rama tokom postupka uzorkovanja. Prilikom uzorkovanja korišćeno je ukupno 4 ili 2 litra dejonizovane vode za uzimanje uzorka sa jedne lokacije. Masa čiste vode i masa prljave vode (čista voda pomešana sa čvrstim česticama usisanih sa površine) je merena vagom pri svakom uzorkovanju. Udeo mase prljave u odnosu na čistu vodu tokom merenja kretao se u opsegu od 93% do 97%.

Tokom procesa usisavanja, dizna za usisavanje je ručno pomerana približno konstantnom brzinom od oko 10 cm/s u paralelnim linijama tako da bude usisana cela površina. Tokom usisavanja, dejonizovana voda se kontinualno raspršuje po površini dok se formirana vodena suspenzija, koja sadrži čvrste čestice sa površine, istovremeno usisava (slika 3-7). Na svakom mestu za uzorkovanje ovaj postupak je ponavljan četiri puta, u svim smerovima. Prikupljen uzorak iz posude za prljavu vodu je presipan u prethodno očišćene polietilenske i staklene posude. Hermetički zatvorene, označene posude su čuvane na 4°C u frižideru do laboratorijskih analiza. Pre svakog uzorkovanja, posuda čiste i prljave vode, usisno crevo i usisna dizna su isprani dejonizovanom vodom.



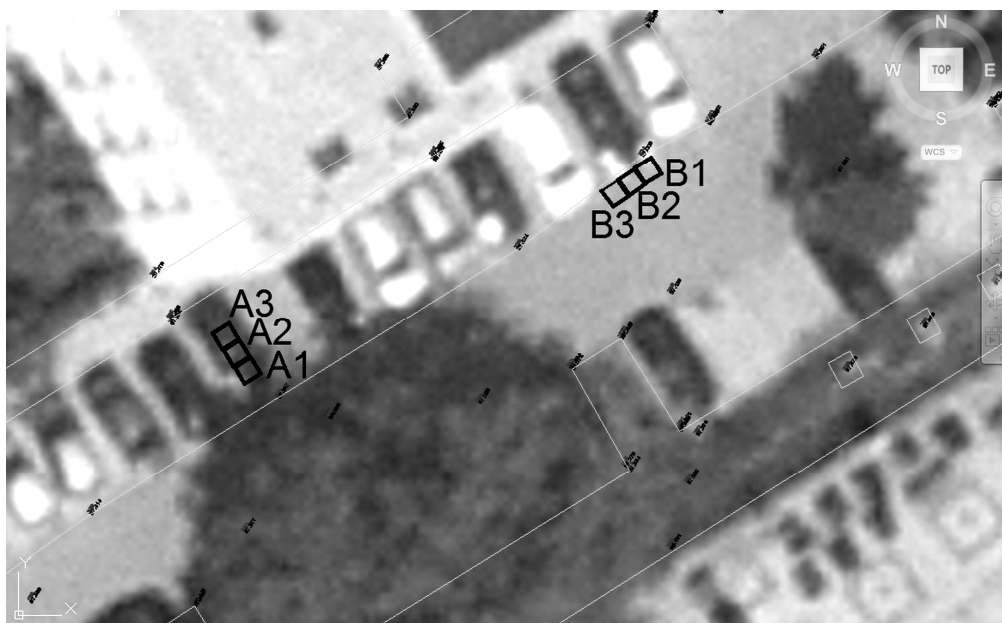
Slika 3-7. Mokro usisavanje površine: levo usisno crevo, desno rezervoar prljave vode sa uzorkom

### 3.1.3. Prethodna ispitivanja, uzorkovanje sa asfaltnih površina (Serija I)

Inicijalna ispitivanja akumulisanja materija na asfaltnim površinama na eksperimentalnom slivu Građevinskog fakulteta izvršena su avgusta meseca 2012. godine. Uzorkovanje sa asfaltnih površina je izvedeno 2., 10. i 17. avgusta 2012. godine u prepodnevnim časovima. Vreme i broj zahvaćenih uzoraka su dati u tabeli 3-4, a lokacije zahvatanja uzoraka su date na slici 3-8.

Tabela 3-4. Vreme i mesto zahvatanja uzoraka, avgust 2012.

Datum	Lokacije uzorkovanja (Slika 3-8)
2 avgust 2012	A1, B1
10 Avgust 2012	A1, A2, B1, B2
17 Avgust 2012	A1, A3, B1, B3



Slika 3-8. Lokacije uzorkovanja materijala sa asfaltnih površina

### 3.1.4. Uzorkovanje površinskih slojeva snega (Serija II)

Uzorkovanje snega je izvedeno u dvorištu Građevinskog fakulteta u Beogradu 10., 12., 13., 14., 15. i 17. decembra 2012. godine. Zahvaćeno je ukupno šest uzoraka neporemećenog snežnog pokrivača u količini od po oko 1 kg, sa površine od približno 0,5 m<sup>2</sup>. Mesta uzorkovanja su bila locirana na zelenim površinama pored parkinga, naspram ulaza u zgradu Instituta za fiziku. Mesta za uzorkovanje su birana tako da sneg

na tom mestu bude netaknut. Uzorci su u plastičnim vrećama odnošeni u Laboratoriju za sanitarnu hidrotehniku Građevinskog fakulteta, gde su otapani u staklenim posudama, zatim prebacivani u plastične flaše i držani u frižideru na 4°C do obavljanja laboratorijskih analiza.

### **3.1.5. Uzorkovanje sa asfalta, betona i kamena (Serije III, IV i V)**

#### **Uzorkovanje za ispitivanje akumulisanja zagađenja, jul 2013. (Serija III)**

U ovoj kampanji je vršeno zahvatanje uzoraka sa:

- asfaltnih površina (kolovozna površina - parking) i
- betonskih površina (pešački trotoar - prilaz zgradi Instituta za fiziku, na koji se ponekad parkiraju automobili).

Položaj mesta za zahvatanje je dat na slikama od 3-9 do 3-12. Zahvatanje uzoraka sa asfalta, lokacije A1, i sa betona, lokacija S1, je izvršeno 9. jula 2013. godine. 10. jula 2013. godine deo parkinga i betonskih staza sa kojih je vršeno uzorkovanje je detaljno i intenzivno opran vodovodskom vodom, korišćenjem pumpe kapaciteta oko 5 L/s, fleksibilnog creva i vatrogasnog šmrka, u trajanju od oko 10 minuta. Oprana površina pokriva oko 100 m<sup>2</sup>, tako da je intenzitet pranja bio oko 30 L/m<sup>2</sup>.

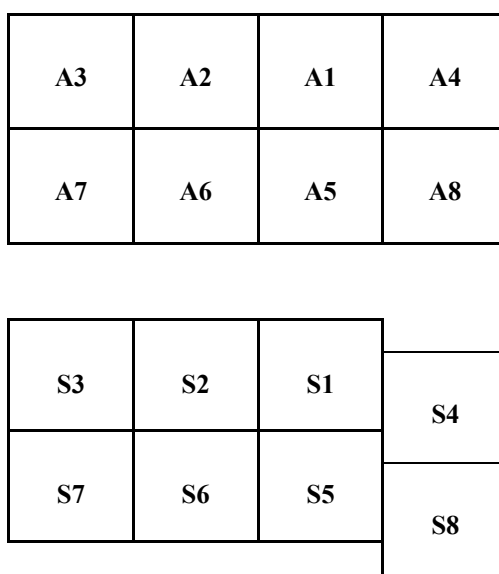
Uzorci A1 - A8 i S1 - S8 su zatim uzimani u jutarnjim časovima. Uzorci označeni sa A1 - A8 su zahvatani sa asfalta a uzorci označeni sa S1 - S8 sa betona. Datumi uzorkovanja su prikazani u tabeli 3-5. Tokom perioda uzorkovanja nije bilo padavina.

Tabela 3-5. Lokacije zahvatanja uzoraka, jul 2013. (Serija III)

<b>Datum</b>	<b>Lokacije uzorkovanja (Slika 3-9 i 3-12)</b>
11. jul 2013.	A1, S1
12. jul 2013.	A2, S2
13. jul 2013.	A3, S3
14. jul 2013.	A4, S4
15. jul 2013.	A5, S5
17. jul 2013.	A6, S6
19. jul 2013.	A7, S7
21. jul 2013.	A8, S8

Međusobni raspored lokacija uzorkovanja je prikazan na Slici 3-9. Svako polje (A1, A2, ... A8; S1, S2, ... S8...) predstavlja kvadrat unutrašnjih dimenzija 707x707 mm na koji je postavljan pomoćni ram za uzorkovanje, kako je opisano u Poglavlju 3.2.2. Kao što se sa slike 3-9 vidi, mesta uzorkovanja se dodiruju, ali nema preklapanja između njihovih površina.

Tokom kampanje uzorkovanja 2013. godine sukcesivno su uzimani uzorci uvek sa druge lokacije na asfaltu ili betonu, kako bi se ispitalo nagomilavanje (akumulacija) materija na razmatranom tipu površine. Uzorci su uzimani u razmaku od jednog ili dva dana (precizna vremena uzorkovanja su data u poglavlju 4), a redosled zahvatanja uzorka odgovara rednom broju mesta uzorkovanja sa slike 3-9.



Slika 3-9. Raspored mesta za uzorkovanje sa asfalta i betona

Na slikama 3-10 i 3-11 prikazan je izgled lokacija za uzorkovanje. Mapa sa preciznim lokacijama uzorkovanja tokom 2013. godine, unetim na snimljenu geodetsku podlogu, je data na slici 3-12.

**Uzorkovanje za ispitivanje priraštaja zagađenja, jul 2013. (Serija IV)**

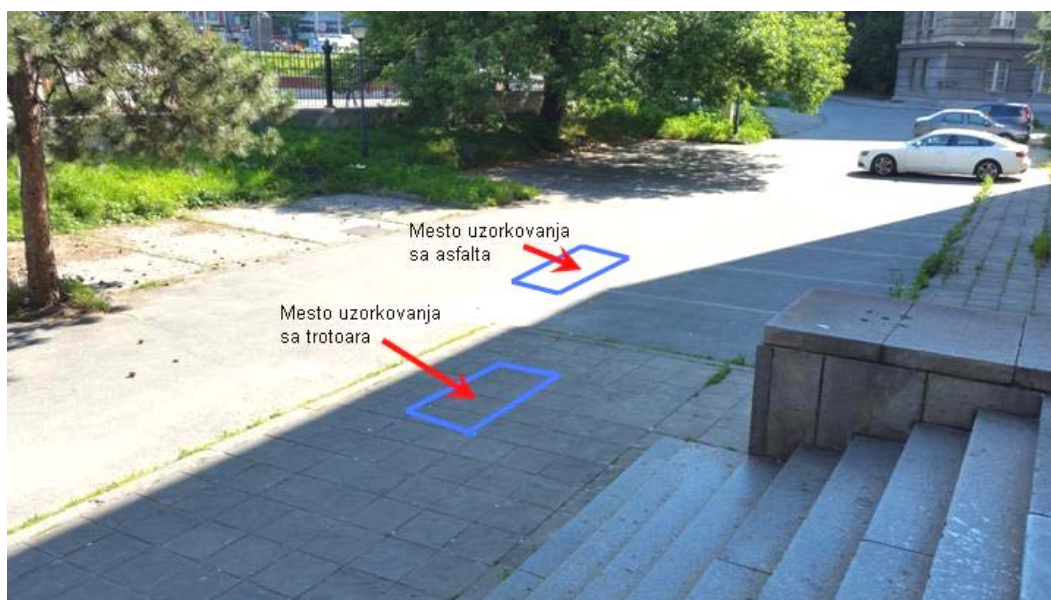
U ovoj kampanji je vršeno zahvatanje uzoraka sa asfaltnih i betonskih površina, i to sa lokacija A1 i S1. Sa obe lokacije je u periodu od sedam dana, 20. do 26. jula 2013. godine, svaki dan u jutarnjim časovima zahvatan po jedan uzorak. U periodu uzorkovanja nije bilo padavina. Međutim, u popodnevnom časovima 23. jula na asfaltnoj

površini u okolini mesta uzorkovanja A1 izvršen je utovar i odvoženje građevinskog materijala (cigla, malter, drugi otpadni građevinski materijal). Zaprljanje asfaltnih i okolnih površina ostacima građevinskog materijala i prašinom je bilo evidentno pri uzorkovanju izvedenom sledećeg dana, 24. jula, ali nastavljeno je sa kampanjom uzrokovanja po planu da bi se kvantifikovao ovaj uticaj i ispitalo potrebno vreme za stabilizaciju rezultata nakon ovog poremećaja.

Za potrebe prikupljanja dovoljne količine uzorka čvrstih materija sa nepropusnih površina za potrebe ispitivanja čvrste faze, usisavanjem je dodatno sakupljeno materijala sa približno još oko 15 m<sup>2</sup> parkinga.

### **Uzorkovanje za ispitivanje priraštaja zagađenja, oktobar 2013. (Serija V)**

U oktobru 2013. su vršena uzorkovanja u cilju ispitivanja dnevnog priraštaja zagađenja na tri tipa površina: asfalt, beton i kamen. U ovoj kampanji vršeno je zahvatanje uzoraka u periodu od sedam dana, 5. do 11. oktobra 2013. godine. Svakog dana, ujutru, zahvatan je po jedan uzorak sa asfaltnih, betonskih i kamenih površina. Sa asfaltnih i betonskih površina uzorci su uzimani sa lokacija A1 i S1 (slika 3-12). Uzorkovanje sa kamene površine vršeno je sa granitnog podesta, kako je prikazano na slikama 3-11 i 3-12 (lokacija označena sa K1). U periodu uzorkovanja nije bilo atmosferskih padavina.

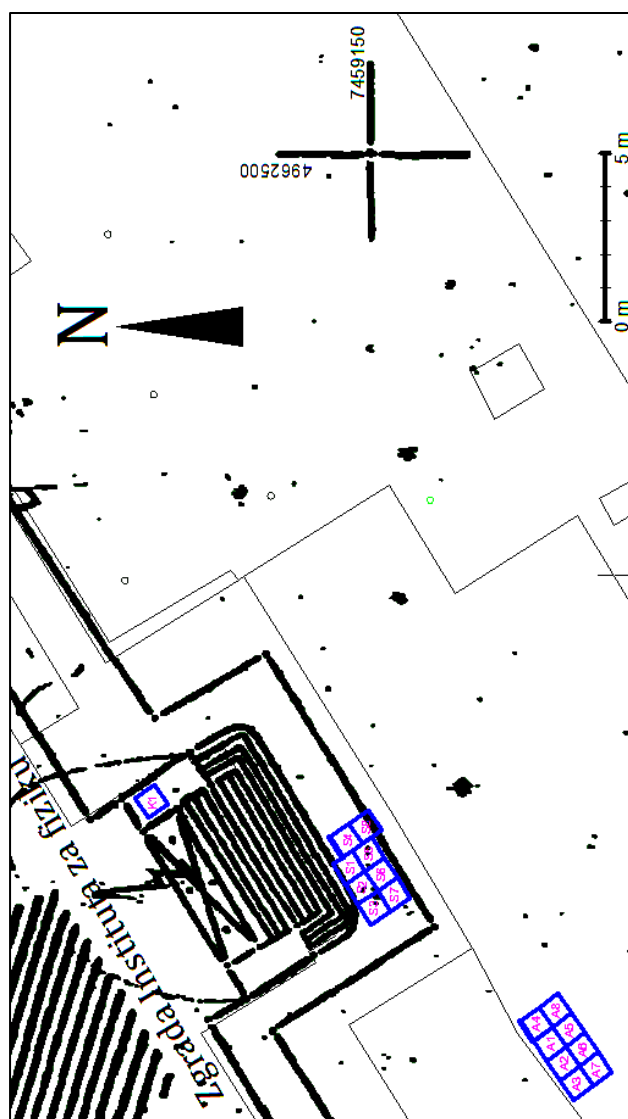


Slika 3-10. Parking Građevinskog fakulteta u Beogradu sa označenim mestima uzorkovanja sa asfalta i betonskog trotoara





Slika 3-11. Mesto uzorkovanja sa kamena pored ulaza u zgradu Instituta za fiziku u Beogradu



Slika 3-12. Precizan položaj mesta za uzorkovanje

## 3.2. METODOLOGIJA ANALIZE UZORAKA

### 3.2.1. Analiza zbirnih uzoraka i tečne faze

Uzorci zahvaćeni u prethodnim ispitivanjima u avgustu 2012. godine su analizirani u Gradskom zavodu za javno zdravlje Beograd, Centar za higijenu i humanu ekologiju, Laboratorija za humanu ekologiju i ekotoksikologiju. Uzorci, koji su se sastojali od smeše vode i čvrstih čestica su analizirani akreditovanim metodama na standardne fizičko-hemijske parametre kvaliteta, sadržaj specifičnih organskih materija (fenoli, ugljovodonici) i sadržaj teških metala.

Uzorci koji su zahvatani tokom 2013. godine ispitivani su u Laboratoriji za sanitarnu hidrotehniku Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, laboratoriji "Anahem" iz Beograda i Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Zahvaćeni uzorci sa nepropusnih površina tokom 2013. godine, koji se sastoje od tečne faze (vode) i čvrste faze (akumulisanih čestica sa površine), su podvrgnuti hemijskoj karakterizaciji. Primenjene laboratorijske metode analize i korišćena instrumentalna tehnika su dati u tabeli 3-6.

Tabela 3-6. Parametri, metode i tehnike za karakterizaciju tečne i čvrste faze

Parametar	Analitička metoda i oznaka standarda	Instrument, proizvođač, pribor
<b>Fizičko-hemijski</b>		
pH vrednost	Elektroanalitička, 4500-H <sup>+</sup> B*	pH metar, WTW 340i
Suvi ostatak na 103-105 °C ( <i>Total Solids</i> - TS)	Gravimetrijska, 2540-B*	Standardni analitički pribor za određivanje suvog ostatka, sušnica Salvis Luzern
Ukupne suspendovane materije na 103-105 °C ( <i>Total Suspended Solids</i> - TSS)	Gravimetrijska, 2540-D*	
Taložljive materije	Gravimetrijska, 2540-F*	Imhofov konus
Hemijska potrošnja kiseonika (HPK)	Volumetrijska, 5220-D*	UV-Vis spektrofotometar, Hach Lange DR 2800
Biohemijska potrošnja kiseonika za 5 dana (BPK <sub>5</sub> )	Manometarska, 5210-B*	Oxidirect BSB BOD, Lovibond. FTC 90 inkubator sa fiksnom temperaturom 20°C.
Mutnoća	Turbidimetrijska, 2130*	Turbidimetar, WTW 340i

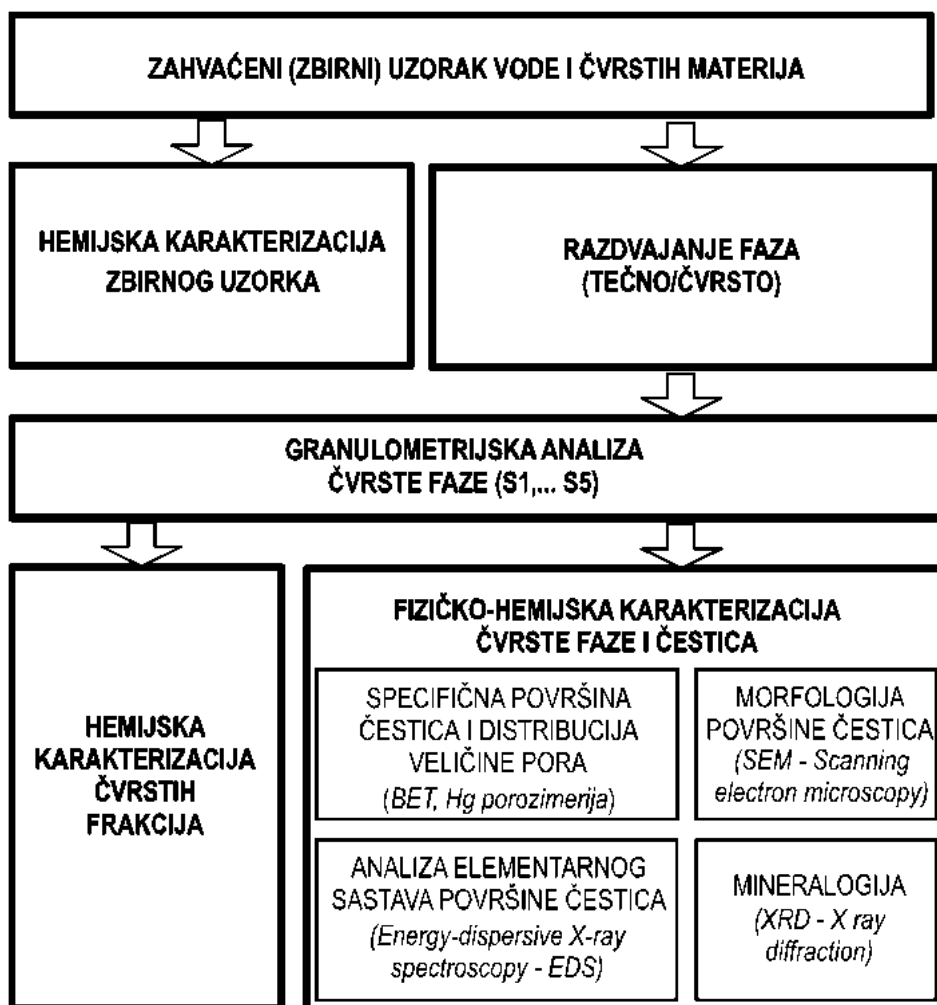


<b>Parametar</b>	<b>Analitička metoda i oznaka standarda</b>	<b>Instrument, proizvođač, pribor</b>
<b>Joni metala (u tečnoj fazi)</b>		
Bakar (Cu <sup>2+</sup> ), Cink (Zn <sup>2+</sup> ), Gvožđe (Fe <sup>2+</sup> )	Atomska apsorpciona spektroskopija (AAS), SM 3111b:1999	AAS, 4100ZL Perkin Elmer
Nikl (Ni <sup>2+</sup> ), Olovo (Pb <sup>2+</sup> )	Indukovano spregnuta kuplovana plazma sa masenim detektorom, ICP-MS	ICP-MS, Agilent 7500ce, Valdbron, Nemačka
Hrom (Cr(VI+))	Spektrofotometrija ISO 11083:1994	UV-Vis spektrofotometar, Hach Lange DR 2800
<b>Metali (elementarni, u čvrstoj fazi)</b>		
Hrom (Cr), Bakar (Cu), Cink (Zn), Gvožđe (Fe), Nikl (Ni), Olovo (Pb)	Indukovano spregnuta kuplovana plazma sa masenim detektorom, ICP-MS Priprema uzoraka mikrotalasnom digestijom	ICP-MS, Agilent 7500ce, Valdbron, Nemačka
<b>Nutrijenti (u tečnoj fazi)</b>		
Ukupni azot (TN)	Spektrofotometrija Metoda sa askorbinskom kiselinom, 4500-P.E.*	UV-Vis spektrofotometar, Hach Lange DR 2800
Ukupni fosfor (TP)	Spektrofotometrija Digestija persulfatom, 4500-N.B.*	UV-Vis spektrofotometar, Hach Lange DR 2800
<b>Nutrijenti (u čvrstoj fazi)</b>		
Ukupni azot (TN)	Modifikovana Kjeldal metoda SRPS ISO 11261	Automatska jedinica za Kjeldal digestiju, Velp Scientifica DKL 8.
Ukupni fosfor (TP)	Spektrofotometrija ISO 11263, Određivanje fosfora rastvorljivog u natrijum bikarbonatu	UV-Vis spektrofotometar, Hach Lange DR 2800
<b>Anjoni (u tečnoj fazi)</b>		
(Cl <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Jonska hromatografija	Jonski hromatograf IC Metrohm 861

\* APHA, AWWA, WEF: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd Ed. Washington DC, USA. (2012)

### 3.2.2. Analiza čvrste faze zahvaćenih uzoraka

Uzorci zahvaćeni u julu 2013. godine su podvrgnuti razdvajanju tečne i čvrste faze. Sadržaj teških metala je ispitivan u početnoj fazi istraživanja. Analize čvrste faze su obuhvatile granulometrijska ispitivanja, hemijsku i fizičko-hemijsku karakterizaciju. Algoritam sprovedenih eksperimentalnih postupaka prikazan je na slici 3-13.



Slika 3-13. Algoritam sprovedenih eksperimentalnih procedura

Izdvojene čvrste materije su osušene na 50°C i zatim suvo prosejane prema nacionalnom standardu (SRPS U.B1.026: 1968) na frakcije veličine čestica: <63µm, 63-90µm, 90-125 µm, 125-250 µm i > 250 µm. Ova ispitivanja su obavljena u Laboratoriji za mehaniku tla Građevinskog fakulteta Univerzitetu u Beogradu.

U cilju ispitivanja mogućnosti za sorpciju jona teških metala na česticama čvrste faze, sve izdvojene frakcije čvrste faze su podvrgnute sledećim ispitivanjima:

- određivanje specifične površine i distribucije veličina pora,
- morfološko ispitivanje površina čestica,
- analiza elementarnog sastava površine čestica,
- mineraloška ispitivanja.

Specifična površina čestica i distribucija veličina pora je izvedena metodom niskotemperaturne adsorpcije azota na  $-196^{\circ}\text{C}$ . Specifična površina je određena Brunauer-Emmet-Teller (BET) tehnikom dok je raspodela veličina pora izračunata iz desorpcione izoterme koristeći Barret Joiner-Halenda (BJH) jednačinu (Vulić i sar. 2013). Metoda utiskivanja žive je korišćena za analizu distribucije veličina pora u česticama i kumulativnu zapreminu pora otvora u rasponu prečnika od  $0,02\text{-}200\ \mu\text{m}$  (Rudić i sar. 2014.).

Pored toga, frakcije čvrstih čestica još su ispitivane i sledećim tehnikama karakterizacije:

- morfologija površina čestica je ispitivana skeniranjem elektronskim mikroskopom (SEM),
- energijsko disperzivnom spektroskopijom (EDS) ispitivana je fizičko hemijska struktura površine čestica,
- ispitivanje mineraloškog sastava čvrste frakcije izvršeno je metodom defrakcije X-zraka (XRD).

Sažeti pregled analiziranih parametara i primenjenih analitičkih tehnika ispitivanja čvrste faze su opisani u tabeli 3-7.

Tabela 3-7. Metode i tehnike za karakterizaciju čvrste faze

<b>Karakteristika</b>	<b>Analiitička metoda i oznaka standarda</b>	<b>Instrument, proizvođač i tehnika</b>
<b>Granulometrijski sastav</b>		
Čestice prečnika >0,063 mm	Prosejavanje na sitima SRPS U.BI.026:1968 DIN 4187, 4188.	Laboratorijska sita, Controls, Automaski šejker sita Controls - D407.
Čestice prečnika <0,063 mm	Hidrometarska metoda ASTM-E100/151H-62	
<b>Specifična površina i distribucija po veličini pora</b>		
Specifična površina čestica	Brunauer–Emmet– Teller BET metoda	Micromeritics, ASAP 2010
Distribucija po veličini pora	Metoda utiskivanja žive	Hg Porozimetar, Carlo Erba 2000 WS
<b>Morfologija površine i mineralni sastav</b>		
Morfologija površine čestica	Skenirajući elektronski mikroskop, SEM	Skenirajući elektronski mikroskop (FE-SEM),Tescan Mira 3 XMU
Analiza sastava površine	Energetska disperzivna spektroskopija, EDS	Energetska disperzivna spektroskopija (EDS), Skenirajući elektronski mikroskop, Jeol JSM 5800
Mineralogija	Difrakcija X-zraka, XRD	Difraktometar, XRD Ultima IV Rigaku

## **4. MODELIRANJE OTICAJA I EMISIJE ZAGADENJA**

### **4.1. OSNOVNE POSTAVKE**

Model je aproksimacija realnosti koji u sebi uključuje uzročno-posledične relacije. Važan cilj modeliranja je da se analiziraju te relacije i simulira rad sistema za sakupljanje i odvod kišnog oticaja. U tom kontekstu, model se definiše kao skup matematičkih formulacija fizičkih, hemijskih ili bioloških procesa (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Model uključuje matematičke formulacije kojima se opisuju procesi i sa njima povezani parametri koji karakterišu sistem. U određenim slučajevima, odnosi koji su formulisani u formi tabelarnih podataka ili grafikona se takođe mogu smatrati modelom. U okviru definisanih ograničenja, model se može koristiti za simulaciju datih karakteristika i rada sistema.

Računari su znatno promenili projektovanje, upravljanje i kontrolu rada gradskih kanalizacionih sistema. Jednostavna pravila i procedure su u velikoj meri zamenjene odgovarajućim modelima i formulacijama koje se rešavaju pomoću računara. Računari su povećali brzinu proračuna i, sa stanovišta modeliranja, skoro da nema ograničenja u formulacijama opisa sistema i detalja procesa koje obuhvata model. Nema sumnje da su računarski hidraulički modeli poboljšali mogućnosti za pravilne i detaljne simulacije tečenja oticaja. Međutim, kada je reč o modeliranju kvaliteta oticaja u pogledu hemijskih i bioloških procesa i pojava, sličan uspeh nije postignut. Važno je shvatiti da su ovi procesi i pojave obično daleko složeniji od fizički zasnovanih formulacija tečenja. Detaljan deterministički opis, naročito u slučaju bioloških procesa, stoga uključuje brojne procese interakcija i odgovarajući veliki broj parametara modela. Mogućnosti za procenu i predviđanje kvaliteta oticaja su generalno i dalje ograničeni na empirijska saznanja o ovim procesima i pojavama (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

#### ***4.1.1. Opšti postupak modeliranja***

Modeliranjem se dolazi do odgovora na pitanja o radu i stanju analiziranog sistema na kvantitativan način. Rezultat procesa modeliranja je od izuzetne važnosti prilikom projektovanja i upravljanja sistemom. Očigledno je od ključnog značaja pouzdanost

modela u predviđanju stanja sistema. Postupak modeliranja obuhvata (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010):

➤ **Validacija modela**

Validacija modela je proces u kome se obezbeđuje da su u model uključene logične, proverene i dovoljne informacije, često u formi matematičkih formulacija. Očekuje se da korisnik modela uzme u obzir aspekte koji su najbitniji za modeliranje i da obezbedi da se u modelu koriste podaci i formulacije koje odgovaraju konkretnom slučaju. Opšte je pravilo da model ne treba koristiti van opsega veličina za koje je napravljen.

➤ **Kalibracija modela**

Cilj ovog postupka je utvrđivanje vrednosti parametara modela na osnovu empirijski utvrđenih podataka koji karakterišu sistem i procese koji se modeliraju. Procedura obuhvata podešavanje parametara modela dok se ne postigne određeni (optimalni) nivo saglasnosti rezultata modela i empirijskih podataka. Rezultat ovog postupka su kalibrirane vrednosti parametara modela.

➤ **Verifikacija modela**

Model sa kalibrisanim parametrima se testira na delu skupa podataka koji nije prethodno korišćen za kalibraciju modela. Stoga ovaj postupak predstavlja procenu tačnosti modela pod uslovima za koje će se primenjivati.

Postoje različiti pristupi u tumačenju i izvođenju kalibracije. Idealan pristup je da parametar koga treba kalibrisati treba da izrazi određenu karakteristiku sistema. Međutim, u stvarnosti različite karakteristike sistema preko empirijski utvrđenih podataka utiču na vrednost kalibrisanog parametra. Kalibracija stoga može biti složena, model može zahtevati veliku količinu podataka za njenu kalibraciju i više od jednog seta parametara. Jedan broj radova (Mourad i sar. 2005, Bertrand-Krajevski 2007), raspravlja o konkretnim aspektima od značaja za kvalitetno modeliranje zagađenja u urbanom oticaju.

#### ***4.1.2. Vrste modela za transport i transformaciju sastojaka***

Modeli kvaliteta koji se primenjuju u modeliranju urbanog oticaja često uključuju predviđanje masenih opterećenja zagađenjem, brzinu akumulisanja ili uklanjanja

zagađenja i predviđanje gde će se izliti zagađenje. Na ovaj način sledeće stavke postaju ključni elementi modela kvaliteta (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010):

- Stehiometrijske karakteristike transformacije zagađenja
- Kinetičke karakteristike transformacije zagađenja
- Karakteristike transporta zagađenja

Iako su formulisane u širem smislu, ove karakteristike čine bazu iz koje bi se u idealnom slučaju model razvijao, obično primenom jednačine održanja mase:

$$\text{masa sastojka} = \text{ulaz} - \text{izlaz} \pm \text{transformacija} \quad (4-1)$$

Opis transportnih procesa vode i sastojaka u njoj mora odraziti dinamičku prirodu oticanja. Stoga treba razmatrati neustaljeno tečenje u modelu, a ustaljeno tečenje može biti razmatrano u početnim fazama modeliranja. Postoje različite vrste modela (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010):

- Empirijski modeli
- Statistički formulisani modeli
- Deterministički modeli
- Stohastički modeli
- Modeli sive kutije (gray box modeli)

Važno je primetiti da model može uključivati karakteristike iz više od jedne od ovih grupa.

#### ➤ **Empirijski modeli**

Formulacija empirijskog modela se zasniva na rezultatima eksperimenata ili sistematskog programa monitoringa. Stepem teorijskog znanja o fenomenu koji je predmet modela može znatno da varira od jedne do druge vrste modela. Veoma jednostavni empirijski modeli su modeli crne kutije (npr. modeli ulaz-izlaz), koji predviđaju fenomen bez znanja o procesima koji ih regulišu. Druge vrste modela uključuju neka osnovna teorijska znanja o fenomenima, kao kod modela sive kutije (opisani u nastavku). Empirijski modeli su od posebnog značaja kada postoji samo prilično grubo poznavanje rada sistema. Takvi modeli su takođe korisni kada postoji ograničena količina podataka. Ono što je, međutim, veoma važno napomenuti je da

se empirijski modeli mogu koristiti samo u svojoj oblasti definicije, odnosno modeliran sistem ili fenomen mora biti u opsegu za koji je model prvobitno razvijen. Tipično, konstante i parametri empirijskog modela ne odražavaju bilo kakve opšte zakonitosti procesa i pojava. Da bi se obezbedila pouzdanost rezultata mora se obaviti kalibracija parametara modela u odnosu na merene podatke sa konkretnog sistema koji je predmet modeliranja (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

➤ **Statistički formulisani modeli**

Statistički modeli su bazirani na brojnim osmotrenim podacima koji se smatraju dovoljnim, u pogledu njihovog kvaliteta i kvantiteta, da bi bili podvrgnuti statističkoj analizi. Rezultat ovakvog modela je izražen kao srednja vrednost i percentili. Statistički modeli su po svojoj prirodi ograničeni uslovima pod kojima su podaci dobijeni (npr. ograničeni klimatskim karakteristikama ili karakteristikama sliva). Primer statističkog modela je rezultat analize istorijskih serija podataka o kišama koji rezultiraju u ITP ili HTP tabelama ili krivama. Statistički modeli su korisni kada je poznato da će se fenomen dogoditi, ali uzročno-posledičnu vezu nije moguće odrediti (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

➤ **Deterministički modeli**

Deterministički model izražava performanse sistema matematičkom formulacijom preko fizičkih, hemijskih ili bioloških karakteristika i procesa. Matematičke formulacije procesa u sistemu i njihove interakcije su često ključni elementi determinističkog opisa. Za jedan set ulaznih podataka i početnog stanja, deterministički model uvek daje iste rezultate. Deterministički model se zasniva na teorijski dobro prihvaćenim i relevantnim naučnim saznanjima koja se primenjuju za simulaciju rada sistema i odvijanje procesa.

Razvijen je veliki broj determinističkih modela za potrebe modeliranja zagađenja u kišnom oticaju sa urbanih površina. Fizički zasnovani hidrodinamički modeli su naročito uspešni u modeliranju ustaljenog i neustaljenog tečenja, ali su isto tako poznati modeli vodotoka i jezera koji uključuju determinističke opise glavnih fizičko-hemijskih, hemijskih i bioloških karakteristika i procesa u njima. Generalno, deterministički modeli, a posebno oni za simulaciju aspekata kvaliteta vode, uključuju nekoliko parametara koji iskazuju stehiometrijske i kinetičke osobine procesa. Deterministički modeli su moćna oruđa za analizu, ali oni



zahtevaju pažljivu validaciju i kalibraciju, često zasnovanu na obimnom broju merenih podataka (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Procesi urbanog odvodnjavanja su po svojoj prirodi kompleksni i obično pokazuju visoku varijabilnost (što ne podrazumeva i visoku neizvesnost). Činjenica da su deterministički modeli procesa, koji se javljaju u urbanom odvodnjavanju, takođe prilično složeni, često dovodi do toga da njihova struktura sadrži brojne parametre. Veliki broj parametara može dovesti do teškoća u kalibraciji i potrebe za velikom količinom podataka za kalibraciju i verifikaciju modela (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Deterministički modeli, po svojoj prirodi, nemaju sposobnost da predstave varijabilnosti koje su povezane sa procesima i parametrima tokom kišnog vremena. Za uključivanje varijabilnosti u model koriste se stohastički modeli. Međutim, deterministički modeli su veoma korisni za razumevanje značaja i uticaja pojedinih procesa i pojava. Osim toga, deterministički modeli su osnovni deo modela sive kutije.

#### ➤ **Stohastički modeli**

Stohastički modeli predstavljaju proširenje determinističkih modela time što uključuju parametre modela predstavljene poznatom ili pretpostavljenom statističkom raspodelom. Korišćenjem tehnike Monte Carlo, svaka pojedinačna sekvenca modela se ponavlja veliki broj puta, često nekoliko hiljada puta. Pri svakom ponavljanju postupka, generator slučajnih brojeva se koristi za određivanje vrednosti parametara prema statističkoj raspodeli. Rezultati modela se analiziraju statistički kako bi se defnisala njihova raspodela, koja odražava varijabilnost rezultata usled varijabilnosti ulaznih parametara. Stoga, stohastički modeli su pogodni za analizu osetljivosti rezultata na promenljivost ulaznih parametara. Najbolje je varijabilnost ulaznih parametara odrediti na osnovu rezultata istraživanja na terenu, izvedenih pod različitim uslovima i ponovljenih više puta. Obim i raspoloživost rezultata istraživanja na terenu su često ograničavajući faktor u određivanju raspodele ulaznih parametara. Zato se pri modeliranju često koriste jednostavni i očekivani modeli raspodele, u skladu sa ograničenim fondom podataka, ali treba biti oprezan prilikom tumačenja rezultata ovakvog modela.

Takozvani regresioni modeli se takođe mogu smatrati stohastičkim modelima. Ovaj tip modela se takođe naziva i model crne kutije, jer utvrđeni parametri modela obično ne predstavljaju parametre nekog fizičkog procesa ili zavisnosti.

➤ **Modeli sive kutije**

Modeli sive kutije kombinuju karakteristike iz determinističkih i stohastičkih modela. Na ovaj način, deterministički dobijene informacije o fizičkom, hemijskom i biološkom poznavanju sistema se mogu kombinovati sa stohastičkim informacijama podataka primenom statističkih metoda za procenu parametara. Stohastički uslovi na taj način uključuju neizvesnosti u formulaciju modela i merenim podacima.

Modeli sive-kutije obično uključuju stohastički formulisane diferencijalne jednačine sa uključenim šumom merenih podataka. Nepoznati parametri modela se procenjuju primenom niza podataka koji opisuju performanse sistema. Statistički metodi se mogu koristiti za procenu.

Jedna od prednosti korišćenja modela sive kutije je uključenje malog broja fizički značajnih parametara u model. Osim toga, u poređenju sa determinističkim modelima, upotreba šuma merenih podataka u modelu sive-kutije znači da je šum merenja manje zastupljen u parametrima modela.

### ***4.1.3. Tipovi modela urbanog odvodnjavanja***

#### **Podela po kompleksnosti modela**

Modeli urbanog odvodnjavanja se mogu podeliti u sledeće tri grupe prema njihovom stepenu složenosti (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010):

➤ **Modeli jediničnog opterećenja**

Takvi modeli uključuju jednostavne procene opterećenja po jedinici površine.

➤ **Jednostavni modeli**

Ovi modeli formulišu jednu veličinu, ili pojavu, u zavisnosti od raznih parametara. Primeri za ovo su modeli akumulisanja i spiranja zagađenja sa urbanih i saobraćajnih površina.

➤ **Kompleksni modeli**

Kompleksni modeli uključuju kompleksne hidrološke ili hidrauličke modele, često povezane sa modelima akumulisanja, spiranja, transporta i transformacije zagađenja.

## Softverski paketi

Komercijalni softverski paketi modeli za hidrološko-hidrauličke analize oticaja su dostupni već, najmanje, poslednje tri decenije. Potencijalna pouzdanost ovih modela za svrhe predviđanja stanja i rada sistema za odvodnjavanje je danas prilično visoka (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010). Razvijen je veći broj komercijalnih hidrodinamičkih modela (npr. SWMM, MOUSE, i HYDROWORKS). Takvi kompleksni modeli imaju mogućnosti korišćenja istorijskih serija podataka o kišama i mogućnosti kalibracije modela prema podacima o merenim protocima. Hidrodinamički modeli mogu simulirati oticanje sa slivnih površina i neustaljeno tečenje u kanalskoj mreži. Hidrodinamički modeli mogu biti opremljeni dodatnim modulima koji simuliraju odabrane aspekte odvodnjavanja, npr. transporta materija, advekciju-disperziju sastojaka u tečnoj fazi, kontrolu i upravljanje u realnom vremenu, skladištenje i transformaciju sastojaka (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

U komercijalnim modelima, termin "modul kvaliteta vode" obično se odnosi na modul koji je računa akumulisanje zagađenja na površini, spiranje sa površine i transport zagađenja u kanalizacionoj mreži, opterećenje zagađenjem iz separacionog sistema kanalizacije i zagađenja usled preliivanja iz opšteg sistema kanalizacije. Stoga ovi modeli predviđaju opterećenje zagađenjem koja se generišu i ispuštaju sa razmatranog sliva. Primeri dostupnih modela za odvodnjavanje su:

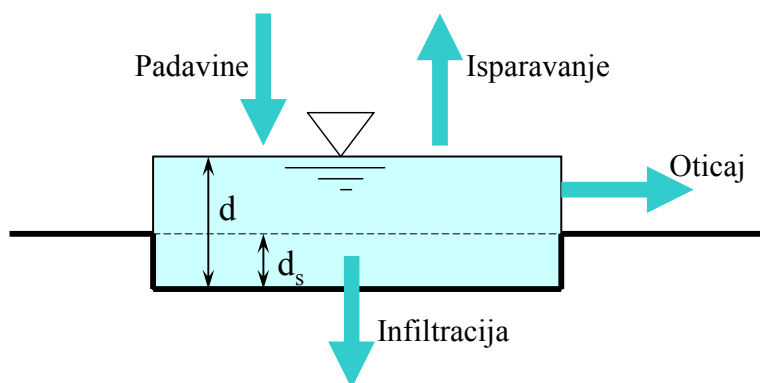
- SWMM (Storm Water Management Model) razvijen od strane Američke agencije za zaštitu životne sredine (US EPA)
- InfoWorks CS koga je razvio Innowyze (bivši Wallingford Software, United Kingdom)
- Mike Urban CS razvijen od strane DHI (Danish Hydraulic Institute, Denmark)
- FLUPOL razvijen u Francuskoj od strane AESN (Agence de l'eau Sena Normandie), SEDIF (Sindicat des Eaux d'Ile-de-France), i CGE (Compagnie Generale des Eaux)

Ovi kompleksni modeli odvodnjavanja uključuju modeliranje hidroloških i hidrauličkih procesa zajedno sa kvalitetom oticaja.

## 4.2. MODELIRANJE POJEDINIH PROCESA OD ZNAČAJA ZA KVALITET OTICAJA

### 4.2.1. Površinsko oticanje

Koncept površinskog oticanja koji koristi najveći broj modela i softverskih paketa je prikazan na slici 4-1. Svaka površina podsliva se tretira kao nelinearni rezervoar. Priliv vode dolazi od padavina, topljenja snega i doticaja sa uzvodnih podslivova. Svi ovi prilivi vode su prikazani na slici 4-1 kao "Padavine". Padavine se zadaju u obliku hijetograma. Sa površine podsliva, odnosno iz rezervoara, voda odlazi putem infiltracije, isparavanja i površinskog oticanja. Kapacitet ovog "rezervoara" odgovara maksimalnom kapacitetu skladištenja vode na razmatranoj površini, što odgovara najvećoj količini vode na razmatranoj površini potrebnoj za njeno kvašenje i natapanje (Rossman 2015; James i sar. 2010).



Slika 4-1. Koncept površinskog oticaja (Rossman 2015)

Površinsko oticanje po jedinici površine  $Q$  nastaje tek kada dubina vode u "rezervoaru" premaši maksimalan kapacitet skladištenja na površini  $d_s$ . U tom slučaju isticanje, odnosno oticaj sa površine, se dobija iz Maningove jednačine (Rossman 2015):

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} I^{0.5} \quad (4-2)$$

gde su:  $Q$  - protok (L/s),  $n$  - Maningov koeficijent hrapavosti ( $m^{-1/3}$  s),  $A$  - površina okvašenog preseka ( $m^2$ ),  $R$  - hidraulički radijus (m),  $I$  - nagib linije energije (-),

#### 4.2.2. Infiltracija

Infiltracija je proces gde padavine prodiru sa polupropusne površine terena podsliva u nezasićen sloj zemljišta. Postoji nekoliko načina za modeliranje infiltracije (Rossman, 2015; James i sar. 2010):

##### ➤ **Metoda po Hortonu**

Ova metoda se zasniva na empirijskim zapažanjima koja pokazuju da brzina infiltracije opada eksponencijalno od početnog maksimuma do nekog minimuma tokom dugih kišnih događaja, u skladu sa sledećom jednačinom:

$$f_p = f_\infty + (f_0 - f_\infty) \cdot e^{-at} \quad (4-3)$$

gde su:  $f_p$  - brzina infiltracije (dužina/vreme),  $f_0$  - početna brzina infiltracije (dužina/vreme),  $f_\infty$  - minimalna brzina infiltracije kojoj teži kroz vreme (dužina/vreme),  $a$  - koeficijent opadanja (vreme<sup>-1</sup>),  $t$  - vreme od početka padavina. Ulazni parametri koje treba definisati su maksimalne i minimalne brzine infiltracije, koeficijent opadanja infiltracije koji opisuje koliko se brzo brzina infiltracije smanjuje tokom vremena i vreme koje je potrebno potpuno zasićenom zemljištu da se potpuno osuši.

##### ➤ **Modifikovana Hortonova metoda**

Ovo je modifikovana verzija klasične metode po Hortonu koja koristi ukupnu infiltraciju iznad minimalnog intenziteta kao promenljivu (umesto vremenske skale kod krive po Hortonu), čime se postižu preciznije procene infiltracije pri padavinama niskog intenziteta. Ulazni parametri su isti kao kod klasične metode po Hortonu.

##### ➤ **Metoda Green-Ampt**

Ova metoda modeliranja infiltracije pretpostavlja da postoji jasno izraženi vlažni front u vertikalnom stubu zemljišta, koji razdvaja niži sloj zemljišta sa nekim početnim sadržajem vlage od sloja zemljišta zasićenog vodom iznad njega. Brzina infiltracije vode u zemljište, nakon zasićenja površine zemljišta, se opisuje jednačinom:

$$f_p = K_s \left( 1 + \frac{S \cdot IMD}{F} \right) \quad (4-4)$$

gde su:  $f_p$  - brzina infiltracije (dužina/vreme),  $K_s$  - koeficijent filtracije (dužina/vreme),  $S$  - prosečna visina kapilarnog sisanja na vlažnom frontu (visina

vodenog stuba), *IMD* - početni deficit vlage na početku padavina, *F* - ukupna količina infiltrirane vode (dužina).

Potrebni ulazni parametri su početni deficit vlage u zemljištu, koeficijent filtracije zemljišta i visina kapilarnog sisanja na vlažnom frontu. Brzina smanjenja deficita vlage tokom sušnih perioda je empirijski u vezi sa hidrauličkom provodljivošću.

➤ **Modifikovana Green-Ampt metoda**

Kod ovog metoda, izmena u odnosu na originalni Green-Ampt je u tome što ne smanjuje deficit vlage u gornjem površinskom sloju zemljišta tokom početnih niskih intenziteta kiše. Ova promena može da pruži realnije modeliranje infiltracije za kišne epizode koje imaju dug početni period sa intenzitetima kiše manjim od hidrauličke provodljivosti zasićenog zemljišta.

➤ **SCS krive**

Ovaj pristup podrazumeva da se oticaj računa preko SCS krivih zemljišta (Nacionalna služba zaštite resursa SAD – US National Conservation Service). Ukupan kapacitet infiltracije zemljišta se određuje preko tabelarnih podataka vezanih za SCS krivu usvojenog tipa zemljišta. Tokom kišnog događaja ovaj kapacitet se smanjuje u funkciji kumulativne visine padavina i preostalog kapaciteta infiltracije. Ulazni parametri za ovu metodu su broj SCS krive i vreme koje je potrebno potpuno zasićenom tlu da se potpuno osuši.

### **4.2.3. Evaporacija**

Evaporacija je proces isparavanja vode sa površine zemljišta. U proračunima oticaja retko se koriste fizičke zavisnosti evaporacije od meteoroloških faktora. U modelima oticaja se obično zadaje kao konstanta tokom vremena proračuna, ili se mogu zadavati vremenske serije prema osmotrenim podacima (Hvitved-Jacobsen i sar 2010; Rossman 2015).

### **4.2.4. Akumulisanje zagađenja na površini**

Najčešće korišćene funkcije, koje opisuju proces akumulisanja zagađenja tokom vremenskog perioda bez padavina, su opisane ispod (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010; James i sar. 2010; Rossman 2015).

**Linearna funkcija** podrazumeva da se zagađenje na površini uvećava sa vremenom na sedeći način:

$$B = B_o + C_b \cdot \Delta t \quad (4-5)$$

gde su:

- $B$  – količina zagađenja na površini nakon vremena  $t$  (masa/površina),
- $B_o$  – količina materije koja je akumulirana na površini u početnom vremenskom trenutku (masa/površina),
- $C_b$  – koeficijent priraštaja zagađenja (masa/površina/vreme)
- $\Delta t$  - vremenski period.

U osnovi ovoga je pretpostavka da se zagađenja iz atmosfere, od saobraćaja i iz drugih izvora, stalno izdavaju na površini. Međutim, istraživanja su ukazala na to da se, iako dnevni priraštaj zagađenja stalno postoji, zagađenje na nekoj površini ne akumulira stalno. Istraživanja ukazuju da stopa priraštaja zagađenja opada sa vremenom, što dovodi do usporavanja akumulisanja zagađenja i asimptotsko približavanje ukupne količine zagađenja nekoj vrednosti, koja zavisi od tipa površina, načina njihovog korišćenja i drugih faktora (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010, James i sar. 2010, Wicke i sar. 2012). Stoga se pri modeliranju akumulisanja zagađenja najčešće koriste funkcije koje podražavaju ovakvu dinamiku akumulisanja zagađenja u sušnom periodu.

**POW** – stepena funkcija:

$$B = \min\{C_{1b}, C_{2b} \cdot t^{C_3}\} \quad (4-6)$$

gde su:

- $B$  – količina zagađenja na površini nakon vremena  $t$  (masa/površina),
- $C_{1b} = B_{\max}$  – maksimalna količina materije koja se može akumulirati na površini (masa/površina),
- $C_{2b}$  – koeficijent priraštaja zagađenja,
- $t$  – vreme,
- $C_{3b}$  – vremenski eksponent.

**EXP** – eksponencijalna funkcija:

$$B = C_{1b} \cdot (1 - e^{-C_{2b} \cdot t}) \quad (4-7)$$

gde  $B$  i  $C_{1b}$  imaju isto značenje kao u prethodnoj jednačini, a:

- $C_{2b}$  – koeficijent uklanjanja zagađenja usled razgradnje, odnošenja vetrom i usled drugih faktora (vreme<sup>-1</sup>),
- $t$  – vreme.

**SAT** – saturaciona funkcija (Michaelis-Menten):

$$B = \frac{C_{1b} \cdot t}{C_{2b} + t} \quad (4-8)$$

gde su:

- $B$  – količina zagađenja na površini nakon vremena  $t$ ,
- $C_{1b} = B_{max}$  – maksimalna količina materijala koja se može akumulirati na površini (masa/površina),
- $C_{2b}$  – polusaturacioni koeficijent koji je jednak broju dana potrebnih da se dostigne polovina akumulacije razmatranog parametra na površini (dani),
- $t$  – vreme.

Treba obratiti posebnu pažnju određivanju odgovarajućih funkcija koje opisuju akumulisanje pojedinih parametara u konkretnom slučaju, i njih je najbolje odrediti terenskim i laboratorijskim istraživanjima. Pri tome treba voditi računa da vrednosti koeficijenata u jednačinama akumulisanja mogu varirati u širokim granicama i razlikovati se za jedan red veličine (Wicke i sar. 2012; Rossman 2015).

#### **4.2.5. *Spiranje zagađenja oticajem sa površine***

Spiranje zagađenja sa površina terena javlja se tokom padavina i najčešće se modelira na neki od sledećih načina (Hwitved-Jacobsen i sar. 2010; Rossman 2015):

##### ➤ **Eksponencijalna jednačina spiranja (EXP<sub>w</sub>)**

Masa spranog materijala ( $W$ ) u jedinicama mase po jedinici vremena je proporcionalna proizvodu oticaja podignutog na stepen  $C_{2w}$  i preostale količine akumulisanog materijala na površini ( $B$ ):

$$W = C_{1w} \cdot q^{C_{2w}} B \quad (4-9)$$

gde su:

- $C_{1w}$  - koeficijent spiranja,



- $C_{2w}$  - eksponent spiranja,
- $q$  - intenzitet oticaja po jedinici površine (mm/h) i
- $B$  – količina preostalog akumulisanog zagađenja na površini.  $B$  je ovde ukupna masa zagađenja, a  $B$  i  $W$  se izražavaju u istim jedinicama mase.

➤ **Stepena jednačina spiranja (POW<sub>w</sub>)**

Ovaj način uključuje korišćenje sledeće jednačine, gde je spiranje  $W$ , izraženo kao jedinica mase u jedinici vremena, proporcionalno oticanju podignutom na neki stepen:

$$W = C_{1w} \cdot q^{C_{2w}} \quad (4-10)$$

gde su:

- $C_{1w}$  - koeficijent spiranja,
- $C_{2w}$  - eksponent spiranja,
- $q$  - intenzitet oticaja po jedinici površine.

➤ **Srednja koncentracija tokom kišne epizode (EMC)**

Specijalni slučaj gornje jednačine je kada je eksponent  $C_{2w}$  jednak jedinici, tako da koeficijent  $C_{1w}$  predstavlja koncentraciju zagađenja u jedinicama masa/zapremina – odnosno srednju koncentracija tokom kišne epizode (EMC - Event Mean Concentration).

Treba obratiti posebnu pažnju određivanju odgovarajućih funkcija koje opisuju spiranje pojedinih parametara u konkretnom slučaju, i njih je najbolje odrediti terenskim i laboratorijskim istraživanjima. Pri tome treba voditi računa da vrednosti koeficijenata u jednačinama spiranja mogu varirati u širokom opsegu: u zavisnosti od vrste, karakteristika i stanja površine ovi koeficijenti mogu varirati u opsegu od dva reda veličine (Avellaneda i sr. 2009, Wicke i sar. 2014, Rossman 2015).

#### **4.2.6. Modeliranje tečenja u mreži kanala i cevi**

Savremeni modeli predstavljaju sve elemente sistema kao veze ili kao čvorove, gde su čvorovi međusobno povezani vezama. Veze mogu biti cevi ili kanali (svaki sa svojom definisanom geometrijom preseka, dužinom, hrapavošću i nagibom dna), crpke i crpne stanice, prelivne građevine. Kao čvorovi modeliraju se spojevi cevi ili kanala, šahtovi i uređaji za prijem i skladištenje oticaja.

Modeliranje tečenja u kanalima (cevima) se opisuje jednačinom održanja mase i jednačinom održanja momenta količine kretanja, odnosno jednodimenzionalnim (1D) jednačinama Sen Venana (Saint Venant), gde za svaki kanal ili cev važi (James i sar. 2010, Rossman 2015):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2 / A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f + gAh_L = 0 \quad (4-11)$$

Oznake u jednačinama (4-11) su:  $x$  je dužina duž cevi/kanala,  $t$  je vreme,  $A$  je površina poprečnog preseka,  $Q$  je protok,  $H$  je piježometarska kota vode u cevi/kanalu,  $S_f$  je nagib piježometarske linije (hidraulički gubitak po jedinici dužine cevi/kanala),  $h_L$  su lokalni gubici energije po jedinici dužine cevi/kanala i  $g$  je gravitaciono ubrzanje.

Ove jednačine se rešavaju za uslove (James i sar. 2010, Rossman 2015):

- ustaljenog tečenja,
- neustaljenog tečenja (model kinematskog talasa),
- neustaljenog tečenja (model dinamičkog talasa).

Svaki od ovih načina koristi Manningovu jednačinu za vezu između protoka, dubine vode i nagiba podloge (ili linije energije). U slučaju pojave tečenja pod pritiskom, može biti korišćena ili Hazen-Vilijamsova ili Darsi-Vajsbahova jednačina (James i sar. 2010).

### ➤ Ustaljeno tečenje

Ustaljeno tečenje predstavlja najjednostavniji tip računa, uz pretpostavku da je unutar svakog računskog vremenskog koraka protok uniforman i stacionaran. Tako se jednostavno prenosi uzvodni hidrogram na uzvodni kraj cevi/kanala bez vremenskog kašnjenja ili promene oblika. U cevima/kanalima se ostvaruje normalna dubina.

Ovaj tip proračuna ne uzima u obzir privremeno skladištenje vode u cevima i kanalima, lokalne gubitke na ulazu i izlazu, povratni tok i tečenje pod pritiskom. Može se koristiti samo u striktno granatim mrežama gde u svakom čvoru postoji samo jedna odvodna cev/kanal. Ova vrsta proračuna ne zavisi od vremenskog koraka proračuna i prikladna je za preliminarne analize korišćenjem dugoročne kontinuirane simulacije (James i sar. 2010, Rossman 2015).

➤ **Neustaljeno tečenje - model kinematskog talasa**

Ovaj metod podrazumeva rešavanje jednačine kontinuiteta zajedno sa pojednostavljenim oblikom jednačine momenta količine kretanja, za svaku cev/kanal. Ovde se usvaja da je nagib vodnog ogledala isti kao i nagib dna cevi/kanala.

Maksimalni protok koji se može transportovati duž kanala odgovara protoku kada je cev/kanal praktično pun, i ostvarena je normalna dubina. Svaki protok preko ovog maksimalnog se ili izgubi iz sistema ili se može privremeno skladištiti na vrhu uzvodnog čvora, odakle se upušta u odvodnu cev/kanal kada u njoj bude postojala rezerva kapaciteta.

Kinematski talas omogućava prostorne i vremenske varijacije protoka unutar cevi/kanala. To dovodi do vremenskog pomeranja (kašnjenje) izlaznog hidrograma i njegovog prigušenja. Međutim, ovaj oblik proračuna ne može da analizira uspor, povratni tok, gubitke na ulazu i izlazu ili tečenje pod pritiskom, i takođe je ograničen na analizu striktno razgranatih mreža. Ako se ne očekuje bilo koji od navedenih efekata, onda ova metoda može biti dovoljno tačna i efikasna za proračun, posebno za simulacije tokom dugih računskih perioda. Metoda proračuna zadržava numeričku stabilnost do umereno dugih računskih vremenskih koraka, reda veličine od 1 do 5 minuta. (James i sar. 2010, Rossman 2015).

➤ **Neustaljeno tečenje - model dinamičkog talasa**

Metoda dinamičkog talasa rešava kompletne jednodimenzionalne Sen Venanove jednačine i samim tim, teorijski, daje najtačnije rezultate (Rossman 2015). Kod ovog načina proračuna moguće je modelirati tok pod pritiskom kada se cev napuni, tako da se protok kroz cev može povećati preko protoka pri normalnoj dubini za punu cev. Poplave se javljaju kada dubina vode u čvoru prevaziđe maksimalnu dubinu na raspolaganju (odnosno kota nivoa vode u čvoru prevaziđe kotu terena), pri čemu voda koja se izlije iz čvora se ili izgubi iz sistema ili se može privremeno skladištiti na vrhu ulaznog čvora, odakle se upušta u odvodnu cev/kanal kada bude u njoj postojala rezerva kapaciteta.

Dinamički talas može da modelira privremeno skladištenje vode u cevima/kanalima, gubitke na ulazu/izlazu, uspor, povratni tok vode i tečenje pod pritiskom. Može se primeniti na bilo koju konfiguraciju mreže, čak i one koje sadrže

višestruka razdvajanja toka ili prstenasto povezanu mrežu. Ova metoda se gotovo uvek primenjuje ako treba analizirati sisteme koji su pod usporom zbog ograničenja na izlazu, ili kod sistema kod kojih se primenjuje regulacija protoka na izlazu preko preлива i otvora. Međutim, za ovu metodu važi da je potrebno koristiti kratke vremenske računске korake, reda veličine 30 sekundi, kako bi se održala numerička stabilnost proračuna (James i sar. 2010, Rossman 2015).

#### **4.2.7. Modeliranje tečenja po površini terena i u mreži kanala**

Česte pojave plavljenja unutrašnjim vodama u urbanim područjima navele su istraživače da razviju i unaprede modele koji istovremeno modeliraju i povezuju:

- tečenje po površini terena, do ulaska u kanalizacioni sistem,
- tečenje u kanalizacionoj mreži.

Tečenje u kanalizacionoj mreži se modelira 1D Sen Venanovim jednačinama, dok tečenje po površini se modelira ili 1D ili 2D Sen Venanovim jednačinama. U drugom slučaju modeli se baziraju na (Leandro i sar. 2011):

- eksplicitnom rešavanju 2D Sen Venanovih jednačina tečenja po površini terena, u kojima je član ubrzanja u jednačinama zanemaren (jer je mnogo manji od članova trenja i gravitacije),
- implicitnom rešavanju 1D Sen Venanovih jednačina u kanalizacionoj mreži.

1D/2D modeli su sofisticirani hidraulički alati koji simultano modeliraju tečenje po površini i u kanalizaciji, i smatraju se tačnijim od 1D/1D modela (Todorović i sar. 2011, Leandro i sar. 2011). Ipak, 1D/1D modeli su još uvek poželjni za praktične primene, zbog veoma dugog vremena trajanja proračuna pomoću 1D/2D modela (Leandro i sar. 2011).

#### **4.2.8. Transport i transformacije zagađenja**

U pogledu modeliranja kvaliteta vode u sistemu cevi i kanala, cevi/kanali se najčešće modeliraju kao reaktor sa potpunim mešanjem. Iako bi pretpostavka o reaktoru sa tečenjem u obliku klipa bila realnija, razlike u rezultatima proračuna će biti minimalne ako je vreme putovanja vode kroz cev/kanal istog reda veličine kao i vremenski korak proračuna. Koncentracija nekog sastojka koji izlazi iz cevi/kanala na kraju vremenskog koraka nalazi se iz jednačine održanja mase, koristeći srednje vrednosti za količine koje

se mogu promeniti tokom vremenskog koraka, kao što su protok i zapremine vode u cevi/kanalu.

Modeliranje kvaliteta vode u uređajima za skladištenje vode sledi isti pristup koji se koristi za cevi/kanale. Za ostale tipove čvorova, koji se modeliraju kao čvorovi bez zapremine, koncentracija neke materije na izlazu iz čvora jednaka je ponderisanoj vrednosti koncentracija u tokovima voda koji ulaze u taj čvor.

### **4.3. RAČUNARSKI PROGRAM SWMM**

Modeliranje oticaja i emisije zagađenja sa eksperimentalnog sliva vršeno je programskim paketom SWMM (Storm Water Management Model) koga je razvila Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (US Environmental Protection Agency – US EPA).

USEPA SWMM je kompjuterski program koji analizira pojavu padavine-oticaaj za kišni događaj i računa količinu i kvalitet otekle vode sa urbanih površina različitog stepena izgrađenosti ili sa ruralnih površina tokom analiziranog perioda vremena. Komponenta programa SWMM koja analizira oticaj funkcioniše tako što analizira podslivove koji primaju padavine i generišu površinski oticaj, koji pored vode nosi i deo zagađenja sakupljenih na površini. Komponenta programa SWMM koja simulira transport ovaj površinski oticaj transportuje po površini terena, kroz sistem ukopanih cevi, otvorenih kanala, objekata za zadržavanje i tretman voda, crpnih stanica i drugih uređaja u zadatoj konfiguraciji analiziranog slivnog područja. SWMM prati generisani kvantitet i kvalitet oticaja po svakom podslivu, kao i protok, dubine vode i kvalitet vode (oticaja) u svakoj cevi i kanalu u toku celog perioda računске simulacije, koji je podeljen na više vremenskih intervala – vremenskih koraka (James i sar., 2010)

SWMM je prvi put razvijen 1971. godine i od tada je pretrpeo nekoliko velikih nadgradnji. Program je u širokoj upotrebi za planiranje, analizu, projektovanje i upravljanje opštim ili separacionim sistemima kanalizacije, i uopšte za analizu oticaja i odvodnjavanja urbanih i ruralnih područja.

U ovim istraživanjima korišćena je najnovija verzija programa SWMM broj 5.1.010 iz avgusta 2015. godine (<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>). Ova verzija je, u odnosu na prethodne, kompletno

unapređena u praktično svim domenima, a naročito u delu koji se odnosi na kvalitet oticaja i analizu mera i uređaja za kontrolu kvaliteta i kvantiteta oticaja i smanjenje uticaja urbanizacije na oticaj (Low Impact Development (LID) Controls). SWMM 5.1 pruža integrisano okruženje za uređivanje ulaznih podataka o razmatranoj oblasti, vršenje hidroloških i hidrauličkih simulacija, simulacije kvaliteta oticaja i prikazivanje rezultata proračuna u različitim formatima. Na raspolaganju su mogućnosti prikaza rezultata u formi obojenih mapa slivova i kanalske mreže, grafikona i tabela zadatih vremenskih serija, podužnih profila i prikaz statističkih pokazatelja (James i sar., 2010). U nastavku će ukratko biti opisani parametri programa SWMM od značaja za istraživanja u ovoj disertaciji.

#### ***4.3.1. Opšte mogućnosti modeliranja***

SWMM ima mogućnosti modeliranja niza **hidroloških** i drugih procesa koji utiču na proces padavine-oticaaj u urbanim sredinama, kao što su (James i sar., 2010):

- vremenski neravnomerne kiše;
- isparavanje sa površine stajaćih voda;
- akumulacija i topljenje snega;
- sakupljanje oticaja u lokalnim depresijama;
- infiltracija padavina u nezasićene slojeve zemljišta;
- perkolacija infiltrirane vode kroz slojeve zemljišta do podzemne vode;
- infiltracija/eksfiltracije podzemene vode u/iz drenažni sistem;
- generisanje oticaja sa površine terena se predstavlja nelinearnim rezervoarom; i
- prihvat i zadržavanje oticaja od padavina u različitim tipovima uređaja i objekata za kontrolu oticaja (LID).

Prostorna varijabilnost u svim ovim procesima postiže se tako što se razmatrana oblast deli na manje, homogene površine – podslivove, u meri u kojoj je potrebno da se procesi na podslivu mogu dovoljno verno opisati osrednjenim parametrima po podslivu, od kojih svaki može imati deo propusnih i nepropusnih površina. Protok – oticaj po površini zemljišta može biti usmeren između podoblasti koje se razmatraju, između podslivova ili između ulaznih tačaka u sistem kanalizacije (sistem za odvodnjavanje).

SWMM ima mogućnosti da fleksibilno modelira **hidrauličke procese transporta** oticaja i priliva spoljnih voda kroz mrežu za odvodnjavanje koja se sastoji

od površina, cevi, kanala, uređaja za prihvatanje i tretman kišnih voda i prelivnih / razdelnih građevina. Sposobnosti programa SWMM uključuju (James i sar., 2010):

- mogućnost modeliranja mreže neograničenih dimenzija i broja elemenata;
- mogućnost izbora pre-definiranih standardnih oblika preseka otvorenih i zatvorenih kanala, kao i definisanje geometrije preseka prirodnih kanala;
- modeliranje elemenata kao što su uređaji za prihvatanje, skladištenje i tretman oticaja, razdelne građevine, pumpe, prelive i otvori;
- modeliranje spoljnih doticaja u sistem usled površinskog oticanja, infiltracije podzemnih voda, infiltracije zavisne od padavina, protoka u suvo vreme u kanalizaciji za upotrebljene vode, kao i drugih priliva koje može definisati korisnik;
- modeliranje ustaljenog i neustaljenog tečenja (kinematski ili dinamički talas);
- modeliranje različitih režima toka u mreži, kao što je tečenje sa slobodnom površinom, pod pritiskom, povratni tok, izlivanje vode na površinu terena;
- primena krivih za opisivanje kontrole ulaska vode kroz slivnike; i
- mogućnost da korisnik sam definiše pravila kontrole i dinamiku rada pumpi, otvaranje ispusta, promene nivoa pokretnih prelive i dr.

Pored modeliranja procesa padavine – oticaj, SWMM 5 takođe ima mogućnosti da **modelira akumulisanje, spiranje, transport i transformacije zagađenja** u modeliranom oticaju, kao i zagađenja u upotrebljenoj vodi (protok u suvo vreme - Dry Weather Flow - DWF). Sledeći procesi mogu biti modelirani za parametre kvaliteta vode koje definiše korisnik (James i sar., 2010):

- akumulisanje zagađenja na površini tokom suvog vremena, prema nameni i tipu površine;
- spiranje zagađenja sa površine tokom padavina, za različite tipove i namene površine;
- direktan doprinos padavina akumulisanju zagađenja;
- smanjenje količine zagađenja na površini usled čišćenja ulica;
- smanjenje zagađenja u oticaju usled primenjenih metoda kontrole količina i kvaliteta oticaja (LID, BMP);
- unos protoka u suvo vreme (DWF) ili spoljni doticaj u bilo koju tačku sistema koju definiše korisnik;

- modeliranje kvaliteta vode usled mešanja vode u kanalima i transformacije (razgradnje) zagađenja kroz vreme; i
- smanjenje koncentracija materija usled tretmana i zadržavanja u uređajima za prihvatanje i tretman oticaja, ili usled prirodnih procesa u kanalskoj mreži (cevi i/ili kanali).

#### **4.3.2. Površinsko oticanje**

Koncept površinskog oticanja koji koristi SWMM je prikazan na slici 4-1. Svaka površina podsliva se tretira kao nelinearni rezervoar. Priliv vode dolazi od padavina, topljenja snega i doticaja sa uzvodnih podslivova. U proračunu se dubina vode na podslivu ( $d$ ) stalno ažurira tokom proračuna kroz rešavanje jednačine kontinuiteta za podsliv (Rossman 2015, James i sar. 2010).

#### **4.3.3. Infiltracija**

SWMM nudi nekoliko načina za modeliranje infiltracije, uključujući Hortonovu metodu, modifikovanu Hortonovu metodu, Green Ampt metodu, modifikovanu Green Ampt metodu i SCS krive (Rossman, 2015, James i sar., 2010).

#### **4.3.4. Akumulisanje zagađenja na površini**

U modelu SWMM akumulisanje zagađenja može se modelirati POW, EXP i SAT funkcijom opisanom u poglavlju 4.2 (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010, James i sar. 2010, Rossman 2015).

Pored navedene tri funkcije, SWMM dopušta da korisnik sam definiše funkciju akumulisanja zagađenja, koja se tada naziva **EXT**. U tom slučaju zadaju se parametri:

- $C_{1b}$  - maksimalna količina materije koja se može akumulirati na površini (masa/površina),
- $C_2$  – koeficijent razmere, kojim se množi svaki podatak o zadatoj akumulaciji zagađenja u vremenskom trenutku  $t$ ,
- Vremenska serija – parovi podataka: akumulacija zagađenja (masa/površina) u vremenu  $t$  (dani) od početka perioda bez kiše.



#### **4.3.5. *Spiranje zagađenja oticajem sa površine***

Spiranje zagađenja sa površina terena javlja se tokom padavina i u programu SWMM se može matematički opisati na neki od sledećih načina (Rossman 2015):

- eksponencijalna jednačina spiranja,
- jednačinom gde je spiranje proporcionalno oticanju podignutom na neki stepen,
- zadata srednja koncentracija tokom kišne epizode (EMC - Event Mean Concentration).

#### **4.3.6. *Modeliranje tečenja u mreži kanala i cevi***

SWMM predstavlja sve elemente sistema kao veze ili kao čvorove, gde su čvorovi međusobno povezani vezama. Veze mogu biti cevi ili kanali, crpke i crpne stanice, prelivne građevine. Kao čvorovi modeliraju se šahtovi i uređaji za prijem i skladištenje oticaja.

Modeliranje tečenja u kanalima (cevima) u SWMM se opisuje jednačinom održanja mase i jednačinom održanja momenta količine kretanja za blagopromenljivo nestacionarno tečenje, odnosno 1D jednačinama Sen Venana, gde za svaki kanal ili cev važe jednačine 4-11 (James i sar. 2010, Rossman 2015).

U SWMM korisnik može izabrati neki od sledećih načina za rešavanje ovih jednačina (James i sar. 2010, Rossman 2015): ustaljeno tečenje, neustaljeno tečenje - model kinematskog talasa, neustaljeno tečenje - model dinamičkog talasa. Svaki od ovih načina koristi Maningovu jednačinu za vezu između protoka, dubine vode i nagiba dna (ili linije energije). U slučaju pojave tečenja pod pritiskom, koristi se ili Hazen-Vilijamsova ili Darsi-Vajsbahova jednačina (Rossman 2015).

Metod kinematskog talasa zadržava numeričku stabilnost do umereno dugih računskih vremenskih koraka, reda veličine od 1 do 5 minuta. (James i sar. 2010, Rossman 2015).

Za metodu dinamičkog talasa važi da je potrebno koristiti kratke vremenske računске korake, reda veličine 30 sekundi ili kraće, kako bi se održala numerička stabilnost proračuna. SWMM može, po potrebi, automatski smanjiti maksimalni vremenski računski korak koga definiše korisnik da bi se održala stabilnost proračuna (James i sar. 2010, Rossman 2015).

#### **4.3.7. *Transport i transformacije zagađenja***

U pogledu modeliranja kvaliteta vode u sistemu cevi i kanala, program SWMM sledi metode koje su opisane u poglavlju 4.2.8.

Koncentracija zagađenja u cevima/kanalima i čvorovima sa zapreminom u modelu će biti smanjivana kroz vreme prateći kinetiku prvog reda, ako koeficijent razgradnje u kinetici prvog reda ima zadatu vrednost različitu od nule (James i sar. 2010, Rossman 2015).

Zbog relativno male veličine razmatranog sliva u ovoj disertaciji, kao i posledično veoma kratkog vremena putovanja vode do izlaznih profila, redukcija zagađenja usled procesa razgradnje biće zanemarljiva.

### **4.4. MODELIRANJE EKSPERIMENTALNOG SLIVA**

#### **4.4.1. *Formiranje shematizovanog modela eksperimentalnog sliva***

Površina uključena u model obuhvata nepropusne površine podslivova SI-2, SI-3, SI-4 i SI-5, kako je objašnjeno u poglavlju 3.1. Model obuhvata samo nepropusne površine (beton, asfalt), kako bi se preciznije modelirao i ispitao proces akumulisanja i pokretanja zagađenja sa nepropusnih površina. Ukupan udeo propusnih površina na sva četiri podsliva je relativno mali (24% površine), a procenjeni doprinos ukupnom oticaju sa sliva je jos manji (manji od 7%), tako da se ovim ne pravi velika greška u modeliranju ukupnog oticaja sa sliva.

Ukupna površina sliva koja je modelirana je 1762,5 m<sup>2</sup> i obuhvata samo nepropusne površine (asfalt i beton), a u model nisu unete ni nepropusne površine čiji oticaj gravitira propusnim površinama.

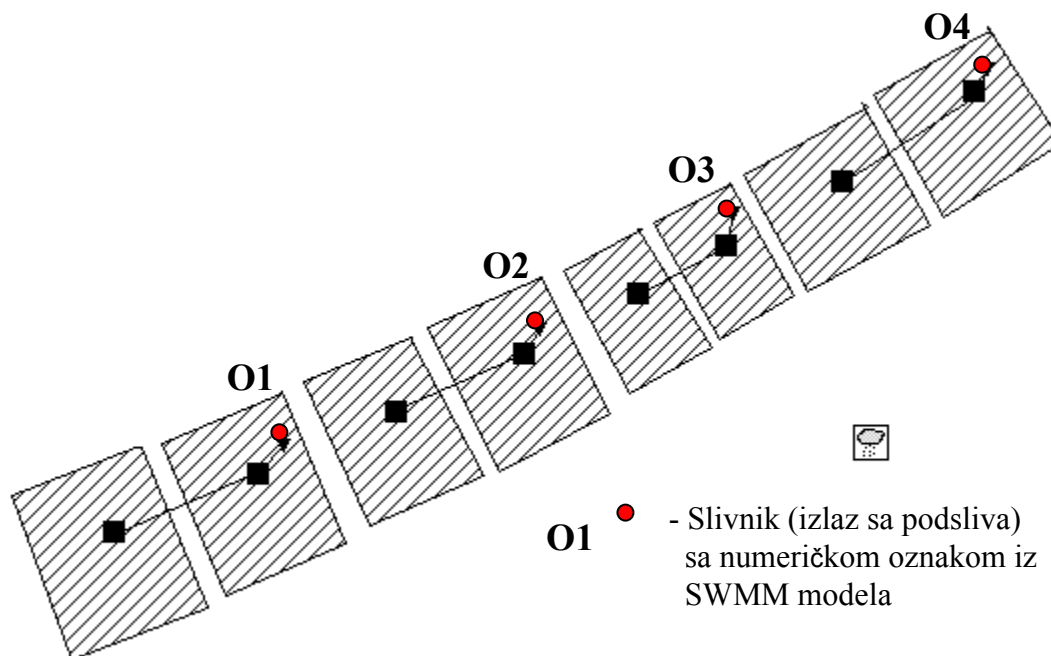
Svaki podsliv je predstavljen sa dve jednake slivne površine koje su povezane plitkim otvorenim kanalom trougaonog preseka. Nizvodni kraj kanala odvodi vodu do ispusta - slivnika. Cela analizirana površina je stoga podeljena na 8 podslivnih površina, koje su povezane sa ukupno 8 veza, a oticaj se ispušta u 4 slivnika. Na ovaj način je simulirano površinsko tečenje po slivu, pre ulaska u slivnike kanalizacije.

U modelu nisu definisani uređaji za sakupljanje i tretman oticaja, niti su zadavani uslovi za kontrolisano izlivanje sa sliva (otvori, prelive i sl.).

Zatim je u model dodavano modeliranje polutanata. Definisana su sledeća zagađenja čije se akumulisanje, spiranje i transport modelira: HPK, TSS, TN, TP, Fe, Zn, Cr i Cu. Funkcije akumulisanja i spiranja su zadavane preko različitih zakonitosti, u skladu sa rezultatima sprovedenih eksperimentalnih istraživanja na slivu.

U proračunima su varirani intenziteti kiše, oblici hijetograma, dužina prethodnog perioda bez padavina, zavisnosti akumulisanja i spiranja zagađenja, po parametrima. Rezultati analiza su dati u poglavlju 4.10.

Modeliranje je urađeno u okruženju programskog paketa SWMM (Rossmann 2015). Na slici 4-2 je dat prikaz shematizovanog modela celog analiziranog sliva formiranog u programu SWMM.



Slika 4-2. Prikaz shematskog modela sliva obrazovanog u programskom paketu SWMM

#### 4.4.2. Metodologija za formiranje 1,5D modela za modeliranje površinskog oticanja

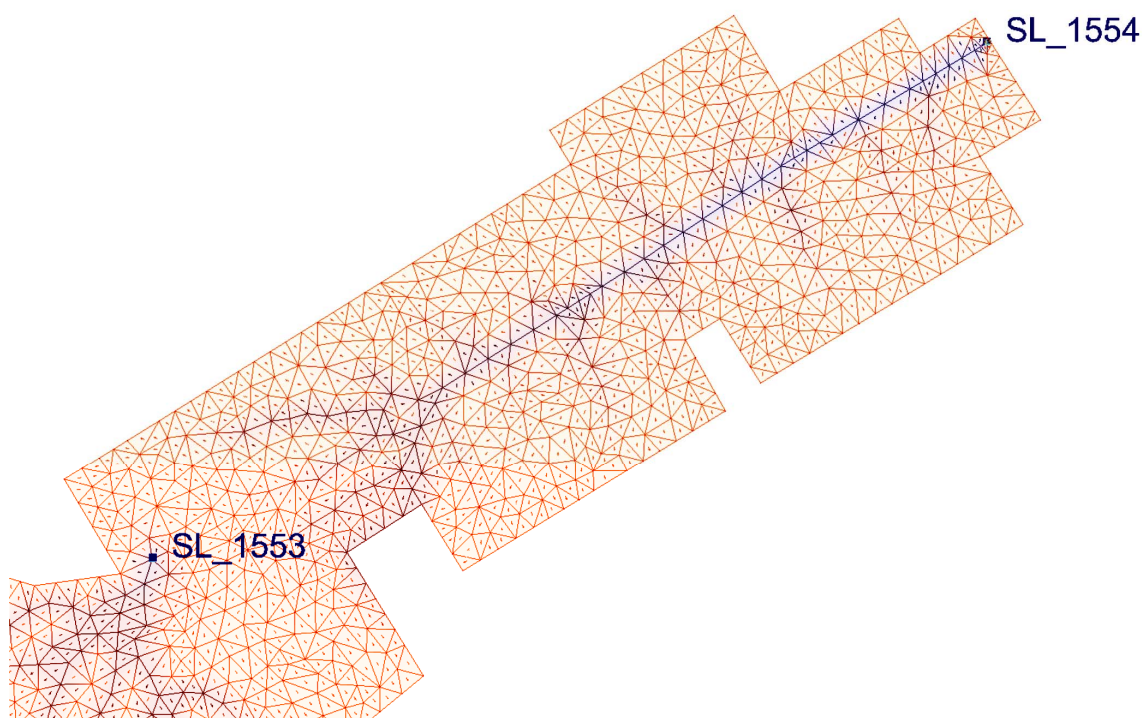
Za modeliranje procesa oticanja i spiranja zagađenja sa urbanih površina, često se koriste 2D modeli tečenja, čiji su osnovni problem predugo trajanje simulacija i zahtev za velikim brojem ulaznih parametara. Način da se ovaj problem prevaziđe je formiranje 1,5D modela, koji podrazumeva da se na osnovu digitalnog modela terena (u

ovom slučaju je model zasnovan na mreži trouglova TIN) formira mreža privilegovanih površinskih tokova, koji usmeravaju vodu prema izlivu (u ovom slučaju su to slivnici).

Algoritam za pripremu modela se može objasniti u nekoliko koraka.

### 1. Formiranje digitalnog modela terena

Na osnovu detaljno snimljenih tačaka, formira se digitalni model terena (TIN) primenom poznatog Delaunay algoritma. Za pravilno formiranje i delimično kontrolisanje načina na koji algoritam formira model terena, potrebno je uneti i strukturne linije, koje nakon primene algoritma postaju stranice trouglova, kako je prikazano na primeru na slici 4-3. Ovo je važno da bi se osiguralo da, primera radi, ivičnjaci postanu deo mreže privilegovanih puteva vode, nakon primene narednog koraka algoritma.



Slika 4-3. Formiranje digitalnog modela terena

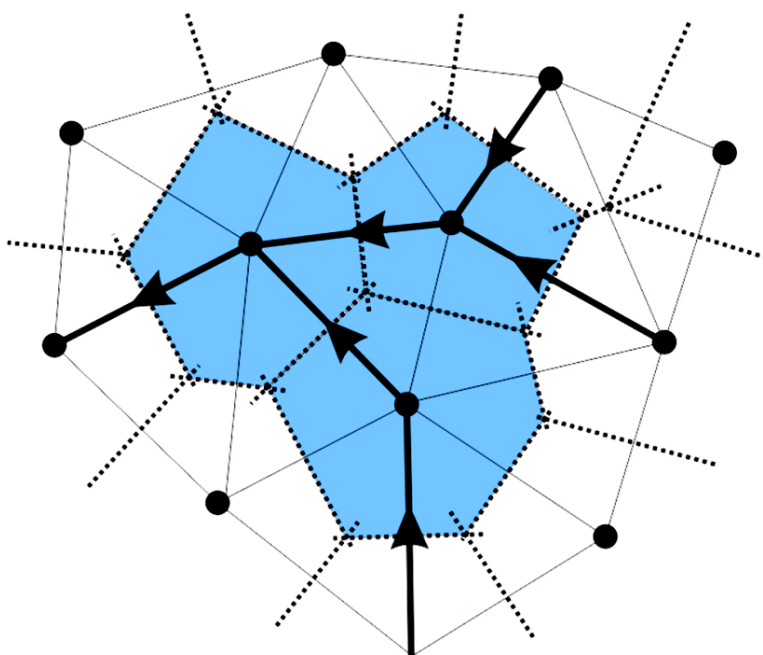
### 2. Propagacija unazad

Pod propagacijom unazad se podrazumeva da se od mesta koje je definisano kao izliv (u ovom slučaju slivnik), putem najstrmijeg porasta terena ide prema uzvodnim delovima sliva. Propagacija se obavlja tako što se stranice trougla, koje prirodno

predstavljaju vezu između dva čvora, orijentišu u pravcu nagiba i na taj način se dobija orijentisani graf.

Propagacija kroz orijentisani graf kreće od najnižvodnijih (izlivnih) čvorova i koršćenjem veza (stranica trougla) sa najvećim nagibom kao prioriternih puteva, formira se površinska, granata mreža.

Kako je svojstvo podele na trouglove primenom Delaunay algoritma, da su trouglovi takvi da spajaju „najbliže“ tačke, to jest da krug opisan oko trougla ne sadrži nijednu drugu tačku od kojih je formiran model terena, to svaki čvor ima svoju pripadajuću površinu koja se nalazi u preseku normala na stranice trougla koje se susstiču u tački (slika 4-4). U oblasti računске geometrije ove oblasti (zatvoreni poligoni) se zovu Voronijevi dijagrami, a u modelu koji se formira predstavljaju slivnu površinu koja pripada čvoru.

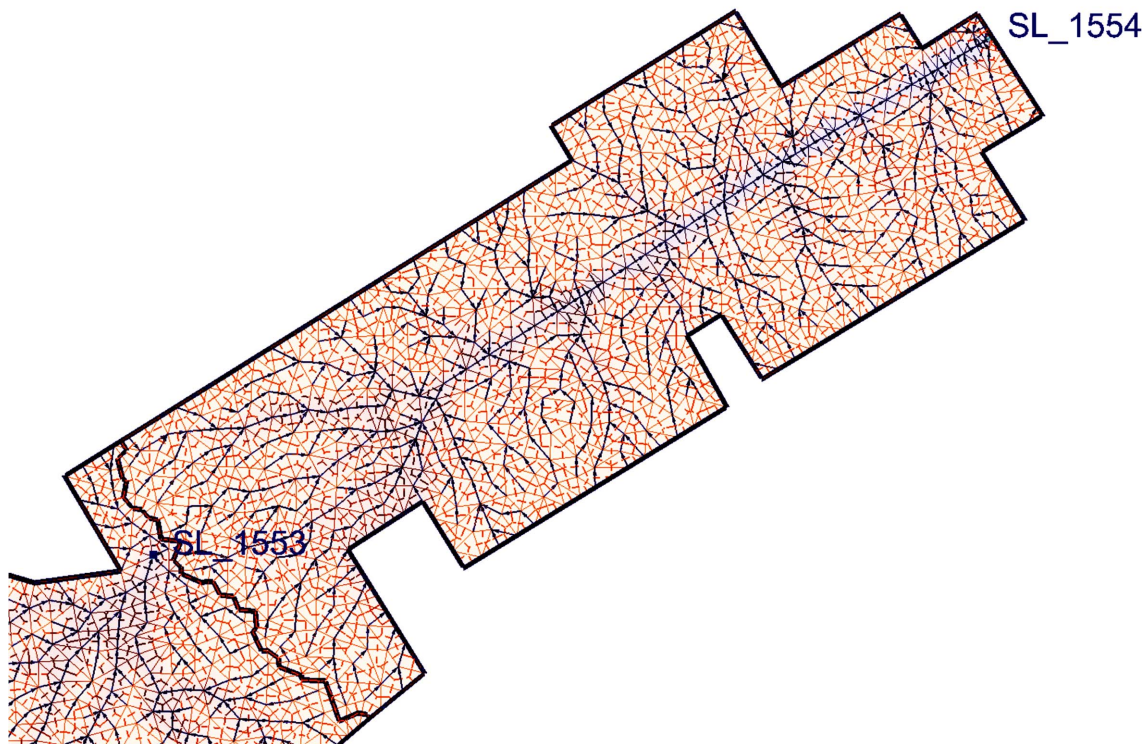


Slika 4-4. Formiranje slivnih površina i mreže površinskih tokova

Na ovaj način je formirana mreža površinskih tokova i slivnih površina, koje se dreniraju kroz ovu mrežu. Primer ovako dobijene mreže površinskih kanala je dat na slici 4-5.

Obzirom na način kako je model formiran, može se reći da predstavlja 1,5D model tečenja po površini terena, u kome se privilegovani površinski putevi modeliraju

kao otvoreni trougaoni kanali sa malim nagibom stranica (npr. 1:10), a svaki čvor mreže ima svoju pripadajuću slivnu površinu (Voronijev – Tiesenov poligon), sa geometriskim karakteristikama (nagib, širina) koje se dobijaju iz digitalnog modela terena.



Slika 4-5. Rezultat primene algoritma za formiranje slivnih površina i mreže površinskih tokova

#### **4.4.3. Formiranje 1,5D modela**

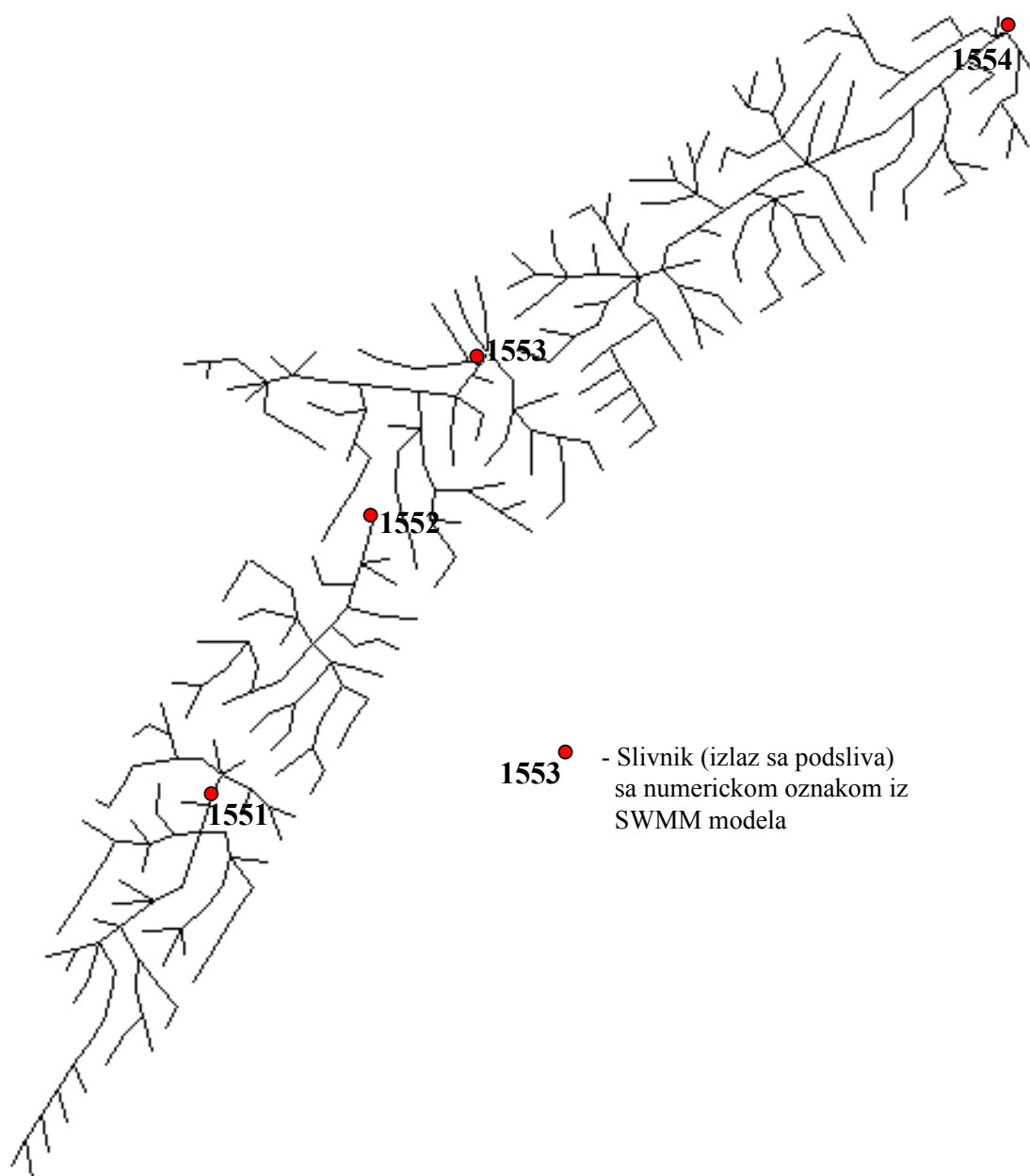
U prvom koraku su podaci geodetskog snimanja eksperimentalnog sliva iskorišćene za generisanje 3D modela terena, korišćenjem iregularne triangularne mreže (TIN). Definisani su pravci privilegovanih puteva vode, vodeći računa o nivoima terena, a zatim je generisana mreža površinskih kanala kojima voda otiče do privilegovanih pravaca, kako je objašnjeno u prethodnom poglavlju. Ovako generisana mreža kanala, slivne površine i čvorovi modela su zatim uneti u programski paket SWMM.

Kao i kod shematizovanog modela, slivnim površinama u modelu su obuhvaćene samo nepropusne površine (beton, asfalt), kako bi se preciznije modelirao i ispitao proces akumulisanja i pokretanja zagađenja sa nepropusnih površina. Ukupna površina sliva koji se modelira je 1762,5 m<sup>2</sup>.

Na svakom podslivu formirana je opisanim postupkom granata mreža površinskih kanala i svaki podsliv se drenira u poseban slivnik (Slika 4-6). Cela analizirana površina je podeljena na ukupno 359 podslivnih površina, koje su povezane

sa ukupno 358 veza. Veze su modelirane kao otvoreni pritki kanali trougaonog poprečnog preseka, kako bi se simuliralo oticanje vode privilegovanim putevima po nepropusnim površinama.

Na slici 4-6 je dat prikaz celog analiziranog sliva sa mrežom veza (trougaonih kanala). Sa slike se jasno vidi da je celo područje podeljeno na ukupno četiri glavna podsliva, i da se svaki podsliv drenira u po jedan slivnik, čiji položaj odgovara položaju slivnika u stvarnosti.

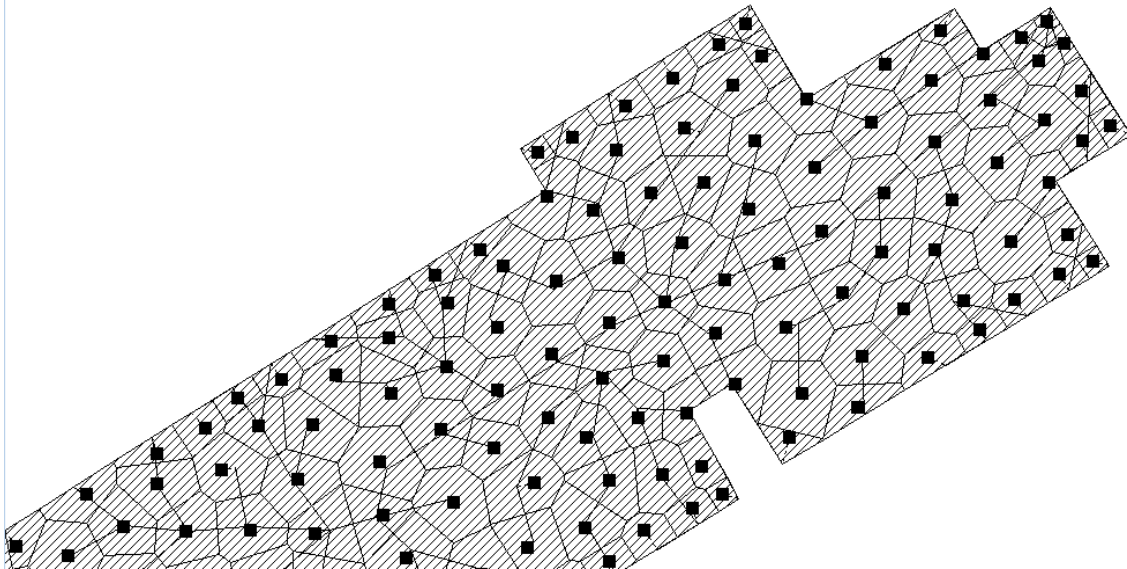


Slika 4-6. 1,5D model eksperimentalnog sliva sa mrežom površinskih kanala kojom je aproksimirano tečenje po nepropusnim površinama



U modelu nisu zadavani uređaji za sakupljanje i tretman oticaja, niti su zadavani uslovi za kontrolisano izlivanje sa sliva (otvori, preliivi i sl.).

Na slici 4-7 je dat prikaz najnižvodnijeg dela sliva SI-2, sa vezama, čvorovima i granicama podslivnih površina.



Slika 4-7. SWMM model eksperimentalnog sliva prikaz podela na podslivove (nižvodni deo podsliva SI-2)

### Osnovni parametri modela

Funkcionalnost inicijalnog modela je testirana na uniformnu 20-to minutnu kišu, ukupna visina pale kiše je 15 mm. Tečenje je modelirano dinamičkim talasom. Da bi se postigla numerička stabilnost proračuna zadati vremenski korak proračuna morao je biti veoma kratak (kraći od 0,5 s).

Osnovni parametri inicijalnog modela eksperimentalnog sliva su (izlaz iz programa SWMM):

```
*****  
Analysis Options  
*****  
Flow Units ..... LPS  
Process Models:  
  Rainfall/Runoff ..... YES  
  RDII ..... NO  
  Snowmelt ..... NO  
  Groundwater ..... NO  
  Flow Routing ..... YES
```



```
Ponding Allowed ..... YES
Water Quality ..... YES
Infiltration Method ..... GREEN_AMPT
Flow Routing Method ..... DYNWAVE
Starting Date ..... MAY-12-2016 00:00:00
Ending Date ..... MAY-12-2016 12:00:00
Antecedent Dry Days ..... 0.0
Report Time Step ..... 00:00:01
Wet Time Step ..... 00:01:00
Dry Time Step ..... 01:00:00
Routing Time Step ..... 0.50 sec
Variable Time Step ..... YES
Maximum Trials ..... 8
Number of Threads ..... 1
Head Tolerance ..... 0.001500 m
```

U modelu je izvršeno i modeliranje polutanata. Definisana su zagađenja čije akumulisanje, spiranje i transport može da se se modelira: HPK, TSS, TN, TP i sadržaj jona teških metala: Fe, Zn, Cr i Cu. Funkcije akumulisanje i spiranja su zadavane u skladu sa rezultatima eksperimentalnih istraživanja na slivu.

Rezultati analiza su dati u poglavlju 4.10.

## 5. REZULTATI I DISKUSIJA

### 5.1. PRETHODNA ISPITIVANJA, SERIJA I

Uzorkovanja materijala sa asfaltnih površina su izvršena 2., 10. i 17. avgusta 2012. godine. Ove uzorke ćemo označiti kao Seriju I. Klimatski podaci za jul i avgust 2012. godine su preuzeti od RHMZS za stanicu Vračar i dati su u tabeli 5-1.

Tabela 5-1. Klimatski podaci za jul i avgust 2012. za stanicu Vračar (izvor RHMZS)

Datum	Tmax [C°]	Tmin [C°]	Tsr [C°]	Atm. pritisak [mbar]	Brzina vetra [m/s]	Rel. vlažnost [%]	Padavine [mm]
24-07-12	26,4	20,5	22,5	1001,1	2,8	74	-
25-07-12	28,9	20,4	22,9	998,1	2,2	83	13
26-07-12	29,0	20,2	23,6	998,6	1,9	78	0,2
27-07-12	30,2	19,9	24,5	998,5	1,9	72	-
28-07-12	33,0	20,6	26,9	997,1	1,5	60	1,6
29-07-12	37,3	21,7	27,8	995,1	3,4	58	-
30-07-12	29,6	19,2	24,4	999,5	2,0	69	11
31-07-12	30,4	20,8	25,7	999,9	2,0	62	-
01-08-12	31,4	20,1	26,0	999,7	2,0	54	-
02-08-12	32,7	21,4	27,4	999,2	1,4	55	-
03-08-12	34,1	22,0	28,9	998,2	1,6	47	-
04-08-12	35,0	22,2	29,2	998,4	1,5	47	-
05-08-12	36,9	23,4	30,7	997,4	2,7	47	-
06-08-12	38,7	26,0	32,4	998,2	2,4	36	-
07-08-12	33,0	25,0	28,5	1002,6	2,2	43	-
08-08-12	33,0	21,0	26,6	1003,7	2,6	37	-
09-08-12	31,5	19,5	25,5	1003,8	2,5	40	-
10-08-12	29,2	20,5	23,8	1002,6	2,0	40	-
11-08-12	28,3	16,8	22,1	1000,1	2,7	43	-
12-08-12	24,1	14,1	18,9	1000,4	2,3	53	-
13-08-12	26,9	13,8	20,5	999,4	1,6	49	-
14-08-12	28,7	15,2	22,5	998,7	1,6	42	-
15-08-12	29,7	14,3	22,9	999,4	1,6	42	-
16-08-12	32,4	18,3	25,5	998,9	1,7	40	-
17-08-12	31,7	18,5	25,3	1002,8	1,5	42	-

Rezultati analiza uzoraka, preračunati na masu materija po jedinici asfaltne površine su dati u tabelama od 4-2 do 4-4 (Krunić 2012).

Tabela 5-2. Rezultati analize uzoraka Serije I - sadržaj teških metala preračunati na g/m<sup>2</sup>

<b>Datum uzorkovanja, 2012.</b>	<b>2.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>
<b>Lokacija:</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>
Olovo (Pb)	0.025	0.000	0.006	0.009	0.008
Kadmijum (Cd)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cink (Zn)	0.139	0.027	0.038	0.045	0.056
Bakar (Cu)	0.025	0.006	0.007	0.007	0.008
Nikl (Ni)	0.009	0.001	0.003	0.002	0.003
Gvožđe (Fe)	3.941	0.729	0.954	0.997	1.028
Hrom (Cr)	0.009	0.002	0.003	0.003	0.003
<b>Datum uzorkovanja</b>	<b>2.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>
<b>Lokacija:</b>	<b>B1</b>	<b>B1</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>
Olovo (Pb)	0.014	0.000	0.002	0.009	0.006
Kadmijum (Cd)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cink (Zn)	0.062	0.024	0.012	0.034	0.032
Bakar (Cu)	0.013	0.005	0.003	0.007	0.007
Nikl (Ni)	0.005	0.001	0.001	0.002	0.002
Gvožđe (Fe)	2.243	0.681	0.284	1.113	0.798
Hrom (Cr)	0.005	0.002	0.001	0.003	0.005

Tabela 5-3. Rezultati analize uzoraka Serije I - ostali fizičko-hemijski parametri preračunati na g/m<sup>2</sup>

<b>Datum uzorkovanja, 2012.</b>	<b>2.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>
<b>Lokacija:</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>
potrošnja KMnO <sub>4</sub>	2.069	1.538	3.800	0.117	3.242
BPK <sub>5</sub>	0.198	0.244	0.338	0.346	0.120
Amonijum jon (NH <sub>4</sub> -N)	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Nitriti (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N)	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Nitrati (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)	0.002	0.003	0.004	0.005	0.005
Hloridi (Cl <sup>-</sup> )	0.017	0.014	0.013	0.022	0.013
Sulfati (SO <sub>4</sub> )	0.051	0.031	0.032	0.035	0.037
Susp. materije (TSS)	25.246	5.465	2.049	4.741	6.466
Suvi ostatak (TS)	51.242	9.098	4.483	7.045	9.394
Ukupni fosfor (TP)	0.023	0.000	0.006	0.001	0.006
Ukupni azot (TN)	0.008	0.023	0.021	0.019	0.035
Ulja i masti	-	0.125	0.081	0.040	0.195
pH [-]	8,4	8,2	8	8,9	8
El. provodljivost [μS/cm]	54	51	44	20	51
<b>Datum uzorkovanja</b>	<b>2.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>
<b>Lokacija:</b>	<b>B1</b>	<b>B1</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>
potrošnja KMnO <sub>4</sub>	1.126	0.050	3.227	1.637	4.005
BPK <sub>5</sub>	0.098	0.865	0.206	0.382	0.357
Amonijum(NH <sub>4</sub> -N)	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Nitriti (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> - N)	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Nitrati (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N)	0.000	0.003	0.003	0.002	0.004
Hloridi (Cl <sup>-</sup> )	0.003	0.013	0.016	0.013	0.016
Sulfati (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	0.019	0.028	0.023	0.022	0.039
Susp. materije (TSS)	14.382	11.281	1.162	4.378	17.698
Suvi ostatak (TS)	24.492	9.636	4.727	7.270	19.472
Ukupni fosfor (TP)	0.015	0.000	0.003	0.008	0.006
Ukupni azot (TN)	0.000	0.018	0.016	0.013	0.025
Ulja i masti	-	0.083	0.066	0.026	0.148
pH [-]	8,7	8,5	8	8,5	8,1
El. provodljivost [μS/cm]	40	53	44	47	62

Tabela 5-4. Rezultati analize uzoraka Serije I - specifična organska jedinjenja preračunata na  $\text{g/m}^2$

<b>Datum uzorkovanja, 2012.</b>	<b>2.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>
<b>Lokacija:</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>
Anjonski deterdženti	0.00000	0.00114	0.00000	0.00167	0.00174
Fenoli	0.00000	0.00000	0.00015	0.00000	0.00000
Ugljovodonici od motornog benzina	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Ugljovodonici od dizel goriva	0.00000	0.00000	0.00411	0.00000	0.00000
Indeks ugljovodonika	0.00000	0.00000	0.01164	0.00200	0.00000
<b>Datum uzorkovanja, 2012.</b>	<b>2.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>	<b>10.8.</b>	<b>17.8.</b>
<b>Lokacija:</b>	<b>B1</b>	<b>B1</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>
Anjonski deterdženti	0.00000	0.00078	0.00000	0.00122	0.00258
Fenoli	0.00000	0.00004	0.00004	-	0.00005
Ugljovodonici od motornog benzina	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Ugljovodonici od dizel goriva	0.00000	0.00078	0.00000	0.00049	0.00000
Indeks ugljovodonika	0.00047	0.00172	0.00052	0.00138	0.00000

Primetno je veliko rasipanje rezultata. Uzorci su bili neutralni do blago bazne reakcije, pH od 8 do 8,9, i niske elektropovodljivosti od 20 do 62  $\mu\text{S/cm}$ . Ulja i masti su prisutni u količinama od 0,026 do 0,148  $\text{g/m}^2$ , što ukazuje na zagađenje asfaltne površine od motornih vozila. Ugljovodonici se pojavlju samo povremeno i u malim količinama, ispod 0,78  $\text{mg/m}^2$ . Suspendovane materije su prisutne u količini do 25,2  $\text{g/m}^2$ . Rezultati prvog dana uzorkovanja pokazuju znatno veće količine većine ispitivanih parametara. Poslednjeg dana uzorkovanja rezultati ukazuju na smanjenje zagađenja, što je neočekivan rezultat.

Iz rezultata jasno proizilazi zavisnost rezultata merenja od mesta uzorkovanja i vremenskog perioda između uzorkovanja. Razmak između uzorkovanja je bio dug tako da nije mogla da se pravilno sagleda dinamika akumulisanja zagađenja. Rezultati uzorkovanja sa mesta A1 i B1, koji su ponavljani u sva tri uzorkovanja, ukazuju na opadanje pojedinih parametara zagađenja tokom vremena. Veoma toplo vreme i niska vlažnost vazduha su faktori kojima se može objasniti odnošenje materijala nakon incijalne akumulacije materija na površini, i smanjenje zagađenja tokom dužeg perioda toplog vremena bez padavina. Obe ispitivane lokacije su na otvorenom prostoru i izložene atmosferilijama i vetru. Takođe, početkom avgusta je primetno veliko smanjenje intenziteta saobraćaja u okolnim ulicama usled sezone godišnjih odmora, što bi zauzvrat dalo manje zagađenje vazduha usled saobraćaja i manju količinu materija koje se iz atmosfere talože po urbanim površinama. Ipak, potrebna su dodatna istraživanja da bi se potkrepile ove tvrdnje.

Prethodna ispitivanja sa uzorcima Serije I su iskorišćena za testiranje i usavršavanje primenjenih tehnika uzorkovanja, finalni odabir površina za uzorkovanje i

ispitivanih parametara. U daljim istraživanjima smanjena je količina čiste vode za uzorkovanje sa 4 L na 2 L, jer je pokazano da je ova količina sasvim dovoljna za efikasno uzimanje uzorka i laboratorijske analize. Nadalje nisu više ispitivani ugljovodonici i masti i ulja, a umesto potrošnje kalijumpermanganata određivana je hemijska potrošnja kiseonika dihromatnom metodom, što je pouzdanija metoda za određivanje ove kiseonične komponente. Pored ovoga, kao što je opisano ranije u poglavlju o primenjenim metodama istraživanja, nadalje je posebna pažnja posvećena i sastavu i strukturi čvrstih čestica.

## **5.2. ANALIZA UZORAKA SNEGA, SERIJA II**

Rezultati ispitivanja uzoraka površinskih slojeva snega iz decembra 2012. godine su dati u tabeli 5-5. Uzorkovanje je započeto 10. decembra 2012. godine, jedan dan nakon što su prestale snežne padavine. 16. decembra je započelo otopljanje koje je dovelo do brzog topljenja snežnog pokrivača tako da uzorkovanje više nije bilo praktično izvodljivo posle 17. decembra.

Uzorci su bili neutralni do blago kisele reakcije, pH od 4,8 do 6,9, što je u skladu sa ranijim istraživanjima (Glenn i Sansalone, 2002). Vrednosti elektroprovodljivosti i tvrdoće su veoma niske, što je i očekivano. Izuzimajući prvi dan uzorkovanja, primećen je trend postepenog povećanja pH u uzorcima i prelaska iz blago kisele (pH=4,8) u neutralnu reakciju (pH=6,9). Uzorci s3 i s4 imaju znatno niže vrednosti gotovo svih ispitivanih parametara, što može ukazati na zavisnost rezultata merenja od izbora mesta uzorkovanja. Izuzev rezultata za ova dva uzorka, postoji trend povećanja vrednosti svih parametara u uzorcima, osim koncentracije jona, tokom vremena. Poznato je iz ranijih istraživanja da je sneg vrlo efikasan u vezivanju čestica i da ih otpušta u okolinu tek prilikom otapanja (Glenn i Sansalone 2002, Westerlund i Viklander 2006).

Ako se iz rezultata proceni količina pojedinih parametara po jedinici površine, dobijaju se vrednosti za suspendovane materije od 12 do 190 mg/m<sup>2</sup> a za HPK od 176 do 79,4 mg/m<sup>2</sup>, što su niske vrednosti i za skoro dva reda veličine niže od izmerenih vrednosti u uzorcima uzetih sa asfalta u Serijama I, III i IV tokom 2012. i 2013. godine. Ovo se može objasniti time da je snežni pokrivač bio svež (prvog dana uzorkovanja snežni pokrivač je bio star jedan dan), a moguće je da je tome doprineo i bolji kvalitet

vazduha u vreme uzorkovanja snega u odnosu na kvalitet vazduha tokom uzorkovanja sa asfalta u Seriji III u julu i Seriji IV u oktobru 2013. godine. Rezultati analiza uzoraka snega su dati u tabeli 5-5.

Tabela 5-5. Rezultati ispitivanja uzoraka snega, Serija II

Parametar	Jedinica	Oznaka uzorka / datum uzorkovanja (2012, god.)					
		s1	s2	s3	s4	s5	s6
		10.12.	12.12.	13.12.	14.12.	15.12.	17.12.
pH	-	6,71	4,76	4,58	4,66	5,77	6,89
El. prov.	mS/cm	36	54	57	44	67	12
TS	mg/L	19	36	13	19	64	105
TSS	mg/L	6	13	0	9	34	95
HPK	mgO <sub>2</sub> /L	8,8	48,7	10,8	16,3	20,5	39,7
Fuoridi	mg/L	0,037	0,045	0,038	0,045	0,038	0,019
Hloridi	mg/L	5,385	2,794	6,159	2,990	8,498	1,050
Nitrati	mg/L	0,857	6,729	5,575	4,909	6,221	0,321
Nitriti	mg/L	0,052	0,055	0,053	0,021	0,095	0,035
Sulfati	mg/L	1,143	3,671	2,474	2,407	4,714	0,807
Fosfati	mg/L	-	-	0,192	-	-	0,172
Kalijum	mg/L	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Natrijum	mg/L	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kalcijum	mg/L	1,2	2,0	1,2	1,2	4,0	2,0
Magenzijum	mg/L	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Tvrdoća	°dH	0,22	0,33	-	-	0,61	-

### 5.3. ANALIZA UZORAKA ZAHVAĆENIH SA NEPROPUSNIH POVRŠINA, SERIJE III i IV

Rezultati laboratorijskih ispitivanja zbrinih uzoraka (voda zajedno sa zahvaćenim materijama sa površine) Serije III (jula 2013. godine), zahvaćenih za ispitivanje akumulisanja zagađenja, su dati u tabeli 5-6 - uzorci sa asfalta parkinga i u tabeli 5-7 - uzorci sa trotoara od betonskih ploča.

Tabela 5-6. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za ispitivanje akumulisanja zagađenja na asfaltnim površinama parkinga (Serija III)

Datum uzorkovanja	09/7/2013	11/7/2013	12/7/2013	13/7/2013	14/7/2013	15/7/2013	17/7/2013	19/7/2013	21/7/2013	
Vreme (hh:mm)	08:15	08:00	08:00	09:00	08:40	08:05	08:00	08:20	08:20	
Merno mesto - na skici	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>A4</b>	<b>A5</b>	<b>A6</b>	<b>A7</b>	<b>A8</b>	
Oznaka uzorka	<b>A1-1</b>	<b>A1-2</b>	<b>A2-3</b>	<b>A3-4</b>	<b>A4-5</b>	<b>A5-6</b>	<b>A6-7</b>	<b>A7-8</b>	<b>A8-9</b>	
Količina uzorka (kg)	1,95	1,87	2,00	1,85	1,94	1,85	1,91	2,27	1,90	
Materijal površine	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	
Površina (m <sup>2</sup> )	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
<b>FIZIČKO-HEMIJSKE KARAKTERISTIKE</b>										
pH	-	8,36	8,48	8,43	7,99	8,10	8,04	8,26	8,05	7,75
El. provodljivost	μS/cm	72,2	54,7	60,7	94,9	87,6	97	91,4	114,5	126,1
HPK	mgO <sub>2</sub> /L	990	490	503	782	864	989	860	1239	983
BPK <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	18	11	13	-	-	2	12	47	0
Sedim. mat.	mL/L	9	4,1	5,3	12	13	10	9	9	9,5
Suvi ostatak (TS)	mg/L	4964	1716	2015	2904	2828	3196	2596	3849	4505
Susp. mat. (TSS)	mg/L	4820	1639	1924	2791	2713	3066	2513	3659	4333
Mutnoća	NTU	2000	609	863	880	1658	1436	1306	1950	1962
<b>NUTRIJENTI</b>										
TN	mgN/L	2,74	6,05	6,9	8,22	10,4	13,6	10,7	15,9	14,9
TP	mgP/L	4,84	2,42	2,38	3,24	3,93	3,32	4,3	5,22	4,76
<b>TEŠKI METALI</b>										
Fe (Nerastvorni)	mg/L	110	41,1	46,5	59,2	61,2	112,8	44,8	54,8	78,4
Fe <sup>3+</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,4	0,27	-	-	-	-	-	-	-
Zn (Nerastvorni)	mg/L	5,1	2,78	3,02	3,68	3,68	2,81	3,09	3,89	4,66
Zn <sup>2+</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,037	0,028	-	-	-	-	-	-	-
Cr (Nerastvorni)	mg/L	1,35	0,55	0,804	0,849	0,938	0,977	0,894	0,954	0,937
Cr(IV) (Rastvoreni)	mg/L	0,042	0,038	-	-	-	-	-	-	-
Cu (Nerastvorni)	mg/L	0,932	0,76	0,367	0,518	0,548	0,608	0,396	0,487	1,55
Cu <sup>+2</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,042	0,038	-	-	-	-	-	-	-
<b>ANJONI</b>										
Cl <sup>-</sup>	mg/L	3,270	3,330	4,048	3,728	4,062	4,001	6,333	8,108	4,829
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0,071	0,033	0,000	0,094	0,054	0,055	0,000	0,140	0,147
Br <sup>-</sup>	mg/L	0,262	0,193	0,171	0,227	0,213	0,235	0,548	0,313	0,294
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	756,00	0,246	0,437	0,822	0,681	1,257	1,528	2,193	2,030
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L	0,367	0	0	0	0	0,145	0,284	0,227	0,512
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	7,019	5,477	5,918	7,215	6,948	7,637	8,542	10,913	9,261

Tabela 5-7. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za ispitivanje akumulisanja zagađenja na betonskim površinama trotoara (Serija III)

Datum uzorkovanja	09/7/2013	11/7/2013	12/7/2013	13/7/2013	14/7/2013	15/7/2013	17/7/2013	19/7/2013	21/7/2013	
Vreme (hh:mm)	08:30	08:10	08:10	09:10	08:50	08:15	08:10	08:30	08:45	
Merno mesto - na skici	<b>S1</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>	
Oznaka uzorka	<b>S1-1</b>	<b>S1-2</b>	<b>S2-3</b>	<b>S3-4</b>	<b>S4-5</b>	<b>S5-6</b>	<b>S6-7</b>	<b>S7-8</b>	<b>S8-9</b>	
Količina uzorka (kg)	1,87	1,82	1,91	1,97	1,83	1,99	1,98	1,97	1,79	
Materijal površine	pločnik	pločnik	pločnik	pločnik	pločnik	pločnik	pločnik	pločnik	pločnik	
Površina (m <sup>2</sup> )	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
<b>FIZIČKO-HEMIJSKE KARAKTERISTIKE</b>										
pH	-	9,00	8,72	8,93	8,47	8,71	8,67	8,88	10,57	8,39
El. provodljivost	μS/cm	50,4	44,4	44,8	58,2	56,5	60,7	58,6	227	82,8
HPK	mgO <sub>2</sub> /L	453	400	236	349	533	342	290	311	657
BPK <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	2	13	13			20	26	25	23
Sedim. mat.	mL/L	2,9	1,4	1,6	2,8	2,1	2,5	1,5	3,7	4,6
Suvi ostatak (TS)	mg/L	1545	735	747	919	974	770	802	1475	2154
Susp. mat. (TSS)	mg/L	1462	669	683	835	878	678	748	1368	2031
Mutnoća	NTU	494	168	175	295	258	263	207	892	868
<b>NUTRIJENTI</b>										
TN	mgN/L	1,37	4,76	2,94	6,13	5,8	6,83	3,76	13,7	12,6
TP	mgP/L	1,95	1,28	0,86	1,41	1,32	1,07	1,03	4,54	2,42
<b>TEŠKI METALI</b>										
Fe (Nerastvorni)	mg/L	39	14,6	17,1	23,7	23,7	22,8	15,6	24	48
Fe <sup>3+</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,3	0,25	-	-	-	-	-	-	-
Zn (Nerastvorni)	mg/L	2,62	1,24	1,29	1,78	1,47	0,49	1,37	2,23	3,69
Zn <sup>2+</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,006	0,006	-	-	-	-	-	-	-
Cr (Nerastvorni)	mg/L	0,595	0,261	0,295	0,352	0,359	0,37	0,307	0,412	0,772
Cr(IV) (Rastvoreni)	mg/L	0,036	0,032	-	-	-	-	-	-	-
Cu (Nerastvorni)	mg/L	0,444	0,432	0,462	0,389	0,737	0,422	0,252	0,467	0,451
Cu <sup>+2</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,027	0,022	-	-	-	-	-	-	-
<b>ANJONI</b>										
Cl <sup>-</sup>	mg/L	2,717	2,753	2,707	2,233	3,373	3,205	4,169	5,257	4,245
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0,061	0,077	0,000	0,072	0,066	0,072	0,065	0,138	0,073
Br <sup>-</sup>	mg/L	0,185	0,167	0,000	0,000	0,000	0,000	0,199	0,395	0,574
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	1,251	0,908	0,745	0,976	1,115	1,478	1,766	2,422	2,423
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	6,962	3,000	3,264	3,569	4,007	4,306	5,138	10,883	6,484



Rezultati laboratorijskih ispitivanja zbrinih uzoraka zahvaćenih jula meseca 2013. godine za ispitivanje dnevnog priraštaja zagađenja (Serija IV) su dati u tabeli 5-8 - uzorci sa asfalta parkinga i u tabeli 5-9 – uzorci zahvaćeni sa trotoara od betonskih ploča.

Tabela 5-8. Rezultati ispitivanja zbrinih uzoraka za ispitivanje dnevnog priraštaja zagađenja na asfaltnim površinama parkinga (Serija IV)

Datum uzorkovanja	20/07/2013	21/07/2013	22/07/2013	23/07/2013	24/07/2013	25/07/2013	26/07/2013	
Vreme (hh:mm)	07:35	08:35	08:15	08:15	08:50	08:50	08:10	
Merno mesto - na skici	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	
Oznaka uzorka	<b>A1-0-0</b>	<b>A1-0-1</b>	<b>A1-0-2</b>	<b>A1-0-3</b>	<b>A1-0-4</b>	<b>A1-0-5</b>	<b>A1-0-6</b>	
Količina uzorka (kg)	1,93	1,94	1,93	1,94	1,89	1,89	1,93	
Materijal površine	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	
Površina (m <sup>2</sup> )	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
<b>FIZIČKO-HEMIJSKE KARAKTERISTIKE</b>								
pH	-	7,47	8,31	8,64	8,45	10,33	9,57	9,08
El. provodljivost	μS/cm	110,2	46,2	34,3	38,7	182,9	71	47,1
HPK	mgO <sub>2</sub> /L	405	203	100	220	915	272	108
Suvi ostatak (TS)	mg/L	1087	505	411	431	4495	753	382
Susp. materije (TSS)	mg/L	930	433	318	362	4252	642	313
Mutnoca	NTU	365	212	165	224	3200	389	199
<b>NUTRIJENTI</b>								
TN	mgN/L	2,34	1,03	1,07	1,61	1,95	3,65	2,25
TP	mgP/L	2,06	0,951	0,663	0,745	2,99	1,19	0,647
<b>TEŠKI METALI</b>								
Fe (Nerastvorni)	mg/L	16,8	6	4,5	6,9	46,2	9,6	6,3
Fe <sup>3+</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,23	0,2	-	-	-	-	-
Zn (Nerastvorni)	mg/L	1,51	0,554	0,481	0,800	6,2	0,917	0,473
Zn <sup>2+</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,053	0,054	-	-	-	-	-
Cr (Nerastvorni)	mg/L	0,328	0,172	0,13	0,126	1,35	0,211	0,103
Cr(IV) (Rastvoreni)	mg/L	0,036	0,03	-	-	-	-	-
Cu (Nerastvorni)	mg/L	0,536	0,21	0,382	0,099	1,11	0,198	0,067
Cu <sup>+2</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,052	0,042	-	-	-	-	-
<b>ANJONI</b>								
Cl <sup>-</sup>	mg/L	5,152	4,204	2,704	3,714	5,452	2,483	1,863
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0,242	0,054	0,000	0,044	0,279	0,084	0,071
Br <sup>-</sup>	mg/L	0,314	0,000	0,255	0,000	0,391	0,208	0,155
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	1,498	0,896	0,460	0,604	1,522	0,845	0,681
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L	0	0	0	0	0	0	0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	6,280	2,730	2,109	2,395	23,733	5,153	2,642

Tabela 5-9. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za ispitivanje dnevnog priraštaja zagađenja na betonskim površinama trotoara (Serija IV)

Datum uzorkovanja	20/07/2013	21/07/2013	22/07/2013	23/07/2013	24/07/2013	25/07/2013	26/07/2013	
Vreme (hh:mm)	07:45	08:55	08:25	08:25	09:00	09:00	08:20	
Merno mesto - na skici	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	
Oznaka uzorka	S1-0-0	S1-0-1	S1-0-2	S1-0-3	S1-0-4	S1-0-5	S1-0-6	
Količina uzorka (kg)	1,87	1,85	1,84	1,82	1,92	1,85	1,83	
Materijal površine	pločnik	pločnik	pločnik	pločnik	pločnik	pločnik	pločnik	
Površina (m <sup>2</sup> )	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
<b>FIZIČKO-HEMIJSKE KARAKTERISTIKE</b>								
pH	-	8,47	8,60	8,64	8,88	9,58	9,25	9,03
El. provodljivost	μS/cm	79,1	40,6	32,3	34	49,3	42,2	35,1
HPK	mgO <sub>2</sub> /L	352	175	79,7	82,7	65,6	47,8	47,1
Suvi ostatak (TS)	mg/L	713	281	209	205	320	250	173
Susp. materije (TSS)	mg/L	602	199	127	144	251	179	112
Mutnoca	NTU	267	109	100	136	182	131	95,5
<b>NUTRIJENTI</b>								
TN	mgN/L	2,98	2,37	1,95	1,47	1,64	1,32	1,01
TP	mgP/L	1,22	0,394	0,383	0,354	0,321	0,351	0,328
<b>TEŠKI METALI</b>								
Fe (Nerastvorni)	mg/L	15,9	5,1	4,9	4,4	4,9	3,5	2
Fe <sup>3+</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,27	0,16	-	-	-	-	-
Zn (Nerastvorni)	mg/L	1,15	0,563	0,37	0,447	0,55	0,372	0,15
Zn <sup>2+</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,03	0,03	-	-	-	-	-
Cr (Nerastvorni)	mg/L	0,261	0,114	0,083	0,106	0,113	0,084	0,049
Cr(IV) (Rastvoreni)	mg/L	0,038	0,031	-	-	-	-	-
Cu (Nerastvorni)	mg/L	0,336	0,091	0,032	0,085	0,084	0,184	0,054
Cu <sup>+2</sup> (Rastvoreni)	mg/L	0,056	0,035	-	-	-	-	-
<b>ANJONI</b>								
Cl <sup>-</sup>	mg/L	5,797	2,370	1,950	1,470	1,640	1,320	1,010
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0,120	0,053	0,000	0,061	0,074	0,091	0,056
Br <sup>-</sup>	mg/L	0,230	0,245	0,000	0,162	0,146	0,154	0,121
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	2,166	0,555	0,266	0,775	0,902	0,973	0,700
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L	0	0	0	0	0	0	0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	5,688	2,582	1,917	1,935	3,028	2,368	1,161

## 5.4. ANALIZA UZORAKA ZAHVAĆENIH SA NEPROPSUNIH POVRŠINA, SERIJA V

U okviru Serije V, zahvatani su uzorci sa asfalta, betona i kamena u cilju ispitivanja dnevnog priraštaja zagađenja. Rezultati laboratorijskih ispitivanja zbrinih uzoraka Serije V su dati u tabeli 5-10 - uzorci sa asfalta parkinga, tabeli 5-11 - uzorci sa trotoara od betonskih ploča i tabeli 5-12 - uzorci sa kamenog podesta pored ulaza u zgradu Instituta za fiziku.

Tabela 5-10. Rezultati ispitivanja zbrinih uzoraka za ispitivanje dnevnog priraštaja zagađenja na asfaltnim površinama parkinga (Serija V)

Datum uzorkovanja	05/10/2013	06/10/2013	07/10/2013	08/10/2013	09/10/2013	10/10/2013	11/10/2013	
Vreme (hh:mm)	08:50	10:15	07:10	07:10	07:20	07:15	07:10	
Merno mesto - na skici	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	<b>A1</b>	
Oznaka uzorka	<b>A1-1-0</b>	<b>A1-1-1</b>	<b>A1-1-2</b>	<b>A1-1-3</b>	<b>A1-1-4</b>	<b>A1-1-5</b>	<b>A1-1-6</b>	
Količina uzorka (kg)	1,99	1,93	1,93	1,93	1,96	1,96	1,87	
Materijal površine	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	asfalt	
Površina (m <sup>2</sup> )	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
<b>FIZIČKO-HEMIJSKE KARAKTERISTIKE</b>								
pH	-	8,74	8,83	8,91	8,96	8,92	8,90	8,98
El. provodljivost	μS/cm	57,3	39,9	32,2	32,6	35	28,6	29,5
HPK	mgO <sub>2</sub> /L	748	230	71	94,1	87	64,2	76,5
Suvi ostatak (TS)	mg/L	4143	802	380	345	258	264	257
Susp. materije (TSS)	mg/L	4056	738	333	297	231	229	189
Mutnoca	NTU	1304	364	127	199	166	101	114
<b>NUTRIJENTI</b>								
TN	mgN/L	14,3	4,66	0,5	2,44	2,07	1,58	1,96
TP	mgP/L	4,9	1	0,507	0,532	0,398	0,264	0,323
<b>TEŠKI METALI</b>								
Fe (Nerastvorni)	mg/L	58	14	6,8	6	5,8	4,6	5,2
Zn (Nerastvorni)	mg/L	2,64	0,669	0,338	0,321	<0,2	0,284	0,334
Cr (Nerastvorni)	mg/L	0,342	0,186	0,116	0,09	0,086	0,074	0,074
Cu (Nerastvorni)	mg/L	1,82	0,835	0,29	0,313	0,23	0,442	0,434
<b>ANJONI</b>								
Cl <sup>-</sup>	mg/L	2,776	2,342	2,290	2,759	2,535	2,490	4,348
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0,114	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Br <sup>-</sup>	mg/L	0,271	0,216	0,000	0,184	0,000	0,168	0,293
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0,490	0,414	0,281	0,239	0,451	0,181	0,566
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L	0,192	0	0	0	0	0	0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	4,308	3,294	3,045	3,553	3,043	2,430	3,808

Tabela 5-11. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za ispitivanje dnevnog priraštaja zagađenja na betonskim površinama trotoara, oktobar 2013.

Datum uzorkovanja	05/10/2013	06/10/2013	07/10/2013	08/10/2013	09/10/2013	10/10/2013	11/10/2013	
Vreme (hh:mm)	09:00	10:25	07:20	07:20	07:30	07:25	07:20	
Merno mesto - na skici	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	
Oznaka uzorka	S1-1-0	S1-1-1	S1-1-2	S1-1-3	S1-1-4	S1-1-5	S1-1-6	
Količina uzorka (kg)	1,95	1,93	1,92	1,92	1,88	1,90	1,87	
Materijal površine	pločnik - betonske ploče na pešačkoj stazi kod stepeništa							
Površina (m <sup>2</sup> )	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
<b>FIZIČKO-HEMIJSKE KARAKTERISTIKE</b>								
pH	-	9,03	8,72	7,57	9,09	8,84	8,78	9,09
El. provodljivost	μS/cm	87,1	40,7	30	36,1	38,6	34,9	39,2
HPK	mgO <sub>2</sub> /L	210	59,4	37,7	51,5	49,9	43,6	49,7
Suvi ostatak (TS)	mg/L	626	191	139	149	128	140	151
Susp. materije (TSS)	mg/L	528	111	71	103	68	65	78
Mutnoca	NTU	275	69,1	50	80,4	68	40	74,4
<b>NUTRIJENTI</b>								
TN	mgN/L	3	1,59	1,27	1,6	1,37	1,31	1,69
TP	mgP/L	0,861	0,322	0,143	0,226	0,192	0,206	0,203
<b>TEŠKI METALI</b>								
Fe (Nerastvorni)	mg/L	12,6	4,8	2,15	3,05	2,1	2,15	3
Zn (Nerastvorni)	mg/L	0,696	0,279	<0,2	0,246	<0,2	<0,2	<0,2
Cr (Nerastvorni)	mg/L	0,116	0,070	0,061	0,061	0,059	0,060	0,066
Cu (Nerastvorni)	mg/L	0,792	0,498	0,187	0,332	0,159	0,165	0,232
<b>ANJONI</b>								
Cl <sup>-</sup>	mg/L	8,684	5,537	5,069	30305,0	3,193	3,473	6,821
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0,139	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Br <sup>-</sup>	mg/L	0,432	0,300	0,261	0,174	0,192	0,140	0,278
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	1,268	0,813	0,816	0,493	0,462	0,386	1,038
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L	0	0	0	0	0	0	0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	11,141	5,893	5,120	4,735	3,876	3,655	5,996

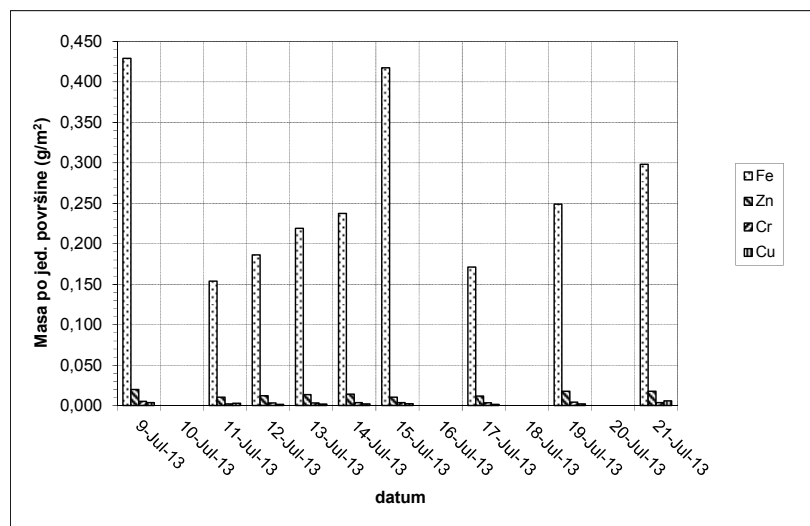
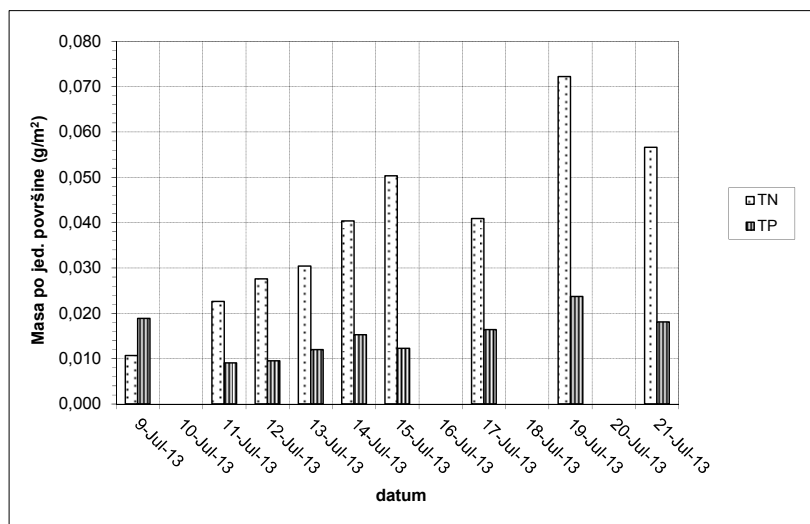
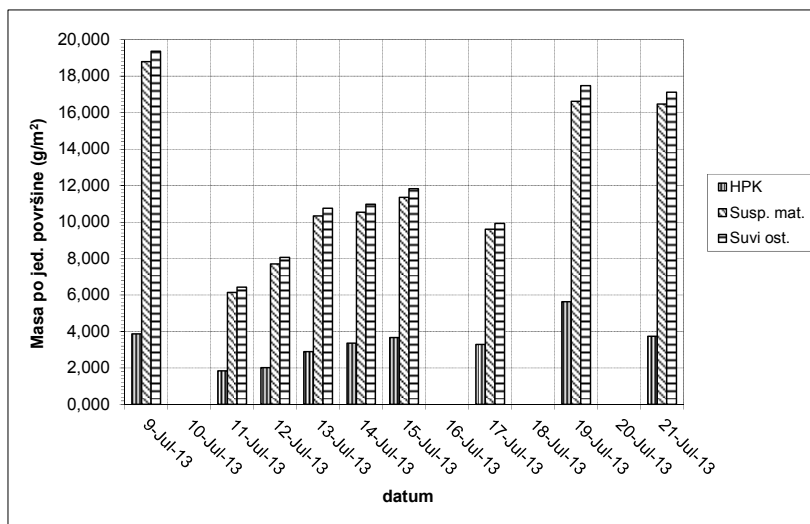
Tabela 5-12. Rezultati ispitivanja zbirnih uzoraka za ispitivanje dnevnog priraštaja zagađenja na kamenim površinama, oktobar 2013.

Datum uzorkovanja	05/10/2013	06/10/2013	07/10/2013	08/10/2013	09/10/2013	10/10/2013	11/10/2013	
Vreme (hh:mm)	09:10	10:35	07:30	07:30	07:40	07:35	07:30	
Merno mesto - na skici	<b>K1</b>	<b>K1</b>	<b>K1</b>	<b>K1</b>	<b>K1</b>	<b>K1</b>	<b>K1</b>	
Oznaka uzorka	<b>K1-1-0</b>	<b>K1-1-1</b>	<b>K1-1-2</b>	<b>K1-1-3</b>	<b>K1-1-4</b>	<b>K1-1-5</b>	<b>K1-1-6</b>	
Količina uzorka (kg)	1,94	1,89	1,86	1,94	1,91	1,98	1,94	
Materijal površine	kamene ploče (granit) pred ulaza u zgradu instituta							
Površina (m <sup>2</sup> )	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
<b>FIZIČKO-HEMIJSKE KARAKTERISTIKE</b>								
pH	-	8,72	7,23	7,13	6,86	6,85	6,93	6,99
El. provodljivost	μS/cm	40,4	20,9	16,2	16,9	161,1	16,2	1484
HPK	mgO <sub>2</sub> /L	57,3	23,8	17,7	17,3	18,8	15,7	15,9
Suvi ostatak (TS)	mg/L	311	108	61	56	60	61	61
Susp. materije (TSS)	mg/L	233	49	30	31	29	31	30
Mutnoca	NTU	135	33,5	23,8	25,2	20,3	20,3	19,4
<b>NUTRIJENTI</b>								
TN	mgN/L	3,49	1,83	1,43	1,35	1,07	0,923	1,23
TP	mgP/L	0,495	0,174	0,09	0,093	0,081	0,08	0,09
<b>TEŠKI METALI</b>								
Fe (Nerastvorni)	mg/L	7,8	2,48	1,68	1,36	1,28	1,08	0,8
Zn (Nerastvorni)	mg/L	0,316	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Cr (Nerastvorni)	mg/L	0,104	0,047	0,037	0,03	0,026	0,019	0,022
Cu (Nerastvorni)	mg/L	0,536	0,268	0,148	0,129	0,114	0,114	0,115
<b>ANJONI</b>								
Cl <sup>-</sup>	mg/L	5,353	4,985	1,952	2,207	2,189	2,854	4,946
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0,079	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Br <sup>-</sup>	mg/L	0,288	0,232	0,000	0,131	0,126	0,137	0,219
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	2,752	1,589	0,814	0,755	0,673	0,696	0,746
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L	0	0	0	0	0	0	0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	5,460	4,908	2,251	3,465	2,696	2,365	3,966

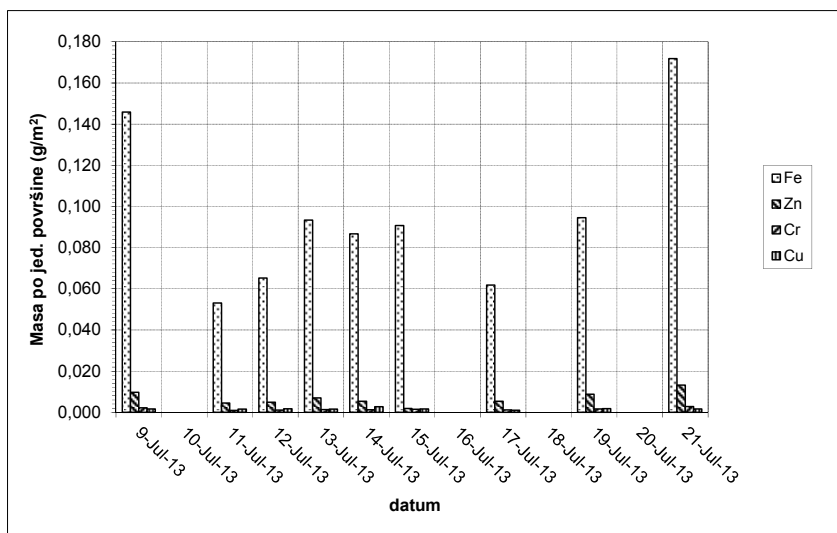
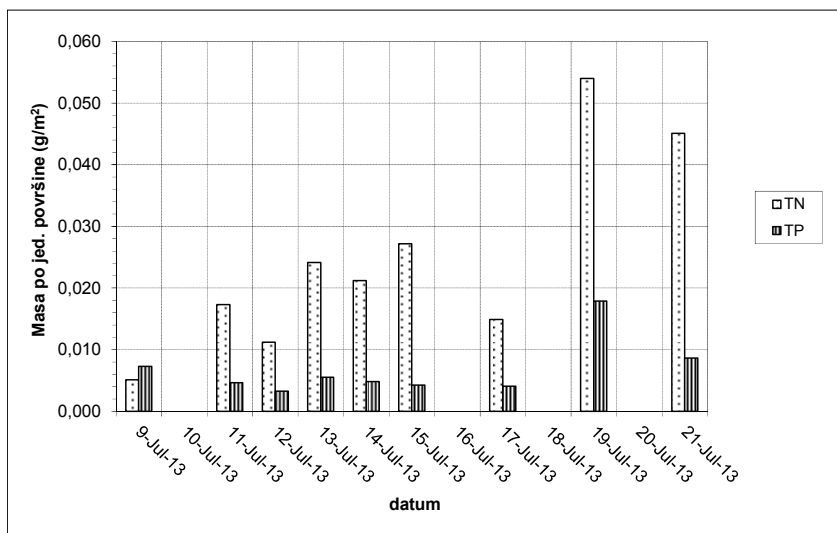
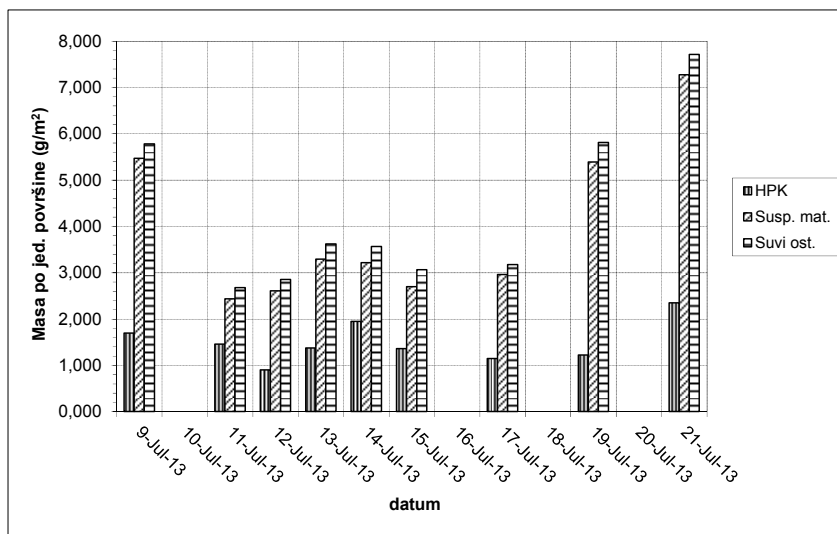
## 5.5. ANALIZA AKUMULISANJA ZAGAĐENJA, SERIJA III

Podaci merenja parametara u zahvaćenim uzorcima Serije III sa asfalta i betona su obrađeni da se dobije podaci o masi zagađenja (mg ili g) po kvadratnom metru površine. Obradeni najbitniji parametri, za sve kampanje uzorkovanja u 2013. godini, su prikazani na dijagramima na slikama 5-1 i 5-2.

Iz merenih rezultata jasno se uočava da je količina (masa) zagađenja na asfaltnim površinama parkinga znatno veća od količina sa betonske površine trotoara. Ovo jasno ukazuje na uticaj vrste površine i njenih karakteristika, prvenstveno hrapavosti, na mogućnost akumulisanja zagađenja, sa jedne strane, ali takođe i na uticaj načina korišćenja površine. Površine koje koriste motorna vozila imaju znatno veće količine zagađenja od površina namenjenih pretežno pešacima.



Slika 5-1. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane asfaltne površine parkinga prema merenjima akumulisanja zagađenja, Serija III (jul 2013.)



Slika 5-2. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane površine trotoara od betonskih ploča prema merenjima akumulisanja zagađenja, Serija III (jul 2013.)

Iz merenih rezultata uočava se da je u svim uzorcima mala razlika između suvog ostatka i (TS) i suspendovanih materija (TSS), odnosno da je relativno nizak udeo rastvorenih materija u uzorcima. To je potvrđeno merenjima koncentracija teških metala u rastvorenom i nerastvorenom obliku gde je vrlo nizak udeo teških metala u rastvorenom obliku, odnosno veoma je izraženo razdvajanje čvrste i tečne faze teških metala. Ovo je veoma izraženo za gvožđe i cink, gde je udeo rastvorenih oblika do 5%, a ovaj procenat je nešto veći za hrom i bakar. Nizak sadržaj rastvorene faze teških metala u oticaju je ustanovljen takođe i u drugim istraživanjima (Milukaitė 2010). Ovo se može objasniti pH vrednostima koje su u neutralnom ili blago baznom opsegu, što pogoduje prisustvu metala u nerastvorljivim oblicima. Sa druge strane, pH reakcija kišnice može biti neutralna (Delečić 1998; Milukaitė 2010) ili blago kisela, što pogoduje rastvaranju teških metala (Glenn i Sansalone 2002). Uzrok smanjenju pH kišnice leži u rastvaranju ugljen-dioksida, sumpornih oksida i drugih gasova prisutnih u atmosferi u niskim koncentracijama u kapljicama vode u atmosferi. Međutim, kišni oticaj, pod uticajem atmosfere i materija sa kojima dolazi u kontakt na tlu (npr. jedinjenjima kalcijuma i dr.), obično brzo prelazi u neutralnu reakciju, čime se ravnoteža pomera prema smanjenju udela rastvorljivih teških metala u oticaju.

Iz rezultata se jasno vide efekti pranja površine za uzorkovanje posle prvog dana uzorkovanja u kampanji merenja Serije III u julu 2013. godine. Nakon pranja površine, sledećeg dana uzorkovanja su količine svih parametara osim nutrijenata nekoliko puta manje nego pre pranja. Razlozi za odstupanje ovih izmerenih vrednosti za nutrijente (N i P) su neočekivani i trebalo bi ih detaljnije ispitati u budućnosti.

Nakon pranja površine, primetan je trend uvećanja količine zagađenja na ispitivanim površinama, mada priraštaj zagađenja nije ravnomeran i postoje povremena odstupanja od generalnog trenda uvećanja. Zapaženo je postojanje trenda usporavanja priraštaja zagađenja, odnosno saturacije površine zagađenjem, ali on nije izrazit.

### **5.5.1. Funkcije akumulisanja zagađenja EXP, POW i SAT**

Rezultati ispitivanja uzoraka Serije III zahvaćenih sa asfaltnih i sa betonskih površina su testirani da bi se ispitalo koja od funkcija akumulisanja, opisanih u poglavlju 3.3, najbolje opisuje dobijene rezultate. Analizom su obuhvaćene sledeće funkcije:



**POW** – stepena funkcija:

$$B = \min\{C_{1b}, C_{2b} \cdot t^{C_{3b}}\}$$

**EXP** – eksponencijalna funkcija:

$$B = C_{1b} \cdot (1 - e^{-C_{2b} \cdot t})$$

**SAT** – saturaciona funkcija (Michaelis-Menten):

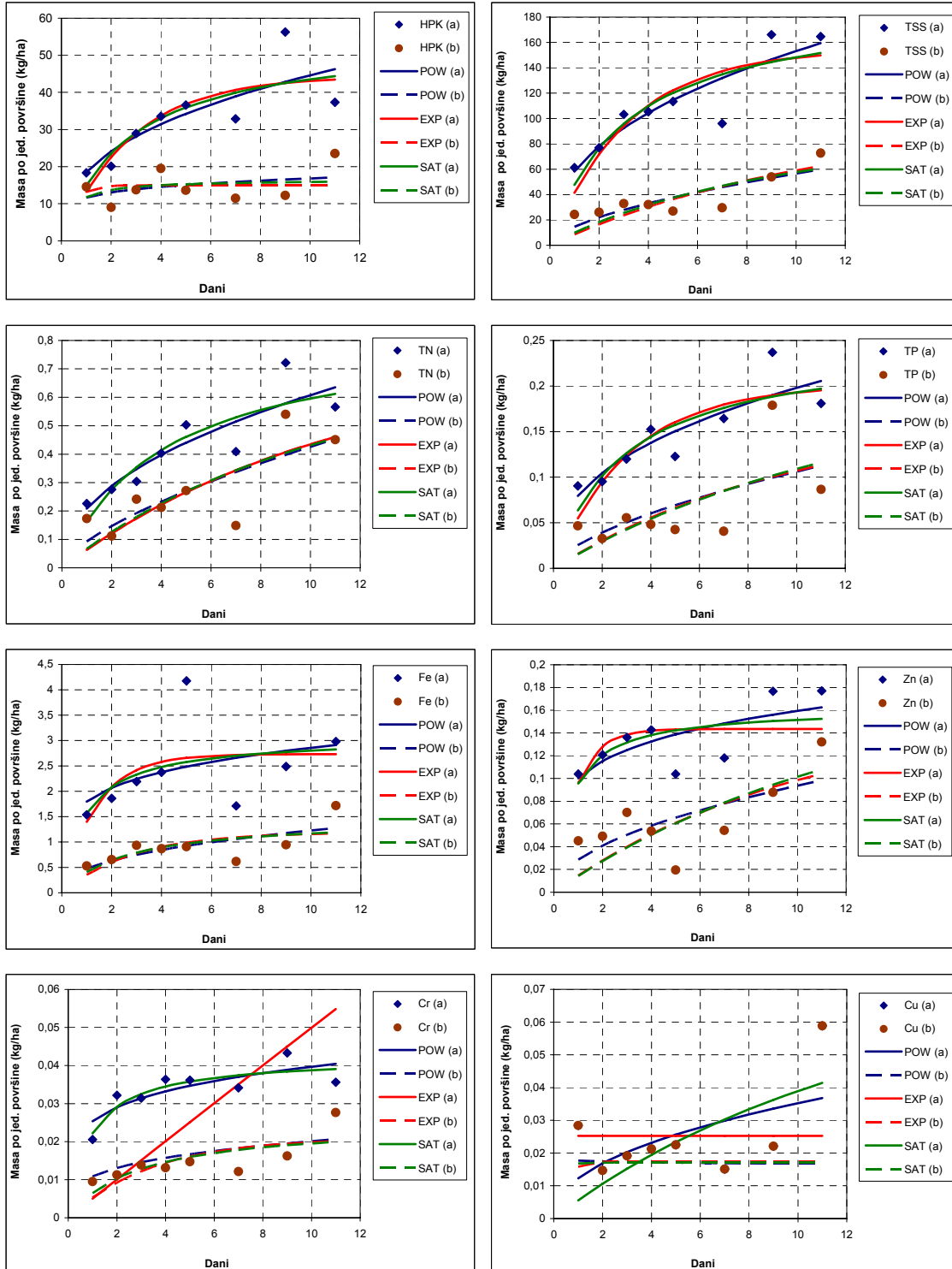
$$B = \frac{C_{1b} \cdot t}{C_{2b} + t}$$

Za rezultate merenja uzorka Serije III za merenja akumulisanja zagađenja sa asfalta i betona, parametri  $C_{1b}$ ,  $C_{2b}$  i  $C_{3b}$  su određeni minimizacijom sume kvadrata razlika između izračunatih vrednosti po nekom od modela akumulisanja i merenih podataka, korišćenjem Excel Solver-a (Microsoft Excel 2007). Dobijene vrednosti parametara i sume kvadrata razlika (Sum  $R^2$ ) su date u tabeli 5-13. U funkciji POW je zanemaran koeficijent  $C_{1b}$  - maksimalna količina zagađenja na površini.

Tabela 5-13. Koeficijenti C1, C2, C3 i suma kvadrata razlika (Sum  $R^2$ ) za funkcije akumulisanja zagađenja: POW, EXP i SAT

	ASFALT				BETON			
	Sum $R^2$	$C_{1b}$	$C_{2b}$	$C_{3b}$	Sum $R^2$	$C_{1b}$	$C_{2b}$	$C_{3b}$
<b>HPK (kg/ha)</b>								
POW	322,45		18,478	0,383	130,60		11,662	0,159
EXP	317,99	44,377	0,354		151,39	14,954	2,131	
SAT	311,28	55,297	2,704		141,19	16,517	0,408	
<b>TSS (kg/ha)</b>								
POW	1827,85		58,326	0,419	681,83		14,619	0,588
EXP	2965,85	154,897	0,311		907,90	98,599	0,091	
SAT	2445,62	194,110	3,082		878,03	126,065	11,862	
<b>TN (kg/ha)</b>								
POW	0,04284		0,209	0,465	0,06600		0,093	0,661
EXP	0,04818	0,642	0,260		0,07224	0,729	0,091	
SAT	0,04591	0,843	4,154		0,07154	1,088	15,231	
<b>TP (kg/ha)</b>								
POW	0,00409		0,079	0,397	0,01030		0,025	0,620
EXP	0,00541	0,201	0,318		0,01051	0,174	0,096	
SAT	0,00484	0,250	2,934		0,01049	0,334	20,570	
<b>Fe (kg/ha)</b>								
POW	3,96272		1,797	0,201	0,48227		0,478	0,410
EXP	3,58570	2,733	0,717		0,63141	1,194	0,352	
SAT	3,71226	3,071	0,957		0,56498	1,472	2,593	
<b>Zn (kg/ha)</b>								
POW	0,00303		0,100	0,202	0,00457		0,029	0,514
EXP	0,00450	0,144	1,109		0,00539	0,160	0,096	
SAT	0,00374	0,162	0,696		0,00529	0,315	21,017	
<b>Cr (kg/ha)</b>								
POW	0,00010		0,025	0,194	0,00011		0,011	0,267
EXP	0,00176	2,401	0,002		0,00013	0,021	0,290	
SAT	0,00006	0,042	0,905		0,00011	0,025	2,880	
<b>Cu (kg/ha)</b>								
POW	0,00112		0,012	0,459	0,00016		0,018	-0,023
EXP	0,00143	0,025	23,272		0,00015	0,017	2,434	
SAT	0,00129	0,118	20,183		0,00016	0,017	0,026	

Na narednim dijagramima na slici 5-3 su prikazani podaci merenja uzoraka Serije III sa asfaltnih (a) i betonskih (b) površina, kao i krive fitovane prema funkcijama POW, EXP i SAT sa koeficijentima modela iz tabele 5-13.



Slika 5-3. Dijagrami merenih vrednosti i funkcija POW, EXP i SAT, za parametre u uzorcima sa asfaltiranog parkinga (a) i sa betonskog trotoara (b)

Sve razmatrane funkcije su, za svaki pojedinačni parametar, bliske u opisivanju trendova zagađenja, osim za bakar, za koji zbog rasipanja rezultata razmatrane krive nisu mogle da budu uspostavljene. Za uzorke sa asfalta, najbolje slaganje najčešće pokazuje stepena funkcija POW (TSS, nutrijenti, Zn), dok eksponencijalna funkcija EXP daje najbolje slaganje za hrom i gvožđe, a saturaciona funkcija SAT za HPK.

Za rezultate uzoraka sa betona, najbolja slaganja sa merenjima u odnosu na druge funkcije, uvek daje stepena funkcija POW.

Poredeći veličine akumuliranog zagađenja, njegov priraštaj i vrednosti kojima teži kroz vreme (saturacija) na ispitivanom području sa rezultatima istraživanja na drugim lokacijama, može se zaključiti da je eksperimentalni sliv na Građevinskom fakultetu mesto koje ima izraženu akumulaciju zagađenja na površinama. Poređenjem sa rezultatima do kojih su došli drugi istraživači (Wicke i sar. 2012; Gunawardana i sar. 2012; Egodawattaa i sar. 2008; Miguntanna i sar. 2010a; Vaze i Chiew 2002) može se zaključiti da su na mestima uzorkovanja iz jula 2013. godine veoma izražena akumulisanja materija na površini, naročito kod asfaltne površine, i da su količine materija znatno veće od drugih ispitivanih lokacija navedenih u literaturi (mogu biti čak 10 do 20 puta veće). Treba voditi računa da su lokacije navedene u literaturi najčešće bile saobraćajnice, autoputevi ili krovovi, koje su pretežno izložene atmosferskim uticajima koji mogu odnositi zagađenje akumulirano na površini (sunce, vetar), ili su to površine na kojima se sakupljaju samo atmosferski depoziti, bez uticaja okolnog terena ili načina korišćenja površine (specijalno konstruisane table, kod Vicke i sar. 2012 ili krovne površine kod Egodawattaa i sar. 2008).

Moguće objašnjenje za velike količine materija na ispitivanim površinama može biti da su obe površine, a naročito asfaltna, pod uticajem spiranja sa okolnih zelenih površina, tako da deo sakupljenih materija na površini potiče i od erozije okolnog zemljišta.

### ***5.5.2. Nove funkcije akumulisanja zagađenja L-P, L-E i LIN***

Testirane su nove funkcije akumulisanja zagađenja koje uvažavaju da akumulisanje zagađenja na nepropusnoj površini prati linearni trend kroz vreme, dok se uklanjanje zagađenja predstavlja posebnom funkcijom zavisnom od vremena. Ovim je pokušano da se razdvoje i kvantifikuju pojave ukupnog (bruto) akumulisanja materija na površini i

pojava uklanjanja, ili nestajanja zagađenja sa razmatrane površine. Bruto dnevni priraštaj akumuliranih materija na površini se odvija stalno i prvenstveno zavisi od kvaliteta i sastava atmosfere, intenziteta i udaljenosti okolnog saobraćaja i drugih faktora, i za jednu istu lokaciju tokom kraćeg vremenskog perioda se može smatrati da je približno konstantan, te je stoga bruto priraštaj zagađenja kroz vreme linearna funkcija. Sa druge strane, zagađenja akumulirana na površini se stalno smanjuju usled odnošenja vetrom, razgradnje i drugih procesa.

U ovom istraživanju ispitane su sledeće nove funkcije - modeli akumuliranja, kako bi se utvrdilo koliko dobro opisuju akumuliranje različitih parametara zagađenja na asfaltu i betonu u julu 2013. godine:

**L-P** – funkcija koja ima linearni član bruto priraštaja zagađenja a uklanjanje zagađenja se opisuje stepenom funkcijom:

$$B = C_{4b} + C_{5b} \cdot t - C_{6b} \cdot t^{C_{6b}}$$

gde su:

- $B$  - količina zagađenja na površini nakon vremena  $t$  (masa/površina),
- $C_{4b}$  – početna količina zagađenja (za  $t=0$ ) na površini (masa/površina),
- $C_{5b}$  – bruto dnevni priraštaj zagađenja (masa/vreme/površina),
- $C_{6b}$  – koeficijent (eksponent) uklanjanja zagađenja,
- $t$  – vreme (dani),

**L-E** – funkcija koja ima linearni član bruto priraštaja zagađenja a uklanjanje zagađenja se opisuje stepenom funkcijom:

$$B = C_{4b} + C_{5b} \cdot T - C_{6b} \cdot e^{C_{6b} \cdot t}$$

gde  $B$ ,  $t$ ,  $C_{4b}$ , i  $C_{5b}$  imaju isto značenje kao u prethodnoj jednačini, a:

- $C_{6b}$  – koeficijent uklanjanja zagađenja usled razgradnje, odnošenja vetrom i usled drugih faktora (vreme<sup>-1</sup>),
- $t$  – vreme.

**LIN** – linearna funkcija akumuliranja zagađenja:

$$B = C_{4b} + C_{5b} \cdot t$$

gde  $B$ ,  $C_{4b}$ ,  $C_{5b}$  i  $t$  imaju ista značenja kao i u prethodno opisanim funkcijama

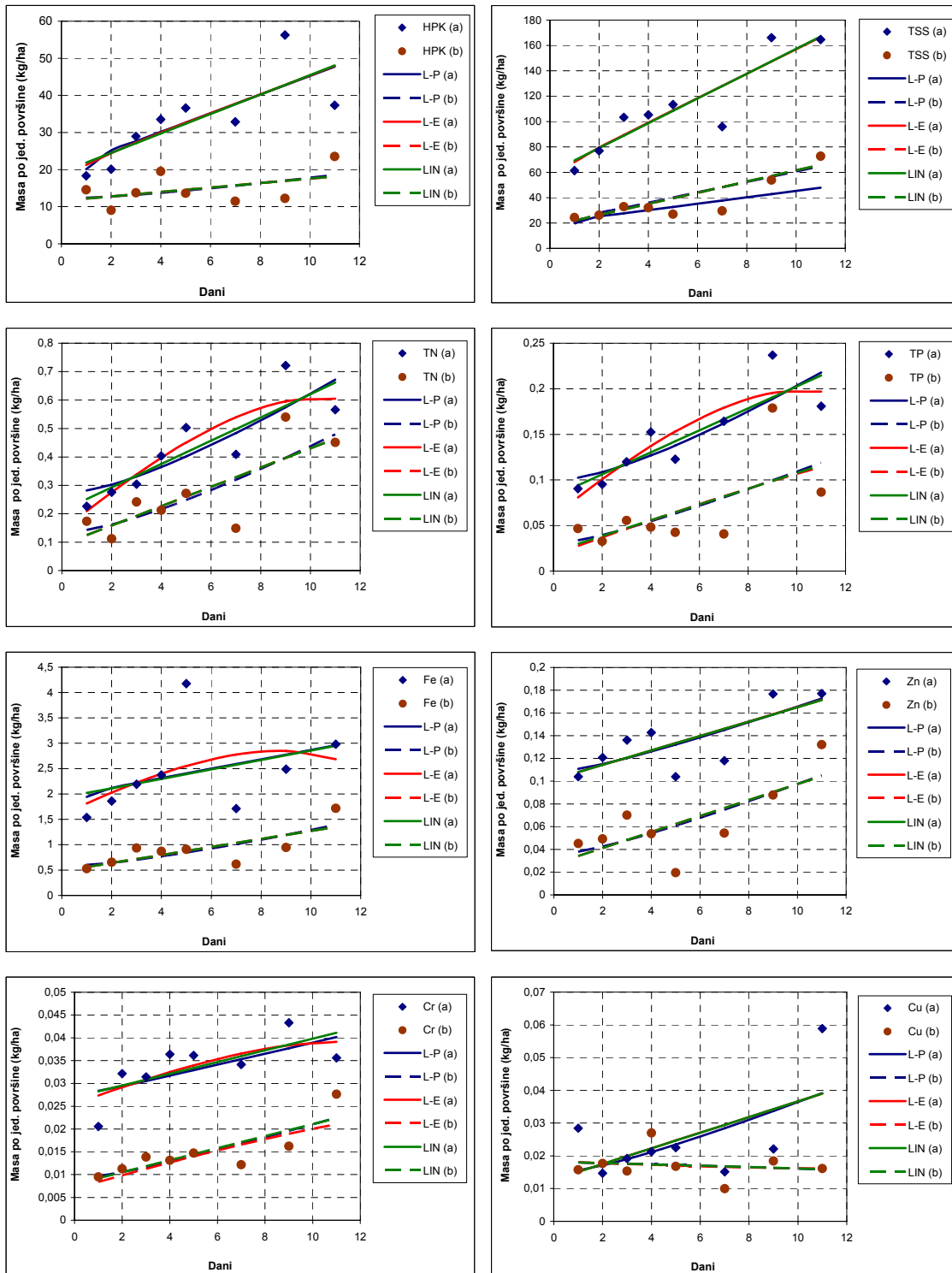
Za rezultate merenja uzorka Serije III određeni su empirijski parametri  $C_{4b}$ ,  $C_{5b}$  i  $C_{6b}$  minimizacijom sume kvadrata razlika između izračunatih vrednosti po navedenim modelima akumuliranja i merenih podataka, korišćenjem Excel Solver-a (Microsoft

Excel 2007). Dobljene vrednosti parametara, zajedno sa sumom kvadrata razlika ( $\text{Sum } R^2$ ) su date u tabeli 5-14.

Tabela 5-14. Empirijski koeficijenti  $C_{4b}$ ,  $C_{5b}$ ,  $C_{6b}$  i suma kvadrata razlika ( $\text{Sum } R^2$ ) za funkcije akumulisanja zagađenja: L-E, L-P i LIN

	ASFALT				BETON			
	Sum $R^2$	$C_{4b}$	$C_{5b}$	$C_{6b}$	Sum $R^2$	$C_{4b}$	$C_{5b}$	$C_{6b}$
<b>HPK (kg/ha)</b>								
L-E	374,28	19,907	2,546	-0,754	120,79	11,562	0,600	-8,036
L-P	371,18	20,113	2,513	-322,035	117,40	12,420	4,155	0,940
LIN	384,77	19,253	2,617		120,79	11,558	0,601	
<b>TSS (kg/ha)</b>								
L-E	1685,96	60,740	9,625	-1,400	537,96	17,458	4,407	-10,373
L-P	1626,28	63,104	9,321	-1290,05	590,05	19,497	4,117	-19,115
LIN	1719,24	59,617	9,763		537,96	17,462	4,407	
<b>TN (kg/ha)</b>								
L-E	0,03885	0,225	0,085	0,170	0,06021	0,125	0,034	0,000
L-P	0,05484	0,282	0,901	0,983	0,05716	0,144	0,231	0,941
LIN	0,04753	0,211	0,041		0,06021	0,091	0,034	
<b>TP (kg/ha)</b>								
L-E	0,00349	0,086	0,026	0,172	0,00989	0,029	0,011	0,097
L-P	0,00488	0,102	0,465	0,990	0,00968	0,034	0,014	0,661
LIN	0,00431	0,082	0,012		0,00985	0,021	0,009	
<b>Fe (kg/ha)</b>								
L-E	4,08544	1,874	0,281	0,190	0,42328	0,563	0,079	0,000
L-P	4,21920	1,943	0,093	-2,698	0,39639	0,604	2,218	0,986
LIN	4,30534	1,927	0,093		0,42328	0,484	0,079	
<b>Zn (kg/ha)</b>								
L-E	0,00255	0,108	0,006	0,003	0,00376	0,034	0,007	0,000
L-P	0,00248	0,111	0,010	0,649	0,00345	0,038	0,012	0,697
LIN	0,00255	0,102	0,006		0,00376	0,027	0,007	
<b>Cr (kg/ha)</b>								
L-E	0,00012	0,028	0,002	0,162	0,00008	0,009	0,002	0,118
L-P	0,00015	0,028	0,001	0,204	0,00007	0,010	0,002	0,628
LIN	0,00015	0,027	0,001		0,00007	0,008	0,001	
<b>Cu (kg/ha)</b>								
L-E	0,00094	0,015	0,002	0,000	0,00015	0,018	0,000	0,154
L-P	0,00087	0,016	0,005	0,737	0,00015	0,018	0,000	0,519
LIN	0,00094	0,013	0,002		0,00015	0,018	0,000	

Na narednim dijagramima na slici 5-4 su prikazani podaci merenja za asfaltne (a) i betonske (b) površine, kao i fitovane krive prema novim funkcijama L-P, L-E i LIN sa koeficijentima iz tabele 4-14.



Slika 5-4. Dijagrami merenih vrednosti i funkcija L-P, L-E i LIN, za parametre u uzorcima sa asfaltiranog parkinga (a) i sa betonskog trotoara (b)

Sa dijagrama se jasno uočava da je je dominantan trend za praktično sve razmatrane parametre linearan, i da je prisutna veoma mala zakrivljenost dijagrama,

odnosno da rezultati ukazuju da tokom perioda merenja još nije došlo do zasićenja površine. Ovo je naročito izraženo za rezultate za ispitivanje uzoraka sa asfalta.

Ako se posmatraju sume kvadrata odstupanja, kao mera saglasnosti aproksimativnih funkcija i merenih rezultata, poredeći funkcije POW, EXP i SAT sa jedne strane, i nove funkcije L-E, L-P i LIN sa druge strane, za uzorke sa asfalta nova funkcija L-P daje najbolja slaganje za TSS, Zn i Cu. Za preostale parametre, najbolja slaganja daju ranije opisane funkcije POW (TN, TP), EXP (Fe, Cr) i SAT (HPK). Sa druge strane, za rezultate merenja uzoraka sa betona, bolja slaganja sa merenjima uvek imaju nove funkcije, pri čemu najčešće najbolje slaganje sa rezultatima merenja daje funkcija L-P, odnosno kombinacija linearne i stepene funkcije (tabele 5-13 i 5-14).

Aproksimativne funkcije za Cu pokazuju znatna odstupanja od oblika ovih krivih za druge parametre, što je posledica velikog rasipanja merenih rezultata, tako da uspostavljanje trendova nije pouzdano.

U tabeli 5-15 su date vrednosti bruto dnevnih priraštaja zagađenja, prema izračunatim parametrima funkcije L-E. Izostavljeni su podaci za Cu jer dobijeni rezultati ukazuju da nema priraštaja ovog parametra kroz vreme.

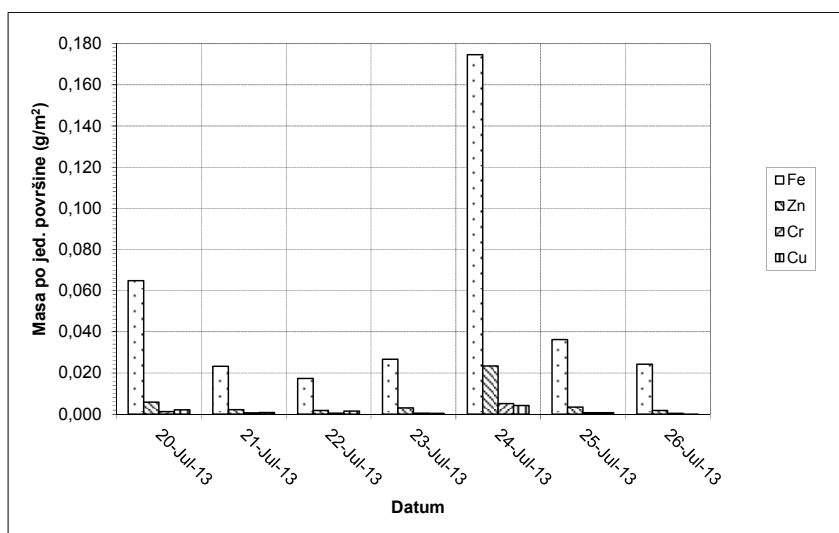
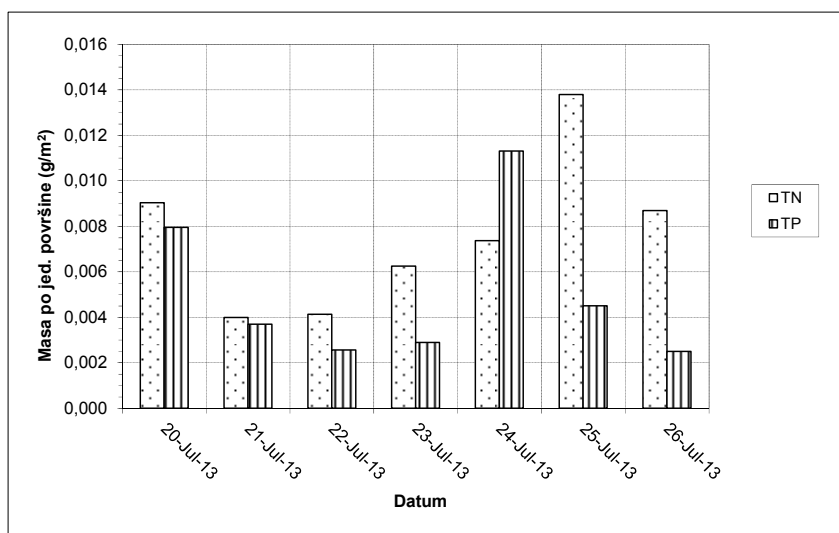
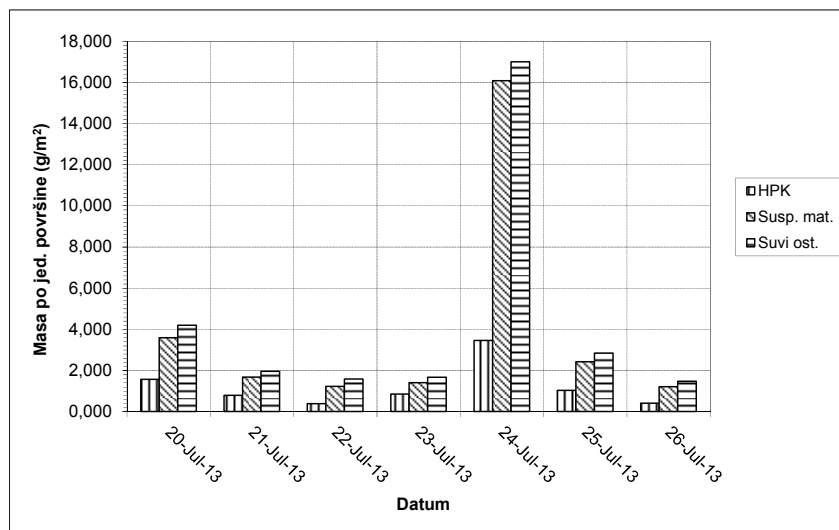
Tabela 5-15. Bruto dnevni priraštaj pojedinih parametra, prema funkciji L-E.

Parametar	Bruto dnevni priraštaj $C_{5b}$ (kg/ha/dan)	
	Asfalt	Beton
HPK	2,546	0,600
TSS	9,625	4,407
TN	0,085	0,034
TP	0,026	0,011
Fe	0,281	0,079
Zn	0,0064	0,0070
Cr	0,0023	0,0017

## 5.6. DNEVNI PRIRAŠTAJI MATERIJNA NA POVRŠINI, SERIJE IV I V

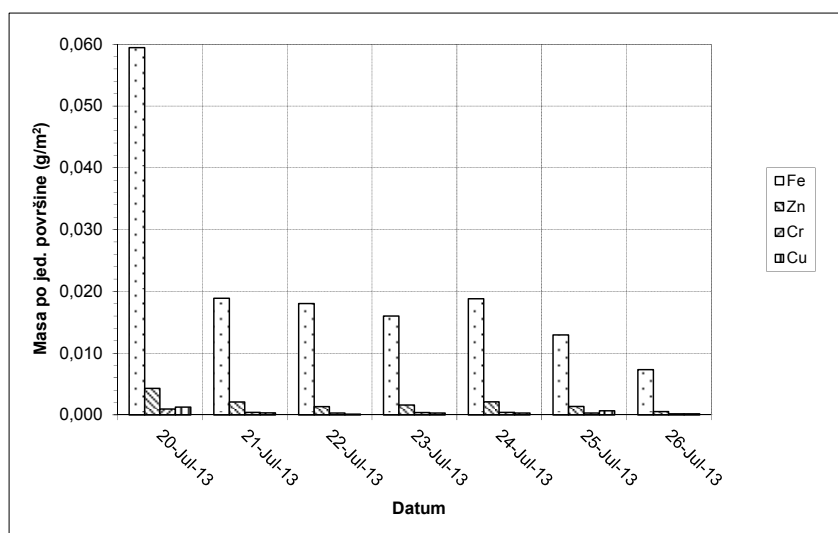
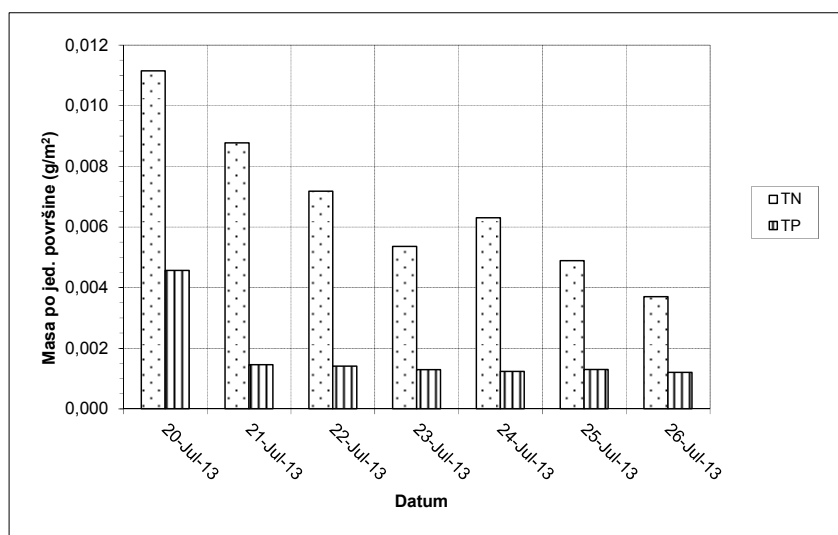
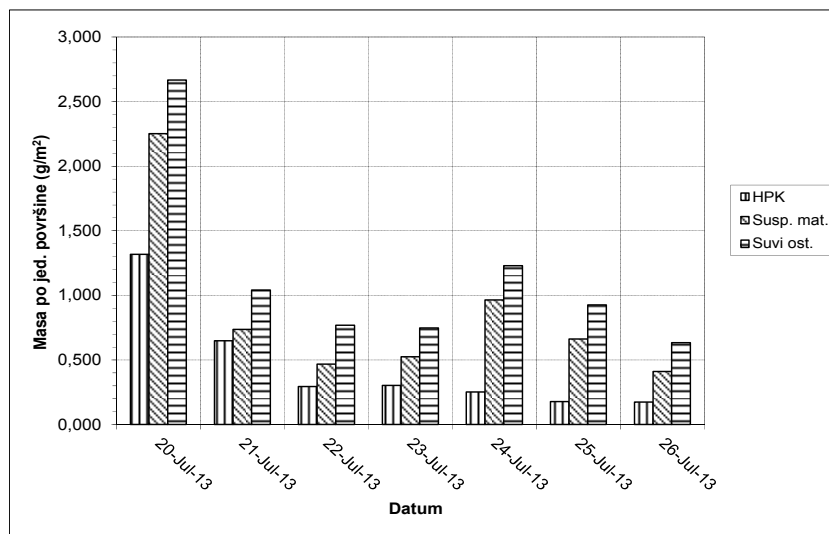
### 5.6.1. Količine zagađenja prema rezultatima merenja uzoraka Serije IV i V

Na narednim slikama su prikazane količine materija po jedinici ispitivanih nepropusnih površina, na osnovu rezultata merenja u uzorcima Serije IV iz jula 2013. (slike 5-5 i 5-6) i Serije V iz oktobra 2013. godine (slike 5-7, 5-8, 5-9).

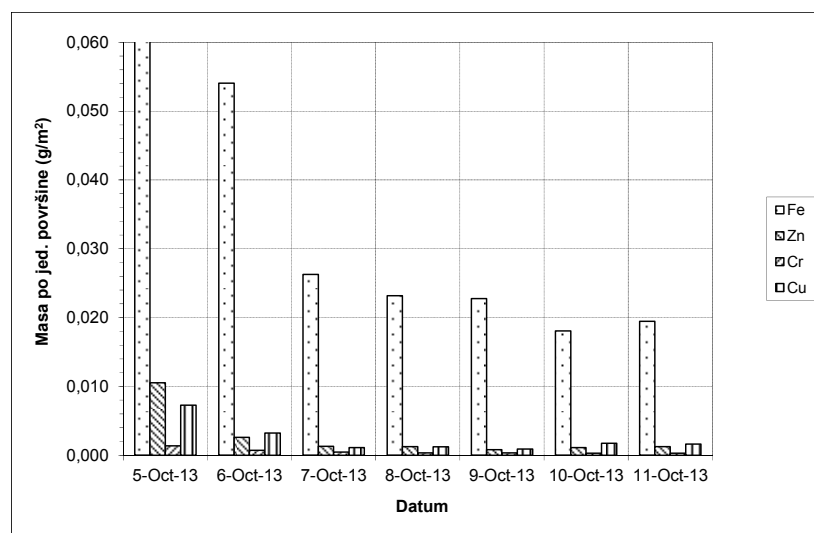
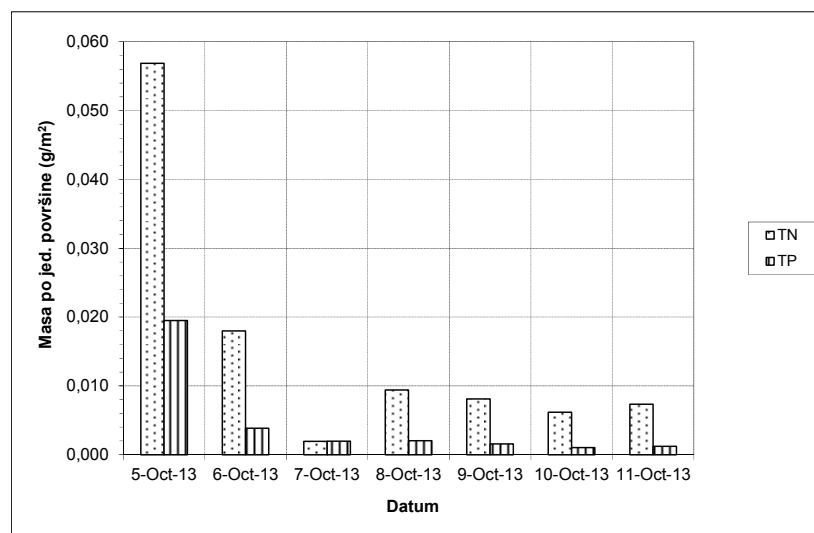
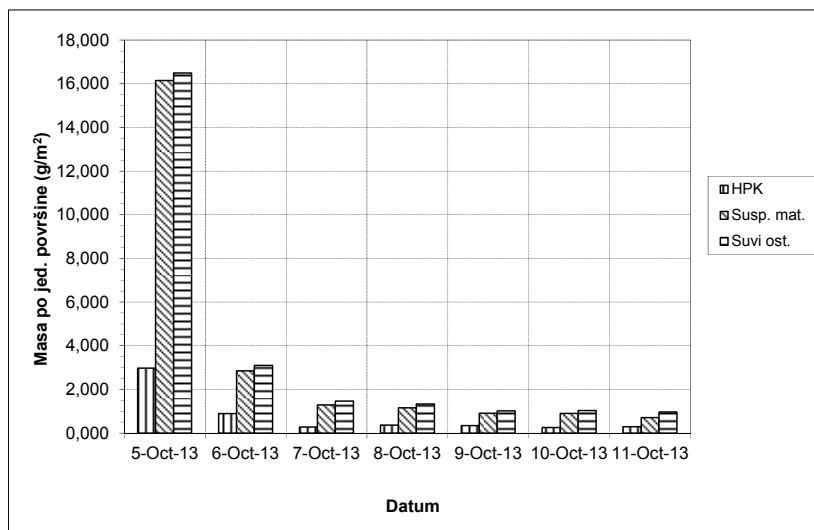


Slika 5-5. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane asfaltne površine parkinga prema merenjima dnevnog priraštaja zagađenja, Serija IV (jul 2013.)

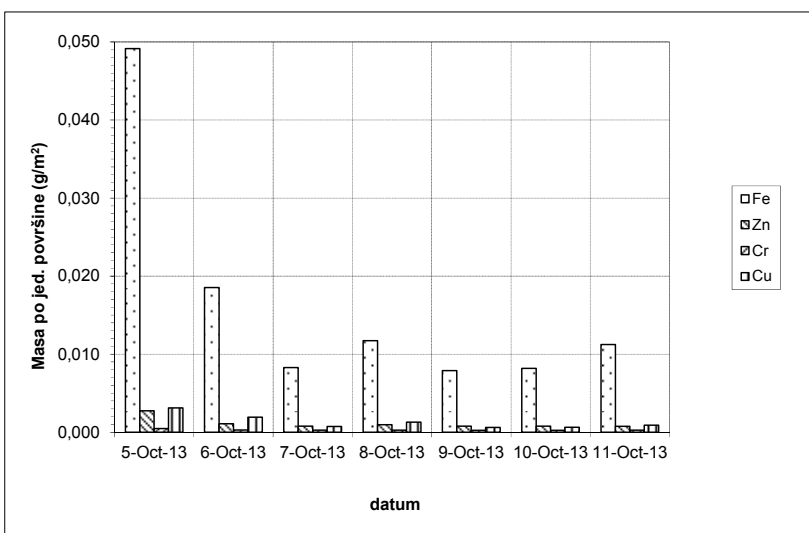
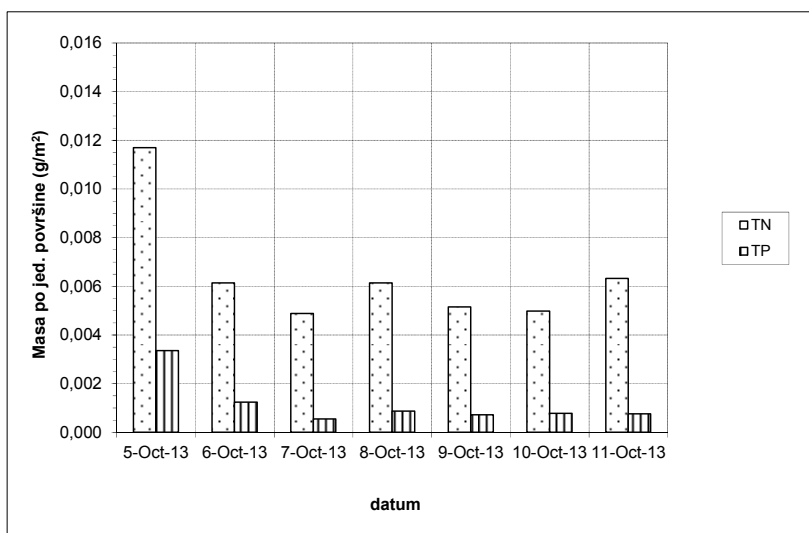
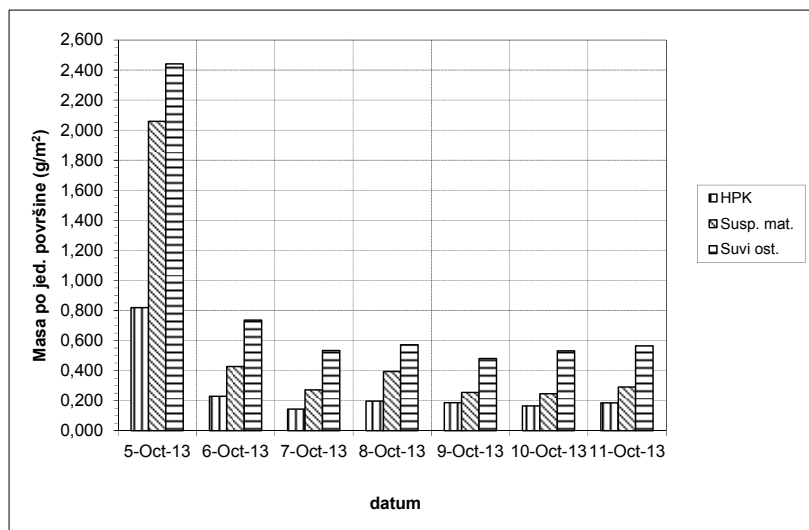




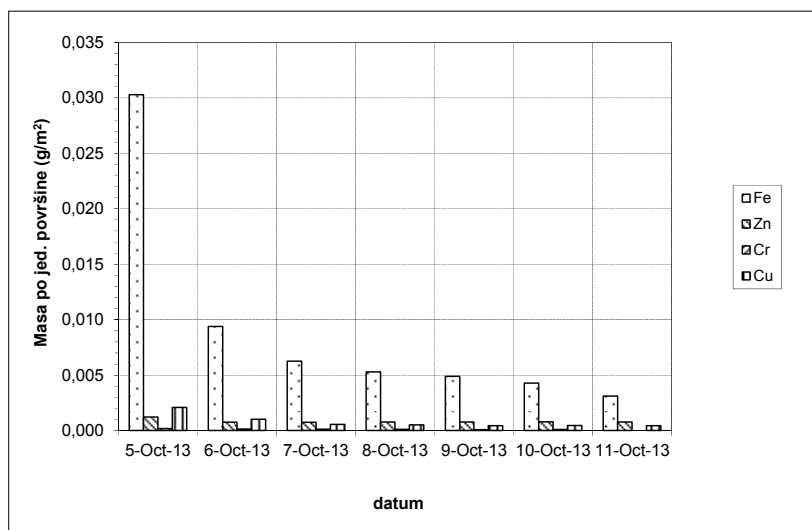
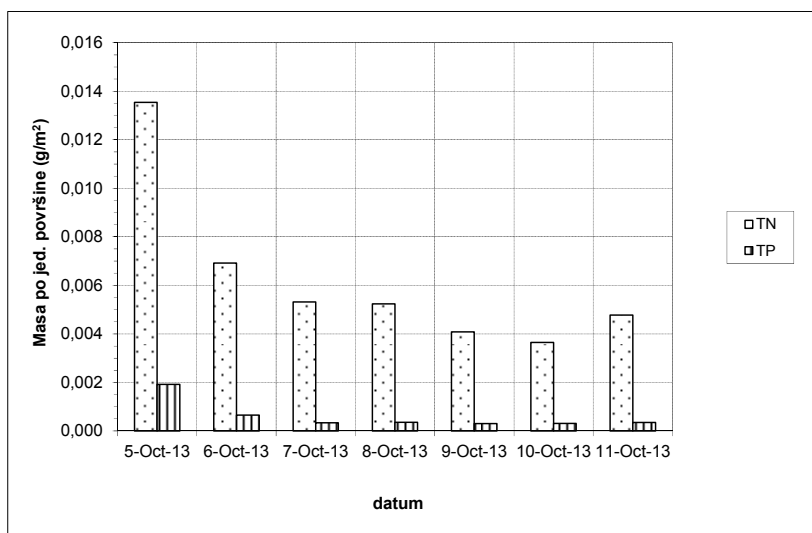
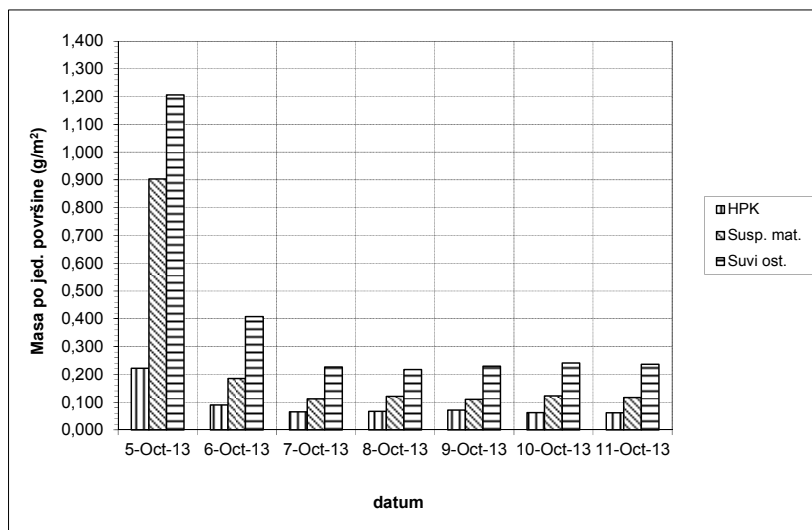
Slika 5-6. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane površine trotoara od betonskih ploča prema merenjima dnevnog priraštaja zagađenja, Serija IV (jul 2013.)



Slika 5-7. Masa merenih parametrov po jedinici ispitivane asfaltne površine parkinga prema merenjima dnevnog priraštaja zagađenja, Serija V (oktobar 2013.)



Slika 5-8. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane površine trotoara od betonskih ploča prema merenjima dnevnog priraštaja zagađenja, Serija V (oktobar 2013.)



Slika 5-9. Masa merenih parametara po jedinici ispitivane površine kamenog podesta prema merenjima dnevnog priraštaja zagađenja, Serija V (oktobar 2013.)

### 5.6.2. Diskusija rezultata i određivanje dnevnih priraštaja zagađenja

Rezultati pokazuju da se masa ispitivanih zagađenja po jedinici ispitivane površine kroz vreme vrlo brzo smanjuje, tako da već posle dva do tri dana masa svakog parametara po jedinici površine teži nekoj graničnoj vrednosti, koja u stvari predstavlja neto dnevni priraštaj zagađenja, odnosno ukupno akumuliranu masu tog parametra umanjenu za gubitak mase usled razgradnje, odnošenja vetrom i drugih razloga. Ovo važi ako se zahvatanje uzoraka vrši uvek u intervalima od približno 24 sata, sa iste površine i koristeći istu tehniku uzorkovanja materijala sa površina.

Nešto modifikovana eksponencijalna jednačina akumulisanja zagađenja (EXP), koja se koristi u modelu "MIKE Urban" (DHI, Danska), uvodi u jednačinu koeficijent  $B_{dn}$  ( $\text{g/m}^2/\text{dan}$ ), koji predstavlja ukupno dnevno (bruto) akumulisanje zagađenja, ali takođe i koeficijent  $C_{2u}$  ( $\text{dan}^{-1}$ ) koji predstavlja i stopu uklanjanja zagađenja sa površine usled razgradnje, odnošenja vetrom i iz drugih razloga:

$$B = \frac{B_{dn}}{C_{2u}} (1 - e^{-C_{2u} \cdot t})$$

Tokom zahvatanja uzoraka Serije IV u drugoj polovini jula meseca 2013. godine izvođenje građevinskih radova u sred kampanje uzorkovanja je dovelo do naglog skoka zagađenja, naročito na asfaltu, što je očigledno iz priloženih rezultata (slike 5-4 i 5-5). Zbog ovog poremećaja, ovi rezultati ispitivanja mogu se koristiti za orijentacionu procenu dnevnih neto količina priraštaja parametara tokom perioda uzorkovanja, i koji su dati u tabeli 5-16.

Tabela 5-16. Procenjene vrednosti neto dnevnog priraštaja pojedinih parametara, prema ispitivanjima uzoraka Serije IV i izračunati parametar bruto priraštaja  $B_d$

Parametar	Procenjen neto dnevni priraštaj (kg/ha/dan)		$B_{dn}$ - Bruto dnevni priraštaj (kg/ha/dan)	
	Asfalt	Beton	Asfalt	Beton
HPK	4,000	1,800	15,707	31,869
TSS	12,000	4,100	48,175	9,021
TN	0,060	0,040	0,167	0,066
TP	0,025	0,012	0,064	0,016
Fe	0,240	0,100	1,958	0,420
Zn	0,020	0,014	0,159	0,013
Cr	0,005	0,003	0,030	0,006

Pored ovih procenjenih vrednosti, u istoj tabeli se daju uporedo i vrednosti za veličinu  $B_d$  bruto dnevno akumulisanog zagađenja, određenih prema gornjoj jednačini, za dobijene vrednosti koeficijenta  $C_{1b}$  i  $C_{2b}$  za EXP funkciju date u tabeli 5-13 (bez podataka za Cu).

Iz tabele 5-16 se vidi da su izračunate vrednosti bruto dnevnog priraštaja zagađenja ( $B_d$ ) nekoliko puta veće od procenjenih neto dnevnih priraštaja zagađenja iz podataka merenja iz jula 2013. Ovo znači da je razgradnja ili odnošenje zagađenja sa razmatranih nepropusnih površina značajno, i da je ono glavni razlog trendova usporavanja priraštaja zagađenja na urbanim nepropusnim površinama. Ipak, prema istraživanjima Mourad-a i saradnika (2005), za pouzdanije i preciznije određivanje veličine koeficijenta  $B_{dn}$  i  $C_{2u}$  potrebno je raspolagati velikim fondom merenja na slivu i sprovesti postupke kalibracije modela akumulisanja i spiranja zagađenja. Iz izračunatih bruto priraštaja iz tabele 5-15 u prethodnom poglavlju vidi se da su procenjeni bruto priraštaji iz tabele 4-16 znatno veći, što takođe ukazuje na kompleksnost pojave akumulisanja, i potrebe za dodatnim ispitivanjima u cilju preciznijeg definisanja ovih veličina.

Za potrebe detaljnije analize podataka i određivanja dnevnog prinosa zagađenja korišćeni su podaci merenja priraštaja zagađenja iz oktobra, kada je sukcesivno 7 dana u isto vreme dana uziman po jedan uzorak sa asfaltiranog parkinga (mesto uzorkovanja A1), betonskog trotoara (mesto uzorkovanja S1) i kamenog podesta (mesto uzorkovanja K).

Spiranje zagađenja sa površina terena tokom padavina je detaljno objašnjeno u poglavljima 2 i 4, i date su i jednačine kojima se matematički opisuje proces spiranja zagađenja, najčešće u formi direktne zavisnosti količine spranog materijala od protoka podignutog na neki stepen (James i sar. 2010, Hvitved-Jacobsen i sar. 2010).

Međutim ove jednačine opisuju proces spiranja zagađenja tokom kiše, i nisu direktno primenjive na rezultate sprovedenih ispitivanja priraštaja zagađenja. Ipak, ideja o eksponencijalnoj zavisnosti odnošenja zagađenja sa površine je testirana na rezultatima ispitivanja. Kako su uzorci zahvatani u pravilnim razmacima od 24 h (sa varijacijom  $\pm 15$  min), uvek koristeći istu tehniku i istu količinu vode za uzorkovanje, ispitana je sledeća jednačina za aproksimaciju zavisnosti količine zahvaćenih materija (parametara, zagađenja) sa površine od vremena:

$$M = (C_{t=0} - C_t) \cdot C_{t=0}^t + C_{dn}$$

gde su:

- $M$  – količina zahvaćenih materija sa jedinice površine (kg/ha),
- $C_{t=0}$  – ukupna količina materija zahvaćena u prvom uzorkovanju,
- $C_{dn}$  – dnevni neto priraštaj zagađenja, prosečni (kg/ha),
- $t$  - vreme u danima.

Ovom jednačinom se količine materija koje se zahvataju uzorkovanjem sa površine tokom vremenskog perioda rastavljaju na dva dela:

- prvi sabirak je deo postojećih sakupljenih materija koje postoje na površini i koje se eksponencijalnim zakonom smanjuju sa svakim uzorkovanjem, odnosno kroz vreme,
- drugi sabirak predstavlja dnevni neto priraštaj materija po jedinici površine.

Parametri  $C_{t=0}$  i  $C_{dn}$  su određeni minimizacijom sume kvadrata razlika između izračunatih vrednosti i merenih podataka, korišćenjem Excel Solver-a (Microsoft Excel 2007). Dobijene vrednosti parametara, zajedno sa sumom kvadrata razlika (Sum  $R^2$ ) su dati u tabeli 5-17.

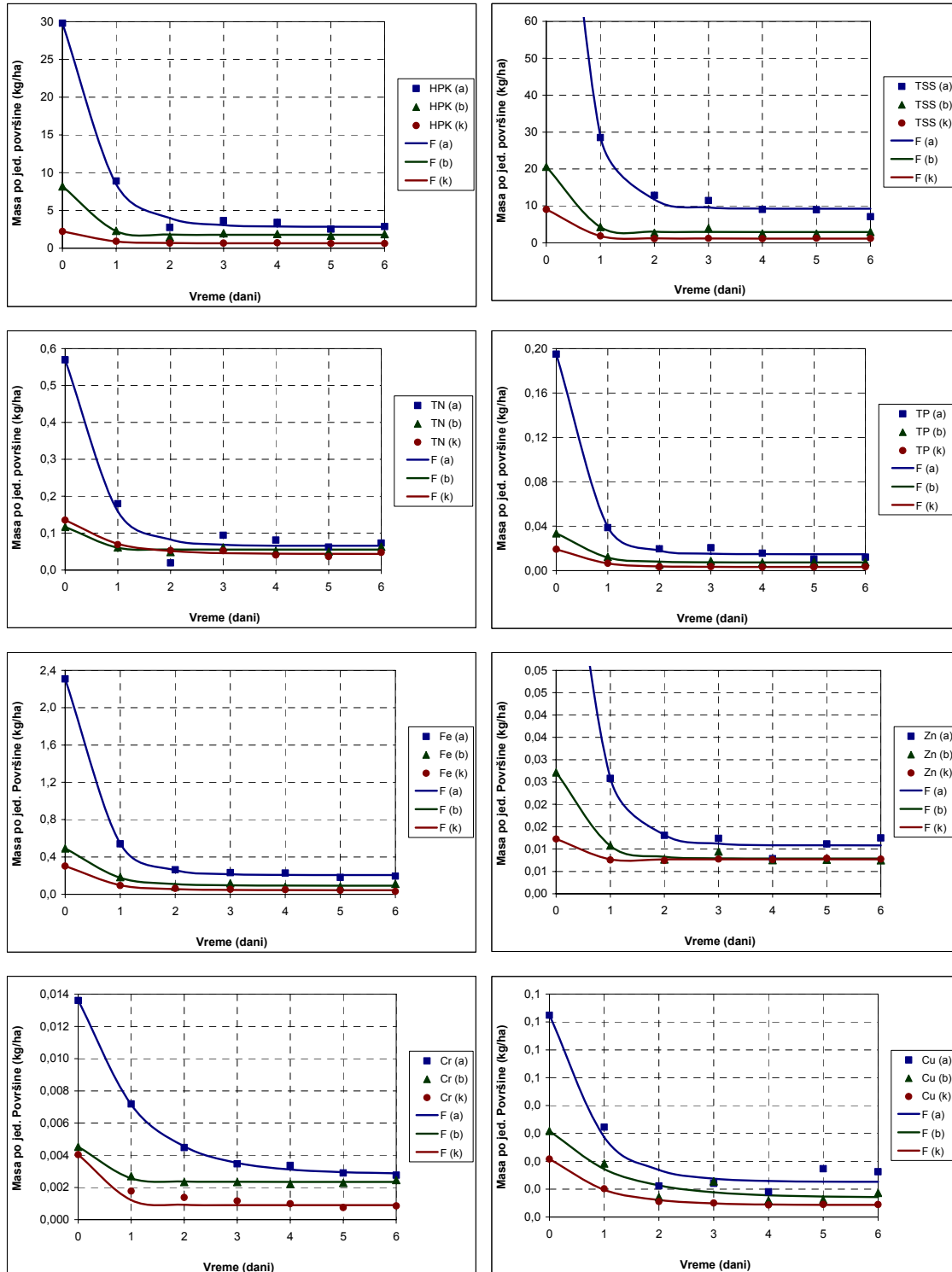
Ako uporedimo izračunate vrednosti za dnevne neto priraštaje zagađenja  $C_{dn}$ , sa ranije procenjenim vrednostima neto dnevnog priraštaja zagađenja prema funkciji akumulisanja zagađenja L-E (Tabela 5-15), može se zaključiti da se ove vrednosti za asfaltne površine relativno dobro slažu: relativna razlika između vrednosti dnevnog priraštaja za HPK je 10,5%, za TSS je 4,1% za TN i Cr je po 23,0%, za Fe je 26,7%, a za preostale parametre je između 34 i 69%. Međutim, za betonske površine razlike u dobijenim vrednostima priraštaja zagađenja na opisana dva načina su znatno veće.

Tabela 5-17. Koeficijenti  $C_{t=0}$  i  $C_{dn}$  i suma kvadrata razlika ( $\sum R^2$ ) za eksponencijalnu funkciju uklanjanja zagađenja uzorkovanjem

	<b>Sum <math>R^2</math></b>	<b><math>C_{t=0}</math></b>	<b><math>C_{dn}</math> (kg/ha)</b>
<b>HPK (mg/m<sup>2</sup>)</b>			
Asfalt	2,4710	0,2091	<b>2,8121</b>
Beton	0,2039	0,0745	<b>1,7651</b>
Kamen	0,0076	0,1545	<b>0,6497</b>
<b>TSS (mg/m<sup>2</sup>)</b>			
Asfalt	9,7595	0,1290	<b>9,2331</b>
Beton	1,4777	0,0764	<b>2,9078</b>
Kamen	0,0193	0,0865	<b>1,1537</b>
<b>TN (mg/m<sup>2</sup>)</b>			
Asfalt	0,0054	0,1862	<b>0,0655</b>
Beton	0,0002	0,0857	<b>0,0550</b>
Kamen	0,0001	0,3018	<b>0,0434</b>
<b>TP (mg/m<sup>2</sup>)</b>			
Asfalt	0,0001	0,1364	<b>0,0147</b>
Beton	0,0000	0,1659	<b>0,0073</b>
Kamen	0,0000	0,1994	<b>0,0032</b>
<b>Fe (mg/m<sup>2</sup>)</b>			
Asfalt	0,0015	0,1602	<b>0,2060</b>
Beton	0,0020	0,2117	<b>0,0916</b>
Kamen	0,0003	0,2074	<b>0,0441</b>
<b>Zn (mg/m<sup>2</sup>)</b>			
Asfalt	0,0000	0,1592	<b>0,0108</b>
Beton	0,0000	0,1464	<b>0,0079</b>
Kamen	0,0000	-0,0020	<b>0,0077</b>
<b>Cr (mg/m<sup>2</sup>)</b>			
Asfalt	0,0000	0,3997	<b>0,0028</b>
Beton	0,0000	0,1000	<b>0,0023</b>
Kamen	0,0000	0,1000	<b>0,0009</b>
<b>Cu (mg/m<sup>2</sup>)</b>			
Asfalt	0,0001	0,2681	<b>0,0126</b>
Beton	0,0000	0,4251	<b>0,0070</b>
Kamen	0,0000	0,3317	<b>0,0043</b>



Na dijagramima na slici 5-10 prikazani su rezultati analize uzoraka Serije V zahvaćenih sa asfaltne (a) i betonske (b) i kamene (k) površine, kao i fitovane krive prema gore navedenom funkcijom sa parametrima iz tabele 5-17.



Slika 5-10. Komparativna analiza fitovanih krivih i rezultata merenja uzoraka Serije V zahvaćenih sa asfaltiranog parkinga (a), betonskog trotoara (b) i kamena (k)

Kao što je navedeno, i kao što se vidi sa slike 5-10, koeficijent  $C_{dn}$  predstavlja vrednost kojoj funkcija teži asimptotski. Kako je računato sa količinama materija izraženim u kg/ha, odatle i vrednosti koeficijenta  $C_{dn}$  imaju jedinice kg/ha.  $C_{dn}$  se može razumeti i kao prosečan neto dnevni priraštaj materija po jedinci površine u toku razmatranog perioda merenja.

Iz rezultata merenja je jasno uočljiva i izražena razlika u neto dnevnim priraštajima (količinama materija koje se zadržavaju na različitim tipovima površina za jedan dan), gde je za sve merene parametre najveći dnevni priraštaj na asfaltu a najmanji na kamenu. Ove razlike su najveće za suspendovane materije, ukupan fosfor i gvožđe, gde razmere koeficijenata  $C_{dn}$  iznose 8,0, 4,6 i 4,7, respektivno. Najmanje razlike su za ukupan azot i cink, gde ova razmera iznosi samo oko 1,5. Razmera koeficijenta  $C_{dn}$  između betonske i kamene površine su obično bile između 1,5 i 2,5 u korist betonske površine, osim za ukupan azot i cink gde je razmera bila znatno manja.

Sve ovo jasno govori u prilog tvrdnji da akumulisanje zagađenja na ispitivanim lokacijama zavisi od karakteristika površine, gde veća hrapavost znači veću mogućnost za zadržavanje zagađenja i stoga veću akumulaciju zagađenja. Asfaltna površina je i pod uticajem spiranja sa okolnih površina uključujući i zelene površine, tako da deo materijala deponovanih na asfaltnoj površini može poticati i od prirodnih materijala koji su odneti erozijom sa okolnog zemljišta. Ovi materijali se zatim prenose i na okolne betonske površine saobraćajem, vetrom ili oticajem.

Način korišćenja površine je takođe od značaja, gde površine pod motornim saobraćajem (asfalt) su zagađenije od površina za pešake koje se povremeno koriste za parkiranje vozila (beton), a najmanje zagađenja je na kamenoj površini koja nema direktnog kontakta ni sa vozilima ni pešacima. Stoga, materije koje su izdvojene na kamenu predstavljaju materije koje su se istaložile iz atmosfere, odnosno atmosferski depozit, bez uticaja spiranja sa okolnih površina ili kontakta sa vozilima i pešacima.

Ako se uporede vrednosti neto dnevnih neto priraštaja ispitivanih parametara iz jula i iz oktobra 2013. godine može se zaključiti da je, osim za ukupni azot, neto dnevni priraštaj zagađenja na asfaltu bio veći u julu nego u oktobru (42% veći za HPK, 30% veći za TSS, preko 70% veći za TP, Zn i Cr, i 16.5% za Fe). Za beton su takođe dnevni priraštaji zagađenja veći u julu nego u oktobru, ali te razlike su nešto manje: 2% veće za HPK, 41% veće za TSS, 65% za TP, 9% za Fe, 78% veće za Zn i 29% za Cr. Može se

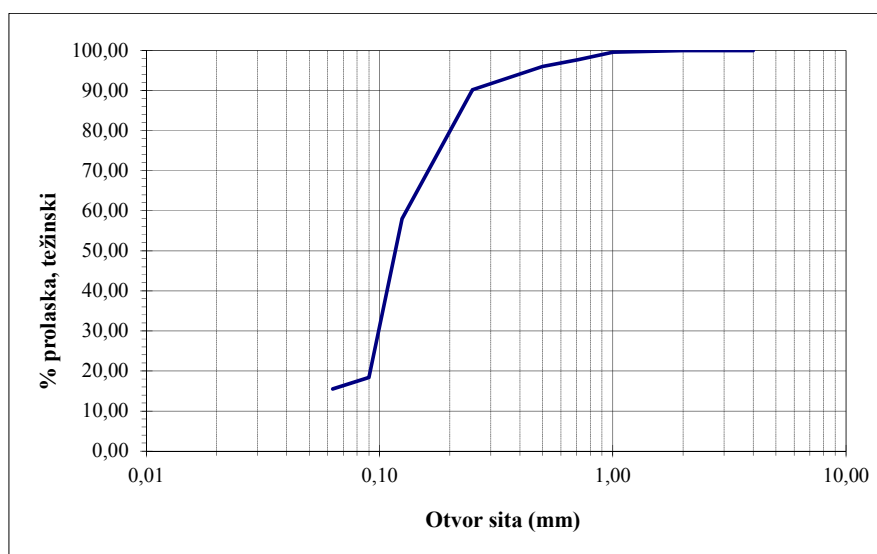
zaključiti da su, za date uslove koji su vladali na eksperimentalnom slivu u Beogradu, neto dnevni priraštaji zagađenja na neprousanim površinama bili veći tokom letnjih meseci nego početkom jeseni 2013. godine, što može ukazati na veću mobilnost zagađenja pri višim temperaturama i nižim vlažnostima vazduha. Neto i bruto dnevni priraštaji zagađenja verovatno zavise i od drugih eksternih faktora, kao što su brzina vetra, intenzitet saobraćaja u okolini i dr., ali za utvrđivanje ovih zavisnosti je potrebno izvršiti dodatna ispitivanja.

## 5.7. ISPITIVANJE ČVRSTE FAZE UZORAKA SA POVRŠINA EKSPERIMENTALNOG SLIVA, SERIJE III I IV

Čvrsta faza uzoraka Serija III i IV je analizirana nizom tehnika. Ispitivana čvrsta faza predstavlja mešavinu uzoraka uzetih na različitim mestima i sa različitih nepropusnih površina (asflat, beton) tako da dobijene rezultate treba tumačiti kao prosečne pokazatelje čvrste faze sa nepropusnih površina izučavanog sliva.

### 5.7.1. Granulometrijska ispitivanja

Granulometrijska kriva izdvojene čvrste faze uzoraka je data na slici 5-10 a u tabeli 5-16 su dati težinski procentulani udeli pojedinih granulometrijskih frakcija. U čvrstoj fazi dominiraju frakcije  $>120 \mu\text{m}$  čiji težinski udeo u uzorku iznosi 81,6%. Tabela 5-18 sadrži podatke o sadržaju nutrijenata i teških metala u pojedinim frakcijama.



Slika 5-11. Granulometrijska kriva ispitivane čvrste faze

Tabela 5-18. Rezultati analiza sadržaja nutrijenata i teških metala u čvrstoj fazi

Oznaka frakcije	S1	S2	S3	S4	S5
$d_o$ ( $\mu\text{m}$ )	<63	63-90	90-125	125-250	>250
% težinski	11,7	3,8	2,9	39,6	42,0
TN (mg/kg)	377	194	354	136	118
TP (mg/kg)	106	136	108	4,4	16
Cr (mg/kg)	31	32	27	8,7	16
Ni (mg/kg)	28	33	29	9,8	20
Cu (mg/kg)	60	55	45	15	11
Zn (mg/kg)	208	238	160	28	46
Fe (mg/kg)	12833	13849	7815	3758	4862
Pb (mg/kg)	44	49	38	7,6	11

### 5.7.2. *Određivanje specifične površine i veličine pora čestica*

Rezultati ukazuju na veoma niske vrednosti specifične površine čestica. Najveća specifična površina je izmerena, u frakcijama S5 i S2 i iznosi samo oko  $2 \text{ m}^2/\text{g}$ . Frakcija S1 ima specifičnu površinu od oko  $1 \text{ m}^2/\text{g}$ , a izmerene vrednosti specifične površine uzoraka S3 i S4 su manje od  $1 \text{ m}^2/\text{g}$ , ali njih treba uzeti sa rezervom jer su dobijene vrednosti u opsegu merne greške instrumenta. Ipak, poređenje među ispitivanim frakcijama je moguće, jer su sve ispitivane pod istim uslovima.

Možemo razlikovati tri tipa pora prema njihovoj veličini (Worch 2012): makropore (prečnik pora  $> 25 \text{ nm}$ ), mezopore ( $1 \text{ nm} - 25 \text{ nm}$ ) i mikropore ( $< 1 \text{ nm}$ ). Raspodela veličina pora (PSD - pore size distribution) kod ispitivanih uzoraka izmerenih niskotemperaturnom adsorpcijom azota je prikazana na slici 5-11. Frakcije S2 i S5 imaju sličnu površinu i bimodalnu raspodelu veličine pora, ali različite frakcije manjih i većih mezopora. Prisustvo malih mezopora prečnika oko  $3 \text{ nm}$  je odgovorno za veću specifičnu površinu ova dva uzorka.

U slučaju frakcije S2, količina manjih mezopora se ne može u potpunosti meriti jer je van mernog opsega, ali njihovo prisustvo u ovom uzorku je evidentno, zajedno sa širokim spektrom većih mezopora prosečnog prečnika  $45 \text{ nm}$ . Frakcija S5 ima dominantan udeo manjih mezopora i veoma mali udeo većih mezopora. Ukupna zapremina pora, izmerena BJH desorpcijom, takođe potvrđuje razliku u prisustvu manjih i većih mezopora u frakcijama S2 i S5, s tim da frakcija S2 sa većom količinom većih mezopora ima veću ukupnu zapreminu pora ( $0,0153 \text{ cm}^3/\text{g}$ ) od frakcije S5 ( $0,0057 \text{ cm}^3/\text{g}$ ), za koju je prethodim ispitivanjem utvrđeno veoma malo prisustvo mezopora.

Niska specifična površina frakcija S3 i S4 je u skladu sa izmerenom širokom monomodalnom raspodelom veličina pora i veoma malom količinom većih mezopora prosečnog prečnika 60 nm. Frakcija S1 ima široku raspodelu veličine monomodalnih pora sa nešto manjim prosečnim prečnikom od oko 45 nm, što je rezultiralo nešto većom specifičnom površinom ove frakcije u odnosu na frakcije S3 i S4. Rezultati su dati u tabeli 5-17.

Kako su ispitivani materijali makroporozni, dodatno su analizirani metodom porozimetrije živom, koja je prikladna metoda za ispitivanje makroporoznih materijala. Rezultati analize živine porozimetrije su dati u tabeli 5-19 i na slici 5-12. Kumulativna zapremina pora merena živinom porozimetrijom je znatno veća od kumulativne zapremine pora merene niskotemperaturnom adsorpcijom azota, što ukazuje na dominantno prisustvo makropora u svim ispitivanim frakcijama.

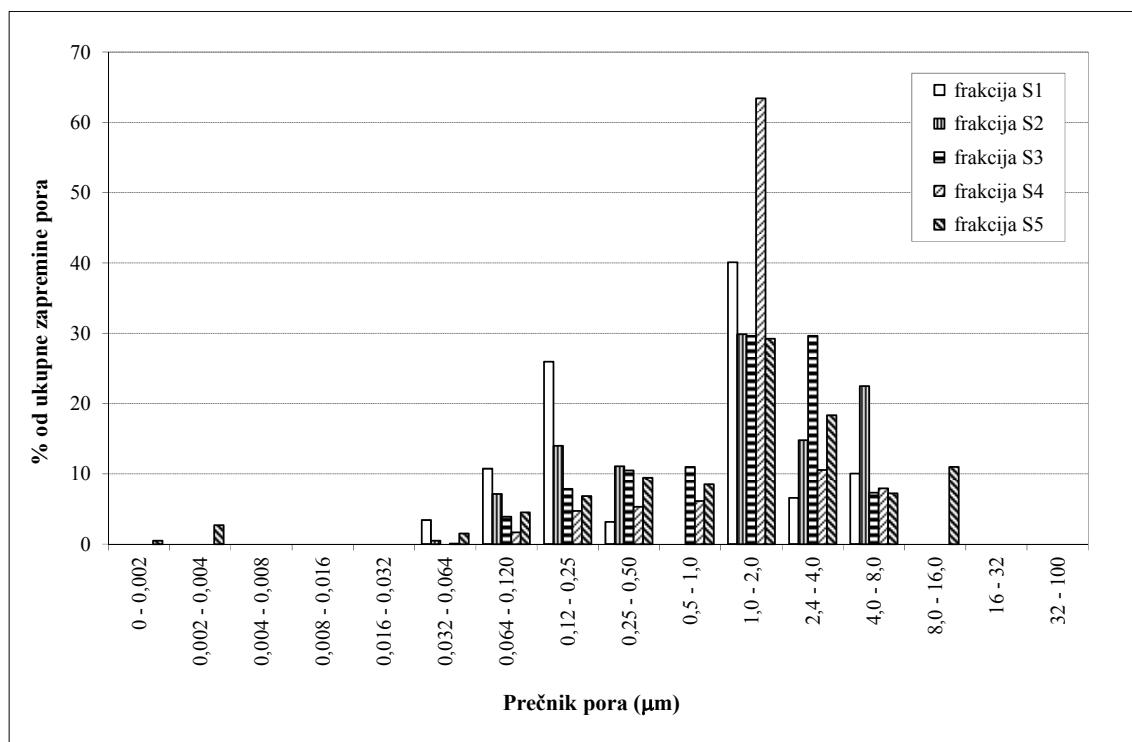
Tabela 5-19. Rezultati analiza specifične površine, veličine i zapremine pora čvrste faze

Frakcija	Niskotemperaturna adsorpcija azota			Porozimetrija sa živom	
	BET spec. površina (m <sup>2</sup> /g)	PSD, prosečan prečnik pora (nm)	BJH desorpcija – uk. zapremina pora (cm <sup>3</sup> /g)	PSD i opseg prečnika pora (μm)	Ukupna zapremina pora (cm <sup>3</sup> /g)
S1	0,94	Monomodalna, 45	0,0125	Bimodalna, 0.12-0,25 i 1-2	0,1211
S2	2,01	Bimodalna, <3 i 45	0,0153	Bimodalna, 0.12-0,25 i 1-8	0,1003
S3	0,48	Monomodalna, 60	0,0081	Monomodalna 1-4	0,1083
S4	0,26	Monomodalna, 60	0,0026	Bimodalna, 0.12-0.25 i 1-2	0,1913
S5	2,10	Bimodalna, 3,5 i 70	0,0057	Monomodalna, 1-4	0,1051

Raspodela veličina pora varira između ispitivanih uzoraka, ali prisustvo pora prečnika u rasponu od 1-2 μm je evidentna u svim ispitivanim frakcijama.

Frakcije S1 i S2 imaju sličnu, široku bimodalnu distribuciju veličine pora, dok uzorak S4 ima usko bimodalnu raspodelu veličine pora sa najvećim udelom makropora prečnika u rasponu od 1 do 2 μm. Uzorci S3 i S5 imaju sličnu široku monomodalnu distribuciju veličine pora.

Iz rezultata obe metode analiza može se zaključiti da su proučavane čvrste frakcije pretežno makroporozni materijali, niske specifične površine.

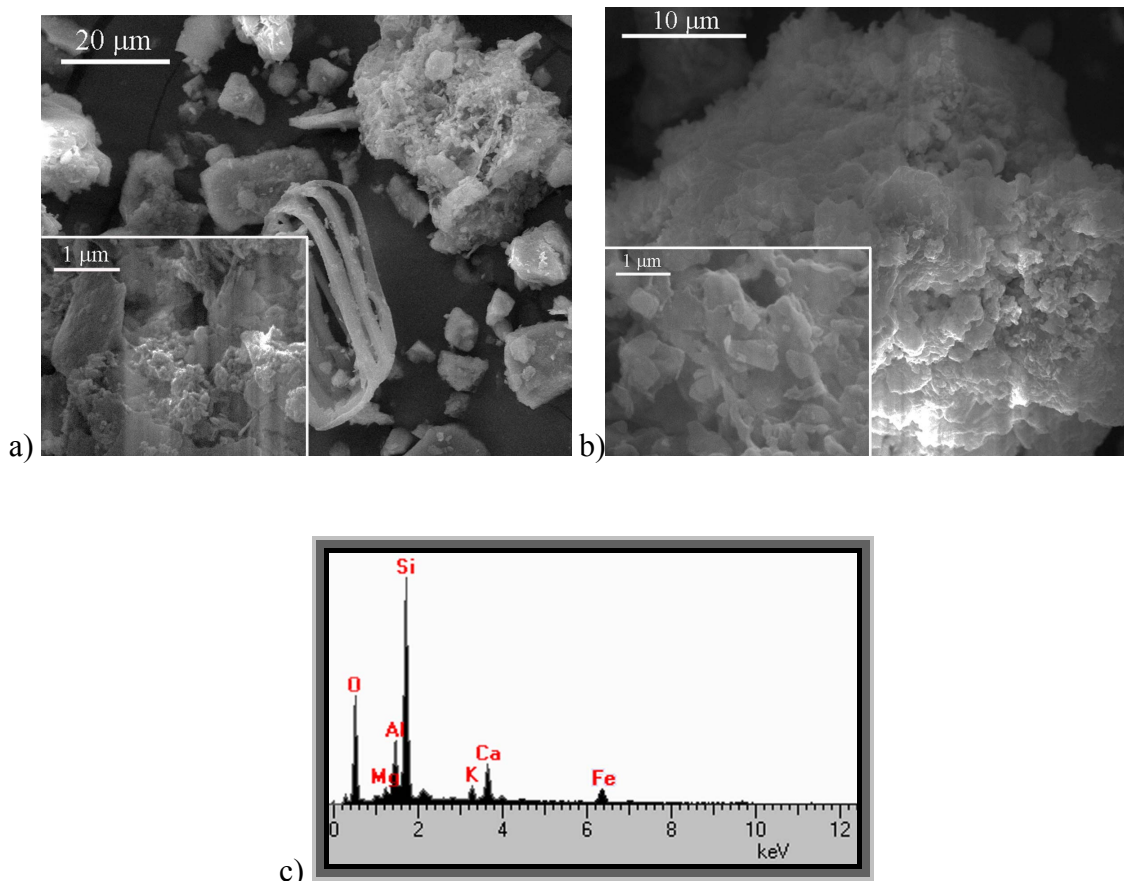


Slika 5-12. Rezultati porozimetrije sa živom: distribucija veličine pora ispitivanih frakcija

### 5.7.3. Morfologija i sastav površine čestica (SEM i EDS analize)

#### SEM i EDS analize

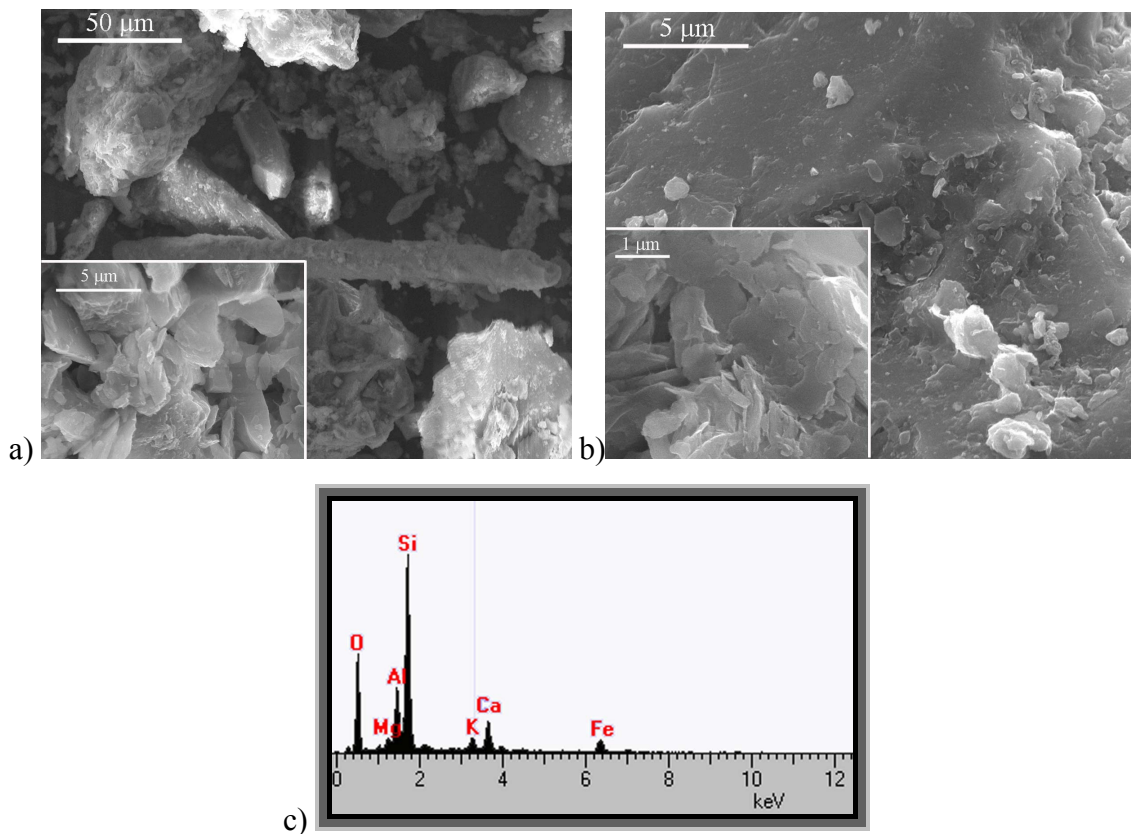
Morfologija data na slikama 5-13 a) i 5-13 b) prikazuje reprezentativne čestice S1 frakcije (čestice prečnika <math><63 \mu\text{m}</math>). Većina vidljivih čestica, <math><30 \mu\text{m}</math> u slučaju slike 5-13 a) i oko <math>50 \mu\text{m}</math> u veličini prikazanoj na slici 5-13 b), su agregati nepravilnog oblika, sastavljeni od manjih čestica nepravilnog, pločastog, sferičnog ili igličastog oblika, u nekim slučajevima nano-dimenzija. Takođe je vidljivo da su fine čestice različitih oblika čvrsto vezane na površini agregata. Jedna netipična spiralno oblikovana čestica je prikazana na slici 5-13a), kao ilustracija da u nekim slučajevima i netipične čestice mogu biti vidljive. EDS spektar frakcije S1 je prikazan na slici 5-13. Prisustvo elemenata O, Mg, Al, Si, K, Ca i Fe potvrđene su u EDS spektru (slika 5-13).



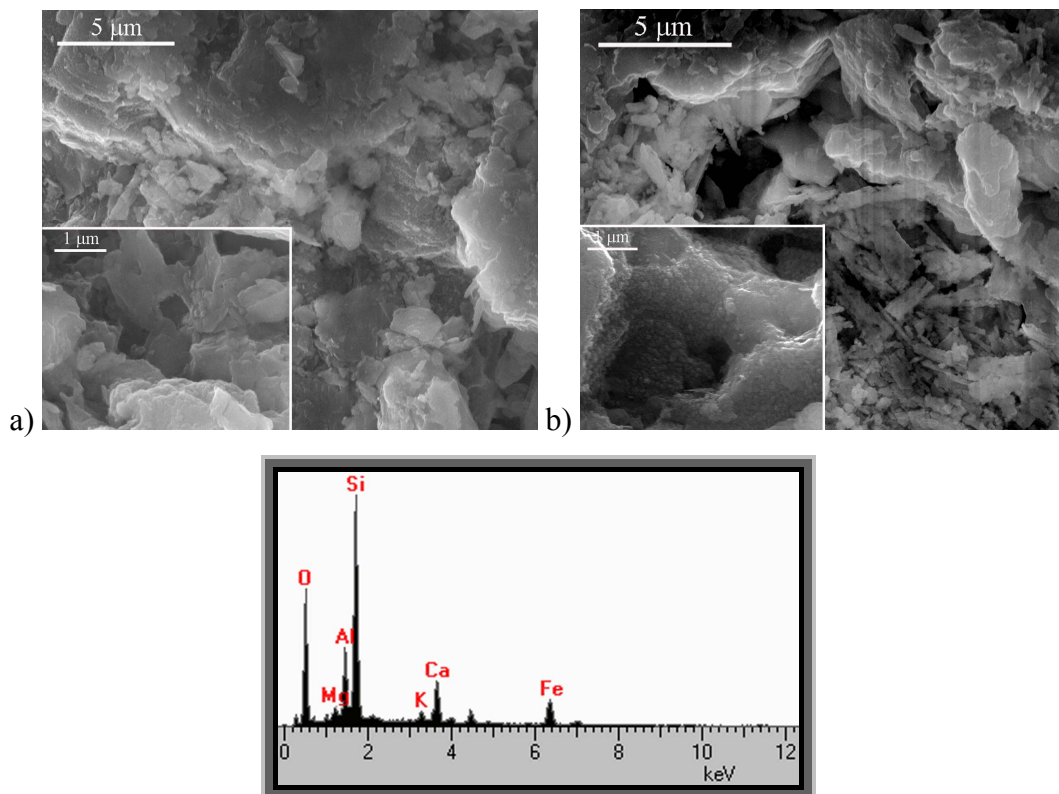
Slika 5-13. FE-SEM mikrografija (a i b) i EDS spektar S1 frakcije (c)

Frakcija S2 (63-90 μm) takođe se sastoji od čestica nepravilnog oblika, prikazanih na slici 5-14. Aglomerati su sastavljeni od manjih čestica koje su uglavnom pločastog oblika i relativno ravne, dok se na površini mogu zapaziti manje čestice nepravilnog oblika. Slika 5-14 takođe pokazuje manju poroznost čestica u poređenju sa slikama 5-13a) ili 5-13b). EDS spektar frakcije S2 je potvrdio prisustvo istih elemenata kao u slučaju frakcije S1.

Analizama je potvrđeno da je S3 frakcija (90-125 μm) sastavljena uglavnom od istih tipova čestica kao u prethodno opisanim frakcijama, a pojedine različito oblikovane čestice u odnosu na S1 i S2 su prikazane na slici 5-15. Ovi agregati su sastavljeni od vlaknastih i štapićastih čestica mikronske veličine. Većim uvećanjem su otkrivene čestice nano, ili nešto veće veličine koje su vezane za površinu. Značajno veća količina Fe je detektovana u ovoj frakciji u odnosu na ostale ispitivane frakcije (slika 5-15).



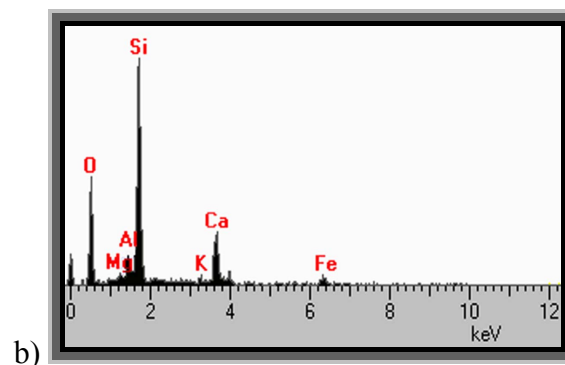
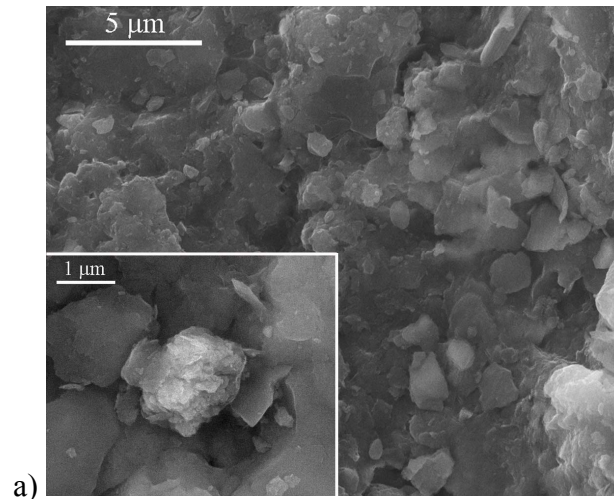
Slika 5-14. FE-SEM mikrografija (a i b) i EDS spektar S2 frakcije (c)



Slika 5-15. FE-SEM mikrografija (a i b) i EDS spektar S3 frakcije (c)

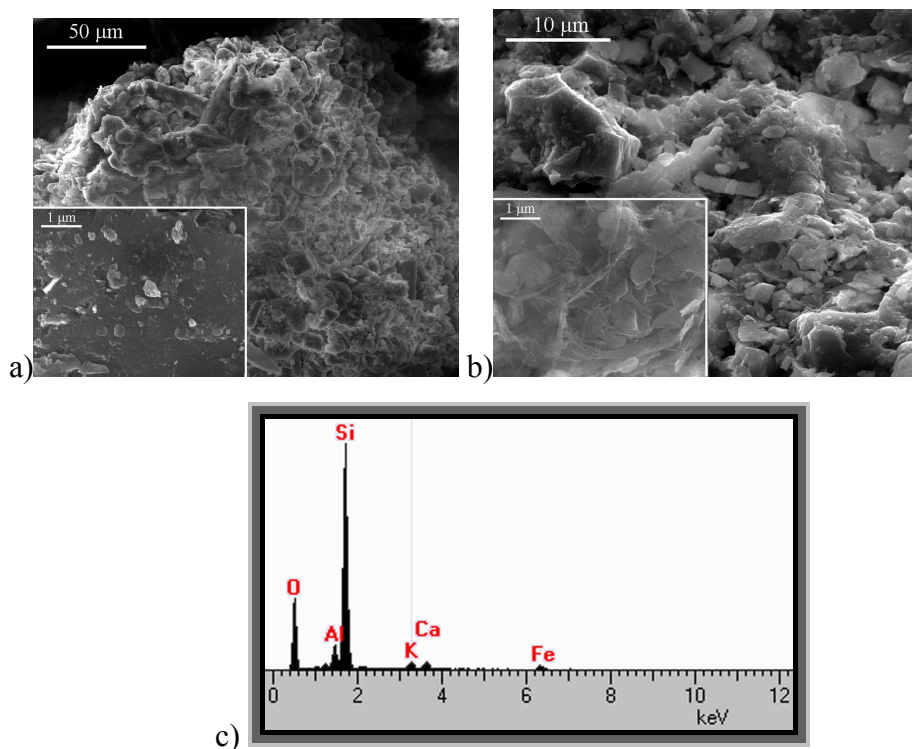


S4 frakcija je pretežno uniformne morfologije i sličnog sastava kao S1 i S2 frakcija, a tipična čestica, sa prethodno opisanim elementima mikrostrukture, je prikazana na slici 5-16.



Slika 5-16. FE-SEM mikrografija (a) i EDS spektar S4 frakcije (b)

Na slici 5-17 prikazan je jedan od najvećih posmatranih agregata iz frakcije S5, koji je sastavljen od čestica različitih oblika navedenih gore, ali većih dimenzija od prethodno opisanih. Netipična morfologija ovih čestica se sastoji od prepletenih vlaknastih čestica koje podsećaju na prirodne gline minerale, kao što je prikazano na slici 5-17. EDS analiza je pokazala da je sastav frakcije S5 sličan frakcijama S1, S2 i S4 (slika 5-17 c).



Slika 5-17. FE-SEM mikrografija (a i b) i EDS spektar S5 frakcije (c)

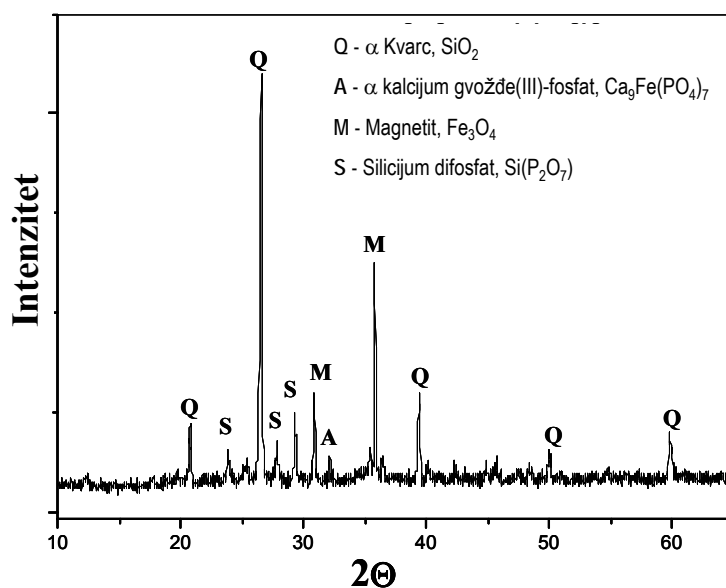
Hemijski sastav dobijen EDS analizom predstavlja hemijski sadržaj na površinama ispitivanih čvrstih frakcija čestica (tabela 5-20). Prosečne vrednosti sadržaja elemenata (u atomskom %) na površini čestica ukazuju na veoma sličan elementarni sastav površina čestica u svim frakcijama. Rezultati EDS analiza ukazuju da su čestice prirodnog porekla i da pretežno sadrže prirodni silicijum, odnosno kvarcni pesak. Pored toga, EDS analiza nije potvrdila prisustvo teških metala na površini ispitivanih materijala. Ovo znači da možda nije došlo do sorpcije i/ili izmene jona teških metala na površini ispitivanih čestica.

Tabela 5-20. Kvantitativni rezultati EDS analize frakcija čvrstih čestica

Frakcija	Sadržaj (%)				
	S1	S2	S3	S4	S5
O	83,12	84,63	78,49	81,08	77,36
Mg	1,42	1,32	1,50	1,42	0,99
Al	2,68	3,45	3,81	0,24	1,22
Si	13,20	11,50	12,13	14,74	18,72
P	0,053	0,07	0,21	0,29	0,21
K	0,89	1,23	0,61	0,37	0,82
Ca	2,35	1,86	2,5	2,81	0,95
Fe	1,72	1,60	3,48	0,79	0,86

## Mineraloška ispitivanja

Ispitivanje mineraloškog sastava ispitivanih frakcija čvrstih čestica pomoću X-zraka (XRD) dao je sličan sastav frakcije S3 kao što je utvrđeno EDS analizom. Rezultati XRD analize S3 frakcije su prikazani na slici 5-18 i položaji vrhova jasno pokazuju da se S3 frakcija uglavnom sastoji od alfa kvarca, magnetita i silicijum difosfata. Oblik vrhova pokazuje visok stepen kristalnosti za sve otkrivene komponente. Poredeći dominantne vrhove na spektru na slici 5-18, uočeno je da je alfa kvarc dominantna kristalna faza, a da se sadržaj ostalih faza smanjuje po sledećem redosledu: magnetit, silicijum difosfat i alfa  $\text{Ca}_9\text{Fe}(\text{PO}_4)_7$ . XRD spektar ima dominantne vrhove koji odgovaraju komponenti alfa kvarca i potpuno se poklapaju sa karticom iz standardne baze podataka br. 01-089-8936 za  $\text{SiO}_2$ . Kvantitativna analiza je pokazala da 80% kristalnog dela S3 frakcije čini alfa kvarc (tabela 5-21), što je u skladu sa rezultatima EDS analiza.



Slika 5-18. XRD spektar S3 frakcije

Tabela 5-21. Rezultati kvantitativne XRD analize frakcije S3

Komponenta	Sadržaj, %
$\alpha$ Kvarc, $\text{SiO}_2$	80,0
$\alpha$ kalcijum gvožđe(III)-fosfat, $\text{Ca}_9\text{Fe}(\text{PO}_4)_7$	0,21
Magnetit, $\text{Fe}_3\text{O}_4$	11,4
Silicijum difosfat, $\text{Si}(\text{P}_2\text{O}_7)$	8,9

Magnetit (11,4%) i silicijum difosfat (8,9%) su takođe detektovani (tabela 5-21), a uočeni oštri vrhovi na XRD spektru na slici 5-18 su identifikovani poređenjem sa podacima iz baze podataka za kartice brojevi 9005838 i 01-085-1571, respektivno. Veoma nizak procenat alfa  $\text{Ca}_9\text{Fe}(\text{PO}_4)_7$  takođe je otkriven, ali karakteristični vrhovi XRD spektra nisu jasno izraženi zbog niskog procenta sadržaja te faze.

Kako EDS, tako i XRD, analize su potvrdile da se ispitivani uzorak čvste faze sa urbanih površina sastojao uglavnom od kvarca i, u manjoj meri od magnetita - prirodnih minerala koji su poznati kao neporozni materijali. Sličan mineralni sadržaj je izmeren i za druge frakcije.

Zbog svoje neporozne prirode, visok sadržaj kvarca i magnetita u ispitivanim uzorcima čvrstih frakcija može objasniti detektovanu makroporoznu strukturu i niske specifične površine ispitivanih čestica.

## 5.8. KORELACIJA IZMEĐU MERENIH PARAMETARA

### 5.8.1. Linearna korelacija

Podaci o količini (masi) pojedinih parametara po jedinici ispitivanih površina, pH vrednosti, elektroprovodljivosti i mutnoći su ispitivani na međusobnu povezanost, odnosno korelaciju. Pri tome povezanost znači da je vrednost jedne promenljive moguće s određenom verovatnoćom predvideti na osnovu saznanja o vrednosti druge promenljive. Ispitivanje korelacije između merenih parametara je urađeno sa ciljem ispitivanja mogućnosti uvođenja jednog ili, nekoliko, parametra (tzv. "surogat parametri") koji bi u dovoljnoj meri mogli verodostojno da reprezentuju preostale parametre, kako bi se pojednostavila buduća ispitivanja i omogućilo efikasnije modeliranje oticaja sa eksperimentalnog sliva.

Da bi se ispitala korelacija između pojedinih merenih parametara, korišćena je linearna Pirsonova (Pearson) korelacija, koja je mera stepena uzajamne linearne povezanosti između dve promenljive, odnosno merenih podataka. Korelacioni koeficijent  $r$  se određuje iz izraza:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

gde su:  $x$  – prvi set podataka,  $y$  - drugi set podataka,  $n$  – broj podataka u svakom setu podataka,  $\bar{x}$  – prosečna vrednost podataka iz prvog seta,  $\bar{y}$  – prosečna vrednost podataka iz drugog seta podataka.

Koeficijent korelacije  $r$  može imati vrednosti između -1 i 1. Ako je vrednost koeficijenta  $r$  veća od 0,7 može se reći da je korelacija između ispitivanih setova podataka snažna, dok ako  $r$  ima vrednosti manje od 0,5 u pitanju je slaba korelisanost podataka (Živojinović i sar. 2013).

Generalno, treba biti oprezan u tumačenju dobijenih rezultata. Iako dve promenljive mogu biti snažno korelisane, iz toga se ne može direktno zaključiti da postoji uzročno-posledična veza između promenljivih. Kauzalnost podrazumeva korelisanost, ali korelacija sama po sebi ne znači kauzalnost (Levine, 2006.).

Korelacioni koeficijenti za sve relevantne merene parametre su određivani za svaku od ispitivanih nepropsunih površina (asfalt, beton, kamen), kao i zbirno, za sve rezultate merenja. Rezultati su dati u tabelama broj 5-22, 5-23, 5-24 i 5-25. Crvenom bojom su označeni izračunati korelacioni koeficijenti koji imaju vrednost preko 0,7 jer oni označavaju snažnu korelaciju između dva parametra.

Tabela 5-22. Korelacioni koeficijenti za rezultate merenja u svim uzorcima zahvaćenim sa asfaltnih površina (Serije III, IV i V)

	pH	El. prov.	HPK	TS	TSS	Mutn.TN	TP	Fe	Zn	Cr	Cu	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
pH	1,000																	
El. prov.	-0,073	1,000																
HPK	-0,358	0,785	1,000															
TS	-0,202	<b>0,750</b>	<b>0,941</b>	1,000														
TSS	-0,205	<b>0,738</b>	<b>0,939</b>	<b>1,000</b>	1,000													
Mutnoća	0,015	<b>0,858</b>	<b>0,890</b>	<b>0,928</b>	<b>0,923</b>	1,000												
TN	-0,479	0,461	<b>0,787</b>	0,686	0,690	0,550	1,000											
TP	-0,418	0,668	<b>0,957</b>	<b>0,937</b>	<b>0,939</b>	<b>0,817</b>	<b>0,819</b>	1,000										
Fe	-0,394	0,564	<b>0,881</b>	<b>0,883</b>	<b>0,886</b>	<b>0,754</b>	0,686	<b>0,848</b>	1,000									
Zn	-0,117	<b>0,829</b>	<b>0,905</b>	<b>0,940</b>	<b>0,936</b>	<b>0,947</b>	0,537	<b>0,849</b>	<b>0,804</b>	1,000								
Cr	-0,196	<b>0,797</b>	<b>0,916</b>	<b>0,900</b>	<b>0,896</b>	<b>0,917</b>	0,536	<b>0,829</b>	<b>0,861</b>	<b>0,963</b>	1,000							
Cu	-0,065	0,442	0,550	<b>0,735</b>	<b>0,738</b>	0,612	0,534	0,646	0,560	0,581	0,446	1,000						
Cl <sup>-</sup>	-0,354	0,674	0,673	0,502	0,493	0,581	0,508	0,595	0,347	0,544	0,578	0,129	1,000					
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-0,003	<b>0,838</b>	0,512	0,551	0,537	0,622	0,206	0,451	0,293	0,571	0,471	0,450	0,473	1,000				
Br <sup>-</sup>	-0,070	0,605	0,588	0,554	0,550	0,576	0,455	0,593	0,411	0,532	0,558	0,426	0,572	0,384	1,000			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,082	0,021	0,282	0,409	0,413	0,297	-0,124	0,326	0,484	0,360	0,420	0,181	-0,071	0,021	0,083	1,000		
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0,399	0,395	0,673	<b>0,716</b>	<b>0,720</b>	0,570	0,629	<b>0,751</b>	0,676	0,563	0,558	0,584	0,406	0,210	0,460	0,444	1,000	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,243	<b>0,916</b>	0,680	0,696	0,685	<b>0,879</b>	0,289	0,539	0,460	<b>0,814</b>	<b>0,776</b>	0,411	0,612	0,724	0,577	0,052	0,263	1,000

Tabela 5-23. Korelacioni koeficijenti za rezultate merenja u svim uzorcima zahvaćenim sa betonskih ploča trotoara (Serije III, IV i V)

	pH	El. prov.	HPK	TS	TSS	Mutn.	TN	TP	Fe	Zn	Cr	Cu	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
pH	1,000																	
El. prov.	0,632	1,000																
HPK	-0,086	0,379	1,000															
TS	0,140	0,580	<b>0,907</b>	1,000														
TSS	0,143	0,572	<b>0,905</b>	<b>1,000</b>	1,000													
Mutnoća	0,370	<b>0,797</b>	<b>0,719</b>	<b>0,919</b>	<b>0,915</b>	1,000												
TN	0,278	<b>0,784</b>	<b>0,701</b>	<b>0,799</b>	<b>0,794</b>	<b>0,879</b>	1,000											
TP	0,616	<b>0,894</b>	0,633	<b>0,819</b>	<b>0,817</b>	<b>0,929</b>	<b>0,862</b>	1,000										
Fe	-0,020	0,349	<b>0,916</b>	<b>0,879</b>	<b>0,882</b>	<b>0,704</b>	0,660	0,632	1,000									
Zn	-0,001	0,464	<b>0,853</b>	<b>0,972</b>	<b>0,974</b>	<b>0,865</b>	<b>0,709</b>	0,689	<b>0,836</b>	1,000								
Cr	0,011	0,397	0,625	<b>0,706</b>	<b>0,702</b>	0,630	0,506	0,411	0,611	0,616	1,000							
Cu	0,066	0,397	0,620	0,549	0,544	0,430	0,447	0,346	0,552	0,399	<b>0,815</b>	1,000						
Cl <sup>-</sup>	0,092	-0,110	-0,193	-0,181	-0,172	-0,142	-0,125	-0,212	-0,172	-0,221	0,034	0,016	1,000					
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,385	0,647	0,491	0,507	0,499	0,583	0,502	<b>0,736</b>	0,428	0,294	0,351	0,393	-0,253	1,000				
Br <sup>-</sup>	0,121	0,443	0,158	0,358	0,351	0,516	0,376	0,322	0,197	0,435	0,559	0,217	-0,023	0,307	1,000			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,231	<b>0,732</b>	<b>0,676</b>	<b>0,776</b>	<b>0,770</b>	<b>0,822</b>	<b>0,758</b>	<b>0,820</b>	0,585	0,689	0,559	0,434	-0,207	0,690	0,536	1,000		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,325	<b>0,712</b>	0,312	0,490	0,482	0,602	0,473	0,536	0,296	0,453	<b>0,770</b>	0,654	0,008	0,447	0,673	0,622	1,000	

Tabela 5-24. Korelacioni koeficijenti za rezultate merenja u svim uzorcima zahvaćenim sa kamenog podesta (Serija V)

	pH	El. prov.	HPK	TS	TSS	Mutn.	TN	TP	Fe	Cr	Cu	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
pH	1,000																
El. prov.	-0,181	1,000															
HPK	<b>0,986</b>	-0,233	1,000														
TS	<b>0,991</b>	-0,202	<b>0,997</b>	1,000													
TSS	<b>0,988</b>	-0,191	<b>0,994</b>	<b>0,995</b>	1,000												
Mutnoća	<b>0,988</b>	-0,218	<b>0,995</b>	<b>0,994</b>	<b>0,999</b>	1,000											
TN	<b>0,978</b>	-0,210	<b>0,977</b>	<b>0,976</b>	<b>0,965</b>	<b>0,972</b>	1,000										
TP	<b>0,989</b>	-0,204	<b>0,996</b>	<b>0,999</b>	<b>0,992</b>	<b>0,993</b>	<b>0,984</b>	1,000									
Fe	<b>0,989</b>	-0,286	<b>0,996</b>	<b>0,993</b>	<b>0,989</b>	<b>0,993</b>	<b>0,983</b>	<b>0,994</b>	1,000								
Cr	<b>0,979</b>	-0,290	<b>0,982</b>	<b>0,977</b>	<b>0,966</b>	<b>0,974</b>	<b>0,994</b>	<b>0,983</b>	<b>0,991</b>	1,000							
Cu	<b>0,976</b>	-0,262	<b>0,980</b>	<b>0,984</b>	<b>0,964</b>	<b>0,968</b>	<b>0,988</b>	<b>0,989</b>	<b>0,985</b>	<b>0,988</b>	1,000						
Cl <sup>-</sup>	0,614	0,398	0,584	0,632	0,583	0,567	0,629	0,639	0,560	0,566	0,657	1,000					
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<b>0,978</b>	-0,170	<b>0,984</b>	<b>0,981</b>	<b>0,996</b>	<b>0,993</b>	<b>0,944</b>	<b>0,976</b>	<b>0,976</b>	<b>0,947</b>	<b>0,936</b>	0,537	1,000				
Br <sup>-</sup>	0,593	0,266	0,630	0,662	0,629	0,612	0,616	0,668	0,588	0,562	0,657	<b>0,899</b>	0,591	1,000			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0,961</b>	-0,242	<b>0,964</b>	<b>0,972</b>	<b>0,945</b>	<b>0,949</b>	<b>0,979</b>	<b>0,978</b>	<b>0,969</b>	<b>0,975</b>	<b>0,997</b>	<b>0,702</b>	<b>0,911</b>	0,694	1,000		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,714	0,116	<b>0,733</b>	<b>0,753</b>	<b>0,708</b>	<b>0,710</b>	<b>0,797</b>	<b>0,774</b>	<b>0,717</b>	<b>0,745</b>	<b>0,801</b>	<b>0,884</b>	0,657	<b>0,891</b>	<b>0,836</b>	1,000	

Tabela 5-25. Korelacioni koeficijenti za sve rezultate merenja u svim uzorcima zahvaćenim tokom (Serije III, IV i V)

	pH	El. prov.	HPK	TS	TSS	Mutn. TN	TP	Fe	Zn	Cr	Cu	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	
pH	1,000																	
El. prov.	-0,231	1,000																
HPK	0,005	-0,007	1,000															
TS	0,053	0,012	<b>0,946</b>	1,000														
TSS	0,047	0,014	<b>0,944</b>	<b>1,000</b>	1,000													
Mutnoća	0,145	0,039	<b>0,892</b>	<b>0,946</b>	<b>0,943</b>	1,000												
TN	0,012	0,016	<b>0,782</b>	<b>0,715</b>	<b>0,716</b>	0,626	1,000											
TP	0,141	-0,006	<b>0,920</b>	<b>0,924</b>	<b>0,925</b>	<b>0,849</b>	<b>0,834</b>	1,000										
Fe	-0,036	-0,014	<b>0,910</b>	<b>0,905</b>	<b>0,907</b>	<b>0,799</b>	0,711	<b>0,845</b>	1,000									
Zn	-0,181	0,664	<b>0,911</b>	<b>0,939</b>	<b>0,937</b>	<b>0,929</b>	0,597	<b>0,836</b>	<b>0,832</b>	1,000								
Cr	0,111	-0,010	<b>0,887</b>	<b>0,881</b>	<b>0,878</b>	<b>0,882</b>	0,589	<b>0,793</b>	<b>0,850</b>	<b>0,908</b>	1,000							
Cu	0,123	-0,037	0,648	<b>0,759</b>	<b>0,760</b>	0,663	0,573	0,659	0,639	0,591	0,592	1,000						
Cl <sup>-</sup>	0,101	-0,036	-0,110	-0,098	-0,096	-0,084	-0,086	-0,124	-0,097	-0,143	-0,009	-0,032	1,000					
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,283	0,021	0,534	0,545	0,532	0,593	0,352	0,561	0,378	0,484	0,496	0,485	-0,119	1,000				
Br <sup>-</sup>	0,109	0,120	0,402	0,425	0,420	0,456	0,424	0,454	0,329	0,452	0,505	0,358	-0,023	0,364	1,000			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,031	-0,010	0,293	0,407	0,411	0,323	-0,046	0,315	0,460	0,352	0,396	0,209	-0,020	0,045	0,072	1,000		
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-0,167	0,016	0,664	<b>0,728</b>	<b>0,731</b>	0,626	0,565	0,697	0,675	0,570	0,560	0,589	-0,045	0,223	0,317	0,465	1,000	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,276	0,107	0,623	0,661	0,652	<b>0,799</b>	0,393	0,555	0,479	0,737	0,775	0,512	-0,013	0,670	0,594	0,080	0,289	1,000

pH vrednosti jedino u uzorcima sa kamenog podesta pokazuju dobru korelisanost sa većinom parametara. Elektroprovodljivost ima veoma niske vrednosti koeficijenta korelacije za skoro sve ispitivane parametre. Izuzetak su rezultati za uzorke sa asfalta i betona, gde je elektroprovodljivost dobro korelisana sa TS, TSS, mutnoćom i pojedinim teškim metalima i jonima.

Mutnoća je veoma dobro korelisana sa suvim ostatkom (TS) i supendovanim materijama (TSS). Dobra korelacija mutnoće sa TS i TSS je očekivana i potvrđena drugim istraživanjima (Wakida i sar. 2013, Kayhanian i sar. 2012) te se mutnoća često koristi, zbog mogućnosti brzog i kontinualnog merenja, kao surogat parametar za posredno određivanje TS i TSS u kišnom oticaju (Sage i sar. 2015). Mutnoća je takođe dobro korelisana sa HPK, TP, Fe, Zn, Cr i sulfatima, što može ukazivati na prirodu i sastav čvrstih materija u ispitivanim uzorcima. S obzirom da se mutnoća može brzo, pouzdano i kontinualno meriti, treba dalje ispitati korišćenje ovog parametra za posredno određivanje drugih parametara kvaliteta u površinskom oticaju (surogat parametar). Na ovaj način bi merenjem mutnoće, sa dovoljno visokom pouzdanošću, trebalo određivati sadržaj niza drugih parametara u oticaju, kao što su TS, TSS, HPK, teški metali i TP.

U svim uzorcima TS i TSS su potpuno korelisani. Oba parametra su dobro korelisani sa HPK, nutrijentima (nešto slabije sa TN) i teškim metalima, što je u skladu sa ranijim istraživanjima, te se stoga TS a naročito TSS može smatrati kao surogat parametar za sadržaj teških metala i donekle nutrijenata, naročito TP, što je identifikovano i u pojedinim ranijim istraživanjima (Westerlund i Viklander 2006, Huang i sar. 2007, Zhang 2010, Kayhanian i sar. 2012).

U zbirnim uzorcima, uzorcima sa betona i asfalta TN je pored TS, TSS i HPK dobro korelisan sa TP. Izuzetak su rezultati analiza uzoraka sa kamena gde je TN veoma dobro korelisan sa praktično svim merenim parametrima. Moguće objašnjenje je da je kamena površina jedina od ispitivanih površina koja nije u stalnom direktnom kontaktu sa motornim ili pešačkim saobraćajem, već da materije koje se na njemu sakupljaju potiču prvenstveno od atmosferskog depozita.

Dobra korelisanost TN sa teškim metalima je primetna, naročito sa gvožđem. Gvožđe se generalno ne smatra zagađenjem u životnoj sredinu, međutim, kao sastojak koji se obično javlja u relativno visokim koncentracijama u površinskom oticaju sa urbanih površina, gvožđe u čvrstom ili istaloženom obliku može igrati značajnu ulogu u vezivanju drugih zagađenja za čestice adsorpcijom (Eriksson i sar. 2005).

Joni, osim sulfata, pokazuju slabu korelisanost sa ostalim parametrima. Takođe primetno je rasipanje vrednosti koeficijenta korelacije za ove parametre i za različite tipove ispitivanih površina, što ukazuje na visoku rastvorljivost ovih materija u urbanom oticaju i/ili odsustvo interakcije sa drugim analiziranim materijama.

### **5.8.2. Analiza glavnih komponenti (PCA)**

Analiza glavnih komponenti (*Principal Component Analyses* - PCA) je statistički postupak koji koristi ortogonalnu transformaciju da pretvori opaženi niz promenljivih, koje su u mogućoj korelaciji, u skup vrednosti promenljivih koje nisu linearno korelisane i koje se zovu glavne komponente. Cilj analize je da se uzme  $p$  promenljivih ( $x_1, x_2, \dots, x_p$ ) i da se pronađe kombinacija istih da bi se izračunale nove promenljive ( $F_1, F_2, \dots, F_p$ ) koje međusobno nisu u korelaciji i koje će opisivati varijacije podataka. Nepostojanje korelacije znači da nove promenljive mere međusobno različite „dimenzije“ podataka, i njihove varijanse su poredane u opadajući niz ( $\text{Var}(F_1) \geq \text{Var}(F_2) \geq \dots \geq \text{Var}(F_p)$ ). Nove dobijene promenljive  $F_1, F_2, \dots$  predstavljaju zapravo



glavne komponente. Broj glavnih komponenti je manji ili jednak broju originalnih promenljivih. Glavne komponente su ortogonalne, jer su oni ajgenvektori matrice kovarijanse, ili matrice korelacije, koja je simetrična.

PCA metod je osetljiv na relativno skaliranje originalnih promenljivih. PCA bazirana na korelacionoj matrici je poželjan metod analize ako su promenljive merene u različitim skalama i razmerama, da bi se izbegao uticaj ovih razlika na krajnji rezultat analiza.

PCA metoda je pogodna za vizuelizaciju i analizu korelacije između promenljivih, ali, kao i kod linearne korelacije, treba biti oprezan kod izvođenja zaključaka jer je ovo statistički metod obrade i vizuelizacije podataka bez ulaženja u prirodu i suštinu povezanosti i interakcija između promenljivih.

PCA analiza u ovom istraživanju je sprovedena korišćenjem softvera XLSTAT ([www.xlstat.com](http://www.xlstat.com)) koji predstavlja zbirku biblioteka makro komandi za programski paket Microsoft Excel. PCA analizom su obuhvaćeni mereni podaci – promenljive: pH, elektroprovodljivost, mutnoća, masa parametara TS, TSS, TN, TP, teških metala i katjona po jedinici ispitivanih površina. PCA analiza je odvojeno sprovedena za sledeća tri seta podataka:

- podaci merenja uzoraka sa asfalta i betona jula 2013. godine za potrebe ispitivanja akumulisanja zagađenja;
- podaci merenja uzoraka sa asfalta i betona jula 2013. godine za potrebe ispitivanja priraštaja zagađenja;
- podaci merenja uzoraka sa asfalta, betona i kamena iz oktobra 2013. godine za potrebe ispitivanja priraštaja zagađenja.

Kako su mereni podaci različitih skala i jedinica, PCA analiza je bazirana na matrici lienearnih koeficijenata korelacije (Pirsonovi koeficijenti korelacije) i svim veličinama su date jednake relativne težine.

Rezultati PCA analize u pogledu projekcija početnih promenljivih na prostor definisan faktorima su prikazani na dijagramima – biplotovima, slike 4-18, 4-19 i 4-20. Kako je za sve ispitivane setove podataka procenat obuhvaćenih varijabilnosti predstavljen samo sa prva dva faktora ( $F1$  i  $F2$ ) bio visok (>75%), to su priloženi samo dijagrami – biplotovi za faktore  $F1$  i  $F2$ .

Na biplotovima su naneti podaci o korelaciji parametara sa glavnim komponentama  $F1$  i  $F2$  (crvene linije na slikama 4-18, 4-19 i 4-20). Kada su dve promenljive daleko od centra, onda, ako su: blizu jedna drugoj, one su snažno pozitivno korelisane ( $r$  blizu 1); ako su ortogonalne, one nisu u korelaciji ( $r$  blizak 0); a ako su na suprotnoj strani u odnosu na koordinatni početak, onda su snažno negativno korelisane ( $r$  blizu -1). Kada su promenljive u blizini koordinatnog početka treba biti oprezan u tumačenju međusobnih povezanosti između ovih promenljivih.

Rezultati PCA analize u pogledu projekcija osmotrebih (merenih) vrednosti se nanose na isti dijagram dvodimenzionalnog prostora sa osama  $F1$  i  $F2$ , zajedno sa korelacijama, u formi biplota, kako bi se ispitali i opazili trendovi.

**PCA analizom uzoraka zahvaćenih jula 2013. godine za određivanje akumulisanja zagađenja** analizirano je ukupno 18 promenljivih (merenih parametara) za 18 osmatranja (zahvaćenih uzoraka), odnosno ukupno 324 promenljivih gupisanih u 18 osmatranja. Rezultati analize su dati na slici 5-19, a oznake su:

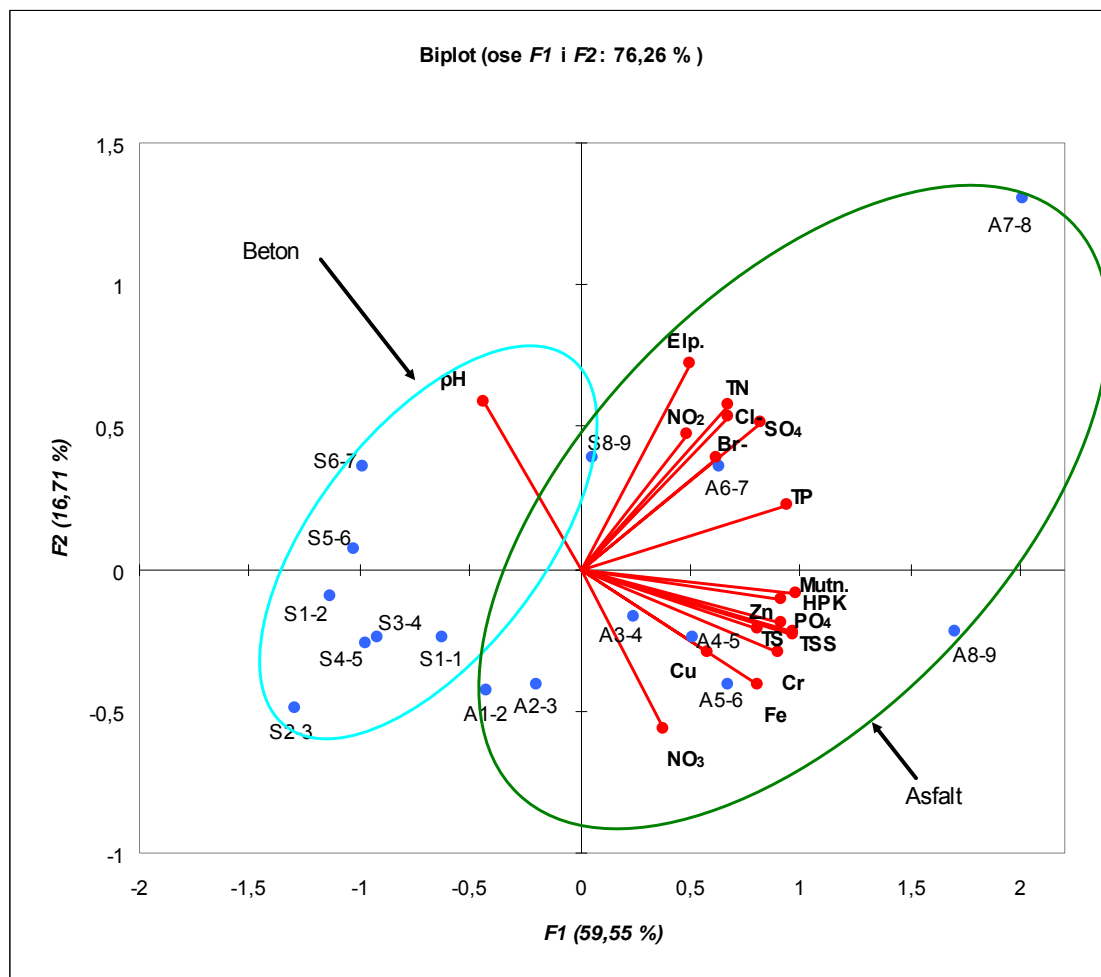
- A1-1, A1-2,.. A8-9, oznaka uzoraka zahvaćenih sa asflata jula meseca 2013. za potrebe određivanja akumulisanja zagađenja (oznake takođe date i u tabeli 5-6).
- S1-1, S1-2,.. S8-9, oznaka uzoraka zahvaćenih sa betona jula meseca 2013. za potrebe određivanja akumulisanja zagađenja (oznake takođe date i u tabeli 5-7).
- pH, Elp. (elektroprovodljivost), HPK, TS, TSS, mutnoća, i dr. su promenljive - izemreni parametri u uzorcima, kako je ranije objašnjeno.

Da bi se sačuvala preglednost drugih podataka, skale apscise i ordinate su podešene tako da nije prikazan podatak za A1-1 i S7-8 jer su daleko van ovog opsega: koordinate tačke A1-1 su  $F1=1,6$ ,  $F2=-2,1$ ; tačke S7-8 su  $F1=0,1$ ,  $F2=2,6$ .

Komponenta  $F1$  je povezana sa svim merenim parametrima osim sa pH, Elektroprovodljivošću i  $\text{NO}_3^-$ , koji su povezani sa komponentom  $F2$ . Glavnim komponentama  $F1$  i  $F2$  je obuhvaćeno 76,26% varijabilnosti svih podataka.

Sledeće promenljive su veoma snažno korelisane sa  $F1$ : HPK ( $r=0,921$ ), TS ( $r=0,971$ ), TSS ( $r=0,969$ ), Mutn. ( $r=0,978$ ), TP ( $r=0,945$ ), Fe ( $r=0,815$ ), Zn ( $r=0,915$ ), Cr ( $r=0,909$ ),  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $r=0,814$ ) i  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $r=0,820$ ). Sa  $F2$  je snažno korelisana samo elektroprovodljivost (Elp.) i iznosi  $r=0,722$ . Sa slike je evidentno da postoji jaka međusobna povezanost između mutnoće, HPK, Zn, Fe, Cr,  $\text{PO}_4^{3-}$ , TS i TSS. Ovim je

potvrđena visoka korelisanost ovih parametara izvedena iz analize Pirsonovih koeficijenata korelacije. Slična, samo malo manje izražena, povezanost je prisutna između sledećih promenljivih: Elp.,  $\text{NO}_2^-$ , TN,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . Parametar  $\text{PO}_4^{3-}$  se nalazi između ove dve grupe, a pH i  $\text{NO}_3^-$  pokazuju slabiju korelisanost sa bilo kojim drugim promenljivama.

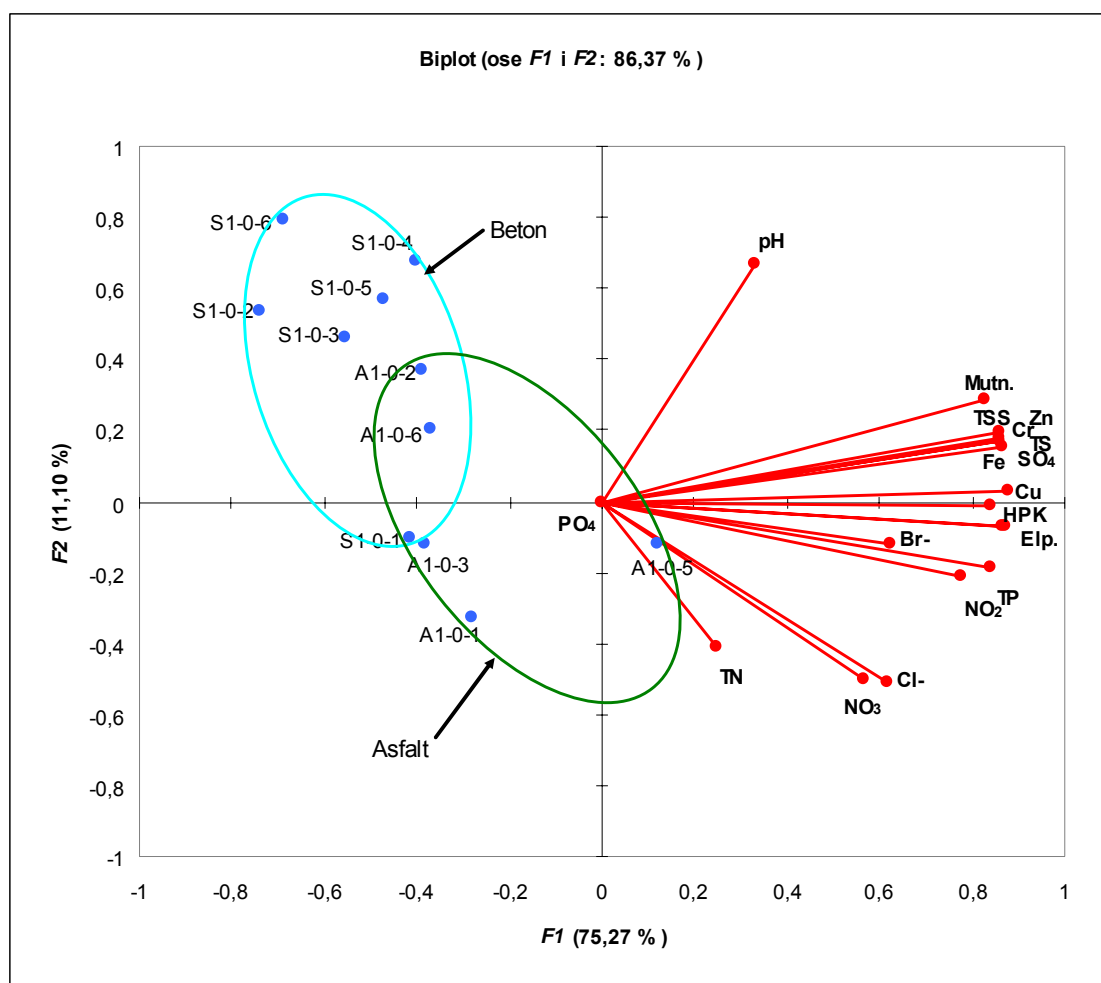


Slika 5-19. Analiza glavnih komponenti (PCA) – biplot za rezultate analiza akumulisanja zagađenja (Serija III, jul 2013.)

Grupisanje rezultata osmatranja, odnosno uzoraka, po tipu površine sa koje su zahvatani uzorci je primetno, i obeleženo je na slici 5-20. Većina tačaka na slici 5-20 koja predstavlja osmatranja, odnosno uzorke, sa asfaltne površine je grupisana tako da ima veće vrednosti glavne komponente F1 u odnosu na uzorke sa betona. Ovo ukazuje na veće vrednosti ispitivanih promenljivih koje su povezane sa F1 u uzorcima sa asfalta nego u uzorcima sa betona. Uzorci sa betona pokazuju manju varijabilnost glavnih komponenti od uzoraka sa asfalta, što se može objasniti manjim kapacitetom ove

površine da akumulira zagađenje usled manje hrapavosti i manjih direktnih uticaja od saobraćaja na akumulisanje materija na ovom tipu ispitivane površine.

**PCA analizom uzoraka zahvaćenih jula 2013. godine za određivanje priraštaja zagađenja na asfaltu i betonu** analizirano je ukupno 18 promenljivih (merenih parametara) za 14 osmatranja (zahvaćenih uzoraka). Rezultati analize su dati na slici 5-20.



Slika 5-20. Analiza glavnih komponenti (PCA) – biplot za rezultate analiza priraštaja zagađenja (Serija IV, jul 2013.)

Da bi se sačuvala preglednost drugih podataka, skale apscise i ordinate su podešene tako da nije prikazan podatak za A1-0-0, A1-0-4 i S1-0-0 jer su daleko van ovog opsega: koordinate tačke S1-0-0 su  $F1=0,6$ ,  $F2=-1,6$ ; tačke A1-0-0 su  $F1=0,9$ ,  $F2=-1,7$ ; tačke A1-0-4 su  $F1=5,4$ ,  $F2=-0,8$ .

Oznake ispitivanih parametara na slici 5-20 su iste kao na prethodnij slici, a preostale oznake su:

- A1-1-0, A1-1-1,.. A1-1-6, oznaka uzoraka sa asfalta iz oktobra meseca 2013. za potrebe određivanja priraštaja zagađenja (oznake takođe date i u tabeli 5-8).
- S1-0-0, S1-0-1,.. S1-0-6, oznaka uzoraka sa betona iz jula meseca 2013. za potrebe određivanja priraštaja zagađenja (oznake takođe date i u tabeli 5-9).

Faktor *F1* je povezan sa svim merenim parametrima osim pH vrednosti (povezana sa *F2*) TN (povezan sa *F3*). Glavnim komponentama *F1* i *F2* je obuhvaćeno 86,37% varijabilnosti svih podataka.

Sledeće promenljive su veoma snažno korelisane sa *F1*: Elp. ( $r=0,987$ ), HPK ( $r=0,981$ ), TS ( $r=0,976$ ), TSS ( $r=0,973$ ), Mutn. ( $r=0,940$ ), Fe ( $r=0,993$ ), Zn ( $r=0,975$ ), Cr ( $r=0,977$ ), Cu ( $r=0,956$ ), Cl<sup>-</sup> ( $r=0,704$ ), NO<sub>2</sub><sup>-</sup> ( $r=0,882$ ), Br<sup>-</sup> ( $r=0,706$ ) i SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $r=0,984$ ). Od preostalih promenljivih, dobro su korelisane pH sa *F2* ( $r=0,759$ ) i TN sa *F3* ( $r=0,760$ ). Sa slike je evidentno da postoji jaka međusobna povezanost između svih promenljivih, osim pH, Cl<sup>-</sup>, TN i NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Ovo takođe potvrđuje visoka korelisanost ovih parametara izvedena iz analize Pirsonovih koeficijenata korelacije.

Grupisanje rezultata osmatranja, odnosno uzoraka, po tipu površine sa koje su zahvatani uzorci je primetno i obeleženo je na slici 5-20. Većina tačaka na slici 5-20 koja predstavlja osmatranja, odnosno uzorke sa asfaltne površine je grupisana tako da ima nešto veće vrednosti glavne komponente *F1* u odnosu na uzorke sa betona. Uzorci sa betona ponovo pokazuju nešto manju varijabilnost glavnih komponenti od uzoraka sa asfalta, ali to ovog puta nije veoma izraženo.

Podaci koji znatno odstupaju od ostalih, i koji radi preglednosti nisu prikazani na dijagramu na slici 5-20, su rezultati merenja u uzorcima zahvećenim prvog dana uzorkovanja sa oba tipa površina (uzorci A1-0-0 i S1-0-0) i četvrtog dana uzorkovanja sa asfalta (uzorak A1-0-4). Razlozi za odstupanje prva dva uzorka leže u činjenici da su ovde u pitanju uzorci koji su uzeti sa površine nakon dužeg perioda suvog vremena te da sadrže velike količine različitih zagađenja i materija. Pored ovoga, na veličinu ispitivanih promenljivih, kod ovih uzoraka, utiču i brojni spoljni faktori (prenos zagađenja sa drugih površina, klimatski faktori, intenzitet saobraćaja), što sve zajedno utiče na pojavu većih vrednosti ispitivanih promenljivih, i veliku varijabilnost ovih rezultata u odnosu na ostale. Sa druge strane, rezultati promenljivih u uzorcima

sakupljenih nakon prvog dana uglavnom se sastoje od materija koje se talože na površini iz atmosfere, materija koje saobraćajem ili na neki drugi način dospevaju na razmatranu površinu, i koji pokazuju znatno manju varijabilnost. Izuzetak je uzorak A1-0-4 koji je zahvaćen sa asfaltne površine nakon izvođenja građevinskih radova u okolini koje su rezultovale u izuzetnom povećanju zaprljanja asfaltne površine i znatnom povećanju količina praktično svih ispitivanih parametara, što je ovaj podatak stavilo van opsega svih opaženih trendova. Istog dana uzorak sa betonskog trotoara je takođe dao samo malo uvećane vrednosti pojedinih parametara usled izvedenih građevinskih radova na obližnjem asfaltu, ali PCA analiza je potvrdila da je varijabilnost ovog podatka i dalje u okvirima varijabilnosti ostalih podataka u razmatranom setu.

**PCA analizom uzoraka zahvaćenih oktobra 2013. godine za određivanje priraštaja zagađenja na asfaltu, betonu i kamenu** analizirano je ukupno 18 promenljivih (merenih parametara) za 21 osmatranje (zahvaćenih uzoraka). Rezultati PCA analize su dati na slici 5-21. Oznake ispitivanih parametara (promenljivih) na slici 4.20 su iste kao na prethodnoj slici, a preostale oznake su:

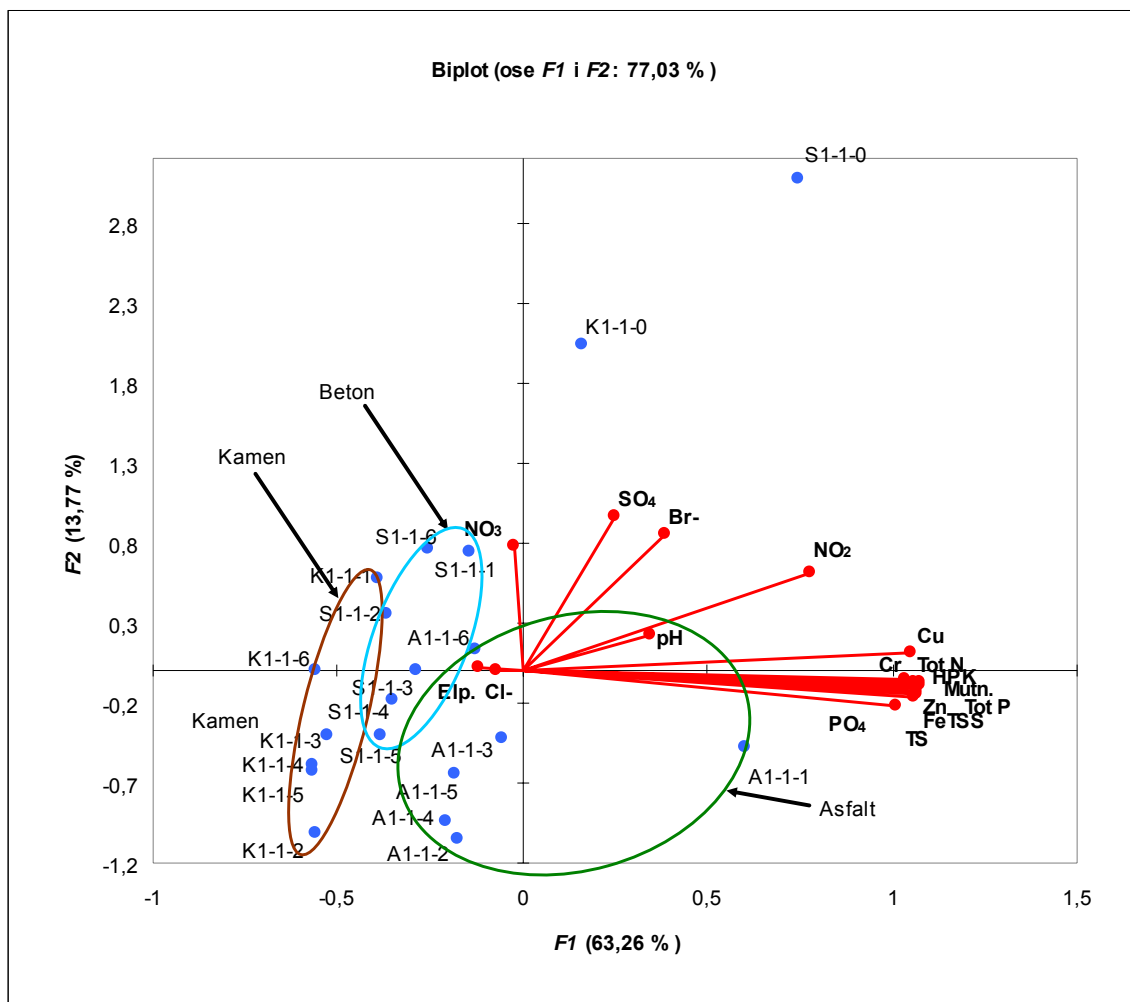
- A1-0-0, A1-0-1,.. A1-0-6, oznaka uzoraka sa asfalta iz oktobra 2013. za potrebe određivanja priraštaja zagađenja (oznake takođe date i u tabeli 5-10).
- S1-0-0, S1-0-1,.. S1-0-6, oznaka uzoraka sa betona iz oktobra 2013. za potrebe određivanja priraštaja zagađenja (oznake takođe date i u tabeli 5-11).
- K1-0-0, K1-0-1,.. K1-0-6, oznaka uzoraka sa kamena iz oktobra 2013. za potrebe određivanje priraštaja zagađenja (oznake takođe date i u tabeli 5-12).

Da bi se sačuvala preglednost drugih podataka, skale apscise i ordinate su podešene tako da nije prikazan podatak za A-1-0 jer je daleko van ovog opsega: koordinate tačke A-1-0 su F1: 4,1, F2: -0,7.

Glavna komponenta *F1* je povezana sa svim merenim parametrima osim pH (povezan sa *F3*), elektorporvodljivosti i  $\text{Cl}^-$  (povezane sa *F4*),  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  i  $\text{SO}_4^{2-}$  (povezane sa *F2*). Glavnim komponentama *F1* i *F2* je obuhvaćeno 77,03% varijabilnosti svih podataka.

Sledeće promenljive su veoma snažno korelisane sa *F1*: HPK ( $r=0,987$ ), TS ( $r=0,974$ ), TSS ( $r=0,968$ ), TN ( $r=0,963$ ), TN ( $r=0,981$ ), Mutn. ( $r=0,983$ ), Fe ( $r=0,991$ ), Zn ( $r=0,982$ ), Cr ( $r=0,915$ ), Cu ( $r=0,942$ ), i  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $r=0,882$ ). Od preostalih

promenljivih, dobro je korelisan samo još  $\text{SO}_4^{2-}$  sa  $F2$  ( $r=0,806$ ). Sa slike je evidentno da postoji jaka međusobna povezanost između svih promenljivih, osim pH, Elp.  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ . Ovo takođe potvrđuje visoka korelisanost ovih parametara izvedena iz analize Pirsonovih koeficijenata korelacije.



Slika 5-21. Analiza glavnih komponenti (PCA) – biplot za rezultate analiza priraštaja zagađanja sa asfalta, betona i kamena (Serija V, oktobar 2013.)

Grupisanje rezultata osmatranja, odnosno uzoraka, po tipu površine sa koje su zahvatani uzorci je primetno i obeleženo je na slici 5-21. Kao i u prethodna dva analizirana slučaja, tačke na slici 5-21 koja predstavlja osmatranja sa asfaltne površine su grupisane tako da imaju nešto veće vrednosti glavne komponente  $F1$  u odnosu na uzorke sa betona ili kamena. Uzorci sa kamena pokazuju najmanje vrednosti  $F1$ . Ovo ukazuje na veće vrednosti ispitivanih promenljivih koje su povezane sa  $F1$  u uzorcima sa asfalta, nešto niže u uzorcima sa betona i najniže u uzorcima sa kamena. Uzorci sa asfalta pokazuju najveće rasipanje i varijabilnost, dok rezultati uzoraka za betona i

kamena zauzimaju veoma uzane oblasti na dijagramu na slici 5-21. Ovo se može objasniti kapacitetom površina u pogledu akumulisanja zagađenja, gde usled manje hrapavosti i manjih direktnih uticaja od saobraćaja i drugih površina, najmanje vrednosti merenih parametara između ispitivanih površina se dobijaju na kamenu, a najveće na asfaltu.

Slično slučaju ispitivanja priraštaja zagađenja u julu 2013. godine, i ovde podaci koji znatno odstupaju od ostalih, i koji radi preglednosti nisu naneti na dijagram na slici 5-21, su rezultati merenja u uzorcima zahvaćenih prvog dana uzorokovanja, sa sva tri tipa površina (uzorci A1-1-0, S1-1-0 i K1-1-0). Razlozi za odstupanje leže u činjenici da su ovde u pitanju uzorci koji su uzeti sa površine nakon dužeg period suvog vremena te da sadrže velike količine različitih zagađenja i materija koje su akumulisane pod uticajem raznovrsnih faktora, te ove vrednosti znatno odstupaju od vrednosti promenljivih određenih u preostalim uzorcima.

## **5.9. DISKUSIJA O MOGUĆIM MEHANIZMIMA RAZDVAJANJA FAZA TEŠKIH METALA U ANALIZIRANIM UZORCIMA**

Hemijska karakterizacija zahvaćenih uzoraka sa nepropusnih površina eksperimentalnog sliva ukazala je na prisustvo teških metala i nutrijenata u svakoj frakciji čvrstih čestica. Osim toga, utvrđena je snažna korelacija između teških metala, nutrijenata i suspendovanih materija u zbirnim uzorcima. Koncentracija teških metala je veća u sitnijim frakcijama čvrste faze, kao što je detektovano u drugim istraživanjima (Gunawardana i sar. 2012, Gunawardana i sar. 2014, Kayhanian i sar. 2012, Zhao i sar. 2010 na česticama <150  $\mu\text{m}$ , Herngren i sar. 2006 na česticama <75  $\mu\text{m}$ , Fujiwara i sar. 2011 na česticama <37  $\mu\text{m}$ ). Ovi rezultati su bili polazište za detaljnija istraživanja o prirodi interakcija između čvrstih čestica i oblika teških metala u zbirnim uzorcima, i ispitivanje veza između teških metala i čestica čvrste faze, naročito sitnih frakcija čvrste faze.

Rezultati BET analize (Poglavlje 5.7.2) su pokazali da čvrste čestice u svakoj frakciji imaju vrlo nisku specifičnu površinu, u rasponu od 0,26 do 2,10  $\text{m}^2/\text{g}$ , sa nerazvijenim sistemom mikropora i dominantnom makroporoznom prirodom čestica, što je dodatno potvrđeno i metodom živine porozimetrije. Pored toga, fizičko-



hemijskom karakterizacijom čvrste faze, u svim ispitivanim frakcijama nije potvrđeno prisustvo teških metala (Cr, Ni, Cu, Zn, Pb) na površinama čvrstih čestica.

Adsorpcija je površinski proces koji zahteva vrlo razvijenu unutrašnju poroznost i visoku specifičnu površinu čestica. Na primer, komercijalni adsorbensi imaju obično specifičnu površinu od najmanje 100 m<sup>2</sup>/g, (Hvitved-Jacobsen i sar. 2010.). Dodatno, rezultati EDS analize (Poglavlje 5.7.3) su pokazali da teški metali nisu vezani za površinu ispitivanih čestica. Zbog toga, malo je verovatno da je proces adsorpcije odgovoran za vrlo dobro razdvajanje čvrste i tečne faze teških metala koje je uočeno u svim uzorcima bez izuzetka. Stoga i dalje stoji otvoreno pitanje koji je mehanizam interakcija između čvrstih čestica i prisutnih teških metala u zahvaćenim uzorcima, odnosno u urbanom oticaju?

Kao što je navedeno u teorijskom delu, više istraživanja je bilo fokusirano na definisanje i kvantifikaciju mehanizama adsorpcije teških metala na česticama u površinskom oticaju, kao dominantnom pretpostavljenom mehanizmu vezivanja teških metala na česticama i uzroku dobrog razdvajanja tečne i čvrste faze teških metala u površinskom oticaju. Međutim, sve sprovedene analize u okviru ovih istraživanja ukazuju da u ispitivanom slučaju adsorpcija ne može biti odgovorna za ovo, već da se dominantna uloga u uklanjanju teških metala iz tečne faze tokom sprovedenih ispitivanja može pripisati precipitaciji (taloženju). Moguće objašnjenje je da u ovom slučaju teški metali formiraju slabo rastvorljive taloge, uglavnom u obliku Fe(OH)<sub>3</sub>, zajedno sa drugim slabo rastvorljivim jedinjenjima gvožđa kao što su FeO(OH) i FePO<sub>4</sub>. Tokom padavina, kada se postigne kritična koncentracija odgovarajućih jona u kišnom oticaju započinje uklanjanje i drugih teških metala. Talozni teških metala koji se mogu formirati uključuju: Zn(OH)<sub>2</sub>, Pb<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, Pb(OH)<sub>2</sub>, NiCO<sub>3</sub>, CuCO<sub>3</sub>, Cu(OH)<sub>2</sub>, Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>.

Osim koncentracije, postoje i drugi spoljni faktori koji mogu uticati na rastvorljivost metala i mogućnost formiranja taloga: jedinjenja za kompleksiranje metala, tvrdoća, pH vrednost, alkalitet i rastvoreni kiseonik.

Različite materije i jedinjenja se razlikuju po svojim fizičkim i hemijskim svojstvima. Varijacije u svakoj karakteristici omogućuje njihovo razdvajanje na tečnu i čvrstu fazu. Joni teških metala stvaraju taloge koji mogu imati različite proizvode rastvorljivosti *K<sub>sp</sub>*. Budući da je predmet ovog istraživanja oticaj sa urbanih površina,

analize i predviđanja koje forme i jedinjenja precipitata se mogu očekivati u čvrstoj fazi oticaja sa urbanih površina, moraju se uzeti sa određenom dozom opreza, jer predmet istraživanja, odnosno površinski oticaj, nije stacionarni sistem sa dostignutim ravnotežnim stanjem u pogledu odvijanja hemijskih reakcija, već je to izrazito promenljiv i dinamičan sistem.

Joni teških metala reaguju sa prisutnim fosfatima, karbonatima, hidroksidima i stvaraju nerastvoran talog. Maksimalne koncentracije jona ovih teških metala na datoj pH vrednosti mogu se izračunati iz vrednosti proizvoda rastvorljivosti  $K_{sp}$ . Sastav i struktura mešavine tečne i čvrste faze u oticaju, koncentracije i prisustvo sastojaka koji stvaraju komplekse će imati najveći uticaj na formiranje različitih kompleksa. Taloženje se dešava istovremeno sa procesom ko-precipitacije, naročito ako su prisutni hidroksidi i oksidi gvožđa i aluminijuma.

Pri pokušaju predviđanja procesa taloženja i uklanjanja jona teških metala iz rastvora, može biti vrlo teško predvideti koncentracije u rastvoru i količine taloga (precipitata) nastalih od jona teških metala, zbog formiranja kompleksa. Procesi kompleksiranja zavise od sastava oticaja i prisustva pojedinih materija, i mogu da dovedu do formiranja različitih kompleksa, kao što su:  $[Zn(OH)_4]^{2-}$ ,  $[Zn(NH_3)_4]^{2+}$ ,  $[Ni(NH_3)_6]^{2+}$ ,  $[Cr(OH)_4]^-$ ,  $[Al(OH)_4]^-$ ,  $[Cd(NH_3)_4]^{2+}$ ,  $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$  i  $[Pb(OH)_4]^{2-}$ , na primer.

U prilog tvrdnji, da je uzrok dobrog razdvajanja čvrste i tečne (rastvorene) faze teških metala proces precipitacije (taloženje), ide i činjenica da je pH reakcija ispitivanih uzoraka bila u neutralnom opsegu, ili čak blago bazna, i da je sadržaj rastvorenog kiseonika bio dovoljan za odvijanje ovih procesa.

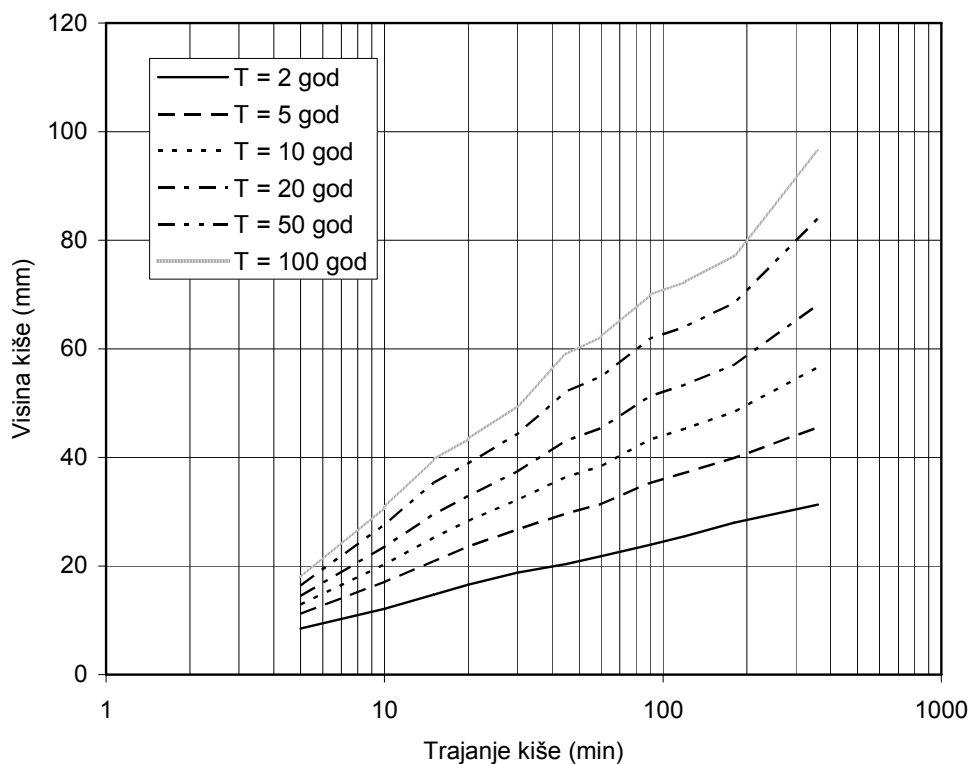
U skladu sa iznetim, može se zaključiti da je glavni uzrok dobrog razdvajanja čvrste i tečne (rastvorene) faze teških metala u ispitivanim uzorcima proces taloženja.

## **5.10. MODELIRANJE OTICAJA I EMISIJE ZAGAĐENJA**

### ***5.10.1. Modeliranje oticaja***

Modeliranje oticaja sa eksperimentalnog sliva je izvršeno 1,5D i shematizovanim modelom kako je opisano u poglavlju 4. Prvo je modeliran proces padavine-oticaaj za uniformne kiše trajanja 10, 20 i 60 minuta povratnog perioda 5 godina, prema podacima

za pluviografsku stanicu Vračar (Beograd) koja je najbliža stanica modeliranom eksperimentalnom slivu. Na slici 5-22 su date HTP krive za stanicu Vračar, a u tabeli 5-26 podaci za ITP krive za istu pluviografsku stanicu (Institut za hidrotehniku 1990).



Slika 5-22. HTP za pluviografsku stanicu Beograd-Vračar, period obrade 1925-1989

Tabela 5-26. Intenziteti kiše različitog povratnog perioda i trajanja (ITP) za pluviografsku stanicu Beograd-Vračar, period obrade 1925-1989

Trajanje (min)	Intenzitet (l/s/ha)							
	Povratni period (godina)							
	2	5	10	20	50	100	200	500
5	283	373	430	483	547	597	643	707
10	202	283	338	392	460	513	565	635
15	163	231	280	328	392	440	490	556
20	138	197	236	274	324	362	399	449
30	104	148	178	208	246	275	304	343
45	75,6	110	135	160	193	219	245	280
60	60,6	87,2	107	126	153	173	194	221
90	44,3	65,4	80,2	95,0	115	130	145	165
120	35,4	51,7	62,9	74,2	89,0	100	112	127
180	25,9	36,9	44,8	52,8	63,3	71,5	79,7	90,8
360	14,5	21,1	26,2	31,5	38,9	44,6	50,6	58,8

Modeliranje je izvršeno u programskom paketu SWMM. Modelirane su sve nepropusne površine eksperimentalnog sliva odjednom, metodom dinamičkog talasa. Sliv se sastoji od 4 podslivna područja, i svako slivno područje se drenira u jedan slivnik, i to:

- slivno područje SI-2 u čvor modela broj 1554 (1,5 model), odnosno čvor O4 (shematizovani model),
- podsliv SI-3 u čvor 1553 (1,5 model), odnosno čvor O3 (shematizovani model),
- podsliv SI-4 u čvor 1552 (1,5 model), odnosno čvor O2 (shematizovani model)i
- podsliv SI-5 u čvor 1551 (1,5 model), odnosno čvor O4 (shematizovani model).

Svaki slivnik je modeliran kao izliv bez ikakve regulacije protoka i ograničenja sa nizvodne strane. Podslivovi se sastoje od potpuno nepropsunih površina, bez mogućnosti infiltracije vode kroz njih, i sastoje se od asfalta i betona (betonske ploče, kamena kocka zalivena cementom). Učešće svake od ova dva tipa površina u ukupnoj površini modeliranog sliva je po 50%.

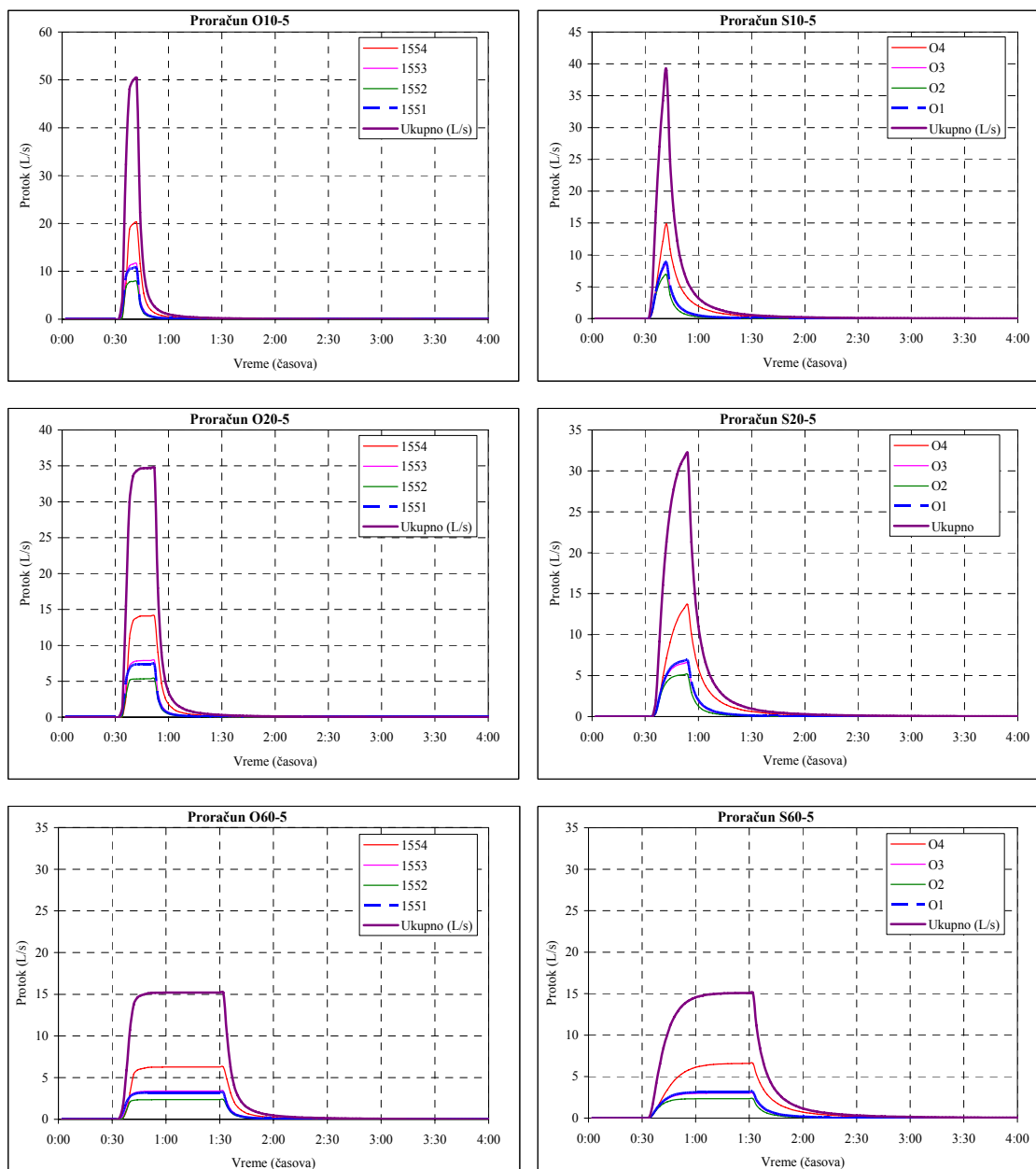
Usvojeno je da oticaj sa površine počinje kada akumulisanje vode na nepropusnoj površini premaši 0,5 mm. Usvojeno je da nema evaporacije, što je opravdano zbog kratkog zadržavanja vode na slivu. Izvršeni su sledeći proračuni:

- proračun O10-5 (1,5D model) i S10-5 (shematizovani model): kiša trajanja 10 minuta povratnog perioda 5 godina,
- proračun O20-5 (1,5D model) i S20-5 (shematizovani model): kiša trajanja 20 minuta povratnog perioda 5 godina,
- proračun O60-5 (1,5D model) i S60-5 (shematizovani model): kiša trajanja 60 minuta povratnog perioda 5 godina.

Svaki proračun traje 6 časova: od 00:00 do 6:00, a kiša započinje uvek u 00:30 časova. Hidrogrami na izlazu iz svakog podsliva i zbirni hidrogram, su dati na slici 5-23. Da bi se postigla numerička stabilnost proračuna 1,5D modelom maksimalni vremenski korak je morao biti veoma kratak, najviše do 0,5 sekundi.

Proračun kiše trajanja 60 minuta pokazuje da je dužina kiše premašila vreme koncentracije. Prema rezultatima proračuna može se zaključiti da je vreme koncentracije nešto kraće od 20 minuta.

Hidrogrami na izlazu iz svakog podsliva i ukupni hidrogram za kiše trajanja 10, 20 i 60 minuta povratnog perioda 5 godina, su dati na slici 5-23.



Slika 5-23. Hidrogrami na izlazu iz svakog podsliva i ukupni hidrogram sa celog eksperimentalnog sliva za kiše trajanja 10, 20 i 60 minuta povratnog perioda 5 godina, izračunati 1,5D modelom (levo) i shematizovanim modelom (desno)

Prema slici 5-23 može se zaključiti da oba modela daju slične rezultate, s tim da 1,5D model daje kraća vremena koncentracije sliva.

Koeficijent oticaja  $Kd$  kod oba modela je blizak jedinici, što je očekivano jer su sve površine modelirane kao nepropusne, bez gubitaka vode na infiltraciju i evaporaciju. Podaci o ukupnim kefcijentima oticaja tokom analiziranih kišnih epozoda, zapremine otekle vode i maksimalnog oticaja sa sliva su dati u tabeli 5-27.

Tabela 5-27. Rezultati proračuna 1,5D modelom (levo) i shematizovanim modelom (desno)

Proračun	Zapremina oticaja (m <sup>3</sup> )	Kd (%)	Q <sub>max</sub> (L/s)	Vreme pojave Q <sub>max</sub> (hh:mm)
<b>O10-5</b>	29,66	99,05	52,02	00:42
<b>S10-5</b>	28,79	96,14	38,98	00:42
<b>O20-5</b>	41,16	99,04	35,82	00:52
<b>S20-5</b>	40,03	96,32	32,19	00:52
<b>O60-5</b>	54,30	98,21	15,69	01:32
<b>S60-5</b>	53,96	97,60	15,09	01:32

Može se zaključiti da oba razmatrana modela uspešno opisuju proces padavine-oticaj na razmatranom eksperimentalnom slivu. Prednost se može dati 1,5D modelu zbog njegovih većih mogućnosti modeliranja lokalnih karakteristika sliva.

### 5.10.2. Modeliranje zagađenja

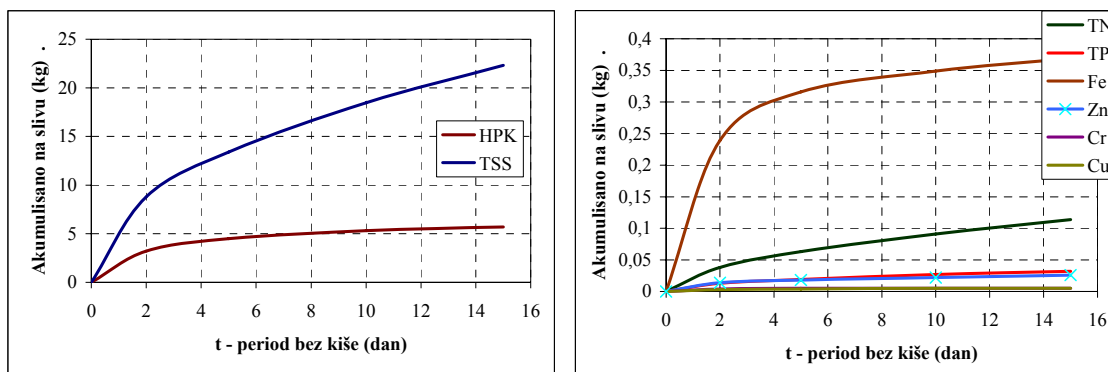
Za modeliranje akumulisanja i spiranja zagađenja sa sliva korišćene su funkcije i koeficijenti dati u tabeli 5-28. Koeficijenti funkcija akumulisanja su kalibrisani prema rezultatima istraživanja, a koeficijenti spiranja su defnisani na osnovu ispitivanja Wicke i sar. (2012) koja su sprovedena na istom tipu površina (asfalt, beton) kao na ispitivanom slivu.

Tabela 5-28. Funkcije akumulisanja i spiranja zagađenja korišćene za modeliranje zagađenja

<b>AKUMULISANJE ZAGAĐENJA</b>									
Parametar	Asfalt				Beton				
	Tip funk.	C <sub>1b</sub>	C <sub>2b</sub>	C <sub>3b</sub>	Parametar	Tip funk.	C <sub>1b</sub>	C <sub>2b</sub>	C <sub>3b</sub>
HPK	SAT	55,297	2,704		HPK	POW		11,662	0,159
TSS	POW		58,326	0,419	TSS	POW		14,619	0,588
TN	POW		0,209	0,465	TN	POW		0,093	0,661
TP	POW		0,079	0,397	TP	POW		0,025	0,620
Fe	EXP	2,733	0,717		Fe	POW		0,478	0,410
Zn	POW		0,100	0,202	Zn	POW		0,029	0,514
Cr	SAT	0,042	0,905		Cr	POW		0,011	0,267
Cu	POW		0,012	0,459	Cu	EXP	0,017	2,434	
<b>SPIRANJE ZAGAĐENJA</b>									
Parametar	Asfalt				Beton				
	Tip funk,	C <sub>1w</sub>	C <sub>2w</sub>		Parametar	Tip funk,	C <sub>1w</sub>	C <sub>2w</sub>	
HPK, TSS, TN, TP	EXP <sub>w</sub>	0,270	1,000		HPK, TSS, TN, TP	EXP <sub>w</sub>	0,240	1,000	
Fe, Zn, Cr, Cu	EXP <sub>w</sub>	0,320	1,000		Fe, Zn, Cr, Cu	EXP <sub>w</sub>	0,300	1,000	

### 5.10.3. Rezultati modela - akumulisanje zagađenja

Oba razmatrana modela (1,5D i shematizovani) daju iste rezultate akumulisanja zagađenja na slivu. Mase akumuliranih parametara na modeliranoj nepropusnoj površini sliva, u zavisnosti od broja uzastopnih dana bez kiše, su date na Slici 5-24. Usvojeno je da je masa svih parametara na površini jednaka nuli u početnom trenutku ( $t=0$ ).



Slika 5-24. Rezultati modela - akumulisanje materija na celoj nepropusnoj površini sliva

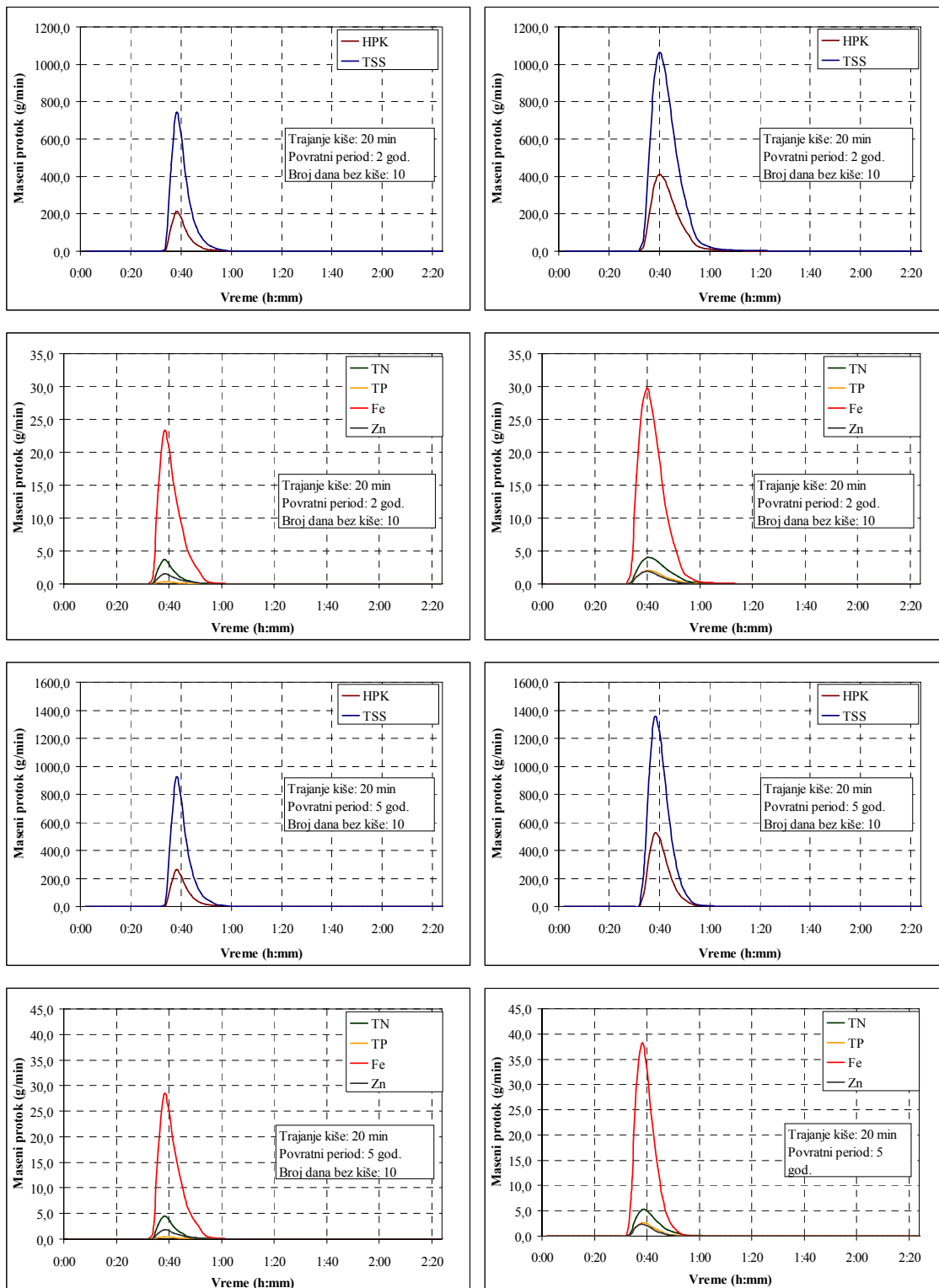
### 5.10.4. Rezultati modela - spiranje zagađenja

1,5D model i shematizovani model su testirani za kišu trajanja 20 minuta povratnog perioda 2 godine. Akumulisanje zagađenja na površinama sliva pre početka kiše se odvijalo u periodu od deset uzastopnih dana bez kiše. Da bi se održala numerička stabilnost proračuna, u 1,5D modelu je korišćen promenljivi vremenski korak proračuna dužine do 0,5 sekundi, dok je vremenski korak shematizovanog modela bio 1 sekunda.

Prilikom analiza emisija zagađenja sa sliva, pažnja je usmerena na ukupnu masu zagađenja koja se spira oticajem sa sliva ili na pronos mase kroz vreme na izlazu iz sliva. Dijagrami masenog pronosa zagađenja oticajem (polutogrami) sa celog sliva su dati na slici 5-25. Može se zaključiti da oba modela daju polutograme sličnog oblika i položaja, s tim da 1,5D model daje nešto niže ukupne količine zagađenja koje je sa sliva odneto površinskim oticajem.

Uzrok za ovo leži prvenstveno u mogućnostima 1,5D modela da modelira tečenje i privremeno zadržavanje vode u lokalnim depresijama. Usled toga dolazi do zadržavanja dela zagađenja unutar površina na slivu koje preostaje nakon padavina. Prema rezultatima proračuna, zagađenje koji preostaje u lokalnim depresijama iznosi oko 1/3 početne vrednosti zagađenja. U stvarnosti ovi lokaliteti na slivu se tokom vremena zapune materijalom tako da nema daljeg dodatnog akumulisanja zagađenja na

površini. Ovo bi moglo da se modelira preko dodatnog početnog zagađenja na delovima slivnih površina gde se očekuje pojačano izdvajanje materija iz oticaja, ali ovo bi zahtevalo obimna dodatna terenska ispitivanja i postupke kalibracije.



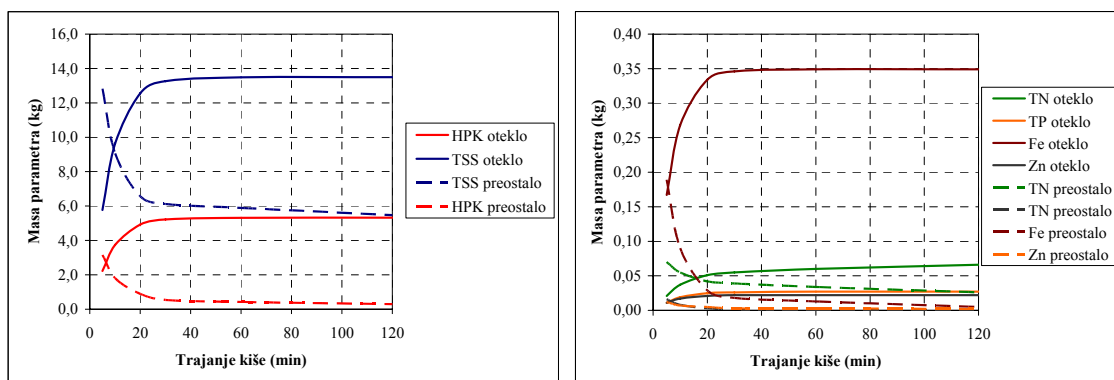
Slika 5-25. Dijagrami masenog pronosa parametara (polutogrami) za celi sliv za različite povratne periode kiše izračunati 1,5D modelom (levo) i shematizovanim modelom (desno)



U pogledu računarskog vremena potrebnog za sprovođenje proračuna, 1,5D kao znatno kompleksniji model zahteva oko 100 puta duže vreme za proračun od shematizovanog modela. Dalja analiza emisije zagađenja sa sliva vršena je shematizovanim modelom.

### 5.10.5. Uticaj trajanja kiše

Na slici 5-26 je data zavisnost mase spranog i preostalog HPK i TSS na slivu od trajanja kiše intenziteta 0,5 mm/min. Slični oblici dijagrama se dobijaju i za druge ispitivane parametre. Proračuni su sprovedeni za akumulaciju zagađenja na površinama u trajanju od 10 uzastopnih dana bez padavina.



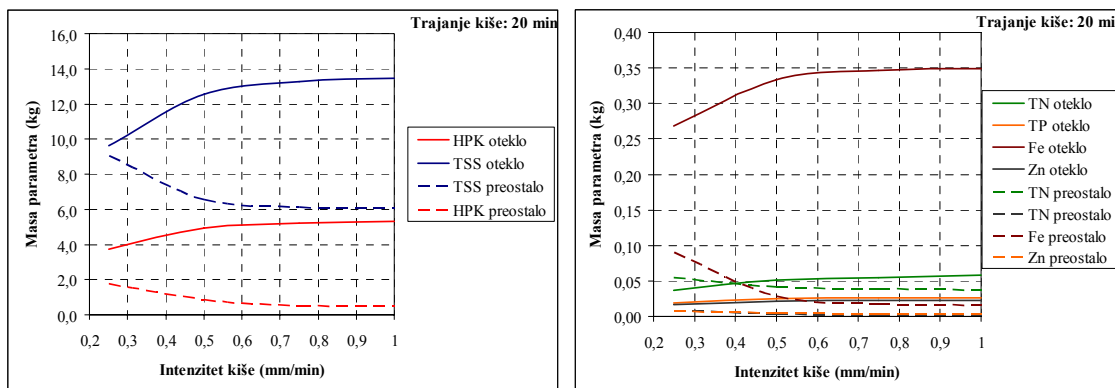
Slika 5-26. Masa spranog i preostalog zagađenja na slivu u zavisnosti od trajanja kiše intenziteta 0,5 mm/min, pre početka kiše bilo je 10 dana bez padavina

Iz rezultata se može zaključiti da već posle 20 minuta kiše intenziteta 0,5 mm dolazi do spiranja najvećeg dela zagađenja sa sliva.

### 5.10.6. Uticaj intenziteta kiše

Na slici 5-27 je data zavisnost mase spranog i preostalog HPK i TSS na slivu od intenziteta kiše trajanja 20 minuta. Slični oblici dijagrama se dobijaju i za druge ispitivane parametre. Proračuni su sprovedeni za akumulaciju zagađenja na površinama u trajanju od 10 uzastopnih dana bez padavina.

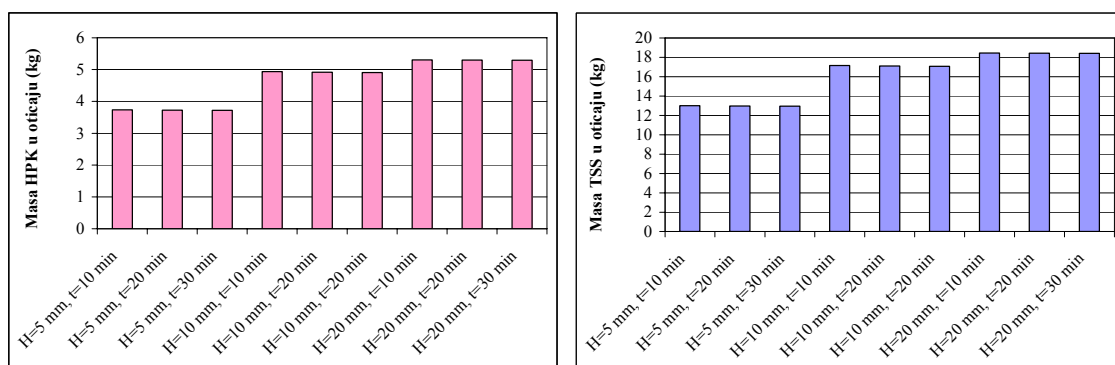
Iz rezultata se može zaključiti da kiša intenziteta 0,3 mm spira već preko 70% od maksimalne količine zagađenja koja se može sprati sa sliva. Masa zagađenja odneta sa sliva kišama intenziteta 0,6-0,7 mm/h dostiže maksimum, i daljim povećanjem intenziteta kiše ne dolazi do povećanja mase spranog zagađenja jer je praktično celokupna akumulacija zagađenja sa površine odnešena oticajem.



Slika 5-27. Masa spranog i preostalog HPK i TSS na slivu u zavisnosti od intenziteta kiše trajanja 20 min, pre početka kiše bilo je 10 dana bez padavina

### 5.10.7. Uticaj visine pale kiše

Na slici 5-28 su dati podaci o izračunatoj masi spranog HPK i TSS sa sliva za iste visine padavina i različita trajanja kiše. Slični oblici dijagrama se dobijaju i za druge ispitivane parametre. Proračuni su sprovedeni za akumulaciju zagađenja na površinama u trajanju od 10 uzastopnih dana bez padavina.

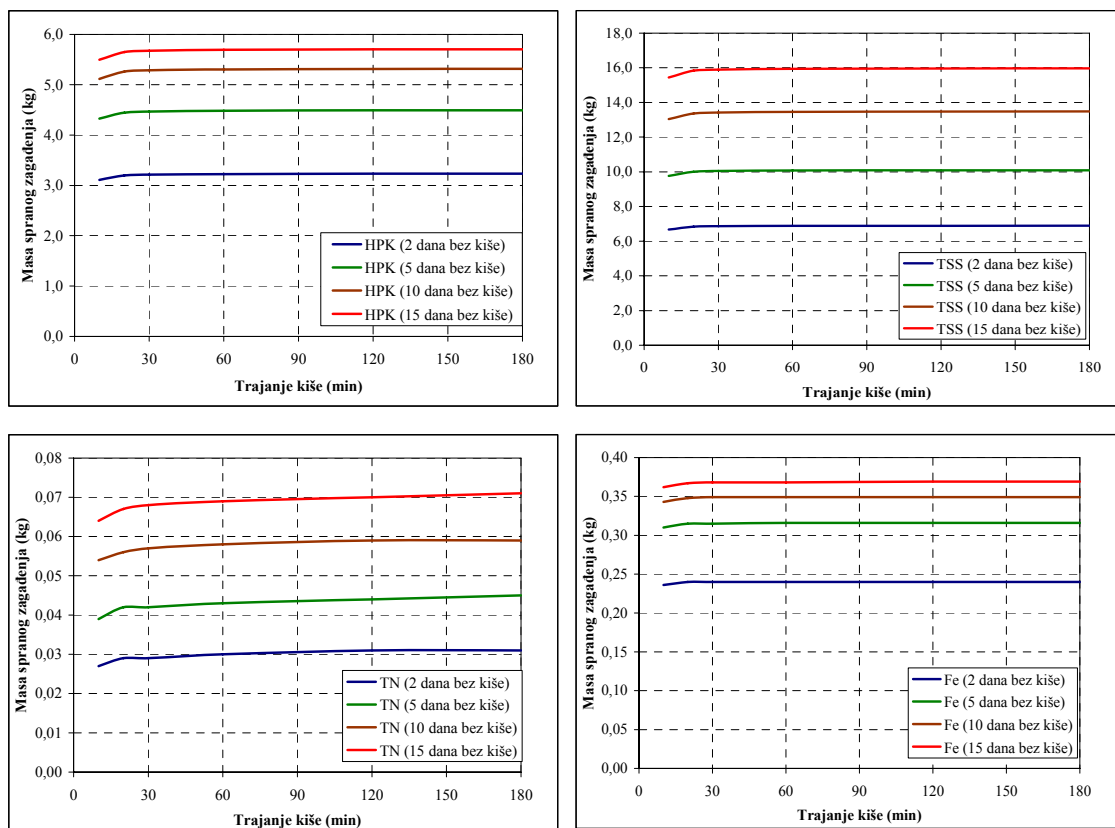


Slika 5-28. Masa spranog HPK i TSS sa sliva za iste visine padavina i različita trajanja kiše, pre početka kiše bilo je 10 dana bez padavina

Iz rezultata se može zaključiti da masa spranog zagađenja zavisi od visine kiše. Sa druge strane, ako se razmatra jedna visina kiše, dužina trajanja kiše ima zanemarljiv uticaj na ukupnu masu spranog zagađenja sa sliva.

### 5.10.8. Ukupna emisija zagađenja i preostalo zagađenje na površini za kiše istog povratnog perioda

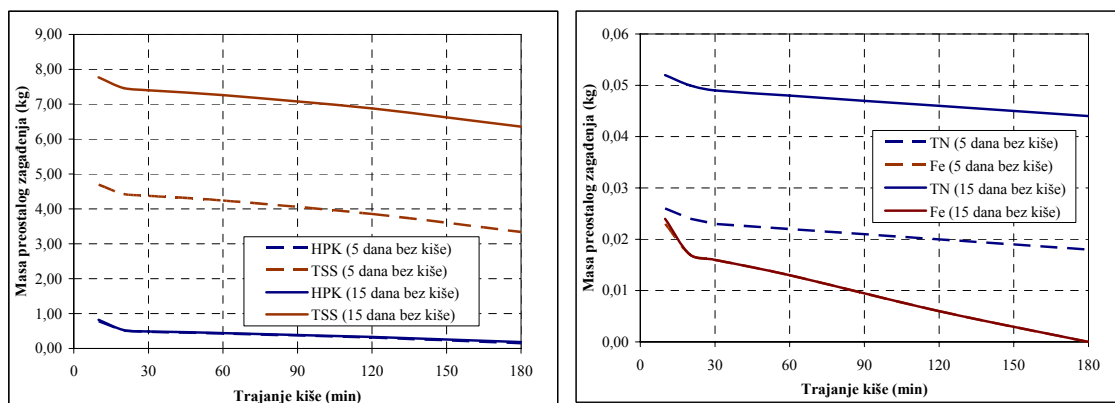
Na slici 5-29 su dati rezultati modeliranja mase parametara zagađenja odnetih sa sliva otcajem od kiša povratnog perioda 2 godine, pri različitoj početnoj akumulaciji zagađenja na slivu (različiti broj uzastopnih dana bez kiše pre početka kišnog događaja).



Slika 5-29. Emisija zagađenja sa sliva od kiša povratnog perioda 2 godine u zavisnosti od broja uzastopnih dana bez kiše pre početka kišnog događaja

Iz rezultata se može zaključiti da sa povećanjem broja uzastopnih dana bez kiše, raste i količina spranog zagađenja. Sa druge strane, za kiše istog povratnog perioda, masa odnetog zagađenja sa sliva praktično ne zavisi od trajanja kiše.

Na slici 5-30 data je zavisnost mase preostalih parametara na površini modeliranog sliva od trajanje kiše i broja uzastopnih dana bez kiše pre početka kišnog događaja. Krive za HPK i Fe za 5 dana bez kiše su preklapljene.



Slika 5-30. Zavisnost mase preostalog zagađenja na površini od trajanja kiše i broja uzastopnih dana bez kiše pre početka kišnog događaja

### 5.10.9. Uticaj oblika hijetograma na emisiju zagađenja

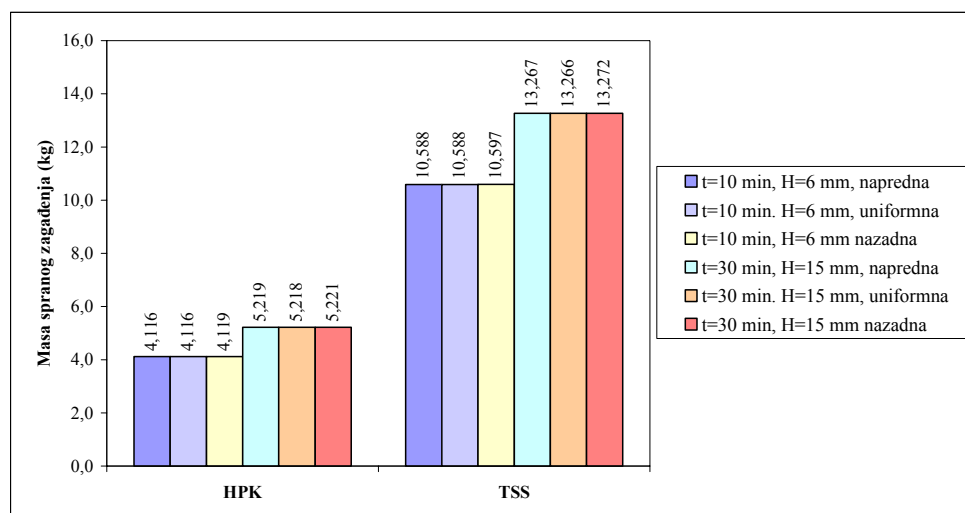
Na slici 5-31 su dati podaci o izračunatoj masi spranog HPK i TSS sa sliva pri sledećim kišnim epizodama:

- kiša trajanja 10 minuta, ukupna visina pale kiše 6 mm, i
- kiša trajanja 30 minuta, ukupna visina pale kiše 15 mm.

Za svaku od navedenih kiša sproveden je proračun sa hijetogramima sledećih oblika:

- nepromenljiv intenzitet kiše (uniformna kiša),
- "napredan" oblik hijetograma gde u prvoj polovini trajanja kiše padne 2/3 ukupne visine padavina a u drugoj polovini trajanja padne 1/3 visine kiše.
- "nazadan" oblik hijetograma gde u prvoj polovini trajanja kiše padne 1/3 ukupne visine padavina a u drugoj polovini trajanja padne 2/3 visine kiše.

Proračuni su sprovedeni za akumulaciju zagađenja na površinama u trajanju od 10 uzastopnih dana bez padavina.



Slika 5-31. Masa zagađenja spranog sa sliva oticajem od kiša trajanja 10 i 30 minuta, različitog oblika hijetograma

Iz rezultata se može zaključiti da je uticaj oblika hijetograma na masu spranog zagađenja praktično zanemarljiv. Ovi rezultati još jednom potvrđuju da količina spranog zagađenja prvenstveno zavisi od ukupne visine kiše.

### 5.10.10. Modeliranje emisije zagađenja surogat parametrom

Analizom korelacija između analiziranih parametara u poglavlju 5.8 utvrđeno je da suspendovane materije (TSS) pokazuju najbolju povezanost sa drugim parametrima.

Zato će TSS biti korišćen kao surogat parametar za modeliranje akumulisanja, pokretanja i transporta oticaja drugih parametara.

U poglavlju 5.5.1 je utvrđeno da akumulisanje suspendovanih materija (TSS) na asfaltnim i betonskim površinama najbolje opisuju stepene funkcije, i to:

$$\text{na asfaltu: } TSS = 58,326 \cdot t^{0,419}$$

$$\text{na betonu: } TSS = 14,619 \cdot t^{0,588}$$

Modeliranje surogat parametrom podrazumeva da se koncentracija nekog parametra P u oticaju može izraziti kao fiksni udeo od koncentracije surogat parametra u oticaju, odnosno u ovom slučaju TSS:

$$C_P = C_{sur} \cdot C_{TSS}$$

gde su  $C_P$  i  $C_{TSS}$  koncentracije parametra P i TSS u oticaju a  $C_{sur}$  je bezdimenzionalni koeficijent razmere između  $C_P$  i  $C_{TSS}$  koga treba odrediti iz rezultata merenja. U ovom istraživanju, koeficijent  $C_{sur}$  je određen na dva načina: iz podataka o akumulisanju zagađenja i iz podataka o kvalitetu oticaja, odnosno emisije sa sliva.

### Prvi način: korišćenje podataka o akumulisanju zagađenja

Spiranje i koncentracija zagađenja u oticaju zavise od količine akumulisanog zagađenja na površini. Da bi se ispitalo da li, u odsustvu sistematskih osmatranja oticaja sa sliva, podaci o akumulisanju zagađenja mogu biti korišćeni za određivanje koeficijenta  $C_{sur}$ , koeficijent  $C_{sur}$  određen je prema rezultatima merenja akumulisanja zagađenja. .

Koeficijent  $C_{sur}$ , za svaki parametar je određen minimizacijom sume kvadrata razlika između stepene funkcije i jednačine određivanja sadržaja parametra prema surogat paramteru, korišćenjem Excel Solver-a (Microsoft Excel 2007). Dobijene vrednosti parametara  $C_{sur}$  za sve parametre su date u tabeli 5-29.

Tabela 5-29. Vrednosti koeficijenata  $C_{sur}$  određenih iz podataka o akumulisanju zagađenja

Parametar	$C_{sur}$		
	Asfalt	Beton	Prosečno
HPK	0,2817	0,3242	0,3030
TN	0,0039	0,0075	0,0057
TP	0,0013	0,0019	0,0016
Fe	0,0192	0,0222	0,0207
Zn	0,0011	0,0017	0,0014
Cr	0,0003	0,0004	0,0003
Cu	0,0002	0,0002	0,0002

SWMM model podrazumeva da jedan parametar može imati samo jedan koeficijent  $C_{sur}$ , i da on važi sa sve vrste površina. Kako je udeo asfaltnih i betonskih površina na modeliranom slivu jednak, za modeliranje su korišćene prosečne vrednosti koeficijenta  $C_{sur}$  iz tabele 5-28.

Modeliranje emisije preostalih parametara, preko TSS kao surogat parametrom, je izvršeno za kiše trajanja 10 i 30 minuta, intenziteta 0,5 i 1,0 mm/min, za prethodno akumulisanje zagađenja na površinama tokom 2 i 10 dana bez kiše. Rezultati modeliranja emisije i veličina odstupanja rezultata modela, sa i bez korišćenja surogat parametra, su dati u tabeli 5-30.

Tabela 5-30. Masa parametara spranih oticajem sa sliva pri kišama različitog trajanja i intenziteta, izračunatih modelom sa i bez surogat parametra (kalibracija parametara prema akumulaciji zagađenja)

	Kiša		Br. dana bez kiše (dan)	HPK (kg)	TSS (kg)	TN (kg)	TP (kg)	Fe (kg)	Zn (kg)	Cr (kg)	Cu (kg)
	t (min)	H (mm)									
Modeliranje bez surogat parametra	10	5	2	2,264	6,245	0,018	0,009	0,185	0,011	0,003	0,002
	10	5	10	3,740	13,010	0,037	0,019	0,268	0,017	0,004	0,003
	10	10	2	2,998	8,229	0,025	0,012	0,231	0,013	0,004	0,003
	10	10	10	4,939	17,175	0,051	0,025	0,335	0,021	0,005	0,004
	30	15	2	3,172	8,688	0,028	0,012	0,239	0,014	0,004	0,003
	30	15	10	5,219	18,146	0,055	0,026	0,346	0,022	0,005	0,005
	30	30	2	3,234	8,848	0,032	0,013	0,240	0,014	0,004	0,003
	30	30	10	5,318	18,489	0,060	0,027	0,349	0,022	0,005	0,005
Modeliranje sa surogat parametrom	10	5	2	1,933	6,245	0,020	0,010	0,131	0,007	0,002	0,001
	10	5	10	3,942	13,010	0,074	0,010	0,269	0,014	0,004	0,003
	10	10	2	2,494	8,229	0,047	0,013	0,170	0,009	0,002	0,002
	10	10	10	5,204	17,175	0,098	0,027	0,356	0,018	0,005	0,003
	30	15	2	2,632	8,688	0,050	0,014	0,180	0,010	0,003	0,002
	30	15	10	5,498	18,146	0,103	0,029	0,376	0,019	0,005	0,004
	30	30	2	2,681	8,848	0,050	0,014	0,183	0,010	0,003	0,002
	30	30	10	5,602	18,489	0,105	0,030	0,383	0,019	0,006	0,004
Odstupanje (%)	10	5	2	14,6	0,0	-11,1	-11,1	29,2	36,4	33,3	50,0
	10	5	10	-5,4	0,0	-100,0	47,4	-0,4	17,6	0,0	0,0
	10	10	2	16,8	0,0	-88,0	-8,3	26,4	30,8	50,0	33,3
	10	10	10	-5,4	0,0	-92,2	-8,0	-6,3	14,3	0,0	25,0
	30	15	2	17,0	0,0	-78,6	-16,7	24,7	28,6	25,0	33,3
	30	15	10	-5,3	0,0	-87,3	-11,5	-8,7	13,6	0,0	20,0
	30	30	2	17,1	0,0	-56,3	-7,7	23,8	28,6	25,0	33,3
	30	30	10	-5,3	0,0	-75,0	-11,1	-9,7	13,6	-20,0	20,0
srednje odstupanje (%)				4,90	0,00	-65,37	-3,01	8,78	20,39	12,59	23,89

Iz rezultata se može zaključiti da prvi metod daje veoma dobra predviđanja emisije HPK, TP i Fe. Nešto veća greška je kod određivanja emisije preostalih teških metala (Zn, Cr i Cu), a najveća greška je kod određivanja TN gde model sa surogat parametrom sistematski precenjuje emisije TN sa sliva.

### **Drugi način: korišćenje podataka o emisiji zagađenja sa sliva**

Ovaj način određivanja koeficijenata je dobro dokumentovan u literaturi (Beck i Birch 2012; Kayhanian i sar. 2007; Miguntanna i sar. 2010b;, Kayhanian i sar. 2012). Koeficijenti  $C_{sur}$  za svaki parametar se određuju iz kvaliteta oticaja, koji se dobijaju merenjima ili, kao u ovom slučaju, iz rezultata modela oticaja. Vrednosti izračunatih vrednosti parametara  $C_{sur}$  su dati u tabeli 5-31.

Tabela 5-31. Vrednosti koeficijenata  $C_{sur}$  određenih iz kvaliteta oticaja

<b>Parametar</b>	<b><math>C_{sur}</math></b>
HPK	0,32599
TN	0,00311
TP	0,00144
Fe	0,02380
Zn	0,00143
Cr	0,00038
Cu	0,00030

Modeliranje emisije preostalih parametara preko TSS kao surogat parametrom je izvršeno za kiše trajanja 10 i 30 minuta, intenziteta 0,5 i 1,0 mm/min, za prethodno akumulisanje zagađenja na površinama tokom 2 i 10 dana bez kiše. Rezultati modeliranja emisije i veličina odstupanja rezultata modela sa i bez korišćenja surogat parametra su dati u tabeli 5-31.

Sa izuzetkom bakra, odstupanja ukupne mase preostalih parametara između dva modela su uvek ispod 5%.

Može se zaključiti da drugi metod daje bolje slaganje rezultata između modela sa surogat parametrom i modela bez surogat parametra. Međutim u odsustvu sistematskih rezultata merenja na slivu, prvi metod može dati dobru početnu aproksimaciju koeficijenata za modeliranje pomoću surogat parametra.

Tabela 5-32. Masa parametara spranih oticajem sa sliva pri kišama različitog trajanja i intenziteta, izračunatih modelom sa i bez surogat parametra (kalibracija parametara prema kvalitetu oticaja)

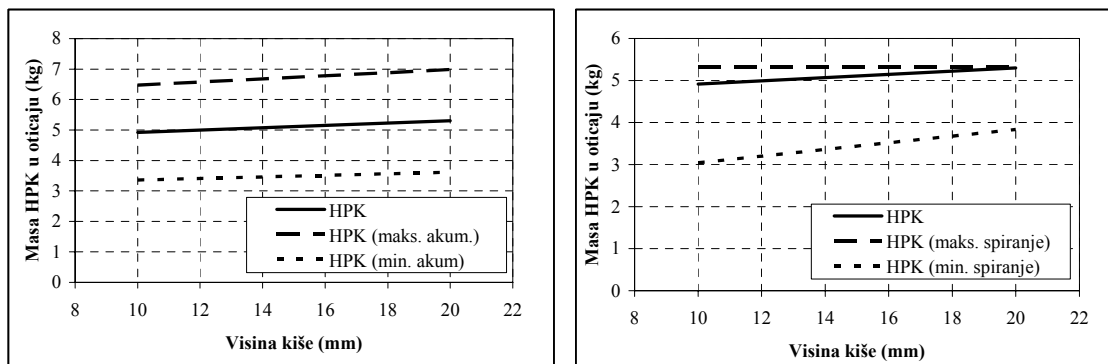
	Kiša		Br. dana bez kiše (dan)	HPK (kg)	TSS (kg)	TN (kg)	TP (kg)	Fe (kg)	Zn (kg)	Cr (kg)	Cu (kg)
	t (min)	H (mm)									
Modeliranje bez surogat parametra	10	5	2	2,264	6,245	0,018	0,009	0,185	0,011	0,003	0,002
	10	5	10	3,740	13,010	0,037	0,019	0,268	0,017	0,004	0,003
	10	10	2	2,998	8,229	0,025	0,012	0,231	0,013	0,004	0,003
	10	10	10	4,939	17,175	0,051	0,025	0,335	0,021	0,005	0,004
	30	15	2	3,172	8,688	0,028	0,012	0,239	0,014	0,004	0,003
	30	15	10	5,219	18,146	0,055	0,026	0,346	0,022	0,005	0,005
	30	30	2	3,234	8,848	0,032	0,013	0,240	0,014	0,004	0,003
	30	30	10	5,318	18,489	0,060	0,027	0,349	0,022	0,005	0,005
Modeliranje sa surogat parametrom	10	5	2	1,933	6,245	0,019	0,010	0,131	0,007	0,002	0,002
	10	5	10	4,241	13,010	0,040	0,010	0,310	0,014	0,005	0,004
	10	10	2	2,683	8,229	0,026	0,012	0,196	0,009	0,003	0,002
	10	10	10	5,599	17,175	0,053	0,025	0,409	0,018	0,007	0,005
	30	15	2	2,832	8,688	0,027	0,013	0,207	0,010	0,003	0,003
	30	15	10	5,915	18,146	0,056	0,026	0,432	0,019	0,007	0,005
	30	30	2	2,884	8,848	0,028	0,013	0,211	0,010	0,003	0,003
	30	30	10	6,028	18,489	0,058	0,027	0,440	0,019	0,007	0,006
Odstupanje (%)	10	5	2	14,6	0,0	-5,6	-11,1	29,2	36,4	33,3	0,0
	10	5	10	-13,4	0,0	-8,1	47,4	-15,7	17,6	-25,0	-33,3
	10	10	2	10,5	0,0	-4,0	0,0	15,2	30,8	25,0	33,3
	10	10	10	-13,4	0,0	-3,9	0,0	-22,1	14,3	-40,0	-25,0
	30	15	2	10,7	0,0	3,6	-8,3	13,4	28,6	25,0	0,0
	30	15	10	-13,3	0,0	-1,8	0,0	-24,9	13,6	-40,0	0,0
	30	30	2	10,8	0,0	12,5	0,0	12,1	28,6	25,0	0,0
	30	30	10	-13,4	0,0	3,3	0,0	-26,1	13,6	-40,0	-20,0
srednje odstupanje (%)				4,90	0,00	-0,75	0,00	-0,44	3,10	-2,10	20,39

#### 5.10.11. Osetljivost modela na promenu ulaznih parametara

Ispitana je osetljivost rezultata modela na promenu ulaznih parametara koji definišu akumulisanje i spiranje zagađenja. Svaki od parametara koji definišu akumulisanje parametara na površini i njihovo spiranje oticajem su varirani u opsegu  $\pm 33\%$  oko vrednosti koja je određena iz rezultata terenskih i laboratorijskih ispitivanja. Proračuni su izvedeni na shematizovanom modelu sliva za kiše trajanja 20 minuta i visine pale kiše 10 i 20 mm.

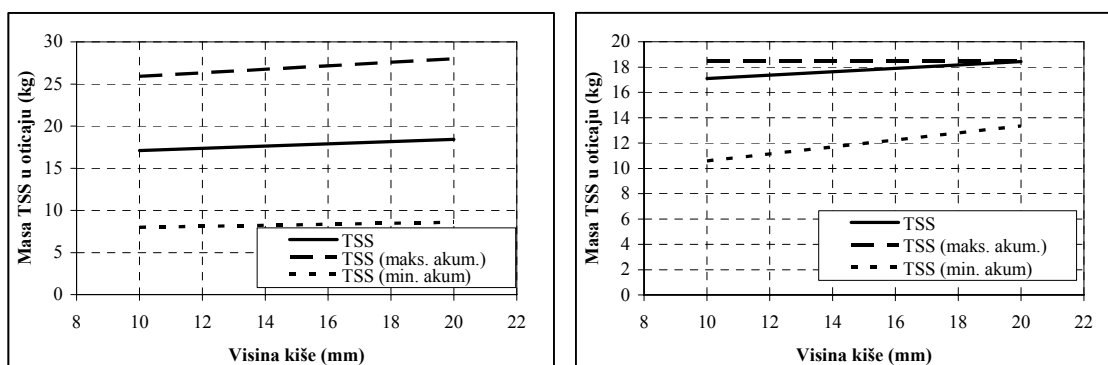
Rezultati proračuna za HPK je dat na slici 5-32 a za TSS na slici 5-33.





Slika 5-32. Mase HPK u oticaju izračunate sa početnim, maksimalnim i minimalnim vrednostima koeficijenata koji definišu akumulisanje i spiranje zagađenja na površini sliva

Variranje koeficijenata koji definišu akumulisanje HPK u opsegu od  $\pm 33\%$ , proizvelo je varijaciju u masi HPK u oticaju od  $\pm 32\%$ . Smanjenje koeficijenata koji figurišu u jednačinama spiranja HPK za 33% dovelo je do smanjenja mase HPK u oticaju između 28 i 38%. Sa druge strane, povećanje ovih koeficijenata za 33% je dovelo do neznatnog povećanja mase HPK u oticaju, između 0,5 i 8%. Uzrok ovome leži u tome što je za početne vrednosti koeficijenata već došlo do spiranja najvećeg dela HPK oticajem tako da ima malo preostalog akumulisanog HPK na površini.



Slika 5-33. Mase TSS u oticaju izračunate sa početnim, maksimalnim i minimalnim vrednostima koeficijenata koji definišu akumulisanje i spiranje zagađenja na površini sliva

Variranje koeficijenata koji definišu akumulisanje TSS u opsegu od  $\pm 33\%$ , proizvelo je varijaciju u masi TSS u oticaju od  $\pm 52\%$ . Ovo je znatno veća varijacija nego za HPK i može se pripisati tome što se akumulisanje TSS opisuje stepenom funkcijom, za razliku od HPK čije akumulisanje se opisuje krivom saturacije. Smanjenje koeficijenata koji figurišu u jednačinama spiranja TSS za 33% dovelo je do smanjenja mase TSS u oticaju između 28 i 38%. Sa druge strane, povećanje ovih koeficijenata za 33% je dovelo do neznatnog povećanja mase HPK u oticaju, između 0,5% i 8%. Uzrok za ovo je isti kao što je opisano za HPK.

## 6. ZAKLJUČCI

### 6.1. AKUMULISANJE ZAGAĐENJA

- Rezultati sprovedenih ispitivanja na eksperimentalom slivu su ukazala da:
  - akumulisanje zagađenja na nepropusnim površinama pokazuje tendenciju usporavanja kroz vreme, odnosno da teži zasićenju,
  - tokom 12 dana bez padavina nije došlo do zasićenja nepropusnih površina zagađenjem.
- Eksperimentalni sliv, gde su vršena ispitivanja, odlikuje veoma izražena akumulacija zagađenja na površinama, što je posledica, između ostalog, erozije okolnih zelenih površina i odsustva sistematskog čišćenja.
- Rezultati merenja akumulisanja zagađenja su aproksimirani funkcijama POW, EXP i SAT, i sve razmatrane funkcije su, za svaki pojedinačni parametar, bliske u opisivanju trendova akumulisanja zagađenja, osim za bakar, za koji zbog rasipanja rezultata razmatrane krive nisu mogle biti uspostavljene. Za uzorke sa asfalta, najbolje slaganje najčešće pokazuje stepena funkcija POW (TSS, TN, TP, Zn), dok eksponencijalna funkcija EXP daje najbolje slaganje za Cr i Fe, a saturaciona funkcija SAT za HPK. Za rezultate uzoraka sa betona najbolja slaganja sa merenjima u odnosu na druge funkcije uvek daje stepena funkcija POW.
- Testirane su nove funkcije L-E, L-P akumulisanja zagađenja koje se sastoje od linearnog člana bruto priraštaja zagađenja kroz vreme, dok se simultano uklanjanje zagađenja sa površine predstavlja funkcijom zavisnom od vremena koja može biti eksponencijalna (kod L-E funkcije) ili stepena funkcija (kod L-P funkcije). Pored ovih, testirana je linearna funkcija LIN priraštaja zagađenja kroz vreme. Za uzorke sa asfalta nova funkcija L-P daje najbolja slaganje za TSS, Zn i Cu. Za preostale parametre, najbolja slaganja daju ranije opisane funkcije POW (TN, TP), EXP (Fe, Cr) i SAT (HPK). Sa druge strane, za rezultate merenja uzoraka sa betona, najbolja slaganja sa merenjima uvek imaju nove funkcije, pri čemu najčešće najbolje slaganje sa rezultatima merenja daje funkcija L-P, odnosno kombinacija linearne i stepene funkcije. Ovo ponovo ukazuje na to da u periodu uzorkovanja nije bila dostignuta saturacija ispitivanih površina zagađenjem.

## 6.2. DNEVNI PRIRAŠTAJ ZAGAĐENJA

- Analiza podataka je ukazala da je ukupan (bruto) dnevni priraštaj zagađenja nekoliko puta veći od procenjenih neto dnevnih priraštaja zagađenja, odnosno da je razgradnja ili odnošenje zagađenja sa razmatranih nepropusnih površina značajno, i da je to glavni razlog usporavanja priraštaja zagađenja na ispitanim površinama.
- Razlika u neto dnevnim priraštajima (količinama materija koje se zadržavaju na različitim tipovima površina za jedan dan) je veoma izražena između različitih tipova površina, gde je za sve merene parametre najveći dnevni priraštaj na asfaltu a najmanji na kamenu. Ove razlike su najveće za TS, TP i Fe, gde razmere iznose 8,0, 4,6 i 4,7. Najmanje razlike su za TN i Zn, gde ova razmera iznosi samo oko 1,5. Razmera neto dnevnog priraštaja zagađenja između betonske i kamene površine su obično bile između 1,5 i 2,5 u korist betonske površine, osim za vrednosti za TN i Zn gde je razmera bila znatno manja.
- Može se zaključiti da akumulisanje zagađenja na ispitivanim lokacijama zavisi od karakteristika površine, gde veća hrapavost utiče na veće zadržavanje zagađenja i stoga bržu i veću akumulaciju zagađenja.
- Način korišćenja površine je takođe od značaja, gde površine pod direktnim uticajem motornog saobraćaja (asfalt) su zagađenije od površina za pešake koje se povremeno koriste za parkiranje vozila (beton), a najmanje zagađenja je na kamenoj površini koja nema direktnog kontakta ni sa vozilima ni pešacima. Stoga, materije koje su izdvojene na ispitivanoj kamenoj površini predstavljaju materije koje su se istaložile iz atmosfere, odnosno atmosferski deponit, bez uticaja spiranja sa okolnih površina ili uticaja kontakta sa motornim i/ili pešačkim saobraćajem.
- Može se zaključiti da je, osim za ukupni azot, neto dnevni priraštaj zagađenja na asfaltu u letnjem periodu bio veći nego u jesen (42% veći za HPK, 30% veći za TSS, preko 70% veći za TP, Zn i Cr, i 16.5% za Fe). Za beton, su takođe dnevni priraštaji zagađenja veći u julu nego u oktobru, ali te razlike su nešto manje: 2% veće za HPK, 41% veće za TSS, 65% za TP, 9% za Fe, 78% veće za Zn i 29% za Cr. Stoga, može se zaključiti da su, za date uslove koji su vladali na eksperimentalnom slivu u Beogradu, neto dnevni priraštaji zagađenja na nepropusnim površinama bili veći tokom letnjih meseci nego početkom jeseni. Potrebna su dalja istraživanja da bi se bliže odredili svi faktori koji na ovo utiču.

### 6.3. ISPITIVANJA ČVRSTE FAZE

- U čvrstoj fazi, izdvojenoj iz uzoraka zahvaćenih jula meseca 2013. godine sa asfaltnih i betonskih površina, dominiraju frakcije  $>120\ \mu\text{m}$  čiji težinski udeo u uzorku iznosi 81,6%.
- Koncentracija teških metala je znatno veća u sitnijim frakcijama čvrste faze. Tako na čvrstu frakciju čestica prečnika preko  $125\ \mu\text{m}$  odlazi 81,6% ukupne težine uzorka, ali zato 60,7% težine teških metala. Na frakciju čestica prečnika manjeg od  $90\ \mu\text{m}$  odlazi samo 15,5% težine uzoraka, ali ova frakcija sadrži čak 35,2% težine teških metala. Najveću tendenciju koncentrisanja u najsitnijim frakcijama ispitivanih čvrstih čestica pokazali su TP, Cu, Zn i Pb, a najmanju Ni i Cr.
- Rezultati strukturnih analiza specifične površine i ukupne zapremine pora čestica u svim granulometrijskim frakcijama ispitivane čvrste faze, izmereni metodom niskotemperaturne adsorpcije azota i metodom porozimetrije živom, ukazuju na to da su proučavane čvrste frakcije pretežno makroporozni materijali, niske specifične površine.
- Rezultati SEM i EDS analiza ukazuju da su čestice u uzorcima prirodnog porekla i da pretežno sadrže prirodni silicijum, odnosno kvarcni pesak. Pored toga, EDS analize nisu potvrdile prisustvo teških metala na površini ispitivanih materijala. Ovo je potvrđeno i XRD analizom čvrstih čestica. Ovo ukazuje na to da nije došlo do sorpcije i/ili izmene jona teških metala na površini ispitivanih čestica.
- Zbog svoje neporozne prirode, visok sadržaj kvarca i magnetita u ispitivanim uzorcima čvrstih frakcija može objasniti makroporoznu strukturu i niske specifične površine ispitivanih čestica.

## 6.4. KORELACIJA PARAMETARA

- Analiza linearne povezanosti (korelacije) je ukazala na sledeće:
  - Elektroprovodljivost ima veoma niske vrednosti koeficijenta korelacije za skoro sve ispitivane parametre. Izuzetak su rezultati za uzorke sa asfalta i betona, gde je elektroprovodljivost dobro korelisana sa TS, TSS, mutnoćom i pojedinim teškim metalima i jonima.
  - Mutnoća je veoma dobro korelisana sa suvim ostatkom (TS) i supendovanim materijama (TSS). Mutnoća je takođe dobro korelisana sa HPK, TP, Fe, Zn, Cr i sulfatima, što može ukazivati na prirodu i sastav čvrstih materija u ispitivanim uzorcima. S obzirom da se mutnoća može brzo, pouzdano i kontinualno meriti, ona je potencijalno najbolji kandidat za surogat parametar preko koga bi se posredno mogao procenjivati, sa dovoljnom pouzdanošću, sadržaj niza drugih parametra u oticaju, kao što su TS, TSS, HPK, teški metali i TP.
  - U svim uzorcima TS i TSS su potpuno korelisani. Oba parametra su dobro korelisana sa HPK, nutrijentima (nešto slabije sa TN) i teškim metalima, te se stoga TS, a naročito TSS, mogu smatrati kao surogat parametri za sadržaj teških metala i donekle nutrijenata, naročito TP.
  - Dobra korelisanost TN sa teškim metalima je primetna, naročito sa gvoždem.
  - Joni, osim sulfata, pokazuju slabu korelisanost sa ostalim parametrima. Takođe primetno je rasipanje vrednosti koeficijenta korelacije za ove parametre i za različite tipove ispitivanih površina, što ukazuje na visoku rastvorljivost ovih materija u urbanom oticaju i/ili odsustvo interakcije sa drugim analiziranim materijama.
- PCA analiza je u pogledu korelisanosti parametara potvrdila analize linearne korelacije. PCA analiza je takođe pokazala da se rezultati merenja sa pojedinih površina jasno grupišu na dijagramima, što ukazuje da uzorci sa pojedinih površina pokazuju međusobne sličnosti u svojoj strukturi i sastavu, i ovu pojavu treba dodatno istražiti.

## **6.5. RAZDVAJANJE FAZA TEŠKIH METALA U ISPITANIM UZORCIMA**

- U svim merenjima ustanovljena je mala razlika između suvog ostatka i (TS) i suspendovanih materija (TSS), odnosno relativno nizak udeo rastvorenih materija u uzorcima. To je potvrđeno merenjima koncentracija teških metala u rastvorenom i nerastvorenom obliku, gde je vrlo niski udeo teških metala u rastvorenom obliku, odnosno veoma je izraženo razdvajanje čvrste i tečne faze teških metala. Ovo je veoma izraženo za Fe i Zn, gde je udeo rastvorenih oblika do 5%, a ovaj procenat je nešto veći za Cr i Cu.
- Fizičko-hemijska karakterizacija površina čestica čvrste faze nije potvrdila prisustvo teških metala (Cr, Ni, Cu, Zn, Pb) na površinama ispitivanih čvrstih čestica.
- Iz svih analiza može se zaključiti da adsorpcija nije uzrok dobrog razdvajanja tečne i čvrste faze teških metala, već da bi uzrok ove pojave u ispitivanim uzorcima moglo biti taloženje. U prilog ovoj tvrdnji ide i činjenica da je pH reakcija ispitivanih uzoraka bila u neutralnom opsegu, ili čak blago bazna, i da je sadržaj rastvorenog kiseonika bio dovoljan za odvijanje ovih procesa.

## **6.6. MODELIRANJE OTICAJA I ZAGAĐENJA**

- 1,5D model može uspešno da modelira površinsko oticanje po nepropusnim površinama, uključujući i modeliranje tečenja privilegovanim putevima duž površine, privremeno akumulisanje voda u lokalnim depresijama, tečenje u delovima sliva sa kontranagibima, kao i akumulisanja i spiranja zagađenja sa nepropusnih površina.
- Ukupna masa zagađenja koja se spira površinskim oticajem prvenstveno zavisi od visine pale kiše, dok je uticaj trajanja kiše i oblika hijetograma zanemarljiv.
- Ukupna masa zagađenja, koja se spira površinskim oticajem od kiša istog povratnog perioda, prvenstveno zavisi od količine akumulisanog zagađenja na slivu, dok je uticaj trajanja kiše veoma mali.

- Rezultati ukazuju na to da se najveći deo zagađenja (>80%) odnese spiranjem od kiše ukupne visine od oko 10 mm.
- Prilikom modeliranja zagađenja korišćenjem surogat parametara, koeficijente razmere između koncentracije modeliranog parametra i surogat parametra je najbolje odrediti iz rezultata merenja kvaliteta oticaja. U odsustvu ovih podataka, kao dovoljno dobra aproksimacija, mogu se koristiti podaci o akumulisanju parametara zagađenja na površinama razmatranog sliva.
- Modeliranje zagađenja u oticaju je osetljivo na promenu parametara koji definišu akumulisanje i spiranje zagađenja. Stoga je neophodno definisati zakonitosti akumulisanja i spiranja zagađenja na osnovu rezultata istraživanja na konkretnoj lokaciji koja se modelira.

## **6.7. PREPORUKE ZA IZBOR MERA ZA KONTROLU OTICAJA**

Merenja su ukazala na veliki doprinos erozije sa zelenih površina akumulisanju zagađenja na ispitivanim nepropusnim površinama. Stoga, kontrola i smanjenje erozije može dovesti do smanjenja ukupnih količina materijala koje se akumuliraju i, kasnije, odnose površinskim oticajem sa urbanih nepropusnih površina.

Redovno čišćenje ulica je opšte prihvaćeno kao jedna od najčešće primenjivanih najboljih praksi u kontroli kvaliteta oticaja, te je potrebno uvesti u domaću praksu planiranje ove mere i prema zahtevima kontrole kvaliteta oticaja.

Velika prostorna i vremenska promenljivost svih parametara površinskog oticaja, kao i činjenica da zagađenje koje se spira oticajem potiče iz rasutih izvora zagađenja, predstavlja teškoću u uspostavljanju jednostavnih pravila i zahteva u pogledu kontrole i smanjenja zagađenja od urbanog uticaja. Stoga, uvođenje graničnih vrednosti emisije, odnosno maksimalnih dozvoljenih koncentracija parametara u kišnom oticaju koji se ispušta u vodoprijemnike, ne deluje kao opravdano i praktično primenjivo u praksi.

Sa druge strane, pristup ovoj problematici u zakonodavstvu EU, a delom i u Srbiji, je da sva ispuštanja u vode budu takva da ne naruše dobar status vodnih tela. Ovo ukazuje da je krajnji cilj smanjenje negativnih uticaja od ljudskih aktivnosti, što podrazumeva da se u prvom koraku moraju odrediti uslovi na slivu bez urbanizacije, a

zatim primenom odgovarajućih mera se negativni uticaji urbanizacije i drugih ljudskih aktivnosti kontrolišu da ne pređu neku vrednost koja ne ugrožava opstanak i razvoj ljudske zajednice, ali ni ciljani status vodnog tela. Ovakav pristup veoma zavisi od lokalnih specifičnosti i zahteva dodatne napore za istraživanja, analize i testiranja projektna rešenja.

S obzirom da rezultati istraživanja ukazuju da emisija zagađenja prvenstveno zavisi od visine kiše, mere i tehnička rešenja moraju biti usmerene ka smanjenju (kontroli) oticaja i kontroli kvaliteta oticaja od kiše određene ukupne visine padavina, određene prema specifičnostima konkretnog sliva i karakterisitkama vodoprijemnika. Od tehničkih rešenja, koja bi doprinela ostvarenju ovakvih ciljeva, nameću se sistemi za simultanu kontrolu količina i kvaliteta oticaja, jer se upravo na taj način smanjuju izmene prirodnog hidrološkog režima usled urbanizacije.

Efekti od zagađenja u oticaju mogu biti akutni i hronični. Protiv akutnih efekata treba se boriti prevencijom i akcionim planovima pri akcidentima. Dugoročni (hronični) efekti zagađenja potencijalno nose veliki rizik od nedostizanja propisanog statusa vodnog tela u koje se urbani oticaj izliva. Za analizu dugoročnih efekata je potrebno uspostavljanje odgovarajućeg monitoringa i uvođenja u praksu analiza biodostupnosti zagađenja, analiza specifičnih formi zagađenja i toksikoloških ispitivanja. Rezultati ovih analize će izvesno voditi ka tome da se kao mere za kontrolu zagađenja propisuju mere ograničavanja ukupne zapremine oticaja i ukupne količine (mase) zagađenja koje se sa sliva mogu oticajem uneti u recipijent. Zbog kompleksnosti ovog problema, neophodna su dodatna istraživanja.

U pogledu planiranja mera za kontrolu količina i kvaliteta urbanog oticaja, važno je voditi računa da se u urbanom oticaju manji deo zagađenja nalazi u rastvorenom obliku, a značajniji deo u susepdovanom obliku, koji je delom vezan za najsitnije čvrste čestice.

Na kraju, preporučuje se kontinuirano obaveštavanje javnosti o značaju ovih aktivnosti, kao i podizanje svesti javnosti o značaju ove problematike.



## 6.8. PREDLOG ZA DALJA ISTRAŽIVANJA

Predlaže se sprovođenje sledećih aktivnosti u budućnosti, koje se nadovezuju na istraživanja iz ove disertacije:

- Uspostavljanje detaljnih hidroloških i meteoroloških merenja na eksperimentalnom slivu.
- Merenje kvaliteta i protoka oticaja sa: (a) asfaltnih i betonskih površina i (b) krova u okviru eksperimentalnog sliva. Analiza rezultata i definisanje kvaliteta rezultata praćenja zagađenja preko surogat parametara.
- Izbor adekvatne metode merenja kvaliteta i protoka oticaja sa propusnih (zelenih) površina. Testiranje metode i analiza rezultata.
- Zahvatanje i analiza uzorka metodom mokrog usisavanja sa nepropusnih površina tokom različitih sezona radi daljih ispitivanja sezonskih zavisnosti akumulisanja i priraštaja zagađenja.
- Ispitivanja zavisnosti parametara zagađenja u odnosu na hidrološke i meteorološke uslove na slivu (padavine, brzina vetra, veličina i brzina kišnih kapi i dr.).
- Analiza specifičnih zagađenja na površini i u oticaju sa sliva (PAH, specifični organski polutanti, TOC, mikropolutanti, mikrobiološka zagađenja i dr.).
- Uvođenja metoda za zadržavanje i tretman kišnih voda na eksperimentalnom slivu, testiranje i analiza njihovog rada i efikasnosti.

## 7. LITERATURA

- American Public Health Association / American Water Works Association / Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd Ed. Washington DC, USA. (2012)
- 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
- Avellaneda P., Ballesteros T., Roseen R. and Houle J. (2010) Modeling Urban Storm-Water Quality Treatment: Model Development and Application to a Surface Sand Filter. *Journal of Environmental Engineering* 136, 68-77
- 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
- Beck H.J., Birch G.F. (2012) Spatial and Temporal Variance of Metal and Suspended Solids Relationships in Urban Stormwater—Implications for Monitoring. *Water Air Soil Pollut* 223, 1005–1015
- Bertrand-Krajewski, J.-L. 2007. Stormwater pollutant loads modeling: Epistemological aspects and case studies on the influence of field data sets on calibration and verification. *Water Science and Technology* 55 (4): 1–17.
- Charbeneau R.J., Barrett M.E. (1998) Evaluation of Methods for Estimating Stormwater Pollutant Loads. *Water Environment Research* 70, 1295-1302
- Cheah C.H., Ball J.E., Cox R.J. (2008) Kinematic Wave Modelling of Surface Runoff Quality for Small Urban Catchments. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008
- 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
- Chen J., Adams B.J. (2006) Analytical Urban Storm Water Quality Models Based on Pollutant Buildup and Washoff Processes. *Journal of Environmental Engineering*, 132, 1314–1330
- Dean, C., Sansalone, J., Cartledge, F., Pardue, J. (2005) Influence of hydrology on stormwater metal element speciation, *Journal of Environmental Engineering*, 131(4), 632–642
- Deletic A. (1998) The First Flush Load of Urban Surface Runoff. *Water Research* 32, 2462-2470
- Deletic A., Maksimovic C., Loughreit F., Butler D. (1998) Modelling the management of street surface sediments in urban runoff. In: *Proceedings of the International Congress of Innovative Technologies in Urban Storm Drainage 1998-Novatech '98*, Lyon, France.
- Deletic A., Orr D. (2005) Pollution buildup on road surfaces. *Journal of Environmental Engineering* 131 (1), 49-59.
- Dotto C.B.S., Kleidorfer M., Deletic A., Rauch W., McCarthy D.T., Fletcher T.D. (2011) Performance and sensitivity analysis of stormwater models using a Bayesian approach and long-term high resolution data. *Environmental Modelling & Software* 26 (2011) 1225-1239

- Duong T.T.T., Lee B. (2011) Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics. *J. Environ. Manag.* 92 (3), 554-562.
- Egodawatta P., Goonetilleke A. (2008) Understanding urban road surface pollutant wash-off and underlying physical processes using simulated rainfall. *Water Science and Technology* 57 (8), 1241-1246.
- Egodawattaa P., Thomas E., Goonetilleke A. (2007) Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall. *Water Research* 41 (2007) 3025 – 3031
- Egodawatta P., Goonetilleke A. (2008) Modelling Pollutant Build-up and Wash-off in Urban Road and Roof surfaces. Proceedings of the 31st Hydrology and Water Resources Symposium and the 4th International Conference on Water Resources and Environment Research, Engineers Australia, Adelaide, Australia
- Egodawattaa P., Thomas E., Goonetilleke A. (2009) Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces. *Science of the Total Environment* 407 (2009) 1834–1841
- Eriksson E., Baun A., Mikkelsen P.S., Ledin A. (2005) Chemical hazard identification and assessment tool for evaluation of stormwater priority pollutants. *Water Sci. Technol.* 51 (2), 47-55.
- Flint K.R., Davis A.P. (2007) Pollutant Mass Flushing Characterization of Highway Stormwater Runoff from an Ultra-Urban Area. *Journal of Environmental Engineering* 133, 616-626
- 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
- Fujiwara F., Rebagliati R.J., Dawidowski L., Gomez D., Polla G., Pereyra V., Smichowski P. (2011) Spatial and chemical patterns of size fractionated road dust collected in a megacity. *Atmos. Environ.* 45 (8), 1497-1505.
- Glenn D.W.III, Sansalone J.J. (2002) Accretion and Partitioning of Heavy Metals Associated with Snow Exposed to Urban Traffic and Winter Storm Maintenance Activities. II. *Journal of Environmental Engineering* 128, 167-185
- Gromaire M. C., Garnaud S., Saad M. and Chebbo G. (2001) Contribution of Different Sources to the Pollution of Wet Weather Flows in Combined Sewers. *Water Research* 35, 521-533
- Gunawardana C., Goonetilleke A., Egodawatta P., Dawes L., Kokot S. (2012) Role of Solids in Heavy Metals Buildup on Urban Road Surfaces. *Journal of Environmental Engineering* 138, 490–498
- Gunawardana C., Egodawatta P., Goonetilleke A. (2014) Role of particle size and composition in metal adsorption by solids deposited on urban road surfaces. *Environ. Pollut.* 184, 44-53.
- Gunawardana C., Egodawatta P., Goonetilleke A. (2015) Adsorption and mobility of metals in build-up on road surfaces. *Chemosphere* 119, 1391-1398.
- Gupta K. and Saul A.S. (1996) Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. *Water Research* 30, 1244-1252
- Ha S.J., Stenstrom M.K. (2008) Predictive Modeling of Storm-Water Runoff Quantity and Quality for a Large Urban Watershed. *Journal of Environmental Engineering* 134, 703-711

- Herngren L., Goonetilleke A., Godwin A. (2006) Analysis of heavy metals in roaddeposited sediments. *Anal. Chim. Acta* 571 (2), 270-278.
- Huang J., Du P., Ao C., Lei M., Zhao D., Ho M., Wang Z., Ho P., Wang Z. (2007) Characterization of surface runoff from a subtropics urban catchment. *Journal of Environmental Sciences*, 19 (2007) 148-152
- 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.
- Institut za hidrotehniku (1990): "Druga faza istraživanja procesa oticanja kišnice sa urbanih površina i njihova zaštita od plavljenja i zagađenja voda", Završni izveštaj naučno-razvojnog projekta, Građevinski fakultet, Beograd
- James W., Rossman L.A., James W.R.C. (2010) *User's guide to SWMM 5*, 13th Edition, Published by CHI, Guelph, Ontario, Canada. ISBN 978-0-9808853-5-4
- Kang J.H., Kayhanian M., Stenstrom M.K. (2008) Predicting the existence of stormwater first flush from the time of concentration. *Water Research* 42 (2008) 220–228
- Kang J.H., Kayhanian M., Stenstrom M.K. (2006) Implications of a kinematic wave model for first flush treatment design. *Water Research* 40 (2006) 3820–3830
- Kayhanian M., Fruchtman B.D., Gulliver J.S., Montanaro C., Ranieri E., Wuertz S. (2012) Review of highway runoff characteristics: Comparative analysis and universal implications. *Water Research* 46 (2012) 6609–6624
- Kayhanian M., McKenzie, E.R. Leatherbarrow J.E., Young T.M. (2012) Characteristics of road sediment fractionated particles captured from paved surfaces, surface run-off and detention basins. *Science of the Total Environment* 439 (2012) 172–186
- Kayhanian M., Suverkro C., Ruby A., Tsay K. (2007) Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration. *Journal of Environmental Management* 85 (2007) 279–295
- Krunić B. (2012) *Pollutants Analysis on Paved Surfaces in an Experimental Catchment*, Thesis for Postgraduate Programme in Water Resources and Environmental Management, University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering
- Leandro, J., Djordjević, S., Chen, A. S., Savić, D. A., and Stanić, M. (2011). "Calibration of a 1D/1D urban flood model using 1D/2D model results in the absence of field data." *Journal of Water Science and Technology-IWA*, 64 (5) 1016–1024.
- 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
- 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
- Levine D. (2006) *Statistics for Six Sigma Green Belts with Minitab and JMP*. Pearson Education, Inc., Publishing as Prentice Hall U er Saddle River, New Jersey, USA.
- Liu D., Sansalone J.J., Cartledge F.K. (2005) Adsorption Kinetics for Urban Rainfall-Runoff Metals by Composite Oxide-Coated Polymeric Media. *Journal of Environmental Engineering* 131, 1168–1177
- Luo H., Luo L. Huang G., Liu P., Li J., Hu S., Wang F., Xu R., Huang X. (2009) Total pollution effect of urban surface runoff. *Journal of Environmental Sciences* 21 (2009), 1186–1193

- Ma Z., Ni H., Zeng H., Wei J. (2010) Function formula for first flush analysis in mixed watersheds: A comparison of power and polynomial methods. *Journal of Hydrology* 402 (2011) 333–339
- Maniquiz M.C., Lee S., Kim L.H. (2010) Multiple linear regression models of urban runoff pollutant load and event mean concentration considering rainfall variables. *Journal of Environmental Sciences* 2010, 22(6) 946–952
- May D., Sivakumar M. (2009) Prediction of urban stormwater quality using artificial neural networks. *Environmental Modelling & Software* 24 (2009) 296–302
- McLeod S.M., Kells J.A., Putz G.J. (2006) Urban Runoff Quality Characterization and Load
- Miguntanna N.P., Goonetilleke A., Egodowatta P., Kokot S. (2010a) Understanding nutrient build-up on urban road surfaces. *Journal of Environmental Sciences* 2010, 22(6) 806–812
- Miguntanna N.S., Egodawatta P., Kokot S., Goonetilleke A. (2010b) Determination of a set of surrogate parameters to assess urban stormwater quality. *Science of the Total Environment* 408 (2010) 6251–6259
- Mourad, M., J.-L. Bertrand-Krajewski, and G. Chebbo. 2005. Stormwater quality models: Sensitivity to calibration data. *Water Science and Technology* 52 (5): 61–68.
- Obermann M., Rosenwinkel K., Tournoud M. (2009) Investigation of first flushes in a medium-sized mediterranean catchment. *Journal of Hydrology* 373 (2009) 405–415
- Park I., Kim H., Chae S., Ha S. (2010) Probability mass first flush evaluation for combined sewer discharges. *Journal of Environmental Sciences* 2010, 22(6) 915–922
- Pitt R., Field R., Lalor M., Brown M. (1995) Urban Stormwater Toxic Pollutants: Assessment, Sources, and Treatability. *Water Environment Research* 67, 260-275
- Polkowska Z., Gorecki T., Namiesnik J. (2002) Quality of roof runoff waters from an urban region (Gdansk, Poland). *Chemosphere* 49 (2002) 1275–1283
- Revitt D.M., Lundy L., Coulon F., Fairley M. (2014) The sources, impact and management of car park runoff pollution: a review. *J. Environ. Manag.* 146, 552e567.
- Rossmann L.A. (2015) Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1, EPA-600/R-14/413b, U.S. Environmental Protection Agency
- Rudic O., Ranogajec J., Vulic T., Vucetic S., Cjepa D. Lazar D. (2014) Photo-induced properties of TiO<sub>2</sub>/ZnAl layered double hydroxide coating onto porous mineral substrates. *Ceram. Int.* 40 (7), 9445-9455.
- 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
- Sage J., Bonhomme C., Al Ali S., Gromaire M.C. (2015) Performance assessment of a commonly used "accumulation and wash-off" model from long-term continuous road runoff turbidity measurements. *Water Research*, IWA Publishing, 2015, 78, 47-59
- Shaw S.B., Stedinger J.R., Walter M.T. (2010) Evaluating Urban Pollutant Buildup/Wash-Off Models Using a Madison, Wisconsin Catchment. *Journal of Environmental Engineering* 136, 194-203
- Taebi A., Droste R.L. (2004a) First flush pollution load of urban stormwater runoff. *J. Environ. Eng. Sci.* 3: 301-309
- Taebi A., Droste R.L. (2004b) Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater. *Science of the Total Environment* 327 (2004) 175–184

- Todorović A, Stanić M., Prodanović D., Plavšić J. (2011) Advanced Hydrological Modeling in Urban Areas Using Hydroinformatic Tools, Innovation as a Function of Engineering Development, Faculty of Civil Engineering and Architecture, University of Nis (ISBN 978 86 80295 98 5), 357-362
- Vaze J., Chiew F.H.S. (2002) Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface. *Urban Water* 4 (2002) 379–389
- Vulić T., Hadnadjev-Kostić M., Rudić O., Radeka M., Marinković-Neducin R., Ranogajec J. (2013) Improvement of cement-based mortars by application of photocatalytic active TieZneAl nanocomposites. *Cem. Concr. Compos.* 36, 121-127.
- Wakida F. T., Martinez-Huato S., Garcia-Flores E., Pinon-Colin T.D.J., Espinoza-Gomez H., Ames-Lopez A. (2013) Pollutant association with suspended solids in stormwater in Tijuana, Mexico. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*
- Wang L., Wei J., Huang Y., Wang G., Maqsood I. (2011) Urban nonpoint source pollution buildup and washoff models for simulating storm runoff quality in the Los Angeles County. *Environmental Pollution* 159 (2011) 1932-1940
- Westerlund C., Viklander M. (2006) Particles and associated metals in road runoff during snowmelt and rainfall. *Science of the Total Environment* 362 (2006) 143– 156
- Wicke D., Cochrane T.A., O’Sullivan A. (2012) Build-up dynamics of heavy metals deposited on impermeable urban surfaces. *Journal of Environmental Management* 113, (2012), 347–354
- Worch E. (2012) Adsorption Technology in Water Treatment. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin/Boston.
- Yufen R., Xiaoke W., Zhiyun O., Hua Z., Xiaonan D., Hong M. (2008) Stormwater Runoff Quality from Different Surfaces in an Urban Catchment in Beijing, China. *Water Environment Research* 80, 719
- Zhang M., Chen H., Wang J., Pan G. (2010) Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization. *Journal of Environmental Sciences* 2010, 22(1) 40–46
- Zhao H., Li X., Wang X., Tian D. (2010) Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials* 183 (2010) 203–210
- Zhao H., Li X. (2013) Understanding the relationship between heavy metals in roaddeposited sediments and washoff particles in urban stormwater using simulated rainfall. *J. Hazard. Mater.* 246-247, 267-276.
- Zhu Y., Liu P., Liu H., Zhang H., Chen L. (2009) Pollutant Washoff Characterization of Expressway Runoff in Shanghai. *Bull Environ Contam Toxicol* (2009) 83:398–402
- Živojinović D., Rajaković-Ognjanović V., Onjia A., Rajaković Lj. (2013) Spatial variations in the distribution of trace ionic impurities in the water-steam cycle in a thermal power plant based on a multivariate statistical approach. *Central Eur. J. Chem.* 11 (9), 1456-1470.

## **BIOGRAFIJA AUTORA**

Aleksandar Đukić je rođen 27. marta 1965. godine u Beogradu, gde je završio osnovnu i srednju školu. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu upisao je 1984. godine, a studije započinje školske 1985/86. godine, nakon odsluženja vojnog roka. Diplomirao je 27. septembra 1990. godine na Odseku za hidrotehniku, a na istom fakultetu i odseku je 6. februara 1997. godine odbranio magistarsku tezu pod naslovom "Analiza efekata hipolimnetičke aeracije na promenu kvaliteta vode u akumulaciji".

Od januara 1991. do juna 1993. radio je u Institutu za vodoprivredu "Jaroslav Černi". Od jula 1993. godine do novembra 2013. godine bio je zaposlen na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, prvo kao asistent pripravnik na grupi predmeta Komunalna hidrotehnika a od 1997. kao asistent za užu naučnu oblast komunalno i sanitarno inženjerstvo. Od novembra 2013. godine zaposlen je u Institutu za vodoprivredu "Jaroslav Černi" iz Beograda, kao vodeći istraživač u Zavodu za vodosnabdevanje, kanlisanje i zaštitu voda i šef Odseka za vodosnabdevanje.

Objavio je preko 50 naučnih i stručnih radova u međunarodnim i domaćim časopisima i u zbornicima sa međunarodnih i domaćih skupova. Koautor je dve domaće monografije i osam poglavlja u domaćim i inostranim monografijama. Učestvovao je u ukupno sedam naučno-istraživačka projekta finansiranih od strane Ministarstva nauke Republike Srbije. Član je Inženjerske komore Srbije. Od 1996. je organizacioni sekretar Srpskog društva za zaštitu voda, a od 2006. godine član je Saveta Evropske asocijacije za vode. Učestvovao je kao konsultant, projektant ili nadzor u realizaciji većeg broja studija i projekata komunalne hidrotehničke infrastrukture u Srbiji, regionu i na Bliskom istoku.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани Александар Ђукић

број индекса

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

#### **МОДЕЛИРАЊЕ ЕМИСИЈЕ ЗАГАЂЕЊА КИШНОГ ОТИЦАЈА СА УРБАНИХ СЛИВОВА**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда



У Београду, 30. јун 2016.



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске  
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора:      Александар Ђукић  
Број индекса  
Студијски програм            Грађевинарство  
Наслов рада                    МОДЕЛИРАЊЕ ЕМИСИЈЕ ЗАГАЂЕЊА КИШНОГ  
ОТИЦАЈА СА УРБАНИХ СЛИВОВА  
Ментор                            доц. др Бранислава Лекић, дипл.инж.графј.

Потписани:    Александар Ђукић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанда**

У Београду, 30. јун 2016.



---

Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

МОДЕЛИРАЊЕ ЕМИСИЈЕ ЗАГАЂЕЊА  
КИШНОГ ОТИЦАЈА СА УРБАНИХ СЛИВОВА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 30. јун 2016.



1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.