صحت‌سنجی پارامترهای شاخص جریان روی سرریز با استفاده از نتایج مدل المان محدود ANSYS CFX (مطالعه موردی: سرریز سد آزاد، سنندج)

رامین عبدالله کوخی[۱]، رضا جعفری‌نیا[۲] و مهدی فولادی‌پناه*[۳]

۱) دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

۲) استادیار گروه مهندسی آب، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

۳) استادیار گروه عمران، واحد رامهرمز، دانشگاه آزاد اسلامی، رامهرمز، ایران.

*نویسنده مسئول: **fuladipanah@gmail.com**

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۸ **تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۸**

چکیده

مدلسازی فیزیکی همراه با استفاده از مدل‌های عددی با دقت مطلوب برای شرایطی که امکان مدلسازی به ازای دبی‌های زیاد در آزمایشگاه به‌دلیل محدودیت‌های هیدرولیکی و فیزیکی میسر نباشد امری اجتناب‌ناپذیر است. در این تحقیق، ضمن اندازه‌گیری‌های مدل فیزیکی، از مدل عددی المان محدود ANSYS CFX برای شبیه‌سازی عددی میدان جریان شامل سرعت، فشار و ضریب کاویتاسیون برای مدل سریز سد آزاد استفاده شده است. به کمک دو معیار آماری R^2 و RMSE، مدل آشفتگی RNG (k-ε) برای شبیه‌سازی میدان جریان طی فرآیندهای واسنجی و صحت‌سنجی انتخاب شد. این مدل توانایی زیادی در تحلیل جریان‌های دارای کرنش سریع و خطوط جریان منحنی‌الخط دارد. علی‌رغم خطای میانگین ۲ تا ۳ درصدی بین داده‌های مدل عددی و مدل فیزیکی، همگرایی بسیار مناسبی بین داده‌های مدل عددی و مدل فیزیکی مشاهده شد که دلیل آن استفاده از مدل‌های اویلری-اویلری و مدل لاگرانژی برای جریان‌های آشفته دو فازی توسط ANSYS CFX است. با استفاده از مدل عددی به ازای سیلاب‌های ۱۰۰۰ ساله، ۱۰۰۰۰ ساله و حداکثر سیلاب محتمل به ترتیب با مقادیر ۱۴۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۲۹۰ متر مکعب بر ثانیه، میدان سرعت، فشار و ضریب کاویتاسیون ارزیابی گردید. نتایج ضمن تایید و انطباق خروجی مدل عددی با مقادیر مدل فیزیکی، در خصوص پدیده مخرب کاویتاسیون مشخص شد در محدوده ۱۱۵ متری سطح شیبدار تندآب منتهی به پرتاب کننده، ضریب کاویتاسیون زیر خط بحرانی قرار دارد که نیاز به وجود هواده در مسیر تنداب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدلسازی عددی، المان محدود، میدان جریان و مدل ANSYS CFX.

مقدمه

با توجه به رشد و گسترش احداث سدهای بزرگ و همچنین بالا رفتن استانداردهای ایمنی در سدها، طراحی سرریزهای اقتصادی و مطمئن برای تخلیه سیلاب ورودی به مخزن سدها، همواره یکی از مسائل مهم برای مهندسان هیدرولیک بوده است. از همین‌رو مطالعه این دسته از سازه‌ها برای محققین هیدرولیک امری حیاتی و مهم تلقی می‌شود. هزینه بالای احداث سدها و سازه‌های هیدرولیکی وابسته به آن و همچنین طولانی بودن زمان ساخت این قبیل پروژه‌ها و روشن شدن این واقعیت که انجام آزمایشات بر روی مدل‌های فیزیکی هنوز هم به‌عنوان دقیق‌ترین روش در تحلیل و بررسی مسائل و مشکلات طراحی این گونه سازه‌ها مطرح است، مهندسان را بر آن داشته است تا با ساخت مدل‌های فیزیکی نسبت به رفع نواقص این طرح‌ها اقدام نمایند، اما با توجه به اینکه تحلیل و بررسی جریان عبوری از روی سرریز سدها توسط مدل‌های فیزیکی نیاز به هزینه و زمان زیاد دارد، استفاده از مدل‌های عددی همواره یکی از جایگزین‌های مناسب برای بررسی خصوصیات جریان عبوری بر روی سرریزها می‌باشد. استفاده از روش‌های عددی در شبیه‌سازی جریان روی سرریزها برای اولین بار توسط Cassidy (۱۹۶۵) برای تعیین فشار روی تاج سرریز بر اساس فرضیه جریان پتانسیل به‌صورت دو بعدی صورت گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که بین داده‌های مدل عددی و آزمایشگاهی تطابق مناسبی وجود دارد. همچنین نیروی لزجت تاثیری در تعیین سطح آزاد جریان ندارد. Bouhadi (۲۰۰۴) مدل‌های دو و سه بعدی از سازه سرریز را توسط نرم‌افزار ANSYS CFX مورد بررسی قرار داد. نکته اصلی در این تحقیق بررسی جریان دو فازی عبوری روی سرریز توسط این مدل بود. با دو روش اویلرین ـ اویلرین و ذرات لاگرانژی تحلیل جریان‌های دو فازی انجام شد که در نهایت نتایج عددی با داده‌های تجربی USACE تطابق مناسبی را نشان داد. Kim و Park (۲۰۰۵) جریان عبوری از سرریز آزاد را با مد نظر قرار دادن اثر شرایط مقیاس و اثر زبری با استفاده از روش عددی المان محدود مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از اختلاف ناچیز در دبی عبوری، تراز سطح آب و فشار روی تاج بر اثر تغییر زبری سطح بود. Jounson و Savage (۲۰۰۶) دو مدل فیزیکی و عددی را برای مطالعه جریان روی سرریز در زمان وجود پایاب به‌کار بردند. نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی با روش حجم محدود انجام گرفت، با نتایج آزمایشگاهی انطباق خوبی داشت. Cea و همکاران (۲۰۰۷) راه‌ماهی با شکاف قائم را به‌صورت عددی مدلسازی کردند. برای واسنجی مدل از نتایج آزمایشگاهی Puertas و همکاران (۲۰۰۴) که مدل راه‌ماهی را در فلومی با طول ۱۲ و عرض ۱ متر و با شیب ۱۰٪ ساختند، استفاده شد. شبیه‌سازی عددی با روش حجم محدود انجام یافت. نتایج مدل عددی و فیزیکی شامل پروفیل سرعت طولی، سرعت اصطکاکی دیواره، عمق جریان، انرژی اغتشاش، تولید انرژی اغتشاش و تنش رینولدز در جهت افقی با هم مقایسه شد و نتایج همخوانی خوبی با هم داشتند. Paul و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از مبانی دینامیک سیالات

محاسباتی به ارزیابی مدل‌سازی عددی سرریز سه سد مختلف پرداختند. آن‌ها با مقایسه نتایج مدل عددی و مدل فیزیکی نتیجه گرفتند که دقت این نرم‌افزار به مقدار دبی عبوری بستگی دارد و با افزایش دبی عبوری و ریزتر شدن المان‌ها مقدار دقت افزایش می‌یابد. حیدرپور و همکاران (۱۳۸۵) با به‌کارگیری تابع جریان در اطراف یک استوانه، توزیع سرعت روی تاج را تعیین و یک مدل ریاضی برای تعیین ضریب جریان در سرریزهای تاج دایرهای ارائه دادند. آن‌ها نیمرخ توزیع سرعت و مدل ریاضی ضریب جریان را با استفاده از داده های آزمایشگاهی به‌دست آمده از مدل فیزیکی سرریزهای استوانه‌ای و نیم-استوانه‌ای با ارتفاعات مختلف ارزیابی نمودند. ورجاوند و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی به کاربرد مدل عددی FLUENT برای شبیه‌سازی جریان روی مدل فیزیکی سرریز جانبی سد ونیار در آذربایجان شرقی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از انطباق نتایج مدل عددی و مقادیر اندازه‌گیری آزمایشگاهی بود. اژدری‌مقدم و تاج‌نسایی (۱۳۸۹) در تحقیقی به بررسی عددی سلول‌های جریان ثانویه با استفاده از مدل ANSYS CFX پرداختند. نتایج آن‌ها ضمن تایید توانایی مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان حاکی از تغییر ابعاد و موقعیت قرارگیری سلول‌ها در اثر افزایش یکنواخت زبری است. همچنین این افزایش موجب کاهش سرعت متوسط عمقی و افزایش تنش برشی مرزی می‌گردد. اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۹) با آزمایش روی مدل‌های مختلف سرریز استوانه‌ای، مقادیر فشار و سرعت اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه را با مقادیر شبیه-سازی شده توسط مدل فلوئنت مقایسه کردند. نتایج حاکی از تطابق مناسب الگوی جریان اندازه‌گیری شده روی سرریز در آزمایشگاه و شبیه‌سازی مدل بود. آن‌ها همچنین مشاهده نمودند که محل تشکیل عمق بحرانی قبل ازنقطه اوج سرریز و جدایش جریان از روی سرریز در ناحیه انتهایی آن صورت می‌گیرد. ابراهیم‌نژادیان و ملایی‌نیا (۱۳۹۳) بهترین مدل آشفتگی قابل اعمال در نرم‌افزار دینامیک سیال محاسباتی ANSYS CFX را با توجه به ماهیت جریان بر روی سرریز تعیین کردند. بدین منظور مدل عددی سرریز پلکانی سد هرات به ازای سه نوع مدل آشفتگی، K-ε استاندارد، RNG و مدل تنش‌های رینولدز RSM ساخته شد و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه گردیدند. نتایج حاکی از دقت بالاتر مدل RNG در مدلسازی سرریزهای پلکانی در مقایسه با سایر مدل‌های آشفتگی دارد. اصغری و محققیان (۱۳۹۵) با مدل ANSYS CFX به شبیه‌سازی الگوی قرارگیری زبری و تاثیر آن بر روی جریان غلیظ پرداختند. آن‌ها از مدل k-ε برای شبیه‌سازی عددی استفاده کردند. نتیجه تحقیقات آن‌ها تایید توانایی کاربرد مدل عددی در مدلسازی شرایط مختلف جریان بود. آرمان و ولی‌زاده (۱۳۹۷) با استفاده از مدل ANSYS به شبیه‌سازی میدان تنش پرداختند. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها حاکی از توانایی این مدل برای شبیه‌سازی داده‌های آزمایشگاهی بود. صفارزاده و رضایی (۱۳۹۵) با کمک مدل عددی ANSYS CFX به بررسی عرض سیلابدشت روی الگوی جریان پرداختند. آن‌ها از مدل آشفتگی k-ε برای مدلسازی استفاده نمودند. مقایسه نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که کم و بیش انطباق خوبی بین آن‌ها وجود

دارد. امیری و همکاران (۱۳۹۵) ارزیابی دقت مدل ANSYS CFX را روی سرریز تاج دایره‌ای انجام دادند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی نرم‌افزار تطابق بسیار خوبی با مقادیر اندازه‌گیری دارد. کرمی و همکاران (۱۳۹۶) از مدل ANSYS CFX برای شبیه‌سازی جریان روی سرریزهای نیمه‌استوانه‌ای استفاده کردند. آن‌ها از معادلات آشفتگی k-ω، K-ε و RNG در این شبیه‌سازی استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از انطباق و قابلیت زیاد مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی داشت. روشن و واضح است اندازه‌گیری خصوصیات سه بعدی میدان جریان در سازه‌های تخلیه سیلاب در سدها از طریق مدل‌های آزمایشگاهی قابل حصول نیست و علاوه بر مدل آزمایشگاهی لازم و ضروری است مدل‌های عددی قابل اطمینان نیز به منظور تدقیق نتایج آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرند. در این مطالعه از نرم‌افزار ANSYS CFX به منظور شبیه‌سازی میدان جریان در سازه تخلیه‌کننده در سد آزاد (واقع در استان کردستان) استفاده شده است. از نتایج آزمایشگاهی اندازه-گیری شده در مدل فیزیکی این سد در شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار مذکور بهره گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل ANSYS CFX

نرم‌افزار ANSYS CFX، یک نرم‌افزار با هدف پویایی سیال محاسباتی است که یک حلگر پیشرفته را با قابلیت‌های پیش و پس پردازشگر قدرتمند ترکیب می‌کند و از توانایی شبیه‌سازی مواردی مانند جریان‌های دایمی و غیردایمی، آرام و آشفته، مادون صوت، صوت و مافوق صوت، نیروهای شناوری و ... برخوردار است. این نرم‌افزار برای گسسته‌سازی معادلات حاکم بر محیط جریان از روش حجم محدود استفاده می‌کند. نرم‌افزار ANSYS CFX بر خلاف بسیاری از نرم‌افزارهای عددی دیگر محیطی را فراهم نموده است که کلیه فرآیندهای حل مسئله شامل ساخت هندسه، شبکه‌بندی، تعیین معیارها و ضوابط حل مسئله و در نهایت نمایش نتایج حاصله در یک محیط واحد انجام پذیرد. در این نرم‌افزار دو مدل اویلرین ـ اویلرین برای جریان چند فازی و مدل ردیابی ذرات لاگرانژی موجود است. همچنین برای شبیه‌سازی سطح آزاد از دو زیر مدل جریان همگن چند حالتی و جریان غیرهمگن چند حالتی استفاده می‌شود. مجموعه معادلاتی که توسط CFX حل می‌گردند معادلات ناویر استوکس غیردایمی در فرم بقایی هستند. برای ساخت هندسه مجرا از محیط نرم‌افزار کاربردی WORKBENCH استفاده می‌شود.

معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر جریان سیال عبارت از بقای جرم و مومنتوم است که در حالت جریان آشفته سیال تراکم‌پذیر به فرم رابطه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ نوشته می‌شوند:

رابطه ۱: $$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho U)=0$$

رابطه ۲: $$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho UU)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mathrm{div}\left(\mu\ \mathrm{grad}(U)\right)+\left[-\frac{\partial\left(\rho u'^{2}\right)}{\partial x}-\frac{\partial(\rho u'v')}{\partial y}-\frac{\partial(\rho u'w')}{\partial z}\right]+S_{M_x}$$

رابطه ۳: $$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho VV)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mathrm{div}\left(\mu\ \mathrm{grad}(V)\right)+\left[-\frac{\partial(\rho v'u')}{\partial x}-\frac{\partial\left(\rho v'^{2}\right)}{\partial y}-\frac{\partial(\rho v'w')}{\partial z}\right]+S_{M_y}$$

رابطه ۴: $$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho ww)=-\frac{\partial P}{\partial z}+\mathrm{div}\left(\mu\ \mathrm{grad}(w)\right)+\left[-\frac{\partial(\rho w'u')}{\partial x}-\frac{\partial(\rho w'v')}{\partial y}-\frac{\partial(\rho w^{2})}{\partial z}\right]+S_{M_z}$$

که در آن U مولفه سرعت در جهت x، P فشار، ρ چگالی، μ لزجت دینامیکی، u'، v' و w' به‌ترتیب نوسان سرعت در راستای محورهای x، y و z، جملات $\rho u'v'$ و $\rho u'w'$ به‌عنوان تنش‌های رینولدز شناخته می‌شود. پارامتر S_{MX} مربوط به ترم چشمه و چاه می‌باشد.

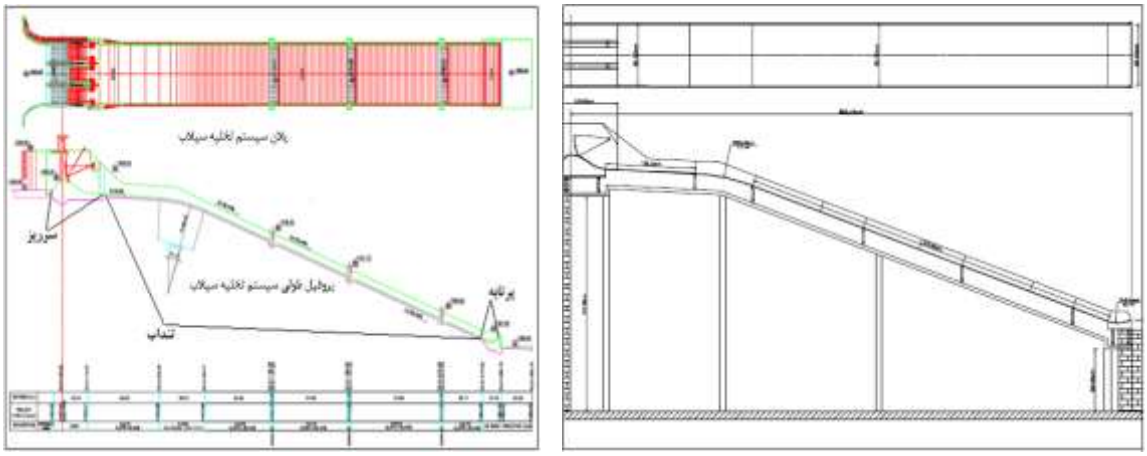
موقعیت و مشخصات سد مخزنی آزاد

سد مخزنی آزاد در ۷۵ کیلومتری جاده سنندج به مریوان در فاصله بین "۰۰ '۴۵ °۳۴ تا "۰۰ '۴۶ °۳۵ عرض شمالی و "۰۰ '۰۵ °۴۶ تا "۰۰ '۰۰ °۴۸ طول شرقی در حوضه آبریز سیروان قرار گرفته است. این سد از نوع سنگریزه‌ای با هسته‌ی رسی با ارتفاع ۱۲۵ متر از پی و طول تاج ۶۰۰ متر می‌باشد. حجم بدنه سد ۸۵ میلیون متر مکعب و حجم مخزن آن ۳۰۰ میلیون متر مکعب است. مساحت حوضه آبریز این سد ۱۰۰۷ کیلومتر مربع، شیب متوسط حوضه ۲۰/۴٪، شیب متوسط رودخانه ۰/۸۱ و طول رودخانه اصلی ۶۹ کیلومتر اندازه‌گیری شده است. هدف از ساخت این سد، انتقال ۲۵۰ میلیون متر مکعب در سال به دشت‌های قروه و دهگلان در شرق استان کردستان و رهاسازی ۵۰ میلیون متر مکعب آب در سال برای جریان زیست‌محیطی و کشاورزی پایاب می‌باشد. رودخانه آزاد از سر شاخه‌های اصلی رودخانه سیروان است که متوسط آورد سالیانه این رودخانه در محل محور سد ۳۷۶ میلیون متر مکعب اندازه‌گیری شده است.

مشخصات نمونه واقعی و مدل فیزیکی تخلیه کننده سر آزاد

سازه تخلیه کننده سد آزاد شامل سرریز، تنداب و پرتاب کننده جامی است. تراز آستانه سرریز ۱۴۶۵ متر، عرض ناخالص سرریز ۳۰ متر که به وسیله دو پایه هر کدام به ضخامت ۳ متر سرریز را به سه قسمت به فواصل ۸ متر تقسیم می‌کنند. بالادست سرریز سطح شیبدار ۲ (افقی): ۳ (عمودی) و طول افقی سرریز ۲۱/۶۱ متر است. تنداب سد مخزنی آزاد به عرض ۳۰ متر از دو شیب ۵٪ و ۳۶/۴٪ و بین دو سطح شیبدار سطح قوسی به شعاع ۱۰۰ متر تحت زاویه ۱۷/۱۴ درجه تشکیل شده است. تنداب از تراز ۱۴۵۸/۱۳ متر در فاصله ۱۷/۹۲ متری از آستانه سرریز شروع و به پرتاب کننده به تراز ۱۳۸۴/۲۵ متری می‌رسد. پرتاب کننده به طول افقی ۱۰/۵۷ متر و شعاع ۱۵/۰ متر تحت زاویه ۴۶/۱۴ درجه تراز ابتدا

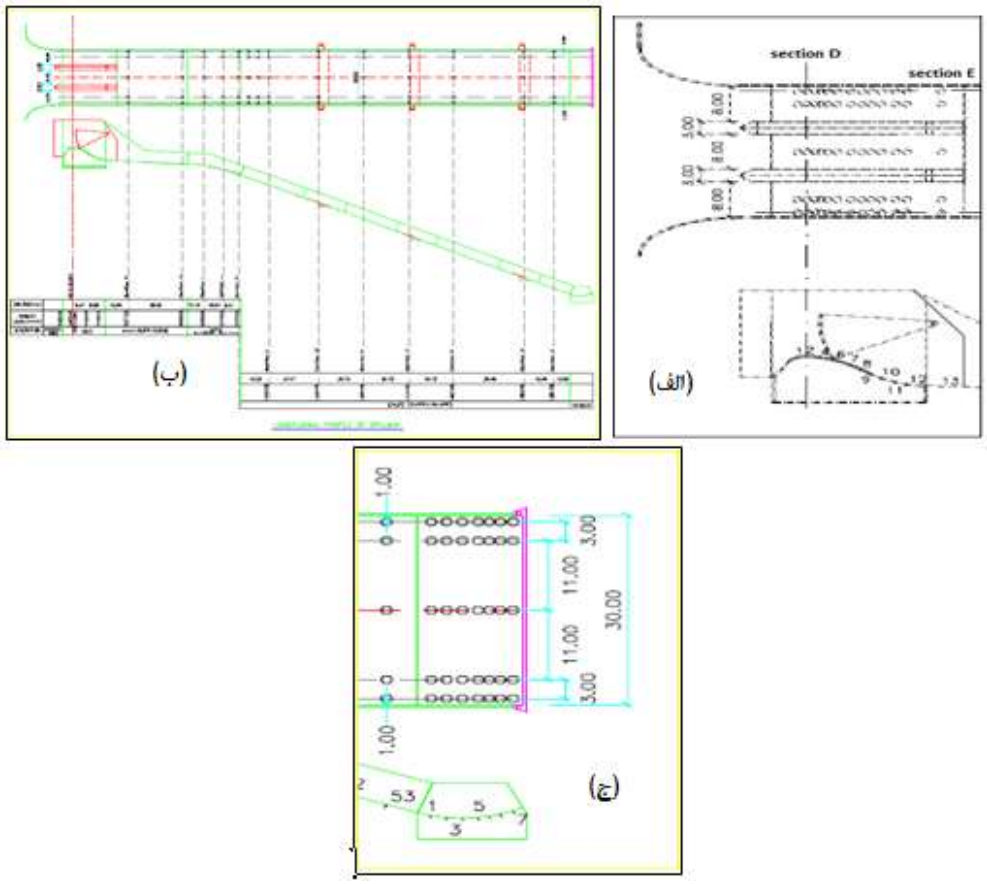
۱۳۸۴/۲۵ متر و تراز لبه ۱۳۸۵/۰۰ متر می‌باشد. در شکل ۱ پلان و پروفیل طولی مدل فیزیکی نشان داده شده است. تاج سرریز، مقطع D در شکل ۱، به‌عنوان مبدا مختصات برای تعیین فواصل طولی در سیستم تخلیه کننده است.



شکل ۱: (الف)پلان و پروفیل طولی سازه شامل سرریز، تنداب و پرتابه؛ (ب) ابعاد و نمایی از مدل فیزیکی تخلیه سیلاب سد مخزنی آزاد

در این تحقیق از داده‌های اندازه‌گیری شده هیدرولیکی و هیدرودینامیکی مدل فیزیکی تنداب سد مخزنی آزاد با مقیاس $\frac{۱}{۳۳/۳۳}$ ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک موسسه تحقیقات آب استفاده شده است. لازم به ذکر است برای شبیه-سازی عددی میدان جریان، ابعاد واقعی تندآب به نرم‌افزار معرفی شده‌اند. بدین منظور، داده‌های اندازه‌گیری شده روی مدل فیزیکی پس از تبدیل به مقادیر واقعی با استفاده از مقیاس عددی، با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار ANSYS CFX مقایسه شده‌اند. مدل فیزیکی سیستم تخلیه سیلاب از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شده است. سه پارامتر عمق آب، سرعت آب و فشار هیدرواستاتیکی در سه بخش سرریز، تنداب و پرتابه روی مدل با استفاده از پیزومترهای نصب شده در مسیر جریان اندازه‌گیری شدند (شکل ۲). اندازه‌گیری مقدار سرعت و عمق آب در دو مقطع تاج سرریز و مقطع انتهایی سرریز در سه مکان چپ، وسط و راست هر مقطع انجام گرفت. مقدار فشار استاتیکی روی سرریز در ۱۲ مقطع و در هر مقطع در پنج ردیف (در مجموع ۶۰ نقطه اندازه‌گیری) به‌وسیله پیزومتر اندازه‌گیری شد. در طول تنداب ۱۳ مقطع عرضی لحاظ گردید. عمق جریان عمود بر سطح روی هر مقطع در سه مکان راست، وسط و چپ و مقدار سرعت عمود بر سطح تنداب در فاصله ۰/۶ عمق آب از سطح با استفاده از سرعت‌سنج پیتو و مقدار فشار استاتیکی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری مقدار فشار استاتیکی در روی تنداب با استفاده از ۲۱۰ پیزومتر تعبیه شده که در ۴۲ مقطع عرضی و در هر مقطع با پنج مکان تعبیه شده بود انجام گرفت. در طول پرتاب‌کننده در راستای پیزومتر تنداب در پنج ردیف عرضی هفت عددی در مجموع ۳۵ پیزومتر نصب شد. دقت اندازه‌گیری سرعت در مدل فیزیکی بر مبنای کاتالوگ سرعت‌سنج برابر با ±۰/۰۰۶۸ متر بر ثانیه

معادل با ۰/۰۳۹± در نمونه واقعی بود. عمق آب در هر مقطع عرضی از طریق مدرج کردن دیواره جانبی سرریز، تنداب و پرتاب کننده اندازه‌گیری شد. فشارسنج‌های مانومتری به منظور اندازه‌گیری فشار استاتیکی به‌کار گرفته شدند. از شش دبی با مقادیر ۷۸، ۱۲۴/۷، ۱۵۶، ۱۹۱، ۲۴۱ و ۳۵۷ لیتر بر ثانیه در آزمایشگاه (متناظر با ۵۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۲۶، ۱۵۴۵ و ۲۲۹۰ متر مکعب بر ثانیه در نمونه اصلی) برای اندازه‌گیری خصوصیات جریان استفاده گردید. شکل ۳ تصاویری از مدل فیزیکی حین انجام آزمایش و اندازه‌گیری را نمایش می‌دهد.



شکل ۲: موقعیت پیزومترها: (الف) در سرریز، (ب) در تنداب و (پ) در پرتاب کننده

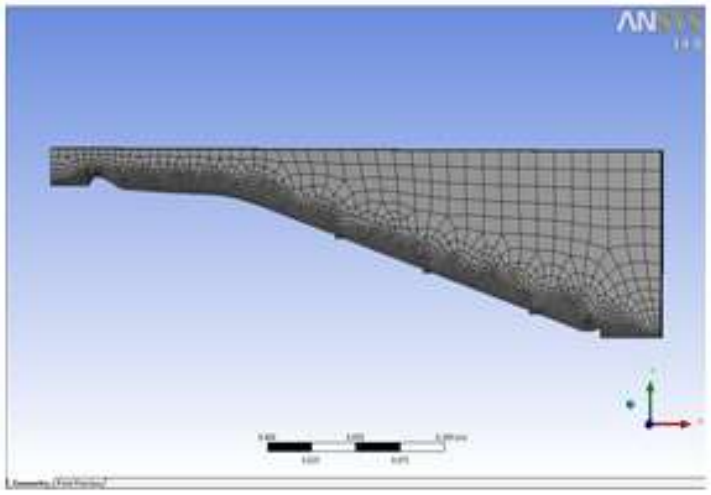
اجرای مدل عددی

معرفی و شبکه‌بندی مدل کامپیوتری

برای ایجاد، ترسیم و تعریف هندسه مدل از نرم‌افزار Workbench استفاده گردید. مش‌بندی یکی از مهمترین بخش-های شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در دینامیک سیالات محاسباتی است. در واقع مش‌بندی میدان جریان بیانگر دامنه محاسباتی است که نرم‌افزار برای حل معادلات از آن استفاده می‌کند. مش‌بندی مناسب منجر به همگرایی و پایداری در

حل معادلات می‌شود. با توجه به تاثیرپذیری نتایج حاصل از شبیه‌سازی با گره‌های محاسباتی از یک سو و درجه مختلف پیچیدگی جریان در نقاط مختلف سیستم تخلیه سیلاب از طرف دیگر باعث می‌گردد تعداد گره‌ها در جهات و موقعیت‌های مختلف با یکدیگر متفاوت باشند. ابعاد مناسب شبکه‌بندی محاسباتی با استفاده از حساسیت‌سنجی به صورت خودکار توسط نرم‌افزار ANSYS CFX از طریق معیارهای انتخابی پس از انجام فرآیند روزنه‌بندی مدل در مرحله تنظیم معیارهای طراحی و با کمک گزینه Mesh Adaption به گونه‌ای انتخاب می‌شود که کمترین حساسیت و وابستگی در نتایج مدل نسبت به شبکه‌بندی ایجاد شود. نتیجه این کار، کاهش هزینه محاسباتی مدل عددی نیز می‌باشد. شش معیار برای آنالیز حساسیت ابعاد شبکه در نرم‌افزار ANSYS CFX عبارتند از الف. Air Volume Fraction؛ ب. Water Volume Fraction؛ پ. Water Velocity؛ ت. Water Vorticity؛ ث. Pressure و ج. Turbulence. طبق محاسبات صورت گرفته برای آنالیز حساسیت مدل نسبت به شش معیار مذکور، در شکل ۴ شبکه‌بندی نهایی مدل ارائه گردید. همان‌طور که مشخص است ابعاد شبکه محاسباتی در مجاورت مرزها ریزتر و در سایر نواحی درشت‌تر می‌باشد.

شکل ۳: مدل فیزیکی حین انجام آزمایش



شکل ۴: مش‌بندی مدل سرریز سد آزاد در نرم‌افزار ANSYS CFX

شرط مرزی جریان

پنج شرط مرزی موجود در نرم‌افزار ANSYS CFX عبارتند از (الف) شرط مرزی ورودی؛ (ب) شرط مرزی خروجی؛ (پ) شرط سطح آزاد؛ (ت) شرط مرزی دیواره و (ث) شرط مرزی تقارن. شرط مرزی ورودی، برای تعریف دبی حجمی ورودی به مدل به کار گرفته می‌شود. در این شبیه‌سازی، گزینه inlet برای اعمال مقادیر دبی عبوری بر روی سرریز انتخاب گردید. شرط مرزی خروجی به منظور توصیف قسمت انتهایی سیستم تخلیه سیلاب استفاده شده است. در این قسمت، گزینه Average static pressure انتخاب گردید. با توجه به اینکه سطح جریان در تماس با فشار اتمسفر است شرط سطح آزاد، گزینه Opening لحاظ گردید. در این شرط مرزی امکان تبادل سیال با هوا وجود دارد. شرط مرزی دیواره با توجه به اصل عدم لغزش گزینه No Slip انتخاب شد. طبق این اصل، سیالی که بلافاصله در نزدیکی دیوار قرار دارد، سرعت دیواره را به خود می‌گیرد.

مدلسازی آشفتگی

به‌طور کلی معادلات توصیف کننده آشفتگی در دو گروه یک معادله‌ای و چند معادله‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به اثرات نفوذ، جابجایی و نیز وقوع جریان‌های چرخشی در سیستم تخلیه سیلاب، روشن و واضح است مدل‌های یک معادله‌ای برای شبیه‌سازی مناسب نخواهند بود. به همین در این مقاله برای شبیه‌سازی مشخصه‌های آشفتگی که در واقع برای بستن معادلات مورد استفاده قرار می‌گیرند از مدل‌های چند معادله‌ای استفاده گردید. در نرم‌افزار ANSYS CFX این مدل‌ها عبارتند از: مدل k-ε استاندارد، مدل RNG k-ε و مدل تنش‌های رینولدزی. انتخاب مدل برتر و مناسب از بین

آن‌ها بر مبنای فرایند واسنجی و صحت‌سنجی برای متغیرهای سرعت و فشار به کمک توابع ارزیابی عملکرد زیر صورت گرفت (رابطه‌های ۵ و ۶):

رابطه ۵:
$$R^2=\frac{[\sum_{i=1}^{N}(X_{oi}-\overline{X}_o)(X_{ei}-\overline{X}_e)]^2}{\sum_{i=1}^{N}(X_{oi}-\overline{X}_o)^2\sum_{i=1}^{N}(X_{ei}-\overline{X}_e)^2}$$

رابطه ۶:
$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_{oi}-X_{ei})^2}{N}}$$

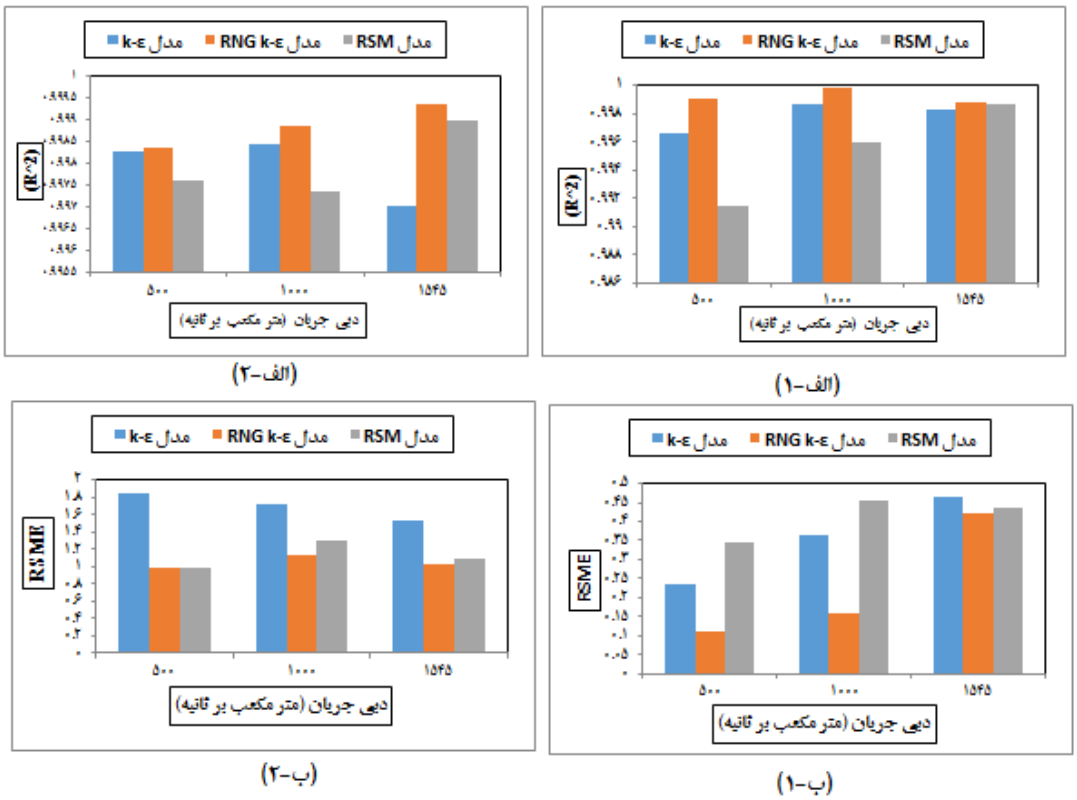
که در این معادلات R^2 ضریب تبیین، σ انحراف معیار، RMSE مجذور میانگین مربعات خطا، $\overline{X}$ مقدار میانگین، N تعداد کل داده‌ها، X_o و X_e بترتیب مقدار متغیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، $\overline{X}_o$ و $\overline{X}_e$ بترتیب مقدار متوسط متغیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده هستند. ضریب تبیین نیز در محدوده [۰،۱] میزان انطباق داده‌های مشاهداتی و پیش-بینی شده را نشان می‌دهد. هر چه مقدار این ضریب به ۱ نزدیک‌تر باشد به انطابق کامل‌تر داده‌ها دلالت خواهد شد.

نتایج و بحث

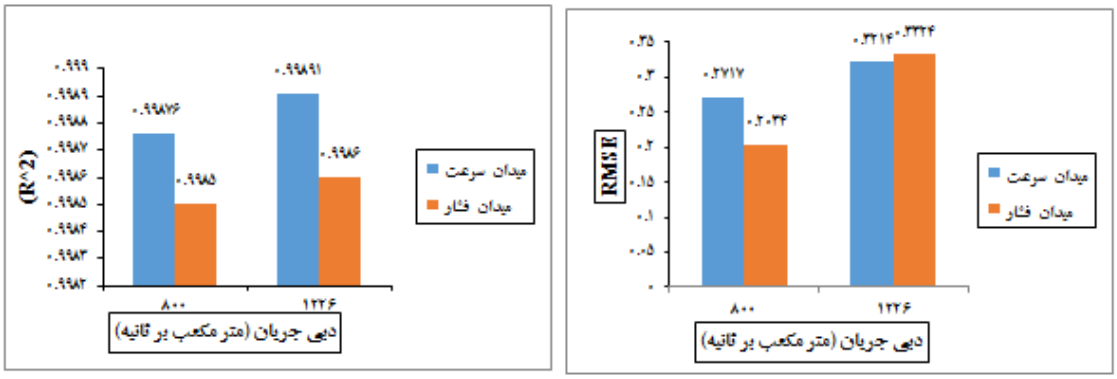
شکل ۵ نتایج معیارهای تدقیق فرآیند واسنجی (شکل ۵ ـ الف بر حسب R^2 و شکل ۵ ـ ب بر حسب RMSE) را در میدان سرعت و فشار نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است از بین سه مدل آشفتگی، مدل RNG(k-ε) در دوره واسنجی بهترین شبیه‌سازی و انطباق را با داده‌های اندازه‌گیری شده به ازای سه دبی ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۴۵ متر مکعب بر ثانیه هم برای میدان سرعت و هم برای میدان فشار نشان می‌دهد. شکل ۶ (فرایند صحت‌سنجی) بیانگر دقت و صحت کاربرد مدل RNG(k-ε) به ازای دو دبی ۸۰۰ و ۱۲۲۶ متر مکعب بر ثانیه است.

شبیه‌سازی عددی

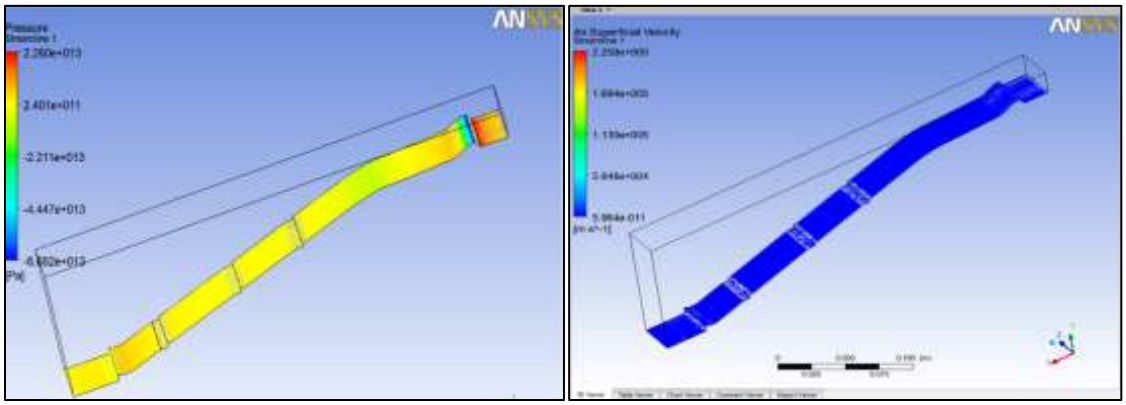
به منظور شبیه‌سازی عددی میدان جریان، توزیع پارامترهای سرعت طولی، فشار استاتیکی و ضریب کاویتاسیون به ازای دبی‌هایی با دوره بازگشت ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و حداکثر سیلاب محتمل روی سرریز سد مورد مطالعه قرار گرفتند. مقدار دبی‌های متناظر با دوره برگشت‌های فوق‌الذکر به ترتیب برابر با ۱۴۰۰، ۱۸۰۰ و ۲۲۹۰ می‌باشند. شکل ۷ نمودار توزیع سرعت و فشار را به ازای حداکثر دبی محتمل (PMP) را در محیط ANYSY CFX نمایش می‌دهند. شکل ۸ توزیع طولی سرعت جریان، شکل ۹ توزیع فشار هیدرواستاتیکی و شکل ۱۰ تغییرات ضریب کاویتاسیون در راستای محور طولی سرریز را برای سه دبی نمایش می‌دهند.



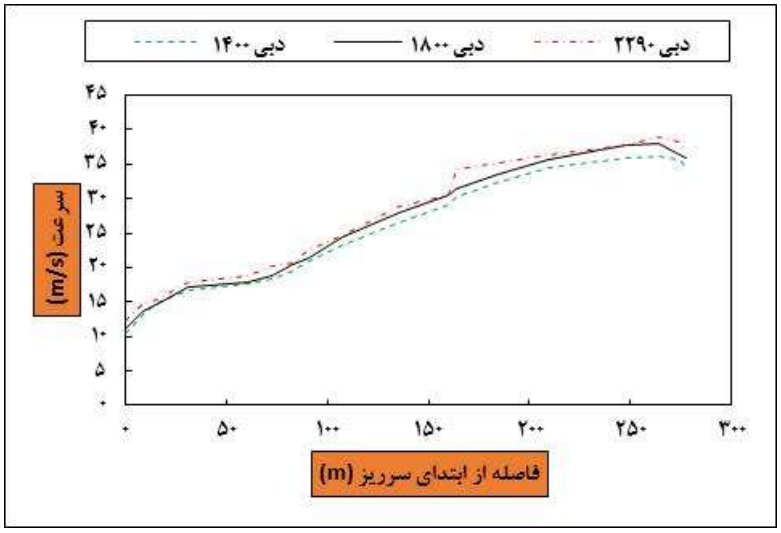
شکل ۵: نتایج فرآیند واسنجی مدل‌های آشفتگی برحسب R^2 و RMSE



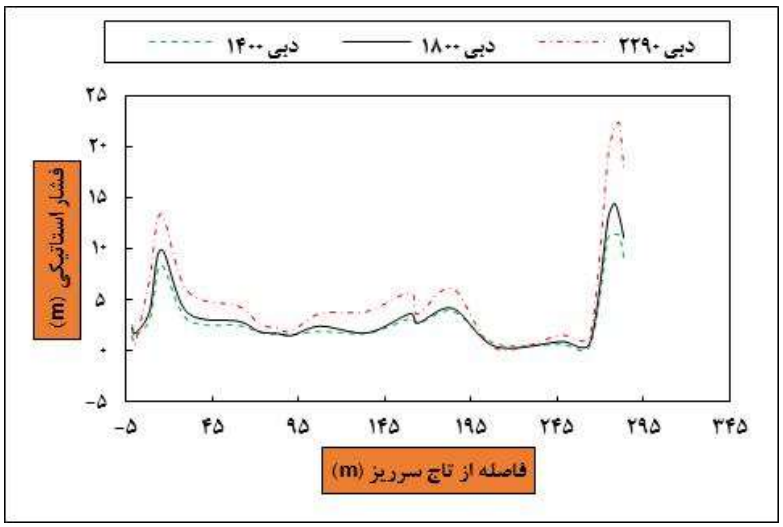
شکل ۶: ضرایب تدقیق فرآیند صحت‌سنجی مدل آشفتگی RNG k-ε



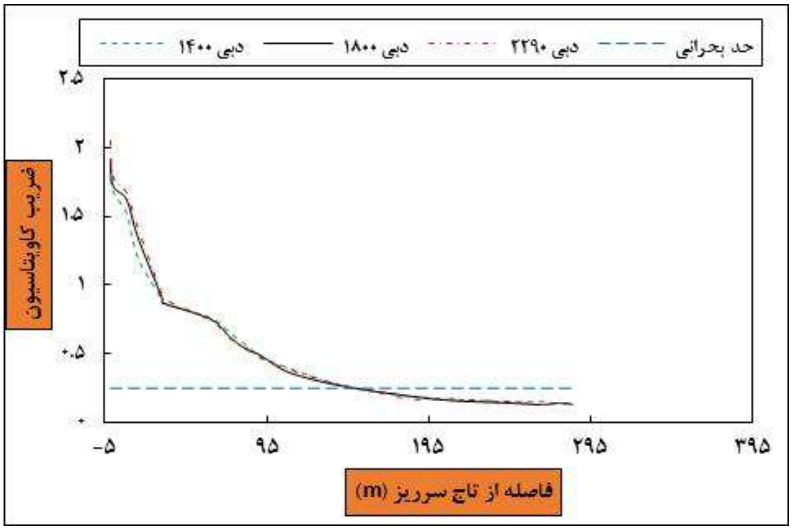
شکل ۷: توزیع سرعت و فشار روی سازه سرریز به ازای دبی PMP



شکل ۸: توزیع طولی سرعت به ازای دبی‌های مختلف



شکل ۹: توزیع طولی فشار استاتیکی به ازای دبی‌های مختلف



شکل ۱: توزیع طولی ضریب کاویتاسیون به ازای دبی‌های مختلف

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی سرریز سد آزاد با استفاده از نرم‌افزار ANSYS CFX مبتنی بر روش گسسته‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. جواب‌های حل عددی با مقادیر مدل فیزیکی مورد مقایسه و انطباق قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی RNG(k-ε) به‌دلیل داشتن عبارت اضافی نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی برای تحلیل جریانات سریعا کرنش یافته است و جریانات بر روی سطوح با انحناهای زیاد مناسب‌تر می‌باشد. همچنین این مدل توانایی زیادی در شبیه‌سازی جریان‌های گذرا دارد. با مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل‌های عددی برای اندازه‌گیری سرعت، می‌توان دریافت که علی‌رغم وجود ۲ الی ۳ درصد خطا میانگین بین داده‌های عددی و مدل فیزیکی، اما همگرایی مناسبی بین داده‌های عددی و مدل فیزیکی وجود دارد. در تجزیه و تحلیل مقادیر سرعت مشخص شد که مدل عددی در مواضعی که جریان به حالتی آشفته می‌رسد با خطاهایی اندک همراه می‌باشد. البته مدل عددی ANSYS CFX به دلیل استفاده از مدل‌های اویلری ـ اویلری و همچنین مدل لاگرانژی جریان‌های آشفته و دو فازی به شکل مطلوب‌تری و با خطایی جزیی‌تر شبیه‌سازی انجام می‌دهد. به ازای بیشترین دبی عبوری بر روی سرریز، جریان در عرض کانال ورودی یکنواخت، جدایی جریان از دیوار هدایت کننده دو طرف، حرکت‌های گردابی و چرخشی در مدل مشاهده نگردید. به‌دلیل همگرایی مناسب بین نتایج سرعت و فشار در مدل عددی و مدل فیزیکی، مقادیر ضریب کاویتاسیون نیز از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشد. در بررسی ضریب کاویتاسیون بحرانی‌ترین حالت در مدل عددی ANSYS CFX به ازای دبی ۱۵۴۵ متر مکعب بر ثانیه اتفاق می‌افتد که برابر با ۰/۱۳ می‌باشد. لذا بحرانی‌ترین حالت لزوما به ازای حداکثر دبی اتفاق نمی‌افتد. سرعت در طول تندآب تند شونده است و میزان سرعت در هر عرض تندآب به ازای دبی مشخص یکسان است. روند نرخ صعودی سرعت درصدی کاهش و ملایم‌تر می‌گردد. سرعت در آستانه سرریز به‌صورت یکنواخت است. به ازای حداکثر سیلاب محتمل (۲۲۹۰ متر مکعب بر ثانیه) متوسط سرعت در آستانه سرریز ۱۱/۸۱ متر بر ثانیه و در فاصله افقی ۸/۴۱ متری از آستانه سرریز برابر با ۱۴/۵۵ متر بر ثانیه می‌باشد. خصوصیات پرتاب‌کننده جامی شکل به عنوان سازه‌ی مستهلک کننده انرژی که ایجاد کننده پرش می‌باشد موجب پخش پرتاب (Jet Dispersion) می‌شود. پرش متراکم جریان را به‌صورت پودری از آب در می‌آورد و به دلیل اثر مقاومت هوا به آرامی سقوط می‌کند. فرآیند پخش شدن پرش خروجی از پرتاب کننده بخش قابل ملاحظه‌ای از کل انرژی هیدرودینامیکی پرش را می‌تواند مستهلک نماید. به عبارتی انرژی در واحد سطح را به حداقل می‌رساند و تمایل برای ایجاد جریان‌های گردابی یا چرخشی را که منجر به فرسایش سواحل و بستر رودخانه شود را کاهش می‌دهد. اگرچه بیشترین مقادیر فشار استاتیکی در پرتاب کننده جامی شکل اتفاق می‌افتد، اما کمترین مقدار نواسانات فشار استاتیکی در پرتاب‌کننده جامی مشاهده گردید، به‌طوری منحنی تغییرات فشار در این محدوده تقریبا

به سمت خط راست گرایش دارد. از ابتدای تندآب تا فاصله ۱۶۰ متری از آستانه سرریز ضریب خوردگی بالای خط بحران است. در فاصله حدود ۱۱۵ متری سطح شیب دار تندآب منتهی به پرتاب‌کننده ضریب خوردگی زیر خط بحران قرار دارد. لذا در این محدوده احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون وجود دارد. لذا جهت رفع پدیده خوردگی در سطح تندآب، سیستم هواده باید تعبیه گردد.

منابع

آرمان، ع. و ولی‌زاده، ر. ۱۳۹۷. شبیه سازی سه بعدی تنش برشی در کانال مرکب مستطیلی با استفاده از مدل عددی Ansys Fluent. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و مهندسی زهکشی، ۷۲ (۱۹): ۱۸۱-۱۶۵.

ابراهیم‌نژادیان، ح. و ملایی‌نیا، م. ر. ۱۳۹۳. الگوی جریان و استهلاک کارمایه در سرریزهای پلکانی با ارتفاع پله غیریگنواخت با کاربرد نرم‌افزار ANSYS CFX. مجله مهندسی منابع آب، ۷: ۹۶-۸۱.

اژدری‌مقدم، م. و تاج‌نسایی، م. ۱۳۸۹. مدل‌سازی عددی سلول‌های جریان ثانویه در کانال‌های ذوزنقه‌ای با زبری یکنواخت. مدل‌سازی در مهندسی، (۸)۲۰: ۷۰-۵۷.

اسماعیلی،ک.، نقوی، ب.، کورش وحید، ف. و یزدی، ن. ۱۳۸۹. مدلسازی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در سرریزهای استوانه ای. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۱: ۱۷۹-۱۶۶.

اصغری، س. ا. و محققیان، س.م. ۱۳۹۵. بررسی عددی تأثیر ایجاد زبری، الگوی قرارگیری، ارتفاع و شکل زبری در کنترل جریان غلیظ با استفاده از ANSYS CFX. مجله علوم و فنون دریایی، ۲ (۱۵): ۷۷-۶۶.

امیری، م. ج.، حیدرپور، م.، بهرامی، م. و رستمیان، ر. ۱۳۹۵. ارزیابی نرم‌افزار ANSYS CFX در شبیه‌سازی توزیع سرعت و فشار بر روی سرریز تاج دایره‌ای. فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب، ۶ (۱۳): ۳۵-۲۳.

حیدرپور، م.، ایزدی نیا، ا. و سعادت پور، ع. ۱۳۸۵. بررسی توزیع فشار روی تاج سرریزهای استوانه‌ای و تاج دایره‌ای با ارتفاعات مختلف. همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز. ص ۳۵۱-۳۴۵.

صفارزاده، ع. ر. و رضایی، ب. ۱۳۹۵. مطالعه عددی اثر عرض سیلاب‌دشت‌های کانال مرکب منشوری بر روی میدان جریان و اندرکنش بین جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها. نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، ۲ (۴۶): ۱۵-۲۷.

کرمی، ح.، فرزین، س.، حیدری، ع. و حسینی، خ. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی مشخصات جریان روی سرریز نیمه استوانه-ای با استفاده از نرم‌افزار عددی ANSYS CFX. مهندسی منابع آب، ۱۰ (۳۴): ۶۰-۵۱.

ورجاوند، پ.، فرسادی‌زاده، د.، حسین‌زاده‌دلیر، ع. و صدرالدینی، ا. ۱۳۸۹. شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در سرریز جانبی با استفاده از مدل آشفتگی k-ε و مقایسه نتایج با مدل فیزیکی. مجله دانش آب و خاک، ۱(۲۰): ۱۱۸-۱۰۵.

Bouhadj, L. 2004. Three Dimensional Numerical Simulation of Turbulent Flow Over Spillways. ASL-AQFlow Inc., Sidney, British Columbia, Canada.

Cassidy, J.J. 1965. Hydraulic model studies of the Trinity dam spillway flip bucket. Central Valley Project, California Hydraulic Laboratory Report No, Hyd-467.

Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vazquez-Cendon, M.E. and Pena, E. 2007. Application of several depth averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fish ways. Journal of Hydraulic Engineering, 133(2): 160-172.

Kim, D. and Park, J. 2005. Analysis of Flow Structure over Ogee- spillway in Consideration of Scale and Roughness Effects by Using CFD Model. Journal of civil Engineering, 9(2): 161-169.

Jounson, M. and Savage, B. 2006. physical numerical comparison of flow over ogee spillway in the presence of tail water. Journal of Hydraulic Engineering, 132(12): 1353-1357.

Paul, G., Chanel, J. and John, C. 2008. Assessment of spillway modeling using computation fluid dynamics. Journal of civil Engineering, 35(12): 1481-1495.

Puertas, J., Pena, L. and Teijeiro, T. 2004. An experimental approach to the hydraulics of vertical slot fish ways. Journal of Hydraulic Engineering, 130(1): 10-23.

Verification of indicator parameters of flow field on spillways using finite element ANSYS CFX model (Case Study: Azad Dam Spillway, Sannandaj)

R. Koukhi[1], R. Jafarinia[2] and M. Fuladipanah[3*]

1) Ph.D Student of Water Resources Engineering and Management, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

2) Assistant Professor, Department of Water Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

3) Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ramhormoz Branch, Islamic Azad University, Ramhormoz, Iran.

***Corresponding Author: Fuladipanah@gmail.com**

Received Date: 2018.06.18 **Accepted Date: 2020.01.28**

Abstract

It's unavoidable to use physical modeling accomplished by precise numerical models at conditions faced to hydraulically and physically limitations for high discharges. In this research work, besides laboratories measurements, ANSYS CFX numerical model was applied to simulate flow field properties including pressure, velocity and cavitation index. Applying two statistical indices R2 and RMSE, RNG(k-ε) was selected as superior turbulent model to simulate flow field during calibration and verification processes. This turbulent model has more capability for analyzing flow of rapid strain and curvature streamline. Contrary to 2 to 3 percent average error, there was appropriate convergence between numerical and physical models because of using Eulerian- Eulerian and Lagrangian model in ANSYS CFX for two phase's turbulent flow. For discharges of return period 1000 yr, 10000 yr and PMP with corresponding values as 1400, 1800 and 2290 (m^3/s) numerical model was used to predict flow velocity, flow pressure and cavitation index. Alongside conformity between numerical model outputs with laboratory results showed about destructive cavitation phenomena that cavitation index is under critical value line at 115 m of sloped Shute ended to flip bucket which aeration is needed through the chute.

Keywords: Numerical modeling, Finite element, Flow field and ANSYS CFX model.