

IZBOR MIKROLOKACIJE ISPUSTA IZ PPOV VELIKO SELO U FUNKCIJI UTICAJA NA KVALITET VODE U RECIPIJENTU

Lazar IGNJATOVIĆ, Miodrag POPOVIĆ
Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd

REZIME

U radu je prikazan i analiziran uticaj ispuštanja prečišćenih i neprečišćenih otpadnih voda Centralnog kanalizacionog sistema Grada Beograda na recipijent – Dunav na lokaciji PPOV Veliko Selo i na osnovu dobijenih rezultata izvršen je izbor mikrolokacije ispusta iz PPOV. Centralni kanalizacioni sistem Beograda obuhvata oko 85% kanalizacione mreže i trenutno opslužuje više od 1250000 stanovnika. Prikupljeni su hidrološki podaci – protok i nivo na karakterističnim profilima Dunava (minimalne srednje mesečne vode 95% obezbeđenosti) koji su poslužili za izradu 2D hidrauličkog modela RMA2. Takođe, prikupljeni su i obrađeni podaci o količinama i kvalitetu prečišćenih i neprečišćenih otpadnih voda u suvom i kišnom režimu rada opšteg kanalizacionog sistema i definisano je opterećenje otpadnih voda zagađujućim materijama (izraženo pomoću BPK5) za budući period rada PPOV (2041. god.), koje je korišćeno kao ulazni podatak za matematički model transporta i transformacije zagađenja u recipijentu Dunavu - RMA4. Formiran je spregnut 2D hidrodinamičko-transportni model RMA2/RMA4 kojim su simulirane tri varijante ispuštanja prečišćenih i neprečišćenih otpadnih voda u suvom i kišnom periodu za buduće stanje (2041. godina):

1. Obalni ispust u Dunavac,
2. Obalni ispust u Dunav i
3. Ispust u dnu u sredinu korita Dunava – u maticu toka.

Zaključeno je da je optimalna lokacija ispusta varijanta br. 2 – obalni ispust u Dunav. Ispust u Dunav se pokazao kao povoljnija varijanta od ispusta u Dunavac sa stanovišta zaštite akvatične životne sredine i ispunjavanja regulatornih standarda i zone mešanja koja se formira nizvodno od ispusta efluenta u Dunav koja ima znatno manje dimenzije u odnosu na zonu mešanja u Dunavcu. Ispust u maticu Dunava je sa ekološke tačke gledišta još povoljniji od obalnog ispusta u Dunav, ali je komplikovaniji sa građevinsko-tehničko-ekonomske tačke gledišta i obezbeđenja plovidbe na međunarodnom plovnom putu.

Cljučne reči: mikrolokacija, ispust, otpadne vode, PPOV, Veliko Selo, efluent, kvalitet vode, recipijent

1. UVOD

Problem prikupljanja i prečišćavanja otpadnih voda velikih gradova je od velike važnosti kako za zajednicu, tako i za ceo sliv. Vode su prirodno bogatstvo, i prema Zakonu o vodama („Sl. glasnik RS“, br. 30/2010, 93/2012, 101/2016, 95/2018 i 95/2018 - dr. zakon, u daljem tekstu: ZOV) [1] u svojini su Republike Srbije. Takođe, vode i vodno zemljište u javnoj svojini se, kao javno vodno dobro, moraju koristiti na način kojim se ne utiče štetno na vode i priobalni ekosistem i ne ograničavaju prava drugih. Imajući u vidu ravnopravnost svih korisnika vode na slivu (uzvodnih i nizvodnih), i zakonsku odredbu (ali i moralno načelo) da se ne utiče štetno na vode, da se ne smeju ograničavati prava drugih, kao i zakonsku obavezu zaštite voda od zagađivanja (Poglavlje 4.3 ZOV), osim neophodnosti i obaveze prečišćavanja otpadnih voda, javlja se i problem minimiziranja uticaja ispuštanja ovako prečišćenih otpadnih voda, ali i problem minimiziranja uticaja ispuštanja neprečišćenih otpadnih voda usled eventualne havarije u radu postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (u daljem tekstu: PPOV).

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 6.2.2024.

Ispravljen: 25.2.2024.

Prihvaćen: 2.3.2024.

Kontakt: lazar.ignjatovic@jcerni.rs

U slučaju havarije, podrazumeva se obaveza hitnog otklanjanja kvara u radu PPOV i brzo ponovno puštanje u pogon.

Prikupljanje i prečišćavanje otpadnih voda centralnog kanizacionog sistema grada Beograda je aktivno obrađivano u literaturi još od sedamdesetih godina prošlog veka, kada je nastala ideja o beogradskom interceptoru. Količine i kvalitet otpadnih voda koje iz opšteg sistema kanisanja dolaze na PPOV mogu značajno da osciluju za vreme suvih i kišnih perioda, pa je u literaturi obrađivana i problematika rasteretnih preliva [2].

Osnovne postavke problema i opcije za projektovanje PPOV Veliko Selo obrađene su u literaturi [3].

Zaštita voda od zagađivanja prema ZOV obuhvata skup mera i aktivnosti kojima se kvalitet površinskih i podzemnih voda štiti i unapređuje, uključujući i od uticaja prekograničnog zagađenja, radi:

1. očuvanja života i zdravlja ljudi;
2. smanjenja zagađenja i sprečavanja daljeg pogoršanja stanja voda;
3. obezbeđenja neškodljivog i nesmetanog korišćenja voda za različite namene;
4. zaštite vodnih i priobalnih ekosistema i postizanja standarda kvaliteta životne sredine u skladu sa propisom kojim se uređuje zaštita životne sredine i ciljevi životne sredine.

Da bi se ispunili ciljevi zaštite voda od zagađivanja, ispoštovalo Ustavno pravo na zdravu životnu sredinu (član 74 Ustava Republike Srbije („Sl. glasnik RS“, br. 98/2006 i 115/2021) [4]) i ravnopravnost svih korisnika vode na slivu, kao jedan od problema, javio se i problem izbora mikrolokacije ispusta iz PPOV Veliko Selo u funkciji uticaja na kvalitet vode u recipijentu (reka Dunav).

U radu je prikazan i analiziran uticaj ispuštanja prečišćenih i neprečišćenih otpadnih voda centralnog kanizacionog sistema Grada Beograda na recipijent – Dunav na lokaciji PPOV Veliko Selo. Centralni kanizacioni sistem Beograda obuhvata oko 85% kanizacione mreže i opslužuje više od 1250000 stanovnika.

Simulirane su tri varijante ispuštanja prečišćenih i neprečišćenih otpadnih voda u suvom i kišnom periodu za buduće stanje (2041. godina):

1. Obalni ispust u Dunavac,
2. Obalni ispust u Dunav i
3. Ispust u dnu u sredinu korita Dunava – u maticu toka.

Testirana je hipoteza da je ispust u Dunav povoljnija varijanta od ispusta u Dunavac sa stanovišta zaštite akvatične životne sredine i ispunjavanja regulatornih standarda i zone mešanja koja se formira nizvodno od ispusta efluenta u Dunav. Ova zona mešanja ima znatno manje dimenzije u odnosu na zonu mešanja u Dunavcu. Takođe, u slučaju ispusta u Dunav, analizirane su prednosti i nedostaci obalnog ispusta (varijanta 2) i ispusta u sredinu toka Dunava (varijanta 3), i usvojena optimalna varijanta.

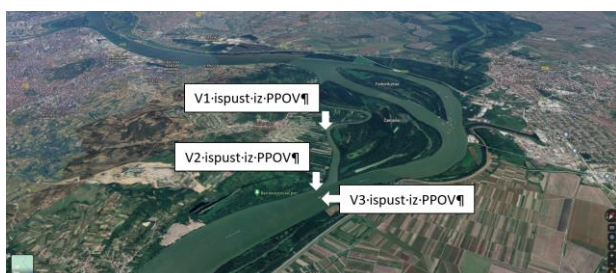
2. GENERALNI OPIS RAZMATRANOG PODRUČJA

Izgradnja PPOV Veliko Selo je predviđena na području katastarske opštine Veliko Selo, između naselja Veliko Selo i rukavca Dunavac, na desnoj obali Dunava. Predmetno područje je aluvijalna zaravan Dunava na nebranjnom terenu, na nadmorskoj visini između 72 m n. m. i 75 m n. m.

Plan detaljne regulacije za izgradnju PPOV Veliko Selo – I faza, gradska opština Palilula [5], u daljem tekstu: Plan, definiše prostor za izgradnju PPOV Veliko Selo. Prostor obuhvaćen Planom je deo teritorije gradskih opština: Palilula, Zvezdara i Grocka. Planom su obuhvaćeni delovi katastarskih opština: Veliko Selo, Slanci, Mirijevo, Mali Mokri Lug i Vinča.

Širi prostor na kome se predlaže lokacija za ispuštanje efluenta iz PPOV Veliko Selo obuhvata površinu na granici Beogradske opštine Palilula i južnog dela Grada Pančeva, KO Pančevo. Uži prostor posmatranog područja se nalazi u desnoj krivini Dunava, između profila na stacionažama km 1156,01 i km 1148,54 i obuhvata rečne ade Forkontumac i Čakljanac. Forkontumac i Čakljanac su aktom o zaštiti prirode proglašeni zaštićenim prirodnim dobrom treće kategorije „Pančevačka ada“, o kome se brine JP „Vojvodinašume“, Šumsko gazdinstvo „Banat“ iz Pančeva. Na uzvodnom kraju Forkontumca se nalazi plaža Bela stena. Glavni tok Dunava i međunarodni plovni put prolazi krajnjim levim rukavcem, severno od Pančevačkih ada. Na stacionaži km 1153, uz plovni put se nalazi sidrište za barže i brodove. Predmetna površina pripada ribarskom području „Beograd“ i „Banat“.

Na levoj obali Dunava se nalazi magistralni put E70, Gradska šuma (izvorište pančevačkog vodovoda, aluvijalnog tipa), ušće Tamiša u Dunav, Luka Dunav AD Pančevo, Starčevačka ada i Južna industrijska zona grada Pančeva sa kompleksima Hemijske industrije Pančevo: Azotara, Petrohemija i Rafinerija. Između Starčevačke ade i spomenika prirode Ivanovačka ada, na levoj obali Dunava, nalazi se nebranjeno močvarno-plavno područje. Šire područje PPOV Veliko Selo, sa razmatranim mogućim varijantama položaja ispusta efluenta u Dunavac i Dunav, prikazano je na slici 1.



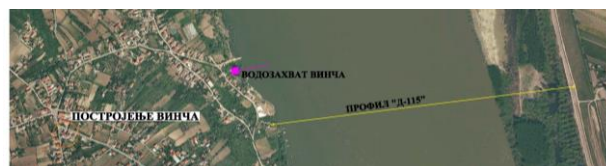
Slika 1. Pogled na šire područje Pančevačke ade iz pravca jugozapada ka severoistoku

Poljoprivredne površine se nalaze na desnoj obali Dunavca, nizvodno od PPOV Veliko Selo. Nizvodno od spoja Dunavca sa glavnim tokom Dunava je nebranjeno područje, šumsko stanište riparijansko-močvarnog tipa – Velikoselski rit.

Generalnim urbanističkim planom Beograda, iz 1972. godine sa horizontom do 2000. [6], u Velikoselskom ritu je predviđeno formiranje tzv. Velike privredne zone (VPZ), u koju bi se premestile sve luke i industrije sa prostora od Dorćolske marine do Pančevačkog mosta. Prostorni planovi Grada Pančeva predviđali su sličnu namenu površina u Spoljnostarčevačkom ritu, na suprotnoj obali. Planirana namena ovih površina je ostala aktuelna i prema naknadno usvojenim planovima, pa je i Generalnim urbanističkim planom Beograda iz 2016. (do 2021.) [7] ovo područje predviđeno kao saobraćajna površina. Međutim, usled smanjenog rečnog saobraćaja, smanjila se i potreba za proširenjem lučkih kapaciteta, pa je za region Beograda ostala dovoljna Luka Dunav u Pančevu. Novi Generalni urbanistički plan Beograda iz 2022. (do 2041. godine) [8] koji je u fazi uvida javnosti, u zoni Velikoselskog rita ne predviđa saobraćajne tj. lučke sadržaje.

Zapadno od Velikoselskog rita se nalazi velika gradska nesanitarna deponija Vinča. Nizvodno od Velikoselskog

rita i deponije Vinča se nalazi vodozahvat vinčanskog vodovoda (približna stacionaža km 1145, slika 2). Izvorište „Vinča“ je od 1926. godine snabdevalo kraljev hotel na Avali, od 1958. snabdeva vodom institut za nuklearne nauke „Vinča“, a od 1992. je u sastavu Beogradskog vodovoda. Kapacitet postrojenja za prečišćavanje rečne vode Dunava je oko 65 l/s [9].



Slika 2. Izvorište „Vinča“ zahvata rečnu vodu iz toka Dunava

3. ZAKONSKI OKVIR

Zaštita voda od zagađivanja, ispuštanje otpadnih voda u površinske vode i kvalitet vode u prirodnim, veštačkim i značajno izmenjenim vodnim telima regulisani su ZOV i njegovim podzakonskim aktima. ZOV propisuje tzv. „standarde za kvalitet efluenta“ i „standarde za kvalitet recipijenta“, pa se mora ispoštovati stroži od ova dva kriterijuma. Ovi uslovi su regulisani sledećim pravilnikom i uredbama:

1. Pravilnik o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i parametrima hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda („Sl. glasnik RS“, 74/2011) [10] – standard za recipijent;
2. Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje („Sl. glasnik RS“, br. 67/2011, 48/2012 i 1/2016) [11] – standard za efluent;
3. Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje („Sl. glasnik RS“, br. 50/2012) [12] – standard za recipijent;
4. Uredba o graničnim vrednostima prioritetnih i prioritetnih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovima za njihovo dostizanje („Sl. glasnik RS“, br. 24/2014) [13] – standard za recipijent.

Analizu zakonskog okvira koji se tiče tretmana i ispuštanja otpadnih voda u Republici Srbiji uz modeliranje transporta zagađenja uradili su D. Mitrinović i sar. [14].

4. OSNOVNI POKAZATELJI KVALITETA REKE DUNAV U ZONI ISPUSTA EFLUENTA

Prema Pravilniku o utvrđivanju vodnih tela površinskih i podzemnih voda („Sl. glasnik RS“, 96/2010) [15], deonica Dunava oko Beograda i Pančeva, predstavlja značajno izmenjeno vodno telo: „Akumulacija HE Đerdap 1 od ušća Velike Morave do ušća Save“ (šifra D5), dužine 65 kilometara, u sklopu vodnog područja Bačka i Banat, Beograd i Donji Dunav.

Prema Pravilniku o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i parametrima hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda („Sl. glasnik RS“, 74/2011) [10], vodno telo D5, pripada vodnim telima Tipa 1 – velike nizijske reke, dominacija finog nanosa. S obzirom na to da je vodno telo D5 značajno izmenjeno vodno telo, za njega se definiše ekološki potencijal i granice između klasa ekološkog potencijala prema hemijskim i fizičko-hemijskim parametrima za značajno izmenjena vodna tela - akumulacije formirane na vodnim telima Tipa 1 (tabela 1).

Za kvalitet vode Dunava na vodnom telu D5, merodavni su podaci sa stanice za monitoring kvaliteta površinskih voda Smederevo. Prema izveštaju Agencije za zaštitu životne sredine: Rezultati ispitivanja kvaliteta površinskih i podzemnih voda u 2020. godini [16], kvalitet Dunava na mernom mestu Smederevo je pod očiglednim antropogenim uticajem. U odnosu na pH vrednost, Dunav je između II i IV klase, prema sadržaju rastvorenog kiseonika pripada III klasi, prema BPK5 pripada II klasi, prema sadržaju ukupnog fosfora pripada III klasi, dok je prema sadržaju rastvorenih metala i prema parametrima iz kategorije salinitet, voda Dunava svrstana u I klasu sa izuzetkom gvožđa (III) i hlorida (II). Od prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci beleže se povišene koncentracije rastvorenog nikla (III/ IV) i fluorantena (III/ IV).

Prema izveštaju Agencije za zaštitu životne sredine: Rezultati ispitivanja kvaliteta površinskih i podzemnih voda u 2021. godini [17], situacija je malo bolja po sadržaju rastvorenog kiseonika i prema sadržaju ukupnog fosfora (kvalitet vode Dunava po ovim parametrima je sada u II klasi), kao i po sadržaju prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci koje 2021. godine nisu zabeležene.

S obzirom na to da voda Dunava u zoni ispusta efluenta po parametru BPK5 pripada drugoj klasi, za potrebe

proračuna usvojeno je da je tzv. „nulto stanje“, odnosno ambijentalna koncentracija BPK5 u Dunavu i Dunavcu jednaka 3,5 mg/L za sve simulacije.

Tabela 1. Hemijski i fizičko-hemijski parametri ocene ekološkog potencijala za akumulacije formirane na vodnim telima Tipa 1. („Sl. glasnik RS“, 74/2011) [10]

Parametar	Jedinice	Granice između klasa ekološkog potencijala		
		II-III	III-IV	IV-V
pH vrednost		6,5-8,5	6,5-8,5	<6,5; >8,5
Rastvoreni kiseonik	mg/L	7,0	5,0	4,0
BPK5	mg/L	5,0	8,0	20,0
Ukupni organski ugljenik	mg/L	5,0	9,0	23,0
Amonijum jon	mg/L	0,30	0,80	1,0
Nitrati	mg/L	3,0	6,0	15,0
Ortofosfati	mg/L	0,10	0,20	0,50
Ukupni rastvoreni fosfor	mg/L	0,20	0,40	1,00
Hloridi	mg/L	50	100	

Prema Uredbi o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje ("Sl. glasnik RS", br. 50/2012) [12], rokovi za dostizanje graničnih vrednosti zagađujućih materija propisanih za površinske vode i sediment koji nisu pod uticajem prekograničnog zagađenja, i to za jednu višu klasu u odnosu na sadašnji nivo kvaliteta, osim za dostizanje graničnih vrednosti I klase, određuju se u skladu sa dinamikom utvrđenom planovima upravljanja vodama, a najkasniji rok za njihovo dostizanje je 31. decembar 2032. godine.

Rokovi za postizanje graničnih vrednosti zagađujućih materija za površinske i podzemne vode i sediment koji su pod uticajem prekograničnog zagađenja i podzemne vode koje nisu pod uticajem prekograničnog zagađenja određuju se u skladu sa dinamikom utvrđenom planovima upravljanja vodama.

Na osnovu svega navedenog, može se zaključiti da dodatni ispusti otpadnih voda u Dunav, u zoni Velikog Sela ne bi smeli da dovedu u pitanje dostizanje ciljnog ekološkog potencijala u predviđenim rokovima na vodnom telu D5.

Prema Uredbi ("Sl. glasnik RS", br. 50/2012) [12], granične vrednosti zagađujućih materija za drugu klasu voda ne bi smele da budu prekoračene van granice zone mešanja. Kada je PPOV Veliko Selo u redovnom

pogonu, zona mešanja bi trebalo da ima ograničene dimenzije.

Iako rukavac Dunava, Dunavac, nije određen kao zasebno vodno telo, imajući u vidu regulatorna ograničenja i međunarodne preporuke koje se odnose na dimenzije zone mešanja i njegov ekološki i ambijentalni značaj, postavlja se hipoteza da bi trebalo propisati mere zaštite Dunavca i odabrati lokaciju ispusta otpadnih voda koja bi imala minimalni uticaj na akvatičnu i riparijansku životnu sredinu.

5. METODOLOGIJA ZA IZBOR OPTIMALNE LOKACIJE ZA ISPUŠTANJE EFLUENTA IZ PPOV VELIKO SELO

U trenutku pisanja ovog rada nisu bili predviđeni namenski istražni radovi uzorkovanja vode za ispitivanje kvaliteta i parametara koji definišu transport i razgradnju materije suspendovane i rastvorene u vodi. Zato se izbor lokacije za ispuštanje efluenta iz PPOV Veliko Selo zasniva na postojećim podlogama i podacima.

Prikupljene su i analizirane sve dostupne podloge, prethodno rađena tehnička dokumentacija i zakonski okvir. Naročito su analizirane hidrološke i hidrauličke podloge koje predstavljaju izvor informacija o raspodeli protoka između glavnog toka i rukavaca u zoni Pančevačkih ada.

Analizirane su tri varijante lokacije za ispuštanje efluenta (prečišćenih i neprečišćenih otpadnih voda u suvom i kišnom režimu rada opšteg kanalizacionog sistema Beograda za buduće stanje (2041. godina), sve u periodu malih voda Dunava ($Q_{\min \text{ sr. mes. } 95\%}$) iz PPOV Veliko Selo (tabela 2):

1. Obalni ispust u Dunavac u neposrednoj blizini PPOV (varijanta 1 – V1);
2. Obalni ispust u Dunav u zoni Velikoselskog rita (varijanta 2 – V2);
3. Ispust u dnu u sredinu korita Dunava – u maticu toka u zoni Velikoselskog rita (varijanta 3 – V3).

6. SIMULACIJA ZONE MEŠANJA MATEMATIČKIM MODELOM

Sprezanjem modela RMA2/RMA4 simulirano je mešanje efluenta i rečne vode. Model RMA2 je hidrodinamički model koji se zasniva na jednačinama plitkog ravanskog tečenja (Navije-Stoksove jednačine

osrednjene po dubini) [18]. Pogodan je za simulaciju mešanja u zonama na većoj i srednjoj udaljenosti od inicijalne zone razblaženja (eng. Intermediate and far-field mixing) zato što pretpostavlja hidrostatičku raspodelu pritisaka u vertikalnom pravcu. Batimetrija se može definisati u visokoj prostornoj rezoluciji diskretizacijom računskog domena na mreži konačnih elemenata.

Strujna slika dobijena simulacijom RMA2 hidrodinamičkog modela se koristi kao ulazni podatak za transportni model RMA4 [19].

Model RMA2 se koristi za ustaljeno tečenje. S obzirom da je transport materije rastvorene u vodi dinamički proces, rezultat proračuna RMA4 modelom je neustaljeni transport, tj. evolucija zone mešanja u vremenu. Proračun traje do uspostavljanja potpuno razvijene zone mešanja, odnosno do uspostavljanja ustaljenog transporta konstituenta rastvorenog u vodi.

Tabela 2. Scenariji za simuliranje zone mešanja nizvodno od ispusta efluenta

VARIJANTA 1 – OBALNI ISPUST U DUNAVAC	VARIJANTA 2 – OBALNI ISPUST U DUNAV	VARIJANTA 3 – ISPUST U SREDINU TOKA DUNAVA
Male vode Dunava $Q_{\min \text{ sr. mes. } 95\%}$		
1. PPOV Veliko Selo – normalan pogon • Suvi period • Kišni period	1. PPOV Veliko Selo – normalan pogon • Suvi period • Kišni period	1. PPOV Veliko Selo – normalan pogon • Suvi period • Kišni period
2. PPOV Veliko Selo – van pogona • Suvi period • Kišni period	2. PPOV Veliko Selo – van pogona • Suvi period • Kišni period	2. PPOV Veliko Selo – van pogona • Suvi period • Kišni period

6.1. Početni i granični hidrološko-hidraulički uslovi za simulaciju zone mešanja

Za izradu 2D hidrauličkog modela RMA2, korišćeni su početni i granični uslovi: minimalni srednji mesečni protok Dunava 95% obezbeđenosti - $Q_{\min \text{ sr. mes. } 95\%}$ na uzvodnom profilu i kota nivoa vode na nizvodnom profilu modela, koji su preuzeti iz Hidrološko-hidrauličke studije (IJČ, 2022) [20] (tabela 3). Navedeni protok i kota nivoa vode dobijeni su analizom režima protoka na osnovu nizova računskih protoka Dunava iz perioda 1985-2021, dobijenih primenom 1D modela

FEQ. Preraspodela protoka između glavnog toka i rukavaca Pančevačkih ada dobijena je 2D hidrauličkim modelom HEC-RAS. Izdvojeni su nizovi minimalnih srednjih mesečnih protoka, a računске vrednosti karakterističnih verovatnoća pojave dobijene su prilagođavanjem teorijskih raspodela empirijskim (detaljno opisano u dokumentaciji [20]).

Izvršena je kalibracija modela RMA2 tako da se dobije preraspodela protoka između glavnog toka i rukavaca kao u dokumentaciji [20], i tako dobijeni protoci su prikazani u tabeli 3.

Tabela 3. Merodavni hidrološki uslovi na profilu Pančevo – Ušće Tamiša

	Male vode Q_{\min} sr. mes. 95% = 2149 m ³ /s
Preraspodela protoka između glavnog toka i rukavaca Pančevačke ade [m ³ /s]	$Q_{\text{glavni tok}}$: 1448,9 $Q_{\text{sr. rukavac}}$: 583,4 $Q_{\text{des. rukavac}}$: 116,7
Z kota na stacionaži nizvodnog graničnog uslova [m n.m.]	69,82

Iz Studije o PPOV „Veliko Selo“, Knjiga 1: Izveštaj o projektnim kriterijumima za dimenzionisanje PPOV (IJČ, 2021) [21], prikupljeni su i obrađeni podaci o količinama i kvalitetu prečišćenih i neprečišćenih otpadnih voda u suvom i kišnom režimu rada opšteg kanalizacionog sistema (organsko opterećenje izraženo pomoću BPK5 [mg/L]) za budući period rada PPOV (2041. god.). Ovi podaci su korišćeni kao ulaz u matematički model transporta i transformacije zagađenja u recipijentu - RMA4, a prikazani su u tabeli 4.

Tabela 4. Merodavni hidraulički kapacitet PPOV i organsko opterećenje

		$Q_{\text{eff.}}$ [m ³ /s]	BPK5 _{eff.} [mg/L]
PPOV radi	Suvi period	5,9	25
	Kišni period	14,0	40
PPOV ne radi	Suvi period	5,9	250
	Kišni period	14,0	120

Usvojena ambijentalna koncentracija BPK5 u Dunavu i Dunavcu iznosi 3,5 mg/L za sve simulacije.

6.2. Parametri simulacije

U svim simulacijama koristi se Manningov koeficijent hrapavosti u opsegu vrednosti od 0,021 do 0,031 m^{-1/3}s.

Usvojena je izotropna turbulencija sa koeficijentima turbulentne viskoznosti u opsegu od 1000 do 2725 Pa·s.

Koeficijenti difuzije za sve simulacije obalnog ispusta su konstantni i iznose 1,0 m²/s.

Koeficijenti difuzije za simulacije ispusta u sredinu korita Dunava su usvojeni prema tabeli 5:

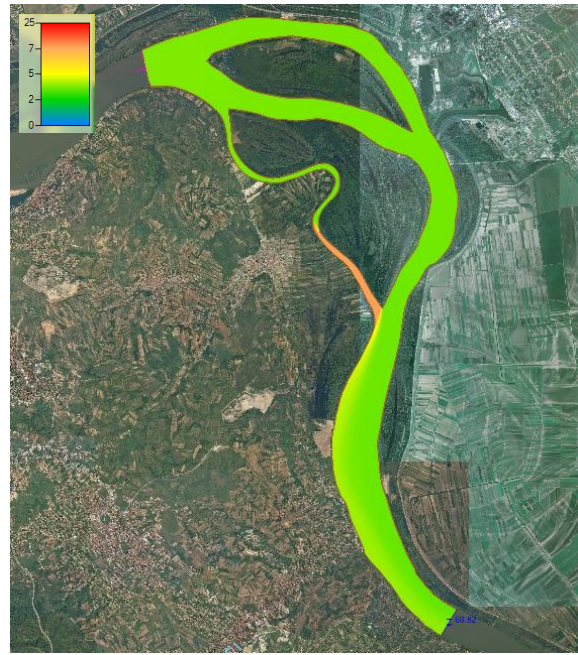
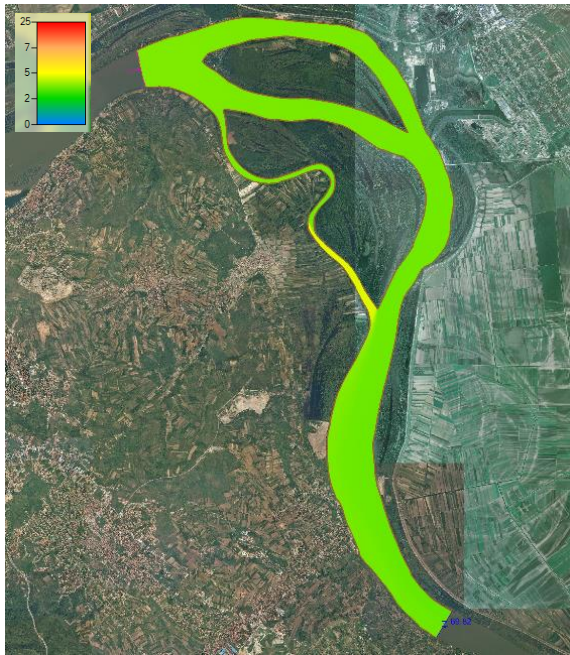
Tabela 5. Usvojeni koeficijenti difuzije za simulacije ispusta u sredinu korita Dunava:

Ispust sredinu korita Dunava		D [m ² /s]
PPOV radi	Suvi period	0,1
	Kišni period	0,1
PPOV ne radi	Suvi period	0,2
	Kišni period	0,3

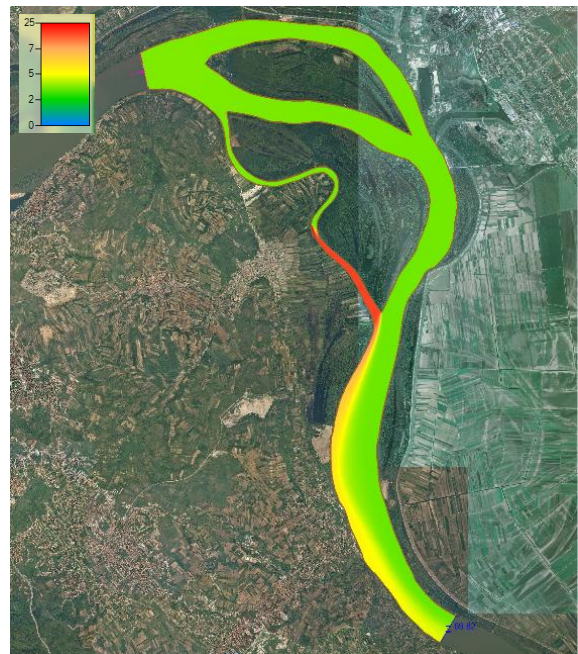
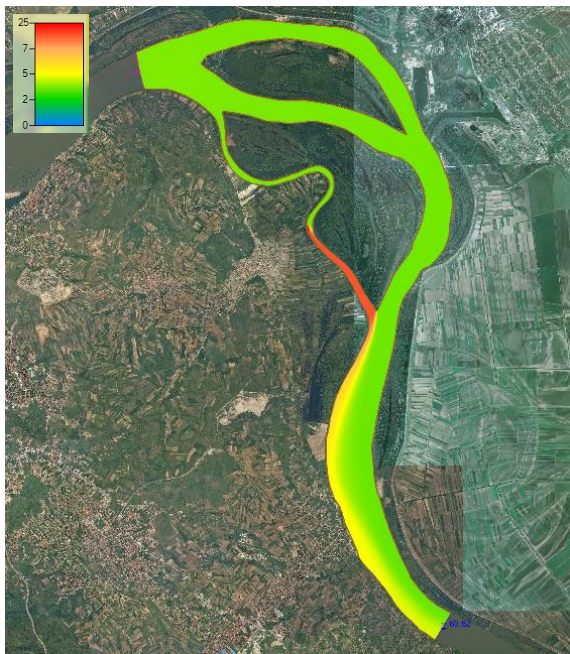
Simulacija dinamičkog transporta traje ukupno 48 časova (da bi se ustalio transport zagađenja i uspostavila potpuno razvijena zona mešanja) sa vremenskim korakom od 0,2 časa i sa konstantnim koeficijentom razgradnje organske materije (sa hemijskom kinetikom razgradnje prvog reda) od 0,15 dan⁻¹.

7. REZULTATI MODELIRANJA ZONE MEŠANJA ZA TRI VARIJANTE ISPUSTA ZA MALE VODE – MAPE ZONA MEŠANJA

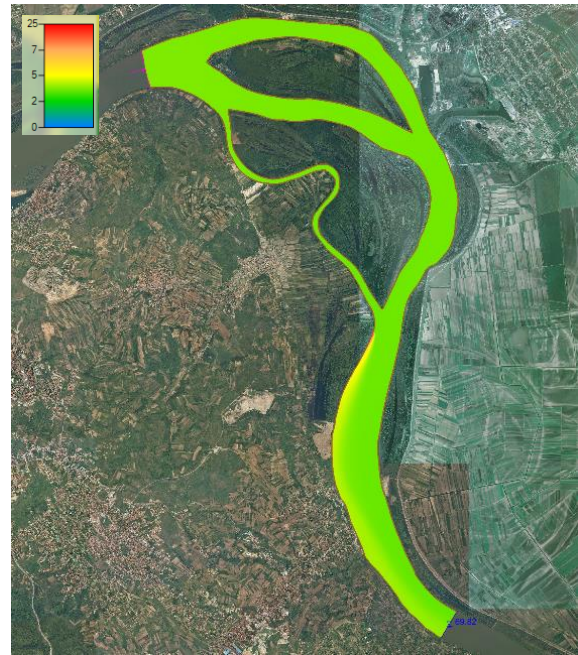
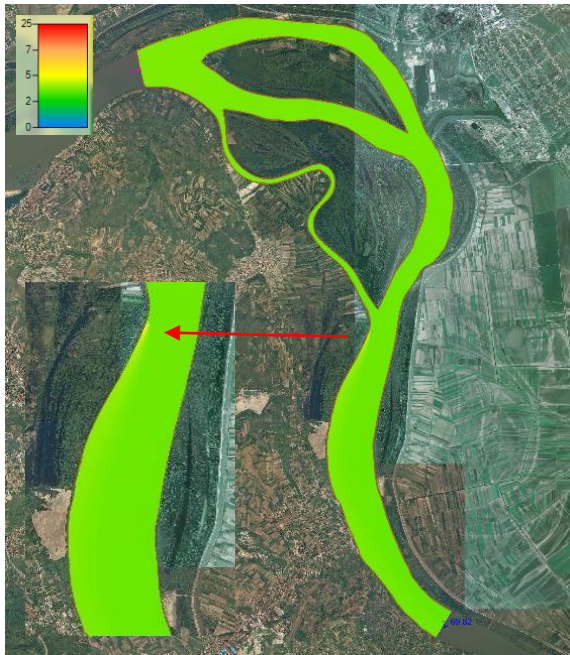
Vizuelni prikaz zona mešanja dobijenih simulacijom na matematičkom modelu RMA2/RMA4 u slučaju ispuštanja efluenta u Dunavac (V1) i Dunav (obalni ispušt (V2) i ispušt u sredinu toka (V3)), predstavljeni su na sledećim slikama (slike 3-8) kako bi se uočile razlike i efekti ispuštanja prema varijanti 1, varijanti 2 i varijanti 3. Na navedenim slikama prikazane su koncentracije BPK5 u mg/L, bojama prema klasi kvaliteta, odnosno ekološkom potencijalu (II klasa, odnosno „dobar i bolji“ ekološki potencijal – zelena boja; III klasa, odnosno „umeren“ ekološki potencijal – žuta boja; IV klasa, odnosno „slab“ ekološki potencijal – narandžasta boja i V klasa, odnosno „loš“ ekološki potencijal – crvena boja). Boje su usvojene prema Pravilniku („Sl. glasnik RS“, 74/2011) [10], za ekološki potencijal vodnih tela površinskih voda.



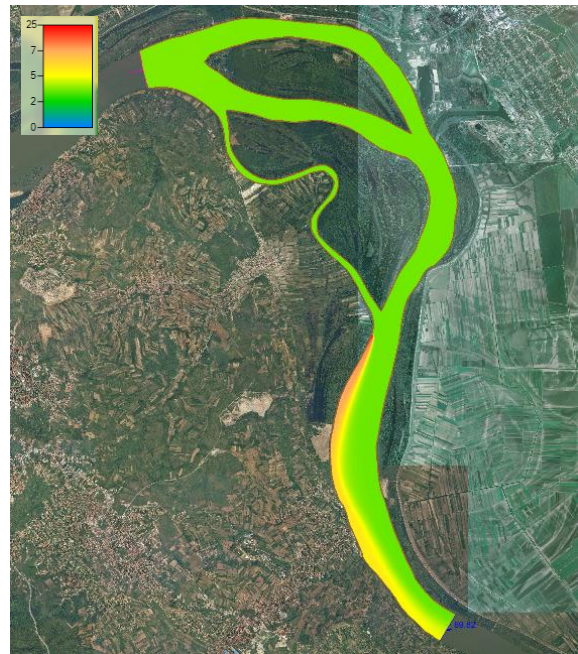
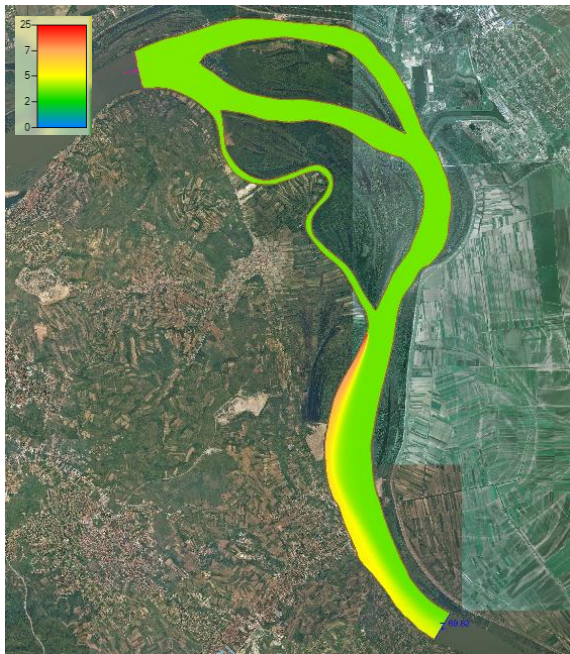
Slika 3. Varijanta 1: male vode, ispust efluenta iz PPOV Veliko Selo u Dunavac - koncentracije BPK5 [mg/L] u a) suvom periodu (levo) i b) kišnom periodu (desno)



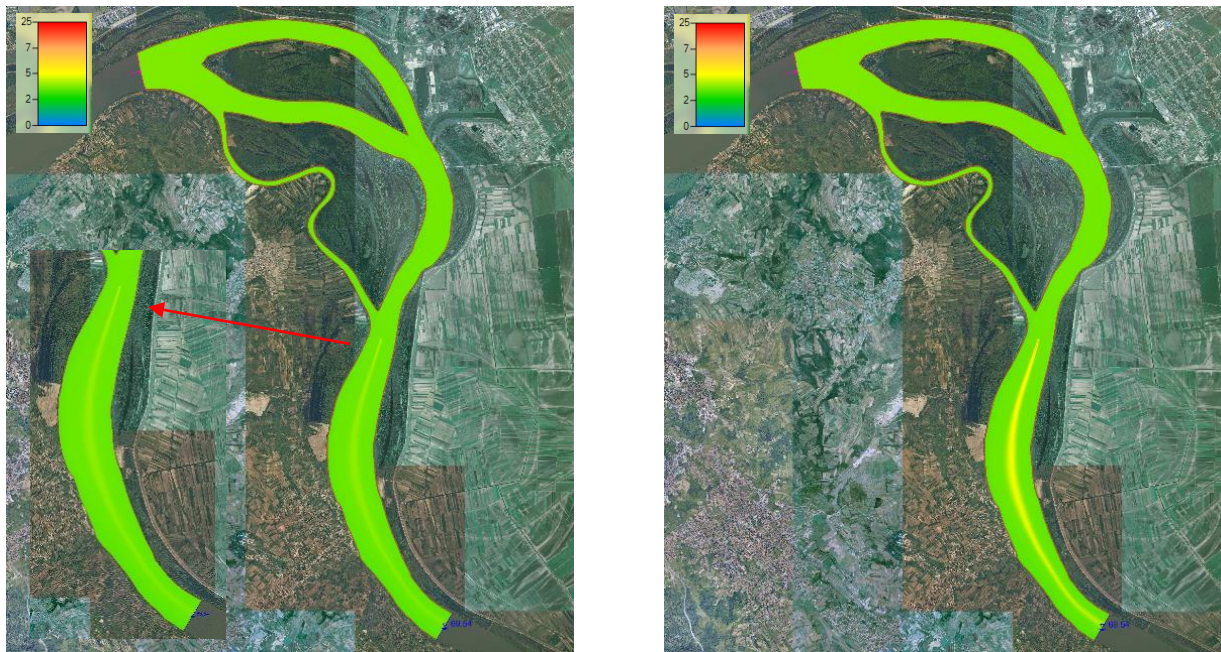
Slika 4. Varijanta 1: male vode, PPOV Veliko Selo van pogona, ispust efluenta u Dunavac - koncentracije BPK5 [mg/L] u a) suvom periodu (levo) i b) kišnom periodu (desno)



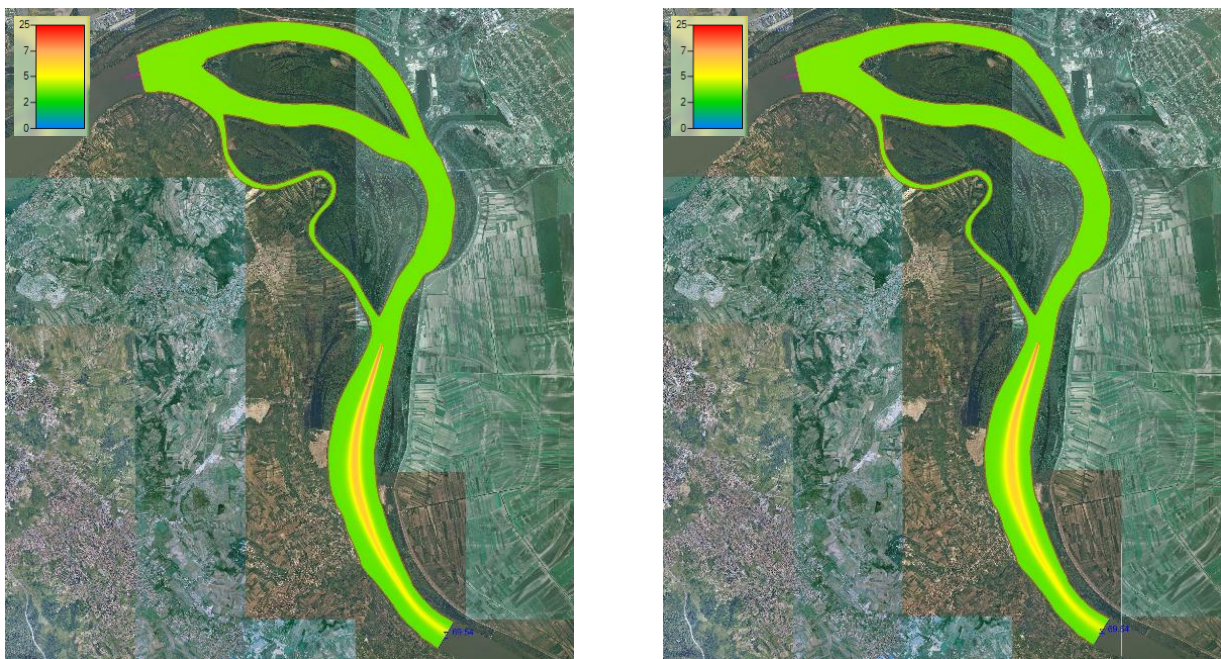
Slika 5. Varijanta 2: male vode, obalni ispust efluenta iz PPOV Veliko Selo u Dunav - koncentracije BPK5 [mg/L] u a) suvom periodu (levo) i b) kišnom periodu (desno)



Slika 6. Varijanta 2: male vode, PPOV Veliko Selo van pogona, obalni ispust efluenta u Dunav - koncentracije BPK5 [mg/L] u a) suvom periodu (levo) i b) kišnom periodu (desno)



Slika 7. Varijanta 3: male vode, ispušt efluenta iz PPOV Veliko Selo u sredinu toka Dunava - koncentracije BPK5 [mg/L] u a) suvom periodu (levo) i b) kišnom periodu (desno)



Slika 8. Varijanta 3: male vode, PPOV Veliko Selo van pogona, ispušt efluenta sredinu toka Dunava - koncentracije BPK5 [mg/L] u a) suvom periodu (levo) i b) kišnom periodu (desno)

8. DISKUSIJA REZULTATA

Za izbor lokacije za ispuštanje efluenta iz PPOV Veliko Selo, najmerodavniji scenario je onaj u kome se u uslovima normalnog rada PPOV prečišćene otpadne vode u danu maksimalne potrošnje u periodu bez kiše ispuštaju u recipijent u hidrološkim uslovima malih voda. Na slikama 3a (Dunavac), 5a (Dunav, obalni ispust) i 7a (Dunav, ispust u sredinu) prikazane su zone mešanja koje nastaju u ovakvim uslovima.

Na slici 3a, zona mešanja se prostire celom dužinom Dunavca nizvodno od mesta ispuštanja u dužini od oko 2200 metara do spoja sa glavnim tokom Dunava. Neposredno oko ispusta, zona inicijalnog mešanja (tzv. zona akutnih uticaja) u Dunavcu je prema parametru BPK5 u četvrtoj klasi, a nizvodno od nje, Dunavac je u trećoj klasi, na dužini od oko 3 širine korita Dunavca. Zatim prelazi u drugu klasu, ali sa vrednostima koje su praktično na samoj granici između druge i treće klase ekološkog potencijala, i tako ostaje sve do spoja sa glavnim tokom Dunava.

Na slici 5a, prikazan je obalni ispust u Dunav, a na slici 7a ispust u sredinu toka Dunava pod istim hidrološkim i hidrauličkim uslovima. Zona mešanja koja pripada trećoj klasi je malih dimenzija (kraća od 300 m, što je polovina širine korita Dunava na mestu ispusta efluenta) i ograničena je na neposrednu zonu ispusta.

Na slikama 3b, 5b i 7b, prikazane su zone mešanja u Dunavcu i Dunavu koje se formiraju u kišnom periodu, kada postrojenje radi u redovnim pogonskim okolnostima.

Zona inicijalnog mešanja u Dunavcu, slika 3b, pripada petoj klasi dok je preostali deo Dunavca, do spoja sa glavnim tokom Dunava u četvrtoj klasi. Ostatak mešanja i degradacije organske materije se odvija u Dunavu, gde na relativno kratkom rastojanju (oko 10 širina vodnog ogledala) dolazi do postizanja koncentracija koje odgovaraju srednjoj vrednosti druge klase kvaliteta prema parametru BPK5. Uzvodni deo ovog rastojanja (1 širina vodnog ogledala) pripada trećoj klasi, a u preostalom delu dolazi do potpunog mešanja i izjednačavanja sa ambijentalnom koncentracijom.

Na slici 5b prikazana je zona mešanja formirana pod istim hidrološkim i hidrauličkim uslovima, ali je ispust lociran na desnoj obali Dunava. Inicijalna zona mešanja

je ograničenih dimenzija i spada u četvrtu klasu (za razliku od inicijalne zone mešanja prilikom ispusta u Dunavac, koja spada u petu klasu). Nizvodno od inicijalne zone mešanja, na rastojanju od 1-2 širine vodnog ogledala, voda Dunava pripada trećoj klasi, nakon čega dolazi do uspostavljanja koncentracija koje odgovaraju drugoj klasi. Zona nakon koje se uspostavlja potpuno mešanje i izjednačavanje sa ambijentalnom koncentracijom (sa 5,0 mg/L na 3,5 mg/L) u ovom slučaju je duža nego na slici 3b i spada u drugu klasu. Ispustom u Dunav za vreme kišnog perioda se izbegava da ceo Dunavac bude u četvrtoj klasi, a četvrta klasa se vrlo usko lokalizuje samo na inicijalnu zonu mešanja.

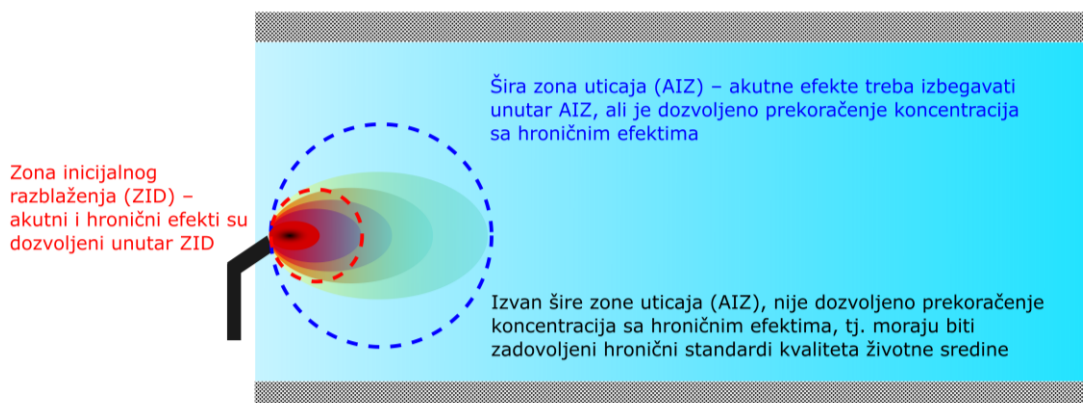
Na slici 7b prikazana je zona mešanja formirana pod istim hidrauličkim i hidrološkim uslovima, ali je ispust iz PPOV u sredinu toka Dunava. Inicijalna zona mešanja u startu pripada trećoj klasi (za razliku od obalnog ispusta, kada pripada četvrtoj klasi). Zona mešanja nakon koje se uspostavlja potpuno mešanje i izjednačavanje sa ambijentalnom koncentracijom je uža i kraća od zone mešanja koja se formira prilikom obalnog ispusta i spada u drugu klasu.

Na slikama 4a, 4b, 6a, 6b, 8a i 8b prikazana je ustaljena zona mešanja u slučaju kada je PPOV van pogona, pri čemu slike 4a, 6a i 8a predstavljaju zonu mešanja u suvom periodu, a slike 4b, 6b i 8b predstavljaju zonu mešanja u kišnom periodu. Prostorni domen modela ne obuhvata deo toka Dunava u kome se ostvaruje potpuno mešanje, pa prikazane slike ne prikazuju celokupnu zonu mešanja.

Razvijene zemlje u svom zakonodavstvu unutar zone mešanja definišu i podzone (slika 9):

1. zonu inicijalnog razblaženja (eng. ZID – Zone of Initial Dilution) u kojoj je dozvoljeno prekoračenje koncentracija sa akutnim efektima i
2. širu zonu uticaja (eng. AIZ – Allocated Impact Zone) u kojoj je dozvoljeno prekoračenje koncentracija sa hroničnim efektima.

Šira zona uticaja se često poistovećuje sa pojmom zone mešanja u svom osnovnom tumačenju. Za analizu rezultata modela, neophodno je poznavanje ovog koncepta, a naročito u slučajevima kada u prostornom obuhvatu modela ne dolazi do ostvarivanja potpunog mešanja po širini poprečnog preseka.



Slika 9. Podela zone mešanja na zonu inicijalnog mešanja (ZID) i širu zonu uticaja (AIZ)

Kada se ponovo pogledaju slike 4, 6 i 8, zone narandžaste i crvene boje u blizini ispusta predstavljaju zone inicijalnog mešanja. Jasno se uočava da je zona sa višestruko prekoračenim koncentracijama značajno manja u slučajevima prikazanim na slici 6, kada se efluent ispušta na obali Dunava, a još manja na slici 8, za slučaj ispusta u sredinu toka Dunava.

9. ZAKLJUČAK

U radu su razmatrane tri varijantne lokacije za ispuštavanje efluenta iz PPOV Veliko Selo. Varijanta br. 1 pretpostavlja izliv efluenta u desni rukavac Dunava – Dunavac, u neposrednoj blizini PPOV, varijanta br. 2 se zasniva na ispuštavanju prečišćenih otpadnih voda u Dunav u zoni donjeg špica Pančevačke ade, odnosno Velikoselskog rita, dok je varijanta br. 3 - ispuštavanje u dnu u sredinu korita Dunava – u maticu toka.

Pregledom i analizom planske dokumentacije, utvrđeno je da ni za jednu od razmatranih varijanti ne postoje urbanističke prepreke. Iako je Generalnim prostornim planom Grada Beograda do 2021, u zoni Velikoselskog rita, predviđena saobraćajna namena - luka, usled smanjene potrebe za novim lukama i blizine Luke Pančevo, ova ideja je napuštena. Trenutno, nacrt Generalnog prostornog plana Grada Beograda do 2041. više ne predviđa upotrebu navedene lokacije za prethodno projektovane saobraćajne namene.

Sa stanovišta zaštite akvatične životne sredine i ispunjavanja regulatornih standarda, rezultati hidrauličkog modela prikazani u Hidrološko-hidrauličkoj studiji (IJČ, 2022) [20] i rezultati simulacija hidrodinamičkog i transportnog modela

ukazuju na nedvosmislen prednost ispuštavanja efluenta u Dunav, u odnosu na Dunavac. Brzina toka pri malim vodama u Dunavcu kreće se u dijapazonu 0,2-0,25 m/s, a dubina vode u rasponu 1,5-10 m. Pri istim protocima brzina vode u Dunavu nizvodno od račve kreće se u dijapazonu od 0,3-0,4 m/s, a dubina vode u rasponu 17,2-18,7 m. Usled većeg protoka i brzina vode u Dunavu i intenzivnijeg mešanja, zona mešanja koja se formira nizvodno od ispusta efluenta u Dunav ima značajno manje dimenzije u odnosu na zonu mešanja u Dunavcu, što se posebno odnosi na zonu inicijalnog mešanja u kojoj se dozvoljava prekoračenje limita životne sredine sa akutnim efektima.

Prednosti ispuštavanja efluenta u Dunav umesto u Dunavac se ogledaju u svim razmatranim scenarijima i to:

- U hidrološkim uslovima malih voda Dunava;
- U suvom i kišnom režimu rada kanalizacionog sistema Beograda i
- U različitim pogonskim sistemima rada PPOV Veliko selo (redovan rad i ispad iz pogona – kvar).

Nedostatak varijante sa ispuštavanjem efluenta u Dunav je izgradnja kolektora dužine oko 2500 m, što će uticati na povećanje investicionih troškova u meri koja će se tek proceniti nakon izrade tehničkog rešenja. Niveleta terena i visinska dispozicija objekata na postrojenju u oba slučaja ostaju nepromenjene.

Ispust u Dunav se pokazao kao povoljnija varijanta od ispusta u Dunavac sa stanovišta zaštite akvatične životne sredine i ispunjavanja regulatornih standarda i zone mešanja koja se formira nizvodno od ispusta efluenta. Imajući u vidu da su prednosti veće od nedostataka,

nedvosmislena je preporuka da se usvoji ispust efluenta iz PPOV u Dunav umesto u Dunavac. Eliminacijom V1, preostaje analiza prednosti i nedostataka između V2 i V3 koja sledi.

Iako je ispust u maticu Dunava iz istih ovih razloga još povoljniji, i osim što ima kraću i užu zonu mešanja, izbegava se zona mešanja neposredno uz obalu Dunava. Sa građevinsko-tehničko-ekonomske tačke gledišta, ova varijanta je komplikovanija, imajući u vidu da bi ispust bio u sredini međunarodnog plovnog puta, pa, osim što bi morali da budu ispunjeni svi zahtevi oko obezbeđenja podvodnog cevovoda na isplivavanje i stabilizacije rečnog dna u zoni ispusta, dovela bi se u pitanje i bezbednost međunarodnog rečnog saobraćaja usled eventualnog isplivavanja cevovoda ili zahteva za obezbeđenjem minimalne dubine plovnog puta za vreme malih voda Dunava.

Iako pojam „zone mešanja“, kao ograničene zone vodnog tela u kojoj je dozvoljeno prekoračenje standarda kvaliteta životne sredine, postoji u domaćoj legislativi, nisu definisane njene dopuštene dimenzije u zadatim uslovima, niti regulatorni mehanizmi kojima bi se preporučila metodologija za proračun zone mešanja. Iz tog razloga, u ovom radu su kao merodavne korišćene preporuke EU i smernice koje se odnose na projektovanje dopuštene zone mešanja.

U slučaju redovnog pogona PPOV Veliko Selo, prostorni obuhvat zone mešanja je u dopuštenim standardima, i zona mešanja je kraća od 10% ukupne dužine vodnog tela.

Iako je ispust u sredinu korita Dunava – u maticu toka (V3) ekološki još povoljnija varijanta, ali i još komplikovanija i skuplja u odnosu na obalni ispust (V2), a imajući u vidu da je, kada je PPOV u redovnom pogonu, zona mešanja koja pripada trećoj klasi i u V2 i u V3 malih dimenzija, preporuka je da se kao kompromisno rešenje usvoji Varijanta 2 – obalni ispust u Dunav, prema kojoj se efluent iz PPOV ispušta u Dunav, uz obalu, u zoni Velikoselskog rita.

LITERATURA

- [1] „Sl. glasnik RS“: Zakon o vodama („Sl. glasnik RS“, br. 30/2010, 93/2012, 101/2016, 95/2018 i 95/2018 - dr. zakon).
- [2] Kostić, D. i Ivetić, M.: Hidraulička analiza rada rasteretnih preliva u opštem sistemu kanaliziranja, *Vodoprivreda* 0350-0519, 38 (2006) 222-224 p. 199-204, UDK: 628.2/532.533, 2006.
- [3] Mitrinović, D., Pavlović, N., Sretenović, Ž., Fengolio, F., Samanos, B. Popović, M.: Baseline and options for design of wastewater treatment plants as a part of large sewerage infrastructure: Case Study Veliko Selo (Belgrade Sewerage System), *Contemporary water management: challenges and research directions*, Proceedings of the International Scientific Conference in the Honor of 75 Years of the Jaroslav Černi Water Institute, Belgrade, Serbia (October 19-20, 2022), p. 377-396, 2022.
- [4] „Sl. glasnik RS“: Ustav Republike Srbije („Sl. glasnik RS“, br. 98/2006 i 115/2021).
- [5] Službeni list Grada Beograda: Plan detaljne regulacije za izgradnju postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda PPOV „Veliko Selo“ - I faza, gradska opština Palilula (Službeni list Grada Beograda, godina LXIII, broj 28, 16. maj. 2019. godine, ISSN 0350-4727).
- [6] Urbanistički zavod Beograda: Generalni urbanistički plan Beograda iz 1972. sa horizontom do 2000.
- [7] Službeni list Grada Beograda: Generalni urbanistički plan Beograda do 2021, Službeni list Grada Beograda, godina LX, broj 11, 7. mart 2016. godine, ISSN 0350-4727.
- [8] Urbanistički zavod Beograda: Generalni urbanistički plan Beograda 2041, Urbanistički zavod Beograda, Beograd 2022, elaborat za rani javni uvid.
- [9] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“: Projekat prikupljanja i prečišćavanja otpadnih voda centralnog kanalizacionog sistema Grada Beograda, Studija o PPOV „Veliko Selo“ Isporuka ID2, Knjiga II, Ulazni podaci, Beograd, 2022. god.
- [10] „Sl. glasnik RS“: Pravilnik o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i parametrima hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda („Sl. glasnik RS“, 74/2011).

- [11] „Sl. glasnik RS“: Uredba o graničnim vrednostima emisije zagađujućih materija u vode i rokovima za njihovo dostizanje ("Sl. glasnik RS", br. 67/2011, 48/2012 i 1/2016). http://www.sepa.gov.rs/download/KvalitetVoda_2020.pdf
- [12] „Sl. glasnik RS“: Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih materija u površinskim i podzemnim vodama i sedimentu i rokovima za njihovo dostizanje ("Sl. glasnik RS", br. 50/2012).
- [13] „Sl. glasnik RS“: Uredba o graničnim vrednostima prioritetnih i prioritetnih hazardnih supstanci koje zagađuju površinske vode i rokovima za njihovo dostizanje ("Sl. glasnik RS", br. 24/2014).
- [14] Mitrinović, D., Ignjatović, L., Pavlović, N., Kovačević, S. Popović, M.: Legislative framework regarding wastewater treatment in the Republic of Serbia and flow and transport modelling in the determination on effluent quality of wastewater treatment plant of Belgrade Central sewerage system, Proceedings of the 28th International Symposium on Analytical and Environmental Problems, Szeged, Hungary, November 14-15, 2022. University of Szeged, H-6720 Szeged, Dugonics tér 13, Hungary, p. 254-258.
- [15] „Sl. glasnik RS“: Pravilnik o utvrđivanju vodnih tela površinskih i podzemnih voda („Sl. glasnik RS“, 96/2010).
- [16] Republika Srbija, Ministarstvo zaštite životne sredine, Agencija za zaštitu životne sredine: Rezultati ispitivanja kvaliteta površinskih i podzemnih voda za 2020. godinu, Beograd, 2021. ISSN (Online) 2620-1518. Preuzeto 26. decembra 2023. sa http://www.sepa.gov.rs/download/KvalitetVoda_2021.pdf
- [17] Republika Srbija, Ministarstvo zaštite životne sredine, Agencija za zaštitu životne sredine: Rezultati ispitivanja kvaliteta površinskih i podzemnih voda za 2021. godinu, Beograd, 2023. ISSN (Online) 2620-1518. Preuzeto 26. decembra 2023. sa http://www.sepa.gov.rs/download/KvalitetVoda_2021.pdf
- [18] Donnell, Barbara P., Letter, Joseph V., McAnally, W. H., and others: “Users Guide for RMA2 Version 4.5,” [22 Apr] 2005. Preuzeto 13. decembra 2023. sa <http://smsdocs.aquaveo.com/rma2.pdf>
- [19] Letter, Joseph V., Donnell, Barbara P., and others: “Users Guide for RMA4 Version 4.5”, [14 Aug] 2008. Preuzeto 13. decembra 2023. sa <https://citeserx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=dbccd0a7858eb76563a47b7045572a31f7195cf7>
- [20] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“: Projekat prikupljanja i prečišćavanja otpadnih voda centralnog kanalizacionog sistema Grada Beograda, Hidrološko-hidraulička studija, Isporuca ID48, Beograd, 2022. god.
- [21] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“: Projekat prikupljanja i prečišćavanja otpadnih voda centralnog kanalizacionog sistema Grada Beograda, Studija o PPOV „Veliko Selo“ Isporuca ID2, Knjiga 1: Izveštaj o projektnim kriterijumima za dimenzionisanje PPOV, Beograd, 2021. god.

THE SELECTION OF THE MICROLOCATION OF THE DISCHARGE FROM THE WWTP VELIKO SELO AS A FUNCTION OF THE INFLUENCE ON THE WATER QUALITY IN THE RECIPIENT

by

Lazar IGNJATOVIĆ, Miodrag POPOVIĆ
Jaroslav Černi Water Institute, Belgrade

Summary

The paper presents and analyzes the impact which the discharge of treated and untreated wastewater from the Central sewerage system of the City of Belgrade has on the recipient - the Danube at the location of the Veliko Selo WWTP. The microlocation of the discharge from WWTP was selected based on the obtained results. The Central sewerage system of Belgrade includes about 85% of the sewerage network and currently serves more than 1,250,000 inhabitants. The hydrological data, namely the flow and level at the characteristic profiles of the Danube (minimum mean monthly flow for a 95% probability of occurrence) were collected and used to create the 2D hydraulic model RMA2. Data on the quantity and quality of treated and untreated wastewater in the rainy and dry mode of operation of the combined sewerage system were also collected and processed, and the load of wastewater with polluting substances (expressed using BOD5) was defined for the future period of operation of the WWTP (year 2041). This was then used as input data for the mathematical model of pollution transport and transformation in the recipient Danube - RMA4. A coupled 2D hydrodynamic-transport model RMA2/RMA4 was created, which simulated three variants of the discharge of treated and untreated

wastewater in the dry and rainy periods for the future state (year 2041):

1. Riverbank discharge into the Dunavac,
2. Riverbank discharge into the Danube and
3. Bottom discharge in the middle of the Danube bed.

It was concluded that the optimal outlet location is variant no. 2 – coastal outlet into the Danube. The discharge into the Danube proved to be a more favourable variant than the outlet into the Dunavac from the point of view of protecting the aquatic environment and meeting the regulatory standards as well as of the mixing zone that is formed downstream of the effluent outlet into the Danube, which has significantly smaller dimensions compared to the mixing zone in the Dunavac. The discharge into the middle of the Danube bed is an even more favourable option than the riverbank discharge into the Danube, but it is more complicated from the construction-technical-economic point of view and the provision of navigation on the international waterway.

Key words: microlocation, outlet, wastewater, WWTP, Veliko Selo, effluent, water quality, recipient