"مقاله پژوهشی"

مطالعه شکل هندسی و الگوی گردش آب در حوضچه پرورش قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorynchus mykiss*) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

میلاد محمدی مقدم[۱]، هومن رجبی اسلامی[۱*]، مجتبی عظام[۲]، سید عبدالمجید موسوی[۳]

۱-گروه شیلات، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲- گروه علوم دریایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۳- گروه علوم دامی، واحد پیشوا-ورامین، دانشگاه آزاد اسلامی، ورامین، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۲/۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۱۳

چکیده

ایجاد شرایط آسایش ماهیان از نقطه نظر یکنواختی میدان سرعت و رژیم جریان حاکم بر استخر یکی از الزامات آبزی‌پروری است که موجب بهبود شرایط تولید خواهد شد. بدین منظور شکل هندسی و الگوی گردش آب در حوضچه پرورش ماهی با بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی، نرم‌افزار فلوئنت و مدل آشفتگی k-ε مورد بررسی قرار گرفت. سه حوضچه مربعی، دایره‌ای و گوشه‌دار به عنوان استخرهای معمول در پرورش قزل‌آلای رنگین‌کمان در این پژوهش انتخاب و سناریوهای مختلف پس از تهیه هندسه حوضچه‌ها با استفاده از شاخص‌های یکنواختی و هیدرودینامیک جریان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد شاخص یکنواختی در حوضچه دایره‌ای برابر ۰/۹۴۰۰۴۸، در حوضچه گوشه‌دار برابر ۰/۹۱۹۴۴۷ و در حوضچه مربعی برابر ۰/۸۷۴۲۲۶ بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود شاخص یکنواختی الگوی جریان و میدان سرعت با نزدیک شدن شکل حوضچه‌ها به حالت مدور بهبود پیدا می‌کند، هرچند فضای فیزیکی اشغال شده توسط استخرها نیز باید مد نظر قرارگرفته شود.

کلمات کلیدی: قزل‌آلای رنگین‌کمان، سیستم آبزی‌پروری چرخشی، هیدرودینامیک جریان، شاخص یکنواختی، دینامیک سیالات محاسباتی، روش حجم محدود.

* عهده‌دار مکاتبات: rajabi.h@srbiau.ac.ir

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]

مقدمه

آبزی‌پروری از منابع حیاتی تامین پروتئین در سراسر جهان است که فعالیت‌های مرتبط با آن طی سالیان اخیر از رشد سریع‌تری برخوردار بوده به طوری که میزان تولید ماهیان از این طریق در سال ۲۰۱۸ به حدود ۴۶ درصد رسیده است (Yu *et al*., 2021). با این وجود توسعه فعالیت‌های آبزی‌پروری با مشکلاتی از جمله عدم تولید پایدار آبزیان همراه خواهد بود که بیشتر این مشکلات از تغذیه نامناسب، کیفیت آب و البته مدیریت غلط ایجاد خواهند شد (Burges *et al*., 2018). قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Oncorynchus mykiss*) یکی از گونه‌های متعلق به خانواده آزادماهیان می‌باشد که پرورش آن توجه زیادی را در نقاط مختلف دنیا به خود جلب کرده است. روش‌های مختلفی برای پرورش این ماهی استفاده می‌شود که سیستم چرخش آب به دلیل کاهش نیاز به منابع سالم آبی در حال گسترش است (Asche *et al*., 1999). با این وجود اختلاط دائمی و مناسب آب در حوضچه‌های پرورشی به دلیل حساسیت این گونه ماهیان به دمای بالا و اکسیژن پایین الزامی می‌باشد (Diken and Koknaroglu, 2022). روش‌های گوناگونی برای دستیابی به بالاترین میزان اختلاط و یکنواختی در مخازن پرورش ماهی توسط پژوهشگران ارایه‌شده که اغلب آنها بر طراحی هندسه استخر تمرکز دارند (Amponsah *et al*., 2021؛ Putraa *et al*., 2022). هندسه استخر آبزی‌پروری در این روش به گونه‌ای طراحی می‌شود که میدان سرعت حاکم بر آن از بالاترین میزان یکنواختی برخوردار باشد تا شرایط آسایش ماهی‌ها را فراهم کند.

طراحی حوضچه‌های پرورش ماهی در توسعه سیستم‌های آبزی‌پروری چرخشی به عنوان یک مرحله بحرانی به شمار می‌رود. رسیدن به بالاترین میزان یکنواختی، به حداقل رساندن مناطق راکد و دارای سرعت آب کم، توزیع مناسب اکسیژن، حذف مواد جامد و مواد غذایی باقیمانده در استخر از جمله نکات مهم در طراحی حوضچه‌ها می‌باشد (Cripps and Poxton, 1992). تطبیق هندسه استخر با رفتار و شنای آبزی مورد نظر می‌تواند باعث کاهش استرس، بهبود فاکتورهای زیستی و افزایش رشد آبزی گردد که مجموع این شرایط منجر به بازدهی بالاتر و سودآوری بیشتری خواهد شد (Jokumsen and Svendsen, 2010).

استفاده از روش‌های عددی برای تحلیل مسائل مهندسی با توجه به هزینه بالای پژوهش‌های تجربی و همچنین توسعه سیستم‌های رایانه‌ای قوی در سال‌های اخیر گسترش چشم‌گیری داشته است (Hirom and Devi, 2022؛ Kong *et al*., 2022). دینامیک سیالات محاسباتی یکی از این روش‌ها است که مسائل مشتمل بر شاره‌های سیالاتی را با استفاده از الگوریتم‌های عددی تحلیل می‌کند. دامنه مساله در دینامیک سیالات محاسباتی شبکه‌بندی شده تا به اجزای کوچک‌تری تقسیم‌بندی شوند و در ادامه امکان حل عددی دستگاه معادلات خطی به دست آمده با تبدیل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی حاکم بر سیالات به معادلات جبری و اعمال شرایط مرزی فراهم می‌شود (Xia and Sun, 2002).

پژوهش‌های مختلفی بر این اساس به استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی در طراحی سیستم‌های مختلف آبزی‌پروری پرداخته است. Labatut و همکاران (۲۰۱۵) یکی از این پژوهش‌ها است که جهت بهبود الگوی چرخشی در استخرهای

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]

آبراهه‌ای از مدلی تحت عنوان مدل جریان اختلاط سلولی (MCR)[۲] استفاده نمودند که بر اساس روش عددی دینامیک سیالات محاسباتی طراحی شده است. این پژوهشگران سه منطقه چرخشی و دورانی را با تعبیه جریان‌های ورودی در راستاها و جهت‌های مشخص و قرار دادن سه دریچه خروجی در سه نقطه روی خط مرکزی در راستای طولی استخر آبراهه‌ای ایجاد کردند که علاوه بر اختلاط جریان باعث حذف خودکار ذرات جامد از طریق خروجی‌ها می‌گردید و خاصیت خودتمیزشوندگی استخر را تقویت می‌کرد. نتایج این پژوهش نشان داد سرعت جریان به صورت خطی به سمت مرکز سلول‌های تشکیل شده کاهش می‌یابد و مناطق کم سرعتی در مرکز سلول و گوشه‌ها ایجاد می‌گردد. Papáček و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه دیگری به بررسی انواع پلت‌های غذایی در سیستم‌های آبزی‌پروری به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته و بیان نمودند که زمان باقی ماندن پلت‌های غذایی در استخر می‌تواند بسته به محل رهاسازی غذا تا ۷۵ درصد تفاوت نماید. Liu و همکاران (۲۰۱۷) تحقیقات گسترده‌ای در یک سیستم آبزی‌پروری چرخشی انجام داده و مسیر حرکت ذرات جامد موجود در یک تانک هشت ضلعی را با استفاده از مدل فاز گسسته ردیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد رسوب ذرات جامد در گوشه‌های استخر بسیار ناچیز است.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی رفتار هیدرودینامیکی جریان در حوضچه آبزی‌پروری با هندسه خاص مورد نظر و در نهایت ارائه مناسب‌ترین الگوی هندسی جهت ساخت و تولید حوضچه به منظور بهره‌برداری از آن در مزارع پرورش ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان بود. همچنین برای مقایسه یکنواختی میدان سرعت در استخرهای فوق از شاخص یکنواختی استفاده شده تا هیدرودینامیک جریان به صورت کمی مورد ارزیابی قرارگیرد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

سطح مقطع استخرهای مورد بررسی در این تحقیق مطابق شکل ۱ با یک ورودی جریان در مجاورت دیواره و یک خروجی در مرکز استخر در نظر گرفته شد. جریان آب درون استخر نیز تراکم‌ناپذیر و آشفته فرض گردید. همچنین عمق استخر برابر ۰/۵ متر و شیب کف استخر ثابت و برابر صفر فرض شد. ابعاد هر حوضچه شامل طول ۲ متر، عرض ۲ متر و عمق ۰/۵ متر فرض شد و عناصر محاسباتی شامل پیکربندی خطوط جریان، خطوط سرعت، پیکربندی کانتورهای سرعت همراه با انحراف استاندارد، شاخص یکنواختی بودند.

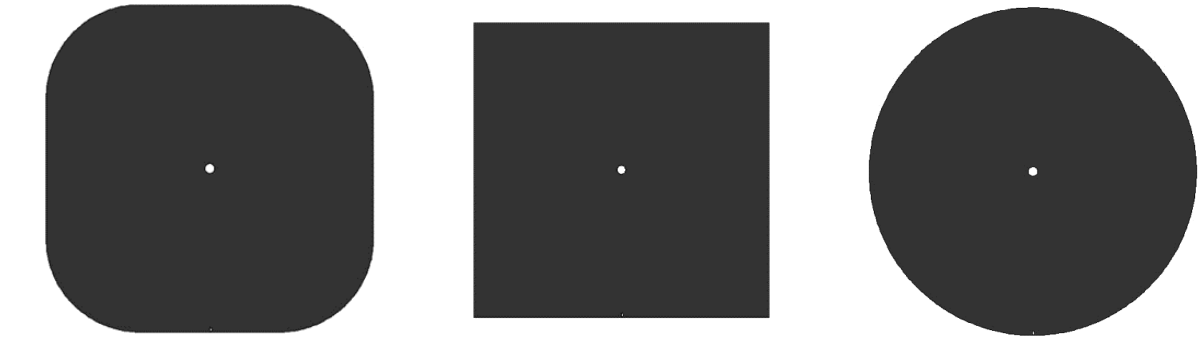
معادلات حاکم بر استخر آبزی‌پروری مورد بررسی شامل معادله بقا جرم، معادله مومنتوم و معادلات آشفتگی می‌باشد. روابط (۱) تا (۲) به ترتیب معادلات بقاء جرم و مومنتوم را نشان می‌دهند (White and Majdalani, 2006):

$$u_{i,i} = 0 \qquad (۱)$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j\, u_{i,j}\right) = -P_{,i} + (\rho - \rho_0)\, g_i + \left[\mu\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right) - \rho\overline{u_i' u_j'}\right]_{,j} \qquad (۲)$$

[۲] mixed-cell raceway

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]



الف) استخر دایره‌ای ب) استخر مربعی ج) استخر مربعی گوشه‌دار

شکل ۱: نمای دو بعدی استخرهای مورد بررسی در پژوهش حاضر

که عبارت $\rho\overline{u_i'u_j'}$ در معادله مومنتوم بیانگر تنش‌های تلاطمی است که به آن تنش‌های رینولدز می‌گویند و اثرات آشفتگی را با خود به همراه دارد. مولفه‌های تانسور تنش رینولدز بر اساس مدل‌های ادی‌ویسکوزیته متناسب با گرادیان‌های سرعت متوسط می‌باشند. در این مدل‌ها که تحت عنوان مدل‌های ویسکوزیته گردابه‌ای بوزینسک شناخته می‌شوند، توربولانس ایزوتروپ در نظر گرفته شده است. ترم تنش‌های رینولدز برای یک جریان تراکم‌پذیر به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود (Davidson, 2015):

$$\overline{u_i'u_j'} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k} - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \qquad (۳)$$

در صورتی که جریان تراکم‌ناپذیر باشد، $\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0$ خواهد بود. در رابطه فوق تانسور نرخ کرنش به صورت زیر تعریف می‌شود (White and Majdalani, 2006):

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \qquad (۴)$$

در معادلات فوق μ_t، ویسکوزیته گردابه‌ای است که به دلیل آشفته بودن جریان و مدل‌سازی صورت پذیرفته در معادله ممنتوم ظاهر شده است. در پژوهش حاضر برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل دو معادله‌ای Realizable k-ε استفاده گردیده و ویسکوزیته گردابه‌ای بر اساس این مدل توربولانسی به صورت زیر بیان می‌شود (Davidson, 2015):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۵)$$

در معادله فوق k و ε به ترتیب انرژی جنبشی و نرخ اضمحلال آشفتگی هستند که برای محاسبه هر یک از آن‌ها از یک معادله انتقال استفاده می‌شود. معادلات انتقال برای دو کمیت آشفتگی ذکر شده به صورت زیر می‌باشند (Davidson, 2015):

$$(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + \rho\Gamma - \rho\varepsilon \qquad (۶)$$

$$(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right] + C_1\varepsilon\Gamma - C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\vartheta\varepsilon}} \qquad (۷)$$

که Γ در روابط فوق برابر است با:

$$\Gamma = -\overline{u_i'u_j'}\frac{\partial u_i}{\partial u_j} = \frac{\mu_t}{\rho}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \qquad (۸)$$

و C_μ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_\mu = \frac{\varepsilon}{A_0\varepsilon + A_S KS} \qquad (۹)$$

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]

که A_0 در آن برابر ۴/۰۴ بوده و A_s و θ طبق روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه شدند

$$A_s = \sqrt{6}\cos\theta \qquad (۱۰)$$

$$\theta = \frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}\,S^2\right) \qquad (۱۱)$$

در مدل‌سازی جریانات آشفته برای حل لایه مرزی در مجاور دیواره جامد و محاسبه گرادیان متغیرها در این ناحیه از مفهومی تحت عنوان تابع دیواره استفاده می‌گردد. توابع دیواره در حقیقت پروفیل‌های تحلیلی جریان در لایه مرزی مجاور دیواره هستند که با استفاده از روش‌های تحلیلی و از حل صریح معادلات جریان در نزدیکی دیواره با اعمال برخی فرضیات ساده‌کننده بر روی معادلات حاکم بر لایه مرزی به دست آمده‌اند. کمیت‌های مرتبط با توابع دیواره به صورت زیر تعریف می‌شوند (Davidson, 2015):

$$u^+ = \frac{u}{u^*} \qquad (۱۲)$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \qquad (۱۳)$$

$$y^+ = \frac{y u^*}{\vartheta} \qquad (۱۴)$$

که u^* در روابط فوق یک سرعت مشخصه برای جریان آشفته و u^+ سرعت مشخصه بی‌بعد می‌باشد. از رابطه u^* و y^+ این نتیجه‌گیری حاصل می‌شود که کمیت y^+ چیزی از جنس عدد رینولدز است. و در جریان‌های آشفته و در راستای عمود بر دیواره با استفاده از y^+، سه محدوده جریانی به صورت زیرلایه لزج، ناحیه گذرا و ناحیه تمام آشفته تعریف می‌گردد. با توجه به مدل تابع دیواره استفاده شده برای حل لایه مرزی، y^+ متناسب با آن باید رعایت شود کمیت y^+ چیزی از جنس عدد رینولدز است. سه محدوده در جریانات آشفته و در راستای عمود بر دیواره با استفاده از y^+ به صورت جریان‌های زیرلایه لزج یا ناحیه مجاور دیواره با جریانی کاملا آرام، ناحیه میانی یا ناحیه ترکیبی با جریانی در حالت گذرا و ناحیه دور از دیواره یا ناحیه قانون لگاریتمی با جریان کاملا آشفته تعریف می‌گردد (Montas *et al.*, 2000). همچنین τ_w برابر تنش برشی دیواره، ρ برابر چگالی سیستماتیکی و ϑ برابر چگالی سیال می‌باشند.

برای بررسی یکنواختی میدان سرعت و رژیم جریان حاکم بر استخر آبزی‌پروری به صورت کمی از شاخص یکنواختی و انحراف استاندارد استفاده شد که به صورت زیر محاسبه گردید (Gorle *et al.*, 2019):

$$\mathrm{Var(x)} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2 \qquad (۱۵)$$

که $\bar{x}$ در آن میانگین مقادیر x است که برابر است با:

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \qquad (۱۶)$$

و انحراف استاندارد بر اساس واریانس از رابطه زیر به دست آمد:

$$\mathrm{SD(x)} = \sqrt{Var(x)} \qquad (۱۷)$$

شاخص یکنواختی فراسنجه دیگر که به عنوان معیاری برای یکنواختی جریان تعریف شده و بیانگر چگونه تغییر یک متغیر میدانی روی یک سطح تغییر است. در صورتی که مقدار این فراسنجه برابر ۱ باشد از بالاترین یکنواختی برخوردار است. شاخص یکنواختی می‌تواند بر حسب سطح یا جرم به صورت وزن‌دار بیان شود. شاخص یکنواختی وزنی سطح، تغییرات کمیت را نشان می‌دهد که به صورت زیر محاسبه شد (Gorle *et al.*, 2019):

$$\gamma_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}[(|\varphi_i - \overline{\varphi_a}|)A_i]}{2|\overline{\varphi_a}|\sum_{i=1}^{n}A_i} \qquad (۱۸)$$

و $\bar{\varphi}_a$ مقدار متوسط متغیر میدانی روی سطح است که طبق رابطه زیر به‌دست آمد:

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]

$$\overline{\varphi_a}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\varphi_i A_i}{\sum_{i=1}^{n}A_i} \quad (۱۹)$$

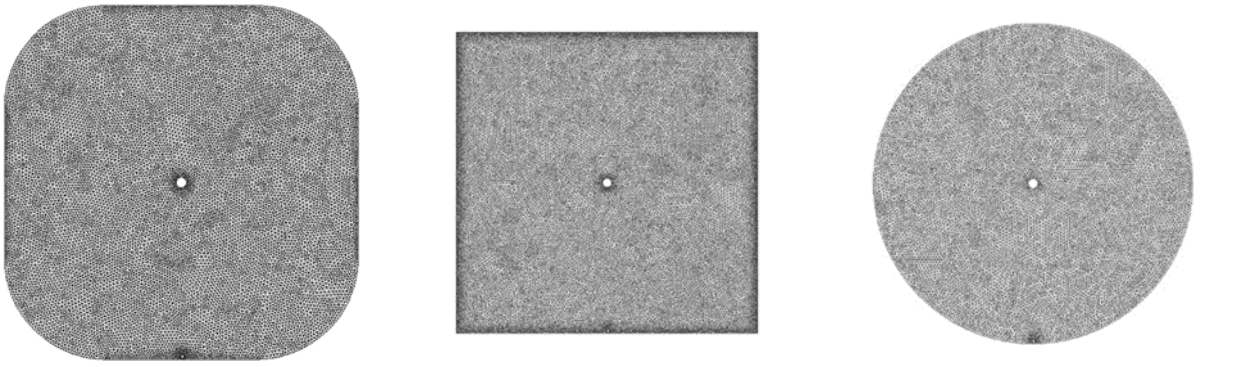
$$\overline{\varphi_a}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\varphi_i A_i}{\sum_{i=1}^{n}A_i}$$

شرایط مرزی

برای تمامی دیواره‌های استخر آبزی‌پروری از شرط مرزی دیواره و عدم لغزش سیال روی دیواره استفاده شد. شرط مرزی عدم لغزش به این معنی است که ذره سیال روی دیواره جامد نمی‌لغزد. بنابراین اگر دیواره جامد ساکن باشد؛ ذره سیال روی دیواره جامد نیز ساکن خواهد بود و اگر دیواره جامد حرکت کند، ذره سیال هم با سرعتی برابر با سرعت دیواره جامد حرکت می‌کند. به بیان دیگر هیچ سرعت نسبی بین ذره سیال روی دیواره و دیواره جامد وجود ندارد. در دریچه ورودی جریان از شرط مرزی سرعت ورودی و در دریچه خروجی از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شد (Labatut *et al*., 2015).

شبکه‌بندی

در پژوهش حاضر برای حل مساله از شبکه بی‌سازمان استفاده شده تا مش تولیدشده بتواند در مجاور دیواره‌ها و مرزهای منحنی شکل هم‌پوشانی کامل را داشته باشد. نتیجه شبکه تولیدشده بر این اساس در دامنه محاسباتی در شکل ۲ ارایه شده است.



الف) استخر دایره‌ای　　ب) استخر مربعی　　ج) استخر مربعی گوشه‌دار

شکل ۲: شبکه تولید شده برای دامنه محاسباتی استخرهای مطالعاتی

روش حل عددی

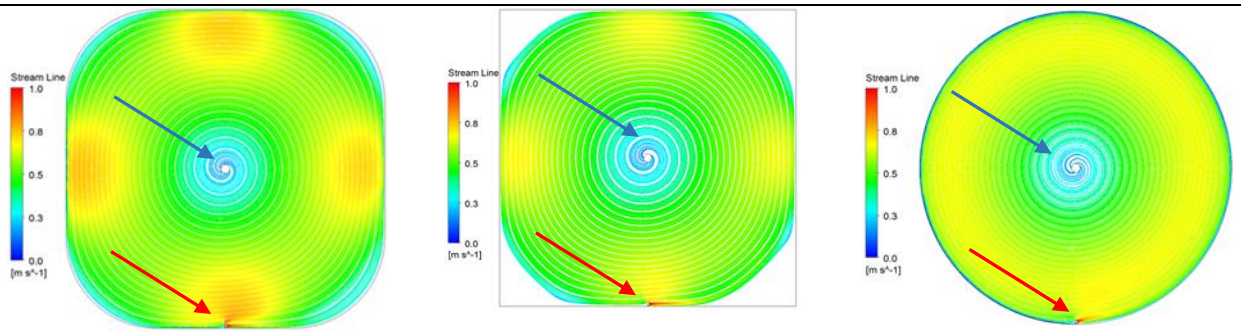
مبنای حل عددی پژوهش حاضر، فن دینامیک سیالات محاسباتی با کمک نرم‌افزار فلوئنت بود که قابلیت مدل‌سازی جریان‌های دو و سه بعدی، جریان‌های دائم و غیردائم، لزج و غیرلزج، انواع جریان‌های واکنشی مانند احتراق، حرکت ذرات جامد را دارد. برای انجام هر حل عددی، لازم است ترم‌های معادلات دیفرانسیلی حاکم بر مسئله خاص مورد بررسی را با انتخاب روش‌های مناسب، گسسته‌سازی کرد تا دستگاه معادلات جبری ایجاد گردد. سپس با به کارگیری شرایط مرزی صحیح، دستگاه معادلات جبری حاصل با انتخاب حلگر مناسب، حل می‌شود. نرم‌افزار فلوئنت یک نرم‌افزار حجم محدود می‌باشد. در روش حجم محدود، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر مسئله به صورت انتگرالی بازنویسی‌گردید. دامنه محاسباتی به تعداد معینی حجم کنترل مجاور هم تقسیم

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]

شده و معادلات در این محدوده حل شد (ANSYS, 2018).

نتایج

مش تولید شده جهت تحلیل در نرم‌افزار فلوئنت فراخوانی گردید. تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده بعد از اتمام شبیه‌سازی اهمیت زیادی دارد. خطوط جریان برای سه استخر مورد بررسی در شکل ۳ ارایه شده است. خطوط جریان در حقیقت مسیر حرکت ذرات سیال می‌باشد. شکل فوق نشان می‌دهد خطوط جریان برای استخر دایره‌ای شکل یکنواخت‌تر خواهد بود. در گوشه‌های استخر مربعی شکل، گردابه‌ای شکل گرفته و ذره وارد شده به گوشه‌ها، در این گردابه می‌افتد و امکان خارج شدن آن وجود ندارد. به بیان دیگر در گوشه‌های استخر مربعی شکل یک ناحیه مرده و راکد ایجاد می‌شود. هدف از طراحی استخر نوع سوم یعنی استخر مستطیلی با زاویه قوس، حذف گوشه‌های استخر مربعی شکل به منظور از بین بردن ناحیه راکد و فضای مرده می‌باشد. یکنواختی میدان سرعت در استخرهای آبزی‌پروری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

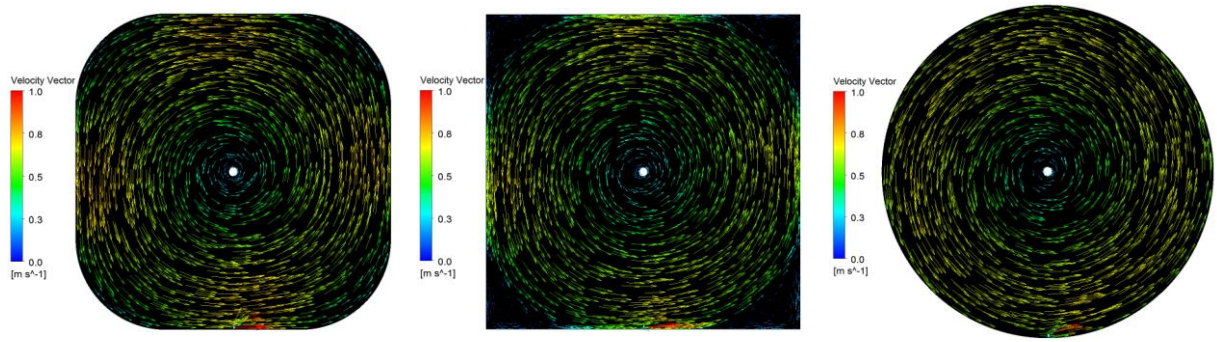


الف) استخر دایره‌ای ب) استخر مربعی ج) استخر مستطیلی با زاویه قوس

شکل ۳. مقایسه خطوط جریان برای پیکربندی‌های هندسی استخرهای مطالعاتی. پیکان قرمز نشان‌دهنده مکان ورودی بوده و پیکان آبی مکان خروجی را نشان می‌دهد.

برای درک و فهم رفتار سیال در استخرهای آبزی‌پروری بهتر است بردارهای سرعت مورد بررسی قرار گیرند. بردارهای سرعت در هر نقطه از میدان، بر خطوط جریان مماس هستند. برای سه استخر مورد بررسی، بردارهای سرعت استخراج گردیده و در شکل ۴ و ۵ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استخر دایره‌ای شکل بردارهای سرعت گردشی منظم‌تری خواهند داشت. در گوشه‌های استخر مربعی شکل، بردار سرعتی وجود ندارد و به ندرت بردارهای با اندازه کم مشاهده می‌گردد. این بدین معنی است که در گوشه‌های استخر مربعی شکل جریان راکد و فضای مرده وجود دارد؛ ولی در استخر دایره‌ای شکل به دلیل ویژگی هندسی آن، چنین پدیده‌ای رخ نمی‌دهد. بردارهای سرعت استخر مستطیلی با زاویه قوس نسبت به استخر مربعی شکل الگوی گردشی منظم‌تری دارند، همچنین به دلیل انحنای ایجاد شده در گوشه‌های این نوع استخر، جریان راکد و مرده در این ناحیه پدیدار نمی‌شود.

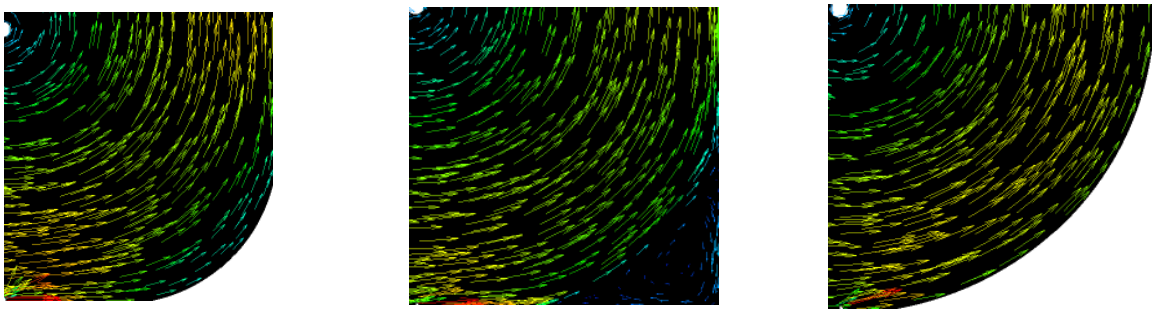
[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]



الف) استخر دایره‌ای ب) استخر مربعی ج) استخر مستطیلی با زاویه قوس

شکل ۴: مقایسه بردارهای سرعت برای پیکربندی‌های هندسی استخرهای مطالعاتی.

.

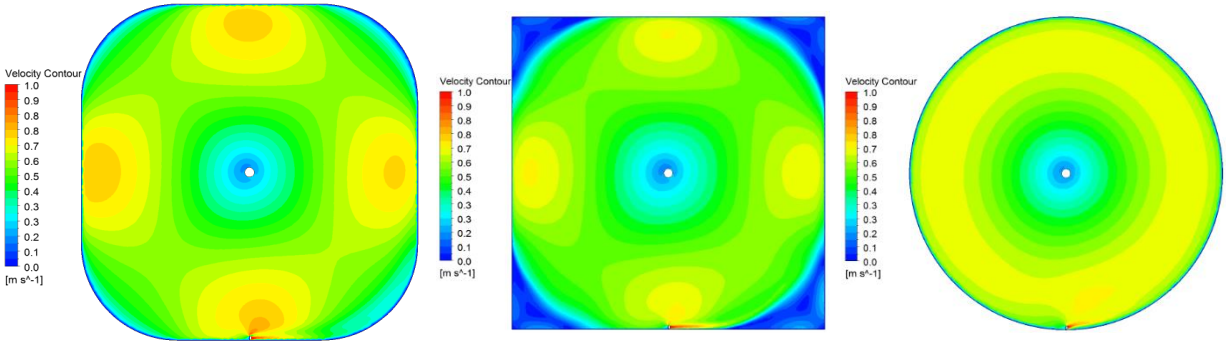


الف) استخر دایره‌ای ب) استخر مربعی ج) استخر مستطیلی با زاویه قوس

شکل ۵: بزرگنمایی مقایسه بردارهای سرعت در گوشه‌های استخرهای مطالعاتی که نشان‌دهنده نمای از نزدیک چرخابه‌های ایجاد شده در مجاورت گوشه‌های استخرهای مطالعاتی.

کانتورهای سرعت برای هر سه نوع استخر مورد پژوهش، در شکل ۶ ارایه شده است. رنج انتخاب‌شده برای تغییرات سرعت در کانتورهای سرعت ارائه شده به طور یکسان در نظر گرفته شده است تا فرآیند مقایسه میدان سرعت بین این سه نوع استخر، راحت‌تر انجام شود. با توجه به رنگ‌بندی میدان سرعت به صورت کیفی می‌توان دریافت استخر دایره‌ای شکل دارای رژیم یکنواخت‌تری خواهد بود. در گوشه‌های استخر مربعی شکل، به دلیل ایجاد فضای مرده کانتور سرعت دارای رنگ آبی می‌باشد. بنابراین عدم یکنواختی در این استخر مشهود است. در استخر نوع سوم با ایجاد انحنا در گوشه‌های استخر و حذف گوشه‌ها، فضای مرده تقریبا از بین رفته است و میدان سرعت حاکم بر این نوع استخر از یکنواختی بیشتری نسبت به استخر مربعی شکل برخوردار می‌باشد.

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]



الف) استخر دایره‌ای ب) استخر مربعی ج) استخر مستطیلی با زاویه قوس

شکل ۶: مقایسه کانتورهای سرعت برای پیکربندی هندسی استخرهای مطالعاتی.

برای مقایسه یکنواختی سه نوع استخر مورد بررسی در پژوهش حاضر به صورت کمی از شاخص یکنواختی و انحراف معیار استفاده شده است. مقدار این پارامترها برای هر سه نوع استخر در جدول ۱ ارایه‌شده است. همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود شاخص یکنواختی استخر دایره‌ای بیشتر از استخر مستطیلی با زاویه قوس واستخر مستطیلی با زاویه قوس بیشتر از استخر مربعی شکل می‌باشد. بنابراین استخر دایره‌ای از لحاظ یکنواختی میدان سرعت و رژیم جریان بهترین استخر خواهد بود. انحراف استاندارد برای استخر دایره‌ای از سایر استخرها کمتر است. هرچقدر انحراف معیار به صفر نزدیک‌تر باشد پراکندگی داده‌ها نسبت به متوسط آن‌ها کمتر می‌باشد.

جدول ۱: مقایسه یکنواختی استخرهای مطالعاتی

فراسنجه موثر	استخر دایره‌ای	استخر مستطیلی با زاویه قوس	استخر مربعی
انحراف استاندارد	۰/۰۹۸۴۲۱۸	۰/۱۲۱۸۹۸	۰/۱۹۴۹۸
شاخص یکنواختی	۰/۹۴۰۰۵۸	۰/۹۱۹۴۴۷	۰/۸۷۴۲۶

بحث

بر اساس یافته‌های Kim و همکاران در سال (۲۰۱۵) مهندسی آبزی‌پروری می تواند به عنوان یکی از مهمترین شاخص‌های حیاتی کیفیت آب برای حفظ بقای ماهی لحاظ شود. . هدف از طراحی استخر نوع سوم یعنی استخر مستطیلی با زاویه قوس، حذف گوشه‌های استخر مربعی به منظور از بین بردن ناحیه راکد و فضای سکون سیال می‌باشد. همان‌گونه که Guo و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهش خود دریافتند یک میدان سرعت یکنواخت با سرعت مشخص باعث افزایش نرخ رسوب ذرات معلق شده و گردابه هایی در مناطقی به وجود می‌آید که دارای یکنواختی جریان بوده که این مسئله در حذف ذرات معلق تاثیر منفی می‌گذارد. بر اساس یافته‌های Shahrokhi و همکاران (۲۰۱۲) حرکت ذرات جامد در سیال یکی از جنبه‌های مهم عملیات ناشی از تعامل دو سویه با محیط هیدرولیکی است که بر خواص فیزیکی و حرکت جامدات تاثیر می‌گذارد. عمده مواد جامد در ستون آب محیط‌های پرورش ماهی از ذرات مدفوع و خوراک نخورده تشکیل شده است. این ذرات در حالت بهینه باید به میزان زیادی و سریعتر از میانگین زمان نگهداری

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]

هیدرولیک مخزن شسته شوند و در غیر این صورت می‌توانند بر کیفیت آب و سلامت و آسایش ماهی تاثیر منفی بگذارد. با توجه به رسم بردارهای سرعت می‌توان بیان نمود استخرهای گوشه‌دار به دلیل نظم بیشتر در بردارهای سرعت در مقایسه با استخر مربعی به لحاظ هیدرولیک مخزن و حذف ذرات معلق در زمان کمتر و در حالت بهینه‌تر به پرورش دهنده کمک می‌کند تا با استخری تمیزتر و ذرات معلق کمتر روبه‌رو باشد. این شرایط که به واسطه عملکرد بهتر سیستم خودتمیزشوندگی استخر است از ایجاد بیماری و همچنین محیط‌های مرده برای انباشت پسماندها جلوگیری کرده و در نهایت به رشد و پویایی و کاهش مصرف غذا منجر شود (Shahrokhi *et al*., 2012). هیدرودینامیک مخازن تاثیر مهمی در این زمینه داشته و بر شرایط شنا، توزیع خوراک، اکسیژن محلول، ترکیبات معدنی و همچنین انتقال ذرات و الگوهای خودتمیزشوندگی مخازن تاثیر می‌گذارد. توزیع خوراک و اکسیژن محلول علاوه بر تجمع متابولیت‌های ماهی مانند دی‌اکسید کربن و آمونیاک با تغییر کیفیت آب نیز بر رفتار ماهی نیز تاثیر می‌گذارد (Terjesen *et al*., 2003؛ Kolarevic *et al*., 2014؛ Good *et al*., 2018). مناطق ساکن طبق نتایج به دست آمده از پژوهش Vadstein و همکاران (۲۰۱۸) به نوبه خود باعث رشد میکروبی می‌شود و ایجاد باکتری‌های مضری می‌شوند که ممکن است باعث عفونت بیماری و در بدترین حالت تلفات در آبزیان پرورشی شوند. لذا اطمینان از شرایط جریان بهینه آب در مخازن پرورش از اهمیت بالایی برخوردار است. طبق بررسی های انجام شده توسط Venegasو همکاران در سال (2014) یکنواختی میدان جریان یکی از عوامل قضاوت در مورد محیط آب در یک مخزن پرورشی است. زیرا یک پارامتر مهم برای اطمینان از توزیع یکنواخت اکسیژن محلول است و به طور مستقیم بر جمع‌آوری و تخلیه باقیمانده خوراک و مدفوع در مخزن پرورش تأثیر می گذارد. پژوهش های Pavlov و همکاران در سالهای ۲۰۰۲ و ۲۰۰۷ نشان داد تأثیر تلاطم بر شاخص های عملکردی پاسخ رئولوژیکی در ماهی نشان می دهد که آستانه و دبی بحرانی با اغتشاش کاهش می یابد که بیان می کند هرچه شکل جریان و میدان سرعت دارای یکنواختی بیشتری باشد میتواند بر شاخص های فیزیولوژیکی ماهی تاثیر مثبت بگذارد و استانه اسایش ماهی را در برابر تغییرات حفظ کند. مزایای افزایش امنیت زیستی در سیستم‌های مخزن پرورش بسته تنها در یک سیستم هیدرودینامیک مناسب قابل دستیابی است. پارامترهای شاخص هیدرودینامیک، مانند بزرگی سرعت جریان، یکنواختی میدان جریان، آشفتگی و توزیع، اغلب برای ارزیابی شرایط میدان جریان استفاده می‌شوند (Oca and Masalo, 2013).

نتایج حاصل از مطالعه عددی حاضر در مجموع نشان داد استخر دایره‌ای از میدان سرعت یکنواخت‌تری نسبت به استخر مربعی برخوردار است. گوشه‌های استخر مربعی به دلیل وجود گردابه به عنوان نقطه تکینگی یک جریان مرده و راکد در این ناحیه ایجاد می‌کند که فرآیند خودتمیز شوندگی را به دلیل تجمع ذرات معلق با مشکل مواجه می‌کند. همچنین شاخص یکنواختی استخر دایره‌ای بیشتر از استخر مربعی بود به طوری که انحراف استاندارد آن به صفر نزدیک بوده و این شرایط موجب بهبود پخش اکسیژن در تمام سطوح استخر و استفاده بهتر از فضای موجود خواهد شد. تمام نتایج فوق نشان می‌دهد هیدرودینامیک جریان استخر

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]

دایره‌ای برای پرورش قزل‌آلای رنگین‌کمان مناسب‌تر از سایر استخرهای آزمایشی است، هرچند که فضای مرده بین استخرها نکته‌ای است که باید در زمان طراحی استخرها مدنظر قرار گیرد.

سپاسگزاری

در اینجا بر خود لازم می‌دانیم که از زحمات تمام کسانی که ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند سپاسگزاری نماییم.

منابع

1. Amponsah, S. K., Agodzo, S., Agbeko, E., Osei, E. A., 2021. Impact of tank geometry on production of African Catfish (*Clarias gariepinus*). African Journal of Agricultural Research, 17(1), 165-172.
2. ANSYS®, 2018. ANSYS CFX Modeling Guide Release 18.2. Available at: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/18.2.2/en-us/help/cfx_thry/cfx_thry.html. Accessed in: July, 25, 2020.
3. Asche, F., Guttormsen, A. G., Tveterås, R., 1999. Environmental problems, productivity and innovations in Norwegian salmon aquaculture. Aquaculture Economics & Management, 3(1), 19-29.
4. Burgess, M. G., Clemence, M., McDermott, G. R., Costello, C., Gaines, S. D., 2018. Five rules for pragmatic blue growth. Marine Policy, 87, 331-339.
5. Cripps, S. J., & Poxton, M. G., 1992. A review of the design and performance of tanks relevant to flatfish culture. Aquacultural Engineering, 11(2), 71-91.
6. Davidson, L., 2015. Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling. Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
7. Diken, G., & Koknaroglu, H., 2022. Projected annual production capacity affects sustainability of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss Walbaum, 1792) reared in concrete ponds in terms of energy use efficiency. Aquaculture, 551, 737958.
8. Good, C., Davidson, J., Terjesen, B. F., Takle, H., Kolarevic, J., Bæverfjord, G., Summerfelt, S., 2018. The effects of long-term 20 mg/L carbon dioxide exposure on the health and performance of Atlantic salmon Salmo salar post-smolts in water recirculation aquaculture systems. Aquacultural Engineering, 81, 1-9.
9. Gorle, J. M. R., Terjesen, B. F., Mota, V. C., Summerfelt, S., 2018. Water velocity in commercial RAS culture tanks for Atlantic salmon smolt production. Aquacultural Engineering, 81, 89-100.
10. Gorle, J. M. R. B. F. Terjesen, and S. T., 2019. Summerfelt, "Hydrodynamics of Atlantic salmon culture tank: Effect of inlet nozzle angle on the velocity field,Comput. Electron. Agriculture, 158, 79–91.
11. 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.
12. Guo, H., Ki, S. J., Oh, S., Kim, Y. M., Wang, S., Kim, J. H., 2017. Numerical simulation of separation process for enhancing fine particle removal in tertiary sedimentation tank mounting adjustable baffle. Chemical Engineering Science, 158, 21-29.
13. Hirom, K., & Devi, T. T., 2022. Application of Computational Fluid Dynamics in Sedimentation Tank Design and Its Recent Developments: a Review. Water, Air, & Soil Pollution, 233(1), 22.
14. Jokumsen, A., & Svendsen, L. M., 2010. Farming of freshwater rainbow trout in Denmark. DTU Aqua.
15. Kim, T., Yoon, H.-S., Shin, S., Oh, M.-H., Kwon, I., Lee, J., Choi, S.-D., Jeong, K.-S., 2015. Physical and biological evaluation of co-culture cage systems for grow-out of juvenile abalone, Haliotis discus hannai, with juvenile sea cucumber, Apostichopus japonicus (Selenka), with CFD analysis and indoor seawater tanks. Aquaculture, 447, 86-101.
16. Kolarevic, J., Baeverfjord, G., Takle, H., Ytteborg, E., Reiten, B. K. M., Nergård, S., Terjesen, B. F., 2014. Performance and

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]

welfare of Atlantic salmon smolt reared in recirculating or flow through aquaculture systems. Aquaculture, 432, 15-25.
17. Kong, X., Liu, J., Yang, T., Su, Y., Geng, J., Niu, Z. 2022. Numerical simulation of feed pellet breakage in pneumatic conveying. Biosystems Engineering, 218, 31-42.
18. Labatut, R. A., Ebeling, J. M., Bhaskaran, R., Timmons, M. B., 2015. Exploring flow discharge strategies of a mixed-cell raceway (MCR) using 2-D computational fluid dynamics (CFD). Aquacultural Engineering, 66, 68-77.
19. Liu, Y., Liu, B., Lei, J., Guan, C., Huang, B., 2017. Numerical simulation of the hydrodynamics within octagonal tanks in recirculating aquaculture systems. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 35(4), 912-920.
20. Montas, H., Reddy, G., Wheaton, F., 2000. CFD analysis of flow in aquaculture tanks. 2000 ASAE Annual International Meeting, Milwaukee, Wisconsin.
21. 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.
22. 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.
23. Pavlov D. S., Lupandin A. I. and Fomichev. O. A., 2002. The distribution of juvenile fish in the nearshore zone of the volga delta branch streams and its relationship with downstream migration. Journal of Ichthyology, 42(Suppl.2):S174-S188.
24. Pavlov D. S., Meshcheryakova O. V., Veselov A. E., Nemova N. N., Lupandin A,2007. Parameters of energy metabolism in juveniles of Atlantic salmon Salmo salar living in the mainstream and in the tributary of the Varzuga River (the Kola Peninsula Journal of Ichthyology, 47(9), 774-781.
25. Putraa, R. A., Shiddiqie, H. L. A., Ahmad, H. N., Nugroho, A. N. A., 2022. CFD Simulation on the Flow Inside a Fish Culture Tank. Jurnal Inotera, 7(1), 19-25.
26. Shahrokhi, M., Rostami, F., Md Said, M. A., Sabbagh Yazdi, S. R., Syafalni. 2012. The effect of number of baffles on the improvement efficiency of primary sedimentation tanks. Applied Mathematical Modelling, 36(8), 3725-3735.
27. Terjesen, A. B. F., Rosten, T. W., Ulgenes, Y., Henriksen, K., Aarhus, I. J., Winther, U., 2003. Betydning av vannmiljøet ved produksjon av laksefisk i lukkede systemer i sjø. VANN, 1, 14-27.
28. Vadstein, O., Attramadal, K.J., Bakke, I., Forberg, T., Olsen, Y., Verdegem, M., Giatsis, C., Skjermo, J., Aasen, I.M., Gatesoupe, F.J. Dierckens, K., 2018. Managing the microbial community of marine fish larvae: a holistic perspective for larviculture [Review]. Frontiers in Microbiology, 9, 1820.
29. Venegas, P. A. Narváez, A. L. Arriagada, A. E. and Llancaleo, K. A., 2014. “Hydrodynamic effects of use of eductors (Jet-Mixing Eductor) for water inlet on circular tank fish culture,” Aquaculture Enginier, 59, 13–22.
30. White, F.M., & Majdalani, J., 2006. Viscous fluid flow (Vol. 3, pp. 433-434). New York: McGraw-Hill.
31. Xia, B., & Sun, D.-W., 2002. Applications of computational fluid dynamics (cfd) in the food industry: a review. Computers and Electronics in Agriculture, 34(1), 5-24.
32. Yu, G., Liu, C., Zheng, Y., Chen, Y., Li, D., Qin, W., 2021. Meta-analysis in the production chain of aquaculture: A review. Information Processing in Agriculture.

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1401.16.3.9.5]
[DOI: 10.52547/aqudev.16.3.91]