



شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سدهای بلند

مهدی شربتدار^۱، حجت کرمی^{۲*}، حامد سرکرده^۳، سید فرهاد موسوی^۴

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۰۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵

مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد

چکیده

جریان خروجی از سدها می‌تواند به دلیل انرژی جنبشی زیاد باعث ایجاد خسارت‌هایی شود، که می‌توان به شسته شدن بستر رودخانه‌ها و آسیب رسیدن به تأسیسات و سازه‌های موجود در مسیر جریان اشاره نمود. حوضچه‌های آرامش با آرام نمودن جریان این هدف را محقق می‌سازند. یکی از روش‌های رایج در شبیه‌سازی سازه‌های هیدرولیکی استفاده از روش‌های عددی است. این روش‌ها بیشتر مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) هستند. با توجه به توانمندی‌های روش‌های عددی و همچنین نرم‌افزارهای پیشرفته، می‌توان به بررسی حالت‌های پیچیده و متنوع اقدام نمود. در تحقیق حاضر، به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش در پایین دست یک سد بلند با استفاده از سه نوع مدل آشفتگی K-ε استاندارد، RNG و LES پرداخته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین مدل آشفتگی، مدل LES جهت مدل‌سازی عددی جریان در حوضچه آرامش تعیین گردید. همچنین جهت بررسی تأثیر بلوک‌های پای تندآب بر عملکرد حوضچه، مدلی پیشنهادی با فرض بلوک‌های پای تندآب حوضچه استاندارد تیپ دو USBR در نظر گرفته شد و با مدل اولیه مقایسه گردید.

نتایج تحقیق حاضر، نشان‌دهنده کاهش تقریبی ۴۰٪ و ۴/۵ درصدی سرعت به ترتیب در مقطع ورودی حوضچه و مقطع ورودی پرش هیدرولیکی روی سازه شوت می‌باشد که حاکی از تأثیر به‌سزای شوت بلوک در بهبود عملکرد حوضچه آرامش این سد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: حوضچه آرامش، FLOW-3D، مدل‌های آشفتگی، پرش هیدرولیکی، بلوک‌های پای تندآب، سدهای بلند

^۱ کارشناس ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، mehdisharbatdar@gmail.com

^{۲*} استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، hkarami@semnan.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، sarkardeh@hsu.ac.ir

^۴ استاد، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، fmousavi@semnan.ac.ir

مقدمه

ایجاد پرش هیدرولیکی یکی از متداول‌ترین روش‌ها جهت استهلاک انرژی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد. معمولاً در انتهای سازه‌هایی مانند سرریز، تندآب‌ها، آبشارها و دریچه‌ها، به دلیل انرژی زیاد جریان، نیاز به سازه‌هایی برای استهلاک انرژی و کاهش سرعت آن به منظور جلوگیری از فرسایش و حفاظت از تأسیسات پایین‌دست می‌باشد. یکی از رایج‌ترین سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی، حوضچه‌های آرامش از نوع پرش هیدرولیکی می‌باشند که در آن‌ها با شکل‌گیری پرش هیدرولیکی و عبور جریان از رژیم فوق بحرانی به زیر بحرانی، انرژی جریان مستهلک می‌شود^۱ (بختیاری و همکاران (۲۰۱۳)). پرش هیدرولیکی کلاسیک یا نوع A، به طور وسیع توسط پترکا^۲ (۱۹۵۸)، راجاراتنام^۳ (۱۹۶۸)، رش و لوتوسر^۴ (۱۹۷۲)، هگر و برمن^۵ (۱۹۸۹) و چانسون^۶ (۲۰۰۶) مورد بررسی قرار گرفته است. عمق ثانویه پرش هیدرولیکی کلاسیک y_2 به‌ازای عمق اولیه یا همان عمق فوق بحرانی در پنجه پرش y_1 و سرعت متوسط V_1 در این مقطع توسط رابطه ارائه شده توسط بلانگر (به نقل از عبدالعظیم^۷ (۲۰۱۰)) بصورت زیر به‌دست می‌آید: (چو^۸ (۱۹۵۹))

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1} - 1) \quad (1)$$

در این رابطه، $Fr_1 = V_1 / \sqrt{gy_1}$ عدد فرود در مقطع بالادست پرش و g شتاب ثقل می‌باشد. نوع دوم پرش هیدرولیکی که در سطح زیر شکل می‌گیرد توسط محققین زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است که در آن با استفاده از موانع مختلف، سعی در افزایش ضریب زبری کف حوضچه و در نتیجه افزایش استهلاک انرژی

دارد (چو^۸ (۱۹۵۹)). مکانیزم استهلاک انرژی و ارزیابی فشار دینامیک و نوسانات سرعت جریان در حوضچه‌های آرامش توسط محققین بسیاری در دو دهه اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است. تانگ و پیندر^۹ به منظور اطمینان از تأثیر مستهلک‌کننده‌های انرژی، مدلی برای به‌دست آوردن ابعاد حوضچه آرامش و ضوابط آن ارائه کرده‌اند. مروری فشرده بر مطالعات پرش هیدرولیکی و مستهلک‌کننده‌های انرژی در منابعی چون شوالت و هگر^{۱۰} (۱۹۹۲) و ویشر و هگر^{۱۱} (۱۹۹۵) یافت می‌شود. لانگ و همکاران^{۱۲} (۱۹۹۱) ساختار جریان را در تشکیل پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که گردابه‌های استوانه‌ای شکل موجود در روی سطح بالای پرش هیدرولیکی از چندین گردابه دیگر تشکیل شده که اندازه آن‌ها از پنجه پرش به انتهای پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد. محققین دیگری مانند پترکا (۱۹۷۸)، المصری و سرهان^{۱۳} (۲۰۰۰)، المصری (۲۰۰۱) و عبدالحمیم^{۱۴} (۲۰۱۳) روی شکل‌های مختلف بلوک‌ها آزمایشاتی را انجام داده‌اند: در ادامه کارهای محققین، تیواری^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۳) و تیواری و تیواری (۲۰۱۳) با استفاده از انواع بلوک‌ها در حوضچه آرامشی که ورودی آن غیر دایروی بود، نتیجه گرفتند که استفاده از آستانه پایانی با شیب ۴۵ درجه کارایی بهتری دارد. تیواری (۲۰۱۳) در تحقیق خود، با کار کردن روی ورودی مستطیلی توانست عملکرد حوضچه را ۲۹٪ نسبت به مدل USBR بهبود ببخشد. این کار توسط تغییر دادن محل دیوار بر خوردی انجام شد. در نهایت، تیواری و همکاران (۲۰۱۴) عملکرد حوضچه را با تغییر دادن هندسه بلوک‌ها در وسط حوضچه افزایش دادند. گوئل و ورما^{۱۵} (۱۹۹۹) برای حوضچه‌هایی با خروجی مربعی شکل

⁹ Tang & Pinder

¹⁰ Schwalt & Hager

¹¹ Vischer & Hager

¹² El-Masry & Sarhan

¹³ Abdelhaleem

¹⁴ Tiwari & Gahlot

¹⁵ Goel & Verma

¹ Bakhtiari & Kashefipor & Shafaei Bajestan

² Peterka

³ Rajaratnam

⁴ Resch & Leutheusser

⁵ Hager & Bremen

⁶ Chanson

⁷ Abdelazim

⁸ Chow



مدل آشفتگی $K-\epsilon$ به بررسی مشخصات آشفتگی جریان، اعم از نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی، پرداختند. در پایان، آن‌ها با بررسی نتایج حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که تطابق مناسبی بین نتایج اندازه‌گیری شده در شرایط آزمایشگاه و مدل عددی حاضر وجود دارد. سارکر و رودز^۴ (۲۰۰۲) پرش هیدرولیکی روی بسترهای صاف را به صورت تجربی و عددی بررسی نمودند. در این مطالعه، با استفاده از روش VOF برای شبیه‌سازی سطح آزاد آب و مدل آشفتگی $K-\epsilon$ RNG برای شبیه‌سازی نمودند.

آن‌ها نشان دادند که تطابق خوبی بین شبیه‌سازی دوبعدی و نتایج اندازه‌گیری شده وجود دارد. ژائو و میسرا^۵ (۲۰۰۴) مدل عددی پرش هیدرولیکی روی بستر صاف را با استفاده از معادلات پیوستگی و مومنتم و با مدل آشفتگی $K-\epsilon$ به صورت دوبعدی بررسی کردند. نتایج آن‌ها به صورت پروفیل‌های سرعت افقی و سطح آب، محاسبه مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی (K) و نرخ اتلاف انرژی (E) ارائه گردید و با نتایج آزمایشگاهی اسوندسن و همکاران (۲۰۰۰) و باکیونین (۱۹۹۵) مقایسه شد. گنزالز و بمباردلی^۶ (۲۰۰۵)، مشخصات پرش هیدرولیکی روی بستر صاف را به صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها برای شبیه‌سازی دو و سه بعدی از مدل آشفتگی $K-\epsilon$ و روش گردابه‌های بزرگ (LES) و از نرم افزار Flow-3D استفاده نمودند. سپس به مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی خود و نتایج اندازه‌گیری شده توسط لیو^۷ و همکاران (۲۰۰۴) پرداختند. صباغ و رستمی^۸ (۲۰۰۷) به مطالعه عددی مشخصات آشفتگی جریان در پرش هیدرولیکی پرداختند. آن‌ها شبیه‌سازی خود را با داده‌های تجربی چانسون و براتبرگ (۲۰۰۰) با اعداد فرود $6/33$ و $8/48$ و داده‌های تجربی راجاراتنام و همکارش (۱۹۹۶) با عدد فرود $3/87$ انجام دادند. در این شبیه‌سازی سه‌بعدی از

برای اعداد فرود بین $1/7$ تا $5/5$ با استفاده از بلوک با زاویه حمله 150° درجه، عملکرد حوضچه را نسبت به مدل USBR بهبود بخشیدند. گوئل و ورما (۲۰۰۰) توانستند با استفاده از چینش جدید طول حوضچه را کاهش دهند. در دهه اخیر، گوئل (۲۰۰۷) تحقیقات زیادی را در راستای کاهش طول حوضچه و افزایش استهلاک انرژی انجام داده است. گوئل، ابتدا توانست طول حوضچه را از $12D$ (D قطر لوله ورودی به حوضچه) به $8D$ و سپس در تحقیقات بعدی خود به $6D$ و سرانجام به $4/5D$ برساند. در زمینه مطالعات عددی، قارانجیک و چادهوری^۱ (۱۹۹۱) به مطالعه روی پرش هیدرولیکی با استفاده از مدل عددی پرداختند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که نتایج حاصل از روش تفاضل محدود مرتبه چهارم دارای دقت بیشتری نسبت به مرتبه دوم می‌باشد زیرا روش حل تفاضل محدود مرتبه دوم از دقت کافی برای پیش‌بینی محل دقیق پرش هیدرولیکی برخوردار نیست. لانگ^۲ و همکاران (۱۹۹۱) با استفاده از مدل آشفتگی دوبعدی $K-\epsilon$ به پیش‌بینی مشخصات آشفتگی در پرش هیدرولیکی مستغرق پرداختند. آن‌ها با استفاده از حل معادلات پیوستگی، مومنتم و معادله $K-\epsilon$ برای جریان‌های دوبعدی، دائمی و تراکم‌ناپذیر به پیش‌بینی اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی پرداختند. در پایان، با مقایسه مدل عددی و تجربی با اعداد فرود فوق بحرانی در محدوده $3/2$ تا $8/2$ نتیجه گرفتند که مدل عددی حاضر برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب، سرعت متوسط جریان، توزیع فشار و تنش‌های برشی آشفتگی گزینه‌ای مناسب می‌باشد. آموریم^۳ و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی مدل فیزیکی و عددی حوضچه نیروگاه سد پرتو کلمبیا پرداختند. آن‌ها با نتایج بدست‌آمده از مدل فیزیکی، شبیه‌سازی عددی حوضچه مذکور را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام دادند. آن‌ها با بهره‌گیری از روش VOF به تعیین پروفیل سطح آزاد آب و با استفاده از

⁵ Zhao & Misra⁶ Gonzalez & Bombardelli⁷ Liu⁸ Sabbagh & Rostami¹ Gharangik & Chaudhry² Long³ Amorim⁴ Sarker & Rhodes

استفاده از داده‌های تجربی اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) و با به‌کارگیری نرم افزار Fluent به صورت دوبعدی شبیه‌سازی کردند. سطح آزاد جریان با روش VOF تعیین گردید و همچنین برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان از مدل‌های آشفتگی $K-\epsilon$ استاندارد و $K-\epsilon$ RNG استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی $K-\epsilon$ و روش جزء حجم سیال (VOF) برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار مناسب بوده و خطای نسبی متوسط مقادیر سطح آب بدست‌آمده از مدل‌های عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده ۱٪ تا ۸/۶٪ می‌باشد. نتایج حاصل نشان داد که پروفیل‌های سطح آب بدست‌آمده از دو مدل آشفتگی $K-\epsilon$ استاندارد و $K-\epsilon$ RNG اختلاف ناچیزی دارند. فقط مدل $K-\epsilon$ RNG کمی سریع‌تر از $K-\epsilon$ استاندارد همگرا می‌گردد. شجاعیان و کاشفی‌پور^۱ (۲۰۱۲) به تحقیق درباره پدیده پرش هیدرولیکی با بهره‌گیری از نرم‌افزار Flow-3D با استفاده از دو نوع مدل آشفتگی $K-\epsilon$ استاندارد و RNG پرداختند. ابتدا برای پیش‌بینی دقیق خصوصیات پرش هیدرولیکی، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط چانسون و چاچرو (۲۰۱۱) در فلوم آزمایشگاهی، دو مدل آشفتگی صحت‌سنجی شدند. بررسی انجام شده نشان داد که نتایج مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل $K-\epsilon$ استاندارد بهتر می‌باشد. سپس از این مدل برای شبیه‌سازی پرش در مدل فیزیکی سد مخزنی نمرود استفاده شد. مقادیر محاسبه فشار، توزیع سرعت و پروفیل سطح آب با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه شدند که انطباق خوبی با هم داشتند.

مدل‌های آشفتگی $K-\epsilon$ و RNG استفاده شد. آن‌ها مشاهده نمودند که مقادیر پیش‌بینی‌شده برای پروفیل سرعت و توزیع فشار توسط مدل آشفتگی RNG نسبت به مدل آشفتگی $K-\epsilon$ بهتر می‌باشد. البته دقت هر دو مدل برای پروفیل سرعت در ناحیه تحتانی پرش بهتر از ناحیه فوقانی می‌باشد و این به علت وجود حباب‌های هوا و تلاطم بالای جریان در ناحیه فوقانی پرش می‌باشد. بنابراین همان‌طور که انتظار می‌رود خطا در این ناحیه بیشتر می‌باشد. صباغ و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D به شبیه‌سازی سه‌بعدی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سد نازل‌وچای پرداختند. در گام اول، برای صحت‌سنجی نرم‌افزار در پیش‌بینی پارامترهای جریان در پرش هیدرولیکی از مدل تجربی چانسون و براتبرگ (۲۰۰۰) استفاده شد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل‌های آشفتگی $K-\epsilon$ و RNG مقایسه گردید. نتایج عددی نشان داد که مدل آشفتگی RNG نسبت به مدل $K-\epsilon$ مقادیر پارامترهای جریان را با دقت بیشتر شبیه‌سازی می‌نماید. به همین خاطر، در مرحله بعد، برای شبیه‌سازی حوضچه سد نازل‌وچای از مدل آشفتگی RNG استفاده شد. در پایان، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پروفیل سطح آب و توزیع عمقی سرعت در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی دارای انطباق خوبی می‌باشد. همچنین نرم‌افزار، مقادیر فشار اطراف موانع موجود را با دقت قابل قبولی محاسبه کرده است چرا که در مناطقی که انتظار می‌رود به علت برخورد جریان با موانع فشار افزایش یابد، با توجه به نتایج حاصل، این مسئله به خوبی دیده می‌شود. عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، پرش هیدرولیکی را روی بستر موج‌دار با

¹ Shojaeian & Kashefipour

مواد و روش‌ها

(VOF)، تعیین می‌شود (هیرت و نیکولز، ۱۹۸۱). این

تابع به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) \right] = 0 \quad (5)$$

در این رابطه F بیانگر جزء حجمی اشغال شده توسط سیال می‌باشد. زمانی که F=1 باشد سیال وجود دارد و زمانی که F=0 باشد سیال وجود ندارد.

مشخصات مدل فیزیکی

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج مدل فیزیکی حوضچه آرامش سد مخزنی نیان استفاده شده است. مدل فیزیکی سیستم تخلیه سیلاب این سد در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب با استفاده از مصالح مختلف از جمله پلکسی گلاس و با مقیاس ۱:۵۰ ساخته شده است. سد خاکی نیان در ۸۰ کیلومتری شرق شهر بندرعباس ساخته شده است. سرریز دریاچه‌دار سد نیان در تکیه‌گاه سمت راست مشرف به بدنه سد قرار دارد.

نوع سد: خاکی با هسته رسی، طول تاج سد: ۵۱۰ متر، عرض تاج سد: ۸ متر، رقوم تاج سد: ۱۴۲/۳۰ متر، ارتفاع سد از بستر رودخانه: ۲۷/۳۰ متر و رقوم حداکثر ذخیره سیلاب: ۱۳۷ متر. نوع سرریز: اوجی دریاچه‌دار، معادله منحنی سرریز: $y=0.0071 x^{1/85}$ ، رقوم کف کانال تقریب: ۱۲۳ متر، رقوم آستانه سرریز: ۱۲۸ متر، ارتفاع آستانه سرریز: ۵ متر، عرض ناخالص سرریز: ۵۶ متر، عرض خالص سرریز: ۴۴ متر، تعداد پایه‌ها: ۳ عدد، ضخامت پایه‌ها: ۴ متر، طول پایه‌ها: ۱۵/۹ متر، تعداد دریاچه‌های قطاعی: ۴ عدد و ابعاد دریاچه‌ها: ۹/۳۸ × ۱۱ متر «ارتفاع × عرض». طول کانال تندآب: ۴۸/۳ متر، رقوم ابتدای حوضچه آرامش: ۱۰۰ متر، عرض حوضچه آرامش: ۵۶ متر، رقوم کانال تندآب: ۱۲۰/۱۲ متر، رقوم انتهای کانال تندآب: ۱۰۲ متر، عرض ناخالص تندآب: ۵۶ متر و شیب تندآب: ۳۷/۵ درصد. طول کف حوضچه آرامش: ۱۰۲ متر، رقوم بستر رودخانه: ۱۱۲ متر، رقوم روی آستانه انتهای حوضچه آرامش: ۱۰۵ متر و رقوم کف پایاب حوضچه آرامش: ۱۰۲ متر. پایاب حوضچه آرامش به بستر رودخانه بصورت سطح شیب‌دار اجرا شده است.

معادلات حاکم

نرم افزار Flow-3D یک بسته نرم‌افزاری جامع در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است. این بسته نرم‌افزاری از تکنیک‌های عددی پیشرفته‌ای برای حل معادلات سه‌بعدی حرکت سیال در مسائل چند فازی استفاده می‌کند. امروزه این نرم‌افزار برای مدل کردن جریان‌های سطح آزاد سه‌بعدی غیرماندگار با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی دارد. در این نرم‌افزار از روش حجم سیال (VOF) برای محاسبه سطح آزاد استفاده می‌شود. جهت شناسایی مرزهای جامد، این نرم‌افزار، از تکنیک عددی پیشرفته و انحصاری FAVOR استفاده می‌کند. استفاده از این تکنیک باعث شده که شبکه‌بندی و هندسه، مستقل از یکدیگر باشند (ماروسی و همکاران ۱۳۹۳). معادلات حاکم بر جریان، معادلات مومنتم و پیوستگی هستند که شامل متغیرهای VOF و FAVOR بوده و برای یک جریان غیرقابل تراکم به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial}{\partial x} (uA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (vA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (wA_z) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(vA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + f_z \quad (4)$$

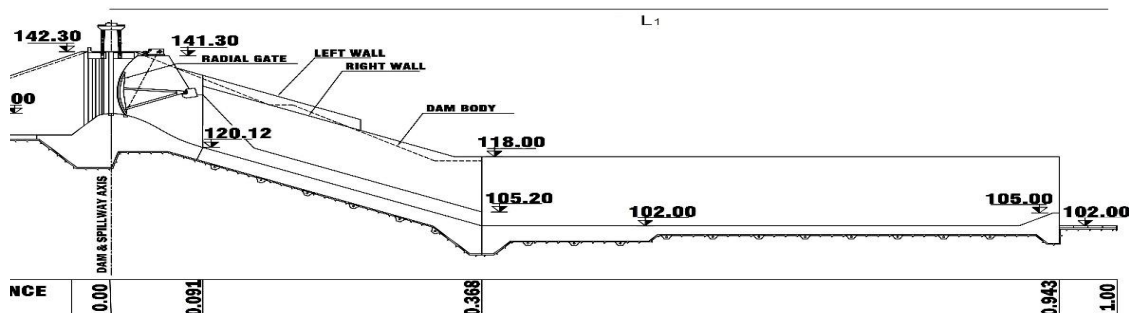
در روابط بالا متغیرهای u، v و w مبین سرعت در جهت‌های x، y و z، VF، جز حجمی باز برای جریان، Ax، Ay، Az مساحت جزئی باز برای جریان در جهت‌های x، y، z، شتاب گرانش در جهت‌های x، y، z، شتاب‌های ویسکوز در جهت‌های x، y، z، فشار و P، دانسیته سیال می‌باشد. ساختار و پیکربندی سیال توسط تابع حجم سیال

مقطع (مقاطع ۱ تا ۱۰) پیزومتر نصب گردیده است. در مجموع برای اندازه‌گیری فشار از ۴۰ پیزومتر در کف حوضچه آرامش مطابق شکل (۴) و جدول (۲) استفاده شده است. پارامتر L_1 برابر طول افقی کل مدل عددی و پارامتر L نیز طول حوضچه آرامش می‌باشد. در شکل (۳) نحوه وقوع پرش‌های هیدرولیکی در مدل فیزیکی در دو عدد فرود ورودی پرش هیدرولیکی $4/48$ و 4 (دبی 1500 و 2500 مترمکعب بر ثانیه) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با کاهش عدد فرود ورودی پرش (افزایش دبی)، پنجه پرش به سمت انتهای تندآب حرکت کرده است و بر میزان تلاطم و آشفتگی جریان افزوده شده است.

انتهای حوضچه دارای آستانه انتهایی سراسری به شکل مقطع دوزنقه می‌باشد. در جدول (۱)، شرایط هیدرولیکی سرریز سیستم تخلیه سیلاب این سد آورده شده است. در شکل‌های (۱) و (۲) به ترتیب، مقطع طولی و مدل آزمایشگاهی سیستم تخلیه سیلاب سد نیان نشان داده شده است. لازم به توضیح است که پارامتر h ، بیانگر اختلاف تراز کف حوضچه آرامش تا کف کانال تقرب می‌باشد. اندازه‌گیری عمق جریان در حوضچه آرامش در سه مقطع عرضی (K, J, I) انجام پذیرفت که مشخصات مقاطع و موقعیت آن‌ها در شکل (۴) و جدول (۲) ارائه شده است. در کف حوضچه در چهار امتداد (امتداد محورهای دهانه‌های سرریز) و ۱۰

جدول (۱): شرایط هیدرولیکی سرریز سیستم تخلیه سیلاب سد نیان

ارتفاع آب روی سرریز (Z/h)	دبی واحد سرریز (متر مکعب بر ثانیه بر متر)	دبی (متر مکعب بر ثانیه)
۰/۴۲۹	۵۷	۲۵۰۰
۰/۵۹۵	۹۳	۴۱۰۰
۰/۶۴۳	۱۰۵	۴۶۰۰



شکل (۱): مقطع طولی سیستم تخلیه سیلاب سد نیان



شکل (۲): مدل فیزیکی سیستم تخلیه سیلاب سد نیان در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات آب

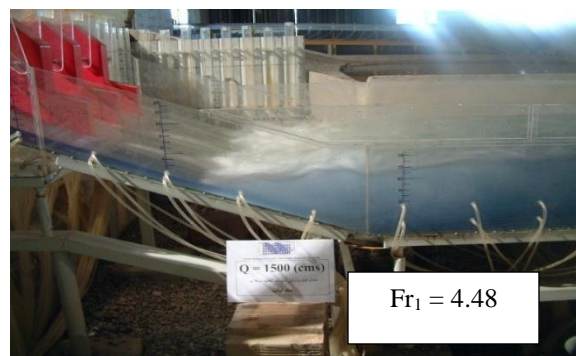
مدل سازی و شبیه سازی مدل در نرم افزار جهت شبیه سازی عددی معادلات حاکم بر این جریان ها از نرم افزار Flow-3D استفاده شده است. این نرم افزار توانایی محاسباتی بالایی در جریان های با سطح آزاد دارد و معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از روش حجم محدود حل می کند. محیط جریان به شبکه ای با سلول های مستطیلی ثابت تقسیم بندی می شود. در این نرم افزار از دو تکنیک عددی حجم سیال (VOF) برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد و کسر مساحت- حجم مانع (FAVOR) برای شبیه سازی سطوح و اجسام صلب مثل مرزهای هندسی استفاده می شود (شجاعیان و کاشفی پور ۲۰۱۲). جهت تخمین پروفیل سطح آزاد از تابع حجم سیال (VOF)، یعنی $F(x,y,z)$ استفاده می شود. این تابع مقدار حجم سیال را در سلول محاسباتی نشان می دهد و به وسیله معادله (۸) بیان می شود.

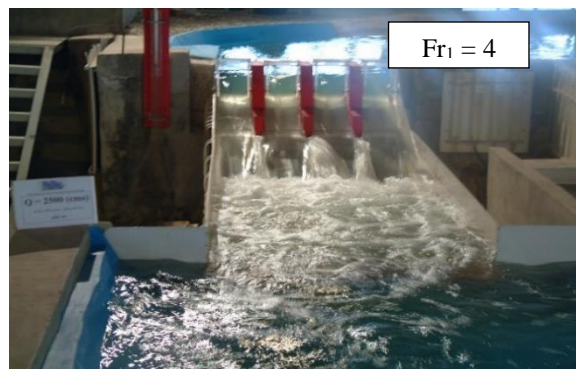
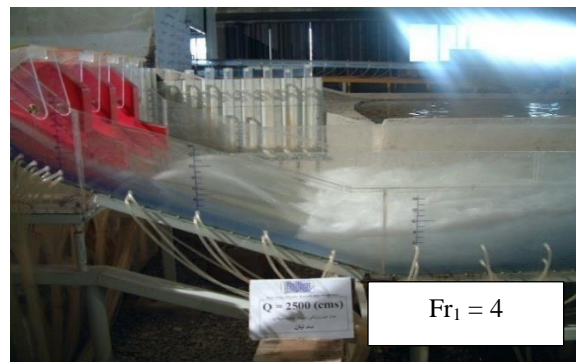
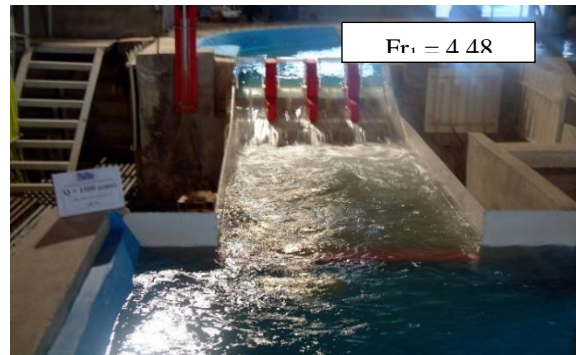
مدل سازی و شبیه سازی مدل در نرم افزار جهت شبیه سازی عددی معادلات حاکم بر این جریان ها از نرم افزار Flow-3D استفاده شده است. این نرم افزار توانایی محاسباتی بالایی در جریان های با سطح آزاد دارد و معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از روش حجم محدود حل می کند. محیط جریان به شبکه ای با سلول های مستطیلی ثابت تقسیم بندی می شود. در این نرم افزار از دو تکنیک عددی حجم سیال

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) \right] = 0 \quad (8)$$

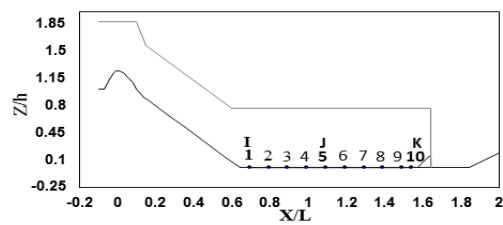
جدول (۲): موقعیت ایستگاه ها جهت اندازه گیری پارامترهای هیدرولیکی

موقعیت ایستگاه	فاصله تا ابتدای دستگاه مختصات در مدل عددی (X/L_1)	فاصله تا ابتدای حوضچه در مدل عددی (X/L)
۱ یا I	۰/۴۸	۰/۰۵
۲	۰/۵۲۸	۰/۱۵
۳	۰/۵۷	۰/۲۵
۴	۰/۶۱۱	۰/۳۴
۵ یا J	۰/۶۶۱	۰/۴۵
۶	۰/۷۰۶	۰/۵۵
۷	۰/۷۵۱	۰/۶۵
۸	۰/۷۹۶	۰/۷۵
۹	۰/۸۴۲	۰/۸۵
۱۰ یا K	۰/۸۶۴	۰/۹





شکل (۳): پرش‌های هیدرولیکی در اعداد فرود مختلف در مدل فیزیکی



شکل (۴): مقاطع اندازه‌گیری عمق آب و فشار در کف حوضچه آرامش



مطابق رابطه $\frac{n_p}{n_m} = (M_L)^{1/6}$ با هم مرتبط می‌گردند، لذا ضریب زبری مورد نیاز در مدل برابر خواهد بود با:

$$n_m = \frac{n_p}{(M_L)^{1/6}} = \frac{0.014}{(50)^{1/6}} = 0.0073 \quad (9)$$

ضریب زبری پلکسی گلاس که خوب پرداخت شده و هیچ‌گونه ناصافی ندارد معادل 0.0085 می‌باشد که کمی زبرتر از مقدار مورد نیاز می‌باشد. لذا باتوجه به اینکه مدل ساخته شده در نرم‌افزار مربوط به مدل پروتوتیپ می‌باشد، ضریب زبری کف معادل 0.014 متر در نظر گرفته شده است. استفاده از شبکه 40 سانتی‌متر برای کل مدل، مدت زمان اجرای برنامه و حجم اطلاعات خروجی را به شدت افزایش داده و نیز استفاده از شبکه 70 سانتی‌متری برای کل مدل، دقت محاسبات را می‌کاهد. در شکل (۶)، دو مش بلوک در نظر گرفته شده نشان داده شده است. شرایط مرزی مدل در ورودی کانال تقرب جریان با فشار مشخص (تراز آب در بالادست - specified pressure)، در کناره‌های مرز صلب (wall)، در مرز بالایی و مرز میانی دو مش بلوک به صورت قرینه و در مرز خروجی پایاب به صورت تراز آب در پایین‌دست - specified pressure تعریف شده است. در شکل (۸) نمایی از شرایط مرزی مدل نشان داده شده است. شبیه‌سازی عددی برای دو عدد فرود 4 و $4/48$ صورت گرفت. همچنین با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه مدل‌سازی عددی، بهترین مدل‌های آشفتگی جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی جریان عبوری از سرریز، شوت و حوضچه آرامش مدل‌های $K-\epsilon$ و LES می‌باشند (رحیم زاده^۱ (۲۰۱۴)) که در این پروژه از هر سه مدل استفاده شده است.

لذا در مجموع، 6 شبیه‌سازی جریان عبوری از سیستم تخلیه سیلاب این سد انجام شده که جزئیات آن‌ها در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۳): خواص فیزیکی آب در دمای 20 درجه

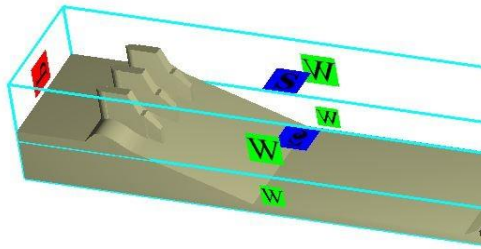
سلسیوس

در مدل‌سازی عددی حوضچه آرامش سد نیان به جهت مدل‌سازی دقیق‌تر و کارآمدتر، قسمت اعظم سیستم تخلیه سیلاب این سد مدل شده است. هر سه پایه موجود روی سرریز و همچنین سازه شوت نیز مدل شده است.

حوضچه آرامش نیز به همراه آستانه پایانی سرتاسری آن مطابق نقشه مدل واقعی شبیه‌سازی گردید. در شکل (۵) هندسه مدل رسم شده در نرم‌افزار AutoCad نشان داده شده است. آب، سیال جریان یافته در کانال است که تمامی خواص آن مرتبط با دمای 20 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. برخی از این خواص در جدول (۳) نشان داده شده است. همچنین در مدل‌سازی، شتاب گرانش 9.81 متر بر مجذور ثانیه و فشار اتمسفر 101325 پاسکال در نظر گرفته شده است. اندازه شبکه در اکثر شبیه‌سازی‌های انجام شده در دبی‌های متفاوت به این صورت در نظر گرفته شد که تا تراز $Z/h' = 0.8$ از کف مدل، ابعاد هر سلول 40 سانتی‌متر و از تراز $Z/h' = 0.8$ تا $Z/h' = 2$ از کف مدل (حدود $Z/h' = 0.225$ بالاتر از بالاترین تراز پایه‌های سرریز)، 70 سانتی‌متر مد نظر قرار گرفت. h' ، تراز کف کانال تقرب در مدل عددی می‌باشد (25 متر). علت استفاده از این نوع مش‌بندی این است که علاوه بر افزایش دقت شبیه‌سازی، تغییرات اندازه شبکه‌ها نیز به تدریج صورت گیرد و همچنین نسبت اندازه شبکه بلوک‌ها از مقدار مجاز 3 (پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار) برای شبکه‌های مجاور بیشتر نشود. یکی از پارامترهایی که در شبیه‌سازی باید رعایت گردد زبری سطح آبراهه یا مجرای سازه در مدل می‌باشد. عمدتاً قسمت‌هایی که در نمونه واقعی از بتن ساخته می‌شود در مدل فیزیکی از جنس شفاف پلکسی گلاس استفاده به عمل می‌آید. از آن‌جا که ضریب زبری بتن در نمونه واقعی حدود 0.014 می‌باشد و ضرایب زبری در مدل و نمونه واقعی

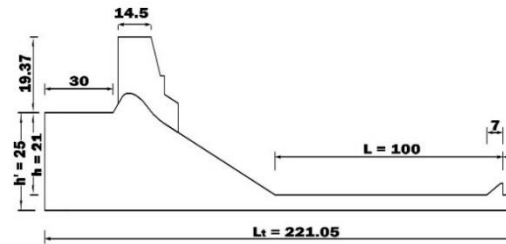
¹ Rahimzadeh

شکل (۶): شبکه بندی مدل عددی



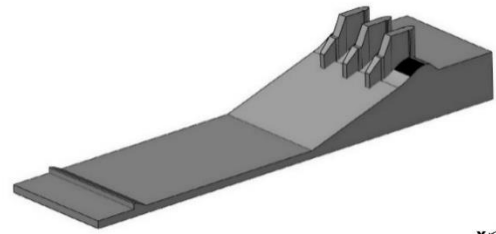
شکل (۷): شرایط مرزی مدل عددی

کشش سطحی (KN/m)	زاویه تماس (درجه)	لزجت ($\text{KN}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)	چگالی (Kg/m^3)
۰/۰۷۳	۹۰	۰/۰۰۱	۱۰۰۰

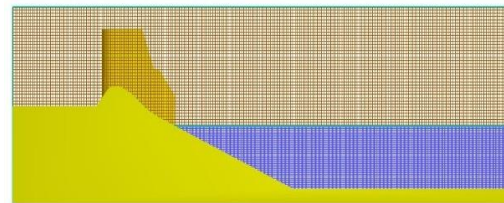


جدول (۴): جزئیات اجراهای انجام شده توسط سه مدل حل آشفتگی

ردیف	Fr_1	تراز سطح آب بالادست (Z/h')	تراز سطح آب پایین دست (Z/h')
۱	۴/۴۸	۱/۴۷۷	۰/۷۰۱
۲	۴	۱/۵۸	۰/۷۴



شکل (۵): هندسه و مدل سه بعدی سیستم تخلیه سیلاب سد نیان جهت شبیه سازی عددی



است. لازم به ذکر است که در این جداول پارامتر B، بیانگر عرض حوضچه آرامش می باشد.

در جداول (۵) و (۶) و شکل (۸) جزئیات سیال در شرایط اولیه جریان در دو ناحیه ۱ و ۲ نشان داده شده

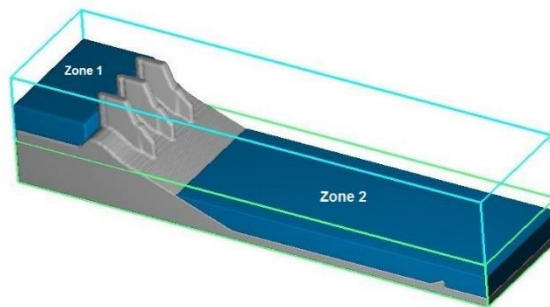
جدول (۵): جزئیات شرایط اولیه جریان در ناحیه ۱

موقعیت شرایط اولیه جریان						Fr_1	ردیف
Z_2/h'	Z_1/h'	Y_2/B	Y_1/B	X_2/L	X_1/L		
۱/۴۷۷	۱	۱	۰	۰/۳	۰	۴/۴۸	۱
۱/۵۸	۱	۱	۰	۰/۳	۰	۴	۲

زمان اجرا برای تمامی اجراها بیش از ۱۰۰ ثانیه، تعداد کل سلول‌های در نظر گرفته شده ۵۰۱۱۰۲۰ و تعداد سلول‌های فعال ۲۸۶۱۴۵۷ عدد می‌باشند

جدول (۶): جزئیات شرایط اولیه جریان در ناحیه ۲

موقعیت شرایط اولیه جریان						ردیف	Fr _i
Z ₂ /h'	Z ₁ /h'	Y ₂ /B	Y ₁ /B	X ₂ /L	X ₁ /L		
۰/۵۶	۰/۱۶	۱	۰	۱	۰/۳۱۷	۴/۴۸	۱
۰/۵۶	۰/۱۶	۱	۰	۱	۰/۳۱۷	۴	۲



شکل (۸): شرایط اولیه مدل عددی

۴ و ۴/۴۸ استفاده گردید. بر همین اساس، مبنای تصمیم‌گیری برای انتخاب بهترین مدل آشفتگی، استفاده از پارامترهای مختلفی مانند جذر مربع متوسط خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و میانگین قدر مطلق خطاها (MAE) می‌باشد که در روابط (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده‌اند:

ارائه و تحلیل نتایج

جهت تحلیل نتایج بدست آمده از مدل‌های عددی انجام شده، که مشخصات آن‌ها در بخش‌های قبلی ارائه گردید، دو پارامتر هیدرولیکی جریان، یعنی عمق و فشار مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار از سه مدل آشفتگی مختلف K- ϵ , RNG و LES در دو عدد فرود

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (o - pr)^2}{N}} \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (o - pr)^2}{\sum_{i=1}^N o^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N pr^2}{N} \right)} \right] \quad (11)$$

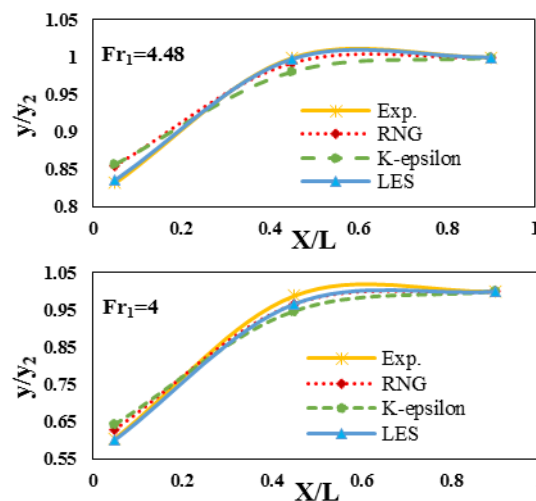
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O - pr| \quad (12)$$

طول حوضچه آرامش نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود هر سه مدل آشفتگی توانایی خوبی در شبیه‌سازی عمق جریان دارند. جهت بررسی و مقایسه بهتر نتایج، جدول (۷) در ادامه ارائه شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی، طبق جدول (۷) مشاهده می‌شود که ضریب R^2 در هر سه مدل آشفتگی بزرگتر از $0/99$ می‌باشد که حاکی از نزدیکی نتایج بدست آمده از هر سه مدل عددی با مدل آزمایشگاهی می‌باشد.

در روابط فوق، O مقدار واقعی متغیر وابسته، pr مقدار پیش‌بینی شده متغیر و N تعداد متغیرها می‌باشد. هرچه مقدار عددی $RMSE$ و MAE به صفر و مقدار عددی R^2 به یک نزدیک‌تر باشد، جواب بهتری برای مدل حاصل شده است. لازم به ذکر است که $RMSE$ و MAE نشان‌دهنده میزان خطای مدل و R^2 نشانگر میزان بازده مدل می‌باشند. شکل (۹) نتایج عددی و آزمایشگاهی عمق متوسط مقطع جریان را در

جدول (۷): ارزیابی عملکرد مدل‌های آشفتگی در تخمین عمق جریان

مدل آشفتگی	R^2	RMSE	MAE
K-ε	0/9971	0/60	0/47
RNG	0/9947	0/82	0/43
LES	0/9998	0/15	0/15



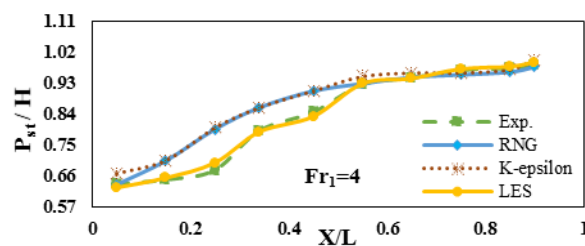
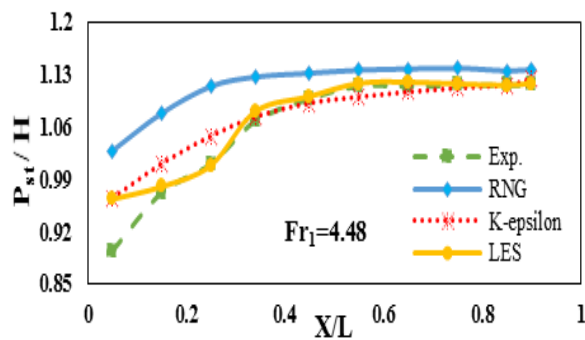
شکل (۹): مقایسه پروفیل سطح آب در مدل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی

دو مدل K-ε و RNG در شبیه‌سازی پروفیل سطح آب تقریباً مشابه می‌باشد. جهت بررسی فشار، میانگین فشار در هر مقطع (۱۰ مقطع) محاسبه گردید و با نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی مقایسه گردید که

همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین دقت در مدل‌سازی عمق جریان مربوط به مدل آشفتگی LES یا مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ می‌باشد که گویای نتایجی بسیار دقیق می‌باشد. مشاهده می‌شود نتایج هر

در شکل (۱۳) بزرگای سرعت نشان داده شده است، که بیشترین نرخ سرعت دقیقاً قبل پرش هیدرولیکی و در انتهای تندآب می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌گردد سرعت جریان در ابتدای حوضچه در کف بسیار بالا بوده که ناشی از برخورد شدید جریان روی تندآب به کف حوضچه می‌باشد، که این شدت در دبی بالاتر بیشتر شده است. سرعت ورودی به پرش هیدرولیکی توسط پارامتر V_1 در نظر گرفته شده است.

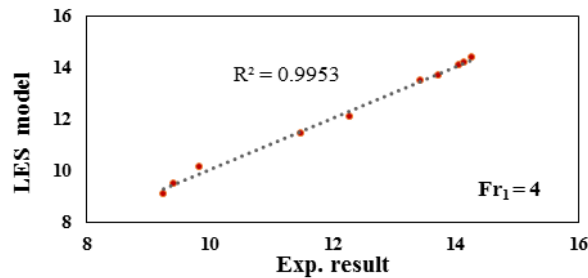
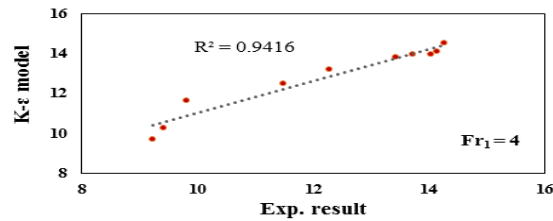
در ادامه به بررسی این پارامتر پرداخته شده است. نتایج بدست آمده در جدول (۸) و شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) ارائه شده است. همان‌گونه که از شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) و جدول (۸) مشخص می‌باشد، بهترین مدل آشفتگی جهت تخمین فشار استاتیکی جریان در حوضچه آرامش سد نیان، مدل LES بوده و پس از آن نیز مدل RNG با اختلاف ناچیز بهتر از مدل K- ϵ می‌باشد. در ادامه، تصاویری از نتایج مدل‌سازی در دبی و مدل‌های آشفتگی مختلف، در حالت دو و سه‌بعدی ارائه شده است.



شکل (۱۰): مقایسه فشار متوسط جریان در مدل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی

جدول (۸): ارزیابی عملکرد مدل‌های آشفتگی در تخمین فشار جریان

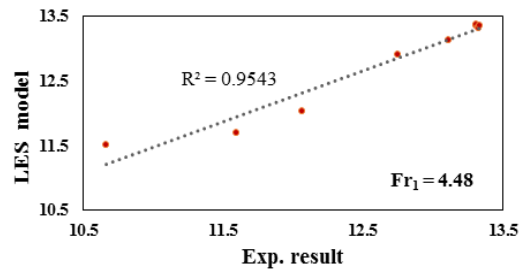
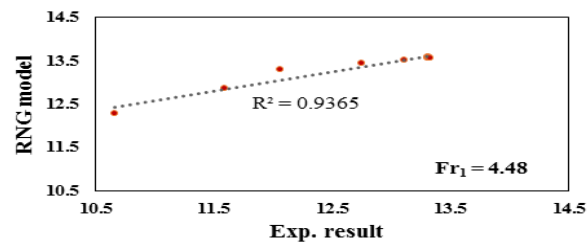
مدل آشفتگی	R^2	RMSE	MAE
K- ϵ	۰/۹۹۱۸	۰/۹۷۹۶	۰/۶۵۶۶
RNG	۰/۹۹۳۴	۰/۸۷۷۰	۰/۵۶۰۱
LES	۰/۹۹۹۷	۰/۲۱۵۸	۰/۱۱۷۰



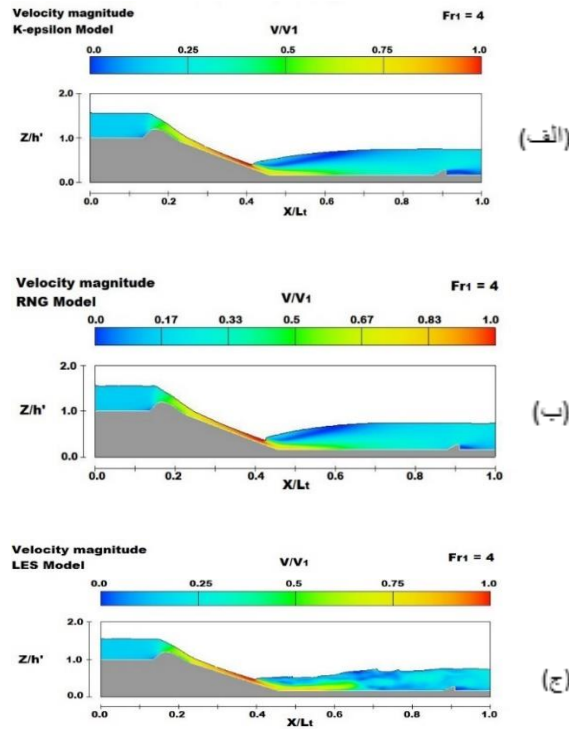
شکل (۱۱): مقایسه مدل آشفتگی K- ϵ و LES در تخمین فشار جریان

حوضچه و سرعت در سطح جریان. سرعت در کف مثبت و مقداری بزرگ، سرعت در سطح پرش کوچک و حتی منفی می‌باشد، که این مسئله، خود نشانگر وجود گردابه و تلاطم شدید و اتلاف انرژی در این ناحیه می‌باشد

در شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، تغییرات سرعت جریان در راستای محور x (محور طولی حوضچه) به همراه بردارهای سرعت و همچنین خطوط هم‌سرعت مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌گردد که در ناحیه رخداد پرش، دو بخش سرعت قابل رؤیت است: سرعت در نزدیکی کف

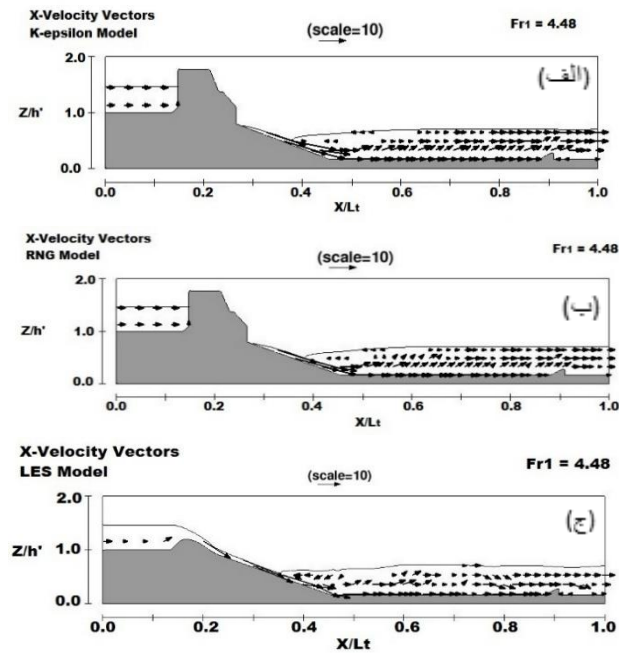


شکل (۱۲): مقایسه مدل آشفتگی RNG و LES در تخمین فشار جریان



شکل (۱۳): مقایسه سرعت در $Fr_1=4$ توسط سه مدل آشفتگی (الف)

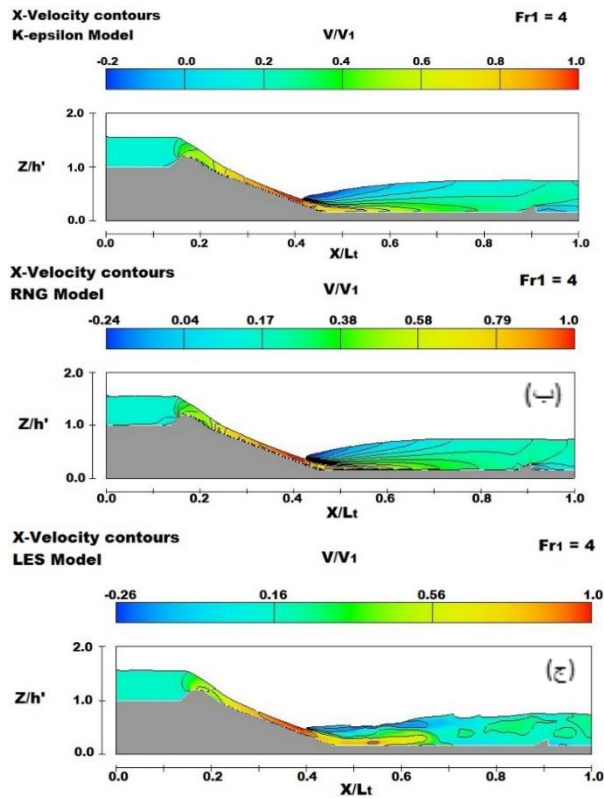
LES (ب) و RNG (ج) و K-ε



شکل (۱۴): بردارهای سرعت در جهت x در $Fr_1=4.48$ بدست آمده

توسط مدل‌های آشفتگی (الف) K-ε، (ب) RNG و (ج) LES

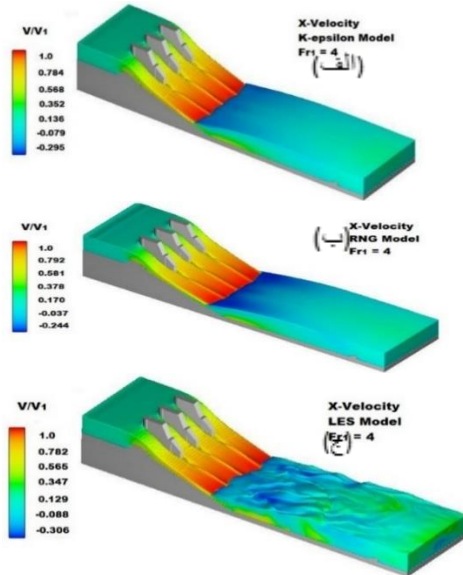
(الف)



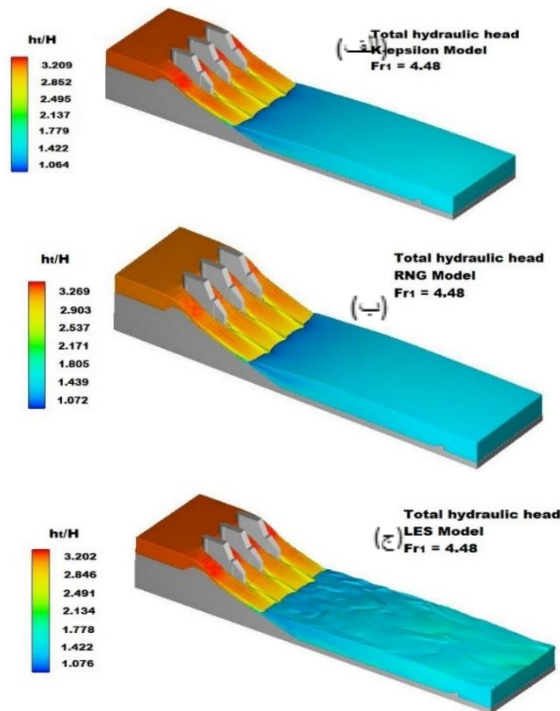
شکل (۱۵): منحنی‌های سرعت در جهت x در $Fr_1=4$ بدست آمده توسط مدل‌های آشفتگی (الف) $K-\epsilon$ ، (ب) RNG و (ج) LES

مدل دیگر، توانایی خوبی در شبیه‌سازی تلاطم و گردابه‌های جریان دارد که این مسئله در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) قابل رؤیت می‌باشد.

پارامترهای H و ht به ترتیب بیانگر ارتفاع (هد) آب مخزن و ارتفاع هیدرولیکی کل جریان در نقاط مختلف می‌باشند. مشاهده می‌شود که مدل LES برخلاف دو



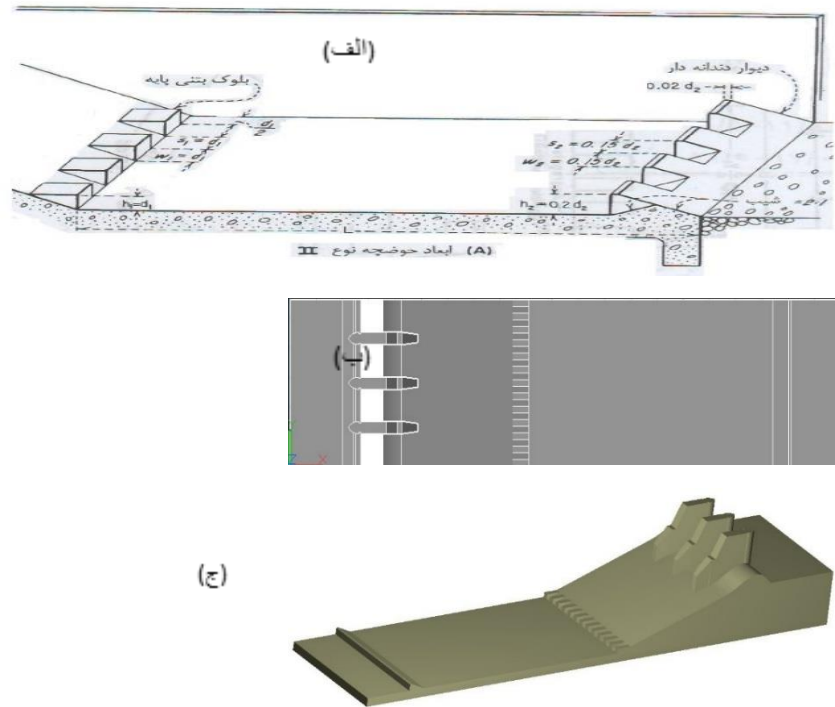
شکل (۱۶): نمای سه بعدی سرعت در جهت x در $Fr_1=4$ بدست آمده توسط مدل های آشفتگی (الف) K- ϵ ، (ب) RNG و (ج) LES



شکل (۱۷): نمای سه بعدی انرژی هیدرولیکی کل در $Fr_1=4.48$ بدست آمده توسط مدل های آشفتگی (الف) K- ϵ ، (ب) RNG و (ج) LES

جهت این کار از ۱۳ بلوک به عرض، ارتفاع و فاصله بینابینی ۲/۲۴ متر استفاده گردید (مطابق شکل (۱۸)). در ادامه نتایج اجرا با زمان ۱۲۵ ثانیه توسط مدل LES آورده شده است و به تحلیل و مقایسه آن با مدل اولیه پرداخته شده است.

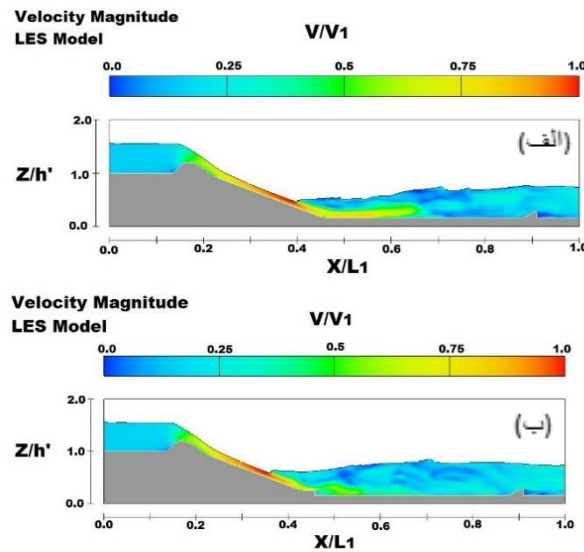
جهت بهبود عملکرد حوضچه آرامش سد نیان، مدلی پیشنهادی با در نظر گرفتن بلوک‌های منقطع در پای تندآب و ورودی حوضچه آرامش با ابعاد و اندازه بلوک‌های حوضچه استاندارد تیپ دو USBR، در عدد فرود ۴ ورودی پرش، مدل‌سازی و شبیه‌سازی گردید.



شکل (۱۸): (الف) ابعاد حوضچه تیپ دو استاندارد، (ب) پلان و (ج) مدل سه‌بعدی پیشنهادی به همراه بلوک‌های پای تندآب

درصدی در مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. سرعت بیشینه ورودی پرش هیدرولیکی (بر روی سازه شوت) در مدل پیشنهادی نیز با کاهش ۴/۵ درصدی همراه است.

باتوجه به شکل (۱۹)، مشاهده می‌گردد پنجه پرش در مدل پیشنهادی در حدود ۱۰ متر به بالادست منتقل شده و از حوضچه دور شده است، همچنین حداکثر سرعت در مقطع ورودی به حوضچه آرامش کاهش ۴۰



شکل (۱۹): تغییرات سرعت برآیند به ترتیب در (الف) مدل اولیه و (ب) ثانویه در $Fr_1=4$

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی جریان درون حوضچه آرامش دارند. همچنین مزیت دیگر مدل LES نسبت به مدل‌های RNG و K-ε، توانایی بالای آن در شبیه‌سازی تلاطم و اغتشاشات سطحی جریان می‌باشد که این مسئله، خود می‌تواند دیدی بهتر از شرایط واقعی جریان دهد. جهت پیشنهاد برای بهبود عملکرد حوضچه آرامش سد نیان، مدلی پیشنهادی با فرض وجود بلوک‌های پای تندآب در مقطع ورودی حوضچه (مطابق با ابعاد بلوک حوضچه استاندارد تیپ دو USBR) با استفاده از مدل LES شبیه‌سازی گردید. نتایج بدست آمده در مدل پیشنهادی حاکی از کاهش ۴۰ درصدی سرعت در مقطع ورودی حوضچه و کاهش ۴/۵ درصدی در مقطع ورودی پرش بر روی سازه شوت می‌باشد. بدین ترتیب، بلوک‌های پای تندآب تأثیر بسزایی در جلوگیری از برخورد ضربه شدید جت جریان ناحیه تحتانی پرش به کف حوضچه آرامش داشته و باعث کاهش سرعت در حوضچه آرامش می‌گردند.

در این مطالعه، شرایط جریان در حوضچه آرامش سد مخزنی نیان به کمک نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی گردید. در مدل‌سازی، از معادلات ناویر استوکس جهت حل میدان جریان، از مدل حجم سیال (VOF) جهت تعیین پروفیل سطح آب و از مدل‌های آشفتگی K-ε، RNG و LES برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شد. صحت نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از مدل فیزیکی حوضچه آرامش سد نیان در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب بررسی گردید. با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، بهترین مدل آشفتگی جهت شبیه‌سازی جریان درون حوضچه آرامش، مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) با بالاترین ضریب تبیین و با کمترین میزان خطا نسبت به دو مدل RNG و K-ε تعیین گردید. مدل‌های آشفتگی RNG و K-ε به ترتیب پس از مدل LES توانایی بسیار خوبی در

				فهرست علائم			
فشار نوسانی در جهت X_i	p	سرعت متوسط	V_1				
لزجت مولکولی (سینماتیکی)	ν	سرعت متوسط در جهت X	u				
متوسط نسبت مساحت جریان در جهت‌های X, Y و Z	A	سرعت متوسط در جهت X_i	\bar{U}_i	ضریب انطباق	R^2	اختلاف تراز کف	h
مقدار پیش‌بینی شده	pr	سرعت متوسط در جهت Y	v	ضریب زبری در مدل	n_m	حوضچه تا کف کانال تقرب	
مقدار واقعی متغیر وابسته	O	سرعت متوسط در جهت Z	w	ضریب زبری در نمونه واقعی	n_p	انرژی جنبشی	k
میانگین قدرمطلق خطاها	MAE	سرعت نوسانی در جهت X	u'	طول حوضچه آرامش	L	برعکس مقیاس طول ساخت مدل	M_L
نسبت حجم باز به جریان	V_F	سرعت نوسانی در جهت X_i	u_i	طول حوضچه آرامش	L_t	پخش مولکولی	λ
هد آب مخزن	H	سرعت نوسانی در جهت Y	v'	عدد فرود ورودی به پرش هیدرولیکی	Fr_1	تابع حجم سیال (VOF)	$F(x, y, z)$
هد هیدرولیکی کل جریان	h_t	سرعت نوسانی در جهت Z	w'	عرض حوضچه آرامش	B	تراز کف کانال تقرب در مدل عددی	h'
شتاب نقل در جهت X_i	g_i	سرعت ورودی پرش هیدرولیکی	V_1	عمق ثانویه پرش هیدرولیکی	γ_2	ثابت تجربی معادله $K-\epsilon$	σ_k
				عمق فوق بحرانی در پنجه پرش	γ_1	ثابت تجربی معادله $K-\epsilon$	σ_ϵ
				فاصله آکس سد تا 10 متر پایین دست حوضچه	L_1	ثابت تجربی معادله $K-\epsilon$	C_1
				فشار استاتیکی جریان	P_{st}	ثابت تجربی معادله $K-\epsilon$	C_2
				فشار لحظه‌ای	p	جرم حجمی مرجع	ρ
				فشار متوسط	\bar{p}	ریشه مربع متوسط خطا	$RMSE$
						سرعت لحظه‌ای در جهت X_i	U_i

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از گروه سازه‌های هیدرولیکی مؤسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو به دلیل همکاری در انجام این پژوهش تشکر نمایند.

منابع

- ماروسی، م.، روشن، ر. و سرکرده، ح. ۱۳۹۳. تحلیل و طراحی با نرم‌افزار FLOW-3D، انتشارات فدک ایستاتیس.
- A. Abbaspour, Farsadizadeh, D., Dalir, A.H., Sadraddini, A., Numerical study of hydraulic jumps on corrugated beds using turbulence models. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, Vol. 33, No. 1, pp. 61-72, 2009. (In Persian).
- A.A. El-Masry, Minimization of scour downstream heading-up structures using double line of angle baffles. In: Proc. of sixth International Water Technology Conference (IWTC), Alexandria, Egypt, 2001.
- A.A. El-Masry, Sarhan, T.E., Minimization of scour downstream heading-up structure using a single line of angle baffles. Engineering Research Journal of Helwan University, Vol. 69, 2000.
- A.A. Salehi Neyshabouri, Nasiri Saleh, F., Turbulence Models and Their Application in Hydraulics. Tarbiat Modares University Press, 2008. (In Persian).
- A. Goel, Verma, D.V.S., Development of Economical Energy Dissipators for Pipe Outlets with Low Inflow Froude Numbers. Asian Institute of Technology, Thailand, 2000.
- A. Goel, Verma, D.V.S., Improved design of energy dissipators for pipe outlets. Journal of Irrigation and Drainage Systems, Vol. 13, No. 4, pp. 313-320, 1999.
- A. Gonzalez, Bombardelli, F., Two-phase flow theory and numerical models for hydraulic jumps including air entrainment. Proc. XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea, 2005.
- A.J. Peterka, Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, Engineering Monograph No. 25, US Bureau of Reclamation, Denver, USA, 1958.



- A.J. Peterka. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipaters, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1978.
- A.M. Gharangik, Chaudhry, M.H., Numerical model of hydraulic jump. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, pp. 1195-1209, 1991.
- D.H. Tang, Pinder, G.F., Solution of an inverse problem in groundwater flow using uncertain data. In: G.A. Keramidas, Brebbia C.A. (Eds.) Computational Methods and Experimental Measurements. Springer, Berlin, https://doi.org/10.1007/978-3-662-11353-0_5, 1982.
- D. Long, Steffler, P., Rajaratnam, N., A numerical study of submerged hydraulic jumps. Journal of Hydraulic Research, Vol. 29, No. 3, pp. 293-308, 1991.
- D. Long, Rajaratnam, N., Steffler, M.P., Smy, P.R., Structure of flow in hydraulic jumps, Journal of Hydraulic Research, Vol. 29, No. 2, pp. 207-218, 1991.
- D.L. Vischer, Hager, W.H., Energy Dissipaters. Swiss Federal Institute of Technology, ETH, Zurich, Switzerland, 1995.
- F.J. Resch, Leutheusser, H.J., Reynolds stress measurements in hydraulic jumps. Journal of Hydraulic Research, Vol. 10, No. 4, pp. 409-430, 1972.
- F.S.F. Abdelhaleem, Effect of semi-circular baffle blocks on local scour downstream clear-overfall weirs. Ain Shams Engineering Journal, Vol. 4, No. 4, pp. 675-684, 2013.
- G. Heidarinejad, Advanced Fluid Mechanics. Tarbiat Modares University Press, 2014. (In Persian).
- G. Heidarinejad, an Introduction to Turbulence. Tarbiat Modares University Press, 2009. (In Persian).
- Goel, A., Experimental study on stilling basins for square outlets. Third WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics, Spain, December 14-16, pp. 157-162, 2007.
- H. Chanson, Air Bubble Entrainment in Hydraulic Jumps Similitude and Scale Effects. Dept. of Civil Engineering, the University of Queensland, Brisbane, Australia, 2006.
- H.L. Tiwari, Design of stilling basin with impact wall and end sill. International Research Journal of Recent Sciences, Vol. 2, No. 3, pp. 59-63, 2013.
- H.L. Tiwari, Gahlot, V.K., Tiwari, S., Reduction of scour depth downstream of stilling basin. International Research Journal of Engineering Sciences, Vol. 2, No. 7, pp. 20-25, 2013.
- H.L. Tiwari, Pawar, A., Gehlot, B.K., Singh, J., Study of shape of intermediate sill on the design of stilling basin model. International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET), Vol. 3, No. 4, pp. 133-138, 2014.
- H.L. Tiwari, Tiwari, S., Design of stilling basin models with intermediate sill. Journal of Science, Technology and Management, Vol. 2, No. 4, pp. 66-71, 2013.
- H. Rahimzadeh, Maghsoodi, R., Sarkardeh, H., Tavakkol, S., Simulating flow over circular spillways by using different turbulence models. Journal of Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 6, No. 1, pp. 100-109.
- J.C.C. Amorim, Rodrigues, C.R., Marques, M.G., A numerical and experimental study of hydraulic jump stilling basin. Advances in Hydro-science and Engineering, International Conference on Hydro-science and Engineering, 2004.
- M.A. Abdelazim, a Hybrid Approach to Improve Design of Stilling Basin. Nile Basin Capacity Building Network, 2010.
- M.A. Sarker, Rhodes, D.G., Physical modeling and CFD applied to hydraulic jump. XXIX IAHR Congress, Tsinghua University Press, Beijing, 2002.
- M. Bakhtiari, Kashefipor, S.M., Shafaei Bajestan, M., Experimental study of characteristics of hydraulic jump in a rectangular, divergent stilling basin. Fourth National Conference on Management of Irrigation and Drainage Networks, Shahid Chamran University, College of Water Sciences and Engineering, 2013. (In Persian).
- M. Jadidi, Turbulence Modeling. IUT Computational Fluid Dynamics Group, 2011. (In Persian).
- M. Jahan Miri, the Phenomenon of Turbulence in Fluids. Sarvnegar Publisher, 2010. (In Persian).



M. Schwalt, Hager, W.H., Die Strahlbox (The jet box). Schweizer Ingenieur und Architect, Vol. 110, No. 27-28, pp. 547-549, 1992. (In German).

N. Rajaratnam, Hydraulic jump on rough bed. Transaction of the Engineering Institute of Canada, 1968.

Q. Zhao, Misra, S., Numerical study of aturbulent hydraulic jump. Proceeding of 17th Engineering Mechanics Conference, University of Delaware, New York, 2004.

S.R. Sabbagh, Rostami, F., Turbulent modeling effects on finite volume solution of three-dimensional aerated hydraulic jumps using volume of fluid. 12th WSEAS International Conference on Applied Mathematics, Cairo, Egypt, 2007.

S.R. Sabbagh, Shamlou, H., Rostami, R., Numerical study of flow in hydraulic jump stilling basin using VOF method. Second National Conference of Dams and Hydroelectric Power Plants, Tehran, 2008.

V.T. Chow, Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York, 1959.

W. Hager, Bremen, R., Classical hydraulic jump: Sequent depths. Journal of Hydraulic Research, Vol. 27, No. 5, pp. 565-585, 1989.

Z. Shojaeian, Kashefipour, S.M., Numerical modeling of hydraulic jump in stilling basin of Namrood reservoir dam. Journal of Soil and Water, Vol. 23, No. 2, pp. 283-295, 2012. (In Persian).



Numerical Modeling of Hydraulic Jump in Stilling Basin of High Dams

Mahdi Sharbatdar¹, Hojat Karami^{2*}, Hamed Sarkardeh³, Sayed-Farhad Mousavi⁴

Abstract:

The outflow from dams, due to its huge amount of kinetic energy, can cause damages such as scouring of the riverbed or destruction of the equipment. Stilling basins are structures that dissipate the excess flow energy at downstream of dams. One of the most common methods, which is used in hydraulic structures analysis, is numerical simulation. Most of these methods are based on computational fluid dynamics (CFD). With the capabilities of numerical methods and advanced softwares, complex and diverse modes of action can be investigated. In this research, hydraulic jumps in stilling basin at downstream of a high dam is numerically simulated by using three different turbulence models including the standard K- ϵ , RNG and LES models and then the results are compared with the experimental data. According to the results, the best turbulence model was LES model for numerical modeling of flow in the stilling basin. In order to evaluate the effect of chute blocks on the performance of stilling basin, a proposed model assuming standard chute blocks of USBR stilling basin type II is considered and this model is compared with the original model. Results showed a decrease of approximately 40% and 4.5% in the flow velocity, respectively, in the beginning of the stilling basin and incident hydraulic jump section on the chute structure, which reflects the high impact of the chute blocks on the improvement of the performance of this dam's stilling basin.

Keywords: Stilling basin, FLOW-3D, Turbulence model, Hydraulic jump, Chute blocks, high dams

¹ M.Sc. of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, mehdisharbatdar@gmail.com

^{2*} Assistant Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, hkarami@semnan.ac.ir.

³ Assistant Professor, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran, sarkardeh@hsu.ac.ir.

⁴ Professor, Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, fmousavi@semnan.ac.ir