

UZROCI I KARAKTERISTIKE STRUJANJA U PALIĆKOM JEZERU

Ljubomir BUDINSKI, Đula FABIAN

Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, Katedra za hidrotehniku i vodno inženjerstvo okoline

REZIME

U ovom radu su na primeru jezera Palić razmatrani faktori koji utiču na formiranje strujne slike: batimetrija, zamuljenost, dotok i isticanje iz jezera, *Coriolis*-ov efekat i vetrovi. Ispitivanje je sprovedeno pomoću numeričkog modela ravanskog strujanja u osnovi, koji koristi krivolinijske koordinate. Model sa otvorenim kodom (što je omogućilo njegovo prilagođavanje aktuelnim potrebama) u radu se pokazao pouzdanim i stabilnim. Za potrebe modelisanja snimljeno je aktuelno stanje korita u oko 600 tačaka. Podaci o vetrovima potiču sa hidrometeorološke stanice Palić na obali jezera.

Numerički opiti su pokazali da za navedene pokretačke sile maksimalne brzine dostižu $2,5 \text{ cm s}^{-1}$, pri čemu vetar daleko nadmašuje uticaj ostalih činilaca.

Ključne reči: jezero Palić, strujna slika, *Coriolis* efekat, vetar, batimetrija, numerički model

1. UVOD

Palićko jezero sa svojom okolinom proglašeno je za jedan od devet najistaknutijih potencijalnih turističkih destinacija u Srbiji. U skoroj prošlosti, 25. maja 2009. jezero je po drugi put doživelo ekološku katastrofu u roku od četiri decenije. Izrada odgovarajućeg projekta sanacije i održavanje vodnog tela u životu nakon njegovog ostvarenja¹ zahteva upoznavanje vitalnih procesa u jezeru, kao što su strujanje, pronos nanosa i hemikalija, toplotne i biološke promene, itd. [1].

Ovaj rad se fokusira na četvrti (turistički) sektor Palića sa ciljem da se stekne uvid u red veličine sila koje

pokreću strujanje u jezeru. Pored protoka kao stalne pokretačke sile, u ovom radu prikazan je uticaj *Coriolis*-ovog efekta, dominantnog severozapadnog vetra i zamuljenosti korita na strujnu sliku. Za sprovođenje analize formiran je model ustaljenog, ravanskog strujanja sa ukupno oko 16600 računskih tačaka, opisan detaljno u nastavku.

2. BATIMETRIJA ČETVRTOG SEKTORA JEZERA

Imajući u vidu da je poslednje podvodno snimanje batimetrije rađeno 1969. godine [2], tokom oktobra 2008. i septembra 2009. godine – postupkom opisanim u radu [3] – izvršeno je novo detaljno snimanje kako čvrstog, tako i muljnog korita u oko 600 mernih vertikalna. Podaci su obrađeni u GIS okruženju, čime se došlo do *TIN*-a (*Triangular Irregular Network*) zasebno za čvrsto i muljno korito, koji su dalje profinjani primenom *Natural Neighbor* interpolacije.

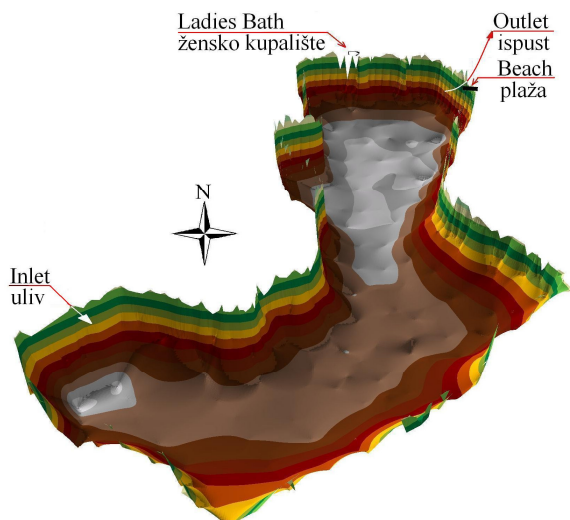
Tabela 1. Osnovni podaci korita turističkog sektora jezera Palić

Površina vodnog ogledala ² na koti 102 mm <i>Water surface area² at 102 msl</i>	364 ha
Prosečna dubina muljnog korita <i>Average depth of the mud bed</i>	1,60 m
Prosečna dubina čvrstog korita <i>Average depth of the hard bed</i>	1,95 m
Prosečna debljina muljne naslage ³ <i>Average thickness of mud³</i>	0,35 m
Ukupna zapremina mulja u vodom zasićenom stanju <i>Overall volume of saturated mud</i>	1 265 000 m ³

¹ Građevinski fakultet Subotica ne učestvuje u projektu sanacije jezera Palić.

² Ova površina ne obuhvata tršćani plićak na južnoj obali, tzv. "Veliko pojilište".

³ Mulj je neravnomerno raspoređen po čvrstom dnu.



Slika 1. Aksonometrijski prikaz čvrstog korita, odnosno dužine prema visini ≈ 200

Na osnovu sadašnjeg snimka batimetrije određeni su osnovni pokazatelji korita turističkog sektora jezera, tabela 1. Ovako dobijene podloge omogućuju izučavanje uticaja zamuljenosti korita na formiranje strujne slike.

3. NUMERIČKI MODEL STRUJANJA

3.1. Jednačine ravanskog strujanja

Za modeliranje strujanja u jezeru Palić korišten je dvodimenzionalni numerički model baziran na Reynolds–ovim jednačinama (RANS–Reynolds Averaged Navier Stokes) osrednjenim po dubini (pretpostavka o hidrostatičkom rasporedu pritiska po dubini). Sistem jednačina, koji uključuje jednačine održanja mase i količine kretanja (dinamička jednačina) osrednjene po dubini, se za pravce u horizontalnoj x, y ravni formuliše kao:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} - fv = \\ = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{\partial(hu''v'')}{\partial x} - \frac{\partial(hu''v'')}{\partial y} + \\ + \left(\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xx}) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yx}) \right) + \frac{1}{\rho} \tau_{sx} - \frac{1}{\rho} \tau_{ox} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + fu = \\ = -gh \frac{\partial z_s}{\partial y} - \frac{\partial(hu''v'')}{\partial x} - \frac{\partial(hv''^2)}{\partial y} + \\ + \left(\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xy}) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy}) \right) + \frac{1}{\rho} \tau_{sy} - \frac{1}{\rho} \tau_{oy} \end{aligned} \quad (3)$$

gde su: u, v – komponente brzina u kartezijanskim koordinatama duž pravaca x i y osrednjene po dubini, z_s – kota nivoa vode, h – dubina vode, $f = 1,05 \times 10^{-4}$ (rad s^{-1}) – Coriolis–ov koeficijent, ρ – gustina vode, g – gravitaciono ubrzanje, u'', v'' – odstupanja od osrednjenih vrednosti brzina.

Tangencijalni naponi usled molekularne i turbulentne difuzije, $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}, \tau_{yx}$, modelirani su koristeći pretpostavke Boussinesq–a o analogiji turbulentnih i viskozni napona [5]. Formulirani u tenzorskoj formi, ovi naponi imaju oblik:

$$\tau_{ji} = (v_m + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = x, y \quad (4)$$

gde su: v_m – koeficijent kinematske viskoznosti, a v_t – koeficijent turbulentne viskoznosti. Za razliku od ovih napona, naponi trenja na površini vodnog ogledala prouzrokovani vetrom τ_{xx}, τ_{yy} modelirani su korišćenjem empirijske zakonitosti napona i brzine [5]:

$$\tau_{sx} = C_{\tau s} \rho_a U_w \sqrt{U_w^2 + V_w^2}, \quad (5)$$

$$\tau_{sy} = C_{\tau s} \rho_a V_w \sqrt{U_w^2 + V_w^2}, \quad (6)$$

gde je $C_{\tau s}$ – empirijski koeficijent trenja, ρ_a – gustina vazduha ($1,2 \text{ kg m}^{-3}$), U_w, V_w – komponente brzine vetra u pravcima x, y na visini od 10 m. Ista zakonitost primenjena je i kod modeliranja napona trenja po koritu, τ_{ox}, τ_{oy} , gde je za koeficijent tanagencijalnog napona korišten Manning–ov izraz [5]:

$$\tau_{ox} = \rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3}, \quad (7)$$

$$\tau_{oy} = \rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3}, \quad (8)$$

gde je n – Manning–ov koeficijent hrapavosti dna.

3.2. Transformacija jednačina ravanskog strujanja u krivolinjski koordinatni sistem

Kako je za potrebe definisanja računске oblasti složenih geometrijskih karakteristika (prirodna morfologija) kartezijanski x, y domen izuzetno neprikladan i zahtevan

(pokrivanje oblasti od interesa pravougaonom računskom mrežom, definisanje graničnih uslova), dobijeni sistem jednačina (izrazi 1, 2 i 3) transformisan je u krivolinijski koordinatni sistem koristeći postupak kompletne transformacije⁴. Na ovaj način formirani pravci krivolinijske mreže nemaju ograničenje ortogonalnosti (dozvoljena je potpuna deformacija računске ćelije), a računska ćelija ne mora biti isključivo četvorougona. Prednost ovakvog izbora računске mreže je bolje prilagođavanje računskog domena geometriji vodnog tela, uz mogućnost dodatnog proglašćavanja mreže u oblastima od posebnog interesa, dok sam izbor tipa mreže zavisi od numeričke metode koja se primenjuje. Obzirom da je postupak transformacije, kao i dobijen sistem transformisanih jednačina veoma obiman, i da kao takav izlazi iz okvira predmeta ovog rada, čitatelj se za detaljnije informacije u vezi sa ovim postupkom upućuje na radove⁴ [6].

3.3. Numeričko rešavanje jednačina ravanskog toka

U cilju formiranja što stabilnijeg, tačnijeg i robustnijeg numeričkog modela, koji je u stanju da odgovori na veoma zahtevne uslove tečenja sa što većom tačnošću, jednačine ravanskog toka transformisane u krivolinijski koordinatni sistem rešavane su primenom postupka etapnog rešavanja (*fractional step method*), [4], [5], [6]. Osnovna prednost i razlog primene ovog postupka ogleda se u mogućnosti raščlanjivanja dobijenog sistema jednačina (metoda superpozicije lokalne promene količine kretanja) na pojedine, matematički zasebne članove, advekciju, difuziju i propagaciju, koji se zatim kao takvi rešavaju numeričkim metodama koje najbolje odgovaraju njihovom matematičkom karakteru. Stečena korist od primene ovakvog postupka je dvostruka. Kao prvo, kako se svaki član dinamičke jednačine rešava zasebno, numerička stabilnost i tačnost kompletnog modela ravanskog strujanja podiže se na znatno višji nivo nego što je to slučaj sa konvencionalnim metodama koje su najčešće u primeni. U tom svetlu advekcija je kao najproblematičniji član sa numeričkog stanovišta rešavana metodom karakteristika⁴ [4], [5], dok su članovi difuzije i propagacije (objedinjuje jednačinu kontinuiteta i članove pritiska, *Coriolis*-ove sile, težine i smičućih napona na podlozi i površini vodnog ogledala) rešavani implicitnom metodom konačnih razlika sa primenom *Thomas*-ovog (*double-sweep*) algoritma i *ADI* metode⁴,

[7], [8]. Na ovaj način model omogućava simuliranje veoma zahtevnih i složenih uslova strujanja (oštra čela, nagle promene u hidrauličkim uslovima razmatranog toka), koji se kao takvi mogu javiti u oblastima kompleksne geometrije prirodnih vodnih tela. Sa druge strane, pristup metode etapnog rešavanja je veoma pogodan i sa računskog stanovišta. Kako se navedeni članovi zasebno modeliraju i rešavaju, to je u okviru računskog postupka moguće njihovo selektivno aktiviranje ili isključivanje u zavisnosti od razmatranog slučaja. Naime, ukoliko su, na primer, u struji koja se modelira, dominantne inercijalne sile i sile pritiska, moguće je u modelu namenski isključiti član difuzije i time povećati efikasnost modela, i skratiti potrebno vreme za simulaciju. Na ovaj način formirani numerički model ne samo da podiže efikasnost proračuna, već i sa velikim stepenom verodostojnosti i tačnosti matematički opisuje karakter razmatranog toka. Pored opisanog hidrodinamičkog modula, numerički model sadrži proceduru za modeliranje dinamički promenljive granice strujanja (sušenje i kvašenje priobalnog područja), kao i za simulaciju transporta suspendovanog i vučenog nanosa, i deformacije korita vodnog tela kao posledice⁴.

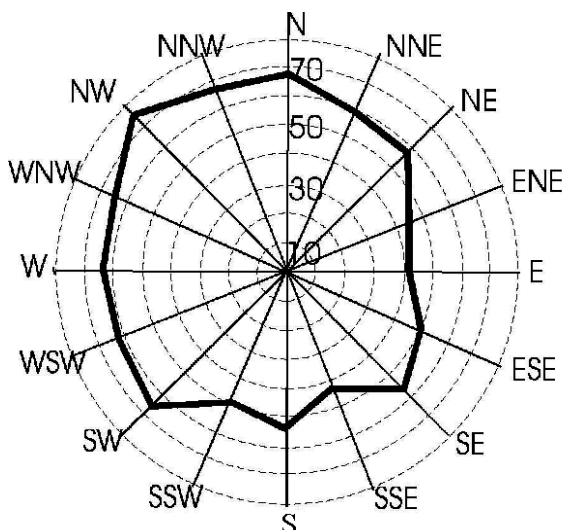
4. GRANIČNI USLOVI

Osnovno strujanje u četvrtom sektoru jezera izazivaju dominantni elementi vodnog bilansa, koji su jedini stalan uzrok strujanja: dotok prečišćene otpadne vode iz prethodnog (trećeg) sektora na jugozapadnom kraju, i ispuštanje jezerske vode prema Krvavom jezeru na severoistočnom kraju četvrtog sektora. Uprkos činjenici da (stari) prečistač funkcioniše već više od 30 godina, proticaji se još uvek ne mere. Procenjeno je da se prosečan protok kreće oko 30000 m³ dan⁻¹, i isti je prihvaćen kao granični uslov na ulivu i izlivu turističkog sektora.

U slučaju "stajaćih" voda neophodno je proveriti uticaj *Coriolis*-ovog efekta na strujanje. Izazvan rotacijom Zemlje, ovaj efekat takođe predstavlja stalno dejstvo. Kod nekih jezera znatno utiče na strujanje, na primer u slučaju jezera *Esthwaite Water (Lake District National Park, England)*, površina jezera 1,1 km², prosečna dubina 6,4 m [9]. *Coriolis*-ov efekat je obuhvaćen modelom Palića i proveren je njegov uticaj na strujnu sliku.

⁴ Budinski, Lj., *Matematičko modeliranje ravanskih (osrednjenih po dubini) jednačina strujanja vode, transporta nanosa i morfoloških promena u prirodnim aluvijalnim vodotocima*, Građevinski fakultet Subotica, Doktorska disertacija – radna verzija

Vetrovi predstavljaju povremen, privremen uticaj. Na Paliću, prosečna brzina vetra kreće se od 2,0 do 3,0 m s^{-1} . Dominantan je severozapadni vetar (slika 2), čiji je uticaj na strujnu sliku takođe proveren.



Slika 2. Ruža vetrova sa hidrometeorološke stanice Palić

Pored navedenih graničnih uslova, prethodno opisan numerički model zahteva definisanje određenih kalibracionih parametara. U ovu grupu parametara spadaju Manning-ov koeficijent trenja korita n , koeficijent turbulentne viskoznosti ν_t i koeficijent trenja vetra C_w . Izvršena je analiza osetljivosti strujne slike na Manning-ov koeficijent hrapavosti u opsegu $n = 0,012 \div 0,038 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$. Sprovedene simulacije su pokazale da se smerovi i intenziteti vektora brzina znatnije menjaju u oblasti $n = 0,012 \div 0,026 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$. Pri definisanju hidrodinamičkog modela za Manning-ov koeficijent trenja usvojena je vrednost $n = 0,03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$. U budućnosti se planira kalibracija ovog parametra putem merenja.

Paralelno sa proverom osetljivosti modela na koeficijent trenja, vršena je analiza osetljivosti na koeficijent turbulentne viskoznosti. U tom pogledu ispitan je opseg od $\nu_t = 0 \div 0,100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Sprovedene simulacije su pokazale slabu osetljivost struje na koeficijent turbulentne viskoznosti u oblasti $\nu_t = 0 \div 0,010 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Daljim povećanjem ovog koeficijenta do vrednosti $0,100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, dolazi do potpunog iščezavanja vrtloga. Shodno tome, za koeficijent turbulentne viskoznosti

usvojena je srednja vrednost neosteljivog opsega, $\nu_t = 0,005 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

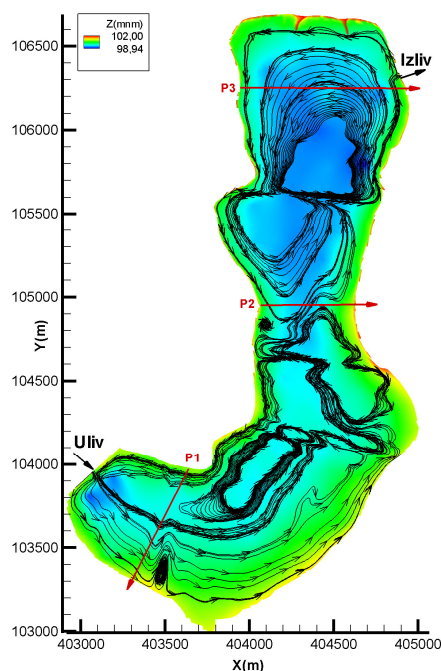
Vrednost koeficijenta trenja vetra $C_w = 0,001$ procenjen je na osnovu [10].

5. REZULTATI

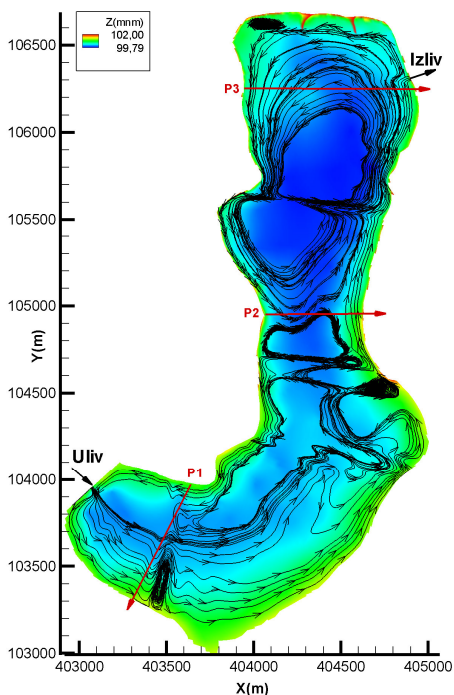
5.1. Osnovno strujanje

Jedini stalan uzrok strujanja u turističkom sektoru je doticaj (prosečnog intenziteta $30000 \text{ m}^3 \text{ dan}^{-1}$) prečišćene otpadne vode iz trećeg sektora na jugoistočnom kraju, i ispuštanje vode na severoistočnom kraju turističkog sektora. Ova pokretačka sila kako u čvrstom, tako i u muljnom koritu izaziva sporo strujanje sa brzinama reda veličine od nekoliko desetine milimetra u sekundi, slika 3 i slika 4.

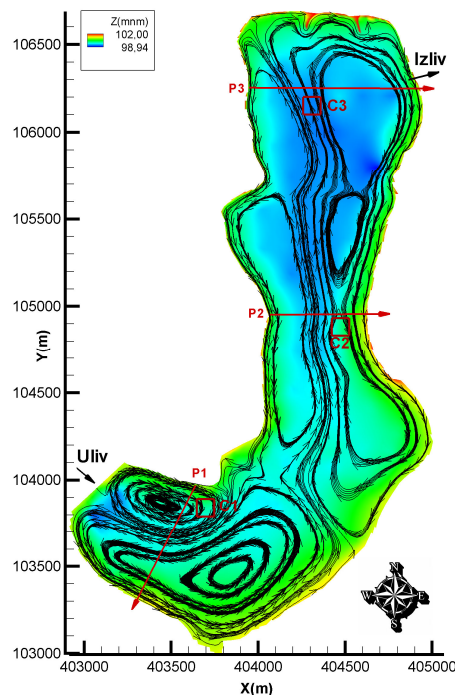
Iste slike ukazuju i na uticaj zamuljenosti na strujnu sliku. U osnovi gledano u severnom delu jezera, između preseka P2 i P3, nema znatne razlike u strujnoj slici čvrstog i muljnog korita, koju karakterišu dva velika odvojena vrtloga. Razlike su značajne na srednjem delu korita između preseka P1 i P2, dok je strujna slika uzvodno od preseka P1 – pod snažnim dejstvom koncentrisanog upuštanja vode – skoro identična u oba korita.



Slika 3. Strujna slika (čvrsto dno + dotok sa prečištača + Coriolis-ov efekat)



Slika 4. Strujna slika (muljno korito + dotok sa prečištača + *Coriolis*-ov efekat)



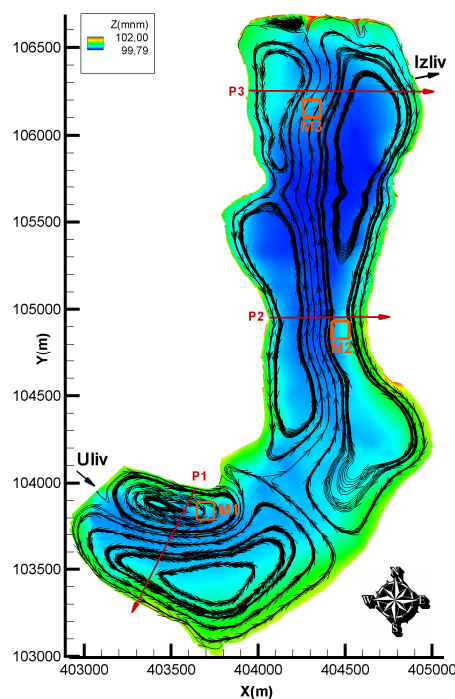
Slika 5. Strujna slika (čvrsto dno + dotok sa prečištača + *Coriolis*-ov efekat + severozapadni vetar $v_{10m}=3\text{ m s}^{-1}$)

5.2. Dejtvo vetra

Kako se osnovno strujanje može pojaviti isključivo u dužim periodima zatišja vetra, verovatnoća njegove izolovane pojave je mala. Da bi se stekao uvid u dejstvo vetra na strujnu sliku, u ovom radu je odabran dominantni severozapadni vetar (duva u jugoistočnom smeru), intenziteta $v_{10m}=3,0\text{ m s}^{-1}$.

Za karakteristike odabranog vetra utvrđena je ustaljena strujna slika jezera – opet zasebno za čvrsto i muljno korito – sa rezultatom na slikama 5 i 6.

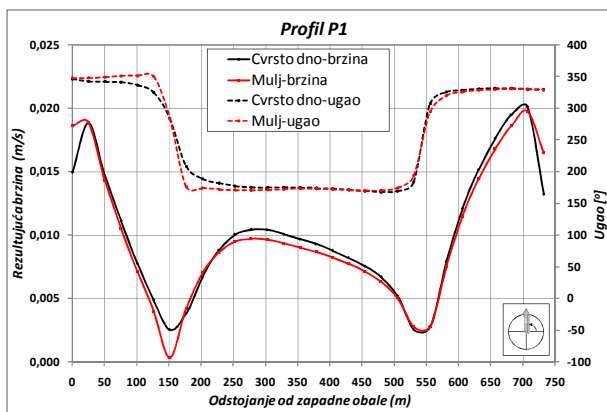
Upoređenjem slika 5 i 6 sa slikama 3 i 4 zaključuje se da je razlika u strujnoj slici bez vetra i sa vetrom značajna. U pogledu formiranja dominantnih vrtloga, jezero se deli na dve oblasti. U severnom i srednjem delu jezera pod dejstvom vetra (i korita) veliki vrtlozi su izduženi u pravcu sever–jug, približno u pravcu dejstva vetra. U ovoj oblasti u priobalnim šavovima strujanje se odvija u smeru vetra, dok se po sredini jezera formira koridor sa suprotnim smerom strujanja. U jugozapadnoj oblasti indukovana su dva dominantna vrtloga.



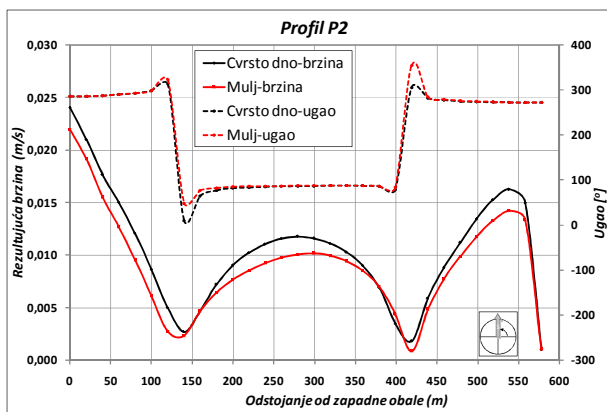
Slika 6. Strujna slika (muljno korito + dotok sa prečištača + *Coriolis*-ov efekat + severozapadni vetar $v_{10m}=3\text{ m s}^{-1}$)

Upoređenjem slike 5 sa slikom 6 može se dodatno zaključiti da strujne slike čvrstog i muljnog korita i pod dominantnim dejstvom vetra pokazuju razlike, pogotovo u severnom delu korita: u dubljem, čvrstom koritu struja izraženije prati pravac vetra, tj. u plićem jezeru sa muljnim koritom više se oseća uticaj konture. Isto opažanje je potvrđeno upoređenjem rezultujućih brzina i njihovih pravaca u presecima P1, P2 i P3, slike 7, 8 i 9. U pogledu brzina između strujne slike čvrstog i muljnog korita najveće razlike se javljaju u preseku P3 na severnom delu jezera. Na nekim mestima razlike u brzinama dostižu čak 100%.

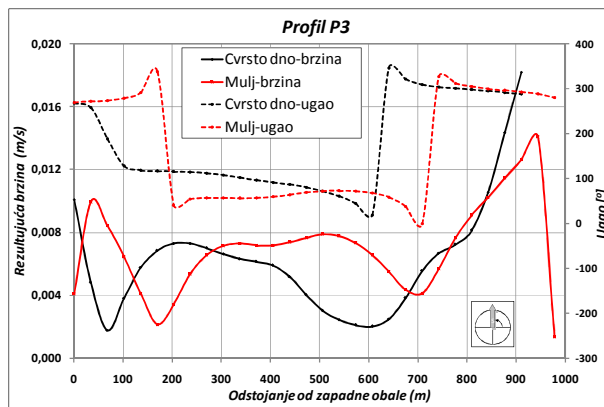
Uticaj vetra na intenzitet strujanja daleko nadmašuje uticaj osnovnog strujanja. Brzine izazvane vetrom skoro su za dva reda veličine veće od brzina usled osnovne struje.



Slika 7. Upoređenje rezultujućih brzina u preseku P1 za čvrsto i muljno korito (dotok sa prečistača + Coriolis-ov efekat + severozapadni vetar $v_{10m}=3m\ s^{-1}$)



Slika 8. Upoređenje rezultujućih brzina u preseku P2 za čvrsto i muljno korito (dotok sa prečistača + Coriolis-ov efekat + severozapadni vetar $v_{10m}=3m\ s^{-1}$)



Slika 9. Upoređenje rezultujućih brzina u preseku P3 za čvrsto i muljno korito (dotok sa prečistača + Coriolis-ov efekat + severozapadni vetar $v_{10m}=3m\ s^{-1}$)

5.3. Coriolis-ov efekat

Coriolis-ov efekat izazvan rotacijom Zemlje, u numeričkom modelu je obuhvaćen fiktivnom silom u jednačinama (2) i (3). Coriolis-ov parametar zavisi od ugaone brzine rotacije Zemlje (Ω) i geografske širine (φ) lokacije vodnog tela, za Palić iznosi:

$$f = 2 \Omega \sin \varphi = 1,05 \times 10^{-4} \text{ rad/s} \quad (9)$$

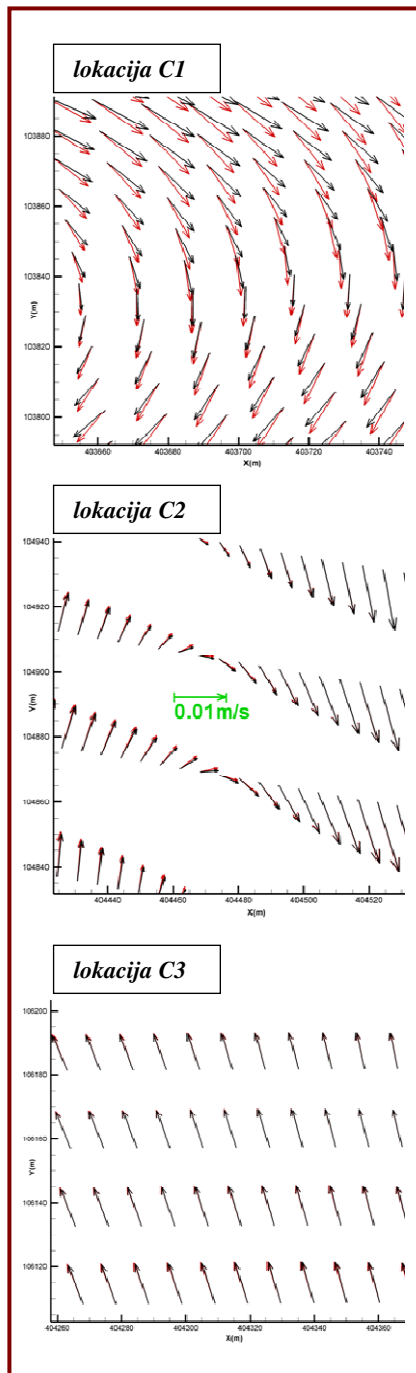
Za ocenu Coriolis-ovog efekta na strujanje često se koristi Ekman-ov broj (odnos viskoznih i Coriolis-ovih sila) i Rossby-jev broj (odnos inercijalnih i Coriolis-ovih sila):

$$Ek = \frac{v_i}{f L^2}, \quad Ro = \frac{u}{f L} \quad (10)$$

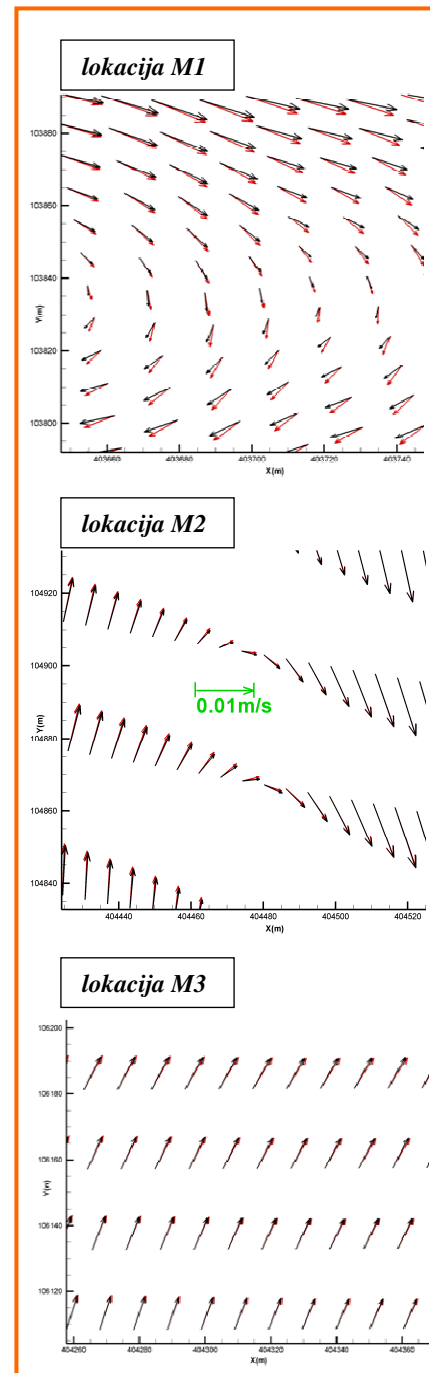
U slučaju Palića, za usvojenu turbulentnu viskoznost od $\nu_t=0,005\ m^2\ s^{-1}$, karakterističnu dužinu (u ovom slučaju to je minimalna širina jezera, $L= 612\ m$), i karakterističnu brzinu $u=0,02\ ms^{-1}$, $Ek= 0,00013$, $Ro= 0,31$. Manje vrednosti pomenutih brojeva znače jači uticaj Coriolis-ovog efekta na strujanje, i obrnuto. Ovde deklarirane vrednosti mogu da se protumače isključivo u upoređenju sa vrednostima sa drugih jezera. U nedostatku istih, za ocenu Coriolis-ovog efekta na strujanje pristupilo se na sledeći način: preklapljeni su strujne slike celog četvrtog sektora jezera za identične uslove, dobijene sa i bez Coriolis-ove sile. Makroskopske razlike na nivou velikih vrtloga nisu primećene, pa je uočena lokacija u blizini preseka P1 (prikazana na slikama 5 i 6) sa najvećim razlikama u lokalnoj strujnoj slici (C1 u čvrstom koritu, odnosno M1 u muljnom koritu). Upoređenja radi, izdvojene su još

dve dodatne lokacije sa prosečnim dejstvom *Coriolis*-ovih sila (C2, C3, odnosno M2, M3) i prikazane su uvećano zasebnom slikom za čvrsto korito (C1, C2 i C3 na slici 10), i muljno korito (M1, M2 i M3 na slici 11).

Veličina izdvojenih oblasti je oko 1 ha. Vektori brzine crne boje su bez, a vektori crvene boje su sa *Coriolis*-ovim efektom.



Slika 10. Uticaj *Coriolis*-ovog efekta na strujnu sliku u čvrstom koritu (strujna slika na lokacijama C1, C2 i C3)



Slika 11. Uticaj *Coriolis*-ovog efekta na strujnu sliku u muljnom koritu (strujna slika na lokacijama M1, M2 i M3)

U slučaju Palića *Coriolis*-ov efektat je najveću lokalnu razliku izazvao na lokaciji C1 (slika 10) odnosno M1 (slika 11), u intenzitetu brzine strujanja do oko 20%, a u pravcu strujanja do oko 30°. Na ostalim lokacijama (C2, C3, M2, M3) razlike su skoro neuočljive.

6. ZAKLJUČCI

U ovom radu je posredstvom numeričkog modela strujanja ispitivan uticaj konfiguracije i zamuljenosti korita, prihranjivanja prečišćenom otpadnom vodom, dejstva vetra i *Coriolis*-ovog efekta na strujnu sliku turističkog sektora jezera Palić. Numerički opiti su pokazali da svaki od nabrojanih elemenata ima primetan uticaj, međutim, vetar daleko nadmašuje ostale.

Izložen numerički model pokazao se pouzdanim i stabilnim alatom za sprovođenje analize ove vrste, pri čemu se pokazalo posebno korisnim što je programski kod otvorenog tipa, pa se u zavisnosti od aktuelnih potreba može dopunjavati dodatnim procedurama.

LITERATURA

- [1] E. Lytras, *Developing models for lake management*, Elsevier, Desalination, 213 (2007) 129-134
- [2] L. Hovanj, *Merenje debljine i nivoa mulja Palićkog i Krvavog jezera*, Zbornik radova Građevinskog fakulteta, broj 17, Građevinski fakultet Subotica, 2008.
- [3] Lj. Budinski, Đ. Fabian, O. Gabrić, *Snimanje i prikaz batimetrije vodnih tela*, Voda i sanitarna tehnika, Časopis udruženja za tehnologiju vode i sanitarno inženjerstvo – Beograd, XXXIX (5) 15-22 (2009)
- [4] Benque, J.P., Hauguel, A., and Violet, P.L., *Numerical Models in Enviromental Fluid Mechanics*, Engineering Applications of Computational Hydraulics, Vol. II, Pitman Publishing Inc., 1982
- [5] Jovanović, M., *Osnove numeričkog modeliranja ravanskih otvorenih tokova*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1998.
- [6] Budinski, Lj., Spasojević, M., *Modeliranje ravanskog strujanja metodom etapnog rešavanja članova jednačine*, Vodoprivreda, Januar-Jun, p. 23-30. 2007.
- [7] Carnahan, B., Luther, H.A., and Wilkes, J.O., *Applied Numerical Methods*, J. Wiley and Sons, 1969
- [8] Ferziger, J.H. and Peric, M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd Edition, Springer, New York, 2002
- [9] M. B. Koçyigit, R. A. Falconer, *Three-dimensional numerical modelling of wind-driven circulation in a homogeneous lake*, Elsevier, Advances in Water Resources 27 (2004) 1167–1178
- [10] Milivoj Kuzmić, Mirko Orlić, *Predicting the currents in the Northern Adriatic and the problem of ill-defined wind forcing*, Geofizika, Vol 4, p. 137-145, 1987

DRIVING FORCES AND CHARACTERISTICS OF CURRENTS IN THE PALIC LAKE

by

Ljubomir BUDINSKI and Dula FABIAN
University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica,
Dept. of Hydraulic, Water Resources and Environmental Engineering,
Kozaracka 2/a, 24000 Subotica

Summary

Through the case of the Palic Lake, this paper investigates the basic elements in developing the flow pattern in shallow lakes: bathymetry, mud cover, inflow and outflow, Coriolis effect and winds. The study was carried out by means of a two dimensional numerical model (in horizontal plane) with a curvilinear coordinate system. The applied model, having unsealed code is adaptable to actual demands and has functioned in reliable and stable manner. For the sake of modeling the actual bathymetry of the lake has been surveyed in approximately 600 locations. Wind data were obtained

from the meteorological station located on the shore of the Palic Lake.

The numerical experiments have shown that for the listed driving forces the maximum velocities reach 2.5 cm s^{-1} , while wind action overpowers the influence of all other factors.

Key words: Lake Palic, flow pattern, Coriolis effect, wind, bathymetry, numerical model

Redigovano 10.11.2010.