

(OPEN ACCESS)

A Laboratory Investigation of the Effect of Inflow System Configuration on the Hydraulic Performance of Octagonal Fish Ponds

Atefeh Moghbeli¹, Tahmine Fatehi², Mohammad Zounemat-Kermani^{*3}

1. Ph.D. Graduate of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: atefeh.moghbeli@agr.uk.ac.ir
2. M.Sc. Student of Water Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: fatehi.tahmine@gmail.com
3. Corresponding Author, Professor. Dept. of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: zounemat@uk.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Modern aquaculture faces significant challenges, including the inefficient distribution of feed particles and inadequate management of solid waste in culture ponds, both of which adversely affect water quality and fish health. Poor hydrodynamic conditions in fish ponds can result in low hydraulic efficiency, the formation of dead zones, and flow short-circuiting. Recirculating aquaculture systems (RAS) incorporating octagonal ponds offer promising solutions for intensive fish culture. Consequently, the proper design of these ponds is essential to ensure uniform feed distribution, effective waste removal, and optimal hydraulic performance. The present study aims to investigate the effect of submerged flow inlet system configurations on the residence time distribution of feed particles and hydraulic efficiency in octagonal culture tanks, with the goal of optimizing feeding performance and water circulation.
Article history: Received: 07.17.2025 Revised: 07.27.2025 Accepted: 08.08.2025	
Keywords: Feed residence time distribution, Hydraulic efficiency, Octagonal fish pond, Recirculating Aquaculture System (RAS), Submerged flow inlet configuration	
	Materials and Methods: This study was carried out through laboratory-scale modelling in an octagonal pond (100 × 100 × 50 cm) with a water depth of 20 cm. A submerged vertical inlet system equipped with three nozzles and five different configurations (β_1 to β_5) was employed to create both uniform and non-uniform flow velocity distributions throughout the water column. The total inflow rate was set at 3 liters per minute, resulting in a theoretical residence time of 60 minutes across all experiments. The experimental procedure was divided into two main parts: (1) evaluation of the residence time distribution (RTD) of feed particles by injecting 10 grams of feed and weighing the remaining/discharged mass, and (2) assessment of hydraulic efficiency through tracer injection and measurement of RTD curves. Hydraulic efficiency was evaluated based on the ratio of actual to theoretical residence time and classified into three levels: poor, acceptable, and high.
	Results: The results of the hydraulic efficiency experiments indicated that configuration β_1 , with an efficiency of less than 35%, fell into the 'poor' category. This was attributed to insufficient momentum and the

development of extensive dead zones, which corresponded to the highest amount of residual feed (5.63 g). Configurations β_4 (50% efficiency) and β_2 (efficiency below 60%) were classified as 'acceptable'. In contrast, configurations β_3 (approximately 85% efficiency) and β_5 (75% efficiency) demonstrated the highest hydraulic performance in the present experimental study, placing them in the 'high' efficiency category. These two configurations promoted effective flow mixing and minimized dead zones. Similarly, they exhibited the lowest levels of residual feed—4.52 g and 4.79 g for β_3 and β_5 , respectively—highlighting their superior performance in managing the residence time of uneaten feed. The β_5 configuration, characterized by an increasing velocity profile from the surface to the tank bottom—thereby maintaining lower velocities in the upper water layers—provided the optimal balance between high hydraulic efficiency and favorable conditions for cold-water species such as rainbow trout, which are sensitive to strong currents and sudden temperature fluctuations and therefore require stable hydraulic environments. Moreover, analysis of the RTD curves supported these findings: configuration β_1 displayed an early and narrow peak, indicative of short-circuiting within the pond, whereas configuration β_5 exhibited a delayed and broader peak, reflecting optimal flow mixing conditions.

Conclusion: The present laboratory study highlights that selecting the optimal configuration of a submerged inlet system plays a critical role in enhancing feed utilization efficiency and improving water quality in octagonal fish farming ponds. Intelligent design strategies for distributing flow velocity throughout the pond's water column—such as the β_5 configuration—can significantly contribute to achieving both high hydraulic efficiency and favourable hydrodynamic conditions for fish. These improvements are essential for ensuring the sustainability and operational efficiency of the aquaculture industry.

Cite this article: Moghbeli, Atefeh, Fatehi, Tahmine, Zounemat-Kermani, Mohammad. 2026. A Laboratory Investigation of the Effect of Inflow System Configuration on the Hydraulic Performance of Octagonal Fish Ponds. *Journal of Utilization and Cultivation of Aquatics*, 15 (2), 171-188.



© The Author(s).

Doi: 10.22069/japu.2025.23883.1969

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پیکربندی سامانه ورودی جریان بر عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های هشت‌ضلعی پرورش ماهی

عاطفه مقبلی^۱، ته‌مینه فاتحی^۲، محمد ذونعمت کرمانی^{۳*}

۱. دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
رایانامه: atefeh.moghbeli@agr.uk.ac.ir
۲. دانشجوی کارشناسی‌ارشد علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
رایانامه: fatehi.tahmine@gmail.com
۳. نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: zounemat@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی-پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷ واژه‌های کلیدی: پیکربندی ورودی جریان مستغرق، توزیع زمان ماند خوراک، حوضچه پرورش ماهی هشت‌ضلعی، راندمان هیدرولیکی، سامانه آبی‌پروری چرخشی (RAS)	سابقه و هدف: آبی‌پروری مدرن با چالش‌هایی نظیر توزیع ناکارآمد ذرات خوراک و مدیریت پسماندهای جامد در حوضچه‌های پرورش مواجه است که بر کیفیت آب و سلامت ماهیان تأثیر می‌گذارد. هیدرودینامیک نامطلوب حوضچه‌های پرورش ماهی منجر به راندمان هیدرولیکی پایین، تشکیل نواحی مرده و جریان کوتاه‌مدت می‌شود. سامانه‌های آبی‌پروری چرخشی با حوضچه‌های هشت‌ضلعی راهکارهای مؤثری برای پرورش متراکم ارائه می‌دهند. از این‌رو، طراحی صحیح این حوضچه‌ها برای توزیع یکنواخت خوراک، حذف پسماندها و دستیابی به راندمان هیدرولیکی بهینه حیاتی است. تحقیق حاضر با هدف درک و شناخت تأثیر پیکربندی سامانه ورودی جریان مستغرق بر توزیع زمان ماند ذرات خوراک و راندمان هیدرولیکی در حوضچه‌های هشت‌ضلعی، به دنبال بهینه‌سازی عملکرد خوراک‌دهی و گردش آب است. مواد و روش‌ها: مطالعه حاضر بر پایه مدل‌سازی آزمایشگاهی در یک حوضچه هشت‌ضلعی (۵۰ × ۱۰۰ × ۱۰۰ سانتی‌متر) با عمق آب ۲۰ سانتی‌متر انجام شد. یک سامانه ورودی عمودی مستغرق با سه نازل و پنج پیکربندی مختلف (β_1 تا β_5)، به‌منظور توزیع یکنواخت و غیریکنواخت سرعت جریان در عمق آب، به کار رفت. دبی کل جریان ورودی به حوضچه سه لیتر بر دقیقه تنظیم شد که موجب زمان ماند تئوری ۶۰ دقیقه در تمام آزمایش‌ها شد. آزمایش‌ها در دو بخش اصلی شامل توزیع زمان ماند ذرات خوراک (با تزریق ۱۰ گرم خوراک و وزن‌کشی باقی‌مانده/تخلیه شده) و راندمان هیدرولیکی با تزریق محلول ردیاب و اندازه‌گیری منحنی‌های (RTD) انجام شدند. راندمان هیدرولیکی بر اساس نسبت زمان ماند واقعی به تئوری و در سه دسته (ضعیف، قابل قبول، بالا) ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج آزمایش‌های راندمان هیدرولیکی نشان داد، پیکربندی β_1 با راندمان کم‌تر از ۳۵ درصد، در محدوده "ضعیف" قرار گرفت. این امر به دلیل تکانه ناکافی و تشکیل مناطق مرده گسترده بود که با بیش‌ترین مقدار خوراک باقی‌مانده (۵/۶۳ گرم) مطابقت داشت. β_4 (راندمان ۵۰ درصد) و β_2 (راندمان کم‌تر از ۶۰ درصد) در دسته "قابل قبول" قرار گرفتند. هم‌چنین، پیکربندی‌های β_3 (راندمان حدود ۸۵ درصد) و β_5 (راندمان ۷۵ درصد) بالاترین راندمان در مطالعه آزمایشگاهی حاضر (دسته "بالا") را کسب کردند. پیکربندی‌های β_3 و β_5 اختلاط جریان مؤثر و حداقل نواحی مرده را فراهم آوردند. به‌طور مشابه، پیکربندی‌های β_3 و β_5 کم‌ترین میزان خوراک باقی‌مانده (به ترتیب ۴/۵۲ و ۴/۷۹ گرم) را داشتند که مؤید کارایی بالای آن‌ها در مدیریت زمان ماند خوراک مصرف‌نشده است. پیکربندی β_5 با توزیع سرعت افزایشی از سطح به کف حوضچه که موجب حفظ سرعت‌های پایین‌تر در لایه‌های بالایی حوضچه می‌گردد، بهترین تعادل را بین راندمان هیدرولیکی بالا و شرایط مطلوب برای ماهیان سردآبی (مانند قزل‌آلای رنگین‌کمان) که به دلیل حساسیت به جریان‌های شدید و تغییرات ناگهانی دما نیاز به شرایط هیدرولیکی پایدار دارند، فراهم آورد. هم‌چنین، تحلیل منحنی‌های RTD این نتایج را تأیید کرد، پیکربندی β_1 بیشینه‌ای زودرس و ضعیف که نشان‌دهنده جریان کوتاه‌مدت در حوضچه است و پیکربندی β_5 بیشینه‌ای دیر هنگام و بلند که مؤید اختلاط بهینه جریان در حوضچه است را نشان داد.

نتیجه‌گیری: مطالعه آزمایشگاهی حاضر تأکید می‌کند که انتخاب پیکربندی بهینه سامانه ورودی جریان مستغرق، عاملی مهم در افزایش بهره‌وری مصرف خوراک و ارتقاء کیفیت آب در حوضچه‌های پرورش ماهی هشت‌ضلعی است. طراحی‌های هوشمندانه در توزیع سرعت جریان در عمق آب حوضچه (مانند پیکربندی β_5)، می‌تواند دستیابی توأم به راندمان هیدرولیکی بالا و شرایط هیدرودینامیکی مطلوب جریان برای ماهیان کمک شایانی نمایند که پایداری و کارآمدی صنعت آبرزی‌پروری را تضمین می‌کند.

استناد: مقبلی، عاطفه، فاتحی، تهمینه، ذونعمت کرمانی، محمد (۱۴۰۵). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پیکربندی سامانه ورودی جریان بر عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌های هشت‌ضلعی پرورش ماهی. نشریه بهره‌برداری و پرورش آبزیان، ۱۵ (۲)، ۱۸۸-۱۷۱.

Doi: 10.22069/japu.2025.23883.1969



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

آبزی پروری با چالش‌های اساسی نظیر اختلاط ناکافی جریان، توزیع ناکارآمد خوراک و ضرورت حذف پسماندهای جامد مواجه است. تجمع پسماندها، کیفیت آب را کاهش داده، مدیریت پساب را مختل ساخته و به سلامت ماهی آسیب می‌رساند. همچنین، اختلاط نامناسب و راندمان هیدرولیکی پایین، منجر به تشکیل نواحی مرده و جریان کوتاه‌مدت می‌شود که توزیع اکسیژن و مواد غذایی را مختل می‌کند. این پدیده می‌تواند نسبت تبدیل خوراک (FCR^1) را که معیاری برای سنجش کارایی تبدیل خوراک به وزن بدن ماهی است کاهش دهند و نرخ رشد ماهی را به دلیل دسترسی ناکافی به مواد مغذی و اکسیژن مختل کنند (۱، ۲). حوضچه‌های هشت‌ضلعی، به دلیل اختلاط مطلوب و ویژگی خودتمیزشوندگی، در بهینه‌سازی پرورش متراکم مؤثر هستند. برای مثال، در پرورش قزل‌آلای رنگین‌کمان، این حوضچه‌ها با ایجاد جریان چرخشی یکنواخت، تجمع پسماند در مرکز حوضچه را کاهش داده و حذف پسماند را تسهیل می‌کنند (۳). پژوهش حاضر با بررسی تأثیر پیکربندی سامانه‌های ورودی جریان مستغرق در حوضچه‌های هشت‌ضلعی پرورش ماهی، به دنبال توزیع بهینه خوراک، حذف پسماندها و ارتقای راندمان هیدرولیکی از طریق مدلسازی آزمایشگاهی است تا کیفیت آب و کارایی مصرف خوراک بهبود یابد.

پژوهش‌های پیشین، مانند بررسی الگوهای جریان در حوضچه‌های دایره‌ای (۱، ۳) و تأثیر زاویه نازل ورودی بر توزیع سرعت (۴)، بر طراحی هندسته و سامانه‌های ورودی/خروجی برای بهبود عملکرد حوضچه‌های آبزی پروری تمرکز داشته‌اند اما تأثیر

پیکربندی‌های مختلف ورودی جریان در حوضچه‌های هشت‌ضلعی کم‌تر بررسی شده است. اوکا و ماسالو (۲۰۱۳) تأثیر ویژگی‌های حوضچه (قطر، ارتفاع آب، زبری) و مشخصات ورودی/خروجی آب (دبی جریان، نیروی تکانه) را بر توزیع سرعت و تکانه زاویه‌ای در حوضچه‌های دایره‌ای بررسی کرده‌اند و نشان دادند که ورودی مماسی آب همراه با خروجی مرکزی در کف، الگوی جریان چرخشی ایجاد می‌کند که بین گرداب اجباری و آزاد تغییر می‌کند. در نتیجه، افزایش نرخ جریان و نیروی تکانه سرعت‌های مماسی نزدیک مرکز حوضچه را افزایش می‌دهد، در حالی که عمق آب بر یکنواختی توزیع سرعت تأثیر می‌گذارد (۱). ونگاس و همکاران (۲۰۱۴) سامانه‌های تزریق آب (اداکتور و اسپری عمودی) را در حوضچه‌های دایره‌ای بررسی کردند و نشان دادند که اداکتور با زاویه تزریق ۴۵ درجه، توزیع سرعت یکنواخت‌تری (نسبت سرعت ۸:۱) نسبت به اسپری عمودی (۱:۱/۴) ایجاد می‌کند. اختلاط را با عبور ۴/۵ تا ۷/۵ برابر آب از دستگاه در زمان ماند هیدرولیکی بهبود می‌بخشد اما زاویه صفر درجه باعث تلاطم و کاهش یکنواختی می‌شود (۴). دیویدسون و سامرفلت (۲۰۰۴) نشان دادند که در حوضچه‌های با خروجی دوگانه، تنظیم جریان خروجی کف (۹/۸-۱۲ درصد) و زاویه ۴۵ درجه نازل‌های ورودی، یکنواختی جریان و حذف سریع پسماند خوراک را بهبود می‌بخشد که این اثرات در حوضچه‌های هشت‌ضلعی کم‌تر بررسی شده است (۵). همچنین، گورله و همکاران (۲۰۱۹ و ۲۰۲۰) تأثیر جهت و مکان نصب ورودی در حوضچه‌های هشت‌ضلعی را بررسی کردند (۶، ۷). با این حال، تحقیقات محدودی بر تأثیر هیدرودینامیک جریان بر توزیع زمان ماند خوراک در حوضچه‌های پرورش ماهی متمرکز

1- Feed Conversion Ratio

شده‌اند. پاپاچک و همکاران (۲۰۲۰) زمان اقامت خوراک در حوضچه‌های استوانه‌ای را بسته به موقعیت تزریق متفاوت دانستند (۲). این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، رابطه جامع و مستقیم بین پیکربندی سامانه ورودی جریان و توزیع زمان ماند خوراک در حوضچه‌های هشت‌ضلعی را با مدل‌سازی آزمایشگاهی بررسی می‌کند.

راندمان هیدرولیکی و منحنی‌های توزیع زمان ماند (RTD)، معیارهای کلیدی برای ارزیابی عملکرد حوضچه‌های پرورش ماهی هستند که به درک اختلاط جریان، شناسایی مناطق مرده و نواحی جریان کوتاه‌مدت کمک می‌کنند. ذونعمت کرمانی (۲۰۱۶) راندمان هیدرولیکی بالای ۷۵ درصد را برای طراحی بهینه حوضچه‌های مستطیلی پرورش ماهیان سردآبی، مانند قزل‌آلای رنگین‌کمان، ضروری دانست که با ضریب شکل حداقل ۷/۵ برای حوضچه‌های مستطیلی با مساحت ۱۲۰ مترمربع، از طریق مدل‌سازی عددی هیدرودینامیک جریان با استفاده از مدل آشفتگی اسمالگورینسکی و معادله انتقال-پخش، قابل‌دستیابی است. در صورت محدودیت‌های محیطی، ضریب شکل ۵ با اصلاح هندسه ورودی و کاهش مناطق مرده نیز راندمان هیدرولیکی مناسبی (بیش از ۵۰ درصد) فراهم می‌کند (۸). تحقیقات مقبلی و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که نصب ورودی جریان به صورت قائم، منجر به جریان کوتاه‌مدت، تشکیل مناطق مرده و راندمان هیدرولیکی ضعیف (کم‌تر از ۵۰ درصد) در حوضچه‌های دایره‌ای می‌شود (۹). پاپاچک و همکاران (۲۰۲۰) نیز عدم توزیع یکنواخت اکسیژن و ته‌نشینی ضایعات را از پیامدهای مناطق راکد عنوان کردند (۲). علی‌رغم این مطالعات، یک رابطه جامع و مستقیم بین پیکربندی سامانه ورودی جریان و توزیع زمان ماند خوراک همراه با راندمان هیدرولیکی در حوضچه‌های

هشت‌ضلعی، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش سعی دارد این شکاف را با ارائه مطالعه‌ای جامع‌تر بر روی این روابط، با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی پر کند.

با وجود رواج حوضچه‌های هشت‌ضلعی و تفاوت رفتار هیدرودینامیکی آن‌ها، مطالعات پیشین عمدتاً بر هیدرودینامیک کلی یا خودشویی متمرکز بودند. اگرچه پژوهش‌هایی مانند اوکا و ماسالو (۲۰۱۳) و ونگاس و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی الگوهای جریان و اختلاط در حوضچه‌های دایره‌ای پرداخته‌اند (۱)، و ذونعمت کرمانی (۱۳۹۵) راندمان هیدرولیکی حوضچه‌های مستطیلی را مدل‌سازی کرده است (۸) اما مطالعه جامعی که به‌طور هم‌زمان رابطه پیکربندی‌های مختلف سامانه ورودی جریان مستغرق (β_1 تا β_5) با توزیع زمان ماند خوراک و راندمان هیدرولیکی در حوضچه‌های هشت‌ضلعی پرورش ماهی را بررسی کند، یافت نشده است. این مطالعه، با مدل‌سازی آزمایشگاهی، تأثیر توزیع سرعت جریان ورودی (افزایشی یا کاهششی) را بر حرکت و زمان ماند ذرات خوراک و نیز راندمان هیدرولیکی حوضچه بررسی می‌کند. هدف، شناسایی پیکربندی‌های بهینه برای ارتقاء کارایی خوارک‌دهی و کیفیت آب است.

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر به منظور بررسی تأثیر پیکربندی سامانه ورودی جریان بر توزیع زمان ماند خوراک در حوضچه‌های پرورش ماهی هشت‌ضلعی، صرفاً بر پایه مدل‌سازی آزمایشگاهی انجام شده است.

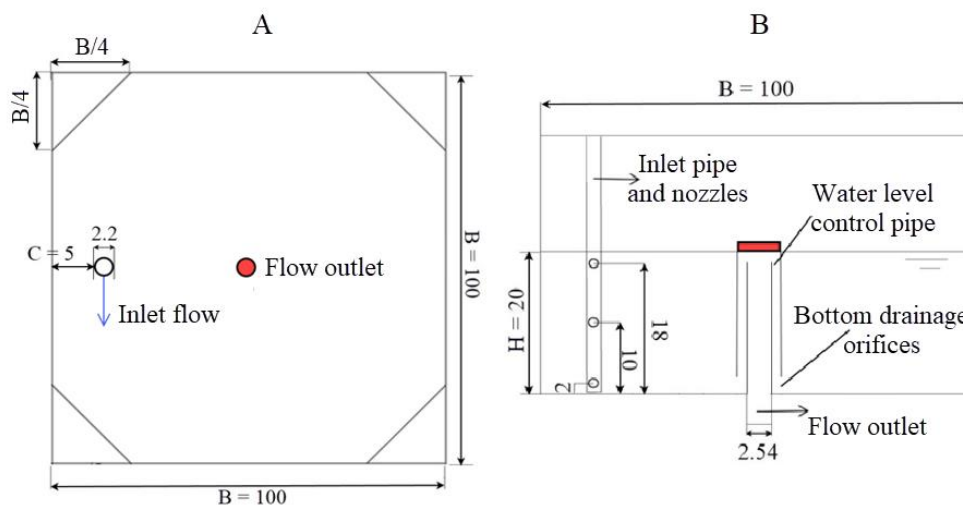
تجهیزات آزمایشگاهی: آزمایش‌ها در یک مدل فیزیکی حوضچه هشت‌ضلعی با دیواره‌های شیشه‌ای انجام شد. این حوضچه دارای ابعاد $100 \times 100 \times 50$ سانتی‌متر) و عمق آب ثابت ۲۰ سانتی‌متر در تمامی

آزمایش‌ها بود که بر اساس مدل‌سازی آزمایشگاهی و هیدرولیکی از یک نمونه واقعی حوضچه هشت‌ضلعی پرورش ماهی با مقیاس ۱۰:۱ (مدل اصلی به مدل آزمایشگاهی) طراحی شده است تا شرایط هیدرودینامیکی جریان و توزیع خوراک در مقیاس آزمایشگاهی شبیه‌سازی شود. گوشه‌های حوضچه مربعی توسط صفحات مستطیلی پخ زده شد تا حوضچه به شکل هشت‌ضلعی تبدیل شود. نسبت گوشه‌های پخ زده نسبت به ضلع حوضچه (L/B) برابر یک چهارم است. همچنین شیب کف حوضچه صفر درصد در نظر گرفته شد تا اثر شیب بر الگوی جریان حذف شده و تمرکز آزمایش‌ها بر تأثیر پیکربندی‌های ورودی جریان (β_1 تا β_5) بر توزیع زمان ماند خوراک و راندمان هیدرولیکی حفظ شود. این انتخاب با شرایط حوضچه‌های پرورش ماهی واقعی با کف صاف سازگار است و در مدل‌سازی آزمایشگاهی برای ساده‌سازی تحلیل جریان رایج است. دبی جریان ورودی برای تمام آزمایش‌ها ۳ لیتر بر دقیقه تنظیم شد که بر اساس قوانین مدل‌سازی فیزیکی و هیدرولیکی و با مقیاس هندسی ۱۰:۱ (مدل اصلی به مدل آزمایشگاهی) محاسبه شده است تا زمان تعویض آب حوضچه یک مرتبه در ساعت (زمان ماند تئوری ۶۰ دقیقه) حاصل شود و شرایط هیدرودینامیکی یک حوضچه پرورش ماهی واقعی شبیه‌سازی شود (۱۰).

سامانه تأمین آب مدل شامل یک مخزن آب مستطیلی (۵۰ × ۵۰ × ۱۰۰ سانتی‌متر)، سه پمپ انتقال جریان از مخزن تأمین آب به نازل‌های سامانه ورودی

جریان و شیرهای تنظیم دبی جریان عبوری از پمپ‌ها بود. سامانه خروجی از نوع مرکزی به همراه تنظیم‌کننده داخلی سطح آب استفاده شد. علاوه بر این، ذرات خوراک مورد استفاده در این مطالعه شامل قطر $\bar{d} = 0.89 \text{ mm}$ می‌شدند. چگالی مؤثر ذرات خوراک $1/9 \pm 1070/9$ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین گردید. همچنین، برای وزن کردن نمونه‌های خوراک برداشت شده از جریان خروجی و باقی‌مانده در حوضچه، از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم استفاده شد.

در پژوهش حاضر، از نمونه خوراک ماهی به وزن ۱۰ گرم به‌عنوان ردیاب برای ارزیابی توزیع زمان ماند (RTD) ذرات خوراک در هر آزمایش استفاده شد. این انتخاب به دلیل شباهت غذای ماهی به شرایط واقعی در حوضچه‌های پرورش ماهی سامانه‌های آبی‌پروری مدار بسته (RAS) و استفاده گسترده آن در مطالعات مشابه پاپاچک و همکاران (۲۰۲۰) انجام گرفت. خوراک ماهی به دلیل دسترسی‌پذیری، امکان استانداردسازی اندازه و جرم ذرات خوراک و رفتار هیدرودینامیکی شناخته‌شده (مانند نرخ ته‌نشینی و پراکنش در حوضچه) انتخاب شد. با این حال، موادی مانند پلی‌استایرن با دانسیته نزدیک به فضولات ماهی نیز می‌توانند برای شبیه‌سازی حذف فضولات مناسب باشند اما به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی (مانند نیاز به کالیبراسیون و دسترسی محدود) در این مطالعه استفاده نشدند. در مطالعات آینده، استفاده از پلی‌استایرن می‌تواند به درک بهتر حذف فضولات کمک کند.



شکل ۱- طرح‌واره‌ای از مدل ساخته شده، (A) نما از بالا، (B) نما از جلو در حالت نصب سامانه ورودی جریان مستغرق، واحد (سانتی‌متر).

Figure 1. Schematic of the constructed model: (A) top view; (B) front view with the submerged flow inlet system installed—unit: cm.

سانتی‌متر بر ثانیه) برای افزایش اختلاط و β_3 (قطر ۲ میلی‌متر، سرعت ۵۳۰ سانتی‌متر بر ثانیه) برای تشکیل گردابه‌های قوی طراحی شدند. پیکربندی‌های β_4 و β_5 با ترکیب سرعت‌های متفاوت (جدول ۱) برای بررسی توزیع غیریکنواخت جریان در عمق آب (کاهشی و افزایشی از سطح به کف) آزمایش شدند. در سامانه‌های آبی‌پروری چرخشی (RAS)، استفاده از دو ورودی عمودی و افقی برای ایجاد الگوهای جریان پیچیده‌تر رایج است (۴). با این حال، در پژوهش حاضر استفاده از یک سیستم ورودی عمودی به دلیل سادگی نصب، کنترل دقیق متغیرهای آزمایش (قطر نازل و سرعت جریان) و تمرکز بر بررسی اثر این متغیرها انتخاب شد. تنظیمات آزمایش‌های پژوهش حاضر بر اساس مطالعات پیشین ونگاس و همکاران (۲۰۱۴) و گورل و همکاران (۲۰۱۹) انتخاب شدند (۴، ۶) تا طیف گسترده‌ای از شرایط هیدرودینامیکی را پوشش دهند. پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات آینده، ترکیب ورودی‌های عمودی و افقی برای بهبود راندمان هیدرولیکی آزمایش شود.

پیکربندی سامانه‌های ورودی جریان: در پژوهش حاضر، پنج پیکربندی مختلف سامانه ورودی جریان (β_1 تا β_5) با یک سامانه ورودی عمودی انتخاب شدند تا تأثیر سرعت جریان بر توزیع ذرات خوراک و راندمان هیدرولیکی در حوضچه‌های هشت‌ضلعی بررسی شود. هر پیکربندی شامل یک سامانه ورودی عمودی با سه نازل (n_1 ، n_2 ، n_3) بود که همگی با زاویه صفر درجه (موازی با دیواره حوضچه) نصب شدند تا جریان موازی دیواره‌های حوضچه هدایت شود. تفاوت بین پیکربندی‌ها در قطر نازل‌ها (۲، ۴ و ۶ میلی‌متر) و سرعت جریان تزریق شده از هر نازل (۵۸/۹۹، ۱۳۲/۷ و ۵۳۰ سانتی‌متر بر ثانیه) بود که برای تشکیل الگوهای جریان یکنواخت و غیریکنواخت طراحی شدند. این پیکربندی‌ها برای پوشش طیف گسترده‌ای از شرایط هیدرودینامیکی (جریان یکنواخت، اختلاط بالا و تشکیل گردابه) و ساده‌سازی کنترل متغیرها در مقایسه با سامانه‌های ورودی ترکیبی عمودی و افقی انتخاب شدند. پیکربندی β_1 (قطر ۶ میلی‌متر، سرعت ۵۸/۹۹ سانتی‌متر بر ثانیه) برای ایجاد جریان یکنواخت، β_2 (قطر ۴ میلی‌متر، سرعت ۱۳۲/۷

جدول ۱- جزئیات طراحی پیکربندی‌های مختلف سامانه ورودی.

Table 1. Design specifications of various flow inlet system configurations.

توضیحات Description	نوع توزیع جریان Flow distribution type	سرعت جریان تزریق شده از نازل (cm/sec) The flow velocity injected from the nozzle	قطر نازل (mm) Nozzle diameter	شماره نازل ورودی جریان Flow inlet nozzle number	پیکربندی سامانه ورودی Input system configuration
جریان آرام با حداقل اختلاط Laminar flow with minimal mixing	یکنواخت Uniform	58.99	6	n ₁	β_1
		58.99	6	n ₂	
		58.99	6	n ₃	
افزایش اختلاط با سرعت متوسط Enhanced mixing at moderate velocity	یکنواخت Uniform	132.7	4	n ₁	β_2
		132.7	4	n ₂	
		132.7	4	n ₃	
تشکیل گردابه قوی Strong vortex formation	یکنواخت Uniform	530	2	n ₁	β_3
		530	2	n ₂	
		530	2	n ₃	
ترکیب سرعت‌ها برای اختلاط متغیر Combination of flow velocities for variable mixing	غیریکنواخت Non-uniform	530	2	n ₁	β_4
		132.7	4	n ₂	
		58.99	6	n ₃	
ترکیب سرعت‌ها برای اختلاط متغیر Combination of flow velocities for variable mixing	غیریکنواخت Non-uniform	58.99	6	n ₁	β_5
		132.7	4	n ₂	
		530	2	n ₃	

است، در موقعیت تعیین شده نصب شد و زاویه نازل‌های آن موازی با دیواره حوضچه تنظیم گردید. مرحله دوم (راه‌اندازی جریان و تزریق خوراک): پمپ‌های انتقال آب به سامانه ورودی جریان روشن شدند و دبی تزریق شده از هر نازل لوله ورودی به کمک شیر تنظیم دبی جریان برابر یک لیتر بر دقیقه (دبی کل برابر سه لیتر بر دقیقه) تنظیم شد. عمق آب درون حوضچه توسط لوله مرکزی سامانه خروجی جریان حدود ۲۰ سانتی‌متر ثابت شد. پس از گذشت ۱۰ دقیقه و رسیدن به حالت پایدار میدان جریان، دوربین ثبت آزمایش روشن شد و نمونه ۱۰ گرمی از

روش انجام آزمایش‌ها: آزمایش‌های این مطالعه، در دو بخش اصلی شامل آزمایش‌های توزیع زمان ماند خوراک و آزمایش‌های راندمان هیدرولیکی، در یک چارچوب چهار مرحله‌ای انجام شدند. همچنین هر آزمایش برای هر یک از پیکربندی‌های ورودی جریان (β_1 تا β_5) سه بار تکرار شد تا از تکرارپذیری نتایج و کاهش خطاهای آزمایشگاهی اطمینان حاصل شود (۱۰).

آزمایش‌های توزیع زمان ماند خوراک

مرحله اول (تنظیم سامانه ورودی): پیکربندی مناسب سامانه ورودی، که در جدول ۱ ارائه شده

در جدول ۱ معرفی شدند، متناسب با هر آزمایش نصب و راه اندازی شد.

مرحله دوم (راه‌اندازی جریان و تزریق ردیاب): پمپ‌ها روشن شدند و دبی جریان ورودی به حوضچه سه لیتر بر دقیقه و عمق آب ۲۰ سانتی‌متر ثابت شد. پس از ۱۰ دقیقه رسیدن به پایداری جریان، محلول ردیاب سدیم کلرید (۵۰ گرم بر لیتر) که با ۵ گرم متیلن‌بلو رنگی شده بود، به صورت پالس ناگهانی تزریق شد. لحظه تزریق به عنوان شروع آزمایش در نظر گرفته شد و کرومومتر روشن گردید.

مرحله سوم (جمع‌آوری داده): پس از شروع آزمایش، غلظت ردیاب در جریان خروجی از حوضچه در بازه‌های زمانی ۶۰ ثانیه توسط دستگاه TDS متر (با قابلیت اندازه‌گیری کل مواد جامد محلول در آب با واحد $\mu\text{g/ml}$) اندازه‌گیری شد.

مرحله چهارم (تجزیه و تحلیل): ابتدا تغییر غلظت محلول ردیاب در طول زمان اجرای آزمایش با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Excel به صورت نمودارهای TDS-Time رسم شد و منحنی‌های توزیع زمان ماند (RTD) به دست آمد. سپس، زمان ماند هیدرولیکی واقعی (t_{real}) برای هر پیکربندی ورودی جریان (β_1 تا β_5) برابر با زمان وقوع بیشینه غلظت محلول ردیاب برای نمودارهای TDS-Time هر پیکربندی تعیین شد. در نهایت، راندمان هیدرولیکی هر پیکربندی با استفاده از معادله ۱ به صورت نسبت زمان ماند واقعی به زمان ماند تئوری ($t_{\text{theoretical}} = 60 \text{ min}$) محاسبه و تجزیه و تحلیل شد:

$$\text{Hydraulic efficiency} = \frac{t_{\text{real}}}{t_{\text{theoretical}}} \times 100 \quad (1)$$

در این معادله Hydraulic efficiency راندمان هیدرولیکی (درصد)، t_{real} زمان ماند واقعی (دقیقه) و $t_{\text{theoretical}}$ زمان ماند تئوری هستند. این

ذرات خوراک در اولین گوشه مقابل سامانه ورودی جریان، وارد حوضچه گردید. هم‌زمان با اضافه نمودن خوراک، کرومومتر برای اندازه‌گیری زمان شروع آزمایش روشن شد. لازم به توضیح است که گرانول‌های پلی‌استایرن می‌توانند به دلیل دانسیته نزدیک به فضولات ماهی برای شبیه‌سازی حذف مواد جامد مناسب باشند اما به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی (مانند دسترسی محدود و نیاز به کالیبراسیون خاص) و تفاوت در رفتار هیدرودینامیکی نسبت به خوراک واقعی ماهی در این مطالعه استفاده نشدند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، گرانول‌های پلی‌استایرن برای شبیه‌سازی رفتار فضولات ماهی آزمایش شوند.

مرحله سوم (جمع‌آوری داده): فرآیند توزیع ذرات خوراک با مشاهده بصری کنترل شد. حداکثر زمان آزمایش نیز ۶۰ دقیقه برابر با زمان ماند تئوری در نظر گرفته شد. در طی اجرای آزمایش و در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای، از لحظه اضافه نمودن خوراک به حوضچه، پسماندهای جامد تخلیه شده جمع‌آوری شدند. پس از خشک شدن، وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد. در صورت عدم تخلیه کامل پسماندهای جامد پس از اتمام زمان اجرای آزمایش، پسماندهای جامد باقی‌مانده در حوضچه توسط سیفون جمع‌آوری و پس از خشک شدن وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد.

مرحله چهارم (تجزیه و تحلیل): فرآیند حرکت ذرات خوراک در حوضچه و مقادیر باقی‌مانده و تخلیه شده با استفاده از تصاویر و وزن‌های اندازه‌گیری شده تجزیه و تحلیل شد.

آزمایش‌های راندمان هیدرولیکی: این آزمایش‌ها به منظور ارزیابی راندمان هیدرولیکی حوضچه هشت‌ضلعی با استفاده از منحنی توزیع زمان ماند (RTD) و معیار زمان ماند هیدرولیکی انجام شد.

مرحله اول (تنظیم سامانه ورودی): در این بخش، پیکربندی‌های مختلف سامانه ورودی (β_1 تا β_5) که

روش مطابق با استانداردهای تحلیل هیدرولیکی است (۸، ۱۰، ۱۱، ۱۲).

نتایج و بحث

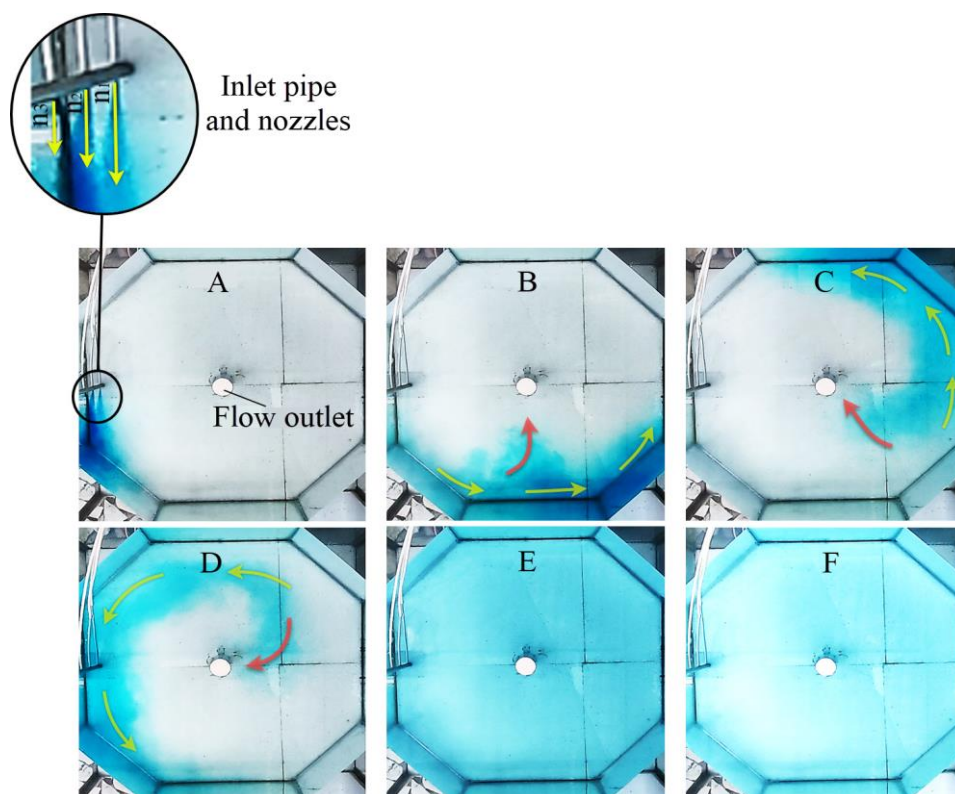
نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی تأثیر پیکربندی ورودی را بر توزیع زمان ماند خوراک و راندمان هیدرولیکی حوضچه‌های هشت‌ضلعی بررسی می‌کند. هدف، شناسایی کارآمدترین پیکربندی برای توزیع یکنواخت خوراک، افزایش در دسترس بودن آن، و بهبود کلی هیدرودینامیک حوضچه بود.

راندمان هیدرولیکی و الگوی جریان: راندمان هیدرولیکی یکی از معیارهای اصلی برای ارزیابی عملکرد هیدرودینامیکی حوضچه‌ها و کیفیت اختلاط جریان است که بر اساس منحنی توزیع زمان ماند (RTD) و معیار زمان ماند هیدرولیکی محاسبه می‌شود. هرچه راندمان هیدرولیکی به یک نزدیک‌تر باشد، اختلاط هیدرودینامیکی جریان در حوضچه بهتر انجام شده و مناطق مرده و جریان کوتاه‌مدت کم‌تری مشاهده می‌شود.

الگوی جریان: شکل‌گیری الگوی جریان در حوضچه‌های پرورش ماهی مستقیماً بر کارایی سیستم در توزیع اکسیژن، مواد مغذی و خوراک و جابجایی مواد ناخواسته تأثیرگذار است. در حوضچه‌های هشت‌ضلعی، تزریق جریان به صورت مماسی، منجر به القاء یک الگوی جریان چرخشی غالب می‌شود که اساس توزیع همگن آب را فراهم می‌آورد. بررسی پیکربندی‌های β_1 ، β_2 و β_3 ، که با هدف ایجاد توزیع یکنواخت سرعت طراحی شده‌اند، نشان‌دهنده تغییر در قدرت جریان چرخشی بر اساس تکانه ورودی است. افزایش سرعت جریان ورودی (از β_1 به β_3) موجب افزایش تکانه شده و جریان چرخشی اولیه را تقویت می‌کند. با این حال، در پیکربندی β_3 ،

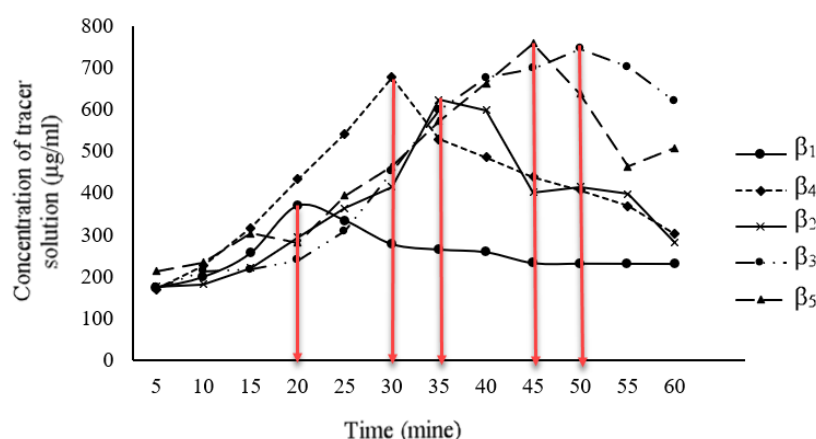
سرعت‌های ورودی بالا (۵۳۰ سانتی‌متر بر ثانیه) منجر به تشکیل یک گرداب مرکزی (vortex) شدید می‌شود که می‌تواند شرایط تنش‌زا و نامطلوبی را برای ماهیان حساس ایجاد کند. در مقابل، پیکربندی‌های β_1 و β_2 با سرعت‌های ورودی پایین‌تر، منجر به جریان‌های ضعیف‌تر و افزایش نواحی با سرعت بسیار کم (مناطق راکد یا مرده) در حوضچه می‌شوند که مستعد ته‌نشینی خوراک مصرف‌نشده هستند و کارایی هیدرودینامیکی سیستم را کاهش می‌دهند.

منحنی توزیع زمان ماند (RTD): شکل ۳، منحنی‌های توزیع زمان ماند (RTD) محلول ردیاب را برای پنج پیکربندی (β_1 تا β_5) نمایش داده و کارایی اختلاط آن‌ها را ارزیابی می‌کند. پیکربندی β_1 با بیشینه غلظت بسیار زودرس (حدود ۲۰ دقیقه)، نشان‌دهنده جریان کوتاه‌مدت شدید و پایین‌ترین راندمان هیدرولیکی است. در این حالت، بخش قابل‌توجهی از ردیاب به سرعت خارج شده، در حالی که قسمتی در مناطق کم‌سرعت به دام می‌افتد. هم‌چنین β_4 بیشینه‌ای نسبتاً زودرس (۲۵-۳۰ دقیقه) نشان می‌دهد که حاکی از اختلاط ضعیف تا قابل قبول است. در مقابل، β_2 با بیشینه‌ای دیر هنگام‌تر (۳۵-۴۰ دقیقه)، بهبود قابل‌توجهی در اختلاط را نشان داده و آن را در محدوده راندمان هیدرولیکی قابل قبول قرار می‌دهد. β_5 با بیشینه غلظت در حدود ۴۵ دقیقه، عملکرد قابل قبولی در اختلاط ارائه می‌کند. نهایتاً، β_3 با دیر هنگام‌ترین بیشینه غلظت (حدود ۵۰ دقیقه)، بهترین عملکرد را در اختلاط و بالاترین راندمان هیدرولیکی را نشان می‌دهد. این بیشینه، حاکی از اختلاط کامل محلول ردیاب در کل حجم حوضچه است.



شکل ۲- مشاهدات بصری الگوی جریان و مناطق کم‌سرعت در کف حوضچه پرورش ماهی هشت‌ضلعی برای پیکربندی β_5 سامانه ورودی نوع، پیکان‌های زرد جهت چرخش جریان و پیکان‌های قرمز مکش جریان رنگی شده به سمت خروجی را نشان می‌دهند؛ (A) شروع آزمایش؛ (B) ۳ دقیقه پس از شروع آزمایش؛ (C) ۵ دقیقه پس از شروع آزمایش؛ (D) ۱۰ دقیقه پس از شروع آزمایش؛ (E) ۴۵ دقیقه پس از شروع آزمایش؛ (F) ۶۰ دقیقه پس از شروع آزمایش و پایان آزمایش.

Figure 2. Visual observations of the flow pattern and low-velocity zones at the bottom of the octagonal fish culture tank for the β_5 configuration of the submerged inlet system. Yellow arrows indicate the direction of flow rotation, and red arrows show the suction of the colored flow toward the outlet. (A) Start of the experiment; (B) 3 minutes after the start; (C) 5 minutes after the start; (D) 10 minutes after the start; (E) 45 minutes after the start; (F) 60 minutes after the start (end of the experiment).



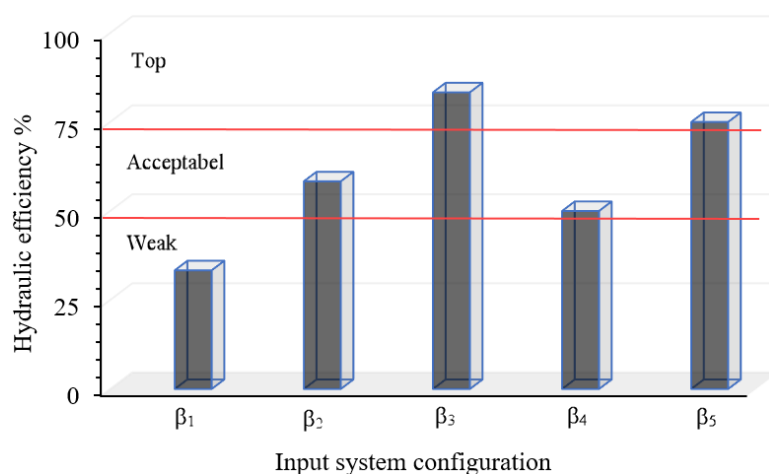
شکل ۳- منحنی‌های توزیع زمان ماند (RTD) محلول ردیاب برای پیکربندی‌های مختلف سامانه ورودی (β_1 تا β_5) در حوضچه پرورش ماهی هشت‌ضلعی. زمان وقوع بیشینه غلظت ردیاب برای هر منحنی با نشانگر قرمز مشخص شده است.

Figure 3. Retention time distribution (RTD) curves of the tracer solution for different inlet system configurations (β_1 to β_5) in the octagonal fish culture tank. A red marker indicates the time corresponding to the peak tracer concentration in each curve.

۶۰ درصد راندمان، در محدوده "قابل قبول" قرار می‌گیرند. β_2 با سرعت ورودی متوسط، اختلاط مناسب‌تری نسبت به β_1 و β_4 فراهم می‌آورد. پیکربندی β_3 با راندمان نزدیک به ۸۵ درصد، بالاترین راندمان را نشان داده و در دسته "بالا" قرار می‌گیرد. این راندمان بسیار بالا، حاکی از اختلاط مؤثر و حداقل مناطق مرده است. β_3 با وجود سرعت‌های ورودی بالا، جریان چرخشی قوی و مؤثری برای اختلاط آب و جابجایی ذرات ایجاد کرده و کم‌ترین میزان خوراک باقی‌مانده را نیز داشته است. پیکربندی β_5 با راندمان ۷۵ درصد، نیز در دسته "بالا" قرار می‌گیرد. β_5 با توزیع سرعت افزایشی از سطح به کف، عملکرد هیدرولیکی بسیار قوی و نزدیکی به β_3 را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، این نتایج تأیید می‌کنند که پیکربندی‌های بهینه (مانند β_3 و β_5)، نه تنها در جابجایی خوراک موفق‌ترند، بلکه از نظر هیدرودینامیکی جریان مؤثر و کارآمدی را در حوضچه تشکیل می‌دهند. این همخوانی، اعتبار یافته‌های مطالعه را تقویت می‌نماید.

راندمان هیدرولیکی: این بخش به بررسی راندمان هیدرولیکی پیکربندی‌های سامانه ورودی بر اساس تحلیل نمودار راندمان هیدرولیکی (شکل ۴) و ارتباط آن با عملکرد کلی حوضچه می‌پردازد. راندمان هیدرولیکی، به عنوان معیاری کلیدی برای ارزیابی کارایی اختلاط جریان و جلوگیری از جریان کوتاه‌مدت و مناطق مرده در حوضچه‌ها به شمار می‌رود. در این پژوهش، راندمان هیدرولیکی بر اساس سه دسته‌بندی ضعیف (Weak) کم‌تر از ۵۰ درصد، قابل قبول (Acceptable) بین ۵۰ تا ۷۵ درصد و بالا (Top) بیش‌تر از ۷۵ درصد ارزیابی شده است.

تحلیل راندمان هیدرولیکی (شکل ۴) نشان می‌دهد که پیکربندی β_1 با راندمان کم‌تر از ۳۵ درصد، در دسته "ضعیف" قرار می‌گیرد. این راندمان پایین، حاکی از اختلاط بسیار ضعیف، مناطق مرده گسترده و جریان کوتاه‌مدت در حوضچه است که با پایین‌ترین سرعت ورودی (۵۸/۹۹ سانتی‌متر بر ثانیه) و بدترین عملکرد در تخلیه خوراک کاملاً همخوانی دارد. در مقابل، پیکربندی‌های β_4 با ۵۰ درصد و β_2 با کم‌تر از



شکل ۴- راندمان هیدرولیکی پیکربندی‌های مختلف سامانه ورودی (β_1 تا β_5) در حوضچه پرورش ماهی هشت‌ضلعی.

Figure 4. Hydraulic efficiency of different inlet system configurations (β_1 to β_5) in the octagonal fish culture tank.

توزیع زمان ماند خوراک: این بخش به بررسی جامع توزیع و حرکت ذرات خوراک در حوضچه، همراه با تأثیر پیکربندی‌های مختلف سامانه ورودی (β_1 تا β_5) بر زمان ماند آن‌ها می‌پردازد. تحلیل داده‌های کمی خوراک باقی‌مانده و تخلیه شده (جدول ۲) و نمودار زمان ماند خوراک (شکل ۵)، اطلاعات جامعی در این زمینه ارائه می‌دهند و با مشاهدات بصری از حرکت ذرات خوراک همخوانی دارند. نتایج آزمایش‌های

توزیع زمان ماند ذرات خوراک نشان داد که انحلال جزئی ذرات خوراک در همه پیکربندی‌ها (β_1 تا β_5) رخ داد، به‌طوری که مجموع وزن خوراک باقی‌مانده و تخلیه‌شده کم‌تر از ۱۰ گرم (وزن اولیه نمونه خوراک برای هر آزمایش) بود (جدول ۲). انحلال ذرات خوراک به ازای هر پنج پیکربندی بین ۱/۲ تا ۲/۸ درصد مشاهده شد که بیش‌ترین مقدار در پیکربندی β_4 است.

جدول ۲- مقدار خوراک باقی‌مانده در حوضچه و تخلیه شده از حوضچه به ازای ورودی‌های β_1 ، β_2 ، β_3 ، β_4 و β_5 .

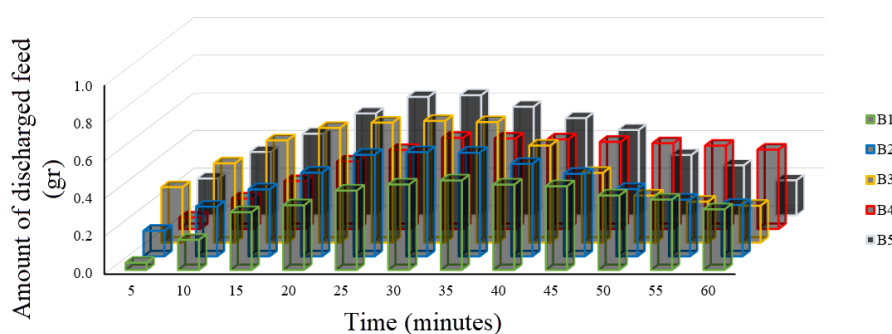
Table 2. Amount of feed remaining in and discharged from the tank for inlet configurations β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , and β_5 .

وزن خوراک ورودی به حوضچه در ابتدای آزمایش (گرم)	وزن خوراک باقی‌مانده در حوضچه (گرم)	خوراک تخلیه شده پس از ۶۰ دقیقه (گرم)	مجموع خوراک باقی‌مانده و تخلیه شده از حوضچه (گرم)	درصد انحلال خوراک (درصد)	سامانه‌های ورودی
Initial feed input into the tank (gr)	Remaining feed in the tank (g)	Feed discharged after 60 minutes (g)	Total feed remaining in and discharged from the tank (g)	Feed dissolution (%)	Input systems
10	5.63	4.19	9.82	1.8	β_1
10	5.07	4.70	9.77	2.3	β_2
10	4.52	5.34	9.86	1.4	β_3
10	5.24	4.48	9.72	2.8	β_4
10	4.79	5.09	9.88	1.2	β_5

پیکربندی β_1 ، با کم‌ترین سرعت ورودی (۵۸/۹۹ سانتی‌متر بر ثانیه)، منجر به بیش‌ترین خوراک باقی‌مانده (۵/۶۳ گرم) و کم‌ترین میزان تخلیه (۴/۲۰ گرم) شد. این نشان‌دهنده زمان ماند طولانی‌تر خوراک مصرف‌نشده و توزیع نامناسب آن است. از منظر هیدرودینامیک، سرعت ورودی پایین، تکانه کافی برای ایجاد جریان چرخشی قوی و پایدار فراهم نمی‌کند. در نتیجه، مناطق با سرعت آب بسیار پایین (مناطق مرده) شکل می‌گیرند که اختلاط مؤثر و جابجایی ذرات خوراک را مختل کرده و باعث ته‌نشینی سریع و تجمع آن‌ها می‌گردد.

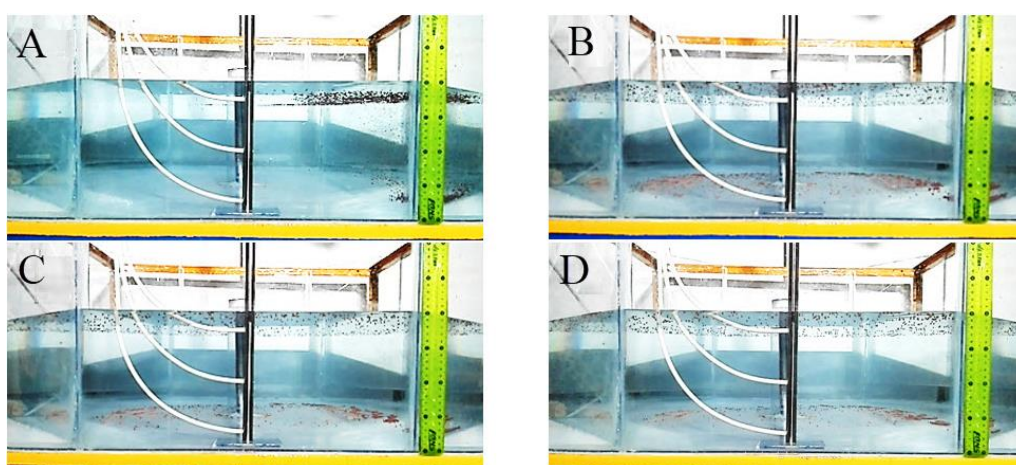
پیکربندی β_2 نسبت به β_1 ، سرعت جریان ورودی بالاتری را تأمین کرده و منجر به کاهش خوراک

باقی‌مانده به ۵/۰۷ گرم و افزایش تخلیه به ۴/۷۰ گرم شد. در مقابل، پیکربندی β_3 با بالاترین سرعت‌های ورودی و یکنواخت، بهترین عملکرد را در مدیریت خوراک باقی‌مانده (۴/۵۲ گرم) و بالاترین میزان تخلیه (۵/۳۴ گرم) نشان داد. سرعت‌های بالای ورودی در β_3 ، تکانه بسیار زیادی تولید کرده و یک جریان چرخشی قدرتمند در حوضچه ایجاد می‌کند. این جریان قوی، نیروهای کشش و بلندکننده را افزایش داده و به جابجایی مؤثر ذرات خوراک کمک می‌کند. با این حال، سرعت زیاد جریان در پیکربندی β_3 ممکن است برای ماهیان حساس نامناسب باشد.



شکل ۵- زمان ماند خوراک در حوضچه به ازای پیکربندی‌های β_1 , β_2 , β_3 , β_4 و β_5 .

Figure 5. Feed residence time in the tank for inlet configurations β_1 , β_2 , β_3 , β_4 , and β_5 .



شکل ۶- حرکت ذرات در حوضچه پرورش ماهی هشت‌ضلعی در طی زمان اجرای آزمایش برای پیکربندی ورودی جریان β_1 .

Figure 6. Particle movement in the octagonal fish culture tank during the experiment for the β_1 flow inlet configuration.

نواحی شنای ماهی شود. این نتایج نشان می‌دهد که می‌توان با تنظیم هوشمندانه توزیع سرعت جریان ورودی در عمق، به زمان ماند بهینه خوراک در دسترس ماهی دست یافت و در عین حال، شرایط هیدرودینامیکی مطلوب‌تری را برای گونه‌های حساس‌تر فراهم آورد. همچنین، باقی‌ماندن ذرات بسیار ریز (کم‌تر از ۰/۱ میلی‌متر) تا پایان آزمایش، بر ضرورت مدیریت خوراک با ذرات درشت‌تر تأکید دارد.

بحث و مقایسه با پژوهش‌های پیشین: این مطالعه با بررسی هم‌زمان راندمان هیدرولیکی و توزیع زمان ماند خوراک در پیکربندی‌های مختلف سامانه ورودی مستغرق، به شناخت دقیق‌تری از عملکرد

پیکربندی غیریکنواخت β_4 و β_5 با هدف توزیع بهینه خوراک طراحی شدند. β_4 (کاهش سرعت از سطح به کف) عملکردی مشابه β_1 در ته‌نشینی داشت (۵/۰۷ گرم باقی‌مانده)، زیرا سرعت کم نازل تحتانی باعث کاهش نیروهای برشی و محدود شدن جابجایی ذرات ته‌نشین‌شده می‌شود. در مقابل، β_5 (افزایشی از سطح به کف) عملکردی نزدیک به β_3 در تخلیه خوراک (۴/۷۹ گرم باقی‌مانده) نشان داد. ویژگی بارز β_5 ، سرعت جریان کم‌تر در لایه‌های بالایی و جریان قوی در کف است. این توزیع بهینه سرعت، نیروهای کشش و بلندکننده کافی در نزدیک بستر ایجاد می‌کند، بدون این‌که موجب تنش‌های هیدرودینامیکی بالا در

هیدرودینامیکی حوضچه‌های هشت‌ضلعی کمک می‌کند. نتایج راندمان هیدرولیکی (شکل ۴) نشان داد که پیکربندی β_5 با توزیع سرعت افزایشی از سطح به کف، بهترین عملکرد را در اختلاط و بالاترین راندمان هیدرولیکی دارد. این یافته، اهمیت بهینه‌سازی توزیع سرعت در عمق را برای اختلاط مؤثر تأیید می‌کند. با وجود تأکید محمدی مقدم و همکاران (۲۰۲۲) بر شاخص یکنواختی میدان سرعت (۳)، مطالعه حاضر با استفاده از راندمان هیدرولیکی و توزیع زمان ماند خوراک، تحلیل جامع‌تری از عملکرد واقعی حوضچه ارائه می‌دهد. این امر اهمیت معیارهای جامع‌تر RTD را برای ارزیابی هیدرودینامیک برجسته می‌سازد.

نتایج این مطالعه نشان داد که تفاوت در قطر نازل‌ها و سرعت جریان ورودی بین پیکربندی‌های سامانه ورودی جریان β_1 تا β_5 با زاویه ثابت نازل‌های ورودی جریان (موازی با دیواره حوضچه)، تأثیر قابل توجهی بر کارایی هیدرولیکی و توزیع زمان ماند (RTD) دارد. پیکربندی β_1 با سرعت پایین و قطر یکسان نازل‌ها (۵۸/۹۹ سانتی‌متر بر ثانیه، ۶ میلی‌متر) جریان یکنواخت اما با راندمان ضعیف (کم‌تر از ۳۵ درصد) ایجاد کرد که به دلیل تشکیل مناطق مرده در حوضچه بود. در مقابل، پیکربندی‌های β_4 و β_5 با ترکیب سرعت‌های متفاوت (از ۵۸/۹۹ تا ۵۳۰ سانتی‌متر بر ثانیه) و قطرهای متنوع (از ۲ تا ۶ میلی‌متر) اختلاط قوی‌تری ایجاد کردند و به ترتیب راندمان هیدرولیکی قابل قبول (۵۰ درصد) و راندمان هیدرولیکی بالا (۷۵ درصد) را نشان دادند. این نتایج با یافته‌های گورل و همکاران (۲۰۲۰) و ونگاس و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد که نشان دادند تغییر در سرعت جریان و پیکربندی ورودی می‌تواند توزیع جریان و حذف مواد جامد را بهبود بخشد (۴، ۷). جدول ۱ با ارائه جزئیات دقیق پیکربندی‌ها، به درک بهتر تأثیر این پارامترها بر الگوی جریان و حذف مواد

جامد کمک می‌کند. همان‌طور که در مطالعات دیگر اشاره شده، استفاده از ترکیب ورودی‌های عمودی و افقی می‌تواند الگوهای جریان پیچیده‌تری ایجاد کند و جریان کوتاه‌مدت را بیش‌تر کاهش دهد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، اثر افزودن ورودی افقی به سیستم ورودی عمودی در حوضچه‌های هشت‌ضلعی بررسی شود تا کارایی هیدرولیکی و خودشویی بهینه‌تر شود. این رویکرد می‌تواند به طراحی سامانه‌های آبی‌پروری چرخشی (RAS) با عملکرد بهتر کمک کند.

این مطالعه با تأیید اصول هیدرودینامیکی کارهای پیشین (۱، ۴)، ارتباط مستقیم آن‌ها را با سرنوشت خوراک برقرار می‌کند. افزایش تکانه (β_3) خوراک را سریع‌تر خارج کرد اما سرعت‌های بالا ممکن است به ماهی آسیب برساند. بنابراین، حفظ تعادل مناسب بین تخلیه و آسایش ماهی حیاتی است.

نوآوری اصلی این پژوهش در بررسی هدفمند توزیع غیریکنواخت سرعت جریان ورودی مستغرق نهفته است. برخلاف مطالعه پاپچک و همکاران (۲۰۲۰) که به تفاوت زمان ماند خوراک بر اساس موقعیت تزریق اشاره داشتند (۲)، مطالعه حاضر به‌طور خاص تأثیر شیب توزیع سرعت (افزایشی یا کاهش) در ستون آب را بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که پیکربندی β_5 با توزیع سرعت افزایشی از سطح به کف، قادر است با سرعت‌های پایین‌تر در لایه‌های بالایی حوضچه (مناسب برای ماهیان حساس)، زمان ماند خوراک را به‌نحو مؤثری مدیریت کرده و از تجمع بی‌رویه آن جلوگیری نماید. این یافته کلیدی، راه را برای طراحی‌های بهینه‌تر سامانه‌های ورودی هموار می‌کند که نه تنها کارایی مصرف خوراک را افزایش می‌دهند، بلکه شرایط زیستی مطلوب‌تری را نیز فراهم می‌آورند. در مجموع، این مطالعه بینش‌های عملی جدیدی را برای صنعت آبی‌پروری ارائه

می‌دهد تا بهره‌برداران بتوانند با انتخاب پیکربندی‌های ورودی جریان مناسب، به تولید پایدارتر و کارآمدتر ماهی در سامانه‌های RAS دست یابند.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که انتخاب خوراک ماهی به عنوان ردیاب برای تعیین توزیع زمان ماند ذرات خوراک در حوضچه پرورش ماهی، توزیع ذرات خوراک و اختلاط هیدرودینامیکی حوضچه‌های هشت‌ضلعی را به خوبی نشان می‌دهد. با این حال، برای بررسی دقیق‌تر حذف فضولات از حوضچه، استفاده از موادی مانند پلی‌استایرن با دانسیته نزدیک به فضولات ماهی می‌تواند مفید باشد. این مواد می‌توانند رفتار هیدرودینامیکی فضولات را بهتر شبیه‌سازی کنند و به درک بهتر فرآیند حذف مواد جامد در سامانه‌های آبی‌پروری مدار بسته (RAS) کمک کنند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، آزمایش‌هایی با استفاده از پلی‌استایرن انجام شود تا تأثیر پیکربندی‌های ورودی جریان بر حذف فضولات از حوضچه‌های پرورش ماهی بررسی شود.

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی جامع تأثیر پیکربندی‌های سامانه ورودی جریان مستغرق بر راندمان هیدرولیکی

و توزیع زمان ماند خوراک در حوضچه‌های پرورش ماهی هشت‌ضلعی پرداخت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که راندمان هیدرولیکی حوضچه به شدت تحت تأثیر پیکربندی ورودی است. پیکربندی β_1 (پایین‌ترین سرعت ورودی) منجر به راندمان ضعیف (کم‌تر از ۵۰ درصد) شد، در حالی که β_3 و β_5 بالاترین راندمان (بیش از ۷۵ درصد) را کسب کردند. این پیکربندی‌ها کم‌ترین میزان خوراک باقی‌مانده را نیز داشتند که مؤید کارایی آن‌ها در مدیریت زمان ماند خوراک مصرف‌نشده است. به‌ویژه، β_5 با توزیع سرعت افزایشی از سطح به کف، بهترین تعادل را بین راندمان هیدرولیکی بالا و شرایط مطلوب برای ماهیان حساس فراهم آورد. این یافته کلیدی نشان می‌دهد که طراحی هوشمندانه توزیع سرعت جریان در عمق می‌تواند به دستیابی همزمان به راندمان هیدرولیکی بالا و شرایط هیدرودینامیکی مطلوب برای ماهیان کمک شایانی نماید. در مجموع، انتخاب پیکربندی بهینه سامانه ورودی جریان مستغرق عاملی حیاتی در افزایش بهره‌وری مصرف خوراک و ارتقاء کیفیت آب در حوضچه‌های پرورش ماهی هشت‌ضلعی (RAS) است که پایداری و کارآمدی صنعت آبی‌پروری را تضمین می‌کند.

منابع

- Oca, J., & Masalo, I. (2013). Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. *Aquacultural Engineering*, 52, 65-72.
- Papáček, Š., Petera, K., Císař, P., Stejskal, V., & Saberioon, M. (2020). Experimental & computational fluid dynamics study of the suitability of different solid feed pellets for aquaculture systems. *Applied Sciences*, 10(19), 6954.
- Mohamadi, M., Rajabi Islami, H., Ezam, M., & Mousavi, S. (2022). Study of geometric shape and water circulation pattern in fish tanks using computational fluid dynamics. *Journal of Aquaculture Development*, 16(3), 91-102.
- Venegas, P. A., Narváez, A. L., Arriagada, A. E., & Llancaleo, K. A. (2014). Hydrodynamic effects of use of eductors (Jet-Mixing Eductor) for water inlet on circular tank fish culture. *Aquacultural Engineering*, 59, 13-22.
- Davidson, J., & Summerfelt, S. (2004). Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150

- m³) circular 'Cornell-type' dual-drain tanks. *Aquacultural Engineering*, 32(1), 245-271.
6. Gorle, J. M. R., Terjesen, B. F., & Summerfelt, S. T. (2019). Hydrodynamics of Atlantic salmon culture tank: Effect of inlet nozzle angle on the velocity field. *Computers and Electronics in Agriculture*, 158, 79-91.
 7. Gorle, J. M. R., Terjesen, B. F., & Summerfelt, S. T. (2020). Influence of inlet and outlet placement on the hydrodynamics of culture tanks for Atlantic salmon. *International Journal of Mechanical Sciences*, 188, 105944.
 8. Zounemat-Kermani, M. (2016). Numerical modeling of hydrodynamic flow for optimizing design of cold-water fish rearing ponds. *Journal of Aquaculture Development*, 10(2), 67-63.
 9. Moghbeli, A., Rahnama, M. B., Sayari, N., & Zounemat-Kermani, M. (2023). Numerical study on the performance of circular juvenile fish breeding ponds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108206.
 10. Ettema, R., Arndt, R., Roberts, P., & Wahl, T. (2000). Hydraulic Modeling: Concepts and Practice (Asce Manual and Reports on Engineering Practice).
 11. Persson, J. (2000). The hydraulic performance of ponds of various layouts. *Urban water*, 2(3), 243-250.
 12. Moghbeli, A., Rahnama, M. B., Sayari, N., Naghizadeh, M., & Zounemat-Kermani, M. (2024). Effect of Inflow on the Hydrodynamic Behavior of Ponds in Recirculating Aquaculture Systems. 10(1), 1-150.