

MATEMATIČNO MODELIRANJE TOPLOTNE OBREMITVE SPODNJE SAVE PRI NUKLEARNI ELEKTRARNI KRŠKO

MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL POLLUTION OF LOWER SAVA RIVER AT THE NUCLEAR POWER PLANT KRŠKO

prof. dr. Matjaž Četina, univ. dipl. inž. grad.

matjaz.cetina@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Rudolf Rajar, univ. dipl. inž. grad.

rudi.rajar@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Katedra za mehaniko tekočin

Vanja Hatič, univ. dipl. inž. grad.

vanja.hatic@gmail.com

dr. Andrej Širca, univ. dipl. inž. grad.

andrej.sirca@ibe.si

IBE, d. d., Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 519.8:536.22:621.311.25

(282.243.743)(497.4 Krško)

Povzetek | Pri načrtovanju termo- ali nuklearnih elektrarn na rekah je treba z matematičnimi modeli napovedati posledice toplotne obremenitve. V prispevku je kratko opisan tridimenzionalni model PCFLOW3D, predvsem modul za simulacijo toplote. Pri- kazana je detajlna verifikacija modela z meritvami v bazenih Vrhovo in Blanca.

Opisana je uporaba modela pri napovedi toplotnega obremenjevanja Save z izpusti toplote iz Nuklearne elektrarne Krško (NEK). V prihodnjih letih bo namreč 7 km dolvodno od NEK zgrajena HE Brežice, z bazenom, v katerega bo iztekala odpadna toplota iz NEK. Toplotne razmere se bodo od sedanjega stanja, ko je izpust toplote neposredno v Savo, bistveno spremenile. Rezultati simulacij so pokazali, da bo osnovna zahteva, da se temperatura pod NEK ne sme povečati za več kot 3 °C, presežena le v redkih izjemnih razmerah.

Ključne besede: tridimenzionalni model, simulacija toplote, toplotna obremenitev Save, odpadna toplota iz nuklearne elektrarne

Summary | During the design of thermo- or nuclear power plants on rivers, simu- lations by numerical models are used to forecast the thermal processes which often cause unacceptable thermal pollution. In the paper, a three-dimensional numerical model PCFLOW3D is described, especially its module for the simulation of thermal processes. A detailed verification of the model is presented, where measurements in the reservoirs Vrhovo and Blanca were used. Further, the application of the model is described for the forecast of thermal load of the Sava River with the thermal outflow from the Nuclear power plant Krško. At present, the cooling water is discharged directly into the Sava River. How- ever, in the next years a new HEPP Brežice will be built 7 km downstream, and the cooling water will flow into the reservoir. The thermal conditions will be significantly changed. Simulation results showed that the maximum allowed temperature increase of 3 °C would be exceeded in very rare conditions only.

Key words: three-dimensional model, simulation of thermal processes, thermal load of Sava River, cooling water from nuclear power plant.

1 • UVOD

Toplotno obremenjevanje je eden pomembnejših procesov pri varovanju okolja. Voda v rekah, jezerih ali tudi morju se lahko segreje do tako visokih temperatur, da so onemogočeni normalni biološki procesi razvijanja flore in favne. Poleg naravnega segrevanja zaradi sončne energije so vzroki segrevanja lahko antropogeni, kar smatramo kot toplotno onesnaževanje. To je predvsem odvajanje odpadne toplote iz termo- in nuklearnih elektrarn. Obseg takega onesnaževanja je treba predvideti že v projektih načrtovanja elektrarn, saj je treba oceniti vplive na okolje, od tega pa je delno tudi odvisna ekonomska upravičenost načrtovane elektrarne.

V slovenski zakonodaji je npr. predpis, da se v rekah ali rečnih akumulacijah temperatura vode zaradi odvajanja odpadne toplote iz termoelektarn ali nuklearne elektrarne ne sme zvišati za več kot 3 °C.

Pri načrtovanju izgradnje NEK v letu 1973 so bili toplotni procesi, kjer se je odpadna toplota odvajala neposredno v Savo, simulirani predvsem s poskusi in meritvami na hidravličnih modelih, s čimer so bili določeni pogoji obratovanja. V naslednjih letih se načrtuje izgradnja hidroelektrarne (HE) Brežice, ca. 7 km dolvodno od NEK. Jez HE Brežice bo zajezil Savo in odpadna toplota se bo v prihodnje namesto v reko Savo odvajala v akumulacijsko jezero

Brežice. S tem se bodo pogoji odvajanja toplote spremenili, saj se bo gladina ob vtoku vode v dovodni kanal NEK povišala za 3 metre, hitrosti toka v bazenu bodo zmanjšane, zadrževalni čas na dolvodnem odseku Save bo povečan, poleg tega bo povečana površina vodne gladine dolvodno od NEK, kar bo povzročilo večji vnos sončne toplote v vodotok.

Zaradi tega je bilo nujno preveriti toplotne razmere, ki bodo nastale v bodočem stanju po izgradnji HE Brežice.

Za takšne presoje je danes mogoče uspešno uporabiti matematične modele, saj je z njimi možno simulirati vse vplive, od izmenjave toplote med bazenom in atmosfero pa do vnosa odpadne toplote iz energetskih objektov. V prispevku so opisani takšen model, njegovo umerjanje in verifikacija veljavnosti ter v sklepnem delu rezultati simulacij.

2 • ODVAJANJE ODPADNE TOPLOTE IZ NEK V SAVO

Izkoristek nuklearne elektrarne Krško znaša le 35 %, ostalih 65 % energije, proizvedene v reaktorjih, se pretvori v toplotno energijo, ki se odvaja s hladilno vodo v reko Savo (NEK, 2012). Zaradi tega ima v sedanjem stanju hladilna voda iz NEK daleč največji vpliv na segrevanje Save dolvodno od jez HE NEK. Upravičeno lahko predvidevamo, da bo NEK tudi po izgradnji HE Brežice ostala največji toplotni obremenjevalec Save.

NEK odvzema vodo iz Save tik nad pregrado pri elektrarni (slika 1). Količina odvzete vode je odvisna od obratovanja elektrarne. Kadarkoli se izkorišča 100 % moči reaktorja in savski pretok to dopušča, se iz Save odvzema $Q_{NEK} = 25 \text{ m}^3/\text{s}$. Črpalke po ceveh potiskajo odvzeto savsko vodo v kondenzator, kjer je izrabljena vodna para, ki prihaja iz turbin. Pri

prehodu skozi kondenzator se zaradi ohlajanja pare savska voda segreje. Črpalke nato segreto vodo potiskajo nazaj v Savo. V neugodnih vremenskih razmerah in pri nizkem pretoku Save je treba pred izpustom nazaj v Savo hladilno vodo ohladiti še v hladilnih stolpih. V hladilnih stolpih se voda hladi z zrakom iz okolice (NEK, 2012).

Toplota, ki jo odda hladilna voda v Savo, je podana z enačbo (1).

$$E_{NEK} = Q_{NEK} \rho_v (T_{NEK} - T_{inp}) c_{pv} t, \quad (1)$$

kjer so:

E_{NEK} vnos toplote z izpustom odpadne vode (J),

Q_{NEK} pretok hladilne vode iz NEK (m^3/s),

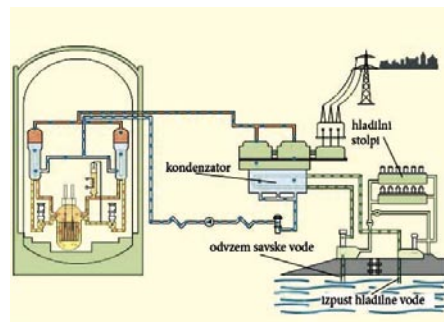
ρ_v gostota vode (kg/m^3),

T_{NEK} temperatura hladilne vode (°C),

T_{inp} vtočna temperatura Save (°C),

c_{pv} specifična toplota vode, ki znaša 4219 J/(kgK),

t čas (s).



Slika 1 • Shema procesa hlajenja v NEK, možnost kombinacije hlajenja s savsko vodo in s hladilnimi stolpi (NEK, 2012)

3 • MATEMATIČNI MODEL

3.1 Model PCFLOW3D

Model PCFLOW3D je nestalni tridimenzionalni nelinearni baroklini model, razvit na Katedri za mehaniko tekočin FGG. Uporabljen in verificiran je bil že pri reševanju mnogih praktičnih problemov, predvsem pri problemih onesnaževanja površinskih voda ((Četina, 2000), (Rajar, 2004), (Tomiya, 2006), (Rajar, 2007)). Princip modela je bil zato

že večkrat opisan ((Rajar, 1997), (Četina, 1997)).

Hidrodinamika temelji na osnovnih enačbah nestalnega toka s prosto gladino, v vertikalni smeri uporabljamo hidrostatično aproksimacijo. Osnovni model sestoji iz štirih modulov: hidrodinamičnega, transportno-disperzijskega, sedimentacijskega in biogeokemičnega modula. Med zunanjimi silami, ki vplivajo na vred-

nosti hidrodinamičnih količin, lahko v modelu PCFLOW3D upoštevamo veter, plimovanje, dotoke rek in notranje sile zaradi gradientov temperature in slanosti ter posledično gradientov gostote vode. Hidrodinamični račun poteka po metodi končnih volumnov, transport in disperzijo polutantov pa lahko računamo z Eulerjevo metodo končnih razlik ali z Lagrangeovo metodo sledenja delcev.

Vpliv turbulence je zajet s koeficienti turbulentne viskoznosti N_h in N_v (posebej za horizontalno in vertikalno smer) ter s koeficienti turbulentne difuzije D_h in D_v . Vrednosti

koeficientov določimo z dodatnimi enačbami, s t.i. modeli turbulence. Koeficienti turbulentne viskoznosti in difuzije so odvisni od hitrosti toka v posameznih točkah in njenih gradientov, spreminjajo se v času in prostoru. Model PCFLOW3D omogoča poljubno kombinacijo horizontalnega in vertikalnega modela turbulence. Uporabljamo v glavnem dva modela turbulence: (a) Model Smagorinsky (vertikalno in/ali horizontalno); (b) Model Mellor-Yamada (vertikalno).

Pri opisanih simulacijah toplotnih procesov smo uporabili model Smagorinsky tako po horizontalni kot po vertikalni smeri.

V prvotni verziji modela je numerično reševanje dinamičnih enačb potekalo po t.i. hibridni shemi, kar je kombinacija »upwind« in centralne sheme. V hidrodinamičnem modulu je ta shema razmeroma dovolj natančna, medtem ko smo pri umerjanju transportno-disperzijskega modula že v več primerih ugotovili, da je shema premalo natančna, ker povzroča preveč poznane numerične difuzije. Zato je bila v zadnjem času vgrajena dodatna shema Quick, ki je drugega reda točnosti in povzroča bistveno manj numerične difuzije.

O uporabnosti in točnosti obeh shem je več detajlov v poglavju 4, kjer je opisana primerjava z meritvami.

3.2 Simuliranje toplotnih procesov

Če simuliramo spremembe toplote v jezerih ali v rečnih bazenih, moramo v modelu upoštevati dve vrsti izmenjave med vodnim telesom in okolico:

- Dotok toplote iz lokalnih virov, v našem primeru dotok odpadne toplote iz NEK
- Izmenjava toplote z atmosfero

LOKALNI DOTOK TOPLOTE. Dotok toplote iz lokalnih virov je upoštevan v definiranih robnih celicah modela, v našem primeru na mestu, kjer je stik odvodnega kanala NEK z bazenom. Ker je temperatura neposredno merilo toplote, v modelu preračunavamo temperaturo na isti način kot katerikoli polutant, parameter temperatura je na mestu koncentracije polutanta. V transportno-disperzijskem modulu se simulira transport in disperzija temperature. Dotok toplote v vodno telo pa se v vsakem času preračunava po enačbi:

$$Q_T = Q \rho \Delta T C_{pv} \quad (2)$$

Kjer pomeni:

Q_T dotok toplote (J/s),

Q pretok vode (m^3/s),

ρ gostota vode ($1000 \text{ kg}/m^3$)

ΔT prirastek temperature ($^{\circ}C$),

C_{pv} specifična toplota vode ($4219 \text{ J}/(kg^{\circ}C)$)

IZMENJAVA TOPLOTE Z OZRAČJEM. Meteorološki dejavniki, ki vplivajo na izmenjavo toplote med vodnim telesom in ozračjem, so naslednji: sončno obsevanje, veter, vlažnost zraka, zračni tlak in oblačnost. Skupni vpliv vseh teh procesov je zajet v splošni enačbi toplotnega toka (Orlob, 1983):

$$P = GSA + SO + SV + CO + EV, \quad (3)$$

kjer so:

P skupno prehajanje toplote (W/m^2),

GSA prehajanje toplote zaradi globalnega sevanja sonca (W/m^2),

SO prehajanje toplote zaradi sevanja ozračja (W/m^2),

SV prehajanje toplote zaradi sevanja vodnega telesa (W/m^2),

CO prehajanje toplote zaradi konvekcije (W/m^2),

EV prehajanje toplote zaradi evaporacije (W/m^2).

Dejansko toploto, ki jo prejme akumulacija, pa izračunamo z izrazom:

$$E_{atm} = P A_a t, \quad (4)$$

kjer so:

E_{atm} vnos toplote iz atmosfere (J),

P skupni dotok toplote iz atmosfere (W/m^2),

A_a površina akumulacije (m^2),

t čas (s).

V modelu se najprej v vsakem času preračunava dotok toplote iz ozračja, ki je lahko pozitiven ali negativen (torej segrevanje ali ohlajanje). Posamezne člene se računa po izkustvenih enačbah (Orlob, 1983).

Najpomembnejši je prvi člen, globalno sevanje. To je dotok toplote preko kratkovalovnega sončnega sevanja. Ta parameter je odvisen od zemljepisne širine, dolžine dneva (torej letnega časa) in od oblačnosti. Zaradi neposrednega odboja je v modelu ta radiacija zmanjšana za 7 % (VGI-VGL, 1989). Podatek o globalnem sevanju mora biti bodisi poznan iz neposrednih meritev sevanja (vpliv oblačnosti je neposredno vključen) ali pa izračunan iz splošnih enačb glede na zgoraj omenjene parametre. Drugi način je lahko natančen le ob jasnem vremenu, saj je npr. oblačnost lahko upoštevana le za neke povprečne mesečne razmere.

na Savi v Radečah) in krivuljo, izvrednoteno preko školjčnega diagrama na HE Vrhov. Ker je drugi način vrednotenja pretoka nezanesljiv, smo po nasvetu strokovnjakov iz HE Vrhov upoštevali pretoke po podatkih Urada za meteorologijo.

Meteorološki podatki. Ti so bili merjeni v bližini kraja meritev. Globalno sevanje je bilo merjeno neposredno na soncu. Vendar smo po dolgem nizu poskusov umerjanja z modelom ugotovili, da je pri merjenju morala nastajati napaka. Zato smo v nadaljevanju izračune globalnega sevanja opravili po splošnih enačbah, kjer je to odvisno od lege v koordinatnem sistemu zemlje ter od letnega in dnevnega časa (Hočevár, 1982). Te enačbe

in končni profil smo oblikovali tako, da se vzdolž toka preseki in širine gladine kar najbolj prilegajo dejanskim. V zadnji verziji smo upoštevali naslednje debeline računskih slojev (od gladine proti dnu): 0,5; 0,8; 1,0; 2,0; 2,5; 2,2; 1,5 in 1,5 metra.

Hidravlični podatki. V obdobju od 22. do 24. julija je bil pretok preko bazena nestalen in je nihal okrog vrednosti $112 \text{ m}^3/s$. Dobili smo dve dokaj različni krivulji časovnega spreminjanja pretoka: pretoke po podatkih Urada za meteorologijo (dobljeni na osnovi meritev

4 • UMERJANJE MODELA

4.1 Umerjanje v bazenu Vrhov

Ena od meritev temperature v bazenu Vrhov v letu 1998 je bila opravljena od 22. julija ob 9. uri do 24. julija ob 8. uri zjutraj. Tako so bili zajeti dva cela dneva in dve noči. Zato smo to meritev izkoristili za temeljito umerjanje modela PCFLOW3D.

Topografski podatki. Topografijo bazena smo zajeli s 57 celicami v vzdolžni smeri ($D_x = 100 \text{ m}$) in 19 v prečni smeri ($D_y = 10 \text{ m}$). Upoštevali smo, da je presek trapezne oblike, ki se linearno večja vzdolž toka. Začetni

so v svetu preverjene, in ker je bilo v celotnem času meritev nebo brez oblakov, je odpadla negotovost zaradi oblačnosti. Izkazalo se je, da je bilo globalno sevanje po meritvah za ca. 20 % prenizko, verjetno zaradi koeficienta odboja, ki ni bil pravilno umerjen.

Kot rezultat prikazujemo samo sliko meritev skupaj z izračunanimi rezultati: temperature v profilu novega mostu v Radečah, ki je 4350 metrov gorvodno od HE Vrhovo (slika 2). Vidimo, da se potek merjenih in izračunanih temperatur dovolj dobro ujema v celotnem obdobju meritev in tudi po celotni globini. Ker smo podobno ujemanje dobili tudi v drugih merjenih profilih, menimo, da je model simulacije toplotnih procesov pokazal dobro točnost in zanesljivost.

4.2 Meritve v bazenu Blanca

Iz poročila Inštituta za hidravlične raziskave (IHR, 2011) povzemamo glavne podatke in rezultate o meritvah, ki smo jih uporabili za verifikacijo modela PCFLOW3D.

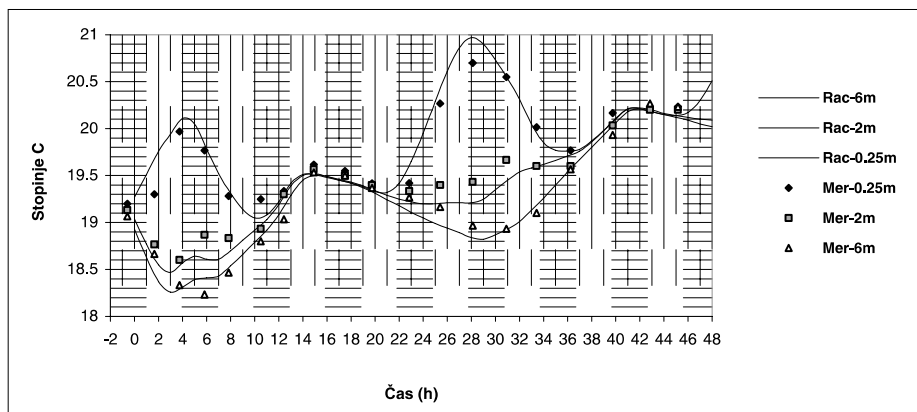
Datum in časi meritev. Meritve v bazenu Blanca so bile opravljene 23. in 24. avgusta 2011. Rezultati so pregledno prikazani v poročilu (IHR, 2011). Meritve v vsakem merskem profilu so bile opravljene šestkrat v času od 23. avgusta ob 10. uri do 24. avgusta 2011 ob 7. uri.

V vsakem profilu so bili časi meritev nekoliko različni (izvajanje na različnih lokacijah je zahtevalo prevoze). Točni časi vsake meritve so prikazani na slikah 5 in 6 skupaj z rezultati meritev in rezultati simulacij.

Hidravlične in temperaturne razmere. Pretok v bazenu Blanca je bil v času meritev $Q = 63 \text{ m}^3/\text{s}$, z minimalnimi nihanji okrog te vrednosti, ki smo jih zanemarili.

Debeline slojev in temperature, kot so bile upoštevane v matematičnih simulacijah, so prikazane v preglednici 1. Vseh slojev v simulacijah je bilo 16, vendar sta prvi spodnji (sloj 1) in zadnji zgornji (sloj 16) fiktivna (zaradi numerične metode).

Treba je pripomniti, da smo prikazane začetne temperature slojev (v času $t = 0$ v simulacijah, kar pomeni 23. avgusta ob polnoči) lahko le privzeli iz meritev, upoštevane so bile povprečne temperature v posameznih slojih, čeprav so dejansko vzdolž toka variirale za ca. $\pm 5 \%$.



Slika 2 • Primerjava merjenih in izračunanih temperatur v bazenu Vrhovo v profilu novega mostu Radeče



Slika 3 • Tloris bazena Blanca, označenih je pet merskih mest

Prav tako smo v simulacijah morali privzeti dotočno temperaturo v prvem gorvodnem profilu. Iz merjenih rezultatov smo privzeli, da je ta temperatura približno $T_{zoc} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Kot je opisano v poglavju 4.4, so prav te netočnosti v vhodnih podatkih povzročile največji del razlik med merjenimi in izračunanimi rezultati.

Meteorološke razmere. Vse podatke o atmosferskih razmerah (globalno sevanje, temperatura zraka, hitrost vetra, vlažnost) smo dobili iz meritev (IHR, 2011). Za temperaturo vodne gladine smo v začetnih simulacijah upoštevali povprečje meritev ($25 \text{ }^{\circ}\text{C}$), v kasnejših (tudi končnih) simulacijah pa je bila v računih upoštevana v vsaki celici modela dejanska

temperatura površinskega sloja, ki se je med časom simulacij spreminjala.

Rezultati. Rezultati meritev, tj. izmerjene temperature v petih merskih profilih v različnih časih dneva (povzeti iz poročila (IHR, 2011)), so prikazani na slikah 5 in 6 skupaj z rezultati simulacij z modelom PCFLOW3D, verzija 21, in sicer za poenostavljeno topografijo (primer BLALIN) in za realno topografijo bazena Blanca (REA).

4.3 Umerjanje modela in dopolnitve

Simulacije hidrodinamike in predvsem toplotnega dogajanja za dosedanje projekte (IBE, 2011) so bile izvedene z verzijo 20 modela

sloj	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D_h (m)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,25	1,1	0,85	0,55	0,4	0,35	0,3	0,25	0,25	0,2
T ($^{\circ}\text{C}$)	19	21	21,2	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,6	24	24,4	24,6	24,6	24,6

Preglednica 1 • Debeline slojev in začetne temperature v času $t = 0$, kot so bile upoštevane v matematičnih simulacijah

PCFLOW3D. Kot je opisano v poglavju 4.1 sta bili v letih 1995 in 1998 narejeni detajlna kalibracija in verifikacija tega modela z meritvami temperature v bazenu Vrhovo (Rajar, 1998), ki sta pokazali dobro ujemanje med meritvami in rezultati simulacij.

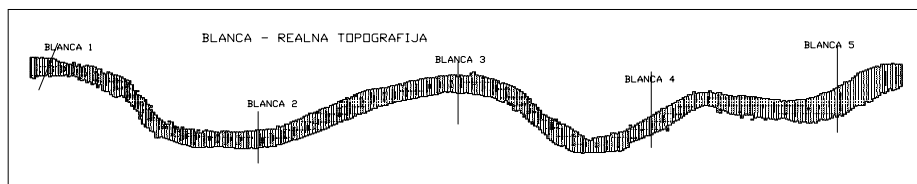
Vendar pa so bile pri nadaljnjih izračunih za omenjene projekte v bazenu Brežice razmere pomembno drugačne kot v primerih iz bazena Vrhovo.

Razlike so predvsem v naslednjih detajlih:

1. V primeru bazena Brežice je poleg izmenjave toplote z ozračjem prisoten lokalni vtok toplote iz odvodnega kanala NEK, kar povzroči bolj kompleksno dogajanje toplotne obremenitve.
2. Pri bazenu Brežice je treba izvršiti simulacije za zelo ekstremne toplotne pojave, kot so visoka temperatura vode v Savi, nizek pretok Save in visoka temperatura ozračja. Pri meritvah v bazenu Vrhovo je bila toplotna stratifikacija majhna, tudi zato, ker je bil pretok v Savi razmeroma velik (112 oziroma 140 m³/s), zato je bilo vertikalno mešanje toplote po globini razmeroma močno.

Ker so bile ob času meritev v bazenu Blanca skoraj ekstremno vroče poletne razmere, z zelo visokimi temperaturami Save in ozračja, nizkim pretokom (63 m³/s) in z močno stratifikacijo slojev, so nam te meritve služile za dodatno verifikacijo in umerjanje modela. Dopolnila modela PCFLOW3D iz verzije 20 v verzijo 21 so bila pripravljena postopno, s serijo korakov. V nadaljevanju opisujemo postopke, s katerimi smo z dopolnili modela dosegli bistveno večjo točnost.

V (prvotni) verziji 20 je predvsem bistveno to, da so se vse simulacije disperzije toplote (ali drugih polutantov) vršile po numerični shemi upwind, za katero je znano, da povzroča določeno numerično difuzijo. Tako je najbolj bistveno dopolnilo modela iz verzije 20 v verzijo 21 uporaba druge numerične



Slika 4 • Tloris območja simulacije z matematičnim modelom (REA) – realna topografija bazena Blanca z vrisanimi lokacijami merskih mest, v katerih smo primerjali merjene in računske rezultate

sheme quick, ki je drugega reda točnosti in bi po vseh informacijah iz literature morala povzročati bistveno manj numerične difuzije. To je najbolj bistveno pri ugotavljanju, koliko resnične toplotne stratifikacije po globini nastane v simulacijah, kajti shema upwind zaradi numerične difuzije delno izenačuje temperaturo posameznih slojev (predvsem površinskih), kar ni v skladu z resničnim fizikalnim pojavom.

Pri vseh simulacijah, tako z verzijo 20 kot 21, smo račun hidrodinamike (HD) in simulacijo disperzije toplote razdelili: najprej smo izračunali potek hitrosti, kjer je model z iterativnim postopkom iz začetnega stanja (vse hitrosti so nič) izračunal stanje HD, ko se ustali pri podanih robnih pogojih in podanem pretoku. V nadaljnjih simulacijah smo z upoštevanjem tako dobljenega (konstantnega) HD-polja simulirali disperzijo toplote. Tako smo bistveno zmanjšali čas izračunov (ca. trikrat). S simulacijami smo preverili, da tak način izračunov v primerjavi s točno simulacijo, kjer se več čas skupaj računata HD in toplotna disperzija, povzroča le manjše netočnosti, reda nekaj odstotkov.

Z modelom PCFLOW3D-V21 smo simulirali tri primere:

- A. BLALIN – bazen Blanca, linearna verzija (umerjanje modela)
- B. REA – bazen Blanca, realna topografija (umerjanje modela)
- C. AVG63A – bazen Brežice (z odsekom Save nad jezom NEK), za razmere v avgustu, pretok 63 m³/s

V marcu 2012 je bil že simuliran osnovni primer: AVG63 – bazen Brežice (z odsekom Save nad jezom NEK), za razmere v avgustu, pretok 63 m³/s, z verzijo 20 modela PCFLOW3D (IBE, 2012).

Primer BLALIN in REA sta bila izvršena in uporabljena za kalibracijo in verifikacijo dopolnjenega modela z uporabo meritev v bazenu Blanca. Primer AVG63A pa je bil ponovna simulacija hidrodinamičnih (HD) in predvsem toplotnih razmer v bazenu Brežice. Zadnji primer je bil glede na topografijo in robne pogoje identičen primeru AVG63 iz predhodnih projektov, bistvo je bilo določiti, koliko so toplotne razmere pri tem primeru različne od primera AVG63 zaradi izboljšane točnosti verzije 21 modela PCFLOW3D.

Najprej smo izvršili primer BLALIN s poenostavljeno topografijo (trapezni prerez, linearne spremembe vzdolž toka). Pri tem smo ukrivljenost bazena zanemarili, smo pa vse parametre, ki pomembno vplivajo na toplotne procese, obdržali skoraj enake: površino in tudi širino bazena, volumen in globine. Zato smo lahko bistveno zmanjšali število računskih celic: preglednica 2 kaže, da jih je bilo v primeru REA ca. 54-krat manj, kar je pomembno skrajšalo čas računanja. Druga prednost poenostavljene topografije BLALIN je bila, da smo lahko bolj pregledno opazovali vplive posamezni členov in raznih izboljšav modela.

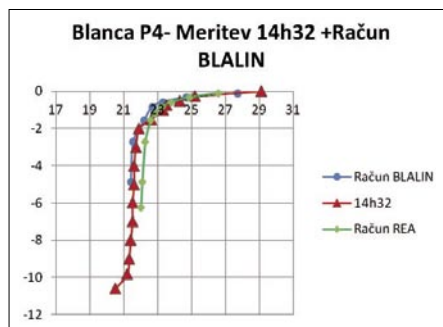
Primer REA pa je bil simuliran z realno topografijo bazena Blanca, ki je prikazana na sliki 4.

Primer	L (dolž.)	Š (širina)	N št. celic X-smer	NJ št. celic Y-smer	št. slojev	D _x	D _y	D _n	Št. vseh celic
BLALIN	8960	180	34	18	16	280	10/16	0,2/1,5	9792
REA	8225	980	331	100	16	25	10	0,2/1,5	529,600
AVG63A	7225	1789,5	246	131	14	4/60	2/20	0,2/1,9	451,164
AVG63	7225	1789,5	246	131	14	4/60	2/20	0,4/1,9	451,164

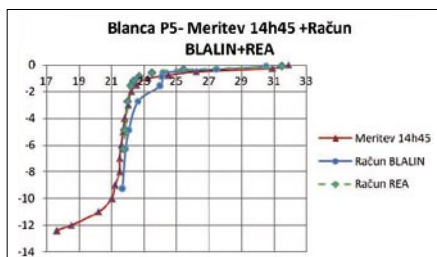
Preglednica 2 • Vrednosti računskih parametrov v posameznih primerih

4.4 Primerjava modelnih rezultatov z meritvami

Na slikah 5 in 6 so prikazane izmerjene krivulje temperature po globini v profilih Blanca 4 in Blanca 5, skupaj z rezultati izračunov serije BLALIN in računa REA. Za primerjavo smo izbrali tri dnevne čase, ujemanje med modelom in meritvami najbolje prikaže meritev ob času največje stratifikacije, tj. med 14. in 15. uro.



Slika 5 • Primerjava merjene in računanke krivulje temperatur po globini v profilu Blanca 4 ob 14. uri in 32 min



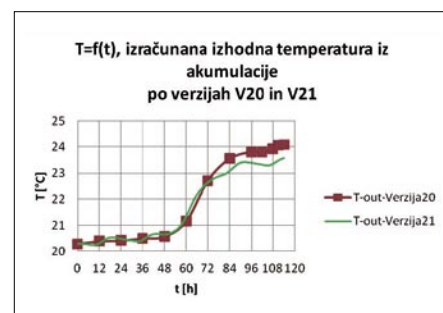
Slika 6 • Primerjava merjene in računanke krivulje temperature po globini v profilu Blanca 5 ob 14. uri in 45 min

Najpomembnejši zaključki o umerjanju so naslednji:

Glede na primerjavo temperaturnih krivulj iz meritev in simulacij lahko rečemo, da nova izpopolnjena verzija modela daje zelo dobro ujemanje. Popolnega ujemanja ni mogoče pričakovati, saj je že omenjeno, da npr. robni pogoji na začetku bazena niso bili dovolj točno merjeni, da bi bile lahko simulacije popolne. Tudi topografija, čeprav v primeru REA simulirana z zelo gosto numerično mrežo, ni popolnoma točna. Poleg tega podatki o atmosferskih razmerah (npr. hitrost vetra, vlažnost) ne morejo biti popolnoma točni. Čeprav so bili verjetno merjeni razmeroma natančno, pa zagotovo ti parametri niso bili konstantni po celotnem območju bazena, kot se edino lahko predpostavlja v simulacijah.

Zanimivo je, da so rezultati simulacij temperature z realno topografijo (primer REA) nekoliko, vendar ne zelo bistveno bližje rezultatom meritev kot primer BLALIN (poenostavljena topografija). To pomeni, da smo s primerom BLALIN dovolj dobro aproksimirali vplivne parametre dejanske topografije.

Pomemben rezultat za toplotno obremenitev Save iz NEK je dejstvo, da na novo umerjen model, verzija 21, daje na iztoku iz bazena Brežice za ca. 0,5 °C nižjo temperaturo kot verzija 20 (slika 7). Kot je dalje prikazano, to pomeni, da je pogoj preseganja 3 °C presežen le v izredno redkih razmerah.



Slika 7 • Primerjava temperature na iztoku iz bazena Brežice, izračunane po verzijah modela 20 in 21. Dodatno umerjena verzija 21 daje za 0,5 °C nižjo temperaturo

5 • OMEJITVE ZARADI TOPLLOTNIH OBREMITEV

5.1 Povzetek evropske zakonodaje

Krovná vodná direktíva Water Framework Directive (WFD), ki jo je v letu 2000 izdala Evropska unija, zapoveduje več novih predpisov na področju varovanja okolja. Namen WFD je, da do leta 2015 izboljša stanje površinskih voda in doseže visok ekološki status. Med drugim je direktíva predpisala tudi kombinirani pristop, ki združuje emisijski in imisijski pristop k varovanju vodnega okolja. V Sloveniji, tako kot v večini drugih članic EU, to pomeni nov pristop, saj smo v preteklosti poznali le emisijski pristop.

Emisijski pristop oziroma izpustni kriterij se v angleški literaturi imenuje Emission Limit Values (ELV). To so mejne vrednosti koncentracije polutanta v odpadni vodi na točki izpusta v vodno telo. ELV je učinkovit način omejevanja onesnaževanja vodnih teles, saj je s tem pristopom mogoče enostavno predpisati omejitve, prav tako je preprosta vzpo-

stavitev monitoringa za tak sistem. Vendar ima ta pristop tudi veliko pomanjkljivost, saj ne upošteva sinergijskega učinka več izpustov v enem vodnem telesu. Tako se lahko zgodi, da vsak posamezni izpust ustreza standardom ELV, da pa njihov skupni učinek deluje negativno na ekologijo vodnega okolja.

Imisijski pristop se v angleški literaturi imenuje Environmental Quality Standards (EQS). To so mejne vrednosti koncentracije polutantov, ki se jih ne sme preseči v vodnem telesu, v katero se odpadne vode odvajajo. Če posplošimo, je pri imisijskem kriteriju vseeno, kakšno odpadno vodo spuščamo v vodno telo, dokler so tam izpolnjeni EQS-standardi. Takšna oblika zakonodaje lahko povzroči, da bi onesnaževalci lahko polno izkoristili ekološko kapaciteto vodnega telesa. Prav tako je zahtevna vzpostavitev monitoringa, saj je težko določiti, kje, kdaj in kako pogosto naj se opravi meritve.

Kombinirani pristop bi lahko bil popolna rešitev, saj bi izničil slabosti obeh prej omenjenih pristopov in združil njune dobre lastnosti. Vendar se še vedno poraja vprašanje, kje naj bi opravljali meritve EQS. WFD ponuja ohlapen odgovor, in sicer, da morajo vrednosti v vodnem telesu ustrezati EQS-standardom na točki popolnega premešanja, kako se to točko določi, pa ni posebej opisano.

5.2 Aktualne omejitve obratovanja NEK na podlagi slovenske zakonodaje

Že pred izgradnjo NEK so bile 25. oktobra 1973 izdane Smernice za izdelavo lokacijske dokumentacije za gradnjo NE Krško, od koder povzemamo glavne točke:

- Pri predvidenem pretočnem hlajenju kondenzatorja se bo odvajalo v Savo 260.000 do 350.000 KCal/s odvečne toplote.
- Temperatura Save po premešanju hladilne in savske vode, merjena na kontrolnem mestu iznad Brežic, v nobenem primeru ne sme preseči 28 °C.

- Razlika med temperaturo savske vode nad odvzemom in temperaturo, ki se mora doseči po mešanju s hladilno vodo, ne sme biti pred izlivom Krke večja od $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ in v prerezu na republiški meji $\Delta T = 2^\circ\text{C}$. Da se izpolni ta pogoj in istočasno zagotovi pri 25 % odvzemu pretoka polno obratovanje elektrarne, je treba zgraditi ustrezne akumulacije.
- Investitor mora zagotoviti stalno merjenje temperatur in ugotavljanje temperaturnih razlik v zato merodajnih profilih ter urediti alarmne naprave, ki naj signalizirajo tako prekoračenje absolutne maksimalne, po zakonu še dopustne temperature 28°C kakor tudi dopustno temperaturno razliko $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ v prerezu pred izlivom Krke in $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ pri profilu na republiški meji s Hrvaško.

Kot smo že povedali, je doslej hladilna voda iz NEK odtekala neposredno v reko Savo, po izgradnji HE Brežice pa bo odtekala v bazen Brežice. Večinoma so za prihodnje stanje omejitve toplotne obremenitve ostale enake, le omejitev maksimalne temperature 28°C je odpadla.

Toplotne izpuste iz NEK načeloma definira Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju odpadnih voda v vode in javno kanalizacijo (Uradni list RS, 2012), podrobneje pa več dovoljenj in odločb, v katerih so določene naslednje bistvene vrednosti:

- odvzem hladilne vode lahko znaša največ $26\text{ m}^3/\text{s}$, če je pretok Save večji od $100\text{ m}^3/\text{s}$,

- odvzem lahko znaša največ 25 % pretoka Save, če je pretok Save manjši od $100\text{ m}^3/\text{s}$,
- rečna temperatura se sme po popolnem premešanju zvišati za največ 3°C v dnevnem povprečju (ob nastopu izjemnih hidrometeoroloških razmer je možno začasno povišanje meje na $3,5^\circ\text{C}$ s posebno odločbo),
- hladilna voda na iztoku v Savo ima lahko od junija do septembra temperaturo največ 43°C , od oktobra do maja pa največ 30°C .

Aktualna dovoljenja ne navajajo več eksplisitno točke popolnega premešanja, vendar je bila njena določitev zahtevana v postopku priprave Državnega prostorskega načrta za HE Brežice.

5.3 Splošna definicija popolnega premešanja

V zakonodaji EU in v slovenski zakonodaji so omejitve temperature ponekod podane v t.i. točki premešanja, ki je na lokaciji, kjer naj bi bila hladilna in rečna voda popolnoma premešani. Vendar je toplotno dogajanje kompleksen pojav, tako da v bistvu točke popolnega premešanja sploh ni mogoče enoznačno definirati. Temperatura vode v bazenu je namreč razporejena različno vzdolž bazena tako po širini kot po globini, spreminja se tudi s časom, saj celo v izbranem prečnem profilu poleg odpadne toplote iz NEK na razpored temperature vplivajo še raz-

ni drugi parametri, kot so razpored hitrosti v profilu, globina, širina, sončno sevanje, veter ... V bistvu torej nimamo točke premešanja, ampak nekakšno prostorsko ploskev, vzdolž katere se pokaže preseganje predpisane temperature.

Tako je točko premešanja nujno definirati na neki praktičen način.

Poglejmo si primer, ko je vir onesnaženja na vodni gladini in na bregu vodotoka. Ob lak onesnaženja se hkrati širi v vertikalni in transverzalni smeri. Za take primere je značilna Gaussova porazdelitev koncentracije po oblaku onesnaženja z maksimalno vrednostjo onesnaženja c_{max} na vodni gladini na bregu vodotoka. Standardni odklon c_{max} opisuje lokalno vrednost onesnaženja c in je praktično indikator širine oblaka onesnaženja (Jirka, 2004).

Točka popolnega premešanja v vertikalni smeri je definirana kot točka, ko koncentracija na dnu struge znaša 90 % koncentracije na vodni gladini. Analogno se lahko definira tudi točka popolnega premešanja v transverzalni smeri (Jirka, 2004).

Analizirali smo stopnjo premešanosti za tri mesece: april, junij, avgust (s povprečnimi mesečnimi parametri). Od teh je avgust zagotovo najbolj kritičen.

Vrednost premešanja se v profilih giblje med 0 % in 80 %, meja 90 % sploh ni dosežena. Zato je bilo v študiji predlagano, da se za točko popolnega premešanja upošteva lokacija na iztoku iz HE Brežice.

6.2 Rezultati

Kot primer izračuna smo izbrali kritične razmere (povratna doba štiri leta). Simulacije toplotnih procesov smo izvajali več kot štiri dni, da se vidi že delno umirjanje in ustaljevanje temperature vode v bazenu. Slika 8 prikazuje razpored temperature v površinskem sloju po štirih dneh simulacij ((IHR, 2010), (IBE, 2011)), slika 9 pa detajl iste situacije, razpored temperature v bližini NEK.

Najpomembnejši rezultat pa je časovni potek temperature na iztoku iz bazena Brežice, kajti tako segreta voda bo tekla dalje v bazen Mokrice. Na sliki 10 je prikazan ta potek za

6 • TOPLOTNI PROCESI V BAZENU BREŽICE

6.1 Izbira karakterističnih meteoroloških razmer

Pri obravnavi obratovanja NEK oziroma toplotnih razmer v bazenu Brežice smo kot enega od kriterijev upoštevali, kakšna bi bila temperatura savske vode po popolnem premešanju. To mešanje je v največji meri zagotovljeno na iztoku iz bazena, na turbinskem iztoku HE Brežice. Tako so bile izdelane simulacije toplotnega dogajanja na tem mestu za različne razmere.

Omenjene analize toplotnih procesov so bile najprej opravljene za povprečne razmere nekaterih tipičnih mesecev v letu. Vendar pa so pogoji hlajenja reaktorjev najbolj kritični v posebnih razmerah, ko nastopi kombinacija zelo nizkega pretoka v Savi ter zelo visokih

temperatur vode v Savi in visokih temperatur ozračja. Tako sta bila na IBE pripravljena še dva scenarija: kritične razmere in ekstremne razmere (IBE, 2003). Glavne karakteristike so prikazane v preglednici 3. Verjetnost nastopa obeh dogodkov (povratna doba) je določena kot produkt verjetnosti nastopa 20-dnevnih nizkih pretokov Save in sočasnega 20-dnevnega obdobja vročih dni (prag 27°C).

RAZMERE	$Q_{\text{Save}} (\text{m}^3/\text{s})$	$T_{\text{zraka}} (^\circ\text{C})$	$T_{\text{Save}} (^\circ\text{C})$	povr. doba (let)
Kritične	75	27	22,83	4
Ekstremne	50	27	24,61	40

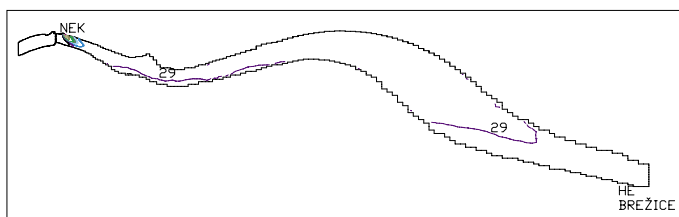
Preglednica 3 • Karakteristike scenarija kritičnih in ekstremnih razmer

nekaj različnih razmer, poleg rezultatov za kritične in ekstremne razmere so prikazani še za nekatere srednje mesečne razmere. Računi pa so bili opravljeni z modelom PCFLOW3D, verzija 20.

Vidi se, da se v tem izračunu kaže, da je povišanje temperature zaradi hladilne vode iz NEK preseženo za več kot dovoljene 3 °C

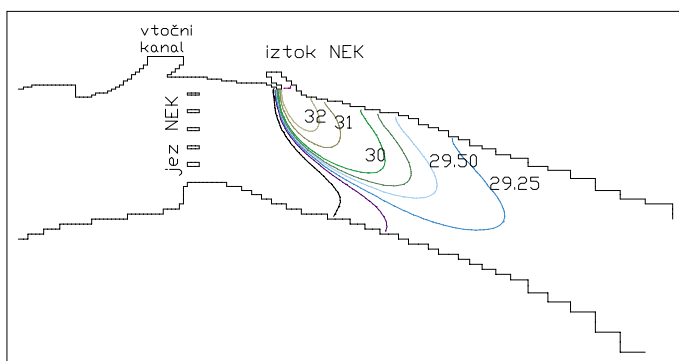
samo v treh primerih: kritičnih, ekstremnih in avgustovskih razmerah. Ker pa so simulacije z novejšo verzijo modela PCFLOW3D (verzija 21) pokazale, da nastane pri takih »vročih« razmerah močnejša stratifikacija in zaradi tega večje oddajanje toplote v ozračje, so po novo umerjenem modelu temperature na iztoku iz bazena Brežice v omenjenih

treh primerih za ca. 0,5 °C nižje. Tako bi do prekoračitve omejitve povečanja temperature za 3 °C prišlo le v kritičnih in ekstremnih razmerah, in sicer največ za 0,5 °C. Takšne izredne situacije se občasno pojavljajo tudi v obstoječem stanju brez zaježitve in jih je pod določenimi pogoji možno reševati z začasnimi dovoljenji za prekoračitve.

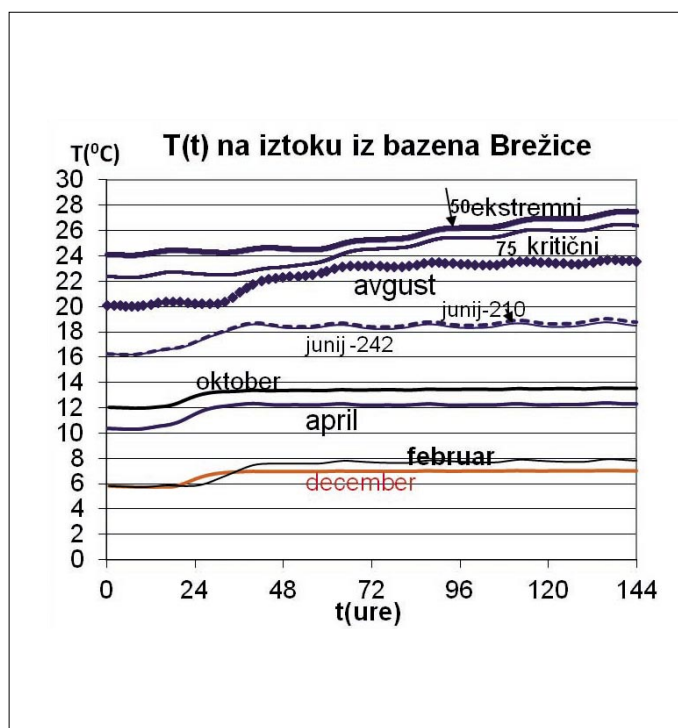


Slika 8 • Izolinije temperature v bazenu Brežice (površinski sloj) po štirih dneh simulaci

Kritične razmere: $Q_{\text{save}} = 75 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{cw}} = 18,75 \text{ m}^3/\text{s}$,
 $T_{\text{save}} = 26,7 \text{ °C}$



Slika 9 • Izolinije temperature v bazenu Brežice (površinski sloj), detalj slike 7a



Slika 10 • Časovni potek temperature na iztoku iz bazena Brežice (turbinski iztok) pri različnih hidroloških in meteoroloških razmerah, izračun po verziji 20

7 • SKLEPI

Po izgradnji HE Brežice bo nastal dolvodno od NEK akumulacijski bazen, v katerega bo odtekala segreta voda iz NEK, ki zdaj odteka neposredno v reko Savo. Nujno je bilo že pri projektiranju bodočega stanja preštudirati toplotne razmere, ki bodo v bodočem bazenu Brežice bistveno drugačne od sedanjih.

Matematični model PCFLOW3D, razvit na Katedri za Mehaniko tekočin UL FGG, je bil preverjen in umerjen z detaljnimi meritvami toplotnih razmer v bazenih Vrhuvo in Blanca.

V nadaljevanju smo ga uporabljali za simulacijo bodočih toplotnih razmer v bazenu Brežice.

Simulirali smo toplotno dogajanje za različne hidrološke in meteorološke razmere in jih predvsem primerjali z omejitvami temperature po slovenski in evropski zakonodaji.

Rezultati so pokazali, da bo glavni pogoj, to je dvig temperature za več kot 3 °C, presežen le v zelo redko nastopajočih razmerah. Ob tem je nujno treba omeniti, da se takšne situacije

pojavljajo že v obstoječih razmerah, hkrati pa je novelacija termične študije celotne Save (IBE, 2012) pokazala, da gorvodni bazeni HE v izrednih hidroloških in meteoroloških razmerah izboljšujejo izhodiščne pogoje (tj. nižajo vstopno temperaturo) za hladilni sistem NEK.

Kot je tudi predvideno po predpisih, bo v bodočih razmerah nujno izvajati monitoring. Rezultati meritev bodo eventualno še pokazali potrebo po dopolnilnih izračunih.

8 • ZAHVALA

Opisane obdelave so se opravljale za potrebe študije HE Brežice – Točka mešanja (IBE, 2012), katere naročnik so bile Hidroelektrarne na spodnji Savi (HESS). Naročniku se zahvaljujemo za dovoljenje za objavo rezultatov.

9 • LITERATURA

- Četina, M., Rajar, R., Širca, A., Hydrodynamic and Water Quality Modelling, Case Studies. Ecological Modelling, 101, pp. 209–228, 1997.
- Četina, M., Rajar, R., Povinec, P., Modelling of Circulation and Dispersion of Radioactive Pollutants in the Japan Sea, Oceanologica Acta 23(7), str. 819–836, 2000.
- Hočevar, A., in dr., Sončno obsevanje v Sloveniji, Zbornik BF, VTOZD za agronomijo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, 1982.
- IBE, Medsebojni vplivi energetskih objektov ob in na reki Savi z vidika toplotne obremenitve Save. Študija. Ljubljana, Ministrstvo za okolje RS, prostor in energijo: 143 str., 2003.
- IHR, Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice, Hidrodinamični in transportni model detajla vtoka in iztoka NEK, Poročilo, Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor RS, Ministrstvo za gospodarstvo RS, HESS, 44 str., 2010.
- IBE, Hidrodinamični in transportni model detajla vtoka in iztoka NEK, 3D-računi transporta plavin in dodatni scenariji obratovanja NEK, Poročilo, Ljubljana, HESS, 53 str., 2011.
- IBE, Medsebojni vplivi energetskih objektov ob in na reki Savi z vidika toplotne obremenitve Save, Revizija A, Poročilo, Ljubljana, HESS, 231 str., 2012.
- IHR, Inštitut za hidravlične raziskave, Izvedba meritev stratifikacije Savske vode v akumulacijskih Bazenu HE Vrhovo, HE Boštanj in HE Blanca, Poročilo, Inštitut za hidravlične raziskave, Ljubljana, 2011.
- Jirka, G. H., Bleninger, T., Burrows R., Larsen, T., Environmental quality standards in the EC-water framework directive, Consequences for water pollution control for point sources, E-Water, 2004/04: str. 1–20, 2004.
- NEK, povzeto po: <http://www.nek.si>, 2012.
- Orlob, G. T., Beck, M. B., Jørgensen, S. E., Mathematical modeling of water quality, streams, lakes and reservoirs. Davis, University of California: str. 150–226, 1983.
- Rajar, R., Širca, A., Modeliranje toplotnega onesnaževanja Save in akumulacij, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 14 p., 1998.
- Rajar, R., Četina, M., Hydrodynamic and Water Quality Modelling, An Experience, Ecological Modelling, 101, pp. 195–207, 1997.
- Rajar, R., Žagar, D., Četina, M., Akagi, H., Yano, S., Tomiyasu, T., Horvat, M., Application of three-dimensional mercury cycling model to coastal seas. Ecological Modelling 171, pp. 139–155, 2004.
- Rajar, R., Žagar, D., Četina, M., Horvat, M., and Petkovšek, G., Mass balance of mercury in the Mediterranean sea, Marine Chemistry, 107, pp. 89–102, 2007.
- Tomiyasu, T., Matsuyama, A., Eguchi, T., Fuchigami, Y., Oki, K., Horvat, M., Rajar, R., Akagi, H., Spatial variation of mercury in sediment of Minamata Bay, Japan. Sci. Total Environ. (368), pp. 283–290, 2006.
- Uradni list RS, št. 28/2005, str. 2676, Pravilnik o določitvi odsekov površinskih voda, pomembnih za življenje sladkovodnih vrst rib.
- Povzeto po: <http://www.uradni-list.si/1/objava.jsp?urlid=200528&stevilka=983>, pridobljeno 26. 4. 2012.
- VGI-VGL, Ocenitev uporabe reke Save za odvajanje toplotne energije. Vodnogospodarski inštitut, Vodogradbeni laboratorij, Ljubljana, Poročilo, Naročnik: IB Elektroprojekt, Poročilo, 15 strani, 119 prilog, 1989.