



دانشگاه گوارن و منابع طبیعی گران

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و دوم، شماره اول، ۱۳۹۴  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در سازه ترکیبی سرریز - دریچه با استفاده از نرم‌افزار *Flow3D*

محمد کاهه<sup>۱</sup>، \*امیراحمد دهقانی<sup>۲</sup>، مهدی کاهه<sup>۳</sup> و عبدالرضا ظهیری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گران، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گران، <sup>۲</sup> دکتری گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، <sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گران  
تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۴

### چکیده

در سازه‌های ترکیبی سرریز-دریچه، تداخل جریان از زیردریچه و روی سرریز باعث اختلاط شدید در جریان و تغییر در توزیع تنش‌های برشی کف می‌شود. از این رو شبیه‌سازی عددی الگوی جریان عبوری از این سازه‌ها بسیار پیچیده است. هدف اصلی از انجام این پژوهش، شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در پایین‌دست این سازه‌ها با استفاده از مدل *Flow3D* است. نرم‌افزار *Flow3D* یک نرم‌افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که برای حل مسایل با هندسه پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل برای شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد سه‌بعدی غیرماندگار با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی دارد. برای ارزیابی این نرم‌افزار با به‌کارگیری روش حجم سیال (*VOF*) در تخمین پارامترهای جریان در سازه‌های ترکیبی، از برخی داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده در این پژوهش استفاده شد، و نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل آشفتگی *RNG k-ε* با آن مقایسه گردید. نتایج آمار خطا برای معادله به‌دست آمده برای نسبت دبی‌های عبوری از رو و زیر سازه (رابطه ۱۳) نسبت به داده‌های محاسباتی نرم‌افزار براساس جذر میانگین مربعات خطا (*RMSE*) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) بررسی شد و مقدار *RMSE* برابر ۰/۰۹۹۴ و مقدار  $R^2$  برابر ۰/۹۹۲ به‌دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که مدل *Flow3D* با دقت بالایی می‌تواند برای شبیه‌سازی پروفیل سطح آب و محاسبه نسبت دبی عبوری از روی سرریز به‌میزان دبی عبوری از زیردریچه مورد استفاده قرار گیرد.

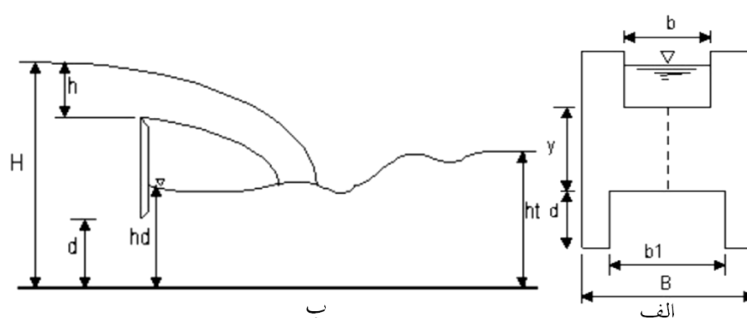
واژه‌های کلیدی: جریان ترکیبی، سرریز-دریچه، مدل‌سازی عددی، *Flow3D*

\* مسئول مکاتبه: [a.dehghani@gau.ac.ir](mailto:a.dehghani@gau.ac.ir)

### مقدمه

برای به حداقل رساندن مشکلات در سرریزها و دریچه‌ها و همچنین برای بالا بردن برتری‌های آنها می‌توان از سازه ترکیبی سرریز- دریچه استفاده کرد به طوری که در یک زمان، جریان آب بتواند هم از روی سرریز و هم از زیر دریچه عبور نماید. این وسیله ترکیبی می‌تواند مشکلات ناشی از فرسایش و رسوب‌گذاری را مرتفع نماید (مایچرک، ۱۹۸۵؛ دهقانی و بشیری، ۲۰۱۰). همچنین با این روش، رسوبات و مواد زائد در پشت سرریزها انباشته نمی‌شوند.

در سازه ترکیبی سرریز- دریچه، شرایط هیدرولیکی جدیدی حاکم خواهد شد که با شرایط هیدرولیکی هر کدام از این دو سازه به تنهایی متفاوت است. از آنجایی که در سازه‌های ترکیبی سرریز- دریچه، تداخل جریان از زیر دریچه و روی سرریز باعث اختلاط شدید در جریان، تغییرات در توزیع تنش‌های برشی کف و از این رو افزایش پیچیدگی محاسبات می‌شود، بنابراین شبیه‌سازی الگوی جریان، سطح آزاد آب و آبستگي مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. تاکنون پژوهش‌های وسیعی در این زمینه انجام شده است. از جمله مطالعات آزمایشگاهی می‌توان به مطالعات نجم و همکاران (۱۹۹۴) اشاره کرد. ایشان پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر روی جریان ترکیبی را مورد بررسی قرار داده و برای جریان سرریز مثلثی روی دریچه مستطیلی، سرریز و دریچه مستطیلی با ابعاد تنگ‌شدگی‌های مختلف به‌طور جداگانه معادلاتی استخراج کردند. همچنین حالتی را که تنگ‌شدگی دریچه و سرریز یکسان یا متفاوت باشد نیز به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار دادند. این پژوهشگران همچنین برای شرایط مختلف مانند استفاده از سرریز مثلثی با زاویه‌های مختلف و یا سرریز مستطیلی با فشردگی جانبی و بدون فشردگی جانبی روابط جداگانه به‌صورت ذیل ارائه دادند:

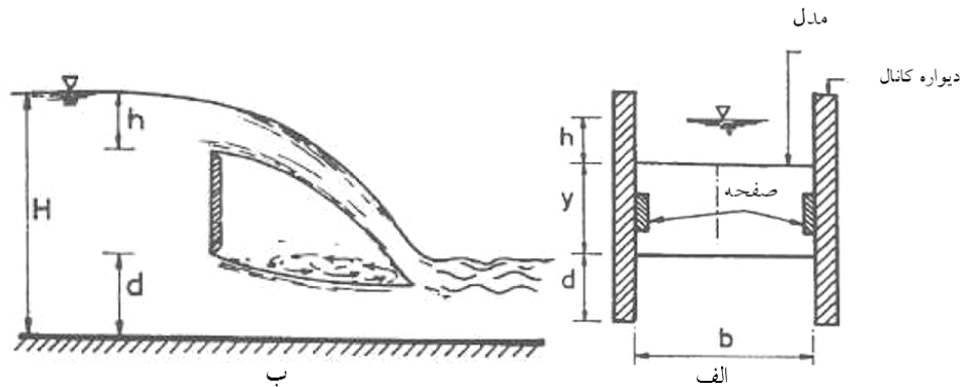


شکل ۱- جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز- دریچه مستطیل شکل با فشردگی جانبی (نجم و همکاران، ۲۰۰۲) (الف- نمای مقابل و ب- نیم‌رخ طولی).

$$C_d = \frac{Q_c}{(b_d \sqrt{\gamma g} \sqrt{(d+y+h-h_d)} + \frac{\gamma}{3} \sqrt{\gamma g} (b - \cdot / \gamma h) h^{1/5}} \quad (1)$$

$$Q_u = \frac{\gamma}{3} C_u \sqrt{\gamma g} (b - \cdot / \gamma h) h^{1/5} \quad (2)$$

$$Q_l = C_l b_d \sqrt{\gamma g} \sqrt{(d+y+h-h_d)} \quad (3)$$



شکل ۲- جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز- دریچه بدون فشردگی جانبی (نجم و همکاران، ۱۹۹۷)  
(الف- نمای مقابل و ب- نیمرخ طولی).

$$\frac{Q_c}{(\sqrt{\gamma g}) b (d^{1/5})} = C_l \left( \sqrt{1 + \frac{y}{d} + \frac{h}{d} + \frac{h_d}{d}} \right) + \frac{\gamma}{3} C_u \left( \frac{h}{d} \right)^{2/5} \quad (4)$$

که در آن ها،  $C_d$ : ضریب آبگذری سازه ترکیبی،  $C_l$ : ضریب آبگذری دریچه،  $C_u$ : ضریب آبگذری سرریز،  $Q_c$ : دبی ورودی به کانال،  $Q_u$ : دبی عبوری از روی سرریز و  $Q_l$ : دبی عبوری از زیردریچه می‌باشند.

پراکاش و شیواپور (۲۰۰۴) به بررسی دبی جریان از روی سرریز مستطیلی و از زیردریچه  $\Lambda$  شکل پرداختند. طبق نتایج ایشان، زمانی که از دریچه  $\Lambda$  شکل و کج استفاده می‌شود، دبی کانال‌های مستطیلی

با بستر ثابت دقیق‌تر قابل تخمین و به واقعیت نزدیک‌تر است. سامانی و مظاهری (۲۰۰۷) به بررسی تخمین رابطه دبی جریان عبوری از روی سرریز و زیر دریچه در حالت‌های مستغرق و نیمه‌مستغرق پرداختند. نتایج بررسی هیدرولیک جریان ایشان نشان می‌دهد که سیستم سرریز-دریچه موجب اصلاح خطوط جریان شده، شرایط جریان را به حالت تئوریک نزدیک‌تر و در نتیجه واسنجی ضریب شدت جریان سیستم سرریز-دریچه و تخمین دبی جریان با دقت بیش‌تری نسبت به سرریزهای معمولی انجام می‌شود. اسماعیلی و فتحی‌مقدم (۲۰۰۶) به بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان و تعیین ضریب دبی مدل سرریز-دریچه در کانال دایروی و جریان‌های زیرگذر و روگذر با نصب مانع با عرض‌های مختلف پرداختند. رضویان و حیدرپور (۲۰۰۷) با بررسی خطوط جریان ترکیبی از روی سرریز مستطیلی با فشردگی جانبی و زیردریچه مستطیلی بدون فشردگی جانبی در حالت لبه‌تیز، معادله‌ای برای ضریب شدت جریان پیشنهاد کردند.

با توجه به توسعه سیستم‌های کامپیوتری و محاسباتی و همچنین وجود پیچیدگی‌های غیرقابل اندازه‌گیری در جریان عبوری از یک سازه ترکیبی سرریز-دریچه در مدل‌های آزمایشگاهی، استفاده از شبیه‌سازی عددی می‌تواند در بررسی هیدرولیکی چنین جریان‌هایی بسیار مؤثر و قابل توجه باشد. نرم‌افزار *Flow3D* توانایی شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و رسوب در اطراف سازه‌های هیدرولیکی مختلف را دارا می‌باشد.

موسته و اتما (۲۰۰۴)، تأثیر طول آبشکن بر منطقه چرخشی پشت آبشکن را با در نظر گرفتن تأثیر مقیاس با نرم‌افزار *Flow3D* مورد بررسی قرار دادند. گونزالز و بومباردلی (۲۰۰۵) نیز در یک شبیه‌سازی عددی با استفاده از *Flow3D* به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی بر روی سطح صاف در دو حالت شبکه‌بندی ریز و شبکه‌بندی درشت به صورت دوبعدی و سه‌بعدی پرداختند. صباغ‌یزدی و همکاران (۲۰۰۷) نیز در یک مدل سه‌بعدی به ارزیابی مدل‌های تلاطمی  $k-\epsilon$  و  $RNG k-\epsilon$  بر روی میزان ورود هوا در پرش هیدرولیکی با استفاده از روش حجم محدود پرداختند و اثر آن را بر روی دقت تخمین سرعت متوسط جریان با استفاده از مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی موجود از پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند. امیراصلانی (۲۰۰۸) به شبیه‌سازی سه‌بعدی آبشستگی در پایین‌دست یک جت ریزشی آزاد با استفاده از مدل  $k-\epsilon$  نرم‌افزار *Flow3D* برای بررسی اثر زاویه اصطکاک داخلی رسوبات بر روی چاله آبشستگی پرداختند. شاه‌رخ (۲۰۰۸) با استفاده از

نرم افزار *Flow3D*، مدل عددی الگوی جریان اطراف یک آبشکن را تهیه و با اعمال مدل‌های مختلف آشفتگی، به تأثیر این مدل‌ها بر طول منطقه جداشدگی جریان در پشت یک آبشکن پرداخت. نتایج نشان داد که بهترین مدل برای پیش‌بینی طول منطقه جداشدگی در پشت یک آبشکن، مدل آشفتگی *LES* می‌باشد. شاملو و جعفری (۲۰۰۸) به بررسی اثر وجود زبری کف بر روی تغییرات میدان سرعت و فشار جریان در اطراف پایه استوانه‌ای شکل در یک کانال مستطیلی توسط نرم‌افزار *Flow3D* و با استفاده از مدل آشفتگی *k-ε* به صورت سه‌بعدی پرداختند. کاهه و همکاران (۲۰۱۰) مدل‌های آشفتگی *k-ε* و *RNG k-ε* را برای تخمین پروفیل‌های سرعت در پرش هیدرولیکی بر روی سطوح موج‌دار مورد بررسی و مقایسه قرار داد. حسینی و عبدی‌پور (۲۰۱۰) با استفاده از نرم‌افزار *Flow3D* به مدل‌سازی عددی پروفیل سرعت در جریان‌های گل‌آلود پیوسته پرداختند و تأثیر شیب، غلظت و دبی جریان بر آن را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین برتور و بورنهم (۲۰۱۰) به مدل‌سازی فرسایش رسوب در پایین‌دست سد با نرم‌افزار *Flow3D* پرداختند.

با توجه به اهمیت موضوع و به منظور بررسی و ارزیابی عددی جریان عبوری از یک سازه ترکیبی سرریز-دریچه، در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار *Flow3D*، هیدرولیک جریان ترکیبی هم‌زمان از روی سرریز و زیر دریچه شبیه‌سازی شده و نتایج آن با نتایج به دست آمده از مطالعه آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است.

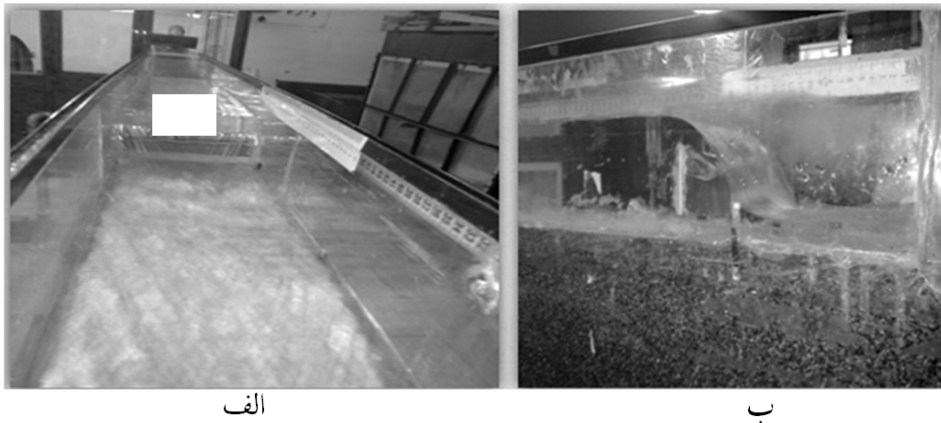
## مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل عددی جریان ترکیبی هم‌زمان از روی سرریز و زیر دریچه، از نتایج آزمایشگاهی بر روی سازه‌های ترکیبی با شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱- محدوده آزمایش‌های به کار رفته برای مدل‌سازی هیدرولیک جریان.

پارامتر	دفعات تغییر	واحد	دامنه تغییرات
دبی ورودی ( $Q$ )	۷	لیتر بر ثانیه	۱/۳۹-۲/۶۴
بازشدگی دریچه ( $W$ )	۵	سانتی‌متر	۰/۵-۱/۵
ارتفاع سازه ( $T$ )	۵	سانتی‌متر	۳/۵-۵/۵

در این پژوهش همه آزمایش‌ها در کانالی به طول ۳/۷ متر، عرض ۰/۱۳۵ متر و ارتفاع ۰/۳ متر انجام شد و سازه مورد نظر در فاصله ۲ متر از ابتدای کانال تعبیه شده بود. شکل ۳ طرح کلی و مشخصات کانال آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهد.



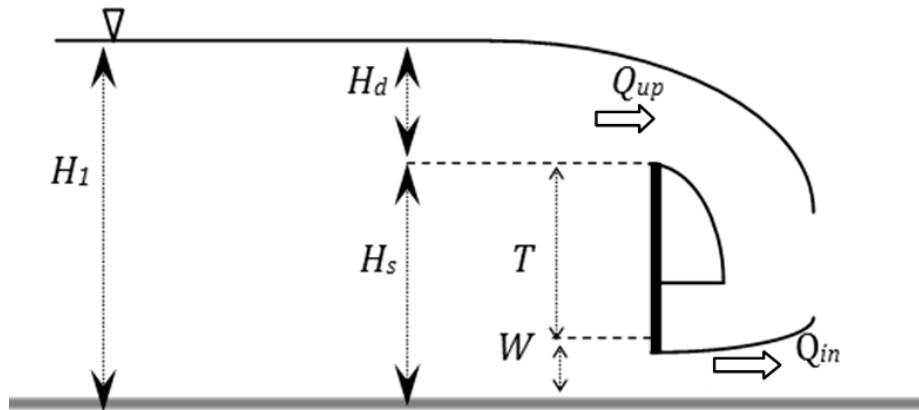
شکل ۳- مدل آزمایشگاهی سازه ترکیبی سرریز- دریچه (الف- نمای مقابل و ب- نیمرخ طولی).

پارامترهای مؤثر و آنالیز ابعادی: در جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز- دریچه در حالت جریان آزاد، متغیرهای مؤثر عبارت‌اند از:

- ۱- دبی عبوری از روی سرریز  $Q_{up}$ ، ۲- دبی جریان عبوری  $Q$ ، ۳- عمق بالادست سازه ترکیبی  $H_1$ ،
- ۴- هد آب روی سرریز  $H_d$ ، ۵- طول سازه  $T$ ، ۶- بازشدگی زیردریچه  $W$ ، ۷- عرض کانال  $b$ ،
- ۸- شتاب ثقل  $g$ ، ۹- چگالی سیال  $\rho$  و ۱۰- لزجت سیال  $\mu$  (شکل ۴).

براساس آنالیز ابعادی به روش پی‌باکینگهام و با صرف نظر کردن از پارامتر بی‌بعد رینولدز جریان (به علت آشفتگی جریان)، اعداد بی‌بعد به صورت رابطه ۵ به دست می‌آیند:

$$\frac{Q_{up}}{Q_{in}} = f\left(\frac{H_d}{T}, \frac{H_1}{W}, Fr\right) \quad (5)$$



شکل ۴- شماتیک جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز- دریچه.

نرم افزار *Flow3D*: نرم افزار *Flow3D* یک مدل مناسب برای حل مسایل پیچیده دینامیک سیالات بوده و قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را مدل کند. این نرم افزار از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم بر جریان با استفاده از شبکه بندی منظم و روش حجم سیال برای محاسبه سطح آزاد آب در مجاری باز استفاده می کند. این مدل قابلیت تحلیل یک، دو و سه بعدی میدان جریان را دارد. معادلات پایه ای مورد استفاده در این مدل، معادلات ناویر استوکس هستند و از پنج مدل آشفتگی طول اختلاط پراتل (*Prandtl mixing length*)، یک معادله ای (*One equation*)، دو معادله ای  $k-\epsilon$  (*Turbulent energy model*)، دو معادله ای  $k-\epsilon$  (*Two equation k- $\epsilon$  model*)، مدل های  $k-\epsilon$  (*Renormalized group model*) *RNG* و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ (*Large eddy simulation model*) در حل خصوصیات جریان های آشفتنه استفاده می کند. این مدل شامل الگوهای فیزیکی بسیاری از جمله آب های کم عمق، لزجت، کاویتاسیون، آشفتگی و محیط های متخلخل می باشد. مدل *Flow3D* در مقایسه با سایر مدل های موجود در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی، دارای دامنه وسیعی از کاربردها و قابلیت هاست، کاربر دوست بوده و رابط گرافیکی بسیار قوی دارد که کار با آن را آسان تر می کند.

در این نرم افزار معادلات استاندارد جریان مانند معادلات ناویر استوکس و معادله پیوستگی برای تمام فضای محاسبات حل عددی می شوند. فرم کلی معادله پیوستگی به صورت شکل زیر بیان می شود:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (6)$$

اولین عبارت در سمت راست معادله پیوستگی مربوط به انتشار تلاطم بوده و به صورت زیر قابل تعریف می‌باشد:

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x}(v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}) + R \frac{\partial}{\partial y}(v_\rho A_y \frac{\partial \rho}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(v_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}) + \xi \frac{\rho v_\rho A_x}{x} \quad (7)$$

عبارت دوم در سمت راست رابطه ۷ بیانگر منشأ دانسیته است که برای مدل‌سازی تزریق توده مواد اهمیت دارد:

$$\frac{V_F}{\rho c^\gamma} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (8)$$

همچنین فرم کلی معادلات حرکت (مومنتم) در حالت سه‌بعدی به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \zeta \frac{A_y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \zeta \frac{A_y u v}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial P}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن‌ها،  $V_F$ : ضریب حجم آزاد به سمت جریان،  $\rho$ : چگالی سیال،  $A_x$ ،  $A_y$  و  $A_z$  سطح جریان در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$ : ضریب نفوذ،  $(u, v, w)$  مؤلفه‌های سرعت در جهات  $(x, y, z)$  و مقدار  $R$  در معادله ضریب مربوط به مختصات به صورت کارتیزین و یا استوانه‌ای می‌باشد.  $G_x$  و  $G_y$  و  $G_z$  مربوط به شتاب حجمی می‌باشند. پارامترهای  $f_x$ ،  $f_y$  و  $f_z$  شتاب‌های ناشی از جریان‌های لزوج بوده و  $b_x$ ،  $b_y$  و  $b_z$  نیز شامل روابط مربوط به افت در محیط‌های متخلخل هستند.



مشخصات میدان حل: شرایط مرزی مورد استفاده در مدل و محدوده آن طوری است که مرز بالادست به صورت دبی ورودی<sup>۱</sup>، مرز پایین دست به صورت مرز خروجی<sup>۲</sup>، مرز در بستر به صورت شرایط دیواره<sup>۳</sup> و مرز سطح آب به صورت شرایط تقارن<sup>۴</sup> انتخاب شده است (شکل ۵).



شکل ۵- شرایط مرزی مورد استفاده در مدل سازی.

یکی از مهم ترین نکاتی که باید در شبیه سازی های عددی مورد توجه و رعایت قرار گیرد، شبکه بندی مناسب برای حل دقیق معادلات حاکم است. در همه آزمایش های عددی صورت گرفته، ابعاد شبکه طوری تعیین شد که پارامترهای کنترل شبکه از قبیل حداکثر نسبت ابعاد شبکه<sup>۵</sup> در راستای طولی و عمقی و ضریب نسبت ابعاد شبکه<sup>۶</sup> در راستاهای مختلف و در مجاورت یکدیگر مناسب انتخاب شده باشند. برای نتایج دقیق و مؤثر، مقدار هر یک از دو پارامتر بالا باید به عدد ۱ نزدیک بوده و مقدار نسبت ابعاد شبکه در مجاور یکدیگر از ۱/۲۵ و همچنین نسبت ابعاد شبکه در راستاهای مختلف از ۳ نباید بیش تر باشد (فلوساینس، ۲۰۰۸). بر این اساس، شبکه بندی مدل، به طور سه بعدی و با ابعاد ۵×۵×۵ میلی متر انتخاب شد و تعداد کل مش برای هر مدل سازی تقریباً ۱۶۲۰۰۰ سلول در نظر گرفته شد.

در مدل سازی عددی پدیده های هیدرولیکی، یکی از مهم ترین پارامترهای مورد استفاده در واسنجی مدل عددی، انتخاب بهترین مدل تلاطمی به منظور شبیه سازی دقیق تر پدیده هیدرولیکی می باشد. در

- 1- Volume Flow Rate
- 2- Outflow
- 3- Wall
- 4- Symmetry
- 5- Maximum Aspect Ratio
- 6- Maximum Adjacent Cell Size Ratio

این پژوهش به منظور واسنجی مدل و شبیه‌سازی جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز-دریچه، مدل‌های تلاطمی  $k-\varepsilon$  و  $RNG k-\varepsilon$  مورد ارزیابی قرار گرفتند. مدل‌های تلاطمی  $k-\varepsilon$  و  $RNG k-\varepsilon$  از نوع دو معادله‌ای بوده و معادلات حاکم بر آن به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_T - \varepsilon_T \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} = \frac{CDIS_1}{k_T} (P_T + CDIS_2 G_T) + Diff_{\varepsilon_T} - CDIS_3 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (11)$$

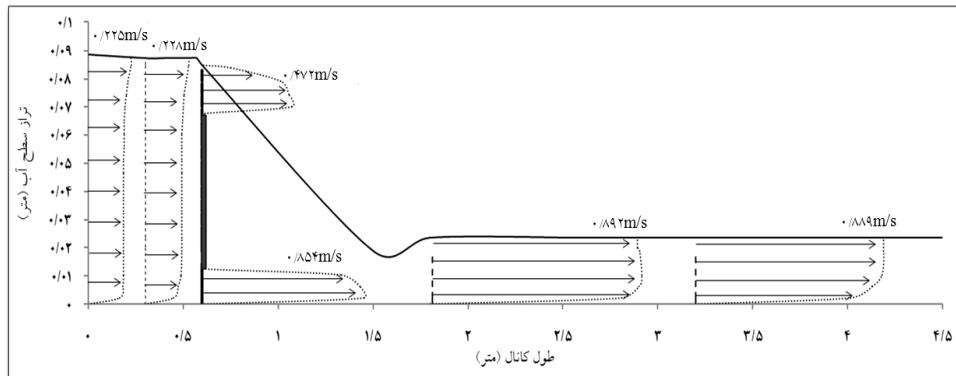
رابطه ۱۰ مربوط به تولید انرژی جنبشی تلاطمی بوده که در آن عبارات‌های  $P_T$ ،  $G_T$  و  $Diff_T$  به ترتیب مربوط به تولید انرژی جنبشی، نیروی شناوری و انتشار تلاطم است. در رابطه ۱۰ مقدار  $\varepsilon_T$  نرخ اتلاف انرژی جنبشی در مدل طول اختلاط پراپانتل است و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\varepsilon_T = CNU \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{k_T^{3/2}}{TLEN} \quad (12)$$

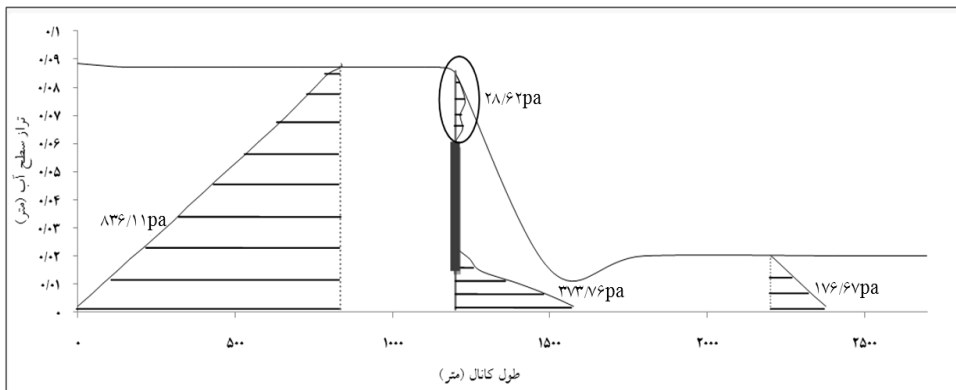
در رابطه ۱۲ مقدار  $CNU$  در روش  $k-\varepsilon$  برابر ۰/۹ و در روش  $RNG k-\varepsilon$  برابر ۰/۸۵ می‌باشد. رابطه ۱۱ مربوط به نرخ اتلاف تلاطم است که در روش  $k-\varepsilon$  استاندارد ضرایب  $CDIS_1$ ،  $CDIS_2$  و  $CDIS_3$  به ترتیب برابر ۱/۴۴، ۱/۹۲ و ۲/۰ است. در روش  $RNG k-\varepsilon$  ضرایب  $CDIS_1$  و  $CDIS_3$  به ترتیب برابر با ۱/۴۲ و ۲/۰ بوده و مقدار  $CDIS_2$  نیز از طریق ترم‌های  $P_T$  و  $K_T$  قابل محاسبه می‌باشد.

## نتایج و بحث

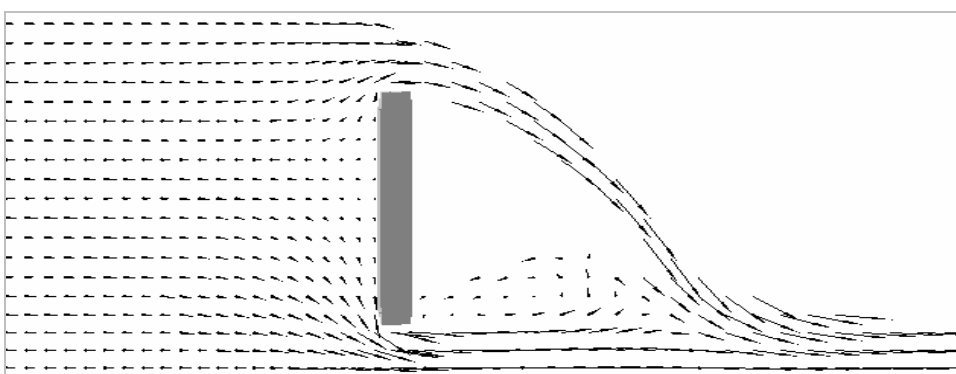
در شکل‌های ۶ و ۷، نمونه‌ای از توزیع سرعت طولی جریان و توزیع فشار محاسبه شده در اطراف سازه ترکیبی سرریز-دریچه نشان داده شده است. همچنین در شکل ۸ الگوی جریان محاسبه شده توسط نرم‌افزار *Flow3D* نشان داده شده است.



شکل ۶- توزیع سرعت طولی جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز- دریچه در طول کانال با استفاده از مدل  $RNG k-\epsilon$ .



شکل ۷- توزیع فشار جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز- دریچه در طول کانال با استفاده از مدل  $RNG k-\epsilon$ .



شکل ۸- الگوی جریان اطراف سازه ترکیبی سرریز- دریچه با استفاده از مدل  $RNG k-\epsilon$ .

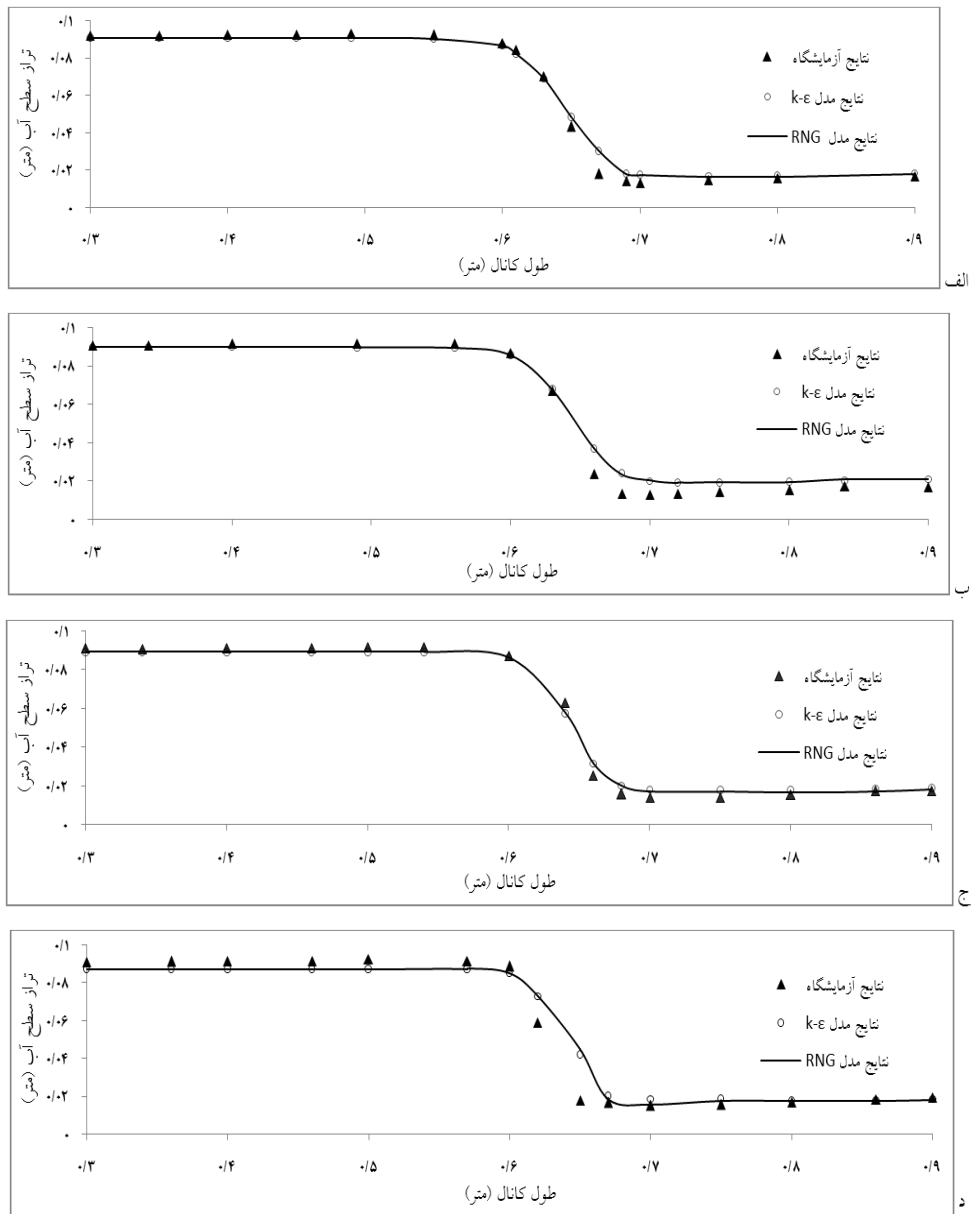
به منظور ارزیابی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز- دریاچه و انتخاب بهترین مدل تلاطمی (به عنوان واسنجی مدل عددی)، ابتدا به مقایسه نتایج پروفیل سطح جریان به دست آمده از دو مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG و  $k-\varepsilon$  پرداخته می‌شود. شکل ۹ نتایج به دست آمده از ارزیابی مدل‌های تلاطمی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که هر دو مدل‌های تلاطمی  $k-\varepsilon$  RNG و  $k-\varepsilon$  توانسته‌اند به خوبی پروفیل سطح آب را برآورد نمایند.

مدل‌های بر پایه  $k-\varepsilon$  RNG کم‌تر بر ارقام ثابت تجربی تکیه می‌کنند. مدل  $k-\varepsilon$  RNG از معادله‌هایی استفاده می‌کند که شبیه معادله‌های مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  است اما مقادیر ثابت معادله که به صورت عملی در مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  یافت شده‌اند، صریحاً از مدل  $k-\varepsilon$  RNG گرفته شده‌اند. از این رو مدل  $k-\varepsilon$  RNG قابلیت اجرایی گسترده‌تری نسبت به مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  دارد. به‌ویژه مدل  $k-\varepsilon$  RNG برای توصیف دقیق‌تر آشفتگی جریان‌های با شدت کم‌تر مناسب‌تر است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، نیز مقادیر محاسبه شده عمق جریان در بالادست و روی سازه نسبت به مقادیر آزمایشگاهی متناظر آن نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب مدل‌ها در برآورد این عمق‌ها است. لازم به ذکر است که تراز سطح آب با چند تکرار و توسط ترازسنج دیجیتالی با دقت بالا اندازه‌گیری شده است.

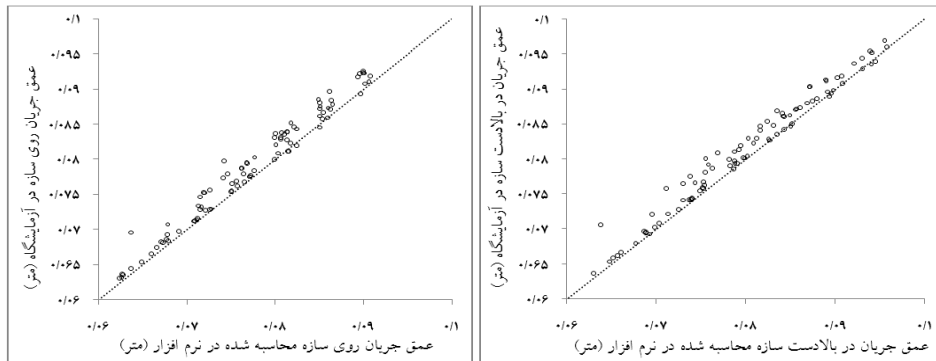
به منظور تعیین مقادیر دبی عبوری از بالا و پایین سازه، مقادیر سرعت طولی محاسبه شده در هر گره درست زیردریاچه و بالای سرریز ملاک کار قرار گرفت و سپس با ترسیم پروفیل سرعت و محاسبه سطح زیر نمودار پروفیل سرعت مقادیر دبی عبوری از زیردریاچه و روی سرریز محاسبه شد.

سپس نسبت دبی بالا به دبی پایین سازه ترکیبی ( $\frac{Q_{up}}{Q_{in}}$ ) براساس پارامترهای بی‌بعد به دست آمده در

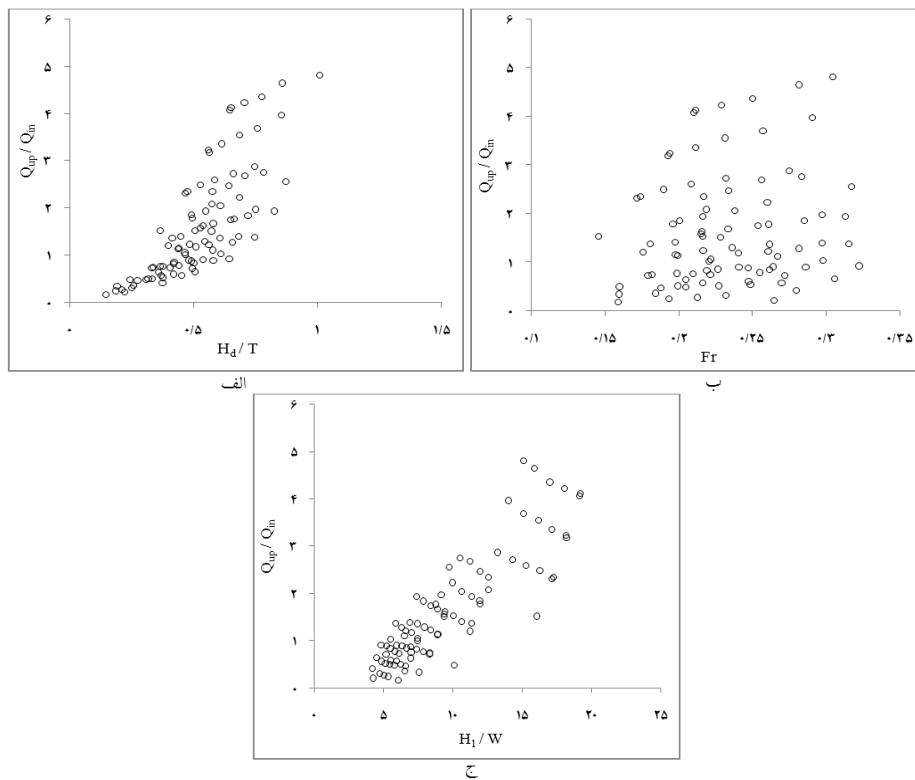
رابطه ۵ ترسیم شد. شکل ۱۱ تغییرات  $\frac{Q_{up}}{Q_{in}}$  را نسبت به  $Fr$ ،  $\frac{H_1}{W}$  و  $\frac{H_d}{T}$  نشان می‌دهد.



شکل ۹- مقایسه پروفیل جریان در دو مدل تلاطمی  $k-\epsilon$  و  $RNG k-\epsilon$  و داده‌های آزمایشگاهی برای دبی ۲/۲۲ لیتر بر ثانیه و فرود ۰/۲ (الف). بازشدگی ۰/۵ سانتی‌متر، ب. بازشدگی ۰/۷۵ سانتی‌متر، ج. بازشدگی ۱ سانتی‌متر و د. بازشدگی ۱/۲۵ سانتی‌متر).



شکل ۱۰- ارزیابی دقت مدل  $RNG k-\epsilon$  برای عمق جریان بالادست سازه و روی سازه.



شکل ۱۱- تغییرات  $\frac{Q_{up}}{Q_{in}}$  نسبت به پارامترهای بی‌بعد به دست آمده در رابطه ۵

(الف- نسبت به  $\frac{H_d}{T}$ ، ب- نسبت به  $Fr$  و ج- نسبت به  $\frac{H_1}{W}$ ).

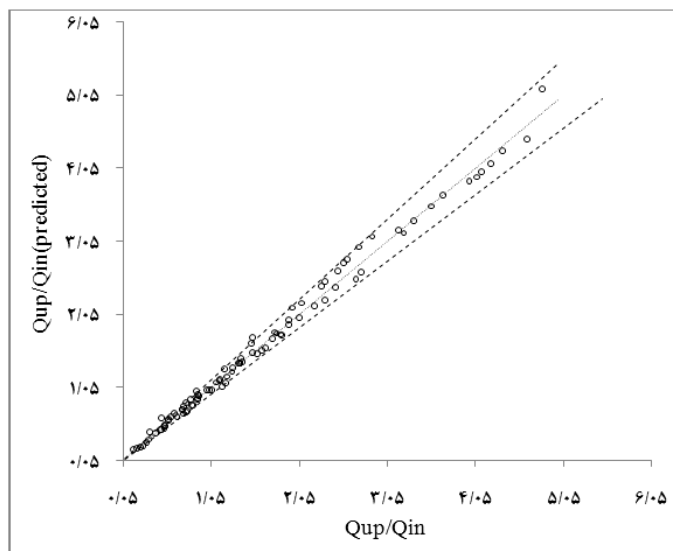
منحنی‌های مربوط به رابطه نسبت  $\frac{Q_{up}}{Q_{in}}$  با پارامترهای بی‌بعد (شکل ۱۱)، روند صعودی داشته در حالی که با افزایش مقدار این پارامترهای بی‌بعد، نسبت دبی‌های عبوری از بالا به پایین سازه افزایش می‌یابد اما روند مشخص برای تغییرات نسبت دبی براساس عدد فرود مشاهده نمی‌شود. با انجام برازش منحنی بر داده‌های آزمایشگاهی، رابطه ۱۳ به‌منظور برآورد نسبت  $\frac{Q_{up}}{Q_{in}}$  ارائه شده است. مقادیر آمارهای خطا با به‌کارگیری این رابطه به‌صورت جدول ۲ می‌باشد.

$$\frac{Q_{up}}{Q_{in}} = 0.3167(Fr)^{-1/13589} \left(\frac{H_1}{W}\right)^{0.96783} \left(\frac{H_d}{T}\right)^{1/2917} \quad (13)$$

جدول ۲- نتایج آمارهای خطای رابطه ۱۳.

انحراف معیار نسبت مقدار	میانگین مقادیر نسبت مقدار	ضریب تعیین ( $R^2$ )	جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)
$\frac{Q_{up}}{Q_{in}}$ محاسباتی نرم‌افزار	$\frac{Q_{up}}{Q_{in}}$ محاسباتی نرم‌افزار		
به محاسباتی رابطه ۱۳	به محاسباتی رابطه ۱۳		
۰/۰۶۱۲	۱/۰۱۱	۰/۹۹۲	۰/۰۹۹۴

مقادیر نزدیک به صفر RMSE و انحراف معیار نسبت مقدار  $\frac{Q_{up}}{Q_{in}}$  و مقادیر نزدیک به یک ضریب تعیین و میانگین مقادیر نسبت  $\frac{Q_{up}}{Q_{in}}$  نشان‌دهنده دقت مناسب رابطه ۱۳ است. در شکل ۱۲ نیز تغییرات مقادیر محاسبه شده نسبت  $\frac{Q_{up}}{Q_{in}}$  از رابطه ۱۳ بر حسب مقادیر مشاهداتی با خطای ۱۰ درصد نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که رابطه از دقت بالایی برخوردار است.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات نسبت دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی.

### نتیجه‌گیری

الف) مدل عددی *Flow3D* مدلی مناسب برای تخمین پروفیل سطح آب در جریان عبوری از سازه ترکیبی سرریز- دریاچه است.

ب) نتایج شبیه‌سازی هیدرولیک جریان ترکیبی هم‌زمان از روی سرریز و زیر دریاچه نشان می‌دهد که مدل‌های تلاطمی *RNG k-ε* و *k-ε* از دقت بالایی در شبیه‌سازی پارامترهای آشفتگی برخوردارند.

ج) با انتگرال‌گیری پروفیل سرعت بالای سرریز و زیر دریاچه می‌توان نسبت دبی عبوری از بالا به پایین سازه ترکیبی را محاسبه نمود.

د) با افزایش پارامترهای بی‌بعد  $\frac{H_1}{W}$  و  $\frac{H_d}{T}$ ، نسبت دبی‌های عبوری از روی سرریز به زیردریاچه

( $\frac{Q_{up}}{Q_{in}}$ ) افزایش و با افزایش پارامتر بی‌بعد  $Fr$ ، نسبت دبی‌ها کاهش می‌یابد.



## منابع

1. Ahmed, F.H. 1985. Characteristics of discharge of the combined flow through sluice gate and over weirs. *J. Engin. Technol.* 3: 2. 49-63.
2. Amiraslani, S.H. 2008. Numerical investigation of free falling jet's effect on the scour of plunge pool. XVIII International conference on water resources.
3. Brethour, J., and Burnham, J. 2010. Modeling sediment erosion and deposition with the Flow3D sedimentation & scour model. *Flow science report.* 3: 14.
4. Dehghani, A.A., and Bashiri, H. 2009. Experimental investigation of scouring in downstream of combined flow over weirs and below gates. 33<sup>rd</sup> Iahr conference. Canada. Pp: 3604-3609.
5. Dehghani, A.A., and Bashiri, H. 2010. Characteristics of scouring in downstream of combined flow over weirs and below gates. 4<sup>th</sup> National conference of erosion and sedimentation.
6. Esmaeili, K., and Fathi Moghadam, M. 2006. Discharge coefficient of weirs - gates combined structures. National conference on Irrigation and Drainage Networks of Shahid Chamran University.
7. González, A.E., and Bombardelli, F.A. 2005. Two phase flow theoretical and numerical models for hydraulic jumps including air entrainment. Proc. XXXI IAHR congress. Seoul. Korea.
8. Heidarpour, M., and Razavian, H. 2007. Experimental investigation of combined flow over sharp crested weirs and through gates. 9<sup>th</sup> National conference on Irrigation and Evapotranspiration.
9. Hoseyni, S.A., and Abdipour, A. 2010. Modeling of velocity profile of continues turbidity currents and effect study of discharge and concentration on it. *J. Civil Engin. Islamic Azad University.* 3: 3. 60-68.
10. Kaheh, M., Kashefipour, M.A., and Dehghani, A.A. 2010. Comparison of k- $\epsilon$  and RNG k- $\epsilon$  turbulent models for estimation of velocity profiles along the hydraulic jump on corrugated beds. 6<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Hydraulics, Athens, Greece.
11. Majcherek, H. 1985. Submerged Weirs. *J. Hydr. Engin. Proc. ASCE.* 111: 1. 163-168.
12. Muste, M., and Ettema, R. 2004. Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flatbed channel. *J. Hydr. Engin.* 130: 635-646.
13. Negm, M.A.A., Al-Brahim, A.M., and Alhamid, B. 2002. Combined free flow over weir and below gates. *J. Hydr. Res.* 40: 359-365.
14. Negm, A.M., El-Saiad, A.A., Alhamid, A.A., and Husian, D. 1994. Characteristics of simultaneous flow over weir and below inverted V-Notches. *Civil Engineering Research Magazine (CERM).* Civil Engineering Department. Faculty of Engineering. Al-Azhar University. Cairo. Egypt. 16: 9. 786-799.
15. Negm, A.M. 1997. Characteristics of combined flow over weirs and below gates. *Sudan Engin. Soc. J.* January. 43: 34.

16. Sabbagh Yazdi, S.R., Rostami, F., and Mastorakis, N.A. 2007. Turbulent modeling effects on finite volume solution of three dimensional aerated hydraulic jumps using volume of fluid. Proceedings of the 12<sup>th</sup> WSEAS International conference on applied Mathematics.
17. Samani J., and Mazaheri M. 2007. Combined flow over weir and under Gate. 7<sup>th</sup> congress of Hydraulic in Iran. (In Persian)
18. Shahrokhy, M. 2008. Comparison of turbulence models on turbulent flow. 4<sup>th</sup> congress of Civil Engineering. Tehran University.
19. Shamloo, H., and Jafari, P. 2008. Numerical investigation of effect of bottom roughness on flow around the piers by Flow3D. 4<sup>th</sup> congress of Civil Engineering. Tehran University.
20. Shesha Prakash, M.N., and Shivapur. A.V. 2004. Generalized head discharge equation for flow over sharp-crested inclined inverted V-Notch weir. J. Irrig. Drain. Engin. ©ASCE. 130: 4.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(1), 2015*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Simulation of Flow hydraulic in combined weir - gate structure by *Flow3D***

**M. Kaheh<sup>1</sup>, \*A.A. Dehghani<sup>2</sup>, M. Kaheh<sup>3</sup> and A.R. Zahiri<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Water Structure, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, <sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, <sup>3</sup>Ph.D., Dept. of Water Structure, Shahid Chamran University of Ahwaz, <sup>4</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Received: 08/24/2013; Accepted: 07/26/2014

### **Abstract**

In Combined weir - gate structures, interaction of flow over weir and through gate brings up intense mixing and change bed shear stresses distribution. Hence, simulation of flow pattern in downstream of these structures is very complex. The main objective of this study is numerical modeling of combined flow over weirs and through gates by *Flow3D* software. *Flow3D* is a high accurate model in computational fluid dynamics for simulation of problem with complex geometry on wide limits of fluid flows in open channel hydraulic. By applying *VOF* method and *RNG K-ε* turbulent models, a series of simulation of combined flow in weir - gate structure on rigid bed were performed and results were compared by some experimental data. The results show that *Flow3D* with *RNG K-ε* turbulent model is appropriate to simulate combined flow in weir - gate structure and estimate free surface profile and discharge ratio passed over weir to under the gate. An equation is also presented for estimation of discharge over the weir to discharge below the gate based on computed velocity profile with accuracy of  $R^2=0.992$  and  $RMSE=0.099$ .

**Keywords:** Combined flow, Weir - gate, Numerical modeling, *Flow3D*

---

\* Corresponding Author; Email: [a.dehghani@gau.ac.ir](mailto:a.dehghani@gau.ac.ir)

