

Primljen / Received: 9.2.2021.

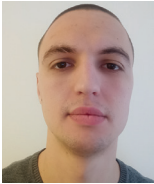
Ispravljen / Corrected: 25.2.2021.

Prihvaćen / Accepted: 28.2.2021.

Dostupno online / Available online: 10.4.2021.

# Izbor oblika riblje staze s vertikalnim otvorima na temelju primjene ABM modela

## Autori:



**Tin Kulić**, mag.ing.aedif.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[tin.kulic@grad.unizg.hr](mailto:tin.kulic@grad.unizg.hr)  
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Goran Lončar**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[goran.loncar@grad.unizg.hr](mailto:goran.loncar@grad.unizg.hr)



**Martina Kovačević**, mag.ing.aedif.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[martina.kovacevic@grad.unizg.hr](mailto:martina.kovacevic@grad.unizg.hr)



**Robert Fliszar**, mag.ing.aedif.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[robert.fliszar@grad.unizg.hr](mailto:robert.fliszar@grad.unizg.hr)

Pregledni rad

**Tin Kulić, Goran Lončar, Martina Kovačević, Robert Fliszar**

## Izbor oblika riblje staze s vertikalnim otvorima na temelju primjene ABM modela

Uspostavljen je fizikalni i 3D numerički model strujanja te model baziran na agentima (eng. Agent-Based Model - ABM) za potrebe praćenja prolaska ribe kroz dvije konfiguracije riblje staze s vertikalnim otvorima. Potrošnja vlastite energije ribe pri prolasku kroz riblju stazu predstavlja ključni parametar ocjene o kvaliteti pojedine konfiguracije riblje staze. Modelska riba prepoznaje okolišne uvjete pomoću svojih senzorskih sposobnosti te donosi kognitivne zaključke o promjeni smjera kretanja prema zoni manje turbulentne kinetičke energije. Rezultati provedenog istraživanja pokazali su da riblja staza s duljim bazenima omogućuje prolazak ribe s manjim utroškom energije.

### Ključne riječi:

riblja staza, fizikalni model, numerički model, ABM model

Subject review

**Tin Kulić, Goran Lončar, Martina Kovačević, Robert Fliszar**

## Application of agent-based modelling for selecting configuration of vertical slot fishway

Physical and 3D numerical hydrodynamic flow models and an agent-based model are developed with the principal objective of analysing fish behaviour in two vertical slot fishway configurations. Fish energy consumption due to swimming represents a crucial criterion for selecting an appropriate fishway configuration. The modelled fish detects ambient flow conditions, makes decisions based on its sensing and cognitive abilities, adapts to the changes in its environment, and moves toward the regions of less turbulent kinetic energy. The results show that fishways with longer pools enable passage of fish at a lower energy consumption.

### Key words:

fishway, physical model, numerical model, agent-based model

Übersichtsarbeit

**Tin Kulić, Goran Lončar, Martina Kovačević, Robert Fliszar**

## Auswahl der Form eines Fischpfades mit den vertikalen Öffnungen, aufgrund der Anwendung des ABM-Modells

Es wurde das physikalische Modell, sowie das numerische 3D-Modell der Strömung, genauso wie das Modell, welches sich auf den Agenten gründet (in englischer Sprache: Agent-Based-Modell - ABM), und zwar für den Bedarf der Begleitung von Fischen durch zwei Konfigurationen eines Fischpfades mit den vertikalen Öffnungen hergestellt. Der Verbrauch der eigenen Energie des Fisches durch den Fischpfad stellt einen Schlüsselparameter der Bewertung über die Qualität der einzelnen Konfiguration eines Fischpfades dar. Der Modellfisch erkennt die Umweltbedingungen mittels seiner sensorischen Fähigkeiten, und er zieht kognitive Schlussfolgerungen über die Änderung der Bewegungsrichtung in die Richtung der Zone mit der kleineren turbulenten kinetischen Energie. Die Ergebnisse der durchgeführten Forschung haben gezeigt, dass ein Fischpfad mit dem längeren Pfad den Durchgang des Fisches mit dem kleineren Energieverbrauch ermöglicht.

### Schlüsselwörter:

Fischpfad, das physikalische Modell, das numerische Modell, das ABM-Modell

## 1. Uvod

Klimatske promjene, degradacija okoliša, narušavanje bioraznolikosti i slični pojmovi sve se češće spominju u brojnim znanstvenoistraživačkim i stručnim radovima i raspravama kao izuzetno negativne posljedice nastale djelovanjem čovjeka. Prekid riječnog kontinuiteta jedna je od vrsta navedenih negativnih antropogenih utjecaja na ekosustave čiji smo dionici. Izvedba pregrada na vodotocima (hidroelektrane, brane, pragovi i slično) značajno utječe na brojne članove životinjske zajednice, a posebice na ribe. Upravo pregrade sprječavaju migracije ovih životinja, što je ključni dio u njihovom životnom ciklusu. Razvoj svijesti o važnosti očuvanja okoliša i o potrebi korištenja obnovljivih izvora energije doveo je do popularizacije izgradnje malih hidroelektrana. Izgradnjom malih hidroelektrana prihvaćeno je i suvremeno poimanje o zadovoljenju načela riječnog kontinuiteta, odnosno očuvanja biološke raznolikosti na cijelom vodotoku [1]. U ovom radu koncentriralo se na uzvodnu migraciju ribe kroz riblju stazu, pri čemu je bitno da riba prođe kroz stazu sa što manjim utroškom energije, bez ozljeda i djelovanja predatora [2].

Riblja staza je kanal opremljen elementima koji omogućuju postizanje željenih hidrauličkih karakteristika potrebnih da bi ribe mogle plivati stazom, a osnovna podjela je na tehničke i prirodne riblje staze [3]. U kontekstu ovoga rada analizirana je tehnička riblja staza s vertikalnim otvorima, detaljnije opisano u poglavlju Materijali i metode.

Riblje staze trebaju biti projektirane na način da odgovaraju fizičkim sposobnostima ribe, pri čemu je naglasak postavljen na prilagodbu uvjeta tečenja sposobnostima najslabijeg plivača [3]. Shodno tome, riba mora svladati i kritične dionice riblje staze u kojima se pojavljuju maksimalne brzine nizvodnog strujanja (kontrakcije toka na mjestima vertikalnih otvora). Na tim mjestima ribe plivaju kratkotrajnom brzinom koju mogu održati kroz nekoliko sekundi nakon čega zahtijevaju i odgovarajuće vrijeme oporavka. Kratkotrajna brzina za jedinke ribe iz porodice pastrvki (*salmonidae*), grgeča (*percidae*) i reda šaranki (*cypriniformes*) procjenjuje se na 10-12 dužina tijela u sekundi. U preostalom dijelu riblje staze potrebno je osigurati ribi kretanje s neprekidnom ili produženom brzinom koja iznosi između 3 i 5 dužina tijela u sekundi [3-6].

Dosadašnja istraživanja navode brojne prirodne i antropološke faktore koji utječu na učinkovitost plivanja ribe. Beamish [5] ističe temperaturu vode i koncentraciju otopljenog kisika u vodi kao ključne faktore čije manje vrijednosti utječu negativno na produženu brzinu plivanja. Od hidrodinamičkih faktora, koji utječu na plivanje ribe, ističu se veličina vrtloga i intenzitet turbulencije u toku vode [6-12]. Iako se turbulencija češće spominje u negativnom kontekstu što se tiče utjecaja na gibanje ribe, Liao [7, 8] opisuje uzorak gibanja u kojem riba koristi energiju vrtloga kako bi smanjila vlastiti utrošak energije tijekom plivanja. Nadalje, navodi da se riba nesmetano kreće poljem turbulentnog toka ako je veličina vrtloga za red veličine manja od duljine ribe. U slučaju pojave vrtloga jednakih ili

većih od ribe, dolazi do odnošenja ribe u smjeru strujanja te nemogućnosti njezina svladavanja turbulentnog toka. Hockley i drugi [13] navode da ribe izbjegavaju tok u kojem su prisutne značajne fluktuacije brzine strujanja u vremenu dok mogućnost svladavanja turbulentnog toka ovisi dominantno o duljini, masi i obliku tijela ribe. Detaljnija analiza utjecaja duljine ribe na sposobnost plivanja i potrebnu konfiguraciju riblje staze s vertikalnim otvorima dana je u radu [14], gdje je promatrano ponašanje sedam ciljanih ribljih vrsta mase od 10 do 400 [g] i duljine 5 do 40 [cm]. Iz ovog istraživanja izdvojene su vrijednosti graničnih brzina strujanja na temelju kojih je zabilježena promjena brzine plivanja ribe što je iskorišteno u sklopu ovoga istraživanja. Fish [15] i McKenzie [16] obradili su tematiku utroška energije ribe uslijed plivanja, pri čemu se navodi da ribe imaju tendenciju gibanja kratkotrajnom brzinom čak i za slučaj pojave struje vode koju bi mogle svladati korištenjem produžene brzine. Nadalje, dan je i izraz za izračun utroška energije same ribe na temelju sile hidrodinamičkog otpora oblika strujanju, a ovisi o veličini ribe, gustoći vode i brzini strujanja vode. Taj izraz koristi se i u sklopu ovoga rada za opis utroška energije ribe uslijed plivanja.

Konfiguracija riblje staze izuzetno je bitan faktor što se tiče njezine konačne funkcionalnosti, tj. osiguravanja riječnog kontinuiteta na mjestima prekida toka te uspješne migracije riba kroz ovaj objekt. Za potrebe analize uvjeta strujanja u ribljim stazama česta je primjena fizikalnih modela kako bi se u laboratorijskim uvjetima relativno brzo i učinkovito dobila predodžba o polju strujanja s različitim konfiguracijama. U radu [17] prikazani su rezultati istraživanja na fizikalnim modelima ribljih staza s različitim nagibima, protocima i širinama, pri čemu je polje strujanja praćeno primjenom Particle Image Velocimetry (PIV) tehnologije. Korak dalje napravljen je u istraživanju Silve i dr. [9], gdje je u laboratorijskim uvjetima analizirano gibanje mrene (*Luciobarbus bocagei*) kroz riblju stazu bazenskog tipa za konstantni uzdužni pad, a promjenjivi protok i površinu otvora u pregradi. Polje strujanja kontinuirano je praćeno 3D akustičnim Dopplerovim brzinomjerom (Acoustic Doppler Velocimeter, ADV), a gibanje ribe praćeno je videokamerom. Utvrđeno je da se riba većinom kreće zonama niske turbulencije uz napomenu da su odrasle jedinke bile uspješnije što se tiče pronalaska otvora u pregradi u odnosu na mlađ. Bermudez i dr. [18] analizirali su kretanje pastrve (*Salmo trutta*), podusta (*Pseudochondrostoma polylepis*) i mrene (*Luciobarbus bocagei*) kroz riblje staze s vertikalnim otvorima. Analizirane su recirkulacijske zone koje ribe koriste za odmor zbog niske turbulencije i malih brzina strujanja. Utvrđeno je da većinu vremena ribe za odmor koriste zone neposredno iza pregrada. Također, prikazane su trajektorije riba neposredno uzvodno i nizvodno od mjesta kontrakcije toka (vertikalnih otvora), pri čemu je zaključeno da se riba većinom odmara iza manje pregrade nakon čega prolazi kroz vertikalni otvor prema uzvodnom bazenu. Li i dr. [19] analizirali su polje strujanja u dvjema konfiguracijama ribljih staza s vertikalnim otvorima za različite uzdužne padove i oblike pregrada. Brzine strujanja kontinuirano su mjerene ADV uređajem. U sklopu toga

istraživanja uspostavljen je 3D hidrodinamički model koji je verificiran rezultatima mjerenja na fizikalnom modelu. Utvrđeno je da se oblikovanjem pregrada može utjecati na polje brzine, turbulentne kinetičke energije (dalje u tekstu: TKE), disipacije energije i vrtložnosti. Također, dobivena je pozitivna korelacija brzine, TKE i disipacije energije s uzdužnim padom riblje staze. Glavni hidraulički parametar, koji utječe na maksimalnu brzinu strujanja, jest pad vodnog lica između dvaju susjednih bazena riblje staze. Stoga, utvrđeno je da je ova činjenica povoljna s ekonomskog aspekta jer ovakvo oblikovanje omogućava izvedbu kraćih i strmijih ribljih staza.

Elementi prethodno navedenih istraživanjima korišteni su i u sklopu ovoga rada. Uspostavljen je numerički 3D hidrodinamički model ribljih staza s vertikalnim otvorima, a proračunski rezultati verificirani su rezultatima mjerenja na fizikalnom modelu. Time je ostvaren doprinos u smislu uspostavljanja modela plivanja ribe, kao individualne jedinice, na podlozi, tj. rezultatima hidrodinamičkog modela.

Ribe su kompleksni organizmi s razvijenom sposobnosti nalaženja hrane, izbjegavanja predatora i prepoznavanja okolišnih uvjeta povoljnih za razvoj i reprodukciju. Stoga, u modelu plivanja ribe kroz riblju stazu kognitivni aspekt ima važnu ulogu i treba biti unesen u matematičku formulaciju problema zajedno s fizikalnim elementima procesa. Formulacija adaptabilnog biheviorističkog ponašanja individualnog organizma u promjenjivim okolišnim uvjetima upravo su okosnica tzv. modelskih simulacija temeljenim na agentima (eng. *Agent-Based Model simulation*) [20, 21].

Modeli temeljeni na agentima (eng. *Agent-Based Model*, dalje u tekstu: ABM) predstavljaju relativno novi modelski pristup u analizi sustava jedinica koji imaju međusobnu interakciju i/ili interakciju s okolinom [22]. Nedavni rastući broj aplikacija ABM metodologije u širokom rasponu znanstvenih disciplina omogućen je razvojem računalnih resursa. Fokus ABM procedura postavljen je na opis akcije i interakcije pojedinačnih elemenata sustava (agenata) s okolišem, bez detaljnijeg modelskog opisa poopćene (globalne) fenomenologije [23]. Postavljeni ciljevi pri uspostavi ujedno definiraju razinu kompleksnosti samog ABM-a.

U ovom radu dan je prikaz primjene izvorno uspostavljenog ABM-a plivanja ribe kroz riblju stazu korištenjem platforme za ekološko modeliranje ECOLab u okviru numeričkog modelskog sustava MIKE ([www.dhigroup.com](http://www.dhigroup.com)). Pokriveni su sljedeći modelski aspekti u opisu uzvodnog plivanja ribe kroz riblju stazu: fizikalna komponenta kroz primjenu hidrodinamičkog modela (strujanje sa skalarnim poljem turbulentne kinetičke energije), bihevioristička komponenta (gibanje ribe uzvodno prema zoni povećane koncentracije hormona uz istovremeno izbjegavanje zona intenzivne turbulentne kinetičke energije). Biološke komponente rasta i mortaliteta te utjecaj promjene temperature i koncentracije otopljenog kisika u vodi na gibanje ribe nisu uzeti u obzir zbog kratkog vremena boravka ribe u ribljim stazama. Također, valja napomenuti da je promatrano kretanje izdvojene jedinice ribe kroz pojedinu konfiguraciju riblje staze.

Prema našoj spoznaji, do sada nisu javno prezentirani rezultati istraživanja integriranih hidrodinamičkih modela i ABM-a ribljih staza (Eulerov model za polje strujanja i Lagrangeov model za gibanje ribe) s ciljem kvantifikacije utjecaja konfiguracije riblje staze s vertikalnim otvorima ili drugih konfiguracija na intenzitet promjene energije ribe pri njenom uzvodnom kretanju. U dosadašnjim istraživanjima vezanim uz integraciju hidrodinamičkih modela i ABM-a analizirana je problematika pronalaska privlačne struje na nizvodnom ulazu u riblju stazu [24, 25, 26], migracija ribe u područjima riječnih estuarija [27] i sezonska migracija riba u morima [28]. U radovima [24-26] prezentirane su trajektorije riba samo od mjesta upuštanja u analizirani vodotok do ulaza u riblju stazu, bez provedene analize uzvodnog plivanja kroz riblju stazu.

U prvom dijelu drugog poglavlja iznose se podaci vezani uz uspostavljeni hidraulički fizikalni model na kojem su provedena mjerenja dubina i brzina strujanja za dvije konfiguracije riblje staze. Uspostava numeričkog modela strujanja kroz riblju stazu za obje konfiguracije razmatra se u drugom dijelu drugog poglavlja, zajedno s verifikacijom modelskih rezultata na temelju prethodno provedenih mjerenja na fizikalnom modelu. U trećem dijelu drugog poglavlja detaljnije se opisuje uspostavljeni ABM plivanja ribe kroz riblju stazu i specifičnosti provedenih simulacija. Rezultati provedenih simulacija prikazani su u četvrtom poglavlju, a zaključna razmatranja navedena su u zadnjem, petom, poglavlju.

## 2. Materijali i metode

### 2.1. Fizikalni model riblje staze

Fizikalni model riblje staze izgrađen je u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (slika 1.) unutar staklenog žlijeba pravokutnog poprečnog presjeka (slika 1.). Žlijeb ima širinu 1 [m], visinu bočnih stijenki 1 [m], te ukupnu duljinu 18 [m], od kojih 13 [m] predstavlja radnu duljinu. Kanal je recirkulacijskog tipa, a voda se zahvaća iz podzemnog kanala niskotlačnom crpkom (KSB AMAREX N). Regulacija protoka ostvaruje se pločastim zasunom smještenim ispred elektromagnetnog mjerača protoka (Enders+Hauser Promag 53). Na kraju kanala postavljena je pokretna zapornicom zglobo uočvršćenom za dno kanala (slika 1.).

U kanalu su izvedene dvije konfiguracije modela riblje staze s vertikalnim otvorima (slika 2.). Ukupna širina, duljina i nagib dna isti su za obje ispitivane konfiguracije riblje staze (širina 45 [cm], duljina 3 [m], konstantan pad dna 13 [%]). Za pregradne stijenske korištene su vodonepropusne šperploče. U prvoj konfiguraciji duljina svakog bazena je 90 [cm], a u drugoj 45 [cm] (slika 2.). U tekstu koji slijedi konfiguracija riblje staze s duljinama bazena od 90 [cm] navodit će se kao RS-90, a s duljinama bazena od 45 [cm] kao RS-45.

Brzine su mjerene u središnjem bazenu ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) uređajem (VECTRINO CABLE PROBE 10 MHz) na 9 točaka (slika 2.) u tri razine (površina, sredina i pri dnu, ukupno 27

mjernih točaka). Na svakoj mjernoj točki je registriranje podataka provedeno tijekom 2 minute, uz frekvenciju uzorkovanja 5 [Hz]. Ulazni protok postavljen je na  $Q = 20$  [l/s] pri čemu je razina gornje vode iznosila 65 [cm] (RS-90) i 71 [cm] (RS-45), a donje vode 25 [cm] od dna kanala (RS-90 i RS-45).

Rezultati izmjerenih brzina strujanja na pozicijama mjernih točaka prikazani su usporedno s rezultatima numeričkog modela u poglavlju 3. Izgrađeni fizikalni model predstavlja pilot-model koji se ne odnosi na konkretnu riblju stazu u umanjenom razmjeru.

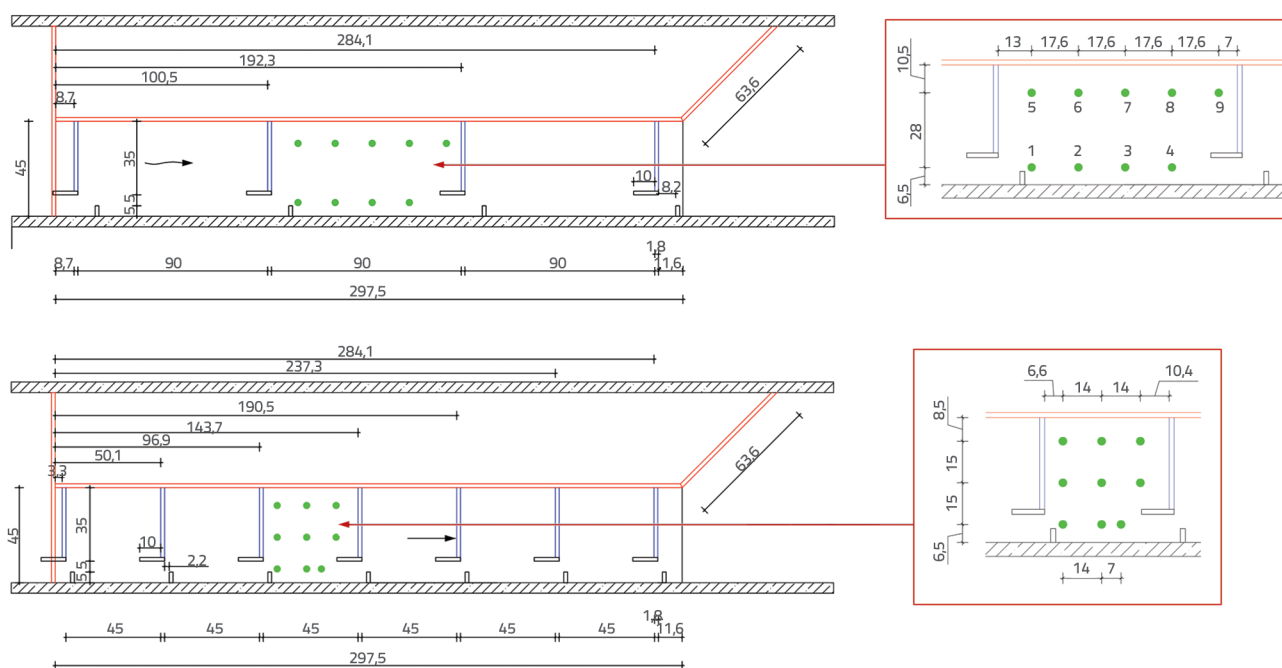


Slika 1. Stakleni žlijeb (kanal) u laboratoriju Zavoda za hidrotehniku (lijevo, pogled uzvodno) i zapornica na izlazu iz kanala (desno) [3]

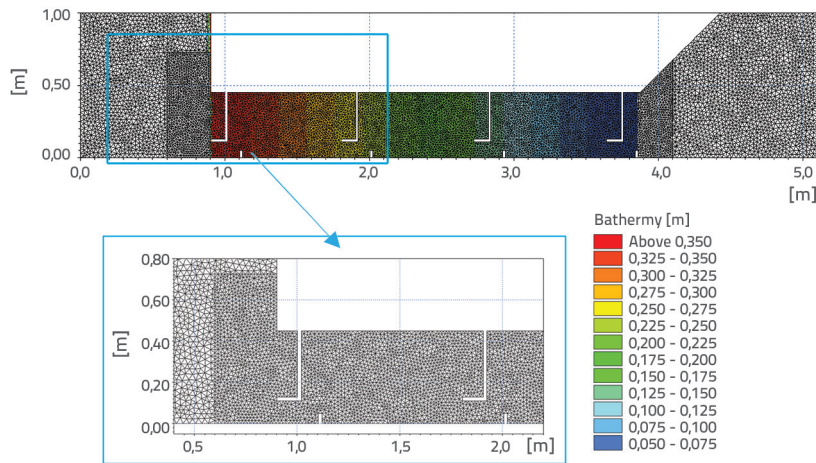
## 2.2. Numerički model riblje staze

Numerički model strujanja treba omogućiti simulaciju ključnih fizikalnih procesa koji utječu na kognitivno donošenje odluka ribe pri plivanju kroz riblju stazu, primjerice pri nailasku ribe na područje intenzivnog vrtloženja i/ili turbulencije. Za potrebe ovog istraživanja primijenjen je 3D hidrodinamički numerički model MIKE 3FM, zasnovan na metodologiji konačnih volumena.

Prostorna domena numeričkog modela i proračunska mreža (prostorna diskretizacija) prikazane su grafički na slici 3. Prikaz je dan samo za riblju stazu s razmakom između pregrada od 90 [cm] s obzirom na to da je prostorna domena modela riblje staze s razmakom 45 [cm] definirana s istom gustoćom proračunskih čvorova. Primijenjena je nestrukturirana mreža konačnih volumena, pri čemu prostorni inkrement između numeričkih čvorova smještenih u težištu konačnih volumena poprima vrijednosti od 0,005 [m] u dijelu postavljene riblje staze do 0,02 [m] u preostalom dijelu proračunske mreže. Na ulaznoj otvorenoj granici (uzvodni rubni uvjet) nametnut je protok s vrijednosti koja je primijenjena i na fizikalnom modelu ( $Q = 20$  [l/s]). Izmjerena dubina donje vode na fizikalnom modelu (25 [cm] za obje konfiguracije) nametnuta je na izlaznoj otvorenoj granici numeričkog modela (nizvodni rubni uvjet). Vrijednost apsolutne hrapavosti u numeričkom modelu varirana je do postizanja dubine vode na ulaznoj otvorenoj granici koja je istovjetna izmjerenoj na fizikalnom modelu (65 [cm] za RS-90 i 71 [cm] za RS-45). Za bočne stijenke i dno usvojena je vrijednost 0,0002 m. Smagorinskijev koeficijent usvojen je kao prostorno homogen s vrijednosti 0,1, nakon njegove varijacije s ciljem postizanja minimalnog odstupanja izračunanih brzina na pozicijama mjernih točaka u odnosu na izmjerene vrijednosti na fizikalnom modelu (detaljnije opisano u poglavlju 3). U svrhu optimizacije vremena potrebnog za provedbu proračuna, usvojena je vertikalna diskretizacija sa 5  $\sigma$ -slojeva. Treba napomenuti da su inicijalno provedene analize sa 15, 10, 5, 4 i 3 vertikalna  $\sigma$ -sloja, pri čemu su razlike u rezultatnim poljima strujanja i TKE bile manje od 3 % pri izboru 15, 10 i 5  $\sigma$ -slojeva, dok je daljnjim smanjenjem broja  $\sigma$ -slojeva razlika u rezultatima povećana na 12 % (4  $\sigma$ -sloja) i 35 % (3  $\sigma$ -sloja).



Slika 2. Geometrija ispitivanih konfiguracija modela riblje staze bazenskog tipa sa vertikalnim otvorima (lijevo) i raster mjernih točaka (desno)



Slika 3. Modelska prostorna domena riblje staze s bazenom duljine 90 cm i diskretizacija s trokutastim konačnim volumenima

Korišten je  $k - \varepsilon$  model turbulencije [29] za vertikalni smjer i Smagorinskyjev koncept [30] za horizontalni smjer. Faktori proporcionalnosti za polja turbulentne kinetičke energije (TKE) i disipacije TKE ( $\varepsilon$ ) usvojeni su s vrijednostima 1 (TKE) i 1,3 ( $\varepsilon$ ) u horizontalnom i vertikalnom smjeru, redom. Vremenski korak proračuna varijabilan je s obzirom na veličinu elemenata mreže, uz postavljenu ograničenje maksimalnog dopuštenog CFL parametra od 0.8.

Izračunana polja brzine strujanja i TKE, u sklopu hidrodinamičkog dijela numeričkog modela, koriste se kao podloga ABM-a plivanja ribe kroz riblju stazu. Tijekom plivanja uzvodno kroz riblju stazu riba se kreće u smjeru povećane koncentracije hormona, pri čemu izbjegava zone povećane TKE. Ova kognitivna komponenta gibanja ribe predstavlja okosnicu uspostavljenog ABM-a.

### 2.3. Uspostava ABM-a i provedba simulacija

U sklopu numeričkih simulacija promatrana je jedinka ribe duljine 25 cm sa sposobnosti plivanja produženom brzinom od 1,1 [m/s] i kratkotrajnom brzinom od 2,5 [m/s]. Navedene vrijednosti brzina plivanja definirane su na temelju rezultata dosadašnjih istraživanja koji su prikazani u radovima [3-6]. Kako je opisano u uvodnom dijelu, navedene karakteristike (duljina, brzine plivanja) odgovaraju karakteristikama riba iz porodice pastrvki, a u kontekstu ovoga rada modelska riba najbliže bi odgovarala potočnoj pastrvi (*Salmo gairdneri*) [31]. U kontekstu ABM-a pojam agent u nastavku teksta odnosi se na jedinku analizirane ribe.

Simulacije ABM provedene su na podlozi rezultata verificiranog hidrodinamičkog modela strujanja, pri čemu su izdvojena polja brzine strujanja i TKE. U nastavku je izložen osnovni koncept uspostavljenog ABM.

Varijabla procesa ABM-a je raspoloživa energija ribe ( $E$ ) čija je promjena dana izrazom [15, 16]:

$$\frac{dE}{dt} = -0.5\rho_v C_b v_{agent,rel}^3 [J] \quad (1)$$

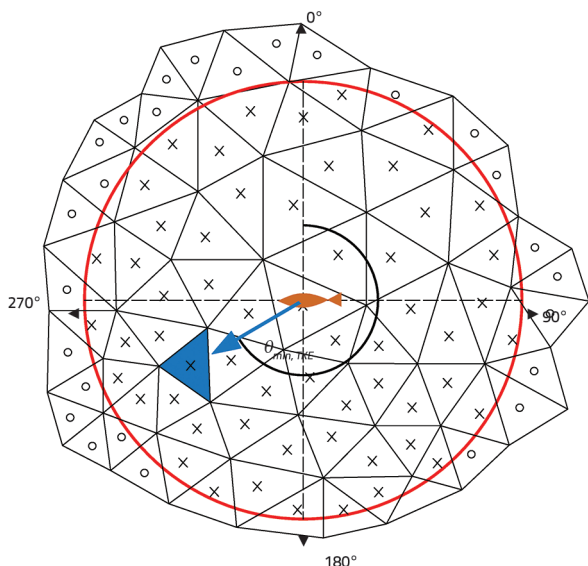
gdje je ( $\rho_v$ ) gustoća vode u [kg/m<sup>3</sup>], ( $C_b$ ) bezdimenzijski koeficijent otpora oblika ribe strujanju vode, ( $v_{agent,rel}$ ) ciljana brzina gibanja ribe u [m/s] (relativna brzina ribe), tj. brzina koju riba želi postići uzimajući u obzir okolišne podražaje (brzinu strujanja vode, turbulenciju). U slučaju kolinearnog plivanja sa strujanjem, agent smanjuje svoju relativnu brzinu prepuštajući se struji toka čime šteti energiju za svladavanje najvećih brzina koje se pojavljuju na mjestu kontrakcije toka (vertikalni otvori između bazena riblje staze). U slučaju

plivanja u smjeru suprotnom od smjera strujanja, riba odabire hoće li se gibati produženom ili kratkotrajnom brzinom ovisno o brzini strujanja vode. Prag raspoložive energije ( $E$ ) nakon koje ribe prekidaju svoje uzvodno napredovanje izraženo je sa vrijednosti 0. U slučaju potpune potrošnje raspoložive energije ( $E = 0$ ), dolazi do prekida uzvodnog plivanja ribe i njenog prepuštanja strujanju, što ribu vraća nizvodno prema donjem dijelu riblje staze. Osnovna motivacija za uzvodno plivanje je pretpostavljeno polje koncentracije hormona koje monotono raste u uzvodnom smjeru. Pri svome gibanju riba izbjegava zone intenzivne TKE.

Slijedi detaljniji uvid u komponente uspostavljenog ABM-a (konstante, senzorske funkcije agenta - ribe, matematička formulacija biheviorističkih i fizikalnih karakteristika ribe), kojima je opisano kretanje ribe kroz riblju stazu.

Prilikom uspostavljanja ABM-a usvojene su sljedeće konstante - gustoća vode ( $\rho_v$ ) = 1000 [kg/m<sup>3</sup>], duljina analizirane jedinke ribe ( $L$ ) = 0,25 [m], produžena brzina plivanja ( $v_{agent,C}$ ) = 1,1 [m/s] što je ekvivalentno 4,4 duljine ribe u sekundi, kratkotrajna brzina plivanja ( $v_{agent,B}$ ) = 2,5 [m/s] što je ekvivalentno 10 duljina ribe u sekundi.

Senzorske funkcije agenta opisane su dvjema predefiniranim funkcijama unutar softvera. Obje funkcije korištene su za potrebe određivanja relativnog smjera kretanja agenta. Prva funkcija ( $\theta_{min,TKE}$ ) korištena je za određivanje smjera kretanja agenta prema minimalnoj TKE, a odnosi se na agentovu detekciju 2D polja TKE u svojoj okolini unutar radijusa 0,018 [m]. Korištenje funkcije koja usmjerava gibanje prema minimalnoj TKE prepoznato je iz istraživanja predočenog u radovima [7, 8, 13, 18]. Druga funkcija ( $\theta_{max,WILL}$ ) korištena je za određivanje smjera kretanja agenta prema maksimalnoj vrijednosti hormona na temelju agentove detekcije pretpostavljenog 2D polja hormona u svojoj okolini unutar istog radijusa. Shematski prikaz rada senzorskih funkcija dan je grafički na slici 4. za primjer kretanja prema minimalnoj TKE.



Slika 4. Shematski prikaz odabira smjera kretanja agenta prema vrijednosti minimalne TKE [32]

Napomena: Narančasti simbol na slici 4. označava trenutni položaj agenta, plavi trokut element s najmanjom vrijednosti TKE, crvena kružnica područje detekcije 2D polja TKE, križići težišta elemenata mreže koje agent uzima u obzir pri odabiru smjera kretanja, kružići težišta elemenata mreže koje agent ne uzima u obzir pri odabiru smjera kretanja.

Prilikom agentove detekcije 2D polja na dijelu prostorne domene modela, gdje je nestrukturirana mreža konačnih volumena gušća, obuhvaćena su maksimalno četiri susjedna elementa. U slučaju raspoznavanja polja, gdje je udaljenost između čvorova veća, agent detektira jedan susjedni element unutar navedenog radijusa.

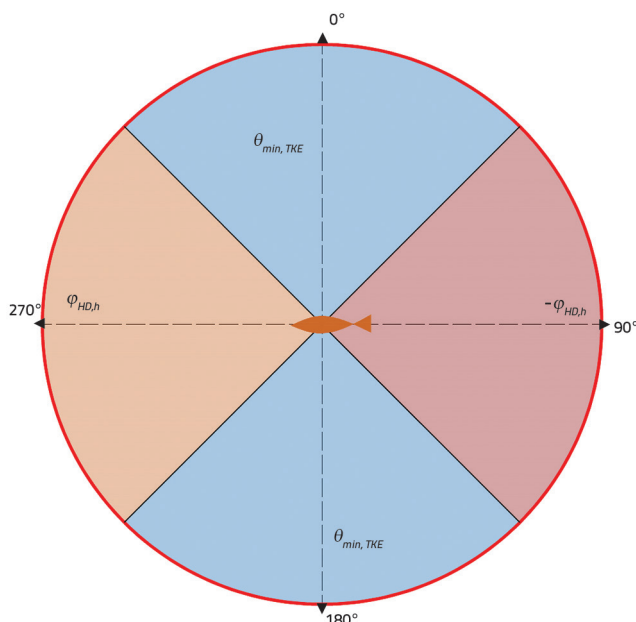
Aritmetički izrazi, koji su korišteni pri uspostavljanju ABM-a, opisani su u nastavku. Omočena površina ribe (A) dana je prema [4]:

$$A = 0,4L^2 \text{ [m}^2\text{]} \tag{2}$$

Relativni smjer kretanja agenta ( $\theta_{ref}$ ) na temelju 2D polja smjera strujanja i TKE, dobivenih hidrodinamičkim modelom, opisan je logičkom formulacijom:

$$\theta_{agent,rel} \text{ [m/s]} = \begin{cases} \varphi_{HD,h}, & \sin(\varphi_{HD,h}) < 0 \wedge |\sin(\varphi_{HD,h})| > |\cos(\varphi_{HD,h})| \\ \theta_{min,TKE}, & \sin(\varphi_{HD,h}) < 0 \wedge |\sin(\varphi_{HD,h})| < |\cos(\varphi_{HD,h})| \\ -\varphi_{HD,h}, & \sin(\varphi_{HD,h}) > 0 \wedge |\sin(\varphi_{HD,h})| > |\cos(\varphi_{HD,h})| \\ \theta_{min,TKE}, & \sin(\varphi_{HD,h}) > 0 \wedge |\sin(\varphi_{HD,h})| < |\cos(\varphi_{HD,h})| \end{cases} \tag{3}$$

gdje je ( $\varphi_{HD,h}$ ) smjer vektora strujanja vode u horizontalnoj ravnini dobivena hidrodinamičkim modelom. Shematski prikaz odabira smjera gibanja agenta na temelju hidrodinamičkih utjecaja u svojoj okolini dan je na slici 5.



Slika 5. Shematski prikaz odabira smjera kretanja agenta na temelju hidrodinamičkih utjecaja u svojoj okolini (polje strujanja i TKE)

Ciljana brzina kretanja agenta ( $v_{agent,rel}$ ) na temelju 2D polja strujanja (smjeri i brzine), dobivenog hidrodinamičkim modelom, opisana je logičkom formulacijom:

$$v_{agent,rel} \text{ [m/s]} = \begin{cases} v_{HD,h}, & \sin(\varphi_{HD,h}) < 0 \wedge v_{HD,h} > 0,2 \\ v_{agent,C}, & \sin(\varphi_{HD,h}) < 0 \wedge v_{HD,h} < 0,2 \\ v_{agent,B}, & \sin(\varphi_{HD,h}) > 0 \wedge v_{HD,h} > 0,9 \\ v_{agent,C}, & \sin(\varphi_{HD,h}) > 0 \wedge v_{HD,h} < 0,9 \end{cases} \tag{4}$$

gdje je ( $v_{HD,h}$ ) brzina strujanja vode u horizontalnoj ravnini dobivena hidrodinamičkim modelom. Granične vrijednosti ( $v_{HD,h}$ ), na temelju kojih agent odabire hoće li se kretati brzinom strujanja vode, produženom ili kratkotrajnom brzinom, definirane su prema [14].

Bezdimenzijski koeficijent otpora oblika ribe strujanju ( $C_b$ ) dan je izrazom (5) ovisno o iznosu ( $v_{HD,h}$ ):

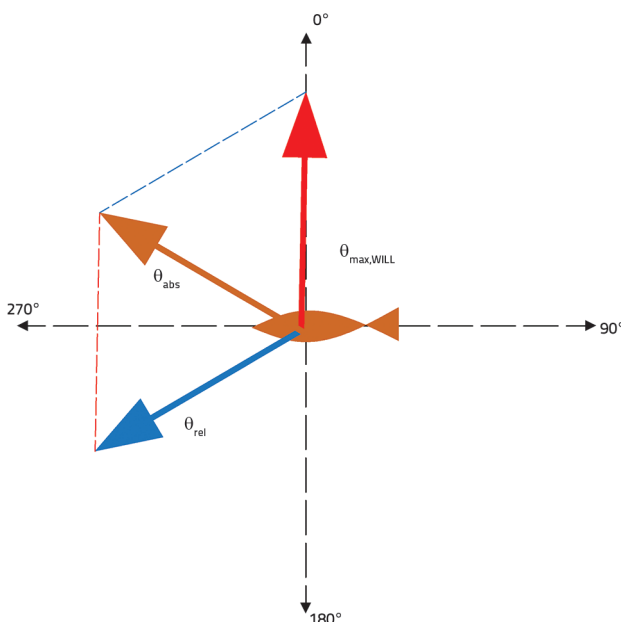
$$C_b [1] = \begin{cases} 10, & v_{HD,h} < 0,2 \\ 30, & 0,2 < v_{HD,h} < 0,9 \\ 150, & v_{HD,h} > 0,9 \end{cases} \tag{5}$$

Time je promjena ( $C_b$ ) opisana rastućom stepenastom funkcijom. Usvojena je pretpostavka da, uslijed povećanja brzine strujanja i potrebe agenta da svlada struju toka, dolazi do povećanja vrijednosti ( $C_b$ ). S obzirom na to da autorima nisu poznate točne vrijednosti ( $C_b$ ), usvojena je pretpostavka da promjena koeficijenta značajno raste ovisno o povećanju relativne brzine kretanja agenta. Pretpostavke su usvojene na temelju radova [15, 16] u kojima je navedeno da upravo vrijednost ( $C_b$ ) raste

3-5 puta kako se intenzivira gibanje ribe (prostorno gibanje kroz fluid te lokalne kontrakcije i savijanja tijela ribe). Ako se promatra gibanje agenta u uvjetima brzine strujanja manjom od 0,2 [m/s], usvojena je vrijednost ( $C_p$ ) = 10. Ako se promatra gibanje agenta u uvjetima brzine strujanja između 0,2 i 0,9 [m/s], usvojen je ( $C_p$ ) = 30 (tri puta veća vrijednost u odnosu na gibanje u uvjetima manjih brzina strujanja). Pri brzinama strujanja toka većima od 0,9 [m/s], usvojena je vrijednost ( $C_p$ ) = 150 (pet puta više u odnosu na gibanje u uvjetima brzina 0,2 do 0,9 [m/s]). Apsolutni smjer gibanja agenta ( $\theta_{abs}$ ), koji predstavlja rezultantni smjer uzimajući u obzir hidrodinamičke utjecaje (brzina i smjer strujanja, TKE) i pretpostavljeno 2D polje hormona, dan je prema izrazu:

$$\theta_{abs} = f(v_{agent,rel}, \theta_{rel}, v_{agent,rel}, \theta_{max,WILL}) [^\circ] \quad (6)$$

gdje je ( $\theta_{abs}$ ) iskazan kao funkcija parametara ( $v_{agent,rel}$ ), ( $\theta_{rel}$ ) i ( $\theta_{max,WILL}$ ). Tom je funkcijom određen konačni smjer gibanja agenta na temelju podataka o dvama vektorima. Prvi i drugi element u zagradi odnose se na brzinu i smjer prvog vektora, a treći i četvrti na brzinu i smjer drugog vektora. Valja napomenuti da je, s obzirom na to da se ovom funkcijom želi dobiti isključivo smjer kretanja agenta, pretpostavljen jednak iznos (brzina) dvaju vektora čija se rezultanta traži. Na taj se način agentu omogućuje detekcija i odabir konačnog smjera u kojem se kreće s obzirom na hidrodinamičke utjecaje i polje hormona koje raspoznaje u svojoj okolini. Shema određivanja apsolutnog smjera gibanja agenta prikazana je na slici 6.



Slika 6. Shematski prikaz odabira apsolutnog smjera kretanja agenta ( $\theta_{abs}$ )

Apsolutna brzina gibanja agenta ( $v_{agent,abs}$ ), koja predstavlja rezultantnu brzinu s obzirom na ( $v_{agent,rel}$ ) i smjer željenog

vlastitog gibanja ( $\theta_{abs}$ ) te brzinu ( $v_{HD,h}$ ) i smjer strujanja ( $\varphi_{HD,h}$ ), dana je izrazom (7):

$$v_{agent,abs} = f(v_{agent,rel}, \theta_{abs}, v_{HD,h}, \varphi_{HD,h}) [m/s] \quad (7)$$

gdje je ( $v_{agent,abs}$ ) iskazana kao funkcija parametara ( $v_{agent,rel}$ ), ( $\theta_{abs}$ ), ( $v_{HD,h}$ ) i ( $\varphi_{HD,h}$ ). Prva dva člana u zagradi opisuju relativni vektor gibanja agenta, a s preostala dva člana opisan je vektor strujanja toka vode u horizontalnoj ravnini. Analogno shematskom prikazu odabira apsolutnog smjera kretanja agenta (slika 6.), agent odabire rezultantnu brzinu vlastitog gibanja. Razlika u odnosu na funkciju ( $\theta_{agent,abs}$ ) može se uočiti u iznosima dvaju vektora i rezultatu koji funkcija daje, a to je iznos rezultantnog vektora. Na ovaj način omogućena je simulacija brzine i smjera kojim se agent želi kretati (relativno gibanje agenta) čemu se suprotstavlja vektor strujanja. Valja napomenuti da su funkcije ( $\theta_{agent,abs}$ ) i ( $v_{agent,abs}$ ) predefinirane unutar softvera korištenog za analize, a izrazi (6) i (7) predstavljaju poopćene izraze dviju funkcija.

Snaga agenta ( $P$ ), koja je ključna pri analizi vremenske promjene varijable procesa - energije (1), dana je prema izrazu:

$$P[W] = \begin{cases} 0, & v_{agent,rel}^3 = v_{HD,h} \\ -0,5\rho_v C_b v_{agent,rel}^3 & \text{inače} \end{cases} \quad (8)$$

Taj je ovaj izraz dobiven na temelju jednadžbe za izračun sile otpora tijela ribe strujanju. Usvojena je pretpostavka da, u slučaju relativnog gibanja agenta brzinom ( $v_{HD,h}$ ), snaga ( $P$ ) jednaka je 0, tj. nema utroška energije. S obzirom na to da je agentu dopušteno gibanje brzinom strujanja samo u slučaju njegovog gibanja u smjeru strujanja (pogledati izraz (4)), do utroška energije dolazi samo u slučaju gibanja agenta produženom ili kratkotrajnom brzinom.

Konačni vektor gibanja agenta određen je svojim komponentama u horizontalnoj ravnini i vertikalnom smjeru. U horizontalnoj ravnini definirani su sljedeći izrazi za izračun smjera (9) i brzine (10) gibanja agenta:

$$\theta_{agent,h} [^\circ] = \begin{cases} \theta_{agent,abs}, & E > 0 \\ \varphi_{HD,h}, & E < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$v_{agent,h} [m/s] = \begin{cases} v_{agent,abs}, & E > 0 \\ v_{HD,h}, & E < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Konačni smjer u horizontalnoj ravnini ( $\theta_{agent,FIN}$ ) jednak je apsolutnom smjeru kretanja agenta u slučaju da njegova energija nije utrošena, odnosno u smjeru strujanja u slučaju da potroši svoju energiju (agent je nošen u smjeru struje vode u slučaju potrošnje čitave raspoložive energije). Konačna brzina ( $v_{agent,FIN}$ ) jednaka je apsolutnoj brzini kretanja agenta u slučaju da njegova energija nije utrošena, odnosno brzini strujanja u

slučaju da potroši svoju energiju (agent je nošen brzinom struje vode u slučaju potrošnje čitave raspoložive energije).

Zadnji element, nužan za definiranje konačnog vektora gibanja agenta, odnosi se na vertikalnu brzinu ( $v_{agent,V}$ ) danu prema izrazu:

$$v_{agent,V} [m/s] = \begin{cases} -v_{HD,V}, & z = 0 \\ v_{HD,V}, & z = d \\ 0, & 0 < z < d \end{cases} \quad (11)$$

gdje je ( $v_{HD,V}$ ) brzina strujanja vode u vertikalnom smjeru dobivena hidrodinamičkim modelom (pozitivan smjer od površine prema dnu),  $z \in [0, d]$  trenutačni vertikalni položaj agenta, a  $d$  maksimalna dubina vode u ribljaz stazi za trenutačni položaj agenta. Konačna vertikalna brzina kretanja agenta jednaka je negativnoj vrijednosti vertikalne brzine strujanja u slučaju da agent dodirne dno (za  $z=d$  agent se počinje kretati od dna prema površini), odnosno pozitivnoj vrijednosti vertikalne brzine strujanja u slučaju da agent dodirne površinu vode ( $z=0$ , kretanje od površine prema dnu). U slučaju da se agent nalazi unutar vodnog stupca, pretpostavljeno je da se njegovo gibanje dominantno odvija u horizontalnoj ravnini, stoga je usvojeno da ( $v_{agent,V}$ ) iznosi 0 [m/s].

Procedura kalibracije ABM-a odnosi se na razvoj izvornog ECOLab predloška, što podrazumijeva definiranje seta prije opisanih i međusobno ovisnih aritmetičkih izraza te softverski predefiniciranih senzorskih i ostalih funkcija. Taj su predložak razvili isključivo autori ovoga rada pri čemu je softver korišten samo kao alat kojim je omogućen njegov lakši razvoj. Zbog nedostatka podataka o plivanju ribe kroz riblje staze konfiguracija sličnih kao što je analizirano u sklopu ovoga istraživanja, verifikacija ABM-a provedena je na temelju dosada provedenih istraživanja u kojima je opisano gibanje ribe u turbulentnim tokovima. Samo je u jednom radu [18] prikazana trajektorija ribe pri njenom prolasku kroz vertikalni otvor što je također poslužilo za potrebe verifikacije modela, tj. razvoj konačnog ECOLab predloška. Valja napomenuti da je u sklopu kalibracije najveća pozornost usmjerena prema odabiru adekvatne vrijednosti radijusa utjecaja. Izbor radijusa utjecaja dviju senzorskih funkcija vezan je uz modelsku prostornu diskretizaciju, a usvajanje navedene vrijednosti rezultira relativno glatkom putanjom ribe kroz riblju stazu. Povećanje vrijednosti radijusa utjecaja u odnosu na usvojenu vrijednost dovodi do trajnog zadržavanja agenta ispred

pregrada koje međusobno omeđuju bazene riblje staze. Međutim, u slučaju izbora manje vrijednosti radijusa od usvojene vrijednosti, agent se počinje intenzivno kretati i ortogonalno na njenu osnovnu putanju. U oba je slučaja utvrđena, osim nepravilnije trajektorije, značajno veća potrošnja energije za svladavanje jednake udaljenosti. Prema navedenom, radijus utjecaja prepoznat je kao najosjetljiviji parametar što se tiče konačnih rezultata vezanih uz izgled trajektorije pri prolasku kroz riblju stazu kao i potrošnju energije agenta.

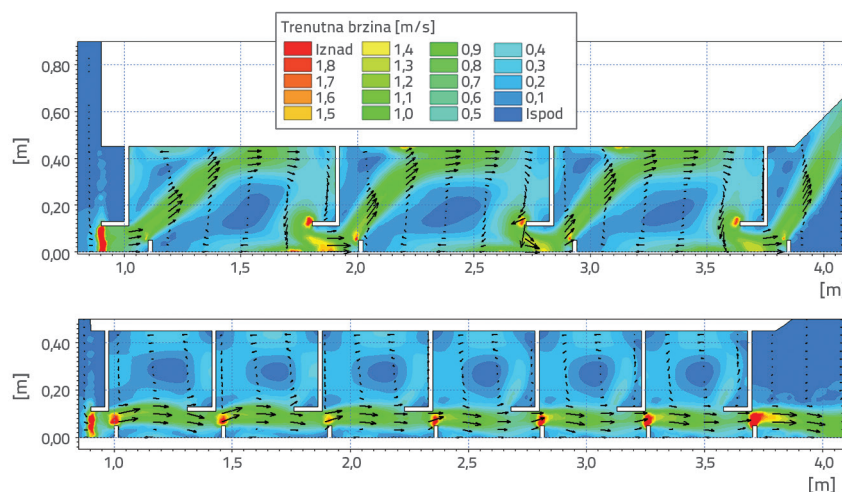
Ukupno su prikazani rezultati 6 ABM numeričkih simulacija (tablica 1.), od kojih se polovica odnosi na plivanje ribe kroz riblju stazu RS-90, a druga polovica kroz riblju stazu RS-45. U svim situacijama početna je pozicija ribe na ulazu u riblju stazu, tj. na polovici nizvodne otvorene granice modela. Simulacije za dvije konfiguracije riblje staze razlikuju se u definiranom polju TKE i dubini upuštanja agenta-ribe kako bi se interpretirala trajektorija agenta u slučaju prolaska kroz pojedini  $\sigma$ -sloj. Korišten je vremenski korak proračuna od 0,05 [s].

### 3. Modelski rezultati i rasprava

Slika 7. prikazuje vertikalno usrednjena polja strujanja, a slika 8. polje TKE u vertikalnom presjeku kroz riblju stazu. Slike 9. i 10. prikazuju usporedbu izmjerenih i modeliranih vertikalno

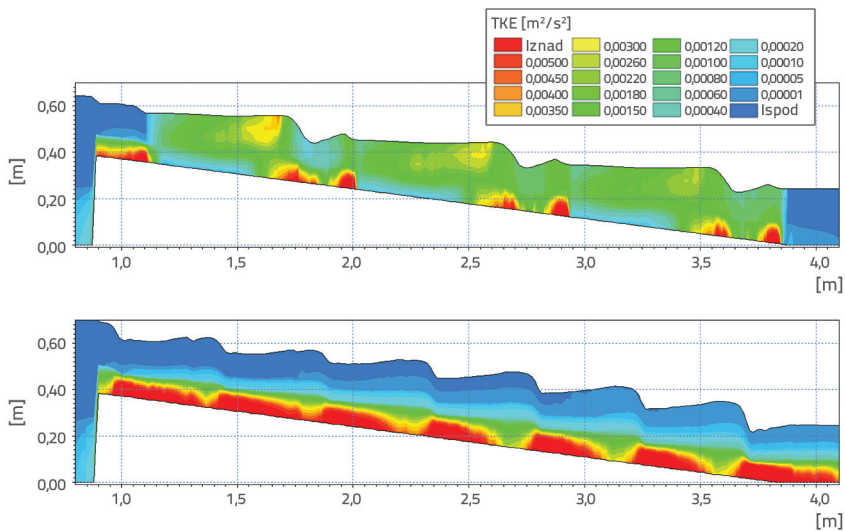
Tablica 1. Setovi ABM simulacija

Red. br.	Konfiguracija	2D polje TKE	Dubina upuštanja agenta [m]
1	RS-90	Peti (površinski) $\sigma$ -sloj	0,05
2	RS-45		
3	RS-90	Treći (srednji) $\sigma$ -sloj	0,12
4	RS-45		
5	RS-90	Prvi (pridneni) $\sigma$ -sloj	0,22
6	RS-45		



Slika 7. Vertikalno usrednjena polja strujanja (gore - bazeni duljine 90 cm, dolje - bazeni duljine 45 cm)

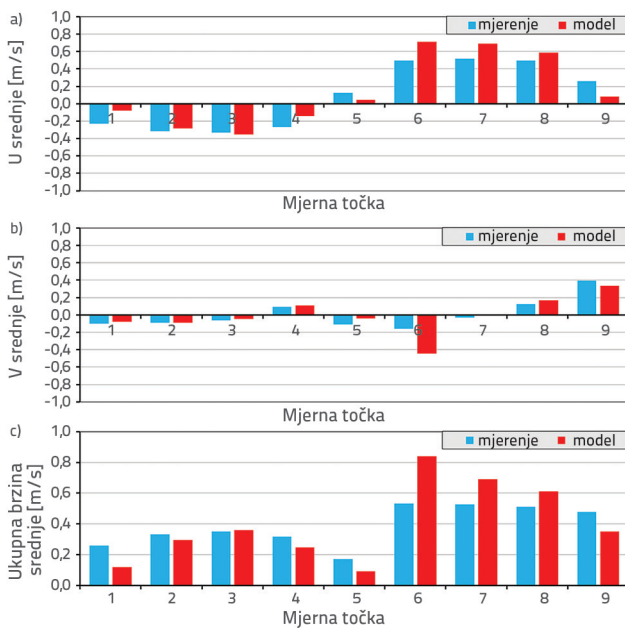




Slika 8. Polja turbulentne kinetičke energije u vertikalnom presjeku kroz riblju stazu (gore: RS-90, dolje: RS-45)

usrednjenih brzina strujanja za pozicije mjernih točaka (mjerne točke 1-9, vidi slika 2.).

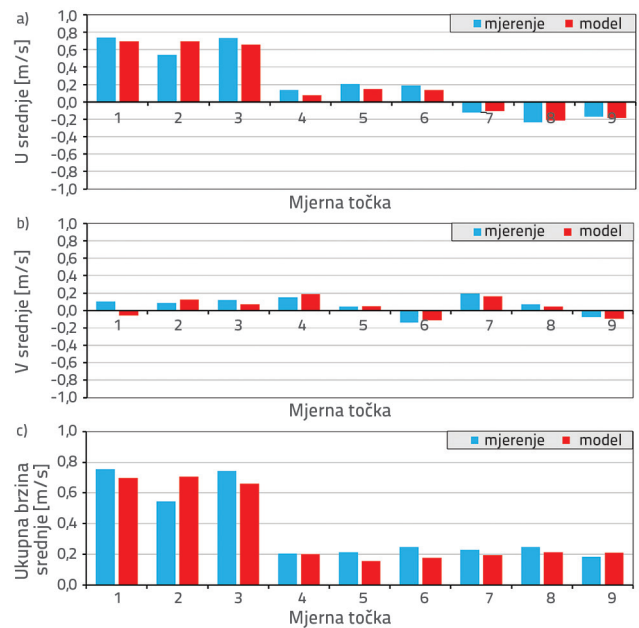
Polja brzine strujanja i TKE znatno se razlikuju za analizirane konfiguracije ribljih staza. Za RS-90 karakterističan je odmak struje glavnog toka od otvora prema lijevoj stijenci kanala te pojava više tzv. recirkulacijskih zona unutar bazena u kojima su brzine izuzetno male. U slučaju RS-45 može se uočiti da se strujanje pretežno odvija uz desnu stijenu kanala, a recirkulacijska se zona proteže od lijevog ruba otvora do lijeve stijene kanala unutar svih bazena.



Slika 9. Usporedba izmjerene i modelirane vertikalno usrednjene U (gore) i V (sredina) komponente te ukupne brzine strujanja (dolje) za riblju stazu sa bazenima duljine 90 [cm]

Maksimalne brzine strujanja u RS-90 prisutne su na uzvodnom rubu središnje (veće) pregrade, a u RS-45 javljaju se neposredno nizvodno od lateralne (manje) pregrade. Općenito, veće brzine strujanja javljaju se za RS-45 što se može vidjeti na grafičkim prikazima vertikalno usrednjenih U i V komponenti te iznosa ukupne brzine strujanja danim ispod (slike 9. i 10.).

Najveća TKE javlja se u pridnenom sloju. Na temelju pregleda uzdužnog profila kroz vertikalne otvore, može se utvrditi da su vrijednosti TKE veće pri dnu za RS-45 u odnosu na RS-90. Od srednjeg  $\sigma$ -sloja prema površini vode može se uočiti veća TKE, tj. intenzivnija turbulencija za RS-90 u odnosu na RS-45 (slike 8., 11. do 13.).



Slika 10. Usporedba izmjerene i modelirane vertikalno usrednjene U (gore) i V (sredina) komponente te ukupne (dolje) brzine strujanja za riblju stazu s bazenima duljine 45 cm

Kalibracija modela provedena je na temelju usporedbe vertikalno usrednjenih izmjerenih i modelom dobivenih brzina strujanja. Za obje konfiguracije ribljih staza uspoređene su brzine strujanja u 9 mjernih točaka (slika 2.) pri čemu su, u sklopu analize pouzdanosti rezultata numeričkog modela, izračunana dva statistička parametra - srednja apsolutna pogreška  $\Delta_{abs}$  (12) i koeficijent determinacije  $R^2$  (13) [33]:

$$\Delta_{abs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{model,i} - y_{mjerene,i}| \quad [m/s] \quad (12)$$

Tablica 2. Statistički parametri  $\Delta_{ABS}$  i  $R^2$  u sklopu analize pouzdanosti numeričkih modela ribljih staza s vertikalnim otvorima RS-90 i RS-35

	RS-90			RS-45		
	U srednje [m/s]	V srednje [m/s]	Ukupna brzina [m/s]	U srednje [m/s]	V srednje [m/s]	Ukupna brzina [m/s]
$\Delta_{ABS}$ [m/s]	0,118	0,060	0,058	0,058	0,043	0,058
$R^2$	0,910	0,753	0,833	0,962	0,713	0,909

$$R^2 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{model,i} - \overline{y_{mjerjenje,i}})^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{mjerjenje,i} - \overline{y_{mjerjenje,i}})^2} [1] \quad (13)$$

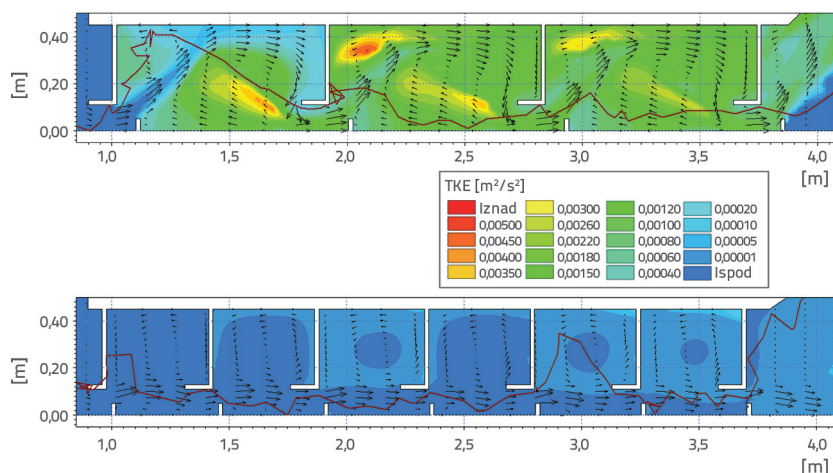
gdje su:  $y_{mjerjenje}$  izmjerene,  $y_{model}$  modelom dobivene vrijednosti U i V komponenti te ukupne brzine strujanja vode,  $i = 1, \dots, 9$  broj mjernih točaka u srednjem bazenu modela.

U tablici 2. prikazane su vrijednosti  $\Delta_{ABS}$  i  $R^2$  vertikalno usrednjenih vrijednosti U i V komponenti te ukupne brzine strujanja za obje konfiguracije riblje staze.

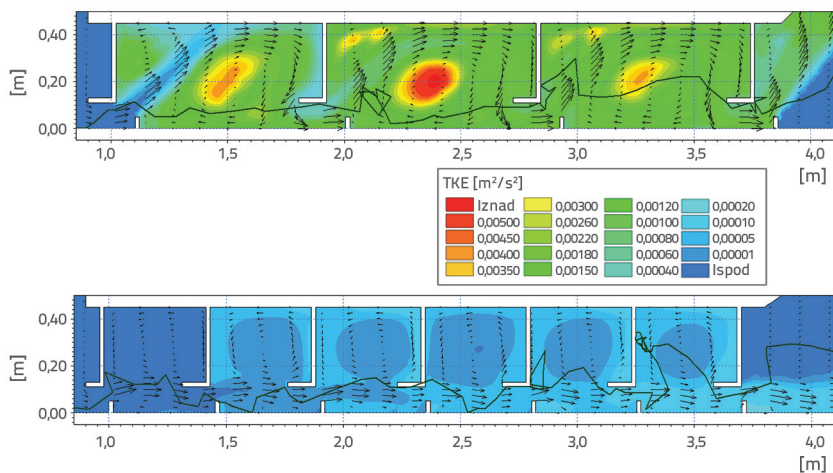
Na temelju pregleda polja strujanja (slika 7.), usporedbe vertikalno usrednjenih izmjerenih i modeliranih brzina strujanja (slike 9. i 10.) te analize dvaju statističkih parametara, može se utvrditi da numerički model RS-45 daje pouzdanije rezultate u odnosu na RS-90. U horizontalnoj ravnini oba modela pokazuju veću pouzdanost kod izračuna U komponente u odnosu na V komponentu strujanja. Najveće pogreške javljaju se u simulacijama modela RS-90 na mjernim točkama bližima lijevoj granici modela (točke 6-8, slika 2.) gdje model precjenjuje vrijednosti brzine. Treba uzeti u obzir da se radi o izuzetno turbulentnom toku dok je kalibracija provedena na temelju mjerenja u nekoliko točaka. Pri analizi rezultata važno je uzeti u obzir i izgled polja brzina strujanja. Prema tome, polje strujanja dobiveno uspostavljenim numeričkim modelima odgovara polju strujanja prisutnom u ovakvim konfiguracijama ribljih staza što je evidentno iz prijašnjih istraživanja [3, 12, 18, 17, 34, 35].

Slika 11. daje uvid u trajektorije ribe pri njenom uzvodnom prolasku kroz riblju stazu. Osim trajektorija ribe, na slikama su prikazana 2D polja TKE te vektori brzine strujanja. Ukupna trajektorija ribe dana je na temelju lokacije zabilježene svakih 0,1 [s], tj. svaki drugi vremenski korak ABM simulacije. Osim trajektorija, dani su

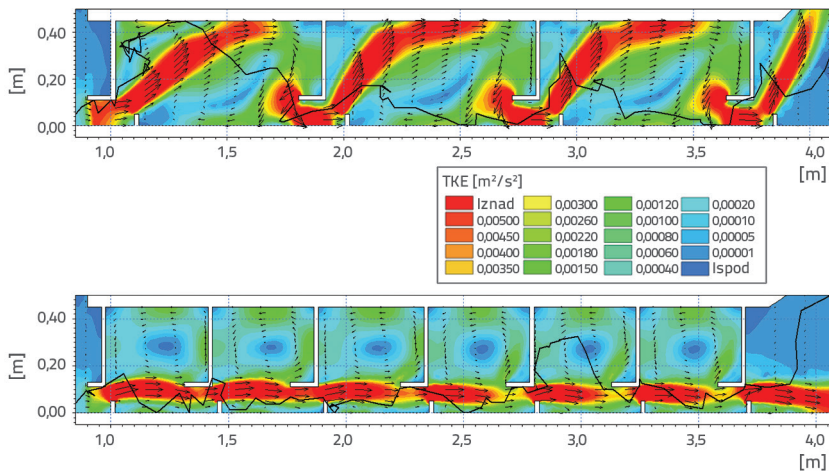
prikazi potrošnje energije ribe prilikom njenog uzvodnog plivanja. Valja napomenuti da je početna vrijednost energije ribe definirana u iznosu od 1 [J], a rezultati će se prikazati za svaki deseti vremenski korak ABM simulacije (svakih 0,5 [s]) u obliku postotka preostale raspoložive energije. Početni iznos energije proizvoljno je definiran s obzirom na to da raspoloživu energiju ribe pri ulasku u riblju stazu nije moguće točno kvantificirati.



Slika 11. Trajektorije ribe pri njenom uzvodnom prolasku kroz riblju stazu (gore - RS-90, dolje - RS-45) na kombiniranoj podlozi polja TKE i vektora brzina strujanja u petom (površinskom)  $\sigma$ -sloju. Agent upušten na dubini od 0.05 [m]



Slika 12. Trajektorije ribe pri njenom uzvodnom prolasku kroz riblju stazu (gore - RS-90, dolje - RS-45) na kombiniranoj podlozi polja TKE i vektora brzina strujanja u trećem (srednjem)  $\sigma$ -sloju; agent upušten na dubini od 0,12 [m]



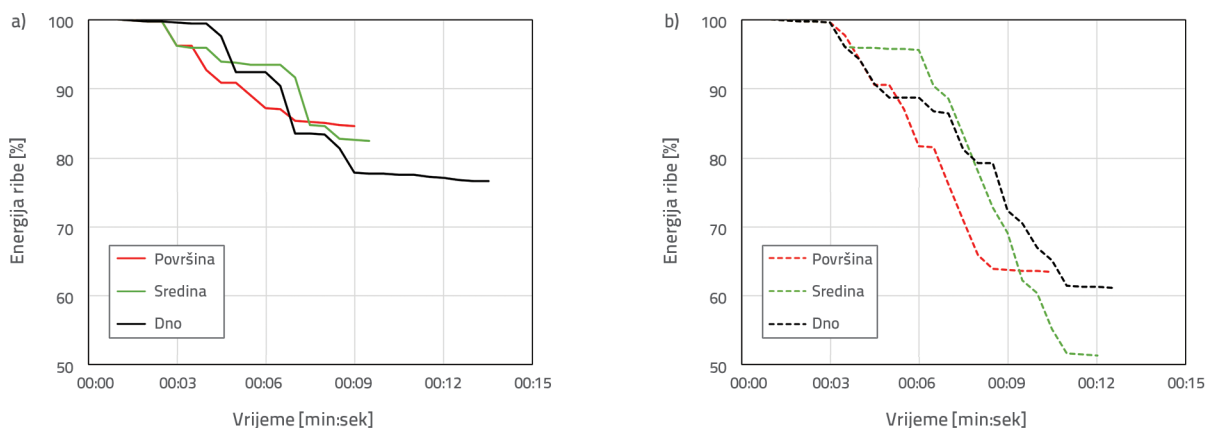
Slika 13. Trajektorije ribe pri njenom uzvodnom prolasku kroz riblju stazu (gore: RS-90, dolje: RS-45) na kombiniranoj podlozi polja TKE i vektora brzina strujanja u prvom (pridnenom)  $\sigma$ -sloju; agent upušten na dubini 0,22 [m]

Verifikacija rezultata uspostavljenog ABM-a kretanja agenta - ribe kroz riblju stazu provedena je na temelju dostupnih informacija o mehanizmima ili obrascima ponašanja te zabilježenih (snimljenih kamerom) trajektorija ribe pri prolasku kroz riblju stazu s konfiguracijom koja je slična korištenoj u ovome radu [18]. Isti autori pokazali su i prilagodljivost riba struji toka s aspekta odabira vlastite brzine kretanja, ovisno o brzini strujanja vode što je potvrda jedne od fundamentalnih pretpostavki pri definiranju odabira brzine kretanja agenta unutar ABM-a uspostavljenog u sklopu ovog istraživanja. Dosad istraženi obrasci ponašanja riba u ribljim stazama, opisani u uvodnom dijelu, mogu se jasno prepoznati na temelju dobivenih rezultata (slike 11. do 14.). Prilikom gibanja agenta uočena je tendencija da izbjegava područja veće turbulencije, tj. veće vrijednosti TKE. Nadalje, u području većih brzina te posebice na mjestima vertikalnih otvora uspješno je simulirano korištenje kratkotrajne brzine kako bi agent svladao strujanje. S druge strane, u području mirnijeg toka te manjih brzina strujanja, što se pretežno odnosi na prostor bazena, agent koristi produženu

brzinu kako bi se gibao uzvodno. Prilikom gibanja u smjeru strujanja agent koristi struju toka što rezultira manjim utroškom energije (slika 14.). Naposljetku, prilikom pojave nagle promjene smjera i brzine strujanja, dolazi do dezorijentacije agenta što se jasno može vidjeti za konfiguraciju RS-90 pri izlasku agenta iz srednjeg prema zadnjem uzvodnom bazenu (slika 13. gore).

Na temelju dobivenih trajektorija može se uočiti da agent češće koristi recirkulacijske zone u RS-90 u odnosu na RS-45 što ujedno rezultira manjom potrošnjom energije pri plivanju. Vremena prolaska kroz riblje staze u rasponu su od 7 do 14 [s], što se može vidjeti prikazom vremenskih serija potrošnje energije ribe, uz napomenu da je zabilježen kraći

boravak agenta u RS-90 (slika 14.). Zadnji vremenski korak na spomenutim prikazima označava ujedno i izlazak agenta iz prostorne domene numeričkog modela kroz uzvodnu otvorenu granicu. Uzimajući to u obzir, može se utvrditi da RS-90 predstavlja povoljniju konfiguraciju riblje staze u odnosu na RS-45. Za RS-90 najmanji utrošak energije primijećen je tijekom plivanja ribe kroz površinski, a najveći kroz pridneni  $\sigma$ -sloj. To je očekivano s obzirom na najintenzivniju tubulenciju u pridnenom sloju. Treba napomenuti, s obzirom na to da numerički model RS-90 uz lijevu stijenku kanala (točke 6-8, slike 2. i 9.) precjenjuje vrijednosti brzine strujanja da je opravdano tvrditi kako je u realnosti mogući i manji utrošak energije ribe pri prolasku kroz riblje staze ovakve konfiguracije. U slučaju RS-45, najmanji utrošak energije javlja se pri plivanju ribe također kroz površinski sloj, a plivanje ribe u srednjem sloju rezultira najvećim utroškom energije. Svakako treba napomenuti da se rezultate simulacija ne treba percipirati kao apsolutno točne, već kao korisne u relativnom smislu, budući da omogućuju usporedbu performansi razmatranih varijanti ribljih staza.



Slika 14. Potrošnja energije ribe pri njenom uzvodnom prolasku kroz riblju stazu (lijevo: RS-90, desno: RS-45) na kombiniranoj podlozi polja TKE i vektora brzina strujanja u pojedinom  $\sigma$ -sloju

#### 4. Zaključak

Za dva oblika riblje staze bazenskog tipa s vertikalnim otvorima uspostavljeni su fizikalni i numerički 3D modeli strujanja, a numerički model nadograđen je izvornim ABM-om uzvodnog plivanja ribe. Rezultati mjerenja strujanja na fizikalnom modelu (9 mjernih točaka u tri vertikalna sloja) poslužili su za kalibraciju i verifikaciju hidrodinamičke komponente numeričkog modela, dok su rezultati dosadašnjih istraživanja kretanja riba u turbulentnim tokovima i izgleda trajektorija prilikom plivanja ribe kroz slične riblje staze korišteni za verifikaciju uspostavljenog ABM-a. U kontekstu ovoga ABM-a agenti - ribe imaju senzorsku sposobnost prepoznavanja optimalnih okolišnih uvjeta (polja brzine strujanja i turbulentne kinetičke energije) i kognitivne reakcije u smislu promjene smjera i brzine svoga kretanja, a sve s ciljem minimizacije potrošnje vlastite energije. Osim navedenih abiotičkih čimbenika, osnovna motivacija za gibanje agenta definirana je kao monotono rastuće polje hormona u uzvodnom smjeru (na uzvodnoj granici modela javlja se maksimalna vrijednost hormona). Prikazani su rezultati ukupno šest numeričkih simulacija, pri čemu se polovica odnosi na RS-90, a polovica na RS-45. Simulacije se razlikuju s obzirom na dubinu na kojoj je upušten agent-riba (u pridrenom, srednjem i površinskom modelskom sloju).

Na temelju modelskih trajektorija agenata - riba prepoznato je kretanje karakterizirano izbjegavanjem područja intenzivne turbulencije te odabirom vlastitog smjera i brzine plivanja ovisno o brzini i smjeru strujanja vode. Osim toga, uspostavljenim ABM-om uspješno je simulirana i dezorijentacija agenta na mjestu značajne promjene smjera i brzine što se smatra karakterističnim ponašanjem ribe izložene ovakvim uvjetima strujanja. Nadalje, rezultati provedenih simulacija pokazali su da izvedba riblje staze s manjim brojem bazena (veća duljina bazena) rezultira manjim utroškom energije ribe. Iako je ovaj zaključak intuitivno jasan i unaprijed očekivan, dobiveni rezultati provedenog istraživanja kvantitativno potvrđuju to očekivanje. Prednost duljih bazena ostvarena je prije svega kroz iskorištavanje recirkulacijskih

zona koje imaju izraženije povratno strujanje (vektor strujanja usmjeren uzvodno) na dijelovima putanje ribe kroz riblju stazu. Stoga, može se zaključiti da je konfiguracija riblje staze s manjim brojem duljih bazena povoljnija u odnosu na konfiguraciju s većim brojem kraćih bazena.

U kontekstu ABM-a, dosadašnjim je istraživanjima uglavnom obrađeno modeliranje jedinki riba kao agenata koji raspoznaju abiotičke čimbenike u svojoj okolini (hidrodinamički faktori, kemijski parametri i sl.) u kombinaciji s biheviorističkim sposobnostima, a sve samo s ciljem pronalaska ulaza u riblju stazu. Rezultati provedenog istraživanja, izloženog u ovom radu, upućuju na mogućnost unaprjeđenja dosadašnjih istraživanja primjenom ABM pristupa s komparativnim simulacijama plivanja ribe kroz riblje staze različitih konfiguracija. Stoga, ovim se radom pokazuje još jedna mogućnost implementacije ABM-a u svrhu rješavanja realnih problema sa kojima se okolišno inženjerstvo susreće.

Treba napomenuti da u sklopu izloženog istraživanja gibanje ribe u zadanom polju brzine ne uključuje interakciju između ribe i toka, odnosno promjenu polja brzine uslijed prisutnosti ribe. To može biti značajno tijekom prolaska kroz otvore u ribljoj stazi, gdje je živi presjek znatno manji od presjeka u recirkulacijskoj zoni. Tijekom prolaska kroz otvore se poprečni presjek reducira, te se time mijenja i polje brzine, a posljedično i otpori gibanja. Stoga, u nastavku istraživanja planira se nadogradnja modela s navedenom komponentom.

Ovim je radom, na primjeru jednog pilot-modela, prikazan suvremeni metodološki pristup zasnovan na modeliranju fizičkih procesa. Takav bi pristup trebalo primijeniti u projektiranju ribljih staza u inženjerskoj praksi kao alternativu dosadašnje primjene jednostavnih empirijskih obrazaca.

#### Zahvala

Ovo istraživanje financirano je iz sredstava projekta Hrvatske zaklade za znanost (DOK-2020-01) i projekta ProtectAS (KK 05.1.1.02.0013).

#### LITERATURA

- [1] Jovanović, M.: Riblje staze u sklopu 'naturalnog' uređenja malih vodotoka, *Vodoprivreda*, 43 (2011) 4-6, pp. 217-226.
- [2] PIANC: Fish passage, report n° 127, Bruxelles, Belgija, 2013.
- [3] Ocvirk, E., Gilja, G., Jelić, D., Bujak, D., Cikojević, A., Đerek, I., Marić, M., Martinović, D.: Planiranje i projektiranje ribljih staza, Konačna studija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, Republika Hrvatska, 2018.
- [4] Web, P.W.: Hydrodynamics and energetics of fish propulsion, *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, Information Canada, Ottawa, 1975.
- [5] Beamish, F.W.H.: Swimming capacity (Chapter), *Fish physiology*, (eds. Hoar, W.S., Randall, D.J.), Randall, Academic Press, New York, pp. 101-187, 1978.
- [6] Katopodis, C.: Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works, *Journal of Hydraulic Research*, 43 (2005) 5, pp. 451-467,
- [7] Liao, J.C.: The role of the lateral line and vision on body kinematics and hydrodynamic preference of rainbow trout in turbulent flow, *The Journal of Experimental Biology*, 209 (2006), pp. 4077-4090, 10.1242/jeb.02487
- [8] Liao, J.C.: The review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows, *Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences* 362 (2007) 1487, pp. 1973-1993, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2442850/> (10.02.2015.)

- [9] Silva, A.T., Santos, J.M., Ferreira, M.T., Pinheiro, A.N., Katopodic, C.: Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway, *River Research Application*, 27 (2011), pp. 360-373, [10.1002/rra.1363](https://doi.org/10.1002/rra.1363)
- [10] Sokoray-Varga, B., Weichert, R., Lehmann, B., Nestmann, F.: Time-Resolved PIV Measurements to Investigate the Characteristics of the Turbulent Structures in a Vertical-Slot Fish Pass, *The 9<sup>th</sup> International Symposium on Ecohydraulics*, Beč, 2012.
- [11] Callaud, D., Pineau, G., Texier, A., David, L.: Modification of vertical slot fishway flow with a supplementary cylinder, *Journal of Hydraulic Research*, 52 (2014) 5, pp. 614-629.
- [12] Callaud, D., Cornu, V., Bourtal, B., Dupuis, L., Refin, C., Courret, D., David, L.: Scale Effects of Turbulence Flows in Vertical Slot fishways: Field and Laboratory Measurement Investigation, *The 9<sup>th</sup> International Symposium on Ecohydraulics*, Beč, 2012.
- [13] Hockley, F.A., Wilson, C.A.M.E., Brew, A., Cable, J.: Fish responses to flow velocity and turbulence in relation to size, sex and parasite load, *Journal of the Royal Society Interface*, 11 (2014) 91, <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.0814>
- [14] Cai, L., Chen, J., Johnson, D., Zhiying, T., Huang, Y.: Effect of body length on swimming capability and vertical slot fishway design, *Global Ecology and Conservation*, 22 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00990>
- [15] Fish, F.E.: *Swimming Strategies for Energy Economy* (Chapter), *Fish Locomotion: An Eco-ethological Perspective*, 2010., pp. 90-122, <https://doi.org/10.1201/b10190-5>.
- [16] McKenzie, D.J.: *Swimming and other activities - Energetics of Fish Swimming*, *Encyclopedia of Fish Physiology*, 2011., pp. 1636-1644.
- [17] Tarrade, L., Texier, A., David, L., Larinier, M.: Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways, *Hydrobiologia*, 609 (2008), pp. 177-188.
- [18] Bermudez, M., Rodriguez, A., Cea, L.: Implications of fish behavior for vertical slot fishways design, *9<sup>th</sup> International Symposium on Ecohydraulics ISE 2012*, Beč, 2012.
- [19] Li, Y., Wang, X., Xuan, G., Liang, D.: Effect of parameters of pool geometry on flow characteristics in low slope vertical slot fishways, *Journal of Hydraulic Research*, 58 (2020) 3, pp. 395-407, <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1581666>
- [20] DeAngelis, D.L., Mooij, W.M.: Individual-based modeling of ecological and evolutionary processes, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 36 (2005), pp. 147-168.
- [21] Grimm, V., Railsback, S.F.: *Individual-Based Modeling and Ecology*, Princeton University Press, Princeton, NJ., 2005.
- [22] Macal, C.M., North, M.J.: Tutorial on agent-based modelling and simulation, *Journal of Simulation*, 4 (2010) 3, pp. 151-162
- [23] Epstein, J.M.: *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton University Press, Princeton, NJ., 2007.
- [24] Goodwin, R.A., Anderson, J.J., Nestler, J.M.: Decoding 3-D movement patterns of fish in response to hydrodynamics and water quality for forecast simulation, *6<sup>th</sup> International Conference on Hydroinformatics*, 2004., [https://doi.org/10.1142/9789812702838\\_0031](https://doi.org/10.1142/9789812702838_0031)
- [25] Goodwin, R.A., Nestler, J.M., Anderson, J.J., Weber, L.J., Loucks, D.P.: Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM), *Ecological Modelling*, 192 (2006), pp. 197-223, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.08.004>
- [26] FITHydro project - Agent based model, [https://www.fithydro.wiki/index.php/Agent\\_based\\_model](https://www.fithydro.wiki/index.php/Agent_based_model), 01.01.2021.)
- [27] De Bie, J., Benson, T., Gaskell, J., Kemp, P.S.: Development and application of an agent based model for glass eel selective tidal stream transport, *International Conference on Engineering and Ecohydrology for Fish Passage, cohdrology for Fish Passage*. 12. [https://scholarworks.umass.edu/fishpassage\\_conference/2018/December13/12](https://scholarworks.umass.edu/fishpassage_conference/2018/December13/12)
- [28] Heinänen, S., Chudzinska, M.E., Mortensen, J.B., En Teo, T.Z., Utne, K.J., Sivle, L.D., Thomsen, F.: Integrated modelling of Atlantic mackerel distribution patterns and movements: A template for dynamic impact assessments, *Ecological Modelling*, 387 (2018), pp. 118-133, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.08.010>
- [29] Rodi, W.: Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids, *Journal of Geophysical Research*, 92 (1987) C5, pp. 5305-5328.
- [30] Smagorinsky, J.: Some historical remarks on the use of nonlinear viscosities, *Large eddy simulations of complex engineering and geophysical flows*, (eds. Galperin, B., Orszag, S.), Cambridge University Press, pp. 1-34, 1993.
- [31] Loubens, G.: *Introduced species - Salmo gairdneri (Rainbow trout)* (Chapter), *Lake Titicaca - A Synthesis of Limnological Knowledge*, (eds. Dejoux, C., Iltis, A.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 420-426, 1992.
- [32] DHI: MIKE ECO Lab - Numerical Lab for Ecological and Agent Based Modelling, User Guide, pp. 133, 2017.
- [33] Wilkis, D.S.: *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Second edition, Department of Earth and Atmospheric Sciences, Cornell University, 2006.
- [34] Bermudez, M., Puertas, J., Cea, L., Pena, L., Balairon, L.: Balairon: Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways, *Ecological Engineering*, 36 (2010), pp. 1355-1364, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.013>
- [35] Marriner, B.A., Baki, A.B.M., Zgu, D.Z., Cooke, S.J., Katopodis, C.: The hydraulics of a vertical slot fishway: A case study on the multi-species Vianney-Legendre fishway in Quebec, Canada, *Ecological Engineering*, 90 (2016), pp. 190-202, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.032>