

بررسی عددی الگوی جریان روی سرریزهای منحنی پیوند آزاد (مطالعه‌ی نمونه‌ای - سد مخزنی نمرود)

محمد حسین پورمحمدی^۱، زهرا شجاعیان^{۲*}

چکیده

سرریزها سازه‌هایی هستند که برای تخلیه سیلاب از مخزن سد در مواقع اضطراری استفاده می‌شوند. یکی از رایج‌ترین و در عین حال ساده‌ترین این سازه‌ها، سرریز منحنی پیوند است. در این تحقیق میدان جریان سه بعدی روی سرریز به کمک نرم افزار Flow-3D با استفاده از دو نوع مدل آشفتگی $k - \epsilon$ و RNG شبیه‌سازی شد. ابتدا برای پیش‌بینی دقیق خصوصیات آبی جریان روی سرریز، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده نهر پایه‌دار آزمایشگاهی، دو مدل آشفتگی $k - \epsilon$ و RNG صحت سنجی شدند. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده نتایج حاصل از صحت‌سنجی نرم افزار نشان دادند که مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل $k - \epsilon$ نتایج بهتری را نشان می‌دهند. سپس از این مدل برای شبیه‌سازی نمونه‌ی آزمایشگاهی سد مخزنی نمرود استفاده شد مقدارهای محاسباتی شامل اندازه‌گیری‌های فشار و نیمرخ سطح آب هستند که با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شدند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های تجربی انطباق خوبی را داشتند.

واژه های کلیدی: الگوی جریان، سد مخزنی نمرود، سرریز، Flow-3D، مدل آشفتگی.

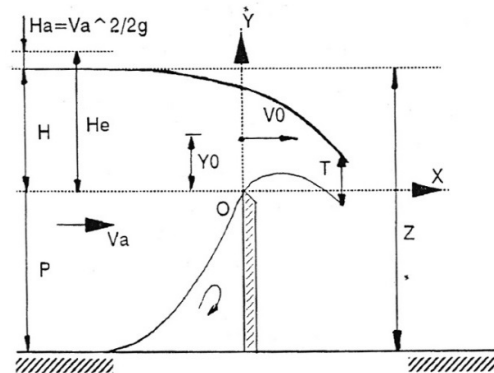
^۱ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

^۲ دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، سازمان آب و برق خوزستان.

Email: z.shojaein64@gmail.com

مقدمه

سدها سازه‌هایی هستند که در مسیر رود ساخته شده و باعث تشکیل مخزن و بالا آمدن سطح آب در بالادست می‌شوند. یکی از سازه‌های مهم سدها، که پایداری سد و مناطق پایین‌دست را در زمان وقوع سیلاب تضمین می‌کند، سرریزها هستند. سرریز عبارت است از سازه‌ای که آب اضافی را، خصوصاً در زمان سیل که جریان آب به بدنه سد و تأسیسات وابسته صدمه می‌زند و ممکن است باعث خرابی آن‌ها شود، دفع می‌کند. معمولی‌ترین و شاید در عین حال ارزان‌ترین سرریز، که بتواند مقدار زیادی از آب را از روی خود عبور دهد، سرریز از نوع منحنی پیوند^۱ است (شکل ۱).



شکل ۱- مطالعه‌ی مسیر حرکت جریان از روی سرریز لبه نازک.

در طراحی این سرریزها، تشکیل جریان‌های سه بعدی و دشواری حل معادلات حاکم بر آن، از نمونه‌ی آزمایشگاهی تحت مقیاس مشخصی نسبت به نمونه‌ی اصلی^۲ استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر به دلیل ابداع روش‌های پیشرفته و دقیق، حل عددی معادلات و به وجود آمدن رایانه‌های قوی برای انجام محاسبات، می‌توان در طراحی این سازه‌های پیچیده از روش‌های حل عددی نیز بهره جست. توسعه اولیه علم دینامیک سیالات محاسباتی^۳ در دهه ۶۰ و ۷۰ براساس نیازی بود که در صنعت هوا-فضا احساس می‌شد. اما امروزه CFD هر جا که

جریان سیال اهمیت پیدا کند، جای خود را باز کرده و به کمک مهندسیین و طراحان آمده است (مهرابیان ۱۳۸۶).

تا کنون تحقیقات وسیعی درباره انواع سرریزها به صورت آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی انجام شده‌است. وانگ و لیو (۲۰۰۰) چهار روش از احجام محدود را روی شبکه‌های مثلثی بی‌ساختار بررسی نموده و مسائلی را چون حل دو بعدی آب‌های کم عمق، شکست سد به صورت دو بعدی، پرش آبی مایل، با این چهار روش، حل گردیده و نتیجه‌های حل‌های عددی، سرعت محاسبات و پایداری روش‌های حل، با یکدیگر مقایسه شدند. یو و همکاران (۲۰۰۰) به مطالعه ویژگی‌های میدان جریان در اطراف سد سویانگ، به صورت عددی پرداختند. در این شبیه‌سازی از نرم افزار Flow-3D، برای حل عددی معادله‌های ناویر-استوکس در محیط محاسباتی استفاده شد. ساویج و همکاران (۲۰۰۱) جریان بر روی سرریز منحنی پیوند معیار را با استفاده از مدل عددی و فیزیکی شبیه‌سازی کرده و مقایسه نمودند. مدل‌های فیزیکی برای ده شرط مختلف جریان اجرا شده و فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار در نقاط مختلف سرریز نصب گردید. در کنار نتایج آزمایشگاهی از معیارهای دفتر عمران اراضی آمریکا^۴ و مهندسیین مشاور ارتش آمریکا^۵ استفاده شد. شبیه‌سازی عددی جریان با استفاده از مدل Flow-3D، با کاربرد حجم محدود انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی عددی با نمونه‌ی آزمایشگاهی، معیار دفتر عمران اراضی آمریکا و مهندسیین شبکه‌ها و ارتش آمریکا مقایسه شد و همخوانی خوبی را باهم نشان داد. ساویج و جانسون (۲۰۰۱)، هو و همکاران (۲۰۰۴) جریان را روی سرریز منحنی پیوند با استفاده از این نرم افزار شبیه‌سازی کردند. در ادامه سودرز و هیرت (۲۰۰۴) و گونزالس و بومباردلی (۲۰۰۵) جریان آب و هوا را روی سرریزهای منحنی پیوند با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ ، RNG و گردابه‌های بزرگ (LES) شبیه سازی کردند در این آزمایش توزیع غلظت هوا، سرعت متوسط جریان آب - هوا و بسامد حباب‌های هوا اندازه-گیری شدند. کیم و پارک (۲۰۰۵) رفتار جریان را روی سرریز منحنی پیوند با در نظر گرفتن مقیاس و تأثیر زبری

⁴ U.S.Bureau of Reclamation

⁵ U.S. Army Corps of Engineers

¹ ogee

² prototype

³ computational fluid dynamic (CFD)

موجود در زمینه پویائی سیالات محاسباتی، دارای دامنه وسیعی از کاربردها و قابلیت هاست.

معادلات حاکم بر جریان سه بعدی نرم افزار Flow-3D

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله پیوستگی، معادله اندازه حرکت و معادله نیمرخ سطح آزاد می باشد.

الف) معادله بقای جرم یا معادله پیوستگی

معادله پیوستگی جریان به شکل زیر نوشته می شود:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w A_x) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{dif} + R_{sor} \quad (1)$$

که در آن V_f مقدار نسبت حجم باز به جریان، ρ چگالی سیال، (u, v, w) به ترتیب مقادیر سرعت در راستای (x, y, z) ، (A_x, A_y, A_z) به ترتیب مقادیر نسبت مساحت در راستای (x, y, z) ، R و ξ مربوط به سامانه انتخابی، تابع پراکندگی و R_{sor} تابع چشمه است. در سیستم مختصات کارتزین (مستطیلی) مقادیر $R=1$ و $\xi=0$ می شوند. R_{sor} نیز مربوط به محیط های متخلخل و ورود سیال ثانویه به محیط محاسبه ها با مقادیر و زمان های تعیین شده، و یا به عبارتی مسائل با دو نوع سیال، می باشد. تابع پراکندگی R_{dif} نیز به صورت زیر تعریف می گردد:

$$R_{dif} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_p A_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_p A_y R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_p A_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \xi \frac{p v_p A_x}{x} \quad (2)$$

در این تابع v_p ضریب ثابت که همان لزجت جنبشی است و برابر با $v_p = \frac{C_p \mu}{\rho}$ که μ ضریب پراکندگی اندازه حرکت یا به عبارتی لزجت و C_p ضریب مربوط به سیالات با چگالی غیر یکنواخت است. به دلیل غیر قابل تراکم بودن سیال، مقدار ρ ثابت و یکنواخت بوده و نیز با توجه به استفاده از مختصات کارتزین و غیر متخلخل بودن مسئله، معادله پیوستگی به صورت ذیل کاهش می یابد:

روی سرریز با استفاده از مدل عددی Flow-3D شبیه سازی کردند هم چنین مغربی و همکاران (۲۰۱۲) و اندرسون و همکاران (۲۰۱۳) و جریان روی سرریز تاج پهن دوزنقه ای را شبیه سازی کردند. شجاعیان و کاشفی پور (۱۳۹۲) پرش آبی در حوضچه آرامش سد نمرود را با استفاده از مدل عددی Flow-3D شبیه سازی نمودند. در تحقیق حاضر جریان آب در سرریز منحنی پیوند سد (مطالعه نمونه ای سرریز منحنی پیوند سد مخزنی نمرود)، به صورت عددی با استفاده از مدل Flow-3D شبیه سازی گردید و نتایج عددی با نتایج نمونه ای آزمایشگاهی مقایسه شد.

هدف از این تحقیق بررسی این نکته است که آیا مدل عددی می تواند شرایط جریان را در سرریز منحنی پیوند با دقت مناسبی شبیه سازی نماید یا خیر؟ چرا که در این صورت به جای صرف هزینه ی زیاد برای نمونه ای آزمایشگاهی می توان از این مدل با هزینه ی کمتر و سریعتر جریان را شبیه سازی نمود. جهت آنالیز جریان بر روی سرریز مخزنی سد نمرود با استفاده از برنامه Flow-3D باید به موارد زیر توجه کرد:

معرفی مدل عددی Flow-3D

نرم افزار FLOW-3D یک مدل مناسب برای حل مسایل پیچیده پویائی سیالات بوده و قادر است دامنه ی وسیعی را از جریان سیالات شبیه سازی 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 ناویراستوکس هستند و از پنج مدل آشفتگی طول اختلاط پراتنل^۱، یک معادله ای^۲، دو معادله ای $k - \epsilon$ ، مدل های $k - \epsilon$ و RNC ^۳ و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ^۵ در حل خصوصیات جریان های آشفته استفاده می کند. این مدل شامل الگوهای فیزیکی بسیاری از جمله آب های کم عمق، لزجت، حفره سازی، آشفتگی و محیط های متخلخل می باشد. مدل FLOW-3D در مقایسه با سایر مدل های

⁴ renormalized group model

⁵ larg eddy simulation model

¹ prandtl mixing lengt

² turbulent one equation

³ two equation k-ε model

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + g_z$$

ج) معادله نیمرخ سطح آزاد:

نیمرخ سطح آزاد با استفاده از تابع حجم سیال (VO) ، یعنی $F(x, y, z)$ تخمین زده می‌شود. این تابع مقدار حجم سیال را در سلول محاسباتی نشان می‌دهد و به وسیله‌ی معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[\frac{\partial}{\partial x}(FAu) + \frac{\partial}{\partial y}(FAv) + \frac{\partial}{\partial z}(FAw) \right] = 0 \quad (11)$$

که در آن A مباحث کاربرد نسبت مساحت جریان در جهات (x, y, z) ، u ، v و w متوسط سرعت در جهات (z, y, x) ، F تابع نسبت سیال که مقادیری بین $[0, 1]$ دارد. اگر $F=1$ باشد، نشان دهنده‌ی اشغال کامل فضای سلول شبکه بندی به وسیله‌ی سیال و اگر $F=0$ باشد بیانگر نبودن سیال است.

مواد و روش‌ها

معرفی سد مخزنی نمرود

سد مخزنی نمرود بر روی رود نمرود واقع شده است. این رود دارای حوضه‌ی آبریز حدود ۵۶۱ کیلومتر مربع بوده و در جنوب جاده تهران فیروزکوه و در نزدیکی روستای خمده تغییر جهت داده و به سوی جنوب باختری می‌رود. این رود به رود فیروزکوه پیوسته و به اسم حبله رود به سوی گرمسار حرکت کرده و دشت گرمسار را آبیاری می‌کند. شهر فیروزکوه در ۱۸ کیلومتری محل طرح نزدیکترین شهر به محل سد است.

جمع آوری اطلاعات پایه

یکی از مهم‌ترین مراحل انجام طرح‌های تحقیقاتی، جمع آوری آمار و اطلاعات اولیه است. در حقیقت تمام طرح‌های مهم در صنعت آب که با هزینه‌ی بسیار سنگینی احداث می‌گردند، پیش از اجرا و در مرحله‌ی مطالعات مقدماتی، نیاز به اطلاعات جامع و کامل از محیط و منابع موجود دارند. جمع‌آوری این اطلاعات، معمولاً تحت عنوان یک پروژه‌ی جداگانه مطالعات اولیه صحرائی و هواشناسی صورت می‌گیرد و اطلاعات از محیط و محل احداث سد و

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (3)$$

یا به صورت کلی‌تر رابطه‌ی ۳ بدین صورت می‌شود:

$$\nabla(V.A) = 0 \quad (4)$$

ب) معادلات اندازه حرکت:

معادلات اندازه حرکت یا حرکت از حل معادلات ناویر-استوکس حاصل می‌شوند. معادلات ناویر-استوکس با توجه به روش‌های استفاده شده در نرم افزار بدین صورت هستند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y V^2}{x V_f} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + g_x + f_x - b_x - \frac{R_{sor}}{\rho V_f} (u - u_w - \delta u_s) \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y uv}{x V_f} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) + g_y + f_y - b_y - \frac{R_{sor}}{\rho V_f} (v - v_w - \delta v_s) \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + g_z + f_z - b_z - \frac{R_{sor}}{\rho V_f} (w - w_w - \delta w_s) \quad (7)$$

که در این روابط (g_x, g_y, g_z) شتاب گرانش در جهات (x, y, z) ، (f_x, f_y, f_z) شتاب لزوجتی سیال، (b_x, b_y, b_z) مقدار کاهش جریان مربوط به محیط‌های متخلخل، (u_w, v_w, w_w) سرعت حرکت مرزهای جامد و مربوط به مسائل با مرزهای جامد متحرک، (u_s, v_s, w_s) مؤلفه‌های سرعت سیال در سطح چشمه و مربوط به مسائل با بده متغیر، δ نیز ضریب بیان کننده سرعت اولیه جریان می‌باشند. با توجه به غیر قابل تراکم بودن سیال و نیز غیرمتخلخل بودن مسئله، ثابت بودن مرزهای جامد و انتخاب راستای z به عنوان راستای گرانش که در نتیجه تنها شتاب گرانش وارد بر جریان g_z خواهد شد، و استفاده از مختصات کارتزین، معادلات ناویر-استوکس به صورت ذیل کاهش می‌یابند:

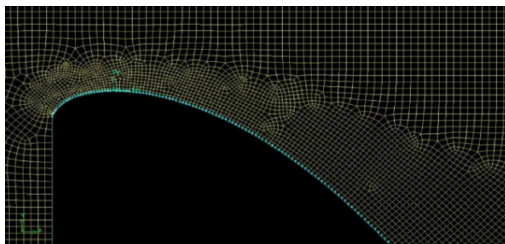
(۸)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (9)$$

نمونه از نرم افزار Gambit استفاده شد. از آنجا که از یک شبکه مکعب مستطیلی استفاده گردیده و ریز کردن سلول-ها در یک جهت باعث بروز خطا در انجام محاسبات می-شود، لذا ابعاد سلولها در تمامی ابعاد به طور یکسان و برابر $0.03/0.03$ متر در نظر گرفته شدند.

شبکه بندی سرریز منحنی پیوند سد مخزنی نمرود

در شبکه بندی نمونه ی سرریز سد مخزنی نمرود از نوع شبکه های چند بخشی استفاده شده است. روش چند بخشی یکی از روش های زیربنایی در حل مسائل عددی می باشد و به طور گسترده برای حل میدان های جریان که دارای پیچیدگی هندسی هستند، به کار می رود. در این روش میدان جریان به چند ناحیه یا بخش تقسیم می شود و در هر یک شبکه جداگانه ای تولید می گردد. به این ترتیب علاوه بر تسهیل در ایجاد شبکه های محاسباتی مناسب، امکان پردازش موازی محاسبات فراهم می گردد و مشکل کمبود حافظه رایانه و یا پیچیدگی هندسی میدان جریان به شکل قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. این شبکه بندی که پس از اطمینان از صحت نتایج و آزمون استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی صورت گرفت در شکل ۳ نشان داده شده است که در نهایت دارای 54322 گره است.



شکل ۳- شبکه بندی صورت گرفته برای سرریز با کاربرد نرم افزار Gambit.

شبیه سازی سرریز سد مخزنی نمرود با استفاده از نرم

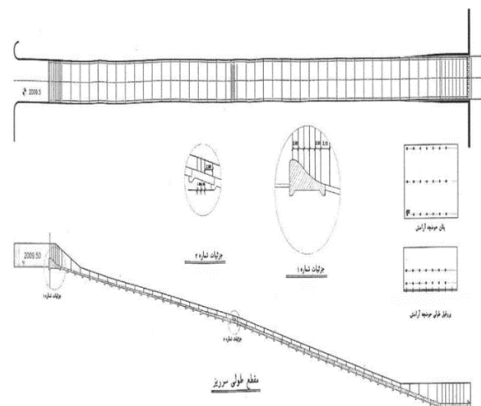
افزار Gambit

نرم افزار Gambit وابسته به شرکت نرم افزاری Ansys Inc از گروه نرم افزارهای رشته ی مهندسی مکانیک است. به طور خلاصه می توان گفت که با استفاده از Gambit، طراحی و شبکه بندی یک شبکه ی تحلیل انجام می گیرد و آنگاه در نرم افزار Flow3D تحلیل ها بر روی پرونده ای که از نرم افزار Gambit حاصل شده است، صورت می پذیرد. در واقع پرونده خروجی از Gambit ورودی نرم افزار Flow-3D خواهد بود. برای شروع کار بایستی سرریز

برخی اطلاعات از ایستگاه های هواشناسی و اندازه گیری موجود، به دست می آیند. بنابراین، برای تهیه مدل های آبی، اطلاعات مربوط به پستی و بلندی، زمین شناسی و هیدرولوژی و نقشه های تصویر افقی و نیمرخ پیش الگو که از اهمیت ویژه ای برخوردارند، تهیه شده و در صورت نیاز، نقشه های با جزئیات بیشتر نیز تهیه می گردد. سپس کلیه اطلاعات و جزئیات با توجه به شرایط منطقه ای با دقت مورد بررسی قرار می گیرد.

معرفی نمونه ی آزمایشگاهی سد مخزنی نمرود

اطلاعات مورد نیاز بیان شده جهت ساخت نمونه ی سرریز سد نمرود، از مطالعات مرحله ی اول سد مخزنی نمرود که به وسیله ی شرکت مهندسی مشاور لار انجام گرفته، تهیه شده است (کمایی رستمی، ۱۳۸۸). این اطلاعات عبارتند از محل و موقعیت ساخت سد، موقعیت سرریز نسبت به محور سد شکل، اطلاعات آب شناسی شامل ظرفیت عبوردهی رودخانه، حداکثر بده های 10000 ساله و PMF تراز سطح آب در مخزن در هر کدام از سیلاب های ذکر شده و نقشه های تصویر افقی و نیمرخ و جزئیات سرریز و حوضچه ی آرامش سد نمرود. نقشه های تصویر افقی و نیمرخ طولی از مقاطع سرریز و حوضچه آرامش سد مخزنی نمرود، به وسیله ی شرکت مهندسی مشاور لار در مقیاس $1:40$ تهیه و ترسیم گردیده است. تصویر افقی و مقطع طولی سرریز در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- تصویر افقی و مقطع طولی سرریز.

شرایط لازم برای شبیه سازی با کاربرد مدل-Flow 3D

برای شبیه سازی سه بعدی سرریز سد مخزنی نمرود از یک شبکه سه بعدی استفاده شد. برای ساخت هندسه ی

انتخاب شیوه محاسباتی و فرمول‌بندی حل مدل سرریز

منحنی پیوند سد گرمسار در برنامه‌ی Flow3D

در شبکه‌بندی تاج سرریز منحنی پیوند تعدادی از بخش‌های شبکه پر و تعدادی از المان‌ها خالی از سیال مورد نظر (آب) هستند و تعداد دیگری از بخش‌ها نیز حالت نیمه پر دارند. لذا بخش‌ها به صورت دو حالتی یعنی ترکیبی از آب و هوا می‌باشند. در جریان‌های دو حالتی می‌توان از مدل VOF استفاده کرد. در این مدل تقابل بین حالتها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و مجموعه‌ای از معادلات اندازه حرکت سیال‌ها و جزء حجمی هر یک از حالتها محاسبه می‌شود. در شبیه‌سازی سرریز منحنی پیوند سد انحرافی گرمسار از مدل VOF استفاده شده است (کیم و پارک، ۲۰۰۵). در مورد انتخاب فرمول بندی VOF برای سرریز منحنی پیوند سد مخزنی نمرود از روش جریان ناپایا به همراه میان یابی ضمنی استفاده شده‌است. در این حالت حل پایای نهایی به شرایط اولیه جریان وابسته بود و نوع روش محاسباتی Explicit می‌باشد. زمانی که محاسبات ناپای VOF در نرم افزار Flow-3D انجام می‌شود، گام‌های زمانی که برای محاسبات کسر حجمی به کار می‌رود، همان گام زمانی که برای معادلات انتقال استفاده می‌شود، نیست. در این حالت نرم افزار Flow-3D به طور خودکار گام زمانی را براساس عدد کورانت در نزدیکی سطح آزاد، ریز می‌کند.

صحت سنجی نرم افزار Flow 3D برای شبیه سازی

جریان بر روی سرریز

اولین گام در یک شبیه‌سازی عددی، واسنجی کردن نمونه است. برای این منظور از مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های گزارش شده در یک مرجع معتبر استفاده شده‌است (سیواکوماران و همکاران، ۱۹۸۳). در این شبیه‌سازی دو مقدار بده واحد عرض برابر با ۳۵۹/۹ و ۱۱۱۷/۹ سانتی‌متر مربع بر ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. شکل‌های ۵ و ۶ جریان شبیه‌سازی شده مربوط به مدل‌های آشفتگی $k - \epsilon$ و RNG معیار در مدل حاضر، با نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی برای دو بده واحد عرض ۳۵۹/۹ و ۱۱۱۷/۹ سانتی‌متر مربع بر ثانیه مقایسه شدند. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، جریان شبیه‌سازی

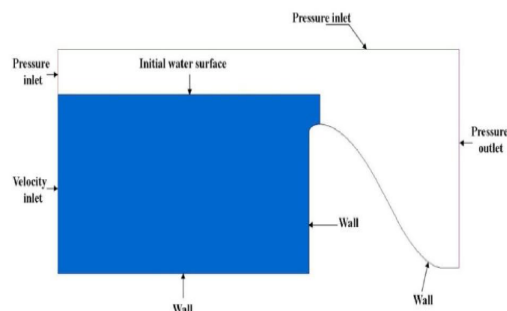
شبیه‌سازی گردد. سامانه فیزیکی طرح (سرریز منحنی پیوند سد نمرود) با استفاده از نقشه‌های موجود و معادله‌ی سرریز با کاربرد نرم‌افزار Gambit در دو یا سه بعد شبیه‌سازی می‌گردد. نتایج مورد نیاز از شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز منحنی پیوند سد مخزنی نمرود نحوه‌ی رفتار جریان بر روی سرریز منحنی پیوند این سد و دقت مورد نیاز در مدل کردن با خطای ۰/۰۱ می‌باشد. جریان بر روی سرریز از نوع مغشوش و ناپایا و جریان آب تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است. مختصات دقیق تاج سرریز در جدول ارائه شده‌است. نوک تاج سرریز نقطه (۰ و ۰) می‌باشد.

جدول ۱- مختصات تاج و بدنه‌ی سرریز سد نمرود.

X	۰	۲	۲/۸	۴	۵/۳
Y	۰	-۰/۴۴۳	-۰/۸۲۶	-۱/۵۹۸	-۲/۶۹
X	۸	۹/۳	۱۰/۳	۱۰/۴۲	۱۵/۹۵
Y	-۵/۷۶	-۷/۶۱	-۹/۱۹	-۹/۴	-۱۸/۶۲

تعیین شرایط مرزی برای شبکه‌بندی نمونه‌ی سرریز منحنی پیوند سد مخزنی نمرود

پس از شبکه‌بندی مناسب سرریز منحنی پیوند بایستی شرایط مرزی را برای فیزیک مسئله به دقت تعیین کرد. با توجه به مقالات ارائه شده، شرط مرزی بالادست تاج سرریز از نوع فشار ورودی^۱ و شرط مرزی پایین دست تاج سرریز از نوع فشار خروجی^۲ در نظر گرفته شده‌است برای بدنه و تاج سرریز شرط مرزی دیوار^۳ و برای بالا تاج سرریز شرط مرزی فشار خروجی در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ شرایط مرزی به کار برده شده برای نمونه نشان داده شده‌است.

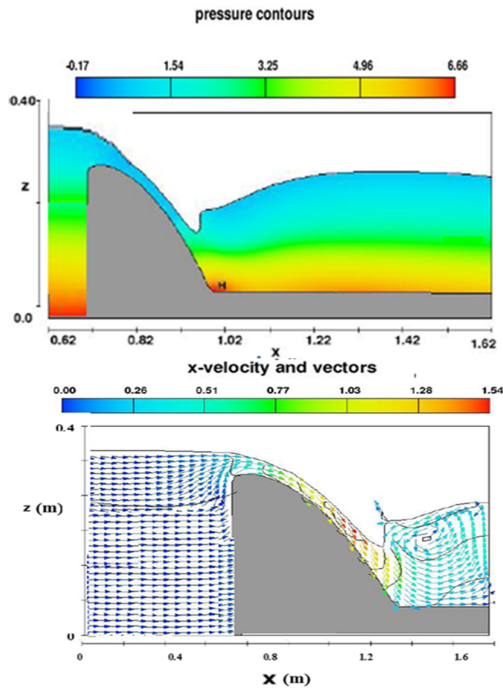


شکل ۴- شرایط مرزی به کار برده شده برای نمونه.

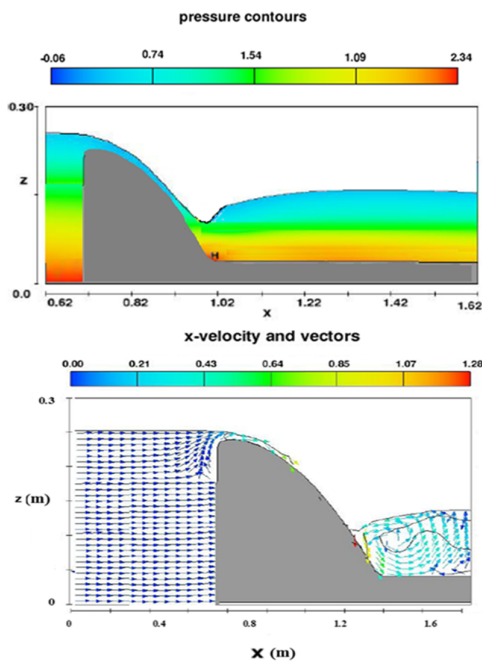
³ wall

¹ pressure inlet

² pressure outlet



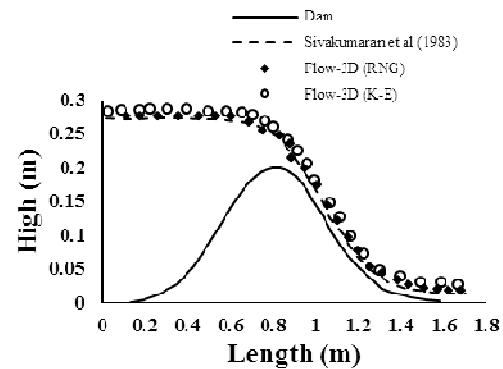
شکل ۷- مقدار محاسبه شده ی فشار (KPa) و سرعت افقی (m/s) به وسیله ی نرم افزار با مدل RNG در $q=119.7(cm^2/s)$.



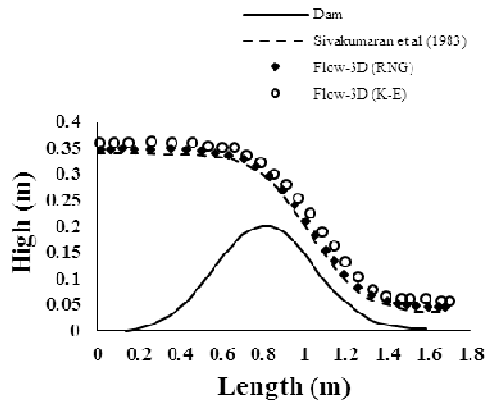
شکل ۸- مقدار محاسبه شده ی فشار (KPa) و سرعت افقی (m/s) به وسیله ی نرم افزار با مدل RNG در $q=359.9(cm^2/s)$.

شده به خوبی از شیب بستر پیروی کرده و تطبیق خوب نتایج مدل عددی با اندازه گیری های انجام شده بر روی نمونه ی آزمایشگاهی از توان مدل در شبیه سازی ترکیب جریان های زیر بحرانی و فوق بحرانی را به نمایش می گذارد. همچنین مقدارهای پیش بینی شده برای نیمرخ طولی جریان با کاربرد مدل آشفتگی RNG نسبت به مدل آشفتگی $k-\epsilon$ تطابق بهتری نسبت به داده های آزمایشگاهی دارد. از این رو جهت شبیه سازی سرریز از مدل آشفتگی RNG استفاده می گردد.

در شکل های ۷ و ۸ مقدار سرعت افقی و فشار برای مدل RNG نشان داده شده اند. همان گونه که انتظار می رود، به علت انحنای شدید خط جریان در ناحیه پرش، توزیع فشار به صورت غیر هیدرواستاتیک است که این مطلب در شکل ها به خوبی مشخص است.



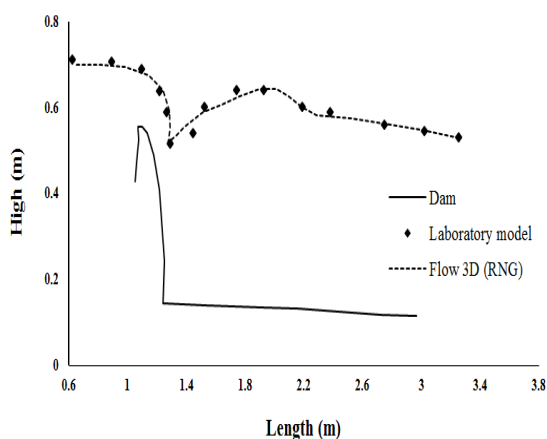
شکل ۵- مقایسه ی نتایج تراز سطح آب محاسبه شده با اندازه گیری های آزمایشگاهی برای بده واحد عرض $۳۵۹/۹$ سانتی متر مربع بر ثانیه.



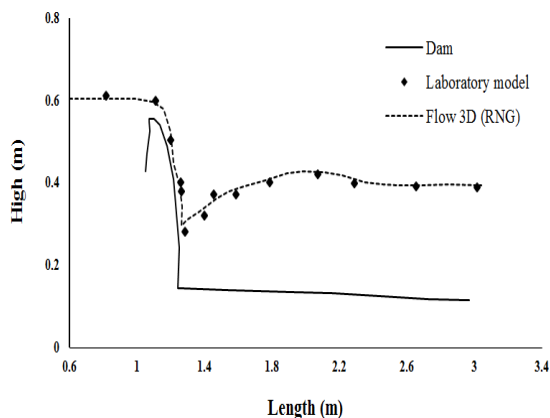
شکل ۶- مقایسه ی نتایج تراز سطح آب محاسبه شده با اندازه گیری های آزمایشگاهی برای بده واحد عرض $۱۱۱۷/۹$ سانتی متر مربع بر ثانیه.

بررسی تغییرات نیمرخ طولی جریان بر روی سرریز

در بررسی نیمرخ طولی جریان روند تغییرات عمق برای دو بده ۱۰۰/۵۵ و ۴۷/۷ لیتر در ثانیه اندازه‌گیری گردید. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ روند تغییرات نیمرخ طولی جریان را در نمونه‌ی آزمایشگاهی و نرم افزار برای سیلاب-های ۱۰۰۰۰ ساله و PMF نشان می‌دهند. همان‌طور که از روی نمودارها مشخص است، نرم افزار نتایج خوبی را در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها در نمونه‌ی آزمایشگاهی، پیش‌بینی کرده‌است. به‌خصوص، تراز سطح آب روی سرریز تطابق خوبی را با مقادیر آزمایشگاهی دارد. در منطقه‌ی جریان در پایین سرریز، به علت تلاطم و آشفتگی زیاد جریان حاصل شده از پرش آبی، مقادیر محاسبه شده اندکی با مقادیر اندازه‌گیری شده تفاوت دارند ولی این اختلاف‌ها در انتهای پرش به علت کاهش تلاطم جریان، کاهش می‌یابند.



شکل ۱۰- بررسی تغییرات نیمرخ طولی جریان بر روی سرریز در بده ۱۰۰/۵۵ لیتر در ثانیه .



شکل ۱۱- بررسی تغییرات نیمرخ طولی جریان بر روی سرریز در بده ۴۷/۷ لیتر در ثانیه.

شبیه‌سازی ریاضی نمونه‌ی آزمایشگاهی سد نمرود

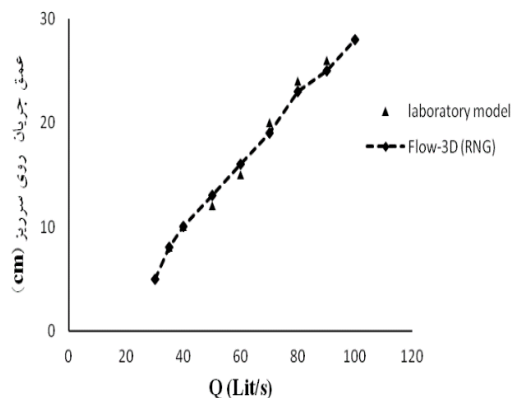
به منظور کاربرد نرم افزار از نتایج نمونه‌ی آزمایشگاهی سرریز سد مخزنی نمرود استفاده شد. این نمونه در آزمایشگاه نمونه‌های آبی مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو با استفاده از پلکسی گلاس ساخته و نصب گردید. سد مخزنی نمرود بر روی رودخانه نمرود واقع شده‌است. شرایط مرزی به کار برده شده جهت شبیه‌سازی نمونه در جدول شماره‌ی ۲ ارائه شده‌اند (کمائی رستمی، ۱۳۸۸).

جدول ۲- شرایط مرزی بالادست حوضچه‌ی آرامش.

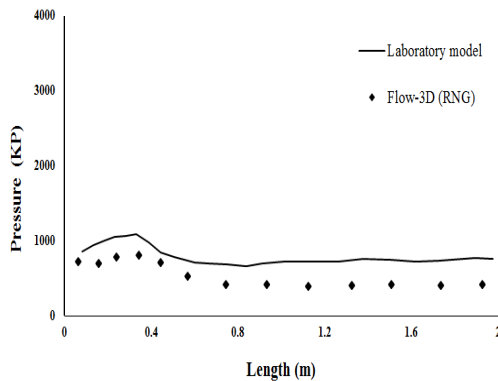
دوره‌ی بازگشت (سال)	آبگذری (m^3/s)	آبگذری معادل در نمونه با مقیاس ۱:۴۰ (lit/s)
۱۰۰۰۰	۴۸۲/۷	۴۷/۷
PMF	۱۰۱۷/۴۵	۱۰۰/۵۵

نتایج و بحث

با توجه به نتایجی که از شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز در بخش قبل حاصل گردیدند، در شبیه‌سازی جریان از مدل آشفتگی RNG استفاده شد. در شکل ۹ تغییرات عمق جریان نسبت به بده عبوری از روی سرریز در دو حالت استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم افزار Flow-3D مقایسه شده‌اند. همان‌طور که از نمودار مشخص است، تراز سطح آب بر روی سرریز تابعی از بده عبوری بوده و نرم افزار این تغییرات را به خوبی شبیه‌سازی کرده‌است.



شکل ۹- تغییرات عمق جریان نسبت به بده عبوری از روی سرریز.



شکل ۱۳- تغییرات فشار بر روی سرریز در بده ۴۷/۷ لیتر بر ثانیه .

مقایسه‌ی نتایج حاصله نشان می‌دهد که این نرم افزار در تعیین نیمرخ سطح آب در طول سرریز دارای دقت مناسبی است. بیش‌ترین خطاها در مدل عددی در برآورد فشار روی سرریز دیده شده است. مقدارهای محاسباتی شامل توزیع فشار و نیمرخ سطح آب هستند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیمرخ سطح آب در مقایسه با اندازه گیری- های تجربی دارای انطباق خوبی است. با توجه به اینکه نتایج مدل عددی دارای دقت مناسبی، است استفاده از این مدل‌ها به خصوص بر روی این چنین سازه‌هایی که دارای محدودیت‌های از نظر ساخت و مدل سازی آبی هستند، با در نظر گرفتن مسئله ورود هوا، پیشنهاد می‌شود به منظور تعیین میزان متوسط خطای نسبی بین مقادیر محاسبه شده با کاربرد نرم افزار و مقادیر نمونه‌ی آزمایشگاهی از روش‌های آماری که در زیر ارائه شده‌اند استفاده گردید:

۱- درصد خطا ($\%E$) که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\% E = \frac{\sum_{i=1}^N |C_{mi} - C_{pi}|}{\sum_{i=1}^N C_{mi}} \times 100 \quad [12]$$

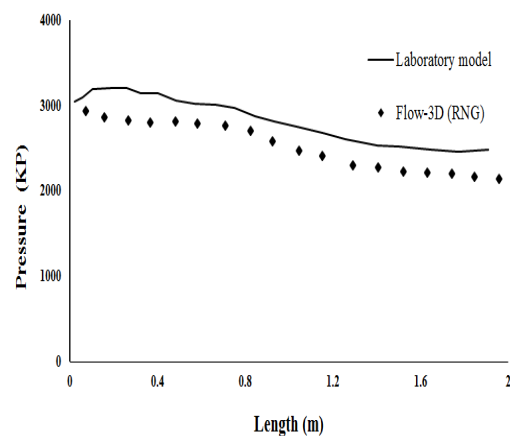
۲- متوسط مجذور مربعات خطا (RMSE) که به صورت زیر تعریف شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_{mi} - C_{pi})^2}{N}} \quad [13]$$

که در آنها، N = تعداد داده‌ها، C_m = مقادیر مشخصه هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و C_p = مقادیر

بررسی تغییرات فشار

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ روند تغییرات فشار روی سرریز، با کاربرد نرم افزار شبیه سازی و با مقادیر آزمایشگاهی نمونه مقایسه شد. همان‌طور که از شکل‌های زیر مشخص است، نرم افزار نتایج نسبتاً دقیقی را در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، پیش‌بینی نکرده- است. دلیل این مطلب این است که روش VOF در عمل به صورت تک حالت عمل می‌کند و از دو حالت فقط برای محاسبه سطح آزاد سیال بهره می‌برد. روش VOF هوا را فقط به سطح‌های سیال وارد می‌کند و در رساندن هوا به عمق سیال (آنچه اتفاق می‌افتد) دچار مشکل می‌شود. دلیل این مسئله این است که روش VOF قادر به شبیه سازی حباب‌های هوا ایجاد شده نبوده و با استفاده از تعادل بین نیروهای کشش سطحی آب و نیروی ناشی از آشفتگی، و نیز تغییرات چگالی ناشی از ورود هوا، برای تعیین سطح آزاد سیال بهره‌مند شود. ورود هوا به سیال به خصوص در جریان‌های متلاطم دیده می‌شود که کشیده شدن دامنه هواگیری سیال در عمق جریان تأثیر مستقیمی بر فشار داشته و مقادیر آن را کاهش می‌دهد. با توجه به نمودارهای توزیع فشار در شکل، ضعف روش VOF در شبیه‌سازی ورود هوا به جریان در توزیع فشار خودنمایی می‌کند و مقادیر فشار هیدرواستاتیک با خطای بیشتری نسبت به عمق جریان، برآورد می‌شود و روش قابلیت اعمال این شرایط را به خصوص در عمق سیال ندارد.



شکل ۱۴- تغییرات فشار بر روی سرریز در بده ۱۰۰/۵۵ لیتر بر ثانیه .

ساخت و مدل‌سازی آبی هستند، با در نظر گرفتن مسئله ورود هوا، پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب سپاسگزاری خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز به دلیل حمایت مالی از انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

منابع

- ۱) شجاعیان، ز. و کاشفی پور، س. م. ۱۳۹۲. شبیه سازی عددی پرش آبی در حوضچه آراشیکه سد مخزنی نمرود. مجله علمی-پژوهشی دانش آب و خاک دانشگاه تبریز، جلد ۲۳ شماره ۲ صفحه‌های ۲۸۳ تا ۲۹۵.
- ۲) کمائی رستمی، ع. ۱۳۸۸. بررسی تغییر شکل شوت بلوک و عمق آب پایین دست روی پرش آبی در حوضچه آراشیکه. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳) مهربان، م. ع. (ترجمه). ۱۳۸۶. پویایی سیالات محاسباتی، اصول و کاربردها. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- 4) Andersson, A. G., Andreasson, P. & Staffan Lundstrom, T. 2013. CFD-modelling and validation of free surface flow during spilling of reservoir in down-scale model. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 7(1): 159-167.
- 5) Gonzalez, A, and Bombardelli, F. 2005. Two-phase flow theory and numerical models for hydraulic jumps, including air entrainment. in Proc. XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea.
- 6) Ho, D., Boyes, K., Donohoo, S., & Cooper, B. 2004. Numerical flow analysis for spillways. Ancold Bulletin: 127-138.
- 7) Kim, D. G., & Park, J. H. 2005. Analysis of flow structure over ogee-spillway in consideration of scale and roughness effects by using CFD model. ASCE Journal of Civil Engineering. 9(2): 161-169.
- 8) Maghrebi, M., Alizadeh, S., & Lotfi, R. 2012. numerical simulation of flow over rectangular broad crested weir (Real case

مشخصه هیدرولیکی برآورد شده به وسیله‌ی مدل Flow-3d هستند.

نتایج آماری حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و محاسبه شده به وسیله‌ی نمونه برای مشخصات هیدرولیکی مورد نظر برای دبی ۱۰۰/۵۵ و ۴۷/۷ لیتر بر ثانیه بررسی و نتایج حاصل از آنها در جدول ۳ آمده اند.

جدول ۳- نتایج حاصل از تحلیل آماری نمونه برای مشخصات هیدرولیکی مورد نظر برای دبی ۱۰۰/۵۵ و ۴۷/۷ لیتر بر ثانیه

<i>RMSI</i>	<i>%E</i>	مشخصه‌ی هیدرولیکی
۰/۰۲۴	۴/۰۲	تغییرات نیمرخ طولی جریان بر روی سرریز
۰/۰۴۵	۶/۳۴	تغییرات فشار بر روی سرریز

با توجه به جدول مشاهده می‌گردد که مدل در برآورد تغییرات تراز سطح آب بر روی سرریز دارای خطای کمتری نسبت به تغییرات فشار بر روی سرریز است.

نتیجه گیری

در این تحقیق الگوی سه بعدی جریان بر روی سرریز منحنی پیوند با استفاده نرم افزار Flow-3D شبیه‌سازی شد. ابتدا برای صحت‌سنجی نرم‌افزار در پیش‌بینی الگوی جریان روی سرریز از داده‌های جمع‌آوری شده نهر پایه دار آزمایشگاهی (سیواکوماران و همکاران، ۱۹۸۳). استفاده شد و جریان روی سرریز با استفاده از دو نوع مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و RNG شبیه‌سازی شد. سپس از نمونه‌ی آزمایشگاهی سرریز سد مخزنی نمرود استفاده شد و نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های نمونه‌ی آزمایشگاهی مربوطه مقایسه گردید. مقایسه‌ی نتایج حاصله نشان می‌دهد که این نرم افزار در تعیین نیمرخ سطح آب در طول سرریز دارای دقت مناسبی است. بیشترین خطاها در مدل عددی در برآورد فشار روی سرریز دیده شده‌است. مقدارهای محاسباتی شامل توزیع فشار و نیمرخ سطح آب هستند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیمرخ سطح آب در مقایسه با اندازه‌گیری‌های تجربی از انطباق خوبی برخوردارند. با توجه به اینکه نتایج مدل عددی دارای دقت مناسبی است. استفاده از این مدل‌ها به خصوص بر روی این چنین سازه‌هایی که دارای محدودیت‌هایی از نظر

- study). In The First International Conference on Dams and Hydropower. Tehran, Iran.
- 9) Savage, B. M., & Johnson, M. C. 2001. Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study. *Journal of Hydraulic Engineering*. 127(8): 640-649.
- 10) Sivakumaran, N. S, Tingsanchali, T. & Hosking, R. J. 1983. Steady shallow flow over curved beds, *J. Fluid Mech*. 128: 469-487.
- 11) Souders, D. T., & Hirt, C. W. 2004. Modeling entrainment of air at turbulent free surfaces. In *Proceedings of World Water and Environmental Resources Management*. Salt Lake City, Utah (pp. 1-10).
- 12) Wang, J., and Liu, R. 2000. A comparative study of finite volume methods on unstructured meshes for simulation of 2D shallow water wave problems. *Mathematics and Computers in Simulation*. 53(5): 171-184.
- 13) Yoo M, Chen, Y., and Zhou, Q. 2000. Case study of an s-shapes spillway using physical and numerical models. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. 132(9): 892-898.

