



Določitev hitrostnega polja toka na območju vtočnega objekta z vizualizacijsko metodo

G. Novak¹, T. Bajcar² in P. Rodič³

Determination of velocity field around intake using visualization method

Povzetek. Vtočni objekt elektrarne je bil optimiziran na podlagi rezultatov fizičnega hidravličnega modela. Pred leti zaključena raziskava Inštituta za hidravlične raziskave je bila na podlagi tedanjih posnetkov pretočnih razmer, ki so tedaj zadoščali za potrebe kvalitativne analize, nadgrajena s podrobnejšo kvantifikacijo hitrostnega polja. To je bilo doseženo z uporabo računalniško podprte vizualizacijske metode. Kvantifikacija hitrostnega polja je bila verificirana z obstoječimi meritvami lokalnih hitrosti, izvedenimi z 2d ADV sondo. Omenjena metoda je bila v nadaljevanju uporabljena za določitev hitrostnega polja na pragu vtočnega objekta, v vtočnem tunelu in z določenimi omejitvami tudi v primeru analize premeščanja modelnih rinjenih plavin - vse to pa predstavlja izrazito nadgradnjo izhodiščne modelne raziskave.

Abstract. In 2006 hydraulic river model with movable bed was employed for the optimisation of the power plant intake structure. During that research some ADV velocity profiles were measured and various films showing dye and model sand propagation were recorded as well. At that time those films allowed qualitative analysis of hydraulic conditions. Those results were recently upgraded by application of computer-aided visualization method for quantification of flow kinematics. The existing ADV measurements were used for the verification of velocity fields. The non-invasive visualization method allowed quantification of flow around intake piers and in the intake tunnel. Moreover, kinematics of movable bed was investigated to certain degree. All that was accomplished using old films and therefore represents considerable enhancement of model results.

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

³ Inštitut za hidravlične raziskave, Ljubljana

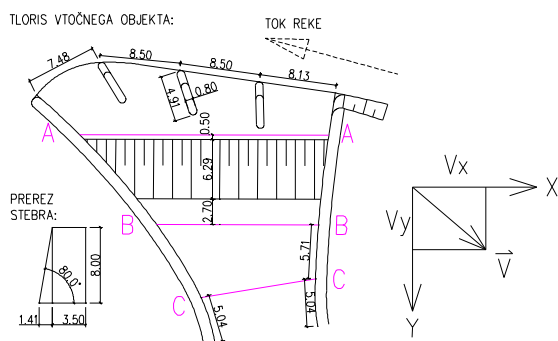
1 Uvod

Prispevek je nadgradnja hidravlične modelne raziskave vtočnega objekta hidroelektrarne, ki je bila leta 2006 izvedena na Inštitutu za hidravlične raziskave. Za potrebe optimiziranja hidravličnih razmer vtoka je bil tedaj na podlagi terenskih meritev in enodimenzijskega matematičnega modela za račun nivojev gladin [1] zgrajen fizični hidravlični model zajetja (usmerjevalni stebri, prag, plato in tunel) ter pripadajočega odseka struge v enotnem geometrijskem merilu 1:28 (Slika 1). Upoštevan je bil Froudov kriterij modelne podobnosti. Razmerje dolžin med naravo in modelom $\lambda = L_{\text{narava}} / L_{\text{model}} = 28$ je bilo izbrano na podlagi ciljev raziskave, zahtev podobnosti in kapacitet laboratorija. Na osnovi števila λ se izpelje merila še za ostale veličine [2], med pomembnejšimi sta razmerje hitrosti $\lambda_v = \lambda^{1/2} = 5,29$ in razmerje pretokov $\lambda_Q = \lambda^{5/2} = 4148,5$.



Slika 1: Fizični hidravlični model vtočnega objekta. Na tlorisnem posnetku (desno) so ob stebrih vidne tudi nitke za boljše ponazoritev pretočnih razmer ob dnu modela

Na fizičnem modelu so bile analizirane hidravlične razmere za različne režime obratovanja elektrarne in različne hidravlične robne pogoje vodotoka (predvsem dotok in kota spodnje vode). Izmerjeni so bili nivoji gladin in v določeni meri tudi kote modelnega prodnega dna.



Slika 2: Tloris vtočnega objekta in prerez stebrov (v metrih za naravo) ter profili, vzdolž katerih so bile izmerjene hitrosti (2d ADV sonda)

Na območju zajetja so bile z akustično sondo (ADV = Acoustic Doppler Velocimetry) izmerjene povprečne lokalne hitrosti v dveh pravokotnih smereh (V_x in V_y) v različnih točkah vzdolž treh profilov (A,B in C), prikazanih na sliki 2.

Precejšen del končnih ugotovitev fizične modelne raziskave je slonel na kvalitativnem opazovanju tokovnih struktur, ki jih je razkrilo dodajanje barvila (raztopina kalijevega permanganata, tj. hipermangan). Nekaj značilnih rezultatov premikanja barvila, o katerih bo govora v nadaljevanju, je prikazanih na sliki 3:



Slika 3: Posnetki barvila na različnih pretočnih poljih modelnega vtoka

Da bi iz kvalitativne prešli na kvantitativno analizo, so bili tako pridobljeni posnetki z (medtem že dolgo porušenega) modela izhodišče za aplikacijo vizualizacijske metode. Metoda temelji na predpostavki, da je kinematika barvila zajeta v advekcijskem zakonu, ki povezuje konvektivne in difuzivne mehanizme transporta polutanta (barvila) v osnovni vodni tok:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(Nv_i)}{\partial x_i} = D\nabla^2 N \quad (1)$$

kjer so: N koncentracija polutanta, v_i komponente hitrosti in D molekularna difuzivnost.

Z uvajanjem časovno variabilne matrike, ki popisuje topološko strukturo skalarnega polja koncentracije polutanta, v nelinearno advekcijsko parcialno diferencialno enačbo drugega reda se matematični zapis advekcijske enačbe zreducira v enostavnejšo obliko, ki je numerično rešljiva. Rešitev enačbe je dvodimenzionalno hitrostno polje, s čimer se izvede prehod od polja koncentracij k polju hitrosti. Koncentracijo polutanta je možno opredeliti z odtenki sivine posameznih črno-belih slik filma, torej $A \propto N$, kjer je A povprečna vrednost sivine v izbranem oknu pikslov črno-bele slike. Teoretične osnove metode podrobneje opisuje Bajcar. [3]

Poudariti velja, da v času nastanka originalnih modelnih posnetkov seveda ni bilo predvideno, da bodo služili (kasnejši) kvantifikaciji, temveč le tedanji kvalitativni ponazoritvi tokovnih razmer. Filmi so bili zato posneti z nekoliko različnih pozicij, na odprti ploščadi, pri naravni svetlobi, večinoma zajemajo tudi sence in odseve gladine. Vse to je do določene mere omejilo izbor primernih posnetkov, oz. na njih zajetih obarvanih območjih.

Kljub temu je bilo možno izvesti primerjavo z meritvami ADV v dovolj velikem številu točk. Na podlagi tako uspešne verifikacije je bila metoda v nadaljevanju uporabljena še za določitev hitrostnih polj, ki na fizičnem modelu niso bila kvantificirana.

2 Metodologija

Na podlagi razpoložljivih filmov in ADV meritev (oboje iz leta 2006) je bil kot najprimernejši izbran nabor filmov, ki prikazujejo hidravlične razmere pri nizkem rečnem pretoku in maksimalni količini zajema preko vtočnega objekta. Glavnina analiz z vizualizacijsko metodo je bila izvedena na filmih, ki jih prikazuje slika 3. Iz nje je razvidno, da so posnetki različno zasukani glede na koordinatni sistem, uporabljen v vizualizacijski metodi, kjer je izhodišče v zgornjem levem vogalu, +x smer horizontalna, +y pa v smeri proti spodnjemu levemu vogalu. Za samo numerično analizo posnetkov oz. rezultirajočih vektorjev hitrosti to sicer ne predstavlja ovire, je pa za medsebojno primerjavo potrebno rezultate ADV meritev izraziti v ustrezno zasukanem koordinatnem sistemu. Zasuk posnetkov α se lahko določi iz naklona originalno horizontalne osi, npr. poveznice modelnih stebrov, in znaša za različne posnetke od 9,5 do 23,4 kotnih stopinj.

S sondo ADV izmerjeni vektor hitrosti $V = (X_{ADV}, Y_{ADV})$ izrazimo v koordinatnem sistemu vizualizacijske metode (X_{VIZ}, Y_{VIZ}) , zasukanem za kot α , po naslednjih dveh enačbah:

$$X_{VIZ} = X_{ADV} \cos \alpha - Y_{ADV} \sin \alpha \quad \text{in} \quad Y_{VIZ} = Y_{ADV} \cos \alpha + X_{ADV} \sin \alpha.$$

V splošnem je postopek določitve hitrostnega polja z vizualizacijsko metodo sledeč:

(1) Izbira primernega filma obravnavanih tekočinskih razmer: po možnosti minimalni odsev gladine in čim manj senc ter maksimalni kontrast barvila. (2) Pretvorba barvnega filma v posamezne posnetke (npr. s programsko opremo Bink - RAD Video Tools). (3) Pretvorba posameznih barvnih slik v posamezne črno-bele posnetke (z uporabo posebnega Matlab skripta). (4) Izbira nastavitvev in analiza s programom vizualizacijske metode.

Program uporabniku omogoča nastavljanje številnih parametrov, ki zajemajo numeriko izračuna, dimenzije opazovanega območja, čas med posnetki in difuzivnost barvila. Pri analizi posnetkov s fizičnega modela vtoka so bile uporabljene naslednje nastavitve (če se omejimo le na nekatere najosnovnejše in izvezamo numeriko): frekvenca znaša 30 posnetkov na sekundo, 1 piksel pomeni 0,001905 m na modelu, koeficient difuzivnosti barvila (podatek za hiperangan) znaša $4 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$. [4]

3 Rezultati

3.1 Hidravlične razmere na območju vtoka – rezultati fizičnega modela

Pri nizkem rečnem pretoku in maksimalni količini zajema preko vtočnega objekta je vtekanje preko praga enakomerno porazdeljeno skozi vsa pretočna polja. Za stebri se do tretjine širine polja pojavlja zastojna cona. V danih hidravličnih razmerah na modelu ni bilo opaziti prodnih premikov.

Lokalne povprečne hitrosti so bile izmerjene z 2d ADV sondo na različnih globinah vzdolž treh profilov (Slika 4). Razporeditev hitrosti na pragu za stebri (profil A-A) je pričakovana glede na kvalitativno opazovanje na modelu. Opazna so štiri področja z večjimi hitrostmi, ki so odraz vtekanja vode ob stebrih oz. ob dolvodni steni. Od profila B-B se do profila A-A področje enakomernih hitrosti širi. Delna neenakomernost hitrosti se v teh profilih kaže

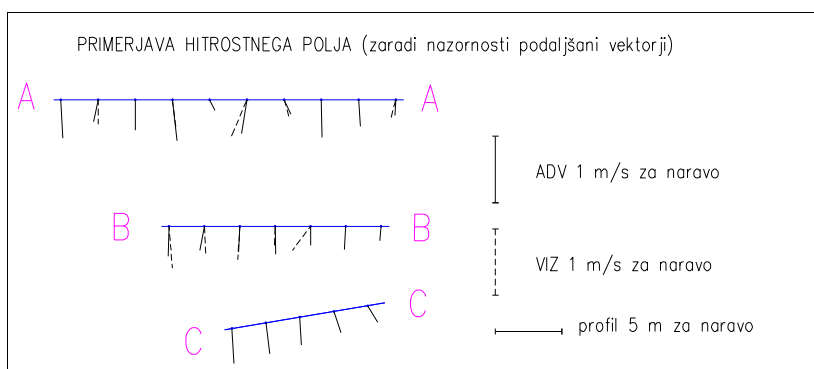
predvsem na gorvodni strani kanala (v grafikonih na desni), kjer so bile izmerjene manjše hitrosti. Z zoževanjem kanala proti vtočnemu tunelu se hitrosti povečujejo.

3.2 Primerjava ADV meritev in rezultatov vizualizacijske metode

Glede na razpoložljive posnetke so bile v primerjavo lokalnih povprečnih hitrosti zajete samo meritve na gladini. Vrednosti ADV na dani lokaciji so povprečne hitrosti tako v krajevnem (merilni volumen sonde) kot časovnem smislu (časovni interval merjenja). To je bilo pri analizi z vizualizacijsko metodo upoštevano z izbiro velikosti opazovanega okna in številom slik, ki se uporabijo v sistemu enačb.

Iz primerjave rezultatov na sliki 4 je razvidno, da je ujemanje vektorjev hitrosti večinoma zadovoljivo. To potrjuje tudi v nadaljevanju podan tabelarični pregled vrednosti. Za profil C-C ni bilo uporabnih posnetkov, ker tega območja filmi sploh niso zajeli.

Zaradi nazornosti so vektorji hitrosti na sliki 4 prikazani brez puščic in v drugačnem merilu kot tloris merskih profilov.



Slika 4: Primerjava meritev ADV in rezultatov vizualizacijske metode (oznaka VIZ)

Rezultati primerjave so v nadaljevanju predstavljeni še tabelarično:

Tabela 1: Lokalne povprečne hitrosti – primerjava ADV in VIZ: profil A-A [m/s za naravo]

	točka	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A-A	lokacija	0,56	3,36	6,16	8,96	11,76	14,56	17,36	20,16	22,96	25,76
ADV	X ADV	0,26	0,07	0,14	0,26	0,11	0,01	0,14	0,10	0,10	0,03
	Y ADV	0,52	0,33	0,44	0,57	0,14	0,52	0,20	0,56	0,39	0,24
	X VIZ	0,03	-0,07	0,00	0,07	0,08	-0,08	0,10	0,01	0,03	-0,01
	Y VIZ	0,58	0,33	0,46	0,62	0,16	0,51	0,22	0,57	0,40	0,24
VIZ	Vx		0,00		0,05		-0,23	0,07			-0,07
	Vy		0,37		0,41		0,55	0,25			0,27
$\Delta[\%]$ za Vy			11		-33		8	13			13

Tabela 2: Lokalne povprečne hitrosti – primerjava ADV in VIZ: profil B-B [m/s za naravo]

	točka	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
B-B	lokacija	0,56	3,22	5,88	8,54	11,20	13,86	16,52
ADV	Vx	0,17	0,04	0,05	0,08	0,05	0,04	0,02
	Vy	0,42	0,36	0,39	0,41	0,29	0,35	0,22
	X VIZ	-0,01	-0,07	-0,02	0,01	0,00	-0,02	-0,02
	Y VIZ	0,45	0,36	0,39	0,42	0,29	0,35	0,22
VIZ	Vx	0,05	0,02	-0,03	-0,01	-0,27		
	Vy	0,63	0,41	0,50	0,29	0,36		
$\Delta[\%]$ za Vy		39	16	28	-30	23		

Iz slike 4 in obeh zgornjih tabel je razvidno, da pri vektorjih hitrosti po pričakovanih izrazito prevladuje komponenta hitrosti v smeri Y, tj. v smeri proti tunelu vtoka, medtem ko so pri ADV rezultatih vse komponente Vx znotraj intervala od -0,1 do +0,1 m/s za naravo. Ker so komponente Vx blizu ničle, so relativne razlike med rezultati ADV in VIZ za Vx seveda visoke tudi ob majhnih absolutnih odstopanjih, zato so za ovrednotenje metode primernejše relativne razlike rezultatov za Vy. Navedene so na obeh zgornjih tabelah. Za dani primer se izkaže, da so hitrosti VIZ v profilu A-A z izjemo ene točke za dobrih 10% večje (relativna razlika s pozitivnim predznakom) od vrednosti ADV. V profilu B-B, kjer je koncentracija barvila na posnetkih že manjša, se relativne razlike povečajo, največ (do 39 %) v točki ob dolvodni steni, pri čemer vrednosti VIZ večinoma ostajajo večje od primerjanih rezultatov ADV meritev.

Razlike rezultatov lahko pripišemo dejstvu, da analizirani posnetki že v izhodišču niso bili prilagojeni kvantifikaciji z vizualizacijsko metodo; nastopali so moteči faktorji snemanja, kot so neprimerna osvetlitev, nezaželen prisotnost senc in prevelik odsev vzvalovane gladine. Manjši delež k skupni razliki doprinese tudi ADV sonda, ki ima deklarirano točnost $\pm 1\%$ izbranega merilnega območja hitrosti (t.i. velocity range je lahko 3, 10, 30, 100 ali 250 cm/s). Ker je bilo na modelu kot najprimernejše izbrano območje 30 cm/s, sonda deklarirano odstopa od prave vrednosti za največ $\pm 1\% \cdot 0,30 \text{ m/s} = \pm 0,003 \text{ m/s}$, to pa za naravo pomeni $\pm 0,003 \text{ m/s} \cdot 28^{1/2} = \pm 0,016 \text{ m/s}$. Slednje v primeru povprečne Vy za naravo okoli 0,38 m/s pomeni $\pm 0,016 / 0,38 = \pm 0,04$ torej $\pm 4\%$ relativne napake.

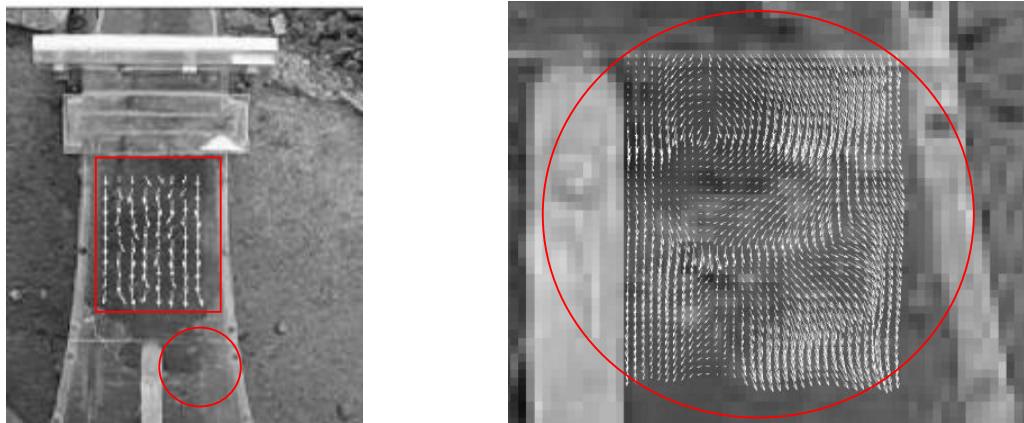
Iz primerjave hitrosti ADV in VIZ lahko zaključimo, da vizualizacijska metoda ob ustreznih pogojih snemanja daje dobre rezultate in jo lahko uporabimo za kvantifikacijo hitrostnega polja.

3.3 Dodatne analize

Ena od pomembnih prednosti uspešno verificirane vizualizacijske metode je ta, da omogoča kvantitativno določitev hitrostnega polja na območjih, ki so za različne kontaktne sonde nedostopne, ali pa bi njihova morebitna namestitve preveč vplivala na opazovane tokovne razmere. Nazorna primera za to sta v nadaljevanju predstavljena modelni vtočni tunel in razcep toka ob gorvodnem stebri nad pragom.

3.3.1 Hitrosti v vtočnem tunelu

Analiza razmer v vtočnem tunelu kaže, da so hitrosti na vstopnem delu tunela precej enakomerne, ob predelni steni, ki razmejuje tunel, pa prihaja do vrtninčenja.



Slika 5: Polje hitrosti v vtočnem tunelu modela in detajl vrtninčenja ob predelni steni (desno)

3.3.2 Hitrosti ob gorvodnem stebri

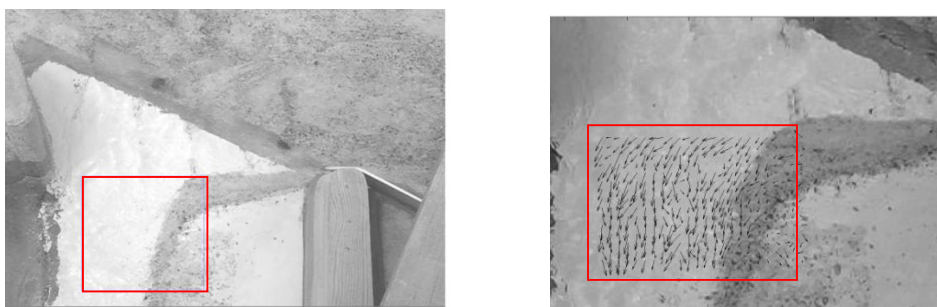
Določitev hitrostnega polja na območju razcepa toka ob stebrih vtočnega objekta bi bila z metodo ADV zelo vprašljiva, saj bi sonda preveč vplivala na merjene veličine. Vizualizacijska metoda jasno pokaže, da se ob modelnem stebri voda v zgornjih plasteh toka razdeli na dve veji, pri čemer pride do izrazitejšje turbulence, medtem ko tok ob dnu sledi obrisu praga in ne vstopa v vtočni objekt. Slednje je seveda bistvenega pomena za reševanje vprašanja vnosa rinjenih plavin (predvsem proda).



Slika 6: Polje hitrosti na razcepu toka ob gorvodnem stebri: barvilo dozirano na sredini globine toka (slika levo), barvilo dozirano ob dnu modela (slika desno)

3.3.3 Premikanje modelnega proda

Do določene mere se vizualizacijsko metodo lahko uporabi tudi pri analizi primerov s premeščanjem modelnih rinjenih plavin. Uporabljeni so bili posnetki vtekanja modelnega proda pri starejši varianti vtočnega objekta brez stebrov. Vizualizacijska metoda kljub odsotnosti barvila pokaže, da prodni jezik napreduje v obliki srpa, pri čemer so hitrosti kotalečih se trdnih delcev manjše od hitrosti vodnega toka nad gladkim dnom. Slednje so rezultat potovanja posnetih površinskih valov oz. odsevov, ki vplivajo na odtenke sivine posnetkov.



Slika 7: Premeščanje modelnega proda in hitrostno polje na robu prodnega jezika (desno)

4 Zaključki

Vizualizacijska metoda za kvantifikacijo hitrostnega polja je bila uspešno verificirana z rezultati meritev ADV in nato aplicirana na primerih, kjer bi bile meritve ADV težko izvedljive ali bi bili tako dobljeni rezultati vprašljivi. To je bilo doseženo izključno na obstoječih posnetkih hidravlične modelne raziskave iz leta 2006, pri čemer omenjeni posnetki v času nastanka sploh niso bili mišljeni kot izhodišče za kasnejšo kvantifikacijo. Torej je upravičeno sklepati, da bi vizualizacijska kvantifikacija ob zagotovljenih ustrežnejših nastavitvah snemanja omogočila še precej podrobnejšo in točnejšo analizo pretočnih razmer in je uporabno eksperimentalno orodje za analizo kompleksnih hidravličnih problemov, zlasti tistih, ki narekujejo uporabo neinvazivnih metod. To bo pri nadaljnjem delu pokazano na eksperimentih s hidravličnimi modeli bočnih prelivov oz. razbremenilnikov.

Literatura

- [1] P. Rodič, G. Novak, M. Bombač, *Hidravlična modelna raziskava spodnjega vtočno-iztočnega objekta in zgornjega vtočnega objekta ČHE Avče – Poročilo hidravlične modelne raziskave*, Inštitut za hidravlične raziskave, Ljubljana, 2006.
- [2] H. Kobus (ur.), *Hydraulic Modelling*, Verlag Paul Parey, Hamburg, 1980
- [3] T. Bajcar, B. Širok, M. Eberlinc, *Quantification of Flow Kinematics Using Computer-Aided Visualization*, Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering, 55, 4, 215-223, 2009
- [4] G. Kyriacou, P. Vadgama, W. Wang, Characterization of a laminar flow cell for the prevention of biosensor fouling, <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=18216529>