

UTJECAJ AKUMULACIJSKIH BAZENA NA TEMPERATURNO STANJE VODOTOKA

THE INFLUENCE OF STORAGE RESERVOIRS ON THE RIVER TEMPERATURE

Primož Rodič
prof. dr. Zvonimir Janežič
Inštitut za hidravlične raziskave
Hajdrihova 28
Ljubljana, Slovenija

prof. dr. Rudi Rajar
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Hajdrihova 28
Ljubljana, Slovenija

tel: +386 1 241 84 20
fax: +386 1 241 84 33
e-mail: primoz.rodic@guest.arnes.si

Kratki sažetak

U članku je opisana problematika računskog određivanja temperaturnog stanja umjetno zajaženoga vodotoka, odnosno akumulacijskog bazena protočne hidroelektrane. Namjera je predvidjeti temperaturni režim vode na ispustu iz akumulacije. Po pretpostavki da je u svim točkama određenog poprečnog presjeka vodenog toka temperatura jednaka, te ako uzmemo u obzir samo toplinske tokove koji se odnose na razmjenu topline na slobodnoj vodenoj površini, opisana je, i za praktični račun priređena, jednadžba toplinske bilance. Prikazan i analiziran je računski primjer, koji je izveden jednodimenzionalnim i tridimenzionalnim matematičkim modelom na osnovi terenskih mjerenja na akumulacijskom jezeru HE Vrhovo na rijeci Savi 1998. g.

Ključne riječi: akumulacija, temperatura, voda, mjerenje, matematički model

Summary

The report describes the problem of numerical determination of temperature conditions of storage reservoirs in hydro power plants. The intention is to predict the temperature regime of water at the outlet of the accumulation. On the presumption that the water temperature of single cross section is same in each point, and only heat streams through the water surface are considered, the heat balance equation is described and for practical computation arranged. An example, which was performed by means of one-dimensional and three-dimensional mathematical model on the basis of field measurements in HPP Vrhovo storage reservoir on river Sava in 1998, is presented and analysed.

Key words: storage reservoir, temperature, water, measurements, simulation model

1 UVOD

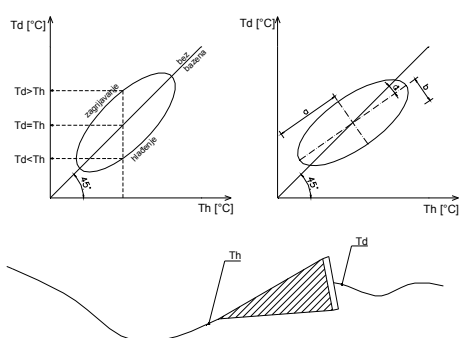
Na akumulaciji HE Vrhovo na rijeci Savi – za slovenski prostor tipičan primjer umjetnog protočnog riječnog bazena – provedena su intenzivna mjerenja u vremenu i prostoru promjenljivih temperatura vode i zraka, relativne vlage i brzine vjetra. Zajedno, sa

istodobno "službeno" registriranim standardnim hidrološkim i meteorološkim podacima, dobila se nužna empirijska osnova za kalibriranje, analizu i odabir odgovarajućeg matematičkog modela.

2 TEORIJSKE OSNOVE

2.1 Utjecaj akumulacijskog bazena na temperaturu vode nizvodno

Utjecaj akumulacijskoga bazena na temperaturu vode nizvodno je grafički prikazan na slici



Slika 1: Shematski prikaz sveze između temperature vode na utoku i ispustu iz akumulacijskog bazena

1. T_h je srednja temperatura vode na utoku i T_d na ispustu iz bazena. Ako bazena nema ili je međusobna udaljenost posmatranih mjernih mjesta malena, onda je sveza T_h i T_d prikazana pravcem pod nagibom 45° . Zbog utjecaja različitih, i kroz godinu promjenjivih temperaturnih prilika u bazenu, gore spomenuta povezanost dobija oblik elipsaste petlje čiji gornji dio pokazuje zagrijavanje, a donji dio hlađenje vode u bazenu. U tom slučaju, vrijednost α predstavlja jačinu, a predznak pokazuje karakter utjecaja bazena na temperaturu vode koja istječe (- zagrijavanje, + hlađenje) [3].

2.2 Toplinska bilanca protočne riječne akumulacije

Na osnovi preliminarnih mjerenja temperatura u akumulacijskom bazenu HE Vrhovo [2] je ustanovljeno da se temperaturene prilike u njoj ne razlikuju mnogo od prirodnog površinskog vodotoka. To znači da se može za računsko određivanje temperaturnog stanja protočne riječne akumulacije – barem u prvoj aproksimaciji – kao ishodište uzeti osnovna jednadžba za neto protok toplinske energije između dva presjeka stacionarnog riječnog vodotoka:

$$Q \cdot \rho \cdot c \cdot dT_w = \Pi \quad (2.1)$$

gdje je: Q vodni protok, [$m^3 s^{-1}$]
 ρ gustoća vode, [$kg m^{-3}$]
 c specifični toplinski kapacitet vode, [$J kg^{-1} K^{-1}$]
 T_w temperatura vode, [K]
 Π bilanca utjecajnih toplinskih tokova, [$J s^{-1}$]

Uz pretpostavke da je u svim točkama određenog presjeka vodnog toka temperatura T_w (prosječna profilna temperatura vode) jednaka, te da se kao relevantni uzimaju u obzir samo toplinski tokovi, koji se odnose na izmjenu topline na slobodnoj vodenoj površini, iz jednadžbe (2.1) zaključujemo da bi promjena temperature homotermnoga vodnog stupa,

koji putuje vodnim tokom i čiji je poprečni presjek 1m^2 , a visina jednaka dubini vodenog toka H (u nastavku RBV – reprezentativni bilančni volumen), bila:

$$dT_w = \frac{1}{\rho \cdot c \cdot H} \cdot P \cdot dt \quad (2.2)$$

gdje je: Pbilanca toplinskih tokova na jedinicu površine vodenog ogledala (u nastavku toplinska bilanca), $[\text{W m}^{-2}]$

Stoga, ako bi veličine P i H bile poznate u ovisnosti od vremena, bilo bi moguće pratiti promjenu temperature RBV, koji se kreće zajedno s vodnim tokom duž bazena, odnosno, mogli bi utvrđivati promjenu temperature vode u određenom presjeku akumulacijskog bazena tokom vremena.

2.3 Komponente toplinske bilance (toplinski tokovi)

U usvojenom konceptu procesa razmjene topline između vode i okoline, su kao relevantne komponente toplinske bilance uvaženi toplinski tokovi zbog:

- zračenja sunca Φ_S
- zračenja ozračja Φ_A
- zračenja vodene razine Φ_W
- evaporizacije (ili kondenzacije) Φ_E
- konvekcije Φ_C

Komponente toplinske bilance P se određuju izravnim mjerenjima i/ili izračunavanjima pomoću jednadžbi/formula, s kojima su obuhvaćeni utjecajni meteorološki parametri.

Globalno zračenje sunca (direktno i difuzno kratkovalno zračenje) Φ_S , se određuje izravnim mjerenjem na terenu, pri čemu je preporučljivo mjeriti i dio odbijenog zračenja sunca od vodene površine. Ako se mjerenja na terenu ne izvedu, moguće je uporabiti (naravno, ako postoje) podatke mjerenja globalnog sunčevog zračenja na najbliži meteorološkoj stanici ili prosječne vrijednosti iz serije višegodišnjih mjerenja, pri čemu je potrebno korigirati vrijednosti zbog moguće oblačnosti i odbitka dijela toplinskog toka od vodene površine.

Infracrveno zračenje ozračja Φ_A i vodene razine Φ_W je također moguće izmjeriti, iako se obično izračunava uz pomoć Stefanove jednadžbe, iz podataka o temperaturi ozračja T_A , odn. vodenoj razini T_W , uključujući tipične vrijednosti emisivnosti ozračja, odn. vode, te u posljednjem primjeru i odbitka dijela toplinskog zračenja.

Tok latentne topline (evaporacija, kondenzacija) Φ_E ovisi o razlici E_W i E_A , tj. tlaku saturirane vodene pare pri temperaturi vode i tlaku vodene pare u zraku iznad razine vode, te također tkz. funkciji vjetra (odn. funkciji transfera) $f(U)$, ovisnoj od brzine vjetra (cca 2 m iznad vodene razine) i drugih meteoroloških parametara.

Toplinski tok zbog konvekcije Φ_C je produkt spomenute funkcije vjetra $f(U)$, razlike temperature vode na njoj razini i temperature zraka iznad vodene razine i tz. Bowenovog koeficijenta (koji je približno konstantan = 0.65)

2.4 TOPLINSKO-BILANČNA FUNKCIJA

Toplinska bilanca, odn. zbroj toplinskih tokova,

$$P = \sum \Phi = \Phi_S + \Phi_A + \Phi_W + \Phi_E + \Phi_C \quad (2.3)$$

$$P(T_W) = \Phi_1 + \Phi_2(T_W) \quad (2.4)$$

ovisna je o temperaturi vode, jer su toplinski tokovi Φ_W , Φ_E in Φ_C u funkcionalnoj ovisnosti o temperaturi vode. Sveza između toplinske bilance P i temperature vode T_W , nazvana toplinsko-bilančna funkcija $P(T_W)$, znači zbroj o temperaturi vode neovisnih toplinskih tokova Φ_1 i o njoj ovisnih $\Phi_2(T_W)$:

Ako se uzme: -da je voda idealna tekućina, -da ne postoji razmjena mase sa okolinom, -da su procesi izobarni (pri konstantnom tlaku), te -da se razmjena topline odvija samo na vodenoj razini, vremenska promjena temperature RBV može se formulirati na slijedeći način:

$$dT_W(t) = \frac{1}{\rho \cdot c} \cdot \frac{P(T_W, t)}{H(t)} dt \quad (2.5)$$

gdje je: $T_W(t)$ temperatura vode kao funkcija vremena, [°C]
 $P(T_W, t)$ toplinsko-bilančna funkcija u ovisnosti o vremenu, [W m⁻²]
 $H(t)$ dubina bilančnog volumna kao funkcija vremena, [m]
 t vrijeme, [s]
 $\rho \cdot c$ toplinski kapacitet vode, [J m⁻³ K⁻¹]

Izračun po jednadžbi (2.5) je moguć pod uvjetom da je kvocijent toplinsko-bilančne funkcije $P(T_W, t)$ i dubine $H(t)$ dat u obliku integrabilne neprekidne funkcije vremena. U tome, međutim, i jeste problem, prvenstveno zbog toplinske bilance, jer se utjecajni meteorološki parametri u prirodi mjenjaju na najrazličitije načine. Jedan od mogućih načina rješenja tog problema je podjela vremena na dovoljno kratke intervale, za koje je promjenljive meteorološke parametre i dubinu moguće zamijeniti sa reprezentativnim konstantnim vrijednostima, odn. za svaki računski interval (i) pojedinačno odrediti po jednu toplinsko-bilančnu funkciju i dubinu, te tako funkciju $P(T_W, t)/H(t)$ nadomjestiti s nizom vremenski neovisnih $P_i(T_W)/H_i$ funkcija. U tom slučaju za pojedinačni računski interval vrijedi:

$$\Delta T_W(t) = \frac{1}{\rho \cdot c \cdot H} \cdot \int P(T_W) \cdot dt \quad (2.6)$$

Za dovoljno malene temperaturne razlike (od T_a do T_e), toplinska bilanca može se uzeti kao konstantna odn. o temperaturi vode neovisna veličina. Jednadžba (2.5) time se pojednostavljuje:

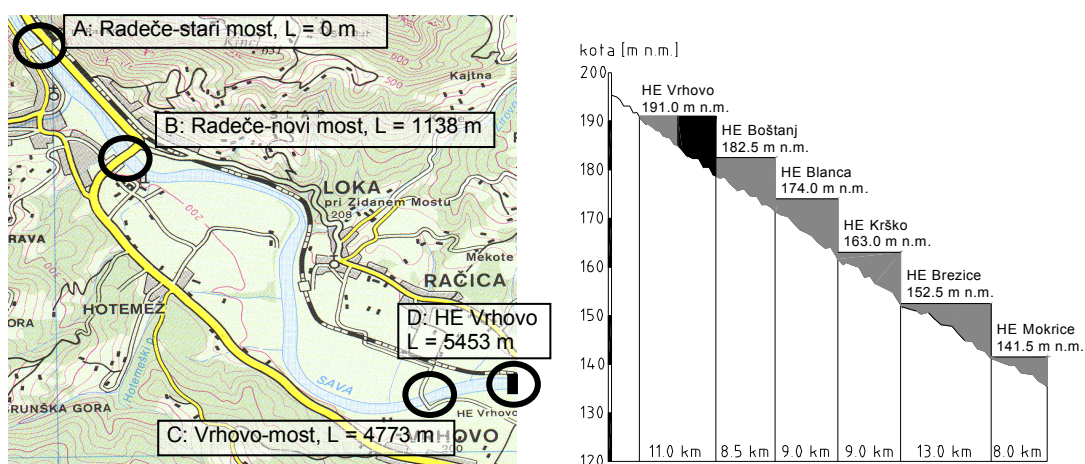
$$\Delta T_W(t) = \sum \Delta T_{Wi}$$
$$\Delta T_{Wi} = \frac{1}{\rho \cdot c \cdot H_i} \cdot P_i \cdot \Delta t_i \quad (2.7)$$

gdje je: i oznaka računskog intervala
 P_i toplinska bilanca, [W m^{-2}]
 ΔT_{wi} razlika temperature vode na početku i na kraju rač. intervala, [K]
 H_i dubina RBV, [m]
 Δt_i računski vremenski interval, [s]
 $\rho \cdot c$ toplinski kapacitet vode, [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$]

3 PRIMJER RAČUNSKE SIMULACIJE TOPLOTNOGA STANJA PROTOČNE RIJEČNE AKUMULACIJE HEV I USPOREDBA SA PODACIMA TERENSKIH MJERENJA

3.1 Istraživački poligon

Aktualnim problemom se u Sloveniji ispostavlja pitanje izbora pouzdane metode prognoziranja toplinskog režima visoko protočnih bazena, pojedinačno i/ili u povezanom nizu – situacija koja će npr. nastati u bliskoj budućnosti na rijeci Savi sa realizacijom planiranog lanca protočnih hidroelektrana.



Slika 2: Akumulacijski bazen HE Vrhovo sa ucrtanima mjernima profilima i uzdužni profil planiranog lanca protočnih hidroelektrana na rijeci Savi

Tipičan primjer takvog objekta je HE Vrhovo (HEV) – prvi član planiranog lanca šest hidroelektrana na donjoj Savi; izgrađen je 1993. godine, a sa projektovanom kotom nominalnog uspora u pogonu je od svibnja 1996. godine. Ta okolnost je omogućila da se pristupi izvođenju sistematski terenskih mjerenja odn. prikupljanju podataka sa namjerom provjere uporabnosti i mogućeg poboljšanja već postojećih, kao i eventualnog razvoja odgovarajućih novih metoda modeliranja temperaturnog režima sličnih vodenih bazena.

3.2 Situacija, geometrija in protočnost bazena

Terenska mjerenja izvodila su se na 5453 m dugom odsjeku akumulacijskog bazena HE Vrhovo, između profila A: Stari most u Radečama (L=0m) i D: HE Vrhovo, (L=5453 m). Kao prosječna (računska) dubina vode u profilu (H) uzet je kvocijent A/B, gdje je A = površina poprečnog presjeka i B = širina vodne razine pri normalnoj koti uspora (191,00 m n.m.). Srednji protok rijeke Save u profilu HEV $Q_{sr} = 222,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, globalni volumen bazena $V = 8,65 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ te relativni kapacitet $\tau = 0,45$ dana.

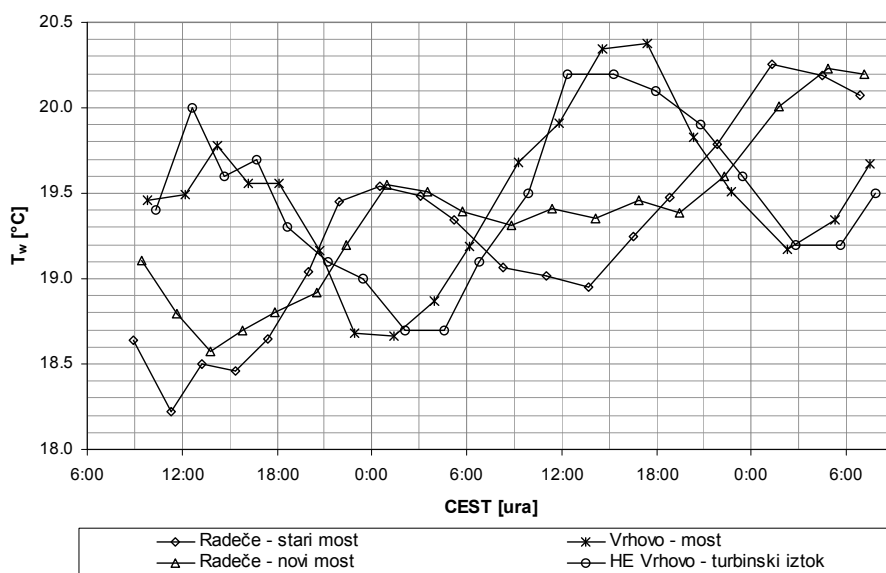
3.3 Opći uvjeti i način mjerenja

Sistematska terenska mjerenja na opisanom odsjeku akumulacijskog bazena HEV su se izvodila u razdobljima stabilnog, suhog i sunčanog vremena te ustaljenih hidroloških prilika. Hidroelektrana je neprestano radila u protočnom režimu, uz održavanje praktično konstantnog nivoa razine vode u bazenu na normalnoj koti uspora $191 \pm 0,02 \text{ m n.m.}$. Prosječni dnevni protoci za vrijeme pojedinačnih mjerenja, iznosili su između 60 i $151 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, odn. između $0,27 Q_{SR}$ i $0,68 Q_{SR}$.

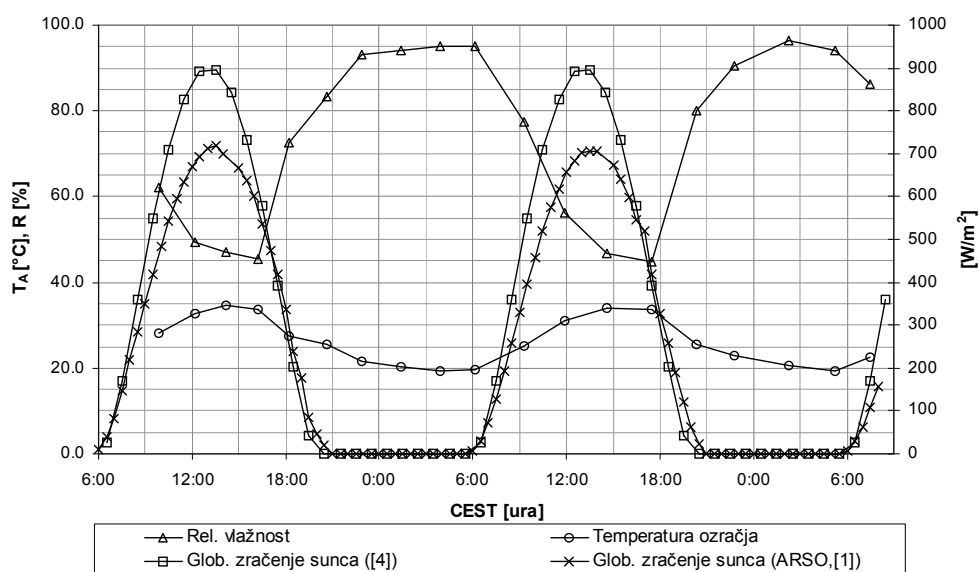
Temperatura vode u profilima (vidi sl.2) mjerena je u tri vertikale, odn. na brani i u više vertikala, sa dubinskim koracima od 0.5 do 2m. Pored toga je bila u svakom profilu izmjerena temperatura zraka tik nad vodenom površinom, brzina vjetra, a u dva profila još i relativna vlažnost zraka.

3.4 Snimanja temperaturnih profila 22.-24. srpanj 1998

Mjerenje je trajalo od 9:00 sati 22.06.98 do 20:00 sati 24.07.89, tj sveukupno 47 sati. Na slikama 3 i 4 grafički su predstavljeni rezultati mjerenja srednjih profilskih temperatura, temperature zraka, relativne vlage i količine sunčevog zračenja.



Slika 3: Srednje profilске temperature u akumulacijskom jezeru HEV 22. – 24. 7. 1998



Slika 4: Temperatura ozračja in relativna vlažnost u profilu Vrhovo-most, globalno sunčevo zračenje, izmjereno u Krškem i vrijednosti globalnoga sunčevog zračenja iz 20-godišnjih prosjeka satnih vrijednosti sunčevog zračenja za Sloveniju [4].

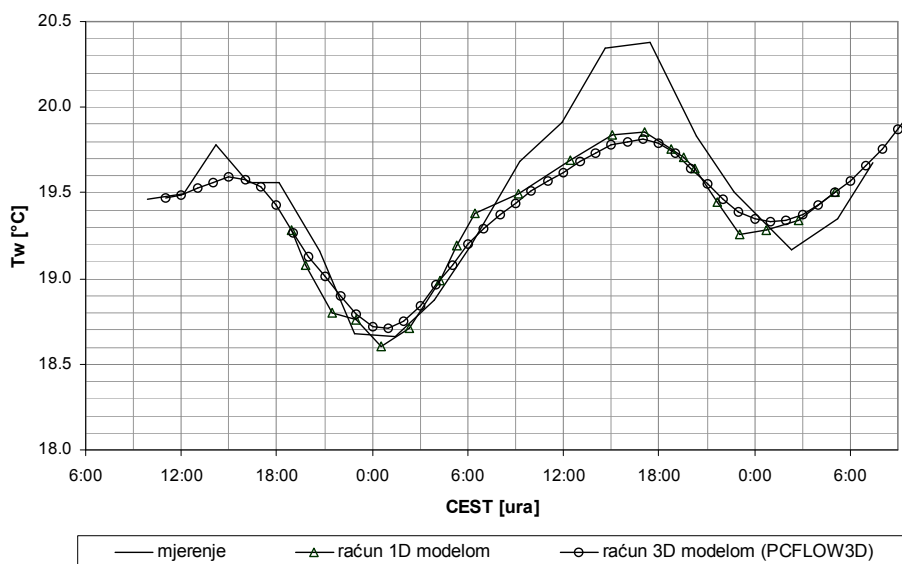
3.5 Rezultati i analiza izračuna temperatura sa matematičkim modelima

Računsko određivanje temperature vode u prostoru in vremenu obavljeno je sa dva modela: jednostavnim jednodimenzionalnim modelom (1D) i zahtijevnijim tridimenzionalnim (3D) modelom PCFLOW3D [5], koji je bilo razvijen na Hidrotehničkom oddjelu Fakulteta za građevinarstvo i geodeziju Univerziteta u Ljubljani, gdje su se i izvršili računi.

Jednodimenzionalni model je izgrađen na prethodnom empiričnom zaključku, da se relativno plitak i visoko protočan riječni bazen HEV, glede na temperaturnu sliku, bitno ne razlikuje od nezajaženog riječnog toka. U tom smislu je dakle bazen HEV tretiran kao vertikalno i poprečno homotermni vodotok, duž kojega se promjena topline s okolinom događa samo na slobodnoj razini. Izhodišna osnova postupka za računsko određivanje temperature vode u prostoru (duž bazena) i vremenu je, dakle, bilanca toplinskih tokova kroz površinsku graničnu plohu reprezentativnog vodenog stupca RBV, koji sa protočnom brzinom putuje duž bazena.

U 3D modelu primjenjen je drukčiji pristup. Cjelokupan poligon podjeljen je u prostornu mrežu volumskih elemenata, u kojima do promjene temperature vode u vremenu dolazi zbog izmenivanja topline sa okolinom i prijenosa topline vodom, koja prolazi kroz njih. Suprotno 1D modelu, gde se radi sa dubinsko srednjom profilskom temperaturom vode, u 3D modelu uzima se u obzir i prostorski transport i disperzija topline po dubini.

Na slici 5 su usporedno predstavljene rezultati izračuna i mjerenja srednje temperature vode u profilu Vrhovo-most u dane 22.-24. srpnja 1998.



Slika 5: Izmjerene i izračunate srednje temperature vode u profilu Vrholvo – most.

Kao što se vidi, glede srednje profilske temperature vode, oba modela (1D i 3D) daju praktički identične rezultate. Primjetno je, međutim, da oba puta su računski dobivene prosječne profilske temperature vode, u fazi zagrijavanja (u sunčanom razdoblju dana), niže (do 0,5°C) od izmerjenih. Pošto se to dogodilo i u primjerima koji ovdje nisu izloženi, vjerovatno razlog tomu nije u strukturnoj osnovi upotrebljenih matematičkih modela, već u upitnoj valjanosti ulaznih podataka; pogotovo glede intenziteta globalnog zračenja sunca koje je u fazi zagrijavanja jedan od glavnih članova toplinske bilance.

Iz okvira preliminarnih analiza je zanimivo navesti još i zaključak, da je za formiranje toplinske bilance, određenog odsjeka zajaženog riječnog toka, potrebno i formalno odgovarajuće uvođenje praktično identičnog faktora povećanja "službenog" podatka o intenzitetu toplinskog zračenja sunca (približno 1.5), kao što je bilo i kod kalibriranja matematičkog modela za određivanje temperaturnog režima nezajaženog toka rijeke Save nizvodno od brane HEV [4]. Opravdanost tako velikog posezanja u službene podatke će se morati dokazati referenčnim mjerenjem zračenja sunca. Za sada bi, na osnovi 20-godišnjih prosječnih satnih vrijednosti [4], moglo biti opravdano povećanje za približno 27%, što je bilo učinjeno također već u gore prikazanom izračunu temperature.

4 LITERATURA

1. Agencija RS za okolje (ARSO): Hidrološki in meteorološki podatki
2. Čehovin I., Rodič P. (1995): Stanje toplotne onesnaženosti reke Save od Zidanega mostu do državne meje, Inštitut za hidravlične raziskave, Ljubljana.
3. Patera A., Votruba L. (1996): Reservoir impact on the downstream regime of a river
4. Kajfež-Bogataj L., Petkovšek Z., Pristov J., Rakovec J., Roškar J., Zupančič B., Hočevar A. (1982): Sončno obsevanje v Sloveniji, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta.
5. Janežič Z., Rodič P., Rajar R. (2000): Temperaturno stanje vodotoka dolvodno od akumulacije, Inštitut za hidravlične raziskave, Ljubljana