

NOMOGRAMI ZA PRORAČUN FUNKCIONALNOSTI TEHNIČKIH RIBLJIH STAZA NA MALIM PRAGOVIMA

izv. prof. dr. sc. Eva Ocvirk
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Kačićeva 26, 10000 Zagreb
eva.ocvirk@grad.unizg.hr

doc. dr. sc. Gordon Gilja
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

dr. sc. Damjan Bujak
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Antonija Cikojević
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

dr. sc. Dušan Jelić
Hrvatski institut
za biološku raznolikost
Maksimirska cesta 129/5,
10000 Zagreb

Izgradnja bioloških staza (u inženjerskoj praksi uobičajeno ribljih staza) u određenoj mjeri umanjuje negativne ekološke utjecaje gospodarskog razvoja i omogućuje ostvarivanje uzdužne povezanosti vodotoka koja je ključna za zadovoljenje migracijskih potreba vodnih organizama. Tehničke riblje staze su od najčešće korištenih tipova ribljih staza za uzvodnu migraciju riba. Cilj ovog rada je bio izvesti nomograme za provedbu direktnog proračuna funkcionalnosti u postupku projektiranja tehničkih ribljih staza. S obzirom na riblje vrste na području RH u ovom radu su analizirana dva tipa: bazenske riblje staze i riblje staze s vertikalnim otvorima. Za funkcioniranje tehničkih ribljih staza najvažniji parametri su: dubina vode, kritična brzina tečenja u otvorima, osiguranje minimalnog protoka i volumetrijska disipacija snage u definiranim granicama. Za potrebe provedbe istraživanja izrađeni su fizički model u laboratoriju i numerički model u OpenFOAM-u. Na temelju provedenih istraživanja definirane su osnovne preporuke za projektiranje geometrije ribljih staza u hidrauličkim uvjetima određenim ribljim vrstama na području Republike Hrvatske.

Ključne riječi: tehničke riblje staze, fizički model, OpenFOAM, nomogram

1. UVOD

Opstanak riblje populacije uvelike se oslanja na raspoloživost potrebnih, ali prostorno odvojenih područja unutar riječne mreže. Sve riblje vrste koje nastanjuju vodotoke provode ciljane migracije unutar njega, tj. promjene staništa barem u izvjesnoj životnoj fazi kao posljedicu promjene zahtjeva staništa s ciljem npr. raspodjele, rasta, reprodukcije, skloništa i zaštite od grabežljivaca (Schmutz i dr., 1997.; Jungwirth, 1998.). Jasno je da prekid kontinuiteta riječne mreže ima negativne utjecaje i znatno ugrožava riblju populaciju. S druge strane već stoljećima ljudi u vodotocima grade zahvate kojima zadovoljavaju svoje potrebe u odnosu na

vodu, a koje rastu s industrijalizacijom i porastom broja stanovnika. Hidrotehničke građevine koje predstavljaju prepreku uzdužnoj povezanosti vodotoka – pragovi, brane, propusti i razni oblici kanaliziranja vodotoka umjetnim elementima – neophodne su s aspekta korištenja voda za različite namjene. Izgradnjom bioloških staza, prolaza za uzvodnu i nizvodnu migraciju vodenih organizama navedene prepreke postaju prolazne čime se održava trofička, populacijska i genetička povezanost duž toka. Uzdužna povezanost vodotoka ključna je s ekološkog stajališta za zadovoljenje migracijskih potreba vodnih organizama te je zato nužan uvjet za sve vodotoke.

Vodne vrste pokazuju prilagodbu specifičnim životnim uvjetima koji prevladavaju u svakom pojedinom dijelu toka rijeke i tvore karakteristične biocenoze koje se mijenjaju u prirodnom slijedu uz vodotok jer se abiotički faktori razlikuju. Biološko značenje riba u ekosustavu prepoznato je i određeno u relativno novije doba, kada je ustanovljena višestruka uloga riba u ekosustavu i to: regulacijska, povezujuća i informativna (Mrakovčić i dr., 2006.). Hrvatska je jedna od ihtiološki najraznolikijih europskih zemalja - u slatkim vodama Hrvatske živi 137 vrsta riba prema Čaleti i sur. (Čaleti i dr., 2019.) pa se tradicionalno na području Hrvatske tok rijeke dijeli prema vrstama riba (Duplić, 2008.). Izgradnja ribljih staza u određenoj mjeri umanjuje negativne ekološke utjecaje i omogućava suživot čovjeka i prirode u skladu s potrebama gospodarskog razvoja. Prije planiranja ribljih staza na postojećim hidrotehničkim građevinama, odnosno u slučaju obnavljanja uzdužne povezanosti, nužno se prvo zapitati je li postojeća prepreka zaista neophodna i služi li još uvijek svojoj primarnoj svrsi – naime, uklanjanje prepreka trebalo bi imati prednost pred izgradnjom ribljih staza. Stoga je u postupku projektiranja ribljih staza potreban multidisciplinarni pristup koji će uvažiti i tehničke i ekološke potrebe u cilju postizanja optimalnog rješenja (Jelić i dr., 2019.).

Cilj ovog rada je izvesti nomograme za tipski proračun funkcionalnosti u postupku projektiranja tehničkih ribljih staza. Podatci za izradu nomograma prikupljeni su iz analiza polja tečenja korištenjem 3D numeričkog modela OpenFOAM, pri čemu je on kalibriran na temelju podataka prikupljenih laboratorijskim eksperimentima na fizičkom modelu.

2. MJERODAVNI HIDRAULIČKI UVJETI ZA KRETANJE RIBA

U prirodnim vodotocima vodenim organizmima je za migraciju raspoloživa cijela širina vodotoka, dok su dimenzije riblje staze u odnosu na širinu vodotoka u pravilu relativno male - ograničene inženjerskim, hidrauličkim i ekonomskim uvjetima, a što posebno dolazi do izražaja u većim rijekama. Stoga je položaj riblje staze uz prepreku izuzetno značajan. Hidraulički uvjeti nizvodno od prepreke (brzina tečenja i stupanj turbulencije) utječu na privlačne struje koje se formiraju na ulazu u riblju stazu, kao i kut izlaznog toka i omjer protoka glavnog vodotoka i riblje staze.

Privlačna struja mora biti vidljiva vodenim organizmima te su istraživanja unazad 20 godina bila usmjerena upravo u tom smjeru kako bi se osiguralo ribama da mogu prepoznati „uzorak toka“ pa je poželjno ponavljanje uzorka geometrije. Primjer su istraživanja (Wu i dr., 1999.; Tarrade i dr., 2008.; Calluaud i dr., 2012.; Calluaud i dr., 2014.). Nadalje, brzine potrebne za formiranje privlačne struje dane u postojećoj literaturi moraju biti u rasponu 0,8 m/s - 2,0 m/s. (FAO, 2002; Calluaud i dr., 2014.). U praksi se pokazalo da je to jedna

od najčešćih projektantskih pogrešaka, a najčešće je posljedica želje za postizanjem određenih hidrauličkih uvjeta u ribljoj stazi te raznih prostornih ograničenja. Izlaz riba u gornju vodu, odnosno ulaz vode u riblju stazu mora biti smješten dovoljno daleko od dominantne struje (npr. preljeva pregrade) kako ribe na izlazu ne bi bile strujom povučene nizvodno preko preljeva. Također u slučaju brzine tečenja gornje vode veće od 0,5 m/s preporuča se izlazno područje iz riblje staze odvojiti pregradnim zidom. S hidrauličkog aspekta, na području izlaza mora se izbjeći snažna turbulencija i brzina tečenja preko 2 m/s kako bi ribe mogle napuštati riblju stazu. U slučaju kada postoje oscilacije gornje vode potrebno je posvetiti posebnu pažnju projektiranju izlaza riblje staze. U pravilu kod oscilacija većih od 1 m preporuča se izvedba većeg broja izlaza kako bi riblja staza ostala funkcionalna i u uvjetima malih protoka. U cilju olakšanja migracije pridnenih riba i bentoskih vrsta (organizama koji žive na dnu vodotoka), dno riblje staze se spaja s dnom riječnog korita. Obično se u tu svrhu rade rampe s maksimalnim nagibima do 1:2, uz pažnju na kretanje vučenog nanosa i potencijalno zasipanje ulaza i izlaza riblje staze.

Osnovni oblik kretanja riba, ujedno i najvažniji kod projektiranja ribljih staza, je plivanje. Za projektiranje ribljih staza trebalo bi koristiti kratkotrajnu brzinu „najlošijeg“ plivača među ribljim vrstama promatranog područja (a to su obično mlade jedinke pojedinih vrsta ili veličinom najmanje vrste). Laboratorijska ispitivanja pokazala su da su najveće kratkotrajne brzine koje mogu savladati male i mlade ribe približno 0,35 m/s - 0,60 m/s. Ovakve, relativno male brzine mogu biti osigurane u neposrednoj blizini dna odgovarajućim projektnim rješenjem. Poželjno je, pogotovo za dugačke staze, postojanje mjesta za odmor (Dumont, 2012.). Generalni pokazatelj razine agitacije u bazenu je maksimalna volumetrijska disipirana snaga P_V [W/m³] koja je ujedno i grubi pokazatelj intenziteta turbulencije, prikazana jednadžbom (1)

$$P_V = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h}{l_b \cdot b \cdot h} \quad (1)$$

gdje su: ρ - gustoća vode [kg/m³], g - ubrzanje sile teže [m/s²], Q - protok vode [m³/s], Δh - razlika razina vode ispred i iza otvora bazena [m], l_b - svijetla duljina pojedinog bazena [m], b - širina bazena [m], h - prosječna dubina toka mjerena u sredini bazena [m].

Za pojedine vrste riba postoje maksimalno preporučene vrijednosti P_V (Liao, 2007.), a detaljnija preporuka raspona P_V prema zonaciji rijeka dana je tablicom (tablica 1).

Unazad 15 godina sve se više energije ulaže u detaljno proučavanje strukture toka u stazama (Wu i dr., 1999.; Tarrade i dr., 2008.). Kod staza s bazenima nastaju recirkulacijske zone - područja omeđena vrtlozima koja se zbog slabije izražene vertikalne komponente mogu

Tablica 1: Preporučene i granične vrijednosti volumetrijske disipirane snage prema zonaciji rijeke za tehničke riblje staze (Armstrong i dr., 2010.)

	Zona pastve - gornji tok	Zona pastve - donji tok	Zona lipljena	Zona mrene	Zona deverike
Preporučena (granična) volumetrijska disipirana snaga P_v [W/m ³]	160 (250)	130-140 (225)	120 (200)	100 (150)	80 (125)

tretirati kao dvodimenzionalne. Situacija kad je vrtlog manji od ribe nije problematična, no ako je veći, ribe se gibaju otežano i kaotično (Calluaud i dr., 2012.; Calluaud i dr., 2014.). Ostali bitni lokalni pokazatelji su brzina toka u točki čija maksimalna vrijednost ne smije prelaziti 2 m/s (na mjestima kontrakcije toka), i dubina koja ne smije biti manja od 0,2 m (FAO, 2002.; Calluaud i dr., 2014.). Poželjno je da dubina bude što veća jer će tada stazu moći koristiti i ribe koje plivaju pridneno i ribe koje plivaju površinski. Ribama odgovara situacija kada znaju prepoznati „uzorak toka“ pa je poželjno ponavljanje uzorka geometrije, što je u pravilu prisutno kod većine ribljih staza.

Tehničke riblje staze su najčešće korišteni tipovi ribljih staza za migraciju riba. Kao što samo ime kaže tehnička rješenja predviđaju staze bazenskog tipa s različitim tipovima umjetnih pregrada. S obzirom na riblje vrste koje nastanjuju područje Republike Hrvatske u ovom radu su analizirana dva tipa ribljih staza – riblje staze

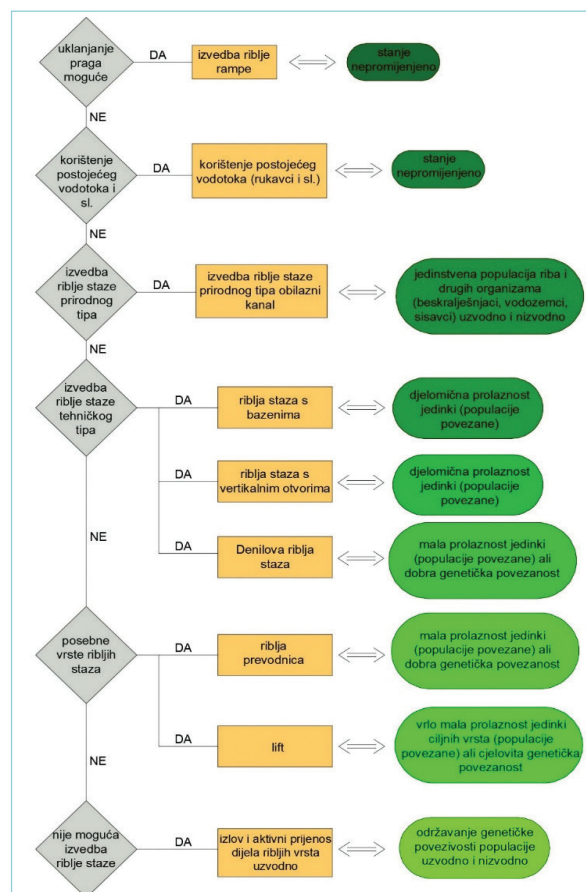
bazenskog tipa i riblje staze s vertikalnim otvorima. Za funkcioniranje tehničkih ribljih staza najvažniji parametri su: dubina vode, kritična brzina tečenja u prolazima, osiguranje minimalnog protoka i volumetrijska disipacija snage u definiranim granicama.

3. PRISTUP PROJEKTIRANJU TEHNIČKIH RIBLJIH STAZA

Osnovna ideja projektiranja tehničkih ribljih staza bazenskog tipa je podjela kanala na bazene gradnjom vertikalnih pregrada koje osiguravaju stepenasti pad vodnog lica od gornje do donje vode. Protok se omogućava kroz otvore u pregradnim zidovima ili preko preljeva a potencijalna energija disipira se postepeno bazen po bazen. Ribe migriraju iz jednog bazena u drugi kroz otvore, pri čemu svladavaju veće brzine samo dok prolaze kroz otvor dok je unutar bazena područje odmora. Za funkcioniranje riblje staze najvažniji parametri



Slika 1: Riblja staza bazenskog tipa uz malu hidroelektranu u Njemačkoj; Riblja staza uz HE Blanca na Savi: staza s vertikalnim otvorima (svladavanje veće razlike u padu) prelazi u obilazni prirodni kanal / Autorica: E. Ocvirk



Slika 2: Dijagram toka planiranja i projektiranja ribljih staza

Tablica 2: Preporučene dimenzije pojedinih elemenata konstrukcije ribljih staza bazenskog tipa i pripadni hidraulički uvjeti prema

		Zona pastreve - gornji tok	Zona lipljena	Zona mrene	Zona deverike
Dimenzije bazena [m]	Duljina [m]	>1,0		1,4-2,0	
	Širina [m]	>0,8		1,0-1,5	
	Dubina vode [m]	>0,6		0,6-0,8	
Otvori [m]	0,2x0,2			(0,25-0,35)x(0,25-0,35)	
Protok [m ³ /s]	0,05-0,10			0,08-0,20	
Max razlika vodnih lica između bazena [m]			0,20		

su dubina vode, kritična brzina tečenja u prolazima, osiguranje minimalnog protoka i volumetrijska disipacija. Na temelju gornjih parametara provodi se i standardni proračun funkcionalnosti. Slikom 2 je prikazan dijagram toka pristupa odabiru projektnog rješenja.

3.1. Riblje staze bazenskog tipa

Riblje staze bazenskog tipa u pravilu su linijskog tlocrta, ali s obzirom na raspoloživi prostor i visinu koju je potrebno svladati postoje situacije u kojima imaju i nekoliko lomova od 180 stupnjeva (slika 1). Pri tome se bazeni na mjestima lomova preporučaju izvesti nešto većih dimenzija kako bi se osiguralo dovoljno prostora za odmorište ribama. S obzirom da je brzina tečenja kroz otvore u dnu bazena direktno ovisna o razlici vodnih lica između bazena preporučena razlika ne bi smjela iznositi više od 0,2 m (za brzine do 2 m/s) pri ekstremnim rubnim uvjetima (maksimalna razlika između gornje i donje vode), dok se idealnom smatra razlika 0,15 m.

3.2. Riblje staze s vertikalnim otvorima

Ovaj tip ribljih staza dijeli mnoge sličnosti s ribljim stazama bazenskog tipa. Riječ je o tehničkim stazama kod kojih se pravokutni kanal s nagnutim dnom pregrađuje vertikalnim pregradama čime se stvaraju bazeni s kontinuiranim otvorima po cijeloj visini pregrade ili dva u slučaju kanala većih širina. Vodni tok formira mlaz na otvoru između dva bazena, a energija tog mlaza se disipira miješanjem u bazenu. Poprečni zidovi moraju biti dovoljno visoki da nikada ne dolazi do prelijevanja preko njih. Osnovna karakteristika ovakvog tipa riblje staze je širina vertikalnog otvora koja ovisi o ribljoj vrsti dominantnoj za projektiranje i raspoloživom protoku. Sam oblik poprečnog zida mora biti takav da osigura povoljno strujanje za potrebe migracija, čemu doprinosi izvedba i tzv. skretni blokovi na određenoj udaljenosti od samog otvora. Brzina tečenja pri dnu otvora riblje staze ovog tipa je manja pa omogućava nesmetanu migraciju malim jedinkama i lošijim plivačima. Ugradnjom pridnenog kamenog supstrata osigurana je migracija i biotskim organizmima. Prednosti ovih ribljih staza su relativno mala osjetljivost na oscilacije donje vode te mogućnost prilagodbe konstrukcije na oscilacije gornje vode (npr. ulazi na različitim razinama). Moguće

ih je izvesti i u područjima malih i velikih protoka (od 100 l/s do nekoliko m³/s). Navedene karakteristike daju im određenu prednost kod odabira u odnosu na ostale tehničke riblje staze.

Tablica 3: Preporučene dimenzije pojedinih elemenata konstrukcije ribljih staza s vertikalnim otvorima i pripadni hidraulički uvjeti prema (FAO, 2002) za Zonu lipljena, mrene, deverike

Širina otvora [m]	0,15-0,30
Širina bazena [m]	1,20-1,80
Duljina bazena [m]	1,90- 3,00
Duljina usmjerivača [m]	0,16-0,18
Razmak usmjerivača i skretnog bloka [m]	0,06-0,14
Širina skretnog bloka [m]	0,16-0,40
Min. dubina vode [m]	0,50-0,75
Protok [m ³ /s]	0,15-0,40

4. PROVEDENA ISTRAŽIVANJA

Za potrebe provedbe istraživanja izrađeni su fizički i numerički model. Fizički model je maketa stvarnog sustava izložena djelovanju tekućine izrađena tako da se dominantne sile koje djeluju na sustav reproduciraju na modelu u odgovarajućem odnosu na stvarni sustav. Fizički model je korišten zbog svoje prednosti da vjerno replicira karakteristike tečenja u prirodi, a osnovne prednosti u odnosu na prirodu su: relativno jednostavno i jeftino prikupljanje podataka, na fizikalnim modelima je moguće ponavljati pokuse i kontrolirati uvjete, prikladni su za prikupljanje eksperimentalnih podataka za kalibraciju i verifikaciju numeričkih modela. Navedene prednosti fizičkog modela u odnosu na prirodu ujedno su i prednosti numeričkog modela u odnosu na fizički. Stoga je fizički model uspostavljen za manji broj karakterističnih situacija koje su služile za kalibraciju numeričkog modela. Na temelju rezultata izvršena je kalibracija numeričkog modela kako bi se na njemu mogle izvesti simulacije za veći broj modela varirajući geometriju i rubne uvjete. Cilj uspostave numeričkog modela je prikazati detaljno polje brzine unutar poprečnog presjeka prolaza riblje staze, s obzirom na rubne uvjete zadanog protoka i razine donje vode. Analiza brzine kroz sam otvor unutar fizičkog

modela je pod utjecajem vanjskih faktora jer direktno mjerenje zahtjeva postavljanje mjernog uređaja u otvor koji svojim volumenom utječe na strujnu sliku koju pokušava mjeriti. Stoga se brzine određuju posredno pomoću opisanog numeričkog modela. U fizikalnom modelu se, dakle, mjere brzine u točkama koje služe za kalibraciju numeričkog modela i na pozicijama gdje samo mjerenje ne utječe na strujnu sliku unutar riblje staze. Iz rezultata numeričkog modela izvedene su srednje brzine u otvoru koje nisu mogle biti direktno mjerene i zabilježene unutar fizikalnog modela (Građevinski fakultet Zagreb, 2018.). U nastavku je za svaki tip modela korištenih u simulacijama/eksperimentima dan detaljan opis ispitivanja i njegove konfiguracije.

4.1. Fizički model

Fizički model ribljih staza je uspostavljen u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Fizički model smješten je u hidraulički kanal pravokutnog poprečnog presjeka širok 0,9 m, dubok 0,9 m i ukupne duljine 18 m, od kojih 13 m predstavlja radnu duljinu. Na uzvodnom kraju kanala nalazi se ulazna građevina kroz koju se pomoću cirkulacijske crpke upušta voda u kanal i time ostvaruje tečenje kroz njega. Kanal je recirkulacijskog tipa, tj. voda koja se koristi u kanalu smještena je u spremniku ispod njega u koji je spojen izlaz iz kanala. Crpka je maksimalnog kapaciteta 25 l/s, a reguliranje protoka ostvaruje se upotrebom elektromagnetnog mjerača protoka. Nizvodni rubni uvjet ostvaruje se pokretnom zapornicom zglobno učvršćenom za dno kanala koja kontrolira razinu donje vode na izlazu. Svaki tip riblje staze ispitan je fizičkim modelom za sljedeći raspon geometrijskih parametara: nagib dna riblje staze od 12,5 %, 10 % i 7,5 %; razmak pregrada 45 cm, 60 cm i 90 cm te različite geometrije otvora.

U svrhu ispitivanja rasporeda polja brzine u ribljim stazama bazenskog tipa ispitano je ukupno 27 konfiguracija modela: kombinacija 3 nagiba (12,5 %, 10 % i 7,5 %), 3 duljine bazena (45 cm, 60 cm i 90 cm) te 3 dimenzije otvora (8x8 cm, 10x10 cm i 12x12 cm). Za distinkciju rezultata pojedinih konfiguracija usvojena je nomenklatura „nagib dna“-„razmak pregrada“-„veličina otvora“. Pregrade se mogu odvit i ponovno pričvrstiti na željeno mjesto uzduž modela ovisno o tome ispituje li se varijanta modela s razmakom pregrada od 45 cm, 60 cm ili 90 cm. Pregrade imaju pravokutne otvore s donje strane čija se pozicija naizmjenično mijenja kroz model lijevo i desno. Otvori na pregradama se također mogu promijeniti od veličine otvora 12x12 cm i 10x10 cm do 8x8 cm umetanjem uložaka točne geometrije i njihovim pričvršćivanjem vijcima na pregradu.

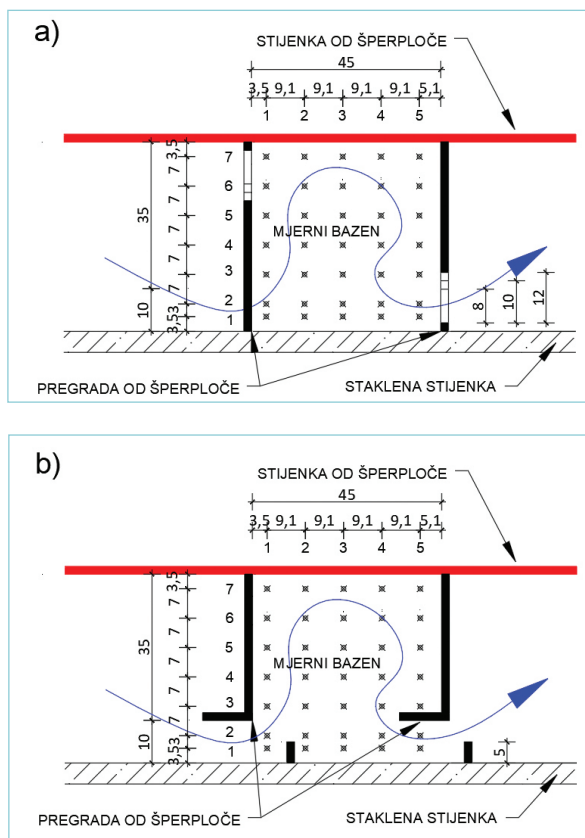
U svrhu ispitivanja rasporeda polja brzine u ribljim stazama s vertikalnim otvorima ispitano je ukupno 9 konfiguracija modela: kombinacija 3 nagiba (12,5 %, 10 % i 7,5 %) i 3 duljine bazena (45 cm, 60 cm i 90 cm). Za distinkciju rezultata pojedinih konfiguracija usvojena je nomenklatura



Slika 3: Fotografije fizičkog modela: hidraulički kanal (a); riblja staza bazenskog tipa – model (b) i detalj otvora (c); riblja staza s vertikalnim otvorima – model (d) i detalj otvora (e)

„nagib dna“-„razmak pregrada“. Pregrade imaju vertikalne otvore s desne strane uz staklenu stijenku kanala. Sam otvor je formiran na način da se sastoji od dvije vertikalne pregrade: veće pregrade u obliku slova „L“ gdje kraći krak slova zadire u uzvodni bazen i kraće pregrade uz staklenu stijenku kanala koja je izmaknuta prema nizvodnom bazenu kako bi došlo do otklona toka od desne stijenke. Udaljenost nizvodne stijenke varira s duljinom bazena.

Kako bi se ostvarila željena geometrijska, kinematska i dinamička sličnost s oponašanom prirodom, a dobiveni rezultati ekstrapolirani na prototip, fizički model se izrađuje u određenim mjerilima uz zadovoljenje uvjeta sličnosti. Ukoliko je u hidrodinamičkom procesu u



Slika 4: Shematski prikaz rasporeda mjernih točaka za konfiguracije bazenske riblje staze (a) i riblje staze s vertikalnim otvorima (b) za duljinu bazena 45 cm

mjerilu prirode dominantan utjecaj sile gravitacije, kao što je slučaj u tehničkim ribljim stazama, parcijalna dinamička sličnost na fizičkom modelu bit će zadovoljena kroz ostvarenje istog doprinosa masenih sila u inercionoj - analize modelski izmjerenih veličina temelje se na Froudeovoj sličnosti. Fizički model izrađen je u geometrijskom mjerilu 1:3, što znači da je odnos geometrijskih karakteristika riblje staze na modelu 3 puta manji od istovjetne riblje staze u prirodi ($\lambda = 3$).

Za svaku od navedenih konfiguracija bazenske riblje staze brzine su mjerene u mjerodavnom bazenu koji je odabran u sredini modela i koji nije pod utjecajem rubnih uvjeta. Prije početka mjerenja polja brzine svake pojedine konfiguracije registrirani su uvjeti ispitivanja, a to su protok pumpe Q [l/s], gornja voda H_{GV} [m], donja voda H_{DV} [m] i visina stupca vode u mjernom bazenu h [m]. Brzine su mjerene ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) Vectrino akustičnim uređajem u unaprijed određenim točkama za svaku konfiguraciju modela. Dobivene sirove podatke o brzinama potrebno je dodatno obraditi, tj. filtrirati, kako bismo se riješili nekvalitetnih podataka, tj. „pikova“ koji se mogu pojaviti (Wahl, 2000.) (Martin i dr., 2002.). Za postupak filtracije podataka korišten je program VSA (Velocity Signal Analyser). Za detekciju pikova korištena je metoda Phase-Space Thresholding koja radi na principu da su točke zatvorene unutar elipsoida koji je definiran prema određenom kriteriju (Goring i Nikora, 2002., Jesson i dr., 2015., Gilja i dr., 2019.b). Sve točke koje se ne nalaze unutar elipsoida program prepoznaje kao pikove i odbacuje ih.

4.2. Numerički model

U svrhu numeričkog istraživanja ribljih staza korišten je 3D numerički model dio open source OpenFOAM paketa (Weller i dr., 1998.). Navedeni model je već korišten u prethodnim istraživanjima dvofaznog tečenja sa slobodnim vodnim licem (Jacobsen i dr., 2011., Zhainakov i Kurbanaliev, 2013.). Neke već provedene analize osjetljivosti modela u svrhu proračuna ribljih staza su pokazale zadovoljavajuću točnost modela (Fuentes-Pérez i dr., 2018.), kao i rezultati kalibracije modela korištenih u ovom radu (Martinović i dr., 2018., Đerek i dr., 2018., Marić i dr., 2018., Gilja i dr., 2019.a). Na temelju rezultata izvršena je kalibracija numeričkog modela kako bi se na njemu mogle izvesti simulacije za veći broj modela varirajući geometriju i rubne uvjete.

Tablica 4: Srednja greška i „Root mean square error“ za nagib staze 12,5%

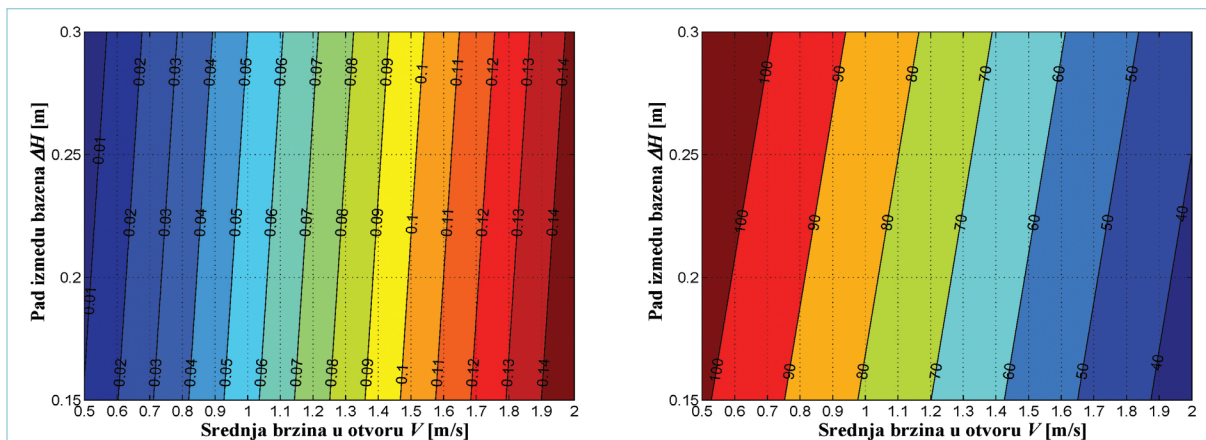
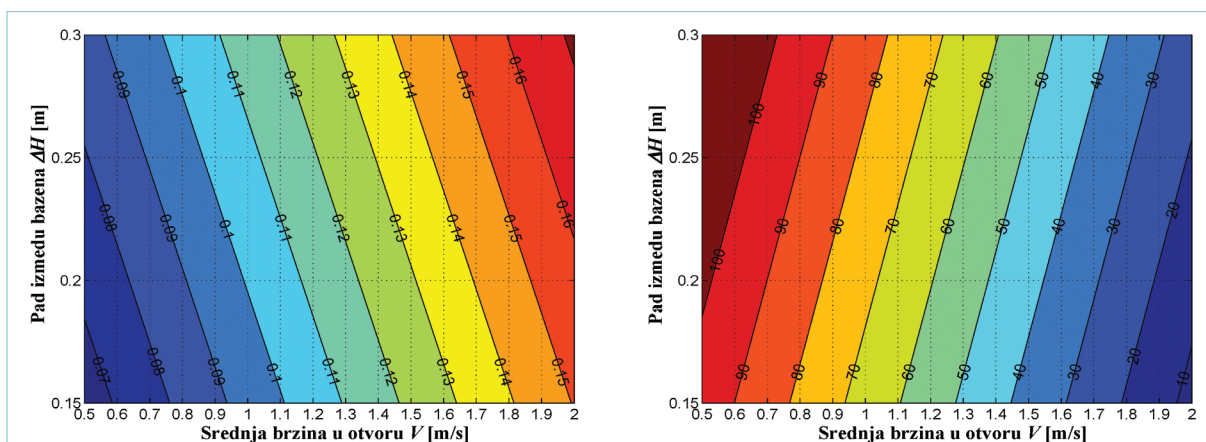
Srednja greška („RMSE“)			
Dužina polja [cm]	Dimenzije otvora		
	8x8	10x10	12x12
45	0,115 (0,166)	0,098 (0,143)	0,122 (0,160)
60	0,093 (0,131)	0,077 (0,109)	0,129 (0,187)
90	0,074 (0,095)	0,087 (0,110)	0,160 (0,127)

Indikatori greške numeričkog modela bazenskih ribljih staza u usporedbi s vrijednostima izmjerenim na fizičkom modelu u laboratoriju se mogu očitati iz tablica 1 i 2, gdje su izražene preko srednje greške i standardne devijacije (engl. Root mean square error – RMSE). Raspon srednje greške kroz različite modele varira između 0.08 – 0.12 m/s, a vrijednosti RMSE u nešto većem rasponu između 0.095 – 0.187 m/s. Navedene vrijednosti su unutar očekivanog raspona, posebice jer se radi o iznimno turbulentnom tečenju kroz riblju stazu. Prethodna istraživanja su također razvila numeričke modele za drukčije vrste ribljih staza, te prihvaćane vrijednosti srednje greške u tim slučajevima su u rasponu 0.07 – 0.10 m/s (Fuentes-Pérez i dr., 2018.). Iz navedenog se može zaključiti da je validacija numeričkog modela izvedena s razumnom kvalitetom uzimajući u obzir i dostupne računalne resurse za izvedbu nadolazećeg većeg broja modela.

Za bazenski tip riblje staze varirana je duljina bazena (1,35 m i 1,8 m), širina bazena (1,35 m i 1,5 m), veličina otvora (25x25 cm, 30x30 cm i 35x35 cm), nagib dna (7,5 %, 10 % i 12,5 %) i protok (0,1 m³/s, 0,15 m³/s i 0,2 m³/s) uz konstantnu razinu donje vode (0,65 m) te su izvedene ukupno 144 simulacije. Za riblju stazu s vertikalnim otvorom varirana je duljina bazena (1,35 m i 1,8 m), širina bazena (1,35 m i 1,5 m), veličina otvora (5 cm, 10 cm i 15 cm), nagib dna (7,5 %, 10 % i 12,5 %) i protok (0,15 m³/s, 0,20 m³/s i 0,25 m³/s) uz konstantnu razinu donje vode (0,7 m) te je izvedeno ukupno 108 simulacija (Ocirk i dr., 2017.).

5. REZULTATI

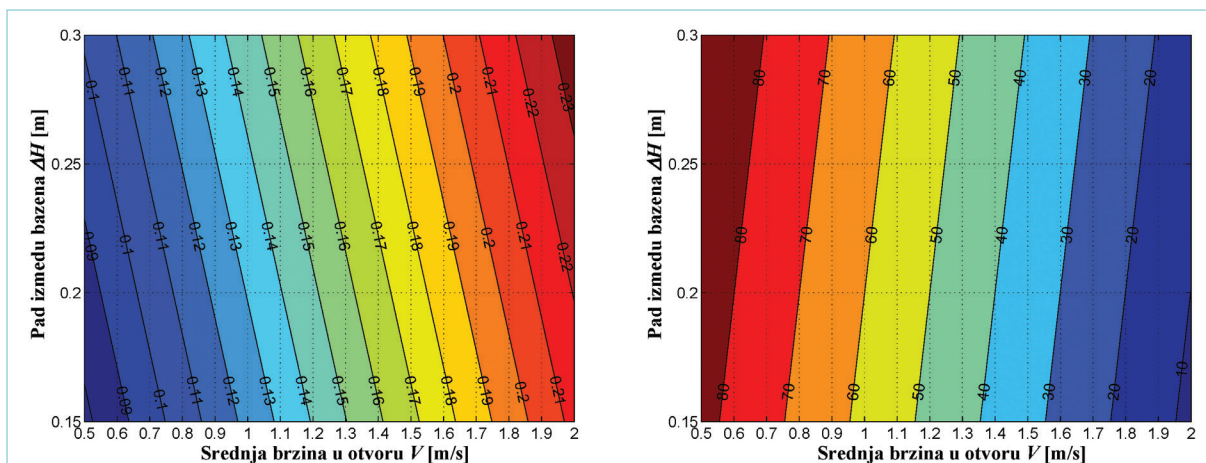
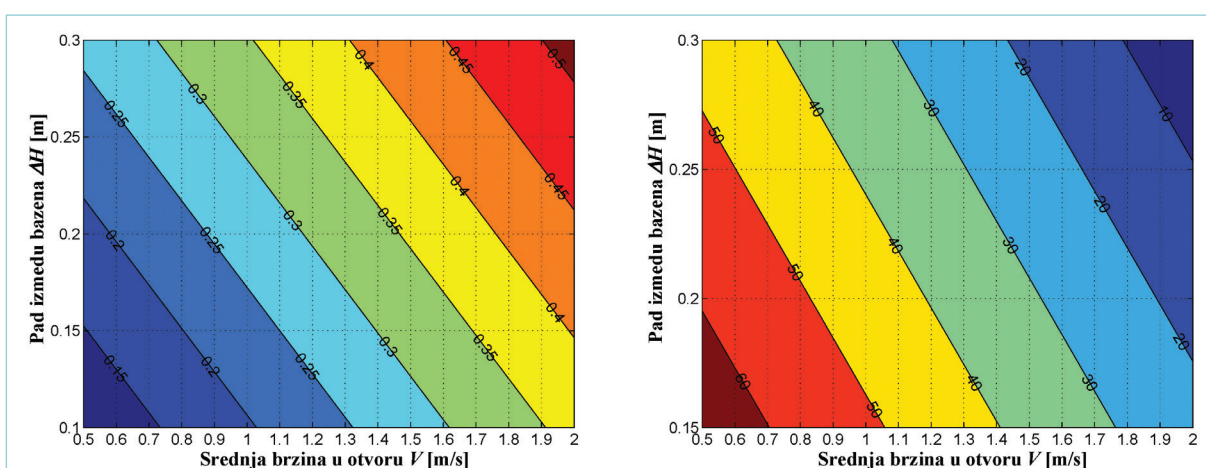
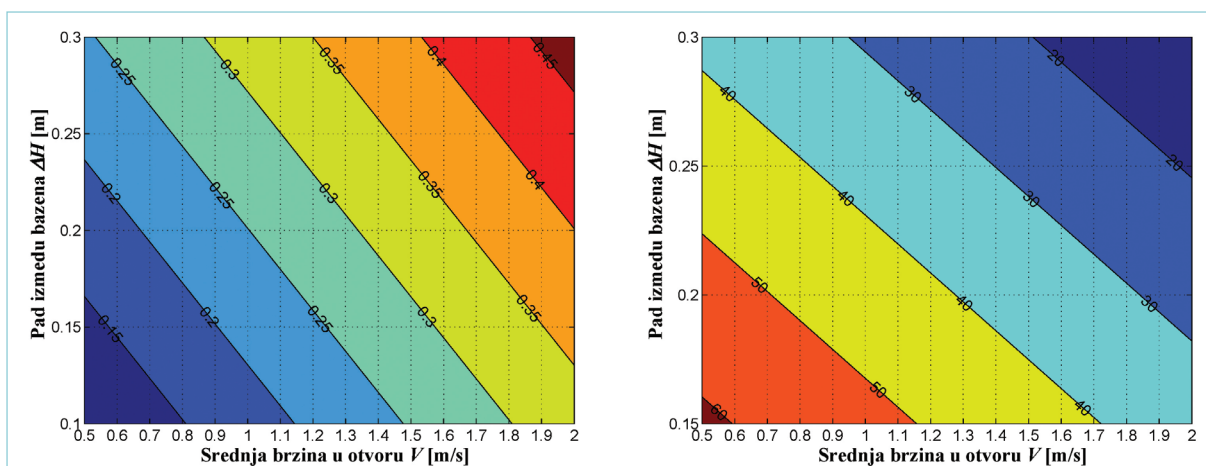
Na temelju rezultata detaljnog proračuna polja tečenja na domeni numeričkog modela detaljnom analizom su izračunate karakteristične vrijednosti potrebne za izradu praktičnih smjernica za projektiranje. Karakteristične vrijednosti koje predstavljaju ograničavajući faktor prilikom projektiranja su srednja brzina u otvoru (V) riblje staze, gdje se lokalno javljaju najveće brzine koje riba mora savladati prilikom prolaska kroz riblju stazu te površina za odmor (A) koja predstavlja udio površine bazena s brzinom manjom od 0,5 m/s koja se smatra graničnom za odmor u ribljolj stazi. Karakteristične vrijednosti brzine u otvoru i površine za odmor projektant će odrediti na temelju zadanih uvjeta u ribljolj stazi, kao što je protok Q te odabranih geometrijskih karakteristika koje utječu na polje tečenja: nagib dna staze l i pad razine vode između bazena Δh . Prilikom analize rezultata pokazano je da duljina i širina bazena imaju zanemariv utjecaj na granične vrijednosti hidrauličkih parametara (V i Δh) te oni nisu posebno istaknuti u prikazu konačnih rezultata, iako su svi dobiveni podatci obuhvaćeni pri izradi konačnih smjernica. Rezultati pojedinačnih numeričkih simulacija su grupirani u parove točaka sa svrhom određivanja funkcionalne zavisnosti $Q = f(V, \Delta h)$ koja je definirana prostornom ravninom koristeći regresiju metodom najmanjih kvadrata. Određivanje

Slika 5: Funkcionalna zavisnost $= f(V, \Delta h)$ za protok Q (lijevo) i površinu A (desno) za riblje staze bazenskog tipa s otvorom 25x25 cmSlika 6: Funkcionalna zavisnost $= f(V, \Delta h)$ za protok Q (lijevo) i površinu A (desno) za riblje staze bazenskog tipa s otvorom 30x30 cm

funkcionalne zavisnosti na ovaj način moguće je ekstrapolirati vrijednosti izmjenog/modeliranog oblaka točaka i dobiti pouzdane vrijednosti za parove varijabli izvan raspona vrijednosti obuhvaćenog prilikom određivanja funkcionalne zavisnosti. Istovjetnom metodom je određena funkcionalna zavisnost $A = f(V, \Delta h)$ koja omogućava određivanje pripadne površine za odmor prema odabranim rubnim uvjetima u bazenu riblje staze.

Rezultati su podijeljeni prema karakterističnim nagibima riblje staze za riblje staze s vertikalnim otvorima jer su uvjeti tečenja u njima, između ostalog, pod dominantnim utjecajem nagiba dna. Za riblje staze bazenskog tipa rezultati su podijeljeni prema veličini otvora, jer su uvjeti tečenja u njima pod dominantnim utjecajem istjecanja kroz otvor riblje staze i nisu u funkciji nagiba dna. Rezultati su predstavljeni veličinama u stvarnom mjerilu, tj. mjerilu prototipa u prirodi kako bi se mogle koristiti prilikom projektiranja bez pretvorbe. Analogno s definiranjem prikaza kojim je dan naglasak na hidrauličke varijable, iz prikaza je izostavljena dubina vode u bazenima. Dubina vode u ribljim stazama bazenskog tipa ovisi isključivo o geometrijskom smještanju početnog otvora u odnosu na nizvodni vodostaj. Kao rezultat istjecanja kroz njega, u uzvodnom

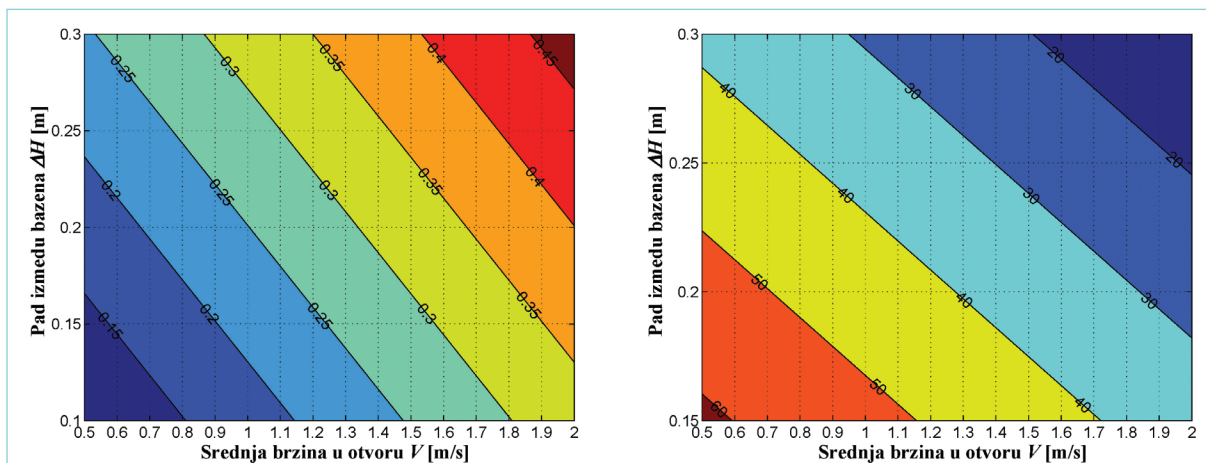
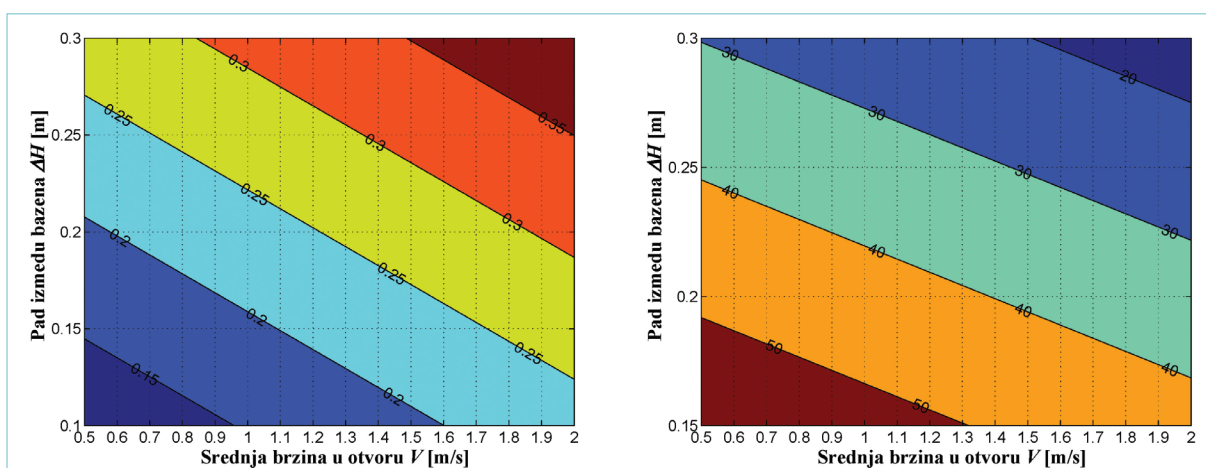
će bazenu vodostaj biti nadvišen za Δh neovisno o koti dna riblje staze, u slučaju da otvor nije smješten neposredno na samo dno. Slična analogija se može prikazati i kod ribljih staza s vertikalnim otvorima gdje lokalni gubitak na otvoru stvara nadvišenje vodostaja u uzvodnom bazenu, uzrokujući uvjete slične istjecanju kroz veliki otvor. Povrh svega navedenog, na formiranje dubine toka duž staze utječe izbor dubine toka na nizvodnom rubnom uvjetu, tj. geometrijsko oblikovanje riblje staze. Iz tog je razloga u ovom istraživanju dubina toka na ulazu u riblju stazu odabrana kao fiksna, u iznosu od 0,65 m, čime je osiguran miran režim tečenja na ulazu u riblju stazu pogodan za predmetne riblje vrste i dovoljna dubina vode cijelom duljinom riblje staze. Osim grafičkog prikaza rezultata, koji daje ovisnost srednje brzine u otvoru V i razlike u vodostaju između bazena Δh kao projektne varijable, također je izrađen i nomogram za praktičnu projektantsku primjenu iz kojeg je moguće očitati ulazne vrijednosti svih triju relevantnih varijabli i odrediti projektne parametre za tipsku primjenu predmetne riblje staze. U nastavku su za ilustraciju prikazani rezultati u granicama srednje brzine toka u otvoru V od 0,5 m/s do 2,0 m/s za po jedan slučaj svakog tipa riblje staze.

Slika 7: Funkcionalna zavisnost = $f(V, \Delta h)$ za protok Q (lijevo) i površinu A (desno) za riblje staze bazenskog tipa s otvorom 35x35 cmSlika 8: Funkcionalna zavisnost = $f(V, \Delta h)$ za protok Q (lijevo) i površinu A (desno) za riblje staze s vertikalnim otvorom i nagibom dna 7,5 %Slika 8: Funkcionalna zavisnost = $f(V, \Delta h)$ za protok Q (lijevo) i površinu A (desno) za riblje staze s vertikalnim otvorom i nagibom dna 7,5 %

5.1. Riblje staze bazenskog tipa

Za riblje staze bazenskog tipa funkcionalna zavisnost pokazuje porast srednje brzine u otvoru pri povećanju protoka i padu između bazena Δh . Promjena prirasta brzine, uz povećanje protoka, posljedica je lokalnog

strujnog polja oko otvora koji utječe na kontrakciju mlaza prilikom istjecanja te na koeficijent lokalnog gubitka i posljedično na razliku u vodostaju. U nastavku su grafički prikazane funkcionalne zavisnosti $Q = f(V, \Delta h)$ i $A = f(V, \Delta h)$ za riblje staze bazenskog tipa prema veličini otvora.

Slika 9: Funkcionalna zavisnost = $f(V, \Delta h)$ za protok Q (lijevo) i površinu A (desno) za riblje staze s vertikalnim otvorom i nagibom dna 10 %Slika 10: Funkcionalna zavisnost = $f(V, \Delta h)$ za protok Q (lijevo) i površinu A (desno) za riblje staze s vertikalnim otvorom i nagibom dna 12,5 %

Tablica 5: Preporučene i granične vrijednosti maksimalne brzine ovisno o ukupnoj visinskoj razlici i zonaciji vodotoka na osnovi ribljih vrsta

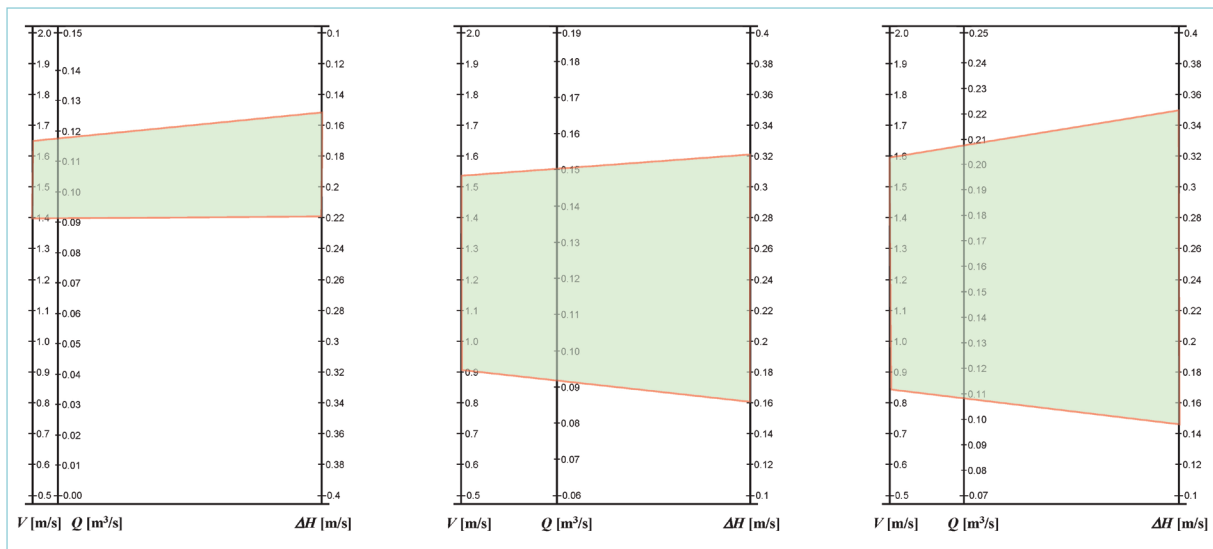
Ukupna visinska razlika	Zona pastirve, gornji tok	Zona pastirve, donji tok	Zona lipljena	Zona mreine	Zona deverike	Zona krkušee
< 3 m	1,1 (2,2)	1,1 (2,1)	1,0 (2,0)	0,9 (1,8)	0,8 (1,7)	0,8 (1,6)
3 do 6 m	1,1 (2,1)	1,0 (2,0)	0,9 (1,9)	0,8 (1,7)	0,8 (1,6)	0,7 (1,5)
6 do 9 m	1,0 (2,0)	0,9 (1,9)	0,9 (1,8)	0,8 (1,6)	0,7 (1,5)	0,7 (1,4)
> 9 m	0,9 (1,9)	0,9 (1,9)	0,9 (1,8)	0,9 (1,7)	0,7 (1,7)	0,6 (N/A)

5.2. Riblje staze s vertikalnim otvorima

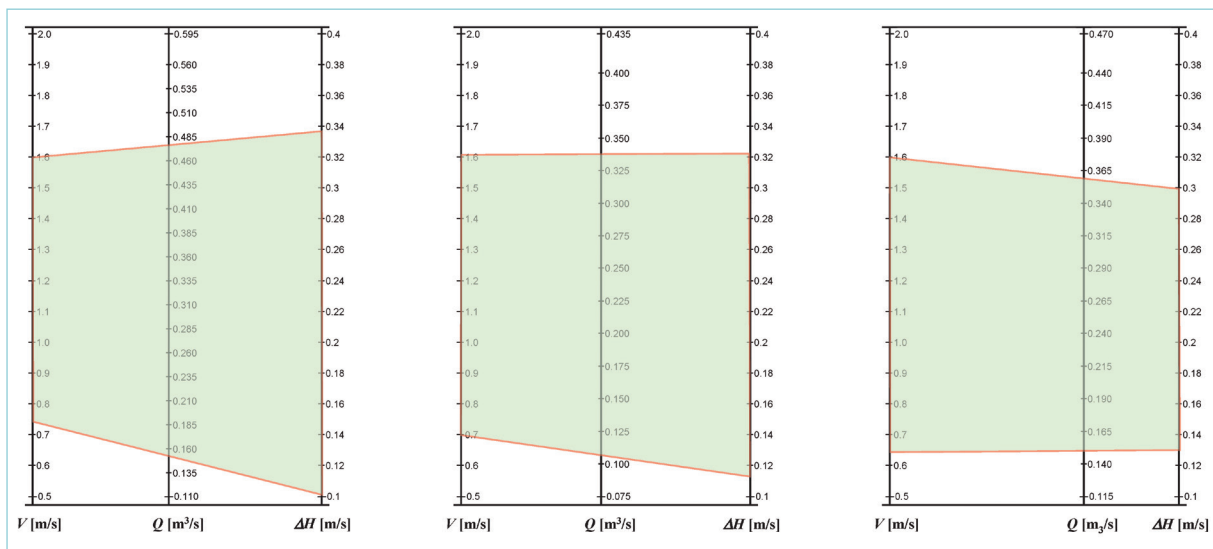
Riblje staze s vertikalnim otvorima pokazuju sličan trend kao i riblje staze bazenskog tipa: funkcionalna zavisnost pokazuje porast srednje brzine u otvoru pri povećanju protoka i padu vodnog lica između bazena Δh . Promjena prirasta brzine uz povećanje protoka posljedica je ubrzanja toka pri kojem dolazi do smanjenja dubine vode u bazenu i posljedično na razliku u vodostaju. U nastavku su grafički prikazane funkcionalne zavisnosti $Q = f(V, \Delta h)$ i $A = f(V, \Delta h)$ za riblje staze s vertikalnim otvorima prema nagibu dna riblje staze.

6. SMJERNICE I PREPORUKE ZA PROJEKTIRANJE RIBLJIH STAZA

Na temelju provedenih istraživanja definirane su osnovne preporuke za projektiranje geometrije ribljih staza u hidrauličkim uvjetima određenim ribljim vrstama na području Republike Hrvatske. Prikazana je tablica preporučenih veličina te nomogrami za očitavanje kombinacija vrijednosti protoka Q , srednje brzine u otvoru V i razlike u vodostaju Δh koje bi kod projektiranja trebale pojednostaviti proračun funkcionalnosti i poslužiti kao ulazni podatci za analizu izvodljivosti. Na



Slika 11: Nomogram za riblje staze bazenskog tipa s otvorom 25x25 cm, 30x30 cm, 35x35 cm



Slika 12: Nomogram za riblje staze s vertikalnim otvorom i nagibom dna 7,5 %, 10 %, 12,5 %

temelju tako odabranih vrijednosti za svaku projektiranu riblju stazu potrebno je provesti hidraulički proračun ili izraditi numerički model kojim će se opisati detaljni uvjeti tečenja u ribljoj stazi, ukoliko je potrebna detaljnija razrada karakteristika polja tečenja.

Za praktičnu inženjersku primjenu rezultata istraživanja mogu se koristiti nomogrami – grafički prikaz tabličnih sustava iz kojih se direktno očitava rezultat bez računanja jednadžbi, čime se pojednostavnjuje proračun funkcionalnosti. Grafički prikaz nomograma se sastoji od sustava linija iscrtanih prema nekoj funkciji. Povlačenjem linije preko cijele domene nomograma i triju vertikalnih skala očitavaju se pripadajući parovi zavisnih varijabli, u ovom slučaju kombinacija vrijednosti protoka Q , srednje brzine u otvoru V i pada razine vode između sukcesivnih bazena Δh . Prikazani su nomogrami za riblje staze bazenskog tipa i riblje staze s vertikalnim otvorima.

Praktična primjena nomograma omogućuje jednostavnost prilikom projektiranja, no prilikom njihovog korištenja moraju se uzeti u obzir lokalni utjecaji na rezultate koji rezultiraju devijacijom od definiranih funkcionalnih odnosa. Lokalni utjecaji su posljedica geometrijskog oblikovanja otvora koji utječe na koeficijent lokalnog gubitka na ulazu/izlazu iz bazena, a što se posljedično odražava na nadvišenje vodostaja u bazenu i brzinu u samom otvoru uz isti projektni protok. Iz ovog su razloga praktični nomogrami prikazani s prostorom koji omeđuje poligon, a koji predstavlja zonu u kojoj vrijede funkcionalne zavisnosti definirane u ovim smjernicama. Preporučeni raspon vrijednosti nalazi se unutar poligona, a njegove stranice predstavljaju granične nagibe pravaca za očitavanje vrijednosti. Drugim riječima, pravci koji se povlače na nomogramu ne smiju imati strmiji nagib od gornje i donje stranice

radnog dijela nomograma. U protivnom, očitavanjem se izlazi van granica pouzdanosti definirane funkcionalne zavisnosti i moguće je očitati nekompatibilne parove vrijednosti varijabli koji se neće realizirati u praksi nakon izgradnje riblje staze.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena su istraživanja polja tečenja pomoću fizičkog i numeričkog modela na nizu različitih geometrija i hidrauličkih rubnih uvjeta u tehničkim ribljim stazama. Na temelju rezultata detaljnog proračuna polja tečenja na domeni numeričkog modela analizom tečenja kroz otvore su izračunate karakteristične vrijednosti potrebne za izradu praktičnih smjernica za projektiranje. Karakteristične vrijednosti brzine u otvoru i površine

za odmor projektant će odrediti na temelju zadanih uvjeta u ribljoj stazi, kao što je protok Q te odabranih geometrijskih karakteristika koji utječu na polje tečenja: nagib dna staze l i pad razine vode između bazena Δh . Na temelju provedenih istraživanja definirane su praktične smjernice oblikovane kao projektantski nomogrami koji kod projektiranja pojednostavnjuju proračun funkcionalnosti i rezultiraju podacima za analizu izvodljivosti za projektiranje ribljih staza u hidrauličkim uvjetima određenim ribljim vrstama na području Republike Hrvatske.

8. ZAHVALA

Autori zahvaljuju Hrvatskim vodama na financijskoj potpori istraživanju kroz projekt „Planiranje i projektiranje ribljih staza“.

LITERATURA

- Armstrong, G.S.; Aprahamian, M.W.; Fewings, G.A.; Gough, P.J., Reader, N.A. i Varallo, P.V., (2010.): Environment Agency Fish Pass Manual: Guidance Notes On The Legislation, Selection and Approval Of Fish Passes In England And Wales. Almondsbury, Bristol, United Kingdom
- Čaleta, M.; Marčić, Z.; Buj, I.; Zanella, D.; Mustafić, P.; Duplić, A. i Horvatić, S., (2019.): A Review of Extant Croatian Freshwater Fish and Lampreys. *Croatian Journal of Fisheries*, 77(3), 137-234
- Calluau, D.; Bourtal, B.; Dupuis, L.; Refin, C.; Courret, D. i David, L., (2012.): Scale effects of turbulence in vertical slot fishways: field and laboratory measurement investigation. *9th International Symposium on Ecohydraulics - ISE 2012*, BOKU - Universität für Bodenkultur Wien
- Calluau, D.; Pineau, G.; Texier, A. i David, L., (2014.): Modification of vertical slot fishway flow with a supplementary cylinder. *Journal of Hydraulic Research*, 52(5), 614-629
- Đerek, I.; Ocvirk, E.; Gilja, G. i Bujak, D., (2018.): Analysis of hydraulic flow conditions in vertical slot fish passes. *10th Eastern European Young Water Professionals Conference - New Technologies in Water Sector* (ur. Feierabend, M. i dr.), 37-38, University of Zagreb, Zagreb
- Dumont, U., (2012.): The New DWA Design Manual on Fish Passes. *9th International Symposium on Ecohydraulics - ISE 2012*, BOKU - Universität für Bodenkultur Wien
- Duplić, A., (2008): *Slatkovodne ribe - PRIRUČNIK za inventarizaciju i praćenje stanja*. Državni zavod za zaštitu prirode, Zagreb
- FAO, (2002.): *Fish passes - Design, dimensions and monitoring*. Rome, Italy
- Fuentes-Pérez, J.F.; Silva, A.T.; Tuhtan, J.A.; García-Vega, A.; Carbonell-Baeza, R.; Musall, M. i Kruusmaa, M., (2018.): 3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways. *Environmental Modelling and Software*, 99, 156-169
- Građevinski fakultet Zagreb, (2018.): *Planiranje i projektiranje ribljih staza*. Hrvatske vode, Zagreb
- Gilja, G.; Marić, M.; Bujak, D. i Ocvirk, E., (2019.a): Hidraulička analiza ribljih staza Denilovog tipa. *7. hrvatska konferencija o vodama - Hrvatske vode u zaštiti okoliša i prirode* (ur. Biondić, D. i dr.), 985-994, Hrvatske vode, Zagreb
- Gilja, G.; Ocvirk, E. i Cikojević, A., (2019.b): Experimental investigation of flow field in a physical fishway model. *16th International symposium Water management & hydraulic engineering WMHE 2019* (ur. Pelivanovski, P. i dr.), 1-12, Ss Cyril and Methodius University, Skopje, North Macedonia
- Goring, D.G. i Nikora, V.I., (2002.): Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 117-126
- Jacobsen, N.G.; Fuhrman, D.R. i Fredsøe, J., (2011.): A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70(9), 1073-1088
- Jelić, D.; Ocvirk, E.; Gilja, G. i Cikojević, A., (2019.): Funkcionalnost ribljih staza. *7. hrvatska konferencija o vodama - Hrvatske vode u zaštiti okoliša i prirode* (ur. Biondić, D. i dr.), 975-984, Hrvatske vode, Zagreb
- Jesson, M.A.; Bridgeman, J. i Sterling, M., (2015.): Novel software developments for the automated post-processing of high volumes of velocity time-series. *Advances in Engineering Software*, 89, 36-42
- Jungwirth, M., (1998.): River Continuum and Fish Migration - Going Beyond the Longitudinal River Corridor in Understanding Ecological Integrity. *Fish Migration and Fish Bypasses* (ur. Jungwirth, M. i dr.), 19-32, Fishing News Books, Oxford, England

- Liao, J.C., (2007.): A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 362(1487), 1973-1993
- Marić, M.; Ocvirk, E.; Gilja, G. i Bujak, D., (2018.): Analysis of hydraulic flow conditions in Denil fish passes. *10th Eastern European Young Water Professionals Conference - New Technologies in Water Sector* (ur. Feierabend, M. i dr.), 75-76, University of Zagreb, Zagreb
- Martin, V.; Fisher, T.S.R.; Millar, R.G. i Quick, M.C., (2002.): ADV Data Analysis for Turbulent Flows: Low Correlation Problem. *Hydraulic Measurements and Experimental Methods Specialty Conference* (ur. Wahl, T.L. i dr.), 1-10, ASCE,
- Martinović, D.; Ocvirk, E.; Gilja, G. i Bujak, D., (2018.): Analysis of hydraulic flow conditions in pool fish pass. *10th Eastern European Young Water Professionals Conference - New Technologies in Water Sector* (ur. Feierabend, M. i dr.), 77-78, University of Zagreb, Zagreb
- Mrakovčić, M.; Brigić, A.; Buj, I.; Čaleta, M.; Mustafić, P. i Zanella, D., (2006.): *Crvena knjiga slatkovodnih riba Hrvatske*. Ministarstvo kulture, Državni zavod za zaštitu prirode, Republika Hrvatska, Zagreb
- Ocvirk, E.; Gilja, G. i Bujak, D., (2017.): Pool fishway hydraulic analysis. *15th International Symposium Water Management and Hydraulics Engineering* (ur. Bekić, D. i dr.), 184-192, University of Zagreb, Zagreb,
- Schmutz, S.; Zitek, A. i Dorninger, C., (1997.): A new automatic drift sampler for riverine fish. *Archiv für Hydrobiologie*, 139(4), 449-460
- Tarrade, L.; Texier, A.; David, L. i Larinier, M., (2008.): Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways. *Hydrobiologia*, 609(1), 177
- Wahl, T.L., (2000.): Analyzing ADV Data Using WinADV. *Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management*, 1-10,
- Weller, H.G.; Tabor, G.; Jasak, H. i Fureby, C., (1998.): A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in Physics*, 12(6), 620-631
- Wu, S.; Rajaratnam, N. i Katopodis, C., (1999.): Structure of Flow in Vertical Slot Fishway. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 351-360
- Zhainakov, A.Z. i Kurbanaliev, A.Y., (2013.): Verification of the open package OpenFOAM on dam break problems. *Thermophysics and Aeromechanics*, 20(4), 451-461

Nomograms for calculating the functionality of technical fish passes on small sills

Abstract. The construction of biological passes (usually fish passes in engineering practice) reduces, to a certain degree, negative ecological impacts of economic development and enables the achievement of longitudinal watercourse connectivity that is vital for meeting migratory needs of water organisms. Technical fish passes are one of the most used types of fish passes for upstream fish migration. The goal of the paper was to derive nomograms for implementing direct calculations of functionality in the technical fish pass design procedure. Considering fish species in the area of the Republic of Croatia, the paper analysed two types: basin fish passes and fish passes with vertical openings. The most important parameters for technical fish pass functionality are water depth, critical flow velocity, ensuring minimum flow and volumetric energy dissipation within defined limits. For investigation purposes, a physical model in the lab and a numerical model in OpenFOAM were developed. Based on the conducted investigation, basic recommendations for designing fish pass geometry in hydraulic conditions determined by fish species in the area of the Republic of Croatia were defined.

Key words: technical fish passes, physical model, OpenFOAM, nomogram

Nomogramme zur Berechnung der Funktionalität von Fischwegen an kleinen Wehren

Zusammenfassung. Der Bau von Wanderhilfen (in der Praxis meistens von Fischwegen) verringert in gewissem Maße ökologisch negative Auswirkungen der wirtschaftlichen Entwicklung und ermöglicht die Längsverbinding von Fließgewässern, was für die Befriedigung der Wanderungsbedürfnisse von Wasserorganismen entscheidend ist. Die Fischtreppe ist der am meisten gebaute Typ der Fischaufstiege. Das Ziel dieses Beitrags war, Nomogramme zur Berechnung der Funktionalität bei der Planung von Fischwegen zu erstellen. Die heimischen Fischarten in Kroatien berücksichtigend, wurden zwei Fischpasstypen analysiert: Beckenpässe und Schlitzpässe. Damit die Fischwege ihrer Funktion gerecht werden, müssen die wichtigsten Parameter, d.h. die Wassertiefe, die kritische Strömungsgeschwindigkeit in den Pässen, Sicherstellung eines minimalen Durchflusses und volumetrische Kraftdissipation in definierten Grenzen in Betracht gezogen werden. In dieser Untersuchung wurden ein physisches Modell im Laboratorium und ein numerisches Modell in OpenFOAM erstellt. Auf Grund der durchgeführten Untersuchungen konnten Grundempfehlungen zur Projektierung der Geometrie von Fischwegen in hydraulischen, durch bestimmte Fischarten festgestellten Bedingungen auf dem Gebiet der Republik Kroatien gegeben werden.

Schlüsselwörter: Fischwege, physisches Modell, OpenFOAM, Nomogramm