مدل‌سازی عددی هیدرودینامیک جریان به منظور طراحی بهینه حوضچه‌های پرورش ماهیان سردابی

محمد ذونعمت کرمانی*[۱]

۱- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، صندوق پستی:۷۶۱۶۹۱۳۳

تاریخ دریافت: ۱۸ دی ۱۳۹۴ تاریخ پذیرش: ۹ اردیبهشت ۱۳۹۵

چکیده

تحقیق حاضر به بررسی طراحی بهینه حوضچه‌های مستطیل شکل پرورش ماهیان سردآبی مانند قزل‌آلای رنگین کمان بر اساس شاخص راندمان هیدرولیکی به منظور بررسی اختلاط هیدرودینامیکی جریان می‌پردازد. شاخص راندمان هیدرولیکی توسط منحنی توزیع زمان ماند هیدرولیکی حوضچه معین می‌گردد. در این پژوهش، تعداد ۱۰ حوضچه پرورش ماهی مستطیل شکل فرضی به مساحت ۱۲۰ مترمربع و با ضرایب شکل متفاوت (از ۰/۱۳ تا ۲۰/۸۳) مد نظر قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی جریان و محاسبه راندمان هیدرولیکی حوضچه‌ها، از یک مدل عددی هیدرودینامیکی جریان میانگین عمقی و مدل آشفتگی اسماگورینسکی به همراه معادله انتقال-پخش به روش احجام محدود بر روی شبکه بی‌ساختار مثلثی استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان درون حوضچه‌ها مبین عملکرد مناسب‌تر وضعیت هیدرولیکی در ضرایب شکل بالاتر است. یافته‌های حاصل از تحقیق انتخاب حداقل ضریب شکل معادل ۲ را برای اختلاط جریان (راندمان هیدرولیکی بیش از ۵۰٪) الزامی می‌داند. با این حال پیشنهاد می‌شود به منظور اختلاط مناسب جریان در حوضچه مستطیلی، حداقل ضریب شکل برابر با ۷/۵ (راندمان هیدرولیکی بیش از ۷۵٪) انتخاب شود. در صورتی که با توجه به شرایط محیطی امکان احداث حوضچه با ضریب شکل بالا (بیش از ۷/۵) وجود نداشته باشد، می‌توان با اصلاح وضعیت هندسی حوضچه در بخش ورودی و کاهش مناطق مرده، حداقل ضریب شکل را معادل با ۵ در نظر گرفت.

کلمات کلیدی: راندمان هیدرولیکی، جریان میانگین عمقی، مدل آشفتگی اسماگورینسکی، حوضچه‌های پرورش ماهیان سردآبی.

* عهده‌دار مکاتبات (✉). zounemat@uk.ac.ir

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]

[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]

مقدمه

ماهیان پرورشی عموماً به دو گروه ماهیان سردابی و گرم‌آبی تقسیم می‌گردند که از جمله ماهیان سردابی می‌توان ماهی قزل آلا و آزاد را برشمرد. از مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر در پرورش این گونه از ماهی‌ها می‌توان به نور، تراکم ماهی، دمای آب، اکسیژن محلول، آمونیاک، pH و گاز کربنیک اشاره کرد. در حوضچه‌ها و مزارع تولید ماهیان سردابی به‌دلیل حساسیت این گونه ماهیان پرورشی به دمای پایین واکسیژن بالا، اختلاط دائمی و مناسب آب الزامی است. به همین منظور وجود جریان دائمی آب در مزارع پرورشی به صورت ورود از بالادست و خروج از پایین‌دست جهت تأمین اکسیژن مورد نیاز ماهی‌ها و عدم افزایش دمای آب امری ضروری است (Hinshaw, 1990).

اختلاط جریان آب حوضچه‌ها سبب ایجاد محیطی یکنواخت در تمام آب حوضچه شده و حجم آب مناسب برای حیات آبزی را افزایش می‌دهد. بنابراین با افزایش میزان اختلاط آب درون استخر می‌توان محیطی مناسب‌تر برای پروش ماهی ایجاد نموده و در نتیجه بازدهی بالاتر و سودآوری بیشتری را انتظار داشت. عوامل مختلفی را می‌توان برای افزایش میزان اختلاط آب درون حوضچه مانند وزش باد و یا اختلاط مکانیکی مد نظر قرار داد. از آنجا که بسیاری از حوضچه‌های پرورش آبزیان کم‌عمق هستند، وزش بادهای سنگین در سطح آن‌ها تا حدی موجب اختلاط آب می‌شود. اما، وجود باد در اکثر مناطق مسئله‌ای غیرقابل پیش‌بینی بوده و برای اختلاط و تهویه آب مزارع پرورشی چندان قابل اعتماد نیست. اختلاط مکانیکی آب یکی دیگر از شیوه‌های افزایش ضریب اختلاط آب درون حوضچه است. اختلاط آب حوضچه‌ها به‌طریق مکانیکی قابل اعتمادتر از مخلوط شدن آب با وزش باد است، زیرا قابلیت تنظیم و برنامه‌ریزی را دارد (Jokumsen and Svendsen, 2010). با وجود مزیت‌های بکارگیری ترفندهای اختلاط به شیوه مکانیکی، ابزارهای اختلاط آب به‌طور معمول در مزارع پرورش ماهی مورد بهره‌برداری واقع نمی‌شود. به همین منظور لازم است تا طراحی هندسی حوضچه به صورتی انجام شود تا از نظر هیدرودینامیک جریان بالاترین میزان اختلاط را داشته باشد. یکی از مهم‌ترین عواملی که می‌تواند در طراحی هندسی مزارع پرورش ماهی نقش بسزایی داشته باشد، راندمان هیدرولیکی[1] جریان است. راندمان هیدرولیکی مبین نحوه اختلاط مناسب آب از نقطه نظر هیدرودینامیک جریان درون محیط آبی است. به منظور محاسبه راندمان هیدرولیکی جریان از مقوله زمان ماند[2] هیدرولیکی – که بیانگر مدت زمان اقامت جریان درون حوضچه است – استفاده می‌شود که وابسته به وضعیت هیدرودینامیکی جریان است. اصولاً هیدرودینامیک اختلاط جریان در یک محیط آبی تحت تأثیر عواملی مانند نسبت طول به عرض (r)، شکل ورودی و خروجی و موانع در مسیر جریان است. باتوجه به اینکه در حوضچه‌های پرورش ماهی مانع در برابر جریان ورودی قرار ندارد، در نتیجه فاکتور نسبت طول به عرض (ضریب شکل)[3] یک عامل مهم و تاثیرگذار در راندمان هیدرولیکی و در نتیجه اختلاط آب است (Jenkins, 2003).

یکی از شیوه‌های تعیین راندمان هیدرولیکی شبیه‌سازی عددی جریان و پخش و انتقال ردیاب درون

[1] Hydraulic efficiency
[2] Residence time
[3] Aspect ratio

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]

محیط آبی است. در همین راستا محققانی چند نسبت به طراحی محیط‌های آبی پرورش آبزیان با استفاده از شبیه‌سازی عددی همت گماردند. در تحقیق صورت گرفته توسط Schulz و همکاران (۲۰۰۳) وضعیت و شرایط هیدرولیکی مزارع پرورش ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان در تالاب‌های مصنوعی با جریان زیرسطحی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور حوضچه‌هایی به ابعاد ۱/۴۰ متر در ۱/۰۰ متر و به ارتفاع ۰/۷۰ متر طراحی و اجرا گردید. به منظور تعیین نرخ بارگذاری هیدرولیکی از ۳ میزان دبی ۱، ۳ و ۵ لیتر بر دقیقه استفاده شد. نتایج حاکی از نسبت معکوس زمان ماند و ضریب تخلیه مواد آلی در حوضچه‌ها می‌باشد (Schulz *et al.,* 2003). Oca و Masalo (۲۰۰۷) معیارهای طراحی جریان چرخشی در حوضچه‌های آبی مستطیل شکل را با استفاده از شبیه‌سازی عددی جریان مورد تحلیل قرار دادند. ایشان برای نیل به این هدف رفتار هیدرودینامکی جریان را بر روی ۳ تیپ حوضچه با ضرایب شکل ۰/۹۵، ۱/۴۳ و ۱/۹۱ بررسی نمودند. یافته‌های پژوهش بیانگر عدم افزایش حجم فضای مرده در حوضچه با ضریب شکل ۱/۴۳ نسبت به حوضچه با ضریب شکل ۰/۹۵ است. در حالیکه افزایش ضریب شکل به ۱/۹۱ موجب می‌شود تا جریان غیریکنواخت شده و فضای مرده و بازچرخانی زیادی به وجود آید (Oca and Masalo, 2007). هر چند تحقیقاتی در رابطه با طراحی بهینه هندسی محیط‌های آبی مانند تالاب‌ها توسط پژوهشگران انجام شده است (Liu *et al.*, 2012; Lee *et al.,* 2014)، اما از آنجا که ابعاد، وضعیت توپوگرافی، پوشش گیاهی و شرایط هیدرویکی جریان آب درون تالاب با مزارع پرورش ماهی متفاوت است، بنابراین بررسی وضعیت هیدرولیکی جریان به منظور طراحی بهینه هندسی مزارع پرورش ماهی نیازمند مدل‌سازی می‌باشد. از مهم‌ترین استخرها و حوضچه‌های پرورش ماهی می‌توان به استخرهای دایره‌ای، حوضچه‌های پرورشی مستطیل شکل (مورد نظر در تحقیق حاضر) و استخرهای کانالی شکل اشاره کرد (Yokoyama *et al.,* 2004; Morrisey *et al.,* 2006).

از آنجا که ارزیابی عملکرد اختلاط هیدرودینامیکی جریان و وضعیت راندمان هیدرولیکی حوضچه‌ها و استخرهای پرورش ماهی حائز اهمیت است، بنابراین اهتمام به بحث طراحی هندسی مناسب مزارع پرورش ماهی و پیکربندی مناسب سازه حوضچه ضروری می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر بررسی رفتار هیدرودینامیکی جریان و راندمان هیدرولیکی حوضچه‌های مستطیلی با ضریب شکل متفاوت و در نهایت ارائه مناسب‌ترین الگوهای هندسی ساخت حوضچه‌های پرورش ماهی است.

مواد و روش‌ها

معادلات کاربردی

به علت عمق کم جریان حوضچه‌های پرورش ماهی (حدود ۰/۵ تا ۱ متر) می‌توان از نوسانات جریان در مسیر عمودی صرفنظر کرد و با فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک درون حوضچه، جهت بدست آوردن معادلات حاکم بر پدیده از معادلات آب‌های کم عمق سود جست که در حقیقت فرم ساده شده‌ای از معادلات کلی حرکت سیال هستند (Rao, 1995). مشخصه اصلی این نوع جریان ناچیز بودن مؤلفه سرعت قائم در مقابل مقیاس افقی است و همچنین در نظر داشتن سطح آزاد برای محیط سیال است.

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]

معادلات آب‌های کم عمق برای سطح آزاد در حالت کلی از دو بخش تشکیل شده‌اند که بخش اول مربوط به پیوستگی جریان و بخش دوم مربوط به اندازه حرکت جریان در جهات x و y است (Fossati and Piedra-Cueva, 2008). شکل کلی این معادلات به صورت زیر است:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=Q_z \quad (۱)$$

$$\frac{\partial (hu)}{\partial t}+\frac{\partial (huu)}{\partial x}+\frac{\partial (hvu)}{\partial y}= -gh\frac{\partial z_s}{\partial x}+\frac{1}{\rho_w}(\frac{\partial hT_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial hT_{xy}}{\partial y})-(\frac{\tau_{bx}}{\rho_w}) \quad (۲)$$

$$\frac{\partial (hv)}{\partial t}+\frac{\partial (hvu)}{\partial x}+\frac{\partial (hvv)}{\partial y}= -gh\frac{\partial z_s}{\partial y}+\frac{1}{\rho_w}(\frac{\partial hT_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial hT_{yy}}{\partial y})-(\frac{\tau_{by}}{\rho_w}) \quad (۳)$$

در روابط فوق t زمان، x و y، مختصات دکارتی نقطه، ρ_w جرم حجمی آب، h عمق جریان، u,v بردارهای میانگین عمقی سرعت، g شتاب ناشی از گرانش، Q_z نشان دهنده اثر جریان ورودی ویا خروجی به محیط حل، τ_x,τ_y مقاومت بستر و جداره و $T_{xx},T_{yy},T_{xy},T_{yx}$ مبین عبارات پخش برگرفته از لزجت جریان در جهات x و y هستند. همچنین به منظور تحلیل معادله مربوط به ردیاب (سدیم کلراید)، از معادله انتقال و پخش غلظت میانگین گیری شده عمقی طبق رابطه زیر استفاده شده است (Rao, 1995).

$$\frac{\partial}{\partial t}(hs)+\frac{\partial}{\partial x}(hus)+\frac{\partial}{\partial y}(hvs)= \frac{\partial}{\partial x}\left(h\gamma_x\frac{\partial s}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\gamma_y\frac{\partial s}{\partial y}\right) \quad (۴)$$

در رابطه بالا s میزان شوری (غلظت)، h عمق آب و γ لزجت پخشیدگی[1] است. جهت مدل‌سازی خصوصیات جریان آشفته روش‌های متفاوتی را می‌توان مدنظر قرار داد. از آن‌جمله می‌توان به شبیه‌سازی عددی بی‌واسطه[2]، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[3] و مدل‌های میانگین‌گیری شده رینولدز[4] اشاره نمود (Van *et al.*, 2014). در تحقیق حاضر از مدل آشفتگی اسماگورینسکی[5] برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان استفاده شده است. بهره گرفتن از این مدل به علت هزینه محاسباتی نسبتاً پایین و دقت مناسب توسط پژوهشگران برای شبیه‌سازی جریان میانگین عمقی پیشنهاد شده است (Rebollo *et al.*, 2014). در این روش مقدار لزجت گرداب‌های با توجه به رابطه زیر قابل محاسبه است (Weickert *et al.*, 2010):

$$\nu_t=L^2\sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (۵)$$

که در رابطه بالا L طول نمونه آشفتگی است. نرخ کرنش و طول نمونه آشفتگی را می‌توان با توجه به روابط زیر محاسبه نمود:

$$\bar{S}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \quad (۶)$$

$$L=C_s\bar{\Delta} \quad (۷)$$

Cs ضریب اسماگورینسکی است. $\bar{\Delta}$ معرف متوسط اندازه شبکه است. مقدار $\bar{\Delta}$ برای جریان‌های میانگین‌گیری شده در عمق را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$\bar{\Delta}=(\Delta_x\Delta_y h)^{1/3} \quad (۸)$$

[1] Diffusivity
[2] Direct numerical simulation (DNS)
[3] Large eddy simulation (LES)
[4] Reynolds averaged navier stokes (RANS)
[5] Smagorinsky

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]

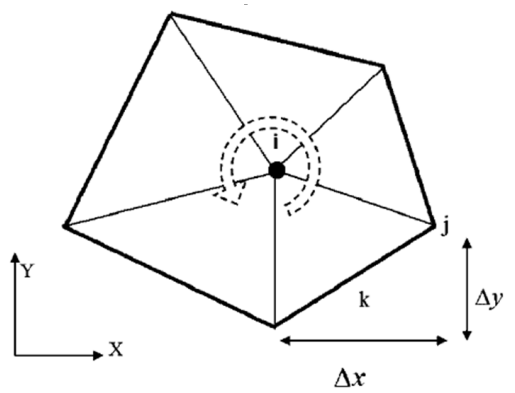
ضریب اسماگورینسکی با توجه به شرایط و نوع جریان متفاوت است. به عنوان نمونه در شرایط جریان آشفته ایزوتروپ و رینولدز بالا مقدار ۰/۱۸ پیشنهاد می‌شود. این ضریب برای آب‌های کم‌عمق (مانند تحقیق حاضر) در حالت کلی ۰/۱۵ و برای جریان‌های درون کانال مقدار ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود (Weickert *et al.*, 2010).

تحلیل معادلات

در میان روش‌های تقریبی حل، روش‌های تفاضل محدود، اجزاء محدود و احجام محدود سابقه کاربرد بیشتری را نشان می‌دهند. روش احجام محدود جز روش‌های عددی انتگرالی جهت حل معادلات است. به طور کلی قانون بقا حرکت سیال را می‌توان به صورت یک رابطه انتگرالی بیان نمود. برای حل معادلات انتگرالی به روش احجام محدود، محیط مورد مطالعه به حجم‌ها (در حالت سه بعدی) و یا سطح‌های کوچک (در حالت دو بعدی) تقسیم می‌شود. سپس مقادیر جرم و اندازه حرکت در شکل انتگرالی در این حجم‌ها اولیه بکار برده می‌شود. در روش حجم محدود چون متغیر در قلمرو فیزیکی انتگرال‌گیری می‌شود، لذا هموار بودن شبکه حائز اهمیت است. شیوه‌های متنوعی برای گسسته‌سازی معادلات با استفاده از روش احجام محدود وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شیوه‌های باساختار و بی‌ساختار اشاره کرد. در تحقیق حاضر از شیوه گسسته‌سازی مبتنی بر احجام محدود بی‌ساختار و روش رئوس سلول در حالت همپوشان استفاده شده است. همچنین به منظور گسسته‌سازی معادلات و اخذ نتایج از کد عددی توسعه یافته توسط نویسنده در محیط برنامه‌نویسی Fortran و برای نمایش نتایج از نرم‌افزار پس‌پردازشگر TecPlot استفاده شده است. از آنجا که شیوه گسسته‌سازی مورد استفاده در مقاله حاضر مبتنی بر احجام محدود رئوس سلول در حالت همپوشان می‌باشد، بنابراین در اینجا تنها به تشریح این شیوه پرداخته می‌شود. فرم کلی معادلات جریان دوبعدی میانگین‌گیری شده در عمق و معادله پخش-انتقال را می‌توان به صورت زیر بیان داشت.

$$\frac{\partial W}{\partial t}+(\frac{\partial E^c}{\partial x}+\frac{\partial F^c}{\partial y})= (\frac{\partial E^d}{\partial x}+\frac{\partial F^d}{\partial y})+S \quad (۹)$$

که W بیانگر متغیرهای مورد حل، $\bar{F}^c$ بردار شار انتقالی متغیر W، $\tilde{F}^d$ بردار شار پخش متغیر W و S جمله مربوط به چشمه و چاه می‌باشد. که بالا نویس‌های c معرف جملات انتقالی و d مبین جملات پخش هستند. از آنجا که اجزاء شبکه مورد نظر در مدل دوبعدی مثلثی است، بنابراین انتگرال‌گیری بر روی این اشکال هندسی صورت می‌پذیرد. شکل (۱) ساختار شبکه دوبعدی را برای حوزه حل Ω نشان می‌دهد (Sabbagh-Yazdi *et al.*, 2007).



شکل ۱: حجم کنترل شکل گرفته در روش احجام محدود رئوس سلول همپوشان

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]

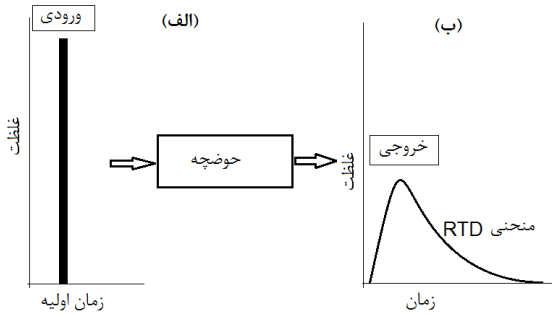
بنابراین با توجه به توضیحات فوق می‌توان گفت که در نهایت رابطه (۹) پس از گسسته‌سازی به شکل زیر تبدیل خواهد شد.

$$W_i^{n+1} = W_i^{n} - \frac{\Delta t}{\Omega_i}\sum_{k=1}^{m}\left(\bar{E}\Delta x - \bar{F}\Delta y\right) + \frac{S_i}{3}\Delta t \qquad (۱۰)$$

در رابطه بالا منظور از $n+1$, n گام زمانی حل معادلات است (Zounemat-Kermani and Sabbagh-Yazdi, 2010).

زمان ماند و راندمان هیدرولیکی

تحت شرایط ایده‌ال می‌توان خصوصیات جریان درون سیستم حوضچه را جریان پیوسته[1] فرض نمود. این بدان معنی است که که کل جریان وروی به داخل حوضچه تا هنگام خروج رفتاری به صورت یکپارچه دارد. به طور کلی مدت زمانی را که جریان در داخل سیستم سپری می‌کند زمان ماند هیدرولیکی می‌نامند. به منظور محاسبه زمان ماند هیدرولیکی می‌توان از بررسی و تحلیل روند تغییرات غلظت یک رديـاب درون حوضچه سود جست. در این روش رديـاب مورد نظر (مانند سدیم کلراید[2]) طی یک آزمون پالس ناگهانی در محل ورود جریان با یک غلظت معین در مدت زمان کم تزریق می‌شود. بر اساس اندازه‌گیری غلظت رديـاب در خروجی حوضچه می‌توان منحنی توزیع زمان ماند[3] (RTD) را به‌دست آورده و ترسیم نمود. شرایط اختلاط جریان داخل حوضچه را می‌توان به‌وسیله موقعیت و توزیع منحنی RTD تفسیر کرد. شکل (۲) نمایی شماتیک از منحنی RTD ورودی و خروجی را که از آزمایش توزیع غلظت رديـاب حاصل شده است نشان می‌دهد (Persson, 2000).



شکل ۲: منحنی RTD از آزمایش رديـاب الف) پالس ورود رديـاب در ورودی حوضچه، ب) منحنی غلظت رديـاب در قسمت خروجی حوضچه (اقتباس از Persson, 2000)

بیشینه و پیک موقعیت منحنی توزیع زمان ماند بیانگر میانگین زمان ماند هیدرولیکی(t_m) محیط آبی مورد نظر است. در ادامه راندمان هیدرولیکی حوضچه را می‌توان با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه کرد:

$$\lambda = \frac{t_m}{t_n} \qquad (۱۱)$$

در این رابطه t_n زمان ماند هیدرولیکی مجازی نامیده می‌شود که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$t_n = \frac{Ah}{Q} \qquad (۱۲)$$

که در آن A مساحت حوضچه، h عمق میانگین حوضچه و Q دبی ورودی است. هر چه راندمان هیدرولیکی حوضچه بالاتر باشد، اختلاط هیدرودینامیکی آب بهتر صورت می‌گیرد.

خصوصیات هندسی حوضچه‌ها

از شایع‌ترین نمونه‌های استخرها و حوضچه‌های پرورش ماهی می‌توان به استخرهای دایره‌ای و حوضچه‌های مستطیل شکل اشاره داشت. حوضچه‌های دایره‌ای شکل عموماً به صورت بتنی یا ورق‌های فلزی

[1] Plug Flow
[2] Sodium chloride
[3] Residence time distribution

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]

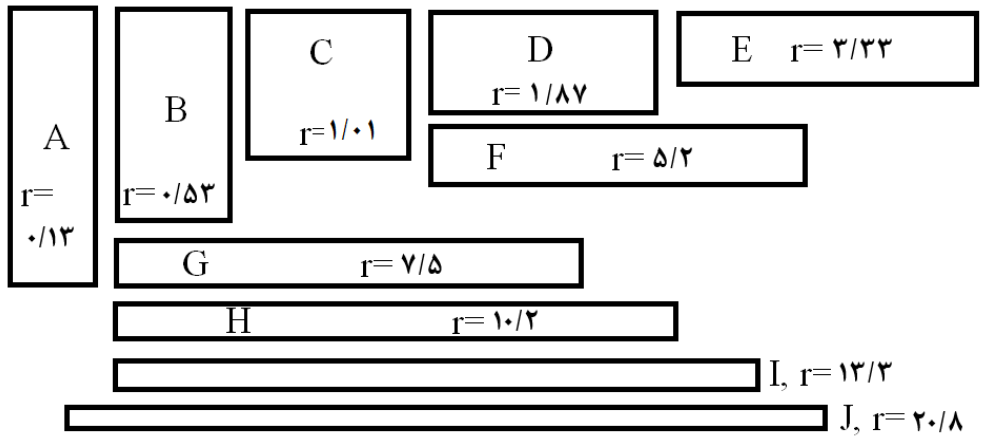
ساخته می‌شوند. ابعاد این حوضچه‌ها متناسب با اندازه ماهی در قطرهای ۲،۴،۶،۸ تا ۱۰ متری احداث می‌شود. ارتفاع دیواره‌ها از ۷۵ سانتی‌متر برای حوضچه‌های کوچک تا ۲ متر برای حوضچه‌های بزرگ متغیر است. جریان آب در این حوضچه‌ها به صورت چرخشی است زیرا دریچه خروجی آب در مرکز تعبیه می‌گردد. از محاسن این استخرها می‌توان به اختلاط بالا و مناسب آب درآنها، شرایط فضای مناسب برای حرکت ماهی‌ها و خود پالایی آن اشاره کرد. از مهم‌ترین معایب آن‌ها فضای مرده بین استخرها، هزینه احداث بالاتر و نیاز به کارگر ماهر در جمع‌آوری آن‌ها است (Yokoyama *et al.*, 2004; Morrisey *et al.*, 2006).

این در حالی است که در حوضچه‌های مستطیل شکل منابع تأمین آب کانال‌ها چشمه‌ها ،رودخانه‌ها، آب پشت سدها یا چاه‌های عمیق هستند وجریان آب درون حوضچه‌ها بصورت خطی بوده که از یک سو وارد واز سوی دیگر خارج می‌شود، شیب طولی کف استخر ۱ درصد وشیب جانبی ۲تا ۳ درصد است. با توجه به شرایط عمومی ساخت حوضچه‌های پرورش ماهیان سردابی، ابعاد رایج این حوضچه‌ها برای ماهی‌های بازاری از ارتفاع ۰/۵ تا ۱متر، عرض ۳ تا ۶ متر و طول ۳۰ تا ۴۰ متر تغییر می‌کند (Yokoyama *et al.*, 2004; Morrisey *et al.*, 2006). در همین راستا، به منظور بررسی تغییرات راندمان هیدرولیکی نسبت به وضعیت هندسی حوضچه‌های مستطیل شکل پرورش ماهی، تعداد ۱۰ حوضچه مستطیل شکل به مساحت ۱۲۰ مترمربع با ضرایب هندسی متفاوت مد نظر قرار گرفت. در تمامی این حوضچه‌ها محل ورود و خروج آب در قسمت میانی حوضچه قرار گرفته است. خصوصیات هندسی حوضچه‌های مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است. شکل (۳) نمایی شماتیک از پیکربندی ۱۰ حوضچه مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۱: خصوصیات هندسی حوضچه‌های مورد بررسی

نام حوضچه	طول حوضچه (متر)	عرض حوضچه (متر)	حجم حوضچه (متر مکعب)	ضریب شکل (نسبت طول به عرض)
A	۴	۳۰	۶۰	۰/۱۳
B	۸	۱۵	۶۰	۰/۵۳
C	۱۱	۱۰/۹	۶۰	۱/۰۱
D	۱۵	۸	۶۰	۱/۸۷
E	۲۰	۶	۶۰	۳/۳۳
F	۲۵	۴/۸	۶۰	۵/۲۱
G	۳۰	۴	۶۰	۷/۵۰
H	۳۵	۳/۵	۶۰	۱۰/۲۱
I	۴۰	۳	۶۰	۱۳/۳۳
J	۵۰	۲/۴	۶۰	۲۰/۸۳

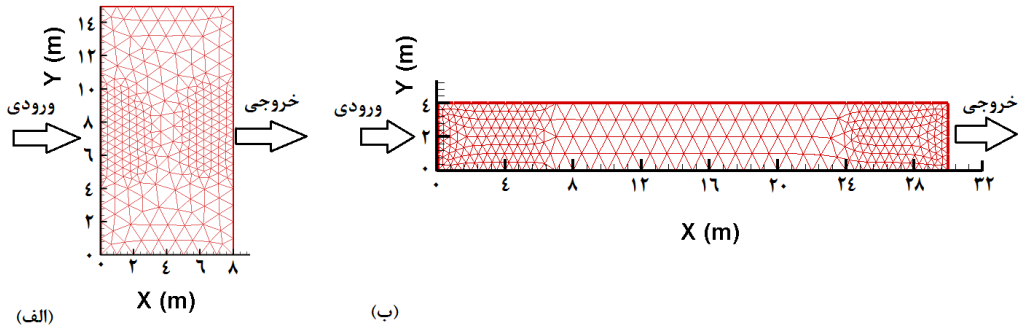
[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]



شکل ۳: پیکربندی‌های مختلف حوضچه‌های پرورش ماهی مستطیل شکل با ضرایب شکل متفاوت (r ضریب شکل و برابر با نسبت طول به عرض می‌باشد)

پیاده‌سازی و اجرای مدل

نخستین گام در استفاده از روش‌های عددی برای حل معادلات حاکم بر جریان، شبکه‌بندی محیط حل است. نوع و کیفیت این شبکه‌بندی بر روی نتایج حل تأثیر قابل توجهی می‌گذارد. اهمیت این مساله در استفاده از شبکه‌های بدون ساختار مثلثی و چهار وجهی بیشتر نمایان می‌شود. در تحقیق حاضر از شبکه‌بندی مثلثی بی‌ساختار استفاده شده است. بنابراین فارغ از هر گونه محدودیت ساختاری برای شبکه‌بندی محیط مورد نظر برای تحلیل، می‌توان از عناصر مثلثی با اندازه‌های مختلف برای تقسیم حوزه مذکور به زیر حوزه‌های قابل تحلیل استفاده نمود. این قابلیت دو امتیاز عمده را در بر دارد، نخست آنکه محیط‌های حل با مرزهای پیچیده با استفاده از مثلث قابل شبکه‌بندی می‌شوند؛ و دوم اینکه با ریز و درشت کردن اندازه مثلث‌ها در مناطق مختلف و با منظور نمودن تعداد زیادی از نقاط گرهی در مناطق حساس با گرادیان شدید و منظور نمودن تعداد کم‌تر نقاط گرهی در مناطق کم اهمیت تر حوزه حل، می توان انعطاف‌پذیری زیادی را در نحوه توزیع نقاط گرهی بدست آورد. شکل (۴) نحوه مثلث‌بندی و شبکه ایجاد شده برای دو نمونه از حوضچه‌های پرورش ماهی (حوضچه‌های تیپ B, G) را نمایش می‌دهد.



شکل ۴: محیط فیزیکی گسسته‌سازی شده مربوط به دو حوضچه مستطیلی؛ الف) B با ضریب هندسی ۰/۵۳ و ب) G با ضریب هندسی ۷/۵

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]

همانگونه که در شکل (۴) مشخص است، از آنجا که دریچه‌های ورود و خروج در وسط قسمت عرضی حوضچه فرض شده‌اند و با توجه به اینکه گرادیان شدیدتر جریان در مناطق ورودی و خروجی (با توجه به شکل و الگوی غالب جریان)، اندازه شبکه در این مناطق نیز ریزتر در نظر گرفته شده است. صحت این مساله را می‌توان در شکل (۵) برای الگوی غالب جریان در مناطق ورودی و خروجی مشاهده نمود.

به منظور مدل‌سازی جریان در مدل عددی لازم است تا ضرایب مربوط به معادلات و شرایط محیطی به درستی تعیین گردد، چرا که اعمال ضرایب مدل‌سازی نادرست بر روی نتایج حاصل از مدل‌سازی تأثیر سوء می‌گذارد. با در نظر گرفتن حوضچه‌های مستطیلی بتنی، ضریب زبری مانینگ معادل ۰/۰۱۴ در نظر گرفته شد. میزان ضریب لزجت گرداب‌های (υ_T) به کمک مدل آشفتگی اسماگورینسکی محاسبه می‌شود. در تحقیق حاضر به منظور تعیین ضریب پخش در جریان‌های آشفته، از عدد اشمیت[1] استفاده شده است (Rodi, 1993).

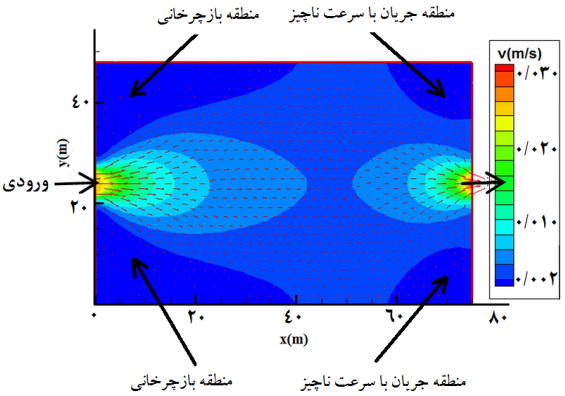
$$\gamma_T = \frac{\upsilon_T}{Sc_T} \qquad (۱۳)$$

مقدار پیشنهادی عدد اشمیت در جریان‌های آشفته با سطح آزاد مابین ۰/۸-۱ است که در تحقیق حاضر برابر با ۰/۹ فرض شده است (Versteeg and Malalasekera, 2007). برای شبیه‌سازی رفتار رد‌یاب - پس از احراز شرایط هیدرولیکی پایدار مدل - یک رد‌یاب لحظه‌ای (سدیم کلراید) در محل ورودی حوضچه‌ها در نظر گرفته شد. همچنین شرایط مرزی اعمال شده در جداره‌ها به صورت شرط مرزی صلب لغزان و در نقاط ورودی و خروجی مرز باز با دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه اعمال شد.

نتایج

شبیه‌سازی الگوی جریان

پس از آماده‌سازی شبکه مربوط به هر حوضچه و اعمال شرایط مرزی، مدل‌سازی عددی جریان و پخش غلظت صورت پذیرفت. به عنوان نمونه، نتایج حاصل از مدل‌سازی در قالب بردارهای سرعت و مناطق هم سرعت جریان در حوضچه D با ضریب شکل ۱/۸۷ در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: بردارهای سرعت و مناطق هم‌سرعت جریان در حوضچه D با ضریب شکل ۱/۸۷

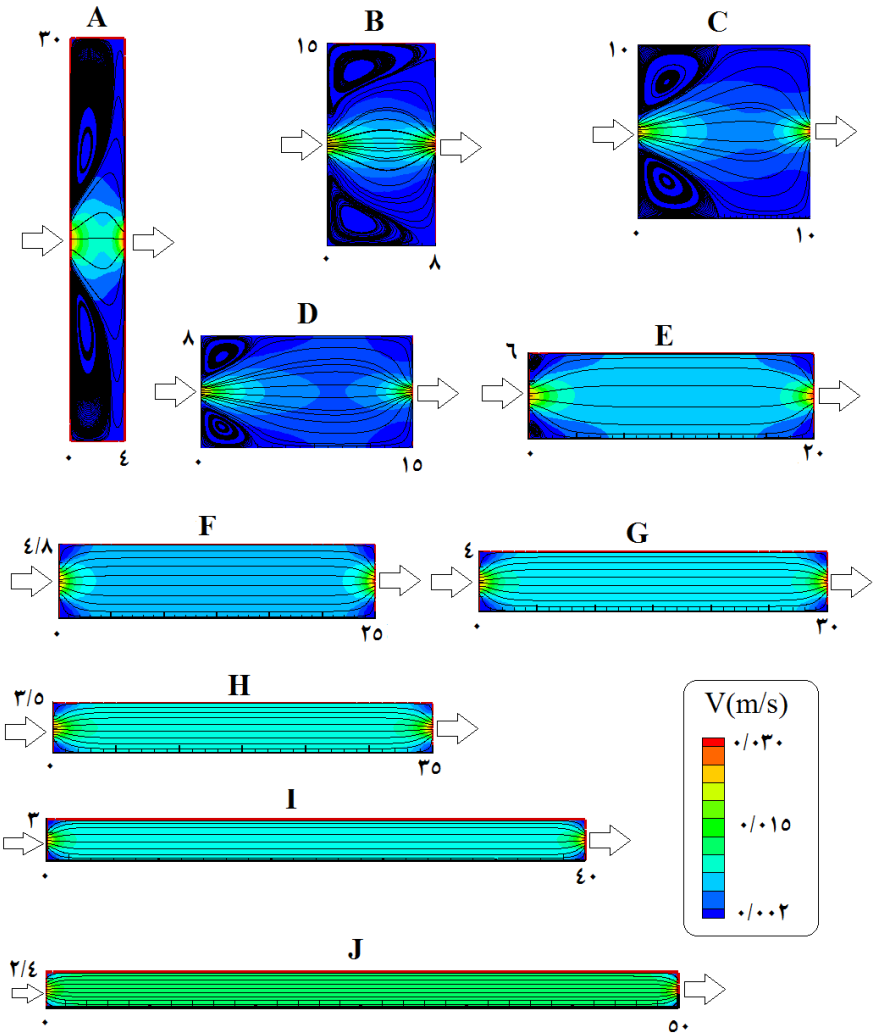
با توجه به الگوی بردارهای سرعت شکل گرفته در شکل (۵) مشخص می‌شود که بیشترین مقادیر سرعت در محل ورودی و خروجی جریان می‌باشد. همچنین چهار منطقه با خصوصیت جریان مرده[2] و با سرعت ناچیز در چهارگوشه حوضچه به خصوص در گوشه‌های بخش ورودی قابل ملاحظه است. در این نواحی سرعت جریان بسیار پایین بوده (کم‌تر از ۰/۰۰۲

[1] Schmidt number

[2] Dead zones

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]

متر بر ثانیه) و مانع از اختلاط مناسب آب می‌گردد. در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی در قالب مناطق هم-سرعت و خطوط جریان مربوط به حوضچه‌های فرضی ده‌گانه در شکل (۶) نشان داده شده است. از بررسی نتایج مربوط به شبیه‌سازی جریان در شکل ۵ مشخص می‌شود جریان در حوضچه‌های با ضریب شکل بالاتر روند یکنواخت‌تری را برای رسیدن به دریچه خروجی طی کرده است. خطوط جریان شکل گرفته در حوضچه‌های A,B,C و D نشان‌دهنده دو ناحیه بازچرخانی قابل ملاحظه در گوشه‌های قسمت ورود جریان است (این مسئله تا حدی در حوضچه E نیز قابل مشاهده است). شایان ذکر است که شکل‌گیری مناطق بازچرخانی در حوضچه‌های F تا J مشاهده نمی‌شود که حاکی از عملکرد مناسب‌تر این نوع حوضچه نسبت به حوضچه‌های با ضریب شکل پایین است.



شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی شده در قالب خطوط جریان و مناطق هم‌سرعت جریان در حوضچه‌های فرضی ده‌گانه

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]

محاسبه راندمان هیدرولیکی

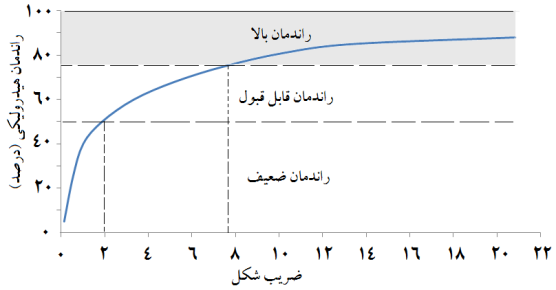
در ادامه به منظور ارزیابی عملکرد هیدرولیکی حوضچه‌ها، پس از محاسبه زمان ماند مجازی هر حوضچه و تعیین زمان ماند هیدرولیکی (زمان پیک RTD)، میزان راندمان هیدرولیکی هر حوضچه محاسبه گردید. هرچه راندمان هیدرولیکی در حوضچه بیشتر باشد اختلاط طبیعی آب بهتر صورت گرفته و در نتیجه موجب بازدهی بیشتر می‌گردد. با توجه به مقادیر مربوط به راندمان هیدرولیکی، سه حالت راندمان بالا (λ>۰/۷۵)؛ قابل قبول (۰/۷۵>λ>۰/۵) و ضعیف (λ<۰/۵) برای حوضچه‌ها قابل دسته‌بندی است (Persson, 2000). آستانه طراحی بهینه مورد نظر در این تحقیق λ>۰/۷۵ در نظر گرفته شده است. در صورتی که راندمان هیدرولیکی حوضچه پایین‌تر از ۰/۷۵ باشد، اختلاط آب درون حوضچه به شکل مناسب صورت نگرفته و موجب عدم جریان یکنواخت و مناسب آب، کاهش اکسیژن، افزایش تلفات و در نهایت کاهش بازدهی می‌گردد. نتایج مربوط به مدلسازی‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: نتایج شبیه‌سازی عددی در برآورد راندمان هیدرولیکی حوضچه‌های ده‌گانه

نام حوضچه	ضریب شکل (نسبت طول به عرض)	حجم حوضچه	زمان ماند مجازی (ثانیه)	زمان ماند هیدرولیکی (ثانیه)	راندمان هیدرولیکی (درصد)
A	۰/۱۳	۶۰	۴۰۰۰	۲۰۰	۵
B	۰/۵۳	۶۰	۴۰۰۰	۱۰۰۰	۲۵
C	۱/۰	۶۰	۴۰۰۰	۱۶۰۰	۴۰
D	۱/۸	۶۰	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۵۰
E	۳/۳	۶۰	۴۰۰۰	۲۴۰۰	۶۰
F	۵/۲	۶۰	۴۰۰۰	۲۷۲۰	۶۸
G	۷/۵	۶۰	۴۰۰۰	۳۰۰۰	۷۵
H	۱۰/۲	۶۰	۴۰۰۰	۳۲۴۰	۸۱
I	۱۳/۳	۶۰	۴۰۰۰	۳۴۰۰	۸۵
J	۲۰/۸	۶۰	۴۰۰۰	۳۵۲۰	۸۸

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ۲ مشخص می‌شود که با افزایش ضریب شکل (نسبت طول به عرض حوضچه) مقدار زمان ماند هیدرولیکی به زمان ماند مجازی نزدیک‌تر می‌شود. این پدیده دلالت برآن دارد که سیال به صورت یکنواخت‌تر از میان حوضچه عبور کرده است. همچنین با افزایش ضریب شکل راندمان هیدرولیکی نیز افزایش یافته است. این میزان افزایش راندمان در ضرایب شکل کم‌تر از ۵ بسیار قابل ملاحظه بوده در حالی که در ضرایب شکل بیش از ۷ روند ملایم‌تری را دنبال می‌کند. نمودار شکل (۷) نرخ تغییرات راندمان هیدرولیکی را در برابر ضرایب شکل حوضچه‌های ده‌گانه به تصویر می‌کشد.

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]



شکل ۷: رابطه بین راندمان هیدرولیکی و نسبت طول به عرض حوضچه

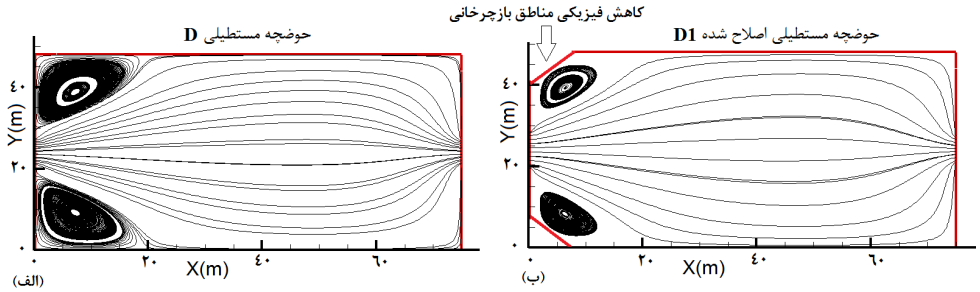
نتایج حاصل از جدول (۲) و شکل (۷) حاکی از آن است که حداقل ضریب شکل برابر با ۷/۵ (شامل حوضچه‌های G,H,I,J) می‌تواند راندمان هیدرولیکی برابر با ۷۵ درصد را در بر داشته باشد که در زمره حوضچه‌های با طرح هندسی بالا قرار می‌گیرند. با این حال حوضچه‌های دارای ضریب شکل مابین ۲ تا ۷/۵ نیز راندمان قابل قبول داشته و می‌توانند با اصلاح ساختار هندسی در طراحی‌ها از نقطه نظر هیدرولیکی مد نظر قرار گیرند.

بحث

بر اساس یافته‌های حاصل از تحقیق، در نظر گرفتن ضریب شکل مابین ۷/۵ تا ۱۰ برای طراحی هندسی حوضچه‌های پرورش مستطیلی به منظور اختلاط مناسب هیدرودینامیکی جریان پیشنهاد می‌شود (در اینجا حوضچه G با ابعاد طول ۴۰ متر در عرض ۳۰ متر و حوضچه H با ابعاد طول ۳۵ متر در عرض ۳/۴ متر).

وجود نواحی بازچرخانی در گوشه‌های بالایی و پایینی حوضچه موجب عدم اختلاط مناسب آب و در نتیجه کاهش راندمان هیدرولیکی می‌شود؛ که این مسئله با نتایج حاصل از تحقیق (Oca and Masalo, 2007) مبنی بر افزایش کارایی عملکرد هیدرولیکی حوضچه با کاهش مناطق بازچرخانی همسو است (شکل ۵). همچنین صحت این امر در نتایج مدل عددی توسط (Jenkins, 2007) به وضوح قابل مشاهده است. بنابراین در صورتی که بتوان مساحت مربوط به این نواحی بازچرخانی را کاهش داد، افزایش راندمان هیدرولیکی قابل دستیابی است. یک رهیافت ارائه شده برای کاهش مناطق بازچرخانی توسط (Bodin *et al.*, 2012) استفاده از مانع در برابر جریان ورودی است؛ به نحوی که باعث پخش شدن جریان در ابتدای حوضچه و اختلاط مناسب‌تر جریان می‌شود. راهکار ارائه شده در تحقیق حاضر برچیدن رئوس قائمه بالایی و پایین بخش ورودی و استفاده از ساختار گوشه‌های ۴۵ درجه است (به طوریکه حجم حوضچه را نیز دستخوش تغییرات قابل ملاحظه ننماید). انجام این طرح برای حوضچه‌های با راندمان هیدرولیکی قابل قبول مابین ۵۰٪ تا ۷۵٪ (حوضچه‌های D,E,F) مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان حوضچه‌های اصلاح شده (D1,E1,F1) مبین کاهش سطح نواحی بازچرخانی در گوشه‌های بالایی و پایینی حوضچه است. شکل (۸) مقایسه رفتار جریان را در قالب خطوط جریان شکل گرفته برای حوضچه مستطیلی D (ضریب شکل ۱/۸۷) و حوضچه اصلاح شده D1 به تصویر می‌کشد. همانگونه که در شکل (۸) مشخص است استفاده از گوشه‌های ۴۵ درجه موجب کاهش سطح نواحی بازچرخانی می‌شود. نتایج حاصل از مدلسازی را برای سه حوضچه مورد نظر در جدول (۳) درج شده است.

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]



شکل ۸: مقایسه رفتار الگوی جریان درحوضچه D با ضریب شکل ۱/۸۷، الف)حوضچه مستطیلی اولیه؛ ب) طرح حوضچه اصلاح‌شده

جدول ۳: نتایج شبیه‌سازی عددی در برآورد راندمان هیدرولیکی حوضچه‌های اصلاح شده

نام حوضچه	ضریب شکل (نسبت طول به عرض)	حجم حوضچه (متر مکعب)	زمان ماند مجازی (ثانیه)	زمان ماند هیدرولیکی (ثانیه)	راندمان هیدرولیکی (درصد)
D۱	۱/۸	۵۷	۳۸۰۰	۲۰۹۰	۵۵
E۱	۳/۳	۵۸	۳۸۶۰	۲۵۵۰	۶۶
F۱	۵/۲	۵۸	۳۸۶۰	۲۹۳۰	۷۶

بررسی عملکرد هیدرولیکی طرح حوضچه‌های اصلاح‌شده نشان می‌دهد که راندمان هیدرولیکی حوضچه F با ضریب شکل ۵/۲ از ۶۸ درصد به ۷۶ درصد ارتقا یافته است که حوضچه را در زمره طرح‌های با راندمان هیدرولیکی بالا قرار می‌دهد. بنابراین استفاده از طرح گوشه‌های ۴۵ درجه موجب افزایش دامنه طراحی هندسی حوضچه‌ها از ضریب شکل ۵/۲ تا ۱۰ شده است. در نهایت ذکر این نکته ضروری است که ابعاد پیشنهادی این پژوهش برای ساخت حوضچه‌های پرورش ماهی هر چند به لحاظ تئوری قابل قبول بوده و راندمان هیدرولیکی مناسب را در بر دارد، اما در عمل ساخت مزارع و جانمایی استخرها بستگی به شرایط محیطی و فضای در دسترس منطقه مورد نظر دارد. بنابراین در حالت کلی اجرای مزارع با بهترین ابعاد پیشنهادی همواره میسر نخواهد بود که در اینصورت می‌توان با توجه به نتایج حاصل از تحقیق، اصلاح ساختار هندسی محیط آبی را برای طراحی و ساخت حوضچه برگزید.

به طور کلی ارزیابی نتایج تحقیق، طراحی بهینه هندسی حوضچه‌های پرورش ماهی را با در نظر داشتن ضریب شکل بیش از ۷/۵ بیان می‌دارد. به عبارت دیگر، برای ساخت حوضچه‌ای به مساحت ۱۲۰ متر مربع، حداکثر مقدار عرض حوضچه برابر با ۴ و حداقل مقدار طول برابر با ۳۰ متر پیشنهاد می‌شود. در شرایطی که لزوم استفاده از حوضچه‌های مستطیلی با ضریب شکل پایین‌تر از ۷/۵ مد نظر باشد، اصلاح ساختار هندسی حوضچه تا ضریب شکل ۵ قابل قبول می‌باشد. که در در اینصورت می‌توان حداکثر مقدار عرض حوضچه با مساحت ۱۲۰ متر مربع را تا ۵ متر نیز افزایش داد.

منابع

1. Bodin, H., Mietto, A., Ehde, P.M., Persson, J. and Weisner, S.E., 2012. Tracer behaviour and analysis of hydraulics in experimental free water surface wetlands. Ecological Engineering, 49, 201-211.

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]

2. Fossati, M., Piedra-Cueva, I., 2008. Numerical modelling of residual flow and salinity in the Rıo de la Plata. Applied Mathematical Modelling, 32, 1066–1086.
3. Hinshaw, J.M., 1990. Trout Farming: A Guide to Production and Inventory Management, Research project, SRAC Publication No. 222., Grant Number 87-CRSR-2-3218, USA.
4. Jenkins, G.A., 2003. Modeling the hydraulic efficiency of artificial welands. MODSIM 2003 International Congress on Modelling and Simulation.
5. Jokumsen, A., Svendsen, L.M., 2010. Farming of Freshwater Rainbow Trout in Denmark, Report: Technical University of Denmark National Institute of Aquatic Resources, DTU Aqua, Section for Aquaculture.
6. Lee, S., Maniquiz-Redillas, M.C., Kim L-H., 2014. Settling basin design in a constructed wetland using TSS removal efficiency and hydraulic retention time. Journal of Environmental Sciences, 26(9), 1791–1796.
7. Liu, L., Hu, J., Qi, J., 2012. Research on the Influencing Factors of Hydraulic Efficiency in Ditch Wetlands. Procedia Engineering, 28, 759–762.
8. Morrisey, D.J., Cole, R.G., Davey, N.K., Handley, S.J., Bradley, A., Brown, S.N., Madarasz, A.L., 2006. Abundance and diversity of fish on mussel farms in New Zealand. Aquaculture, 252(2), 277-288.
9. Oca, J., Masalo, I., 2007. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks. Aquacultural Engineering, 36, 36–44.
10. Persson, J., 2000. The hydraulic performance of ponds of various layouts. Urban Water, 2, 243–250.
11. Rao, D., 1995. A numerical modeling study of the flow and salinity structure in the Godavari estuary, east coast of India. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 21, 35-48.
12. Rebollo, T. C., Hecht, F., Marmol, M. G., Orzetti, G., Rubino, S., 2014. Numerical approximation of the Smagorinsky turbulence model applied to the primitive equations of the ocean. Mathematics and Computers in Simulation, 99, 54–70.
13. Rodi, W., 1993. Turbulence models and their application in hydraulics, Third edition, IAHR Monograph, Delft, Netherlands. 124.
14. Sabbagh-Yazdi, S.R., Zounemat-Kermani, M., and Kermani, A., 2007. Solution of depth-averaged tidal currents in Persian Gulf on unstructured overlapping finite volumes. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 55(1), 81-101.
15. Schulz, C., Gelbrecht, J., Rennert, B. 2003. Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow. Aquaculture, 217, 207-221.
16. Van, C.P., Deleersnijder, E., Bousmai, D., Soares-Frazao, S., 2014. Simulation of flow in compound open-channel using a discontinuous Galerkin finite-element method with Smagorinsky turbulence closure. Journal of Hydro-environment Research, 8(4), 396–409.
17. Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007. An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Second Edition, Prentice Hall. United States, 517.
18. Weickert, M., Teike, G., Schmidt, O., Sommerfeld, M., 2010. Investigation of the LES WALE turbulence model within the lattice Boltzmann framework. Computers and Mathematics with Applications, 59(7), 2200-2214.
19. Yokoyama, H., Inoue, M., Abo, K., 2004. Estimation of the assimilative capacity of fish-farm environments based on the current velocity measured by plaster balls, Aquaculture, 240(1), 233-247.
20. Zounemat-Kermani, M., Sabbagh-Yazdi, S.R., 2010. Coupling of two- and three-dimensional hydrodynamic numerical models for simulating wind-induced currents in deep basins. Computers and Fluids, 39(6), 994-1011.

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-05]

[DOR: 20.1001.1.23223545.1395.10.2.11.3]