

## طراحی بهینه هندسی حوضچه‌های پرورش ماهی با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری

امیر جلال کمالی<sup>۱</sup>، محمد ذونعمت کرمانی<sup>۲</sup>، لیا روزبهانی<sup>۳</sup>

### چکیده

پرورش آبزیان از جمله ماهی، نقش مهمی را در تامین غذا، سلامت جامعه و توسعه اقتصادی ایفا می‌کند. در همین راستا جهت افزایش بهره‌وری، توجه به مسایل مرتبط با پرورش آبزیان، مانند عوامل زیست‌محیطی و هیدرولیکی حایز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش طراحی مناسب و بهینه حوضچه‌های پرورش ماهیان سردابی، از نظر رعایت اصول هیدرولیک و هیدرودینامیک مورد نظر می‌باشد. بدین منظور ضریب راندمان هیدرولیک به‌عنوان عاملی موثر در طراحی هندسی این حوضچه مورد بررسی قرار گرفته‌است. از آنجا که محاسبه راندمان هیدرولیک حوضچه‌ها با توجه به خصوصیات هیدرولیک جریان آب در آنها میسر می‌باشد، لذا با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی جریان آب در حوضچه‌های پرورش ماهی، خصوصیات میدان جریان و در نهایت راندمان هیدرولیک حوضچه، محاسبه شده‌است. مدل‌سازی سه‌بعدی با استفاده از معادله‌های حاکم بر جریان ناویر - استوکس در سیستم مختصات کارتزین و با کاربرد روش احجام محدود، صورت پذیرفته‌است. همچنین جهت محاسبه تنش‌های ناشی از آشفتگی، از مدل دو معادله ای  $k-\epsilon$  استفاده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** حوضچه پرورش ماهی، راندمان هیدرولیک، مدل سه‌بعدی، مدل‌سازی عددی، روش احجام محدود

---

۱- عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان - دانشجوی دکتری هیدرولوژی و منابع آب

**Email: [ajalalkamali@yahoo.com](mailto:ajalalkamali@yahoo.com)**

۲- دانشجوی دکتری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده عمران

۳- کارشناسی ارشد زمین‌شناسی - پترولوژی

## مقدمه

به طور کلی ماهیان پرورشی ایران را می‌توان به دو گروه ماهیان سردابی و یا گرمابی دسته‌بندی نمود. در این میان، تکثیر و پرورش ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان<sup>۱</sup> و قزل‌آلای خال‌قرمز<sup>۲</sup> - که در گروه ماهیان سردابی قرار می‌گیرد - از رایج‌ترین و غالباً سودمندترین نوع پرورش آبزیان می‌باشد. محققان بسیاری در رابطه با شرایط محیطی، چرخه‌زندگی، تکثیر و اثرات زیست‌محیطی این گونه از آبزیان پژوهش نموده‌اند [۱۲ و ۱۱، ۹]. در تحقیق صورت گرفته توسط هگنس<sup>۳</sup> شرایط هیدرولیک و محیط مناسب زندگی گونه‌ای از قزل‌آلای خال‌قرمز و قزل‌آلای آتلانتیک<sup>۴</sup> در جریان رودخانه از جمله سرعت جریان و عمق آب، عوامل محیطی و نوع بستر بررسی شده‌است [۱۱]. در تحقیقی دیگر میزان حداقل و مناسب دبی جریان ورودی برای شرایط مناسب زندگی ماهی قزل‌آلای آتلانتیک مورد نظر قرار گرفت [۱۲]. پژوهش‌هایی نیز برای پرورش ماهی قزل‌آلای خال‌قرمز در آنها را مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. همچنین گریج<sup>۵</sup> و همکاران [۹] اثر اکسیژن محلول در آب و لوهی<sup>۶</sup> و همکاران [۱۷] شرایط محیطی مناسب برای تکثیر ماهی قزل‌آلای خال‌قرمز و قزل‌آلای آتلانتیک را بررسی نمودند. در تحقیقات صورت گرفته دیگر، میزان اکسیژن محلول مناسب برای رشد و نمو ماهیان از جمله ماهی قزل‌آلای در حوضچه‌ها مورد نظر قرار گرفت [۱۹ و ۲۱]. علاوه بر آن تحقیقاتی نیز مبنی بر مسایل اقتصادی پرورش ماهی قزل‌آلای صورت پذیرفته‌است [۱۶].

ایجاد حوضچه‌های پرورش ماهی در اصل رویه‌ای از آب‌زدایی و کنترل منظم مناطق باتلاقی با استفاده از سدهای ساده است که به تدریج حوضچه‌هایی مناسب تولید ماهی در کنار آن ایجاد شد، ریشه گرفته‌است [۱]. یکی از مهمترین مسایل ایجاد شرایط محیطی مناسب‌تر و افزایش بهره‌وری، توجه به وضعیت‌هندسی حوضچه‌های پرورش‌ماهی می‌باشد که در این زمینه توجه به مسایل هیدرولیک جریان آب، امری اجتناب ناپذیر است. برای طراحی بهینه هندسی حوضچه می‌توان از ضریب راندمان هیدرولیک بهره جست [۱۳] و [۲۰، ۲۵]. جهت تعیین ضریب راندمان هیدرولیک، شناخت خصوصیات و وضعیت هیدرودینامیک جریان درون حوضچه الزامی می‌باشد و بدین منظور، لازم است تا جریان درون محیط زندگی آبزی توسط مدل‌های عددی شبیه‌سازی گردد. محققان بسیاری استفاده از مدل‌های عددی را برای نیل به این هدف مورد توجه قرار داده‌اند. در این رابطه می‌توان به مدل‌های پایه‌گذاری شده بر اساس روش‌های تفاضل محدود [۷]، اجزای محدود [۳] و احجام محدود [۲۴] اشاره نمود.

در همین راستا انتخاب ابعاد مدل برای مدل‌سازی حوضچه مهم می‌باشد. در صورتی که تغییرات سرعت در جهت محور عمودی ناچیز باشد، می‌توان جریان را دوبعدی فرض نمود. بر همین اساس، بسیاری از محققان استفاده از یک مدل دوبعدی میانگین عمقی را برای این منظور توجیه‌پذیر دانسته‌اند. از آن میان،

<sup>1</sup> Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)

<sup>2</sup> Brown trout (*Salmo Trutta*)

<sup>3</sup> Heggenes

<sup>4</sup> Young Atlantic salmon (*Salmo Salar*)

<sup>5</sup> Greig et al.

<sup>6</sup> Louhi et al.

می‌توان به تحقیق صورت گرفته توسط جنکینز<sup>۱</sup> اشاره نمود که با استفاده از مدل دوبعدی آب‌های کم‌عمق و روش تفاضل محدود، جریان در محیط آبی مدل‌سازی شده است [۱۳]. استوارت<sup>۲</sup> و همکاران نیز با استفاده از یک مدل دوبعدی اجزای محدود نسبت به مدل‌سازی رودخانه‌ای در ایالات متحده و با توجه به نتایج حاصله از میدان سرعت مدل، زیستگاه‌های مناسب را برای پرورش چند گونه ماهی و از جمله گونه‌ای از ماهی آزاد<sup>۳</sup> مشخص نمودند [۲۳]. همچنین کرودر و دیپلدس<sup>۴</sup> با استفاده از مدل دوبعدی آب‌های کم‌عمق و روش اجزای محدود، اهمیت نواحی مختلف جریان مانند نواحی باز چرخانی و راکد را در رابطه با مسایل بیولوژیک آبزیان از جمله ماهی در محیط‌های آبی مورد توجه قرار دادند [۸].

استفاده از مدل‌های سه‌بعدی علی‌رغم دقت و صحت بیشتر نتایج، نسبت به مدل‌های دوبعدی، به علت پیچیدگی و وقت‌گیر بودن کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، بوکر<sup>۵</sup> با به‌کارگیری یک مدل سه‌بعدی احجام محدود، به مدل‌سازی هیدرولیک جریانات آبراهه‌های شهری که زیستگاه آبزیان می‌باشد پرداخته است [۶].

در تحقیق حاضر سعی بر آن است که با استفاده از یک مدل سه‌بعدی و روش احجام محدود بر روی شبکه با ساختار شش وجهی، نسبت به شبیه‌سازی جریان در حوضچه‌های پرورش ماهی اقدام شود. برای این منظور، از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLUENT نسخه ۳/۷/۳ محصول شرکت FLUENT در سال ۲۰۰۶، استفاده شده است. همچنین، برای مدل‌سازی آشفتگی معادلات، از مدل دومعادله‌ای  $k-\epsilon$  که برای جریانات سه‌بعدی مناسب می‌باشد، بهره‌گیری شده است. هدف اصلی از این مطالعه طراحی بهینه حوضچه‌های پرورش ماهی بر اساس محاسبه ضریب راندمان هیدرولیک می‌باشد.

## روش تحقیق

### ۱- خصوصیات حوضچه‌های پرورش ماهی

از آنجایی که در این تحقیق محیط‌های پرورشی آبزیانی مانند ماهی قزل‌آلا مد نظر بودند، به بررسی اختصاصات استخرهای پرورش این‌گونه ماهیان پرداخته می‌شود. به‌طور کلی دو نوع اصلی از حوضچه‌های پرورش ماهی مورد استفاده قرار می‌گیرند: ۱- حوضچه‌های دراز و ۲- حوضچه‌های گرد [۱]:

حوضچه‌های دراز یا کانال‌های جریان‌دار: کف و جداره این کانال‌ها عمدتاً بتنی بوده و معمولاً در ردیف‌هایی پشت سرهم قرار می‌گیرند. چون این کانال‌ها دیواره بدون شیب دارند، می‌توان از دستگاه‌های مکانیکی برای غذادهی، بارگیری و رقم‌بندی استفاده کرد که این مساله، یک مزیت ویژه محسوب می‌گردد. در بیشتر نقاط دنیا برای پرورش قزل‌آلا از این نوع حوضچه‌ها استفاده می‌شود. اغلب این کانال‌ها به طول

<sup>1</sup> Jenkins

<sup>2</sup> Stewart

<sup>3</sup> Micropterus salmoides

<sup>4</sup> Crowder & Diplas

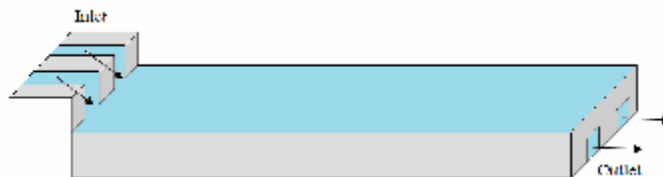
<sup>5</sup> Booker

۳۰ متر، عرض ۳ متر و عمق ۹۰ سانتی متر می باشند. حوضچه های دراز به دلیل عمق کمی که دارند، به راحتی ضد عفونی شده و مدیریت آنها نسبت به حوضچه های گرد آسان تر می باشد (شکل ۱).



شکل ۱- حوضچه های کانالی شکل پرورش ماهیان سردابی

از آنجایی که استفاده از حوضچه های دراز در پرورش ماهیان سردابی معمول تر است، تمرکز اصلی تحقیق حاضر بر مدل سازی و طراحی بهینه این گونه از حوضچه ها قرار گرفته است. به طور کلی مدیریت حوضچه های پرورش ماهی مستلزم تأمین آب کافی و ایجاد شرایط مطلوب محیطی لازم برای حداکثر رشد و حداقل میزان مرگ و میر جمعیت ماهیان موجود در حوضچه است. ورود آب به این حوضچه ها از طریق یک ورودی تحت کنترل انجام می گیرد که ضمن تأمین جریان مداوم و قابل تنظیم، از فرار ماهیان و ورود گونه های نامطلوب به داخل حوضچه جلوگیری می کند. یکی از روش های معمول در تأمین آب این گونه حوضچه ها، ایجاد دو ورودی در عرض قسمت بالادست حوضچه و با فاصله برابر از جدارها می باشد. هر یک از این دو ورودی با عرض حدود ۵۰ سانتی متر، جریان آب سطح آزاد در ابتدای کانال را به داخل کانال سرریز می نماید. این آب از طریق دو خروجی قابل کنترل تحت فشار به نام مانک<sup>۱</sup> از حوضچه خارج می گردد و به تولید کننده امکان می دهد که لایه های آب کف حوضچه که احتمالاً کیفیتشان پایین آمده و بایستی با آب تازه تعویض گردد را تخلیه نماید. مانک ها در کف و انتهای پایین دست حوضچه قرار گرفته اند و عموماً درای ابعاد ۵۰ سانتی متر عرض و ۲۰ سانتی متر ارتفاع می باشند. در شکل ۲ شمایی از حوضچه های پرورش ماهی آمده است [۱].



شکل ۲- نمایش سه بعدی یک حوضچه پرورش ماهی به همراه محل ورودی و خروجی آب

<sup>۱</sup> Monk

حوضچه‌های گرد: آب در این حوضچه‌ها جریان ملایم داشته و بنابراین ماهی نیروی کمتری را صرف مقابله با جریان آب می‌کند که در نتیجه این امر، ضریب تبدیل غذایی بالاتر می‌رود. علاوه بر این، حوضچه‌های گرد نسبت به حوضچه‌های دراز یا کانال‌های پرورشی، به آب کمتری نیاز دارند و چون مجرای خروجی آب در وسط حوضچه گرد قرار دارد، یک جریان دایره مانند در حوضچه به وجود می‌آید که عمل خودپالایی را انجام می‌دهد. اما عیب این حوضچه‌ها این است که گندزدایی یا ضدعفونی کردن آب در آنها با مشکلاتی همراه است. به علاوه نمی‌توان از بسیاری از دستگاه‌های مکانیکی مثلاً برای تغذیه و بارگیری ماهیان در این حوضچه‌های استفاده نمود.

## ۲- مروری بر برخی تعاریف

### زمان ماند هیدرولیک<sup>۱</sup> و راندمان هیدرولیک<sup>۲</sup>

خصوصیات هیدرولیک محیط‌های آبی اثر مهمی بر روی بازدهی و نحوه عملکرد سیستم این محیط‌ها دارد، به طوری که بسیاری از مشکلات مدیریتی، ناشی از ضعف در برآورد خصوصیات هیدرودینامیک محیط‌های آبی می‌باشد. به طور کلی خصوصیات هیدرودینامیک یک سیستم یا محیط آبی را می‌توان با شکل، خصوصیات هیدرولیک سازه‌های ورودی و خروجی، ژرفا، نوع پوشش گیاهی، چگالی جریان، پراکندگی و اختلاط سه بعدی جریان مربوط دانست [۱۳، ۲۰ و ۲۶].

تحت شرایط ایده‌آل می‌توان خصوصیات جریان درون سیستم آبی را جریان پیوسته فرض نمود. این بدان معنی است که کل جریان و روی به محیط آبی تا هنگام خروج از آن مانند یک جریان پیوسته و بدون اختلاط عمل می‌کند. به طور کلی مدت زمانی را که جریان در داخل سیستم آبی سپری می‌کند زمان ماند هیدرولیک نامند که بیان‌کننده مدت زمان اقامت جریان در سیستم آبی است. زمان ماند هیدرولیک را تحت شرایط ایده‌آل یا زمان ماند هیدرولیک اسمی<sup>۳</sup> را می‌توان طبق فرمول زیر معرفی نمود [۱۳].

$$t_n = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $t_n$  زمان ماند هیدرولیک اسمی،  $V$  حجم محیط آبی و  $Q$  دبی محیط آبی می‌باشد. برای جای‌گذاری مقدار دبی چند انتخاب وجود دارد. در صورت مشخص نبودن مقدار دبی خروجی اغلب مقدار دبی ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس پیشنهاد برخی از محققین، در صورت مشخص بودن میزان دبی خروجی بهتر است از میانگین دبی ورودی و خروجی استفاده شود [۴]. زمان ماند هیدرولیک یکی از خصوصیات مهم محیط آبی می‌باشد، تعیین دقیق و بهینه این زمان عامل موثری در به دست آوردن میزان راندمان هیدرولیک و طراحی مناسب محیط آبی می‌باشد. هر آنچه که ضریب راندمان

<sup>1</sup> Retention Time

<sup>2</sup> Hydraulic Efficiency

<sup>3</sup> Nominal Retention Time

هیدرولیک بالاتر و به عدد ۱ نزدیکتر باشد نشان دهنده عملکرد هیدرولیک مناسبتر حوضچه می باشد [۱۳ و ۱۸]. راندمان هیدرولیک محیط آبی را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود [۲۶].

$$I = \frac{t_n}{t_{mw}} \quad (۲)$$

$t_{mw}$  میانگین کل<sup>۱</sup> زمان ماند است. برای محاسبه میانگین کل زمان ماند لازم است تا با استفاده از خصوصیات جریان درون محیط آبی میدان، سرعت میدان مشخص شود. برای این منظور، حجم محیط آبی مورد نظر، به چندین حجم کنترل مکعب شکل و برابر تقسیم می شود به طوری که خصوصیات جریان در مرکز هر یک از این احجام کنترل در بردارنده خصوصیات جریان در آن جزء به خصوص می باشد. شکل ۳ حالت ساده ای از محیط آبی دوبعدی را نشان می دهد.



شکل ۳- نمایش دوبعدی احجام کنترل ایجاد شده درون محیط آبی مورد نظر

حال با محاسبه میدان سرعت ایجاد شده در هر یک از این احجام کنترل یا خصوصیات جریان در مرکز حجم کنترل، جمع جبری هر یک از مولفه های سرعت برای کل حجم آبی در یک حوضچه محاسبه می گردد:

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n u}{n} \quad (۳)$$

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^n v}{n} \quad (۴)$$

$$W_m = \frac{\sum_{i=1}^n w}{n} \quad (۵)$$

در روابط فوق،  $\Pi$  مبین تعداد احجام کنترل شده،  $u, v, w$  به ترتیب معرف مولفه های سرعت در جهت های  $X, Y, Z$  می باشند.  $U_m, V_m, W_m$  برابر با میانگین مولفه های سرعت در احجام کنترل می باشند. شمایل  $\sum_{i=1}^n v$  معرف عددی پارامتر مورد نظر  $v$  از مقادیر ۱ تا تعداد حجم کنترل ایجاد شده می باشد. با استفاده از رابطه زیر سرعت مطلق کل  $Y_m$  برای حجم محیط آبی به دست می آید:

<sup>1</sup> Mean Whole Retention Time

$$\Upsilon_m = \sqrt{U_m^2 + V_m^2 + W_m^2} \quad (۶)$$

در نهایت میانگین کل زمان ماند به شکل زیر قابل محاسبه می باشد:

$$t_{mw} = \frac{\nabla}{\Upsilon_m \cdot A_{Inlet}} \quad (۷)$$

در رابطه بالا  $A_{Inlet}$  بیانگر مجموع مساحت های قسمت های ورودی جریان می باشد.

### ۳- طراحی و مدل سازی

در تحقیق حاضر هشت نمونه حوضچه پرورش ماهی با ضرایب شکل هندسی مختلف و عمق یکسان ۹۰ سانتی متر مورد نظر قرار گرفته اند و پس از شبیه سازی سه بعدی جریان درون حوضچه ها، برای هر یک، راندمان هیدرولیک محاسبه شد. در جدول ۱ مختصات حوضچه های با ضرایب هندسی مختلف مدل سازی شده در این مطالعه آمده است. برای محاسبه ضریب هندسی لازم است تا نسبت طول به عرض در کانال مستطیلی در نظر گرفته شود.

جدول ۱- خصوصیات هندسی حوضچه های فرضی در نظر گرفته شده

حوضچه	طول (متر)	عرض (متر)	ضریب شکل
A	3	6	0/5
B	3	3	1
C	6	3	2
D	15	3	5
E	30	3	10
F	45	3	15
G	60	3	20
H	60	2	30

### معادله ها

معادله های سه بعدی جریان که حاصل از معادله های ناویر استوکس<sup>۱</sup> پس از میانگین گیری اشل های زمانی آشفته گی می باشند را می توان به صورت زیر نمایش داد. این معادله ها مبین اصول فیزیکی بقای جرم و اندازه حرکت<sup>۲</sup> می باشند. معادله مومنتم برای یک سیال تراکم ناپذیر به صورت زیر نوشته می شود [۲۵]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{r}{r_0} g \end{aligned} \quad (۸)$$

<sup>۱</sup> Navier-Stokes Equations

<sup>۲</sup> Momentum

در معادله‌های فوق،  $\partial$  عامل دیفرانسیل،  $u, v, w$  بیانگر مولفه سرعت در جهات افقی  $x$ ، عرضی  $y$  و عمودی  $z$  می‌باشند.  $t$  زمان و  $p$  مشخص کننده فشار می‌باشد.  $g$  شتاب ناشی از نیروی جاذبه و  $u_t$  لزوجت ناشی از آشفتگی است. همچنین  $r$  چگالی جریان و  $r_0$  چگالی آب در دمای  $20$  درجه می‌باشد.

معادله پیوستگی نیز به شکل رابطه زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

به جهت مدل‌سازی آشفتگی از روش دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$  یکی از شناخته‌ترین و جامع‌ترین روش‌های مدل‌سازی آشفتگی می‌باشد، استفاده شده است [۱۴ و ۵]. معادله‌های مورد استفاده به قرار زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u_t}{s_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{u_t}{s_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{u_t}{s_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - e \quad (10)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + u \frac{\partial e}{\partial x} + v \frac{\partial e}{\partial y} + w \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u_t}{s_e} \frac{\partial e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{u_t}{s_e} \frac{\partial e}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{u_t}{s_e} \frac{\partial e}{\partial z} \right) + C_{1e} \frac{e}{k} (P + C_{3e} B) - C_{2e} \frac{e^2}{k} \quad (11)$$

در معادله فوق  $k$  انرژی جنبشی آشفتگی،  $e$  استهلاک آشفتگی،  $P$  جمله تولید<sup>۱</sup> تنش‌های ناشی از آشفتگی و  $B$  جمله تولید غوطه‌وری انرژی آشفتگی می‌باشد، که با توجه به روابط زیر حاصل می‌گردند.

$$B = \frac{g}{r_0} \frac{u_t}{0.7} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (12)$$

$$P = u_t \left\{ \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (13)$$

در نهایت، مقدار لزوجت گردابه‌ای با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$u_t = C_m \frac{k^2}{e} \quad (14)$$

همچنین، ضرایب مربوط نیز برابر با مقادیر زیر در نظر گرفته می‌شوند [۱۰ و ۲۲].

$$C_m = 0.09, s_e = 1.3, C_{1e} = 1.44, C_{2e} = 1.92, C_{3e} = 1.0$$

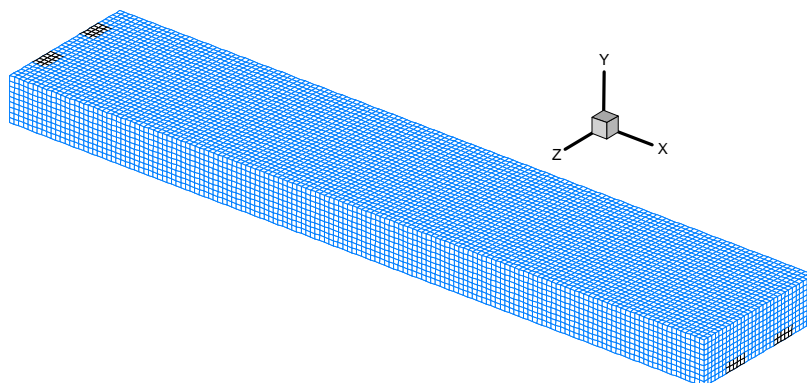
### گسسته‌سازی و روش حل

جهت گسسته‌سازی معادله‌های روش احجام محدود به کار گرفته شده است. برای این منظور از شبکه با ساختار و احجام شش وجهی یا مکعبی برای شبکه‌بندی محیط حل، حوضچه پرورش ماهی، استفاده شده است. احجام محدود به تکنیکی گفته می‌شود که به وسیله آن انتگرال رابطه قانون بقایی مستقیماً در

<sup>1</sup> Production



فضای فیزیکی گسسته شده است. شکل ۴ نمای سه بعدی کانال گسسته سازی شده، حوضچه D، را با استفاده از شبکه مکعب شکل نمایش می دهد.



شکل ۴- نمایش سه بعدی فضای گسسته سازی شده حوضچه با استفاده از شبکه مکعب شکل

همچنین، برای حل معادله‌ها از روش ضمنی استفاده شده است و معادله‌های حاکم در حالت پایدار مورد تحلیل قرار گرفته اند.

#### شرایط مرزی و اولیه

چند نوع شرایط مرزی با توجه به وضعیت سازه و جریان در نظر گرفته شده اند. برای جداره، بستر و دیواره‌های کانال، شرایط مرزی غیر لغزان در نظر گرفته شده است. همچنین، برای مدل سازی سطح آزاد آب از شرایط مرزی متقارن استفاده شده است. در قسمت ورودی کانال، جریان ورودی عمود بر سطح آب وارد کانال شده و شرایط یک جریان ریزشی به درون کانال را شبیه سازی می نماید. برای این منظور، سرعت جریان ورودی با توجه به میزان دبی جریان ورودی در نظر گرفته شده است. از آنجایی که خروجی‌های کانال در انتها و کف کانال قرار دارند، شرایط مرزی فشار در نظر گرفته شده است. برای این منظور مقدار فشار اعمال شده با توجه به رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

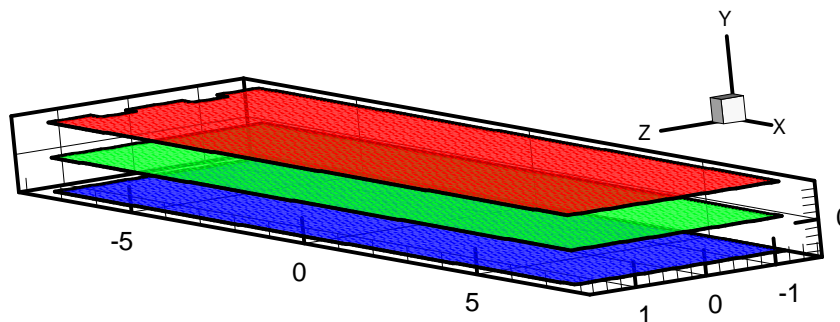
$$P_{out} = \rho_{water} g \frac{h}{2} \quad (12)$$

در رابطه فوق  $h$  مقدار عمق آب در انتهای کانال و  $\rho_{water}$  چگالی آب می باشد.

#### اجرای مدل عددی

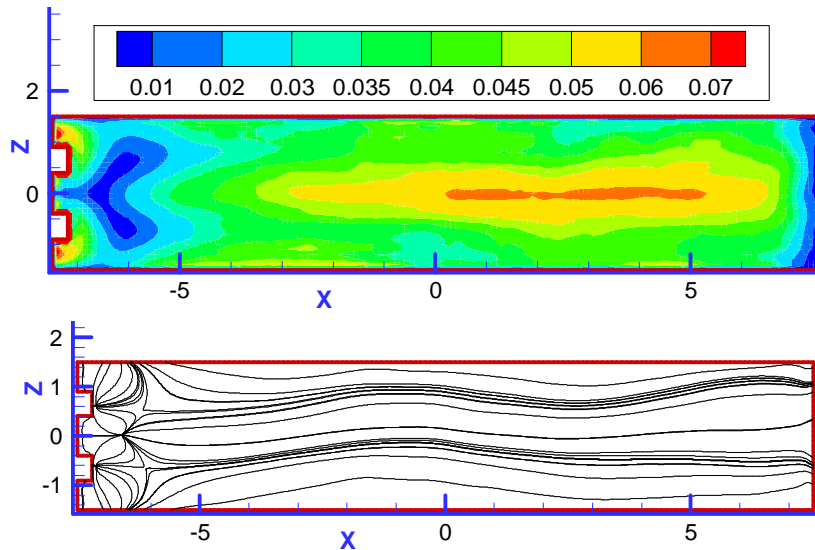
پس از گسسته سازی محیط فیزیکی، معادله‌های حاکم با استفاده از روش احجام محدود مورد تحلیل قرار گرفتند. پس از همگرا شدن نتایج مدل عددی، نتایج حاصل جریان درون کانال مورد بررسی قرار گرفتند. از آنجایی که نمایش تمامی موارد بررسی در اینجا امکان پذیر نمی باشد، لذا نتایج حاصل از اجرای مدل بر روی حوضچه D به عنوان نمونه، نمایش داده شده است. همچنین برای کلیه حوضچه‌ها دبی ورودی برابر با ۱۰۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

از آنجایی که نمایش نتایج در حالت کاملاً سه‌بعدی مطلوب نمی‌باشد، بنابراین نتایج حاصل بر روی سه مقطع دوبعدی منتخب، در جهت عمود بر محور عمودی نمایش داده شده‌است. شکل ۵ نشان دهنده سه صفحه منتخب که به ترتیب بیانگر صفحه سطح آزاد آب، مقطع میانی و مقطع نزدیک به بستر می‌باشند را نشان می‌دهد.

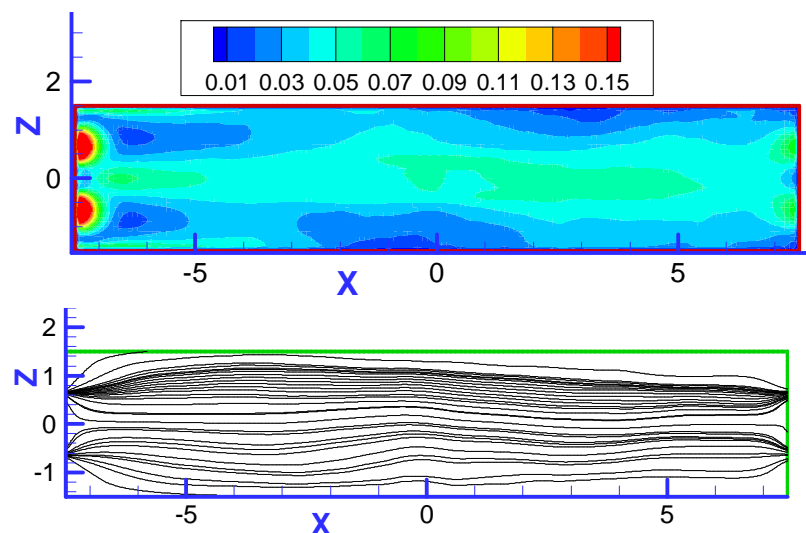


شکل ۵- مقاطع ایجاد شده در محیط حل سه‌بعدی در راستای محور عمودی (واحدها به متر می‌باشد)

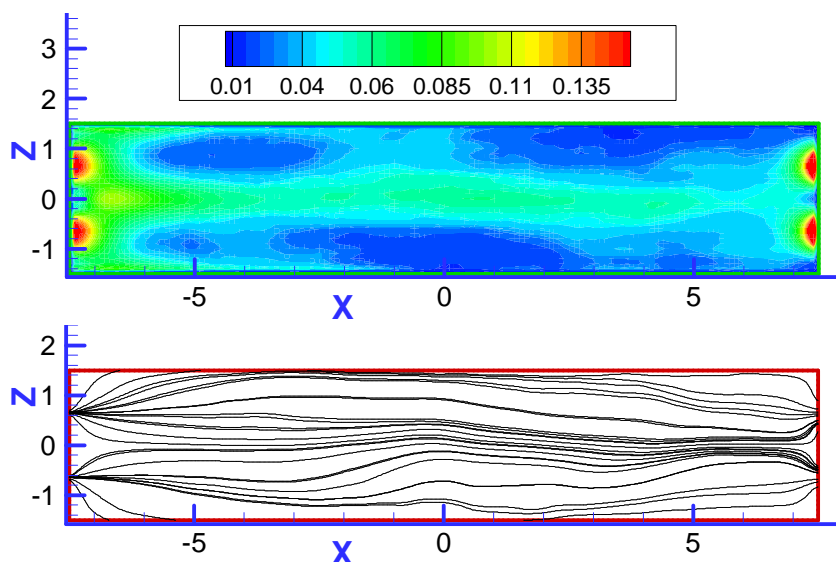
شکل‌های ۶ تا ۸ نیز میدان سرعت و خطوط جریان حاصل از اجرای مدل عددی را بر روی هر یک از مقاطع مورد نظر نشان می‌دهند. یادآوری می‌شود که با توجه به خصوصیات هندسی حوضچه  $D$ ، با توجه به نمایش نرم افزار، طول حوضچه از مقدار  $7/5$  متر تا  $7/5$  متر، عرض از مقدار  $1/5$  - متر تا  $1/5$  متر و ارتفاع از  $45$  - سانتی‌متر تا  $45$  سانتی‌متر نشان داده شده‌است.



شکل ۶- میدان ناشی از سرعت و خطوط جریان حاصل در سطح آب میانی (واحدها به متر و  $Z$  معرف محور عمودی می‌باشد)

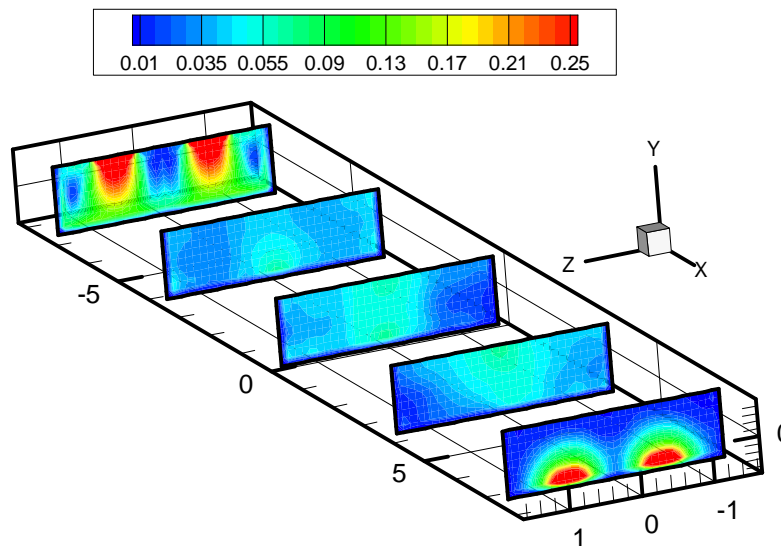


شکل ۷- میدان ناشی از سرعت و خطوط جریان حاصل در مقطع میانی (واحدها به متر و  $Z$  معرف محور عمودی می‌باشد)



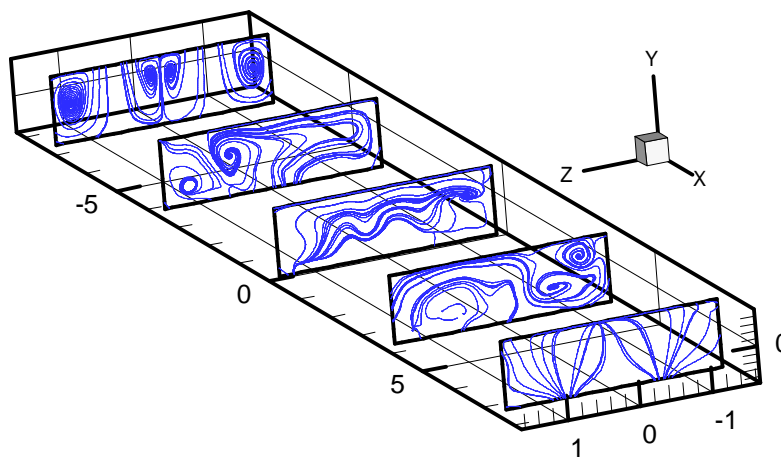
شکل ۸- میدان ناشی از سرعت و خطوط جریان حاصل در مقطع نزدیک به بستر میانی (واحدها به متر و  $Z$  معرف محور عمودی می‌باشد)

نتایج نمایش داده شده حاکی از نحوه اختلاط آب درون حوضچه در صفحه‌های افقی می‌باشد. برای درک بهتر از رفتار جریان، نتایج حاصل از مدل عددی سه بعدی در ۵ صفحه عمودی مطابق با شکل ۹ ارائه شده است که در آن، مقطع پیشین مربوط به مقطع انتهایی کانال می‌باشد.



شکل ۹- نمایش میدان سرعت ایجاد شده در مقاطع عمودی (واحدها به متر می باشد)

همچنین شکل ۱۰ خطوط جریان ایجاد شده در عمق آب را بر روی مقاطع عمودی منتخب نشان می دهد.



شکل ۱۰- خطوط جریان ایجاد شده در مقاطع عمودی (واحدها به متر می باشد)

## نتایج

پس از اجرای مدل عددی بر روی هشت حوضچه مورد نظر و مشخص شدن میدان سرعت، میانگین کل زمان مانند محاسبه شد. با توجه به روابط ارائه شده، مقدار زمان ماند مجازی درون حوضچه با دارا بودن حجم و دبی خروجی از حوضچه نیز محاسبه شد. از تقسیم این دو بر یکدیگر می توان ضریب راندمان هیدرولیک را برای هر یک از حوضچه ها، با توجه به ضرایب متفاوت شکل هندسی به دست آورد. جدول ۲ خلاصه نتایج به دست آمده را نشان می دهد.

جدول ۲- خصوصیات هیدرولیک محاسبه شده برای هشت حوضچه فرضی

حوضچه	ضریب شکل	زمان ماند هیدرولیکی (دقیقه)	میانگین کل زمان ماند (دقیقه)	راندمان هیدرولیکی (درصد)
A	0/5	2/7	87/1	3
B	1	1/4	15	9
C	2	2/7	15/9	17
D	5	6/8	15	45
E	10	13/5	18/8	72
F	15	20/3	25/1	81
G	20	27	31/8	85
H	30	18	20	90

### بحث و نتیجه گیری

بازبینی خصوصیات جریان برای تمامی مدل‌ها نشان دهنده آن است که با افزایش نسبت عرض به طول حوضچه، مقدار درصد نواحی بازچرخانی در کل حوضچه افزایش می‌یابد. در نتیجه، مقدار حجم موثر جریان نسبت به حجم کل جریان کم بوده و بنابراین مقدار زمان گذر کل جریان بالا می‌باشد.

با افزایش نسبت طول به عرض، درصد نواحی بازچرخانی کاهش می‌یابد و در نتیجه، مقدار حجم موثر در حوضچه افزایش یافته و زمان گذر جریان نیز کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، میزان راندمان هیدرولیک جریان بالاتر می‌رود. بنابراین، با افزایش مقدار نسبت طول به عرض، شرایط عمومی جریان به شرایط جریان پیوسته نزدیک‌تر می‌شود. صحت این مطلب را می‌توان با تحقیق مشابه صورت پذیرفته جنکینز<sup>۱</sup> مشاهده نمود که وی نیز با استفاده از یک مدل دو بعدی به نتایج مشابهی با عنایت به نسبت ضریب شکل به میزان راندمان هیدرولیک دست یافته‌است [۱۳].

از آنجاکه حداقل میزان راندمان هیدرولیک برای طراحی مناسب و بهینه محیط‌های آبی مستطیل شکل ۷۰ درصد عنوان شده‌است [۴ و ۲۰]، لذا، با توجه به نتایج حاصل می‌توان دریافت که حداقل ضریب شکل هندسی مناسب برای حوضچه‌های پرورش ماهی ۸ می‌باشد. از نقطه نظر طراحی هیدرولیک، محدودیتی برای افزایش ضریب شکل هندسی وجود ندارد. اما، توجه به این نکته لازم است که در طراحی یک حوضچه پرورش ماهی علاوه بر عامل هیدرولیک حوضچه، عوامل دیگری همچون زیست‌شناسی آبی، پرورشی، تغذیه، تعمیر و نگهداری استخر وجود دارند که باعث می‌شود تا ضریب شکل هندسی تا حد معینی افزایش داشته‌باشد. از آنجایی که در اغلب حوضچه‌های پرورش ماهی ضریب شکل هندسی برابر با ۱۰ می‌باشد [۱]، با توجه به نتایج حاصله، راندمان هیدرولیک این نوع حوضچه‌ها برابر با ۷۲ درصد است که در محدوده قابل قبول از نظر طراحی هیدرولیک می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل و از نقطه نظر طراحی هیدرولیکی، پیشنهاد می‌شود که در صورت امکان برای افزایش ضریب شکل حوضچه‌های کانالی شکل، طراحی حوضچه با توجه به افزایش نسبت طول به عرض صورت پذیرد.

<sup>1</sup> Jenkins

## منابع

- ۱- عمادی، ح.، ۱۳۸۶. پرورش ماهی قزل‌آلا و آزاد، نشر آبریان، چاپ هشتم، ۲۶۴ صفحه.
2. Balas L. and zhan E., 2000. An implicit three-dimensional numerical model to simulate transport processes in coastal water bodies. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. (34), 307-339
3. Bates P.D., 1998. Development and testing of a subgrid scale model for moving boundary hydrodynamic problems in shallow water. *Hydrological Process*:(14). 2073-2088
4. Bendoricchio G., Cin L.D. and Person J., 2000. Guidelines for free water surface wetland design. *EcoSys* (8), 51-91
5. Blazik-Borowa E., 2008. The analysis of the channel flow sensitivity to the parameters of the  $k-\epsilon$  method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Article in press
6. Booker D. J., 2003. Hydraulic modelling of fish habitat in urban rivers during high flows, *Hydrological Process*. (17), 577-599
7. Chen X., 2003. An efficient finite difference scheme for free-surface flows in narrow rivers and estuaries. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. (42), 233-247
8. Crowder D.W and Diplas P., 2006. Applying spatial hydraulic principles to qualify stream habitat. *River Research and Applications*. (22), 79-89
9. Greig S. M., Sear D. A. and Carling P. A., 2007. A review of factors influencing the availability of dissolved oxygen to incubating salmonid embryos. *Hydrological Process*. (21), 323-334
10. Guoqi H., Deguan W. And Xieqing X., 1989. Numerical simulation of 3-D turbulent flows over dredged trenches, *Acta Mechanica Sinica*. (5), 22-37
11. Heggenes J., 1996. Habitat selection by brown trout (*Salmo trutta*) and young Atlantic salmon (*S. salar*) in streams: static and dynamic hydraulic modelling, *Regulated Rivers: Research and Management*. (12), 155-169
12. Heggenes J. and Saltveit S.J., 1996. Predicting fish habitat use to changes in water flow: modelling critical minimum flows for Atlantic salmon, *Salmo Salar*, and brown trout, *S. Trutta*, *Regulated Rivers: Research and Management*: (12), 331-344
13. Jenkins G.A., 2003. The hydraulic efficiency of artificial wetlands, XXX *International Association of Hydraulics Research Congress*, 576-587
14. Kwon O., Hah C., 1995. Simulation of three-dimensional turbulent flows on unstructured meshes, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. (33), 6-18
15. Knud Larsen., 1972. New trends in planting trout in lowland streams: The result of some controlled Danish liberations, *Aquaculture*. (1), 137-171
16. Logan S. H. and Johnston E. W., 1992. Economics of commercial trout production. *Aquaculture* .(100), 25-46

17. Louhi P., Makipetays A. and Erkinaro J., 2008. Spawning habitat of Atlantic Salmon and brown trout: General criteria and intragravel factors. *River Research and Applications*. (24), 330–339
18. Nicholas L.G. Somes, 1999. Numerical simulation of wetland hydrodynamics. Department of Civil Engineering, Monash University, *Environment international*. (25), 773-779
19. Olah J., Sinha R. P., Ayyappanc S., Purushothaman S. And Radheyshyam S., 1987. Sediment Oxygen Consumption in Tropical Undrainable Fish Ponds. *International Kevue ges. Hydrohiol*. (72), 297-305
20. Persson,J., Nicholas L.G Somes and Wong, 1999. Hydraulic efficiency of constructed wetland and pond. *Water Science and technology*. (40), 291-300
21. Robertson D.M. and Imberger J., 1994. Lake number, a quantitative indicator of mixing used to estimate changes in dissolved oxygen. *International Revue ges. Hydrobiol*. (79), 159-176
22. Rüter N., Olsen N.R.B., 2007. Modelling free-forming meander evolution in a laboratory channel using three-dimensional computational fluid dynamics. *Geomorphology*. (89), 308–319
23. Stewart G., Anderson R. and Wohl E., 2005. Two-dimensional Modelling of habitat suability as a function of discharge on two Colorado rivers. *River research and applications*. (21), 1061–1074
24. Tai C.H., Liew K.M. and Zhao Y., 2007. Numerical simulation of 3D fluid–structure interaction flow using an immersed object method with overlapping grids. *Computers and Structures*. (85), 749–762
25. Versteeg H.K. and Malalasekera W., 2007. An introduction to computational fluid dynamics, second edition, Pearson Education Limited. 503 pages
26. Yazdandoost F. and Zounemat-Kermani M., 2005. Evaluating the hydraulic efficiency in artificial wetlands. XXXI IAHR Congress. 1913-1919

