

UDK:551.482.213:214
Originalni naučni rad**ANALIZA UTICAJA IZGRADNJE SISTEMA HE NA IBRU NA KVALITET VODE**Nenad JAĆIMOVIĆ^{1*}, Dušan KOSTIĆ¹⁾, Slobodan GRAŠIĆ²⁾,
Nenad NENADIĆ³⁾¹⁾Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd²⁾JKP Vodovod-Kruševac, Dušanova 46, 37000 Kruševac³⁾Projekt a.d., Veselina Masleše 1/IV, 78000 Banja Luka

*njacimovic@hikom.grf.bg.ac.rs

REZIME

U radu su analizirani mogući uticaji izgradnje kaskade protočnih hidroelektrana na deonici reke Ibar između Raške i Kraljevana kvalitet vode, kao jedan od mogućih aspekata uticaja ovih objekata na životnu sredinu. Analizom raspoloživih podataka o kvalitetu vode reke Ibar, najpre je urađena ocena ekološkog i hemijskog statusa. Utvrđeno je da se na posmatranom delu vodotoka ekološki status može oceniti *umerenim*, pri čemu se ocena može smatrati pouzdanom, dok je hemijski status ocenjen *dobrim*. Kvantitativna procena uticaja na kvalitet vode je urađena primenom dvojnog pristupa: 1) primenom hidrodinamičkog modela sistema HE, kojim je simuliran očekivani termički režim u planiranim akumulacijama, i 2) primena „metode analogije“ u odnosu na procese koji su evidentirani na postojećoj akumulaciji „Čelije“. Rezultati ukazuju da će planirane akumulacije na Ibru predstavljati niz akvatičnih ekosistema koji će se ponašati i funkcionisati kao prelazni oblik između rečnih i jezerskih sistema. Pri tome, neće biti uslova za formiranje stabilne termičke stratifikacije vode u toplijem delu godine, što će usloviti nemogućnost potpune realizacije eutrofikacionog potencijala, koji nesumnjivo postoji, imajući u vidu sadržaj makroelemenata u vodi reke Ibar u postojećim uslovima.

Ključne reči: Ekološki uticaj, hidroelektrane, kvalitet vode, reka Ibar

1. UVOD

Na osnovu međudržavnog sporazuma Republike Srbije i Italije o saradnji u energetske sektoru, JP „Elektroprivreda Srbije“ i preduzeće „SECI Energia S.p.A.“ iz Italije, formirali su zajedničko privredno

društvo „Ibarske hidroelektrane“ sa ciljem realizacije projekta za proizvodnju električne energije na reci Ibar. Godine 2011. urađena je Prethodna studija opravdanosti sa Generalnim projektom, a 2013. Studija opravdanosti sa Idejnim projektom (obe dokumentacije uradio Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Beograd), na osnovu sprovedenih istražnih radova, neophodnih za navedene faze projektovanja. U ovom periodu, usvojen je i Prostorni plan područja posebne namene sistema hidroelektrana na Ibru (Sl. glasnik RS, 82/12).

Prema projektnom rešenju, usvojena je koncepcija iskorišćenja hidropotencijala reke Ibar na delu toka između Biljanovca (opština Raška) i Mataruga (opština Kraljevo), izgradnjom kaskade od 10 protočnih, pribranskih hidroelektrana: HE Bojanići, HE Gokčanica, HE Ušće, HE Glavica, HE Cerje, HE Gradina, HE Bela Glava, HE Dobre Strane, HE Maglič i HE Lakat. Na dužini rečnog toka od oko 46,2 km, sistemom bi se koristio ukupan pad od približno 156 m. Koncepcija rešenja je dispoziiciono i tehnički uslovljena brojnim ograničenjima, kao što su nisko postavljeni u rečnoj dolini, železnička pruga Kraljevo - Kosovska Mitrovica i magistralni put M22 Kraljevo-Raška.

U novije vreme u svetu, ali i u Srbiji, nesporno je polazište da se ovakvi sistemi moraju na najskladniji način uklopiti u okruženje, na način da ne ugrožavaju ekosisteme i socijalno okruženje. Da bi se to ostvarilo obavljaju se brojna istraživanja u više smerova. Važan segment tih istraživanja su terenska istraživanja parametara kvaliteta, na postojećim akumulacijama, kako bi se sagledao razvoj procesa promena kvalitativnih pokazatalja, kao indikator 'starenja akumulacija'. Značajna su istraživanja sprovedena na akumulaciji 'Barje' (Cibulić, 2013) čiji su

rezultatih hrabrujući, jer pokazuju da se uz odgovarajuće mere zaštite stanje kvaliteta vode može održavati u prihvatljivom stanju mezotrofije. Veoma važan aspekt uklapanja ovakvih sistema u okruženje čine i pouzdano određeni ekološki prihvatljivi protoci, koji treba da obezbede dobre uslove za opstanak i održavanje ekosistema. Iz palete tih istraživanja mogu se izdvojiti istraživanja (Đorđević & Dašić, 2011) koja su prilagođena hidrološkim prilikama u ovom regionu, kao i istraživanja koja su dovela do razvoja nove Metode Abiotičkih i Biotičkih parametara i Indeksa Saprobnosti (skraćeno MABIS), koja zahteva nešto širi spektar terenskih istraživanja parametara kvaliteta (Knežević & Đorđević, 2012). Istraživanja uticaja akumulacija na hidrološke režime su veoma važna i u uslovima karsta (Milanović, 2012), koje je pokazalo da se uspešno može apriorno sagledati uticaj realizacije objekata na vodne režime na ekološki veoma bitnim mestima u hidrografskoj mreži.

U skladu sa tim istraživačkim naporima, da se svi objekti koji se grade na rekama apriorno, još tokom planiranja skladno uklape u okruženje, u ovom radu se razmatra jedan vrlo važan aspekt potencijalnih uticaja – uticaj kaskade uspornih objekata na kvalitet vode reke Ibar. Ovaj aspekt uticaja je često i predmet najveće pažnje javnosti, posebno ukoliko predmetni vodotok nizvodno predstavlja okosnicu vodosnabdevanja, kao što je to slučaj u Kraljevu. U radu će se najpre dati ocena postojećeg stanja kvaliteta vode reke Ibar, a zatim će se prikazati metodologija i rezultati za procenu potencijalnih uticaja planiranog sistema HE.

2. POSTOJEĆI KVALITET VODE REKE IBAR

Analiza postojećeg stanja kvaliteta vode reke Ibar je urađena za deo toka od Raške do ušća u Zapadnu Moravu, dužine 93,3 km. Pored deonice Bojanići-Lakat, na kome se planira izgradnja sistema HE, obuhvaćen je i deo toka uzvodno i nizvodno od planiranog sistema. Naime, pretpostavka je da će eventualni uticaj sistema HE na kvalitet vode reke Ibar biti ograničen na ovu deonicu.

Reka Ibar je najveća pritoka Zapadne Morave. Izvire pod Prokletijama, na severnom delu planine Hajla, u Crnoj Gori, a nakon 276 km toka uliva se u Zapadnu Moravu kod Kraljeva. Jednim delom svog toka, Ibar protiče kroz Kosovo i Metohiju, gde je nasutom branom visine 110m formirana akumulacija Gazivode. Ukupna površina sliva iznosi 8.059 km². Kroz klisuru, između Biljanovca i Mataruga, Ibar je brza reka. Tu je korito široko oko 50 m, udubljeno u serpentinu ili planinskim krupnim nanosima, ispunjeno monolitnim blokovima i

oblucima stena, preko i oko kojih se mestimično formiraju izraziti brzaci. Nizvodno od Mataruga, Ibar dobija izgled ravničarske reke, gde se tok smiruje i mestimično račva u rukavce između nanosnih rečnih formacija. Srednji godišnji protok Ibra kod Raške iznosi oko 45 m³/s, dok na ušću u Zapadnu Moravu iznosi oko 63 m³/s.

Postojeći kvalitet vode reke Ibar određen je u potpunosti u skladu sa metodologijom koju propisuje Pravilnik o parametrima ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda i parametrima hemijskog i kvantitativnog statusa podzemnih voda („Službeni glasnik RS“, br. 74/11).



Slika 1. Sistem HE na Ibru, pregledna situacija.

Prema ovom Pravilniku, značenje sintakse *kvalitet vode*, podrazumeva određivanje ekološkog i hemijskog statusa neizmenjenih vodnih tela površinskih voda (reka i jezera), ili određivanje ekološkog potencijala i hemijskog statusa za značajno izmenjena i veštačka vodna tela (akumulacije).

Ekološki i hemijski status reke Ibar procenjeni su na osnovu podataka Ministarstva energetike, razvoja i zaštite životne sredine, Agencije za zaštitu životne sredine, iz 2011. i 2012. godine, sa tri merne stanice: Raška (nadzorni i operativni monitoring), Ušće (nadzorni i operativni monitoring) i Kraljevo (nadzorni monitoring). Promene relevantnih fizičko-hemijskih indikatorakvaliteta vode, u smislu određivanja trendova i periodičnosti, ocenjene su statističkom analizom vremenskih serija pokazatelja kvaliteta sa navedene tri stanice u periodu od 2004. do 2012. godine. Takođe, u julu 2013. godine, sprovedena su i namenska merenja kvaliteta vode reke Ibar i pritokama Lopatnici i Studenici, koje je sproveo Gradski Zavod za javno zdravlje iz Beograda.

Ekološki status. Zbog potrebe da se oceni postojeći ekološki status, korišćeni su poslednji dostupni podaci iz 2012. godine. Sa druge strane, zbog potrebe da se analizom pouzdano oceni ekološki status u bliskoj prošlosti, korišćena je vremenska serija relevantnih fizičko-hemijskih indikatora od 2004. do 2012. godine. Merodavne vrednosti fizičko-hemijskih parametara, koji

su od značaja za akvatičnu biologiju i koji se koriste u oceni ekološkog statusa, prikazani su u Tabeli 1. Merodavne vrednosti određuju se kao godišnji/višegodišnji percentil ranga 80, sa izuzetkom kiseonika za koji je merodavan percentil ranga 10.

Iz prikazanih podataka (Tabela 1) može se primetiti da su vrednosti indikatora, koje su procenjene iz višegodišnjeg niza nešto ujednačenije u odnosu na vrednosti koje su ocenjene iz niza mesečno osmatranih vrednosti u 2012. godini. Voda u Ibru ima bazni karakter i najveći broj izmerenih pH vrednosti, na sve tri stanice, nalazi se na samoj granici dozvoljenih (pH=8,5). Kiseonični režim je relativno uravnotežen, a najviše vrednosti beleže se na mernoj stanici Ušće. Podaci iz 2012. godine, ukazuju da indikatori opterećenja rečne vode organskom materijom (BPK₅, TOC), opadaju duž toka, od Raške prema Kraljevu. Takav zaključak se ne može izvesti i za višegodišnji niz gde su vrednosti indikatora relativno bliske. Merodavne koncentracije ukupnog organskog ugljenika u 2012. godini su za otprilike 50% veće od onih procenjenih na osnovu višegodišnjeg niza. Uzrok ovome mogu biti relativno mali protoci, zbog sušne 2012. godine. Na osnovu podataka za 2012. godinu, ali i na osnovu merodavnih vrednosti iz višegodišnjeg niza, uočava se da amonijum jon i nitrati opadaju duž toka, od Raške prema mernoj stanici Kraljevo. U razmatranim periodima nisu zabeležena značajnija kolebanja u koncentracija ortofosfata i hlorida.

Tabela 1. Vrednosti fizičko-hemijskih parametara, na osnovu kojih se vrši ocena ekološkog statusa, za 2012. godinu i za period od 2004. do 2012. godine, na mernim stanicama „Raška“, „Ušće“ i „Kraljevo“.

			FIZIČKO-HEMIJSKIELEMENTIKVALITETA* (mg/L)								
			pH vrednost (-)	Rastvoreni kiseonik	BPK ₅	Ukupni organski ugljenik (TOC)	Amonijum jon (NH ₄ -N)	Nitrati (NO ₃ -N)	Ortofosfati (PO ₄ -P)	Ukupni rastvoreni fosfor (P)	Hloridi
MERNA STANICA	PODACI IZ 2012	Raška	8,6	8,51	3,22	7,70	0,47	1,20	0,14	-	15,4
		Ušće	8,7	8,88	1,96	5,58	0,32	1,40	0,14	-	18,2
		Kraljevo	8,5	8,19	2,50	6,70	0,18	0,80	0,15	-	16
	PODACI OD 2004-2012	Raška	8,5	8,03	3,00	4,92	0,20	2,36	0,16	-	18
		Ušće	8,5	9,10	3,36	4,92	0,17	2,00	0,15	-	18
		Kraljevo	8,6	8,90	3,20	4,52	0,13	1,82	0,12	-	17

*Merodavne vrednosti parametara ocenjuju se kao percentil ranga 80, izuzev za rastvoreni kiseonik, za koji se merodavna vrednost određuje kao percentil ranga 10

Za sve tri stanice ekološki status Ibra je ocenjen kao *umeren*, u 2012. godini, ali i u periodu od 2004. do 2012. godine. Na svim stanicama dobar godišnji/višegodišnji ekološki status je prekoračen po bar dva parametra: amonijum jon i ortofosfati. Godišnji ekološki status na stanici Raška prekoračio je granicu dobrog po još dva dodatna parametra: pH vrednost i ukupni organski ugljenik.

Prema pomenutom pravilniku umeren ekološki status obezbeđuje uslove koji odgovaraju vrednostima bioloških parametara koji su tipični za dati status. Obzirom da su korišćeni podaci Agencije za zaštitu životne sredine, koja operativni i nadzorni monitoring sprovodi u skladu sa Uredbom i da je ekološki status procenjen na osnovu 90% relevantnih parametara, može se tvrditi da je ocena ekološkog statusa pouzdana.

Hemijski status. Hemijski status reke Ibar, ocenjen je poređenjem graničnih vrednosti prioriternih i prioriternih hazardnih supstanci sa njihovim izmerenim koncentracijama u 2012. godini na mernim stanicama „Raška“, „Ušće“ i „Kraljevo“. Izmerene vrednosti prioriternih i hazardnih supstanci ne prelaze propisane granične vrednosti, pa se može zaključiti da je postignut dobar hemijski status reke Ibar. Potrebno je ipak napomenuti da veliki broj parametara potrebnih za komparaciju nije bio meren, a tu se pre svega misli na: heksahlorna jedinjenja, poliaromatične ugljovodonike i na polihlorovane bifenile.

Dobar hemijski status je ostvaren i po sadržaju teških metala: kadmijuma, žive, olova i nikla. Sadržaj teških metala je jedna od najznačajnijih odrednica kvaliteta akvatične sredine, obzirom da su toksični, neki su dokazano kancerogeni (kadmijum i jedinjenja nikla), a mogu reagovati i sa sulfhidrilnim grupama u enzimima čime blokiraju njihov rad, samim tim i sve procese koji od njih zavise. Treba naglasiti da je nepoželjno prisustvo teških metala u jonskom obliku, dok su u čvrstoj fazi (sa izuzetkom žive koja je tečna) uglavnom neškodljivi. Za teške metale je karakteristična bioakumulacija i biomagnifikacija. U žive organizme dospevaju, ili u procesu ishrane, ili direktno, prodorom kroz ćelijsku membranu ili placentu sisara, gde se akumuliraju. U slučaju četiri pomenuta metala, maksimalno izmerene i srednje godišnje koncentracije ne prekoračuju, maksimalno dozvoljene i prosečne godišnje koncentracije (MDK i PGK) ni na jednoj od tri razmatrane stanice.

Statistički aspekti kvaliteta vode. Analizom statističkih parametara serija podataka o kvalitetu vode

mogućeje steći uvid u prostornu i vremensku raspodelu osnovnih pokazatelja kvaliteta vode, detektovati trendovi, njihova periodičnost, korelisanost kao i interakcija ovih pokazatelja sa hidrološkim režimom. Tabela 2 prikazuje osnovne statistike pokazatelja kvaliteta vode: minimalna vrednost, srednja vrednost i maksimalna vrednost, za merne stanice „Raška“, „Ušće“ i „Kraljevo“, na osnovu podataka prikupljenih u periodu 2004-2012. godina. Temperature vode, pH vrednosti i rastvoreni kiseonik variraju u očekivanim granicama, dok se najveća varijabilnost i najznačajniji ekstremi vezuju sa suspendovane materije. Najniže vrednosti temperature vode beleže se na najjužnijoj stanici „Raška“. Temperature se kreću u očekivanim okvirima i nema pojave značajnih ekstrema. Najveća temperatura, u razmatranom nizu, iznosi 24,4 °C, i izmerena je na stanici „Kraljevo“. Najniže vrednosti pH, beleže se na mernoj stanici „Raška“, ali je na ovoj stanici i njihovo kolebanje najveće. Na stanici „Kraljevo“ pH vrednosti su najveće. Medijana iznosi 8,4, što znači da je veliki broj uzoraka iznad dozvoljene granice od 8,5. Koncentracija suspendovanih materija ima opadajući trend od Raške prema Kraljevu. Najveći broj izmerenih vrednosti, na sve tri stanice nalazi se ispod 40 mg/L. Ovaj parametar, međutim beleži i najveća kolebanja. Na mernoj stanici „Ušće“ maksimalna zabeležena vrednost iznosi 365 mg/L. Kiseonični režim je relativno ujednačen i sve izmerene vrednosti se kreću u okviru očekivanih. Donekle je neobično da sadržaj kiseonika raste od Raške prema Kraljevu, obzirom da temperature u tom smeru imaju blag trend rasta. Najveći broj izmerenih bioloških i hemijskih potrošnji kiseonika, na sve tri stanice, nalazi se u relativno uskom opsegu, u okviru očekivanih vrednosti. Oba pokazatelja beleže blag pozitivan trend od Raške prema Kraljevu.

Koncentracije amonijum jona i nitrata imaju blag opadajući trend od Raške prema Kraljevu. Koncentracije amonijum jona su za red veličine niže od koncentracija nitrata, što ukazuje na neometanunitrifikaciju u prisustvu dovoljnih količina rastvorenog kiseonika. Najveći broj izmerenih koncentracija ortofosfata i ukupnog fosfora, varira u uskom opsegu. I ova dva parametra beleže blag negativan trend u pravcu toka Ibra, od Raške prema Kraljevu.

Pokazatelji kvaliteta voda, zajedno sa protokom, međusobno su korelisani, a za meru intenziteta njihove stohastičke povezanosti izabran je Pirsonov koeficijent korelacije (Helseh and Hirsch, 2002.). U Tabeli 3 data je matrica Pirsonovih koeficijenata korelacije za sledeće promeljive: protok, temperatura vode, pH vrednost,

suspendovane materije, rastvoreni kiseonik, BPK₅, HPK, amonijum jon, nitrati, ortofosfati i ukupni fosfor. Podaci se odnose na mernu stanicu Ušće za serije podataka iz perioda od 2004. do 2012. godine. Na prvi pogled, većina parametara je slabo korelisana. Treba ipak imati na umu da su parametri testirani na linearnu međusobnu zavisnost, koja ima jednoznačan i pojednostavljujući karakter. U nekim od prethodnih studija kvaliteta površinskih i podzemnih voda, Pirsonov koeficijent veći od 0,7 smatran je snažnom linearnom vezom između promenljivih (Fust, 1997). U analizama kvaliteta kišnog oticaja, Pirsonov koeficijent veći ili jednak 0,8 smatra se snažnom linearnom vezom među određenim polutantima (Zhang et al., 2013, Han et al., 2006.). U ovoj analizi, usvojeno je da su promenljive snažno korelisane za apsolutne vrednosti Pirsonovog koeficijenta veće ili jednake (ili vrlo bliske) 0,7, dok sve apsolutne vrednosti koeficijenta, bliske 0,4, upućuju na značajnu, odnosno evidentnu vezu između promenljivih.

Temperatura vode i rastvoreni kiseonik su najjače korelisani, i to negativno, sa vrednošću koeficijenta korelacije od -0,744. Rastvorljivost gasova u vodi je intenzivnija u uslovima niskih temperatura i ova činjenica ima veliki značaj, jer upućuje na zaključak da je kiseonični režim Ibra prevashodno pod uticajem hidrološko-meteoroloških prilika, a manje pod uticajem

prisustva zagađujućih materija. Taj zaključak dodatno potvrđuju i relativno male i to pozitivne vrednosti koeficijenta korelacije između kiseonika i BPK₅ ($r=0,187$), kao i između kiseonika i HPK ($r=0,184$). Očekuje se da ove korelacije u najvećem broju slučajeva budu negativne, tj. razumno je pretpostaviti da velikim vrednostima biološke potrošnje kiseonika odgovaraju niže koncentracije rastvorenog kiseonika. U Tabeli 3 uočava se i značajan uticaj hidroloških uslova, tj. protoka, na neke pokazatelje kvaliteta vode. Protok je negativno i značajno korelisana sa temperaturom vode ($r=-0,449$). Treba naglasiti da visoke vrednosti protoka ne utiču na niske temperature vode, već uglavnom koincidiraju sa njima. Protok je negativno korelisana sa pH vrednošću vode ($r=-0,550$). Ova veza nije tako očigledna, ali je objašnjiva i to preko upravo objašnjene korelacije protoka i temperature vode. Temperatura vode i pH vrednost su pozitivno korelisane ($r=0,404$). To se objašnjava činjenicom da visoke temperature vode utiču na smanjen sadržaj slobodnog ugljen-dioksida u vodi ($r=-0,380$, ova vrednost nije prikazana u Tabeli), koji je sa pH vrednošću jako, negativno korelisana ($r=-0,801$, i ova vrednost nije prikazana u Tabeli). Na taj način, posredno može da se objasni, netako značajna, ali evidentna korelisanost protoka i pH vrednosti. Protok je pozitivno korelisana sa suspendovanim materijama ($r=0,461$).

Tabela 2. Osnovni statistički pokazatelji kvaliteta vode Ibra, na mernim stanicama Raška, Ušće i Kraljevo, na osnovu mesečno osmotrenih podataka u periodu od 2004. do 2012. godine

Parametar	[jedinice]	RAŠKA			UŠĆE			KRALJEVO		
		Min	Max	Sr. vr.	Min	Max	Sr. vr.	Min	Max	Sr. vr.
Temperatura	[°C]	1,2	21,4	10,3	1,2	23,2	12,1	1,2	24,4	11,7
pH	[-]	7,5	8,8	8,2	7,8	8,9	8,3	7,9	8,7	8,4
Suspendovane materije	[mg/L]	1,0	310,0	36,0	1,0	365,0	30,0	1,0	269,0	23,1
Rastvoreni kiseonik	[mg/L]	6,3	15,5	10,2	7,84	18,50	10,88	7,80	14,51	10,84
BPK ₅	[mg/L]	0,8	6,0	2,49	0,72	4,20	2,71	0,60	4,70	2,79
HPK	[mg/L]	2,0	12,1	3,4	2,1	10,0	4,0	2,1	6,2	4,0
Amonijum jon	[mg/L]	0,010	0,690	0,130	0,010	0,960	0,133	0,010	0,660	0,087
Nitrati	[mg/L]	0,007	3,710	1,818	0,100	3,620	1,517	0,050	3,770	1,399
Ortofosfati	[mg/L]	0,020	0,290	0,129	0,011	0,246	0,118	0,001	0,192	0,094
Ukupni fosfor	[mg/L]	0,049	1,072	0,251	0,025	0,372	0,195	0,022	1,780	0,163

Pojava velikih protoka vezuje se za obilne padavine, ili za period otapanja snega. Erozija na slivu i resuspenzija istaloženog nanosa u uslovima povećanih brzina dovodi i do povećanog sadržaja suspendovanih materija u vodi.

Protok je pozitivno korelisan i sa koncentracijom rastvorenog kiseonika ($r=0,394$). Veliki protoci, velike brzine vode i uzburkano vodno ogledalo, velike specifične površine, pospešuju penetraciju atmosferskog kiseonika u vodenu sredinu. Treba se ponovo podsetiti koincidencije povećanih protoka i niskih temperatura vode, kada je rastvorljivost kiseonika u vodi povećana. U Tabeli 3 postoji još jedna značajna pozitivna korelacija, i to između BPK₅ i nitrata ($r=0,460$). Ona se lako objašnjava obzirom da je biološkom potrošnjom kiseonika obuhvaćen proces nitrifikacije (BPK = ugljenična BPK + azotna BPK). Ova veza još ukazuje i na organsko poreklo azotnih jedinjenja u Ibru čiji izvor mogu biti otpadne vode, humus, uginule životinje i sl. Treba napomenuti, da u uslovima povećanih pH vrednosti koje su karakteristične za Ibar, amonijak u vodi može biti prisutan i u nejonizovanoj formi, kao NH₃, koja je toksična za ribe.

Može se zaključiti da je kvalitet vode u Ibru, pored antropogenog uticaja, snažno uslovljen hidrološko-meteorološkim prilikama. Najveći uticaj na kiseonični režim ima temperatura vode, dok uticaj organskog zagađenja na sadržaj kiseonika nije ustanovljen analizom rezultata. Ibar je u ovom delu toka brza i

uzburkana reka, pa su uvek prisutne visoke zalihe rastvorenog kiseonika. To znači da kiseonični režim u velikoj meri zavisi i od hidro-morfoloških karakteristika rečnog toka.

Najveći broj izmerenih bioloških i hemijskih potrošnji kiseonika, na stanicama „Raška“, „Ušće“ i „Kraljevo“, leži u relativno uskom opsegu. Slično važi za amonijum jon i nitrata. Sve to ukazuje na relativno konstantno opterećenje biološki i hemijski razgradivim organskim materijama, kao i na činjenicu da su azotna jedinjenja organskog porekla. Značajna korelacija između protoka i sadržaja suspendovanih materija, ukazuje na prisustvo pluvijalne erozije na slivu i na činjenicu da se u vreme velikih protoka odvija resuspenzija nanosa.

3. ANALIZA UTICAJA IZGRADNJE SISTEMA HE NA KVALITET VODE REKE IBAR

Metodologija. Za kvantitativnu analizu mogućih promena kvaliteta vode u planiranim akumulacijama korišćen je dvojni pristup:

- izrada hidrodinamičkog modela kaskade akumulacija u cilju analize temperaturnog režima vode u planiranim akumulacijama, i
- korišćenje „metode analogije“ u odnosu na postojeće, dobro izučene akumulacije sa sličnim morfološkim i uslovima kvaliteta vode na ulazu u sistem.

Tabela 3. Matrica Pirsonovih koeficijenata korelacije, kao mera linerne povezanosti između parametara kvaliteta vode na stanici „Ušće“, u periodu od 2004. do 2012. godine.

	Q	T	pH	TSS ¹	DO ²	БПК ₅	ХПК	NH ₄	NO ₃	PO ₄	TP ³
Q	1	-0,449	-0,550	0,461	0,394	0,165	0,234	0,122	-0,226	-0,275	-0,188
T		1	0,404	-0,112	-0,744	-0,067	-0,161	-0,232	-0,043	0,193	0,237
pH			1	-0,261	-0,281	-0,219	-0,112	-0,159	0,107	0,166	0,024
TSS				1	0,090	0,158	0,369	0,090	-0,120	-0,020	0,178
DO					1	0,187	0,184	0,216	0,187	-0,250	-0,370
БПК ₅						1	0,159	-0,305	0,460	-0,194	-0,149
ХПК							1	0,060	0,097	-0,013	-0,057
NH ₄								1	-0,293	-0,036	-0,083
NO ₃									1	0,242	0,163
PO ₄										1	0,694
TP											1

¹ TSS Suspendovane materije, ² DO Rastvoreni kiseonik, ³ TP ukupni fosfor

Na ovaj način su kvantitativno analizirana moguće promene osnovnih indikatora koji određuju trofički status i kvalitet vode u akumulacijama, a time i nizvodno od njih.

Hidrodinamički model. Za potrebe ovih analiza, razvijen je numerički model kaskadnih akumulacija planiranog sistema HE na Ibru. Dvodimenzionalni, longitudinalni/vertikalni model neustaljenog tečenja razvijen je uz pomoć CE-QUAL-W2 softverskog paketa (U.S. Army Corps of Engineers). CE-QUAL-W2 model je do sada upešno primenjen na više od 400 vodenih sistema širom sveta (spisak se može naći na veb stranici <http://www.ce.pdx.edu/w2/>), a testiran je i recenziran od strane velikog broja autora (Deliman i Gerald, 2002; Hanna et al., 1999; Gelda et al., 1998; Johnson, 1987). Model rešava hidrodinamičke i transportne diferencijalne jednačine u podužnoj vertikalnoj ravni, tj. lateralno osrednjene diferencijalne jednačine. Zbog toga što pretpostavlja homogenost u lateralnom pravcu, njegova primena najviše odgovara relativno dugačkim i uskim vodenim telima, sa izraženim longitudinalnim i vertikalnim gradijentima parametara kvaliteta. Obzirom na geometrijske karakteristike planiranih akumulacija (širine su dva reda veličine manje od dužina), smatramo da ovakav model može adekvatno da reprezentuje njihove hidrodinamičke procese. Osnovni cilj ovih numeričkih analiza je bila procena uticaja uspora toka na temperaturni režim voda, kao jednog od ključnih parametara, kako eutrofikacionih procesa u akumulacijama, tako i karakteristika vode kao biotopa.

CE-QUAL-W2 modelom je moguće simulirati veliki broj parametara kvaliteta vode, kao što su rastvoreni kiseonik, koncentracije nutrijenata, rastvorene organske materije, organske i neorganske suspendovane materije, kao i proizvoljan broj fitoplanktonskih, zooplanktonskih i perifitonskih grupa. Na osnovu iskustva sa prethodnih, sličnih modelskih istraživanja na postojećim akumulacijama (Jaćimović, et al., 2011, Jovanić, et al., 2009), procenjeno je da osim temperature vode, u ovom slučaju ne postoje uslovi za pouzdano kvantitativno predviđanje ostalih parametara kvaliteta primenom ovog modela. Naime, činjenica je da su kompleksni, međuzavisni biohemijski procesi u akumulacijama osetljivi na veliki broj parametara koje je moguće utvrditi tek na osnovu sistematskih osmatranja na samoj akumulaciji i koje je zatim moguće kroz proces kalibracije inkorporirati u sam model. Drugim rečima, pouzdana primena ovog modela biće moguća tek kada se akumulacije formiraju, kada se sistematski prikupe prvi podaci monitoringa parametara kvaliteta vode i nakon kalibracije biohemijskih parametara modela. Pri

tome, moramo da istaknemo da su temperaturni režim i hidrodinamičke karakteristike u svakom vodenom telu ključni elementi, koji imaju odlučujuću ulogu u eutrofikacionim i eutrofizacionim procesima.

Na osnovu toga je zaključeno da će se pouzdanije kvantitativne prognoze obezbediti primenom „analogije“ sa sprovedenim istraživanjima i prikupljenim podacima na sličnim akumulacijama. Naime, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, u saradnji sa JKP Vodovod iz Kruševca, ova istraživanja sprovodi već duži niz godina na akumulaciji Čelije, koja ima značajne sličnosti sa planiranim sistemom akumulacija na Ibru.

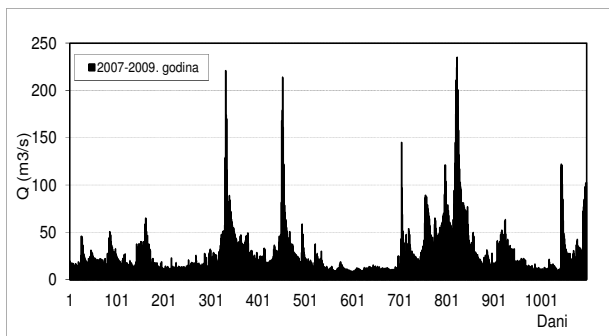
Model sistema HE je formiran kao kaskadni sistem pojedinih akumulacija koje su diskretizovane u podužnom i vertikalnom pravcu. U podužnom pravcu svaka akumulacija je diskretizovana na podužne elemente dužine 100-500 m, dok je u vertikalnom pravcu diskretizacija urađena sa elementima visine 1m.

Za formiranje i simulaciju sistema planiranih akumulacija, pripremljeni su sledeći ulazni podaci:

- batimetrijski podaci; prostorna diskretizacija modela je urađena na osnovu digitalnih topografskih podloga i krivih zapremine i površine akumulacija;
- početni i granični uslovi; hidrološki i meteorološki dnevni nizovi su preuzeti iz godišnjih izveštaja Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije;
- hidraulički parametri; sve simulacije su vršene uglavnom sa vrednostima preporučenim od strane autora softverskog paketa. Prethodna modelska istraživanja akumulacije Čelije, uz neznatne korekcije, su pokazala da model daje odlično slaganje temperaturnog režima sa ovako usvojenim hidrauličkim parametrima (Nenadić i dr., 2013).

Simulacija je izvršena za hidrološke i meteorološke uslove iz 2007, 2008. i 2009. godine, pri čemu su meteorološki dnevni podaci u ovom periodu (temperatura vazduha, vlažnost vazduha, oblačnost i podaci o vetru) preuzeti sa meteorološke stanice „Kraljevo“.

Kao rezultat simulacija, dobijene su promene temperaturnih profila hidrauličkih parametara duž planiranih akumulacija. Tabela 5 prikazuje očekivano temperaturno polje upodužnoj ravni najveće planirane akumulacije Bojanići, u toku letnjeg perioda. Na slici 4 su prikazani dijagrami temperaturnih profila



Slika 2. Ulazni hidrološki niz na Ibru, profil Raška, korišćen u simulacijama

Tabela 4. Karakteristike akumulacija i prosečno vreme zadržavanje vode u toplijem delu godine (maj-septembar).

Pregrada	F (km ²)*	V x 10 ⁶ (m ³)*	Qsr (m ³ /s)**	T (dani)
HE Lakat	0,677	3,156	43,98	0,83
HE Maglič	0,336	2,028	43,05	0,54
HE Dobre Strane	0,261	1,263	42,37	0,35
HE Bela Glava	0,261	1,719	41,80	0,48
HE Gradina	0,352	1,576	41,38	0,44
HE Cerje	0,258	1,580	41,11	0,44
HE Glavica	0,397	1,433	41,03	0,40
HE Ušće	0,433	2,700	33,54	0,93
HE Gokčanica	0,591	2,860	33,51	0,99
HE Bojanići	1,352	6,682	33,11	2,34

* Pri koti normalnog uspora

**U periodu maj-septembar

(januar, maj, avgust i oktobar) neposredno uzvodno od brane HE Bojanići za sve tri simulirane godine. Rezultati ukazuju da je većim delom godine akumulacija gotovo homogena u odnosu na temperaturu vode, dok se u najtoplijem delu godine jul-avgust dolazi do blagog temperaturnog raslojavanja, ali bez uslova za stabilnu termičku stratifikaciju vode. Analize pokazuju da je temperatura vode određena najpre temperaturom vode na ulazu u akumulaciju, odnosno vode koja dolazi Ibrom, a zatim i meteorološkim uslovima.

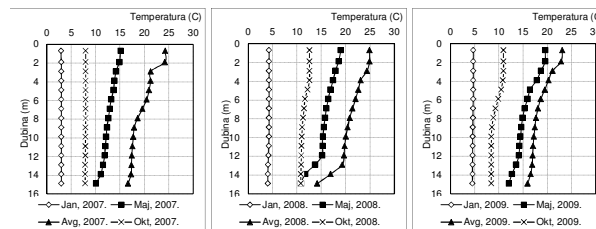
Na ostalim, znatno manjim akumulacijama sistema, temperatura vode je praktično homogena tokom cele

godine i određena temperaturom vode na ulazu. To upravo odgovara uslovima rada malih, protočnih akumulacija, koje funkcionišu kao prelazni oblik između rečnih i jezerskih sistema.

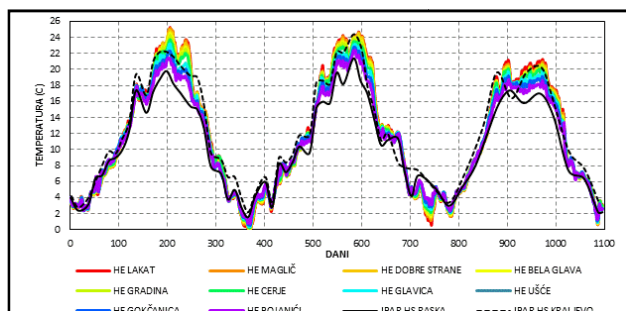
Interesantno je uporediti sračunate temperature vode na izlazu iz pojedinih akumulacija kaskade HE sa izmerenim temperaturama vode reke Ibar u istom periodu uzvodno i nizvodno od sistema (HS Raška i HS Kraljevo). Na dijagramu prikazanom na Slici 4 može se videti da su najveće i najniže temperature vode nešto izraženije u odnosu na prirodni režim. Pri tome, najizraženiji porast temperature se može očekivati u najvećoj akumulaciji Bojanići, do 3 °C. Na osnovu sprovedenih proračuna, može se očekivati da će nizvodno od sistema HE temperatura vode u najtoplijem delu godine biti 2-3 °C veća u odnosu na postojeći režim reke, u kratkim periodima izuzetno niskih temperatura vazduha oko 1 °C niža, a u preostalom delu godine, praktično bez promena. Sa druge strane u samim akumulacijama, zbog male zapremine i kratkog vremena zadržavanja vode, nema uslova za pojavu stabilne termičke stratifikacije koja bi onemogućila vertikalno mešanje vode.

Tabela 5. Poduzni profil akumulacije Bojanići sa sračunatom temperaturom vode za uslove iz avgusta 2009. godine. Stacionaža se odnosi na udaljenost od profila brane.

Segment	3	7	11	15	18	21	24	27	30	33
Dubina (m)	8235	7155	6075	4995	4185	3375	2565	1755	945	202
0,7	16,8	16,8	16,9	21,2	22,2	22,7	22,5	22,9	23,2	23,1
1,9		16,8	16,9	19,1	20,4	21,6	22,0	22,5	23,2	22,9
2,9			16,9	18,1	19,5	20,7	20,4	20,7	21,3	21,1
3,9			16,9	17,7	18,8	19,5	20,2	20,2	20,1	20,2
4,9			16,9	17,6	18,2	18,7	19,1	19,7	19,4	19,5
5,9				17,6	17,9	18,0	18,4	18,8	18,8	18,6
6,9					17,7	17,7	17,9	18,0	18,2	18,1
7,9						17,5	17,5	17,5	17,7	17,7
8,9							17,3	17,3	17,3	17,4
9,9								17,2	17,1	17,2
10,9									17,1	17,1
11,9										17,0
12,9										17,0
13,9										16,6
14,9										15,9



Slika 3. Sezonske promene temperaturnih profila neposredno uzvodno od planirane brane HE Bojanići.



Slika 4. Promena temperature vode u toku simulacionog perioda na izlazu iz pojedinih planiranih akumulacija i poređenje sa osmotrenim temperaturama u istom periodu uzvodno i nizvodno od sistema.

Analogija sa akumulacijom Čelije. Akumulacija Čelije i planirane akumulacije na Ibru imaju sličnu geološku podlogu, a razlike u nadmorskoj visini i klimatskim uslovima nisu velike. Takođe, kvalitet vode reke Rasine je znatno opterećen antropogenim uticajem, slično kao u slučaju reke Ibar. Sama akumulacija Čelije se morfološki može posmatrati kao kaskada tri basena, od kojih je za definisanje dinamike abiotičkih parametara, odnosno njihove promene usled uspora uzet prvi basen jezera Čelije, Zlatari, sa podacima od 2006. do 2012. godine.

Jedan od osnovnih parametara koji utiče na hemizam vode i sam karakter biotopa i biocenoza kod protočnih akumulacija predstavlja retenciono vreme vode. Za sve razmatrane parametre su najpre sračunate njihove dnevne promene u odnosu na retenciono vreme na sledeći način:

$$\bar{C}_d = \frac{\bar{C}_z}{\tau_z}$$

gde je \bar{C}_d prosečna dnevna promena pojedinog parametra, \bar{C}_z prosečna vrednost istog parametra u Zlatarima, i τ_z prosečno retenciono vreme u Zlatarima, sračunato kao odnos zapremine akumulacije i prosečnog protoka u posmatranom periodu.

U ovoj analizi su kao ulazni podaci za analizu planiranih akumulacija uzeti osmotreni podaci iz godišnjih izveštaja Hidrometeorološkog zavoda Srbije za stanice Raška, Ušće i Kraljevo, od 2004. do 2012. godine. U tim podacima se reflektuju svi bitni uslovi koji će oblikovati buduće jezerske ekosisteme: veličina, topografija

i hemizam sliva, lokalna klima, uticaj lokalnih ekosistema, kao i uticaj čoveka. Na osnovu pretpostavke da dužina rečnog toka i sukcesija gornji-srednji-donji tok dovode do promene hemizma vode, izračunate su prosečne promene parametara u odnosu na dužinu toka:

$$\bar{C}_{L_R-U} = \frac{\bar{C}_U - \bar{C}_R}{L_R - L_U}, \bar{C}_{L_U-K} = \frac{\bar{C}_K - \bar{C}_U}{L_U - L_K} \bar{C}_L = \frac{\bar{C}_K - \bar{C}_R}{L_R}$$

gde su \bar{C}_{L_U} prosečna promena parametra duž toka između Raške i Ušća, \bar{C}_{L_U-K} prosečna promena parametra duž toka između Ušća i Kraljeva, \bar{C}_L prosečna promena parametra duž toka između Raške i Kraljeva, \bar{C}_R , \bar{C}_U i \bar{C}_K prosečne vrednosti parametara na HS Raška, HS Ušće i HS Kraljevo, dok su L_R i L_U udaljenosti HS Raška i HS Ušće od ušća u Zapadnu Moravu.

Prosečne početne vrednosti parametara reke Ibar na ulazu u akumulaciju Bojanići su sračunate na osnovu sledećeg izraza:

$$\bar{C}_{ini} = \bar{C}_R + \frac{(L_R - L_I)(\bar{C}_U - \bar{C}_R)}{(L_R - L_U)}$$

gde je \bar{C}_{ini} prosečna vrednost parametra na ulazu u akumulaciju Bojanići, a L_I udaljenost planirane akumulacije Bojanići od ušća Ibra.

Prosečne vrednosti parametara u akumulaciji Bojanići, neposredno ispred brane, na pojedinim dubinama vode, izračunate su na osnovu sledećeg izraza:

$$\bar{C}_{h_B} = \bar{C}_R + L_I \frac{(L_R - L_I)(\bar{C}_U - \bar{C}_R)}{(L_R - L_U)} + \frac{(L_R - L_U)(\bar{C}_K - \bar{C}_R) - (L_R - L_I)(\bar{C}_U - \bar{C}_R)}{L_I(L_R - L_U)} l_B + \frac{\bar{C}_{h_z}}{\tau_z} \tau_B$$

gde je \bar{C}_{h_B} prosečna vrednost parametra na određenoj dubini u akumulaciji Bojanići, \bar{C}_{h_z} prosečna osmotrena vrednost istog parametra u Zlatarima, l_B dužina jezera Bojanići, dok τ_B predstavlja prosečno retenciono vreme u akumulaciji Bojanići.

Pretpostavlja se da je vodozahvat HE neposredno iznad dna akumulacije, pa se kao ulazne vrednosti za svaku nizvodnu akumulaciju uzimaju vrednosti parametara iznad dna prethodne akumulacije:

$$\bar{C}_{h_{n+1}} = \bar{C}_{h_{nf}} + \frac{(L_R - L_I)(\bar{C}_U - \bar{C}_R)}{(L_R - L_U)} l_{n+1} + \frac{\bar{C}_{hz}}{\tau_Z} \tau_{n+1}$$

gde je $\bar{C}_{h_{n+1}}$ prosečna izlazna vrednost parametra na datoj dubini akumulacije, \bar{C}_{h_n} prosečna vrednost parametra iznad dna u prethodnoj akumulaciji, l_{n+1} dužina akumulacije, i τ_{n+1} prosečno retenciono vreme u akumulaciji.

Obzirom da analiza temperaturnog režima planiranih akumulacija pokazuje da ni u jednom delu godine ne dolazi do stabilne termičke stratifikacije u akumulacijama, za analizu ostalih parametara kvaliteta računati su prosečne mesečne vrednosti, i to na sredini pojedine akumulacije, prema prethodnim izrazima. Na primer, prosečna vrednost pojedinog parametra kvaliteta u najuzvodnijoj akumulaciji Bojanići se računa prema sledećem izrazu:

$$\bar{C}_B = \bar{C}_R + L_I \frac{(L_R - L_I)(\bar{C}_U - \bar{C}_R)}{(L_R - L_U)} + \frac{(L_R - L_U)(\bar{C}_K - \bar{C}_R) - (L_R - L_I)(\bar{C}_U - \bar{C}_R)}{L_I(L_R - L_U)} \frac{I_B}{2} + \frac{\bar{C}_Z}{\tau_Z} \tau_B$$

gde je \bar{C}_b prosečna vrednost parametra u akumulaciji Bojanići. U ostalim akumulacijama prosečne vrednosti parametara izračunate su kao zbir prosečne ulazne vrednosti, ponderisane podužne promene, gde je uključena i dužina prethodnih akumulacija, kao i proizvoda prosečne dnevne promene u Zlatarima i vremena zadržavanja vode u pojedinoj akumulaciji:

$$\bar{C}_{n+1} = \bar{C}_R + L_I \frac{(L_R - L_I)(\bar{C}_U - \bar{C}_R)}{(L_R - L_U)} + \frac{(L_R - L_U)(\bar{C}_K - \bar{C}_R) - (L_R - L_I)(\bar{C}_U - \bar{C}_R)}{L_I(L_R - L_U)} \left(\sum_{i=1}^n l_i + \frac{l_{n+1}}{2} \right) + \frac{\bar{C}_Z}{\tau_Z} \sum_{i=1}^{n+1} \tau_i$$

gde je \bar{C}_{n+1} prosečna vrednost parametra u akumulaciji, l_{n+1} dužina akumulacije, $\sum l_i$ ukupna dužina uzvodnih akumulacija, τ_{n+1} prosečno retenciono vreme u akumulaciji, i $\sum \tau_i$ ukupno prosečno vreme zadržavanja vode u svim uzvodnim akumulacijama.

Na opisani način analizirano je očekivano kretanje indikatora kvaliteta vode koji uslovljavaju i oblikuju vodene ekosisteme, kao što su temperatura, mutnoća, tvrdoća i alkalitet, rastvoreni kiseonik, kalcijum, magnezijum, silicijum, hloridni jon, neorganski azot i fosfor. Analiza temperaturnog režima je potvrdila rezultate hidrodinamičkih simulacija primenom modela CE-QUAL-W2 u smislu da ne treba očekivati formiranje jezerskog, lentičkog sistema i stabilne termičke stratifikacije vode. Ovo će za posledicu imati stalno mešanje vode, što je karakteristika srednjih i donjih tokova velikih reka. Najveća razlika temperature vode između površinskog sloja i dna akumulacije je sračunata za akumulaciju Bojanići, i iznosi u najtoplijem delu godine oko 1°C za prosečne mesečne vrednosti temperature.

Formiranje akumulacija će sigurno dovesti do intenziviranja sedimentacije, što će kaskadno dovesti do smanjenja mutnoće vode, pa i bistriju vodu nizvodno od sistema, odnosno na ušću u Zapadnu Moravu. Tabela 6 prikazuje sračunate vrednosti očekivanih vrednosti mutnoće vode i promenu u odnosu na postojeće stanje.

Reka Ibar je karakteristična po visokim pH vrednostima (prosečna godišnja vrednost na HS Raška iznosi 8,4, dok na HS Kraljevo iznosi 8,5), koja se može objasniti visokim sadržajem zemnoalkalnih metala, što za posledicu ima i veliku tvrdoću. Prolaskom kroz planirane akumulacije, voda će postepeno omekšavati, ali će i dalje ostati tvrda (Tabela 7).

Tabela 6. Prosečne očekivane vrednosti mutnoće vode u planiranim akumulacijama.

Reka-jezera-reka	Θ (NTU)					Godina
	III	VI	VIII	X	XII	
Ibar	77,3	34,0	10,3	11,1	12,6	31,5
Bojanići	75,5	32,8	9,9	10,8	12,1	30,9
Gočanica	72,4	30,6	9,3	10,6	11,3	29,3
Ušće	69,9	29,0	8,8	10,3	10,7	29,0
Glavica	68,0	27,7	8,5	10,2	10,3	28,4
Cerje	66,4	26,6	8,2	10,0	9,8	27,9
Gradina	64,6	25,4	7,9	9,9	9,4	27,3
Bela Glava	62,8	24,3	7,5	9,8	9,0	26,7
D. Strane	61,2	23,1	7,2	9,6	8,5	26,2
Maglič	59,0	21,7	6,9	9,4	8,0	25,5
Lakat	55,9	19,6	6,3	9,2	7,2	24,5
Ibar	53,9	18,3	6,0	9,0	6,7	23,8
St. promene	-1,4	-1,9	-1,7	-1,2	-1,9	-1,3

Tabela 7. Sračunate koncentracije zemnoalkalnih elemenata, ukupna tvrdoća i alkalitet.

reka-akumulacije-reka	Ca(mg·L ⁻¹)	Mg(mg·L ⁻¹)	Tvrdoća CaCO ₃ (mg·L ⁻¹)	Alkalitet CaCO ₃ (mg·L ⁻¹)
Ibar	60,59	20,20	234,46	213,29
Bojanići	59,64	20,07	231,52	209,65
Gokčanica	58,91	20,01	229,46	205,76
Ušće	58,35	19,96	227,86	202,78
Glavica	57,96	19,94	226,80	200,62
Cerje	57,60	19,91	225,79	198,65
Gradina	57,22	19,89	224,72	196,55
Bela Glava	56,83	19,86	223,64	194,46
Dobre Strane	56,49	19,84	222,71	192,53
Maglič	56,02	19,80	221,40	189,99
Lakat	55,33	19,75	219,47	186,26
Ibar	55,07	19,75	218,81	184,37
Stepen smanjenja	1,10	1,02	1,07	1,16

Zahvaljujući prirodi svog toka kroz klisuru, voda Ibra je zasićena kiseonikom, pri čemu se na HS Ušće redovno registruju najveće koncentracije i zasićenosti. Nizvodno od Lakta, gde Ibar prelazi u ravničarski tok, koncentracije i zasićenosti kiseonikom su nešto niže. Tabela 8 prikazuje sračunate očekivane prosečne vrednosti koncentracija i zasićenosti kiseonikom duž planiranih akumulacija, na površini i na dnu akumulacije u mesecu avgustu, kada su dobijene najniže vrednosti. Prema očekivanju, dobijeno je postepeno smanjenje koncentracije duž sistema. Ovde je potrebno naglasiti da su rezultati na strani sigurnosti, obzirom da se u Zlatarima formira termička stratifikacija sa hipersaturisanim epilimnionom i anaerobnim hipolimnionom, što se, kako je već ranije objašnjeno, ne može očekivati na planiranim akumulacijama.

Kvalitet vode reke Ibar je pod snažnim antropogenim uticajem. To se najbolje vidi iz koncentracija neorganskog azota, na primer koncentracijama nitrata. Sa druge strane, koncentracije amonijum i nitritnog azota su takođe visoke i ukazuju na intenzivnu denitrifikaciju, koja se može konstatovati u opadanju koncentracije amonijum jona od Raške do Kraljeva, odnosno nitrata od Ušća do Kraljeva.

Uspor će dalje usloviti sniženje koncentracija neorganskih azotnih jona u nizvodnom pravcu usled procesa taloženja u akumulacijama.

Ipak, usled činjenice da Ibar ne pokazuje sezonske fluktuacije sadržaja neorganskog azota, posebno nitrata, sledi da će koncentracije i dalje biti dovoljne za neometan potencijalni razvoj fitobentosa i fitoplanktona (Tabela 9).

Tabela 8. Sračunate prosečne vrednosti koncentracija i zasićenosti kiseonikom u mesecu avgustu.

	Površina akumulacije		Dno akumulacije	
	(mg·L ⁻¹)	(%)	(mg·L ⁻¹)	(%)
Bojanići	9,36	119	8,40	106
Gokčanica	8,49	107	8,09	102
Ušće	8,17	103	7,77	98
Glavica	7,81	98	7,66	96
Cerje	7,70	97	7,66	97
Gradina	7,70	97	7,52	95
Bela Glava	7,57	95	7,33	92
Dobre Strane	7,37	93	7,24	91
Maglič	7,30	92	7,09	89
Lakat	7,16	90	6,93	87

Koncentracije fosfora, kao najčešćeg Liebig-ovog makroelementa u minimumu, u Ibru su izutno visoke, pa se tako prosečna koncentracija od 0,258 mg·L⁻¹ na HS Raška, može smatrati i ekcesnom.

Tabela 9. Sračunate prosečne vrednosti neorganskog azota u planiranim akumulacijama na Ibru

Reka – akum. – reka	Azot (mg·L ⁻¹)		
	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
Ibar	0,0923	0,0207	1,5853
Bojanići	0,0891	0,0204	1,5213
Gokčanica	0,0858	0,0199	1,4713
Ušće	0,0834	0,0194	1,4327
Glavica	0,0816	0,0191	1,4063
Cerje	0,0800	0,0188	1,3814
Gradina	0,0782	0,0185	1,3553
Bela Glava	0,0765	0,0182	1,3288
Dobre Strane	0,0749	0,0179	1,3056
Maglič	0,0728	0,0176	1,2736
Lakat	0,0697	0,0170	1,2265
Ibar	0,0682	0,0167	1,2079
St. smanjenja	1,35	1,24	1,31

Tabela 10. Sračunate prosečne vrednosti fosfora u planiranim akumulacijama na Ibru

Reka – akumulacija –reka	Rastvoreni fosfor ($mg \cdot l^{-1}$)	Ukupan fosfor ($mg \cdot l^{-1}$)
Ibar	0,1215	0,2159
Bojanići	0,1134	0,2029
Gokčanica	0,1079	0,1938
Ušće	0,1036	0,1867
Glavica	0,1008	0,1820
Cerje	0,0981	0,1775
Gradina	0,0952	0,1728
Bela Glava	0,0923	0,1680
Dobre Strane	0,0899	0,1639
Maglič	0,0864	0,1582
Lakat	0,0812	0,1497
Ibar	0,0795	0,1468
Stepen smanjenja	1,53	1,47

Ova koncentracija se postepeno snižava ka ušću reke, pa na HS Kraljevo iznosi $0,17 \text{ mg} \cdot L^{-1}$. Može se sa sigurnošću očekivati da će se ova koncentracija još izrazitije smanjivati duž planirane kaskade akumulacija, i to u proporciji smanjenja mutnoće vode. Fosfor će se imobilisati vezivanjem pre svega za detritus, a onda i za raspoloživi kalcijum.

Stepen smanjenja od početka akumulacije Bojanići pa do izlaza iz akumulacije Lakat se očekuje da bude oko 1,5, stepen mutnoće 1,3, a stepen smanjenja koncentracije kalcijuma 1,1. Stepenn sniženja koncentracija rastvorenog fosfora se može očekivati nešto većim, a ortofosfatnog fosfora dodatno izraženiji (Tabela 10). Drugim rečima, dostupnog fosfora za primarnu produkciju će biti znatno manje nego što je to slučaj u postojećim uslovima.

Primarna produkcija. Na osnovu dobijenih vrednosti mutnoće vode, može se zaključiti da eufotička zona u akumulacijama neće biti duboka, međutim, zbog malih dubina akumulacija, ova zona će zauzimati znatne delove površine akumulacija. Modrozelenim bakterijama, silikatnim i crvenim algama za rast više odgovaraju uslovi slabe svetlosti u odnosu na zelene alge, pri čemu pokretne forme imaju prednost nad sesilnim i lebdećim. Silikatne alge dominiraju u hladnoj vodi, a porastom temperature, pomak se vrši ka zelenim algama i modrozelenim bakterijama. Sasvim je izvesno da se zbog kratkog vremena zadržavanja vode u akumulacijama i

sukcesivnog načina ispuštanja vode iz njih, u planiranim akumulacijama ne mogu ostvariti pravi lentički uslovi, tako da će se ponašati kao lotički, u kojima će u prvo vreme fitobentos imati dominantnu ulogu u primarnoj produkciji.

Modrozeleni bakterije i alge koje se sada sreću u Ibru predstavljaju najvećim delom tihoplankton, odnosno pripadnike perifitona koji dospevaju u plankton odvajanjem od staništa, najčešće dejstvom vodene struje, a među kojima dominiraju silikatne alge. Temperaturni uslovi u planiranim akumulacijama na Ibru pogodovaće najviše silikatnim algama, koje dominiraju u hladnoj vodi. Tokom zime, u decembru i januaru, kada je mutnoća vode smanjena, može se očekivati njihova veća brojnost u fitobentosu, a donekle i u slobodnoj vodi.

Mulj, pesak i sitan šljunak nisu pogodni za rast perifitona, za razliku od šljunka, kamenja i stena. Zbog toga, u dužem vremenskom periodu, formiranje akumulacija će nepovoljno delovati na opstanak fitobentosa.

Potamoplankton neće imati optimalne uslove za razvoj u planiranim akumulacijama, a zbog velikog protoka u toku februara i marta biće praktično odstranjivan iz akumulacija. To će usloviti da će stalno biti u pionirskoj fazi, svake godine će se iznova formirati od bentičkih formi i od tranzitnih organizama.

Uslovi u planiranim akumulacijama omogućiće vegetacioni period za makrofite od kraja maja do kraja septembra, pri čemu je tokom maja i juna povećana mutnoća vode, pa se najizraženija produkcija može očekivati u periodu od jula do septembra.

Kada se makrofitska vegetacija bude uspostavila, nastaće kvantitativne i, vrlo verovatno, kvalitativne razlike među njenim sastojinama u pojedinim akumulacijama zbog razlika u morfometriji i specifičnim udelima litoralnih zona i litoralnih zapremina. Maksimalna dubina do koje se prostire makrofitska vegetacija u ovdašnjim tekućim i stajaćim sistemima kreće se oko 3m. Površine litorala između metarskih izobata u makrofitskoj zoni budućih jezera ilustruju nagib terena i njegova pogodnost za makrofiton. Najveću površinu litorala po opadajućem redosledu imaće Bojanići, Lakat i Gokčanica; međutim, kada se uporede udeli litoralnih zapremina u jezerskim zapreminama, onda su Lakat i Gokčanica ispred Bojanića, od kojeg veće udele imaju Gradina i Glavica koje su na četvrtom i petom mestu. Gradina ima i najpravnomerniji odnos međubutnih površina, odnosno najpovoljniji nagib za razvoj makrofita.

Po obodima akumulacija prvo će se naseliti heleofitne vrste po sledećem vrlo verovatnom rasporedu: *Equisetum fluviatile* L., *Iuncus effusus* L., *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb., *Alisma plantago-aquatica* L. i *Eleocharis palustris* (L.) Roem. & Schult.; od drveća, postojeće vrbe, *Salix purpurea* L., *S. caprea* L. i *S. alba* L., i jova, *Alnus glutinosa* L., počće da se šire po obodima akumulacija. Proces formiranja klimatogene obodne vegetacije traje oko deset godina, a može biti i kraći ako ne postoji antropogeno ometanje. Pri kraju te faze mogu se očekivati prve hidrofite po sledećem vremenskom rasporedu: *Myriophyllum spicatum* L., *Potamogeton gramineus*, L., *P. crispus* L., *P. perfoliatus* L., *Stuckenia pectinata* (L.) Böerner, *Najas marina* L. i *Ceratophyllum demersum* L. Naseljavanje hidrofita traje oko tri godine, i uporedo sa njom završava se faza formiranja obodne vegetacije pojavom rogoza, *Typha angustifolia* L. i *T. latifolia* L., barske perunike, *Iris pseudacorus* L., i eventualno trske, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. U bilo kojem trenutku formiranja makrofite sukcesije, sa velikom verovatnoćom može se očekivati pojava introdukovane invazivne vrste *Elodea canadensis* Michx.

Prema napred navedenim činjenicama, u akumulacijama na Ibru uspostaviće se fitobentoska vegetacija u litoralnoj oblasti eufotičke zone. Ta zajednica na početku neće biti čisto pionirska, već će se formirati kao modifikacija postojećeg fitobentosa. Iz nje će se regrutovati tranzitni članovi potamoplanktona. Tokom zime, u decembru i januaru, pri povećanoj providnosti vode dominiraće bentičke silikatne alge, a tokom leta u fitobentosu povećavaće se brojnost modrozelenih bakterija i zelenih algi. Stacionarni fitoplankton, odnosno potamoplankton, može se očekivati tokom letnje vegetacije, od jula do septembra, u prve tri akumulacije kad su proticaji mali; međutim, svako smanjenje prosečnog proticaja u tom periodu za više od polovine, trostruko će favorizovati rast fitoplanktona – produžavanjem retencionog vremena, povišenjem temperature i smanjenjem mutnoće. Kad se budu naselile makrofite, zasena koju stvaraju redukovaće fitobentos i smanjiti njegovu ulogu u primarnoj produkciji, ali će njihovi listovi predstavljati novu nišu koju će naseliti perifiton koji će se regrutovati iz postojećeg fitobentosa. U odnosu na veličinu jezera i prostranstvo priobalnih zona, uz raspoloživi neorganski azot i rastvoreni fosfor, primarna produkcija u jezerima zasnivaće se na složenoj četvorostranoj ravnoteži između preostalog fitobentosa, makrofita, perifitona i potamoplanktona.

4. OČEKIVANI STEPEN TROFIČNOSTI

Jezero Čelije ima složenu morfologiju i sastoji se od tri sukcesivno sve dublja i zapreminski sve veća basena, koji se ponašaju kao relativno nezavisne celine. Odnosi Karlsonovih indeksa za fosfor i hlorofil-a su 1,52 za prvi, odnosno zlatarski basen koji je ovde uzet kao referentni, 1,73 za drugi i 1,89 za treći. To znači da koncentracija fosfora indikuje samo potencijalni trofički nivo, čija realizacija u krajnjoj liniji zavisi od srednje dubine akvatičnog sistema, to jest od odnosa trofogene i trofolitičke zone.

Akumulacije na Ibru imaće vrlo visoku koncentraciju fosfora, koja po Karlsonovom indeksu indikuje visoku eutrofiju. Po prosečnim pokazateljima voda u jezerima neće biti stratifikovana, zbog kratkih retencionih vremena i eufotičkih zona koje će ići najviše do 3m, a potencijalna trofija se neće potpuno realizovati u primarnoj produkciji. Iako će se akumulacije razlikovati od zlatarskog basena jezera Čelije po tome što se primarna produkcija u njima neće zasnivati na fitoplanktonu, već na fitobentosu i kasnije na makrofitama, ovde se pošlo od jedine moguće pretpostavke, da će trofički potencijal biti 1,52 puta veći od realizacije. Na osnovu koncentracije ukupnog fosfora izračunati su Karlsonovi indeksi za akumulacije:

$$I_p = 10 \left(6 - \frac{\ln \frac{0,048}{[P]}}{\ln 2} \right)$$

gde je I_p indeks trofičnosti za fosfor i $[P]$ koncentracija ukupnog fosfora ($mg \cdot L^{-1}$). Preko indeksa trofičnosti za fosfor dobijeni su indeksi trofičkog potencijala za hlorofil-a kao:

$$I_{chl a} = \frac{I_p}{1,52}$$

gde je $I_{chl a}$ indeks trofičnosti za hlorofil-a. Kako je obzrazac za trofički indeks za hlorofil-a:

$$I_{chl a} = 10 \left(6 - \frac{2,04 - 0,68 \ln \frac{[Chl a]}{1000}}{\ln 2} \right)$$

gde je $[Chl a]$ koncentracija hlorofila-a ($mg \cdot L^{-1}$), nađene su verovatne koncentracije hlorofila-a u budućim jezerima prema sledećem izrazu:

$$[\text{Chl } a] = \frac{e^{\frac{2,04 - \ln 2(6 - 0,1I_{\text{Chl } a})}{0,68}}}{1000}$$

Dobijene koncentracije se u nizvodnom pravcu kreću između 0,011 i 0,009 mg·L⁻¹ (Tabela 11), znatno ispod granice mezotrofija-eutrofija za seston od 0,03 mg·L⁻¹ u rekama, odnosno 0,025 mg·L⁻¹ u jezerima po Dodsovoj klasifikaciji.

Podrazumeva se da su ovde prikazane prosečne vrednosti, zasnovane na prosečnim parametrima i da će stvarna slika biti složenija od prikazane. Na primer, u prvoj fazi sukcesija jezerskih ekosistema, kada će fitobentos u formiranju predstavljati glavne primarne proizvođače, usled nedovoljnog biodiverziteta može dolaziti do njegovog prenamnožavanja. Takođe, svaka dugotrajna suša i posledično smanjenje dotoka favorizovaće lentičke uslove u kojima će u nediversifikovanom fitoplanktonu dominirati „r“ stratezi na osnovu obilja makroelemenata. U takvim situacijama, može doći do proliferacije fitoplanktona i cvetanja vode modrozelenim bakterijama.

Tabela 11. Verovatni potencijalni (I_p) i ostvareni (I_{Chl a}) indeksi trofičnosti i teoretske koncentracije hlorofila-*a* akumulacijama na Ibru.

Akumulacija	Ukupan fosfor (mg·L ⁻¹)	I _p	I _{Chl a}	Hlorofil <i>a</i> (mg·L ⁻¹)
Bojanići	0,2029	82,7	54,4	0,0113
Gokčanica	0,1938	82,2	54,1	0,0110
Ušće	0,1867	81,9	53,9	0,0107
Glavica	0,1820	81,6	53,7	0,0106
Cerje	0,1775	81,4	53,5	0,0104
Gradina	0,1728	81,1	53,4	0,0102
Bela Glava	0,1680	80,8	53,2	0,0100
Dobre Strane	0,1639	80,6	53,0	0,0099
Maglič	0,1582	80,2	52,8	0,0096
Lakat	0,1497	79,7	52,4	0,0093

5. ZAKLJUČAK

U radu su analizirani mogući uticaji izgradnje kaskade HE na Ibru na kvalitet vode, kao jedan od potencijalnih uticaja ovih objekata na životnu sredinu. Analizom raspoloživih podataka o kvalitetu vode reke Ibar, najpre je urađena ocena ekološkog i hemijskog statusa. Utvrđeno je da na posmatranom delu vodotoka ekološki status može da se oceni *umerenim*, pri čemu se ocena može smatrati pouzdanom. Hemijski status je ocenjen

dobrim, pri čemu nisu bili dostupni podaci za sve zagađujuće materije u skladu sa važećim Pravilnikom. Hidrodinamičke simulacije temperaturnog režima planiranih akumulacije su pokazale da nema uslova za pojavu stabilne termičke stratifikacije vode, što se može objasniti relativno malom zapreminom akumulacija i kratkog retencionog vremena i u najtoplijem delu godine. Za prognozu indikatora kvaliteta vode i parametara ključnih za moguće eutrofikacione procese u planiranim akumulacijama, primenjena je „metoda analogije“, gde su korišćeni podaci o promenama kvaliteta vode u akumulaciji Čelije.

Sasvim je izvesno da će planirane akumulacije na Ibru predstavljati niz akvatičnih ekosistema koji će ponašati i funkcionisati kao prelazni oblik između rečnih i jezerskih sistema, i da neće biti uslova za potpunu realizaciju eutrofnog kapaciteta, prema sadržaju makroelemenata u vodi. U tom smislu, u prosečnim uslovima tokom godine može se očekivati trajno održanje mezotrofije u svim planiranim akumulacijama.

Postoje indicije da će kod pojedinih indikatora doći do blagog pogoršanja uslova nizvodno od sistema. To se, na primer, odnosi na temperaturni režim vode, kada se u najtoplijem delu godine može očekivati blago povećanje temperature vode. Takođe, koncentracije rastvorenog kiseonika u vodi će izvesno biti nešto niže od postojećih, ali bez mogućnosti pojave anoksičnih uslova.

Sa druge strane, sasvim su izvesna određena poboljšanja kvaliteta vode nizvodno od sistema, kao na primer kod parametara kao što su mutnoća, koncentracije teških metala u vodi, indikatora fekalnog zagađenja, nutrijenata, tvrdoće itd. Može se sasvim izvesno očekivati da će planirana jezera biti neka vrsta prečišćivača vode za nizvodne korisnike. Takođe, ne treba zanemariti i značajnu mogućnost akumulacija u absorbovanju potencijalnih akcidentnih zagađenja, što u slučaju Ibra predstavlja stalnu pretnju, imajući u vidu potencijalne zagađivače na uzvodnom delu sliva, ali i činjenicu da neposredno pored reke prolaze magistralna saobraćajnica i železnička pruga.

LITERATURA

- [1] Institut za vodoprivredu 'Jaroslav Černi' (2013): Sistem HE na Ibru - Studija o proceni uticaja na životnu sredinu.
- [2] Cibulić, V. i saradnici (2013): Kvalitet vode u akumulaciji 'Barje' petnaest godina nakon

- formiranja i nultog ispitivanja, *Vodoprivreda*, NO 261-2263, s. 111-123
- [3] Đorđević, B. i T. Dašić (2011): Određivanje potrebnih protoka nizvodno od brana i vodozahvata, *Vodoprivreda*, NO 252-255, s. 151-164
- [4] Djordjević, B. (2003): *Cybernetics in Water Resources Management, WRP, Part III: Water resources systems and their ecological and sociological environment*, XXV, p 650, ISBN 0-918334-82-9.
- [5] Knežević, B. i B. Đorđević (2012): Metoda 'MABIS' kao podrška pri određivanju ekološki prihvatljivih protoka, *Vodoprivreda*, NO 255-257, s. 25-42
- [6] Milanović, P. i drugi (2012): Uticaj delimičnog prevođenja voda iz slivova Bune i Bregave u skvu Trebišnjice, *Vodoprivreda*, NO 255-257, s. 2-24
- [7] Helsel, D. R., Hirsch, R. M. (2002): *Statistical Methods in Water Resources Techniques of Water Resources Investigations*, Book 4, chapter A3. U.S. Geological Survey. 522 p.
- [8] Fust, A. (1997): *Geostatistics*, Eotvos Kiado, p.427, Budapest, Hungary.
- [9] Zhang, W., Simin, L., Fengbing, T. (2013): Characterization of Urban Runoff Pollution between Dissolved and Particulate Phases, *The ScientificWorld Journal*, Hindawi.
- [10] Han, Y. H., Lau, S. L., Kayhanian, M. and Stenstrom, M. K. (2006): Correlation analysis among highway stormwater pollutants and characteristics, *Water Science and Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 235-243.
- [11] Delimanm P.N. and J.A. Gerald, (2002): Application of the Two Dimensional Hydrothermal and Water Quality Model, CE-QUAL-W2, to the Chesapeake Bay – Conowingo Reservoir, *Journal of Lake and Reservoir Management*, Vol. 18, No.1, pp. 1-9.
- [12] Hanna, R.B., L.Saito, J.M.Bartholow, and J. Sandelin, (1999): Results of Simulated Temperature Control Device Operations on In-Reservoir and Discharge Water Temperatures Using CE-QUAL-W2, *Journal of Lake and Reservoir Management*, Vol.15, No.2, pp. 87-102.
- [13] Gelda, R.K., E.M. Owens and S.W. Effler, (1998): Calibration, Verification and an Application of a Two Dimensional Hydrotherm Model [CE-QUAL-W2] for Cannonsville Reservoir, *Journal of Lake and Reservoir Management*, Vol.14, pp. 186-196.
- [14] Johnson, B.H., M.B. Boyd and R.R. Copeland, (1987): Lower Missisipi Salt Intrusion Modelling, in the *Proceedings of the National Confeerence on Hydraulic Engineering*, R.M. Ragan ed., Hydraulic Division of the ASCE.
- [15] Shumway, R. H. and S. S.Davis, (2000): *Time Series Analysis and Its Applications*, Springer-Verlag, p. 549, ISBN 0-387-98950-1, New York USA.
- [16] Jacimovic, N., T. Hosoda and M. Ivetic, (2011): Modeling of Dissolved Oxygen Vertical Distribution Changes in Lakes: Case Study of the Lake Zavoj in Serbia, *Proceedings of the IV International Perspective on Water Resources and the Environment*, Singapre.
- [17] Jovanić, P., M. Ivetić i N. Jaćimović (2008): Merenja na jezeru Zavoj u cilju praćenja i upravljanja kvalitetom vode, *Voda i sanitarna tehnika*, Vol. 6, pp. 13-19.
- [18] Nenadić, N., Kostić, D., Jaćimović, N., Naunović, Z. i M. Ivetić (2013): Modeliranje sezonskih promena temperature vode akumulacije Čelije, *Voda i sanitarna tehnika*, vol. 43, br. 6, str. 31-40

WATER QUALITY IMPACT ASSESSMENT OF THE RIVER IBAR HYDROPOWER SYSTEM

by

Nenad JAĆIMOVIĆ^{1*}, Dušan KOSTIĆ¹⁾, Slobodan GRAŠIĆ²⁾,
Nenad NENADIĆ³⁾¹⁾University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Belgrade²⁾PUC Vodovod-Kruševac, Dušanova 46, 37000 Kruševac³⁾Projekt a.d., Veselina Masleše 1/IV, 78000 Banja Luka

*njacimovic@hikom.grf.bg.ac.rs

Summary

Water quality impact assessment of the river Ibar hydropower cascade project is analyzed in this paper, as one of possible aspects of environmental impact assessment. Based on available data provided by authorized institutions, the current state of River Ibar ecological and chemical status is determined in accordance with the methodology prescribed by legislation. The ecological status of the water course between Raska and Kraljevo is rated as *moderate*, with evaluation considered as reliable. At the same time, the chemical status is rated as *good*. Quantitative assessment of possible impacts on water quality is conducted by dual approach: 1) application of hydrodynamic model, utilized for analysis of possible thermal regimes in cascade reservoirs, and 2) application of the „method of analogy“ to the existing,

well studied reservoir „Celije“, the reservoir with similar morphological characteristics and water quality conditions at the entrance of the system. Results indicate that future cascade reservoir system will represent a number of aquatic ecosystems that will perform as a transitional form between river and lake systems. From the environmental perspective, it is important that thermal stratification of reservoirs during the warm seasons is not expected to be established. Consequently, the eutrophic potential of the river Ibar, based on significant content of macroelements in water, is not expected to be fully realized.

Keywords: Environmental impact assessment, hydropower cascade system, water quality, River Ibar.

Redigovano 18.11.2014.