

«یادداشت تحقیقاتی»

علاج بخشی حوضچه‌ی آرامش سد تاریخی فریمان

مسعود هاشمی کربلایی¹، خسرو حسینی^{2*}، حجت کرمی³، ناصر نیک نیا⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سمنان

2- دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

3- استادیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

4- کارشناس، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی

* khhoseini@semnan.ac.ir

چکیده - سد فریمان، یک سد تاریخی در استان خراسان رضوی و در شهری با همین نام است و تاکنون کار آزمایشگاهی و یا بررسی‌های میدانی در هیچ‌یک از سازه‌های این سد از جمله حوضچه‌ی آرامش آن صورت نگرفته است. از آنجایی که حفظ این اثر تاریخی لازم و ضروری است، لذا بایستی عملکرد این سد در شرایط طرح مورد بازنگری قرار گیرد تا سازه‌ی سد در اثر عملکرد نادرست دچار تخریب نگردد. این سد دارای حوضچه‌ی آرامش غیر تیپ برای تخلیه کننده عمقی می‌باشد. در این مقاله، چگونگی عملکرد حوضچه‌ی آرامش این سد با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D بررسی گردیده است. در ابتدا، صحت عملکرد نرم‌افزار در مدل‌سازی پدیده‌ی جریان در حوضچه آرامش با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی به اثبات رسیده است. سپس مدل عددی حوضچه‌ی آرامش سد فریمان ساخته شد و دو مشخصه سرعت و عدد فرود بررسی شده و عملکرد حوضچه‌ی آرامش مورد ارزیابی گرفته است. در این تحقیق مشخص شد که عملکرد این حوضچه برای شرایط طرح مناسب نمی‌باشد. در ادامه طرح پیشنهادی برای تصحیح عملکرد این حوضچه ارائه شد.

کلیدواژه‌گان: حوضچه‌ی آرامش، شبیه‌سازی عددی، صحت‌سنجی، سرعت جریان، عدد فرود، علاج بخشی، حوضچه‌های غیر متعارف.

1- مقدمه

مشخصات جریان مستغرق در یک حوضچه‌ی آرامش با چند پله در انتها را بررسی کردند که در اندازه‌گیری‌های انجام شده مشخص گردید که وقتی نسبت ارتفاع کل پله‌ها به ارتفاع آب در بالادست برابر 0/14 می‌باشد، بیشترین تلفات انرژی مشاهده می‌شود.

Hoseini Sohi et al. (2010) جریان در حوضچه‌ی آرامش سد تالوار را به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی کردند. هدف آن‌ها از این پژوهش، شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌ی آرامش و مطالعه‌ی تأثیرات دبی بر میدان جریان و توزیع فشار و همچنین مقایسه‌ی نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی

معمولاً در پایانه‌ی سازه‌هایی مانند سرریز سدها، تند آب‌ها، آبشارها و دریچه‌ها، به منظور کاهش انرژی زیاد جریان، به سازه‌هایی برای استهلاک انرژی به منظور جلوگیری از فرسایش و حفاظت از تأسیسات پایین‌دست نیاز می‌باشد. Carvalho et al. (2008) پرش هیدرولیکی حوضچه‌ی آرامش پایین‌دست یک سرریز را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند و نتیجه‌گیری شد که مدل عددی، وقوع پرش هیدرولیکی را با موفقیت پیش‌بینی می‌نماید و سازگاری بین نتایج عددی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی رضایت‌بخش است. Ali et al. (2009)

حوضچه آرامش سد فریمان استفاده شده است.

2- صحت‌سنجی نرم‌افزار

در این پژوهش برای صحت‌سنجی نرم‌افزار، از نتایج آزمایشگاهی (Ali et al. (2009) در خصوص تاثیر شکل های مختلف حوضچه آرامش بر طول پرش هیدرولیکی بهره گرفته شده است. شرایط مدل آزمایشگاهی این محققان در کانالی به طول 26، عرض 1 و ارتفاع 1/2 متر که در محدوده دبی های 40 تا 190 لیتر بر ثانیه انجام شده بود، توسط نرم‌افزار Flow-3D به صورت عددی مدل‌سازی گردید. پروفیل‌های سرعت تولید شده در نرم‌افزار با پروفیل‌های سرعت به‌دست آمده در آزمایش مقایسه گردیدند و نتایج بررسی‌ها در خصوص مدل آشفتگی مناسب و ابعاد سلول‌های محاسباتی به شرح زیر می‌باشند.

شبیه‌سازی با چهار مدل آشفتگی One-equation، RNG، k-ε و LES انجام گرفت. به‌منظور ارزیابی مدل عددی، پروفیل سرعت برداشت شده در آزمایشگاه و نتایج عددی با آزمون‌های MAE، RMSE و R² مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بررسی‌ها در جدول 1 آورده شده است. در نهایت مدل آشفتگی RNG با معیار خطای MAE=0.014، RMSE=0.13 و R²=0.84 به‌عنوان بهترین مدل انتخاب گردید.

جدول 1 مقایسه‌ی مدل‌های آشفتگی مختلف با آزمون‌های MAE، RMSE و R²

مدل آشفتگی	MAE	RMSE	R ²
One-equation	0/21	0/26	0/68
RNG	0/014	0/13	0/84
k-ε	0/11	0/23	0/64
LES	0/04	0/28	0/67

برای یافتن بهترین اندازه‌ی شبکه، هندسه‌ی مدل با دو اندازه‌ی شبکه 0/1، 0/1 و 0/01 متر (به ترتیب در جهت-های x، y و z) برای شبکه درشت و 0/05، 0/05 و 0/01 برای شبکه ریز ساخته شده و نتایج آن با آزمون‌های MAE، RMSE و R² مورد ارزیابی قرار گرفت. در این

بود. پس از اجرای شبیه‌سازی عددی، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مدل فیزیکی مقایسه گردید و مشخص شد که نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی به یکدیگر نزدیک هستند. Amorim et al. (2015) جریان در حوضچه‌ی آرامش را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مدل‌سازی کردند. در مدل آزمایشگاهی سطح آب میانگین و فشار لحظه‌ای در نقاط مختلف جریان اندازه‌گیری و همان شرایط به کمک مدل عددی با هدف مقایسه‌ی این دو مدل شبیه‌سازی شد. مقایسه‌ی سطح آب به‌دست‌آمده در مدل‌های عددی و فیزیکی نشان داد که سازگاری خوبی بین مدل آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی وجود دارد.

Babaali et al (2015) پرش هیدرولیکی در حوضچه‌ی آرامش USBR II با دیواره‌های همگرا را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی کردند. مدل‌سازی عددی نشان داد که الگوی جریان با نیم‌رخ طولی جریان اصلی در حوضچه‌ی آرامش سازگار است و این نرم‌افزار عددی می‌تواند پرش هیدرولیکی را به‌خوبی پیش‌بینی کند. Hager et al. (2015) جریان پرش هیدرولیکی را در یک حوضچه‌ی آرامش با بال‌آمدگی ناگهانی در کف بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای یک هد انرژی و عدد فرود معلوم در ناحیه‌ی بالادست حوضچه‌ی آرامش، انرژی تلف‌شده، مستقل از ارتفاع پله بوده و مقدار متناظر آن در پرش هیدرولیکی بر روی کف افقی است.

حوضچه‌ی آرامش تخلیه‌کننده‌ی عمقی سد فریمان حوضچه‌ای غیر تیپ بوده که در آن به‌جای استفاده از بلوک در کف، از حوضچه با بلوک در جداره استفاده شده است.

در این تحقیق، این حوضچه با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مدل‌سازی شده است و عملکرد آن بررسی شده است. به‌منظور مدل‌سازی بهتر این حوضچه، از آنجایی که مدل آزمایشگاهی از طرح موجود نبوده است، لذا در ابتدا با داشتن نتایج مدل آزمایشگاهی، نسبت به تعیین ابعاد شبکه و انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای حوضچه‌های مشابه اقدام گردیده و سپس از این نتایج در مدل‌سازی

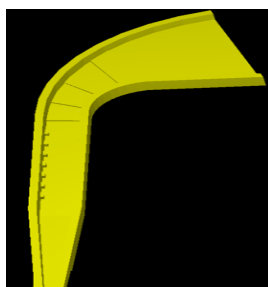
377 میلیون متر مکعب با حجم آب قابل تنظیم سالیانه 6 میلیون متر مکعب است. شکل 1 تصویر سد، جانمایی پایانه‌های سازه‌های هیدرولیکی در پایین دست سد و هندسه‌ی سه بعدی مدل شده در نرم‌افزار AutoCAD را نشان می‌دهد. سازه‌ی حوضچه‌ی آرامش تخلیه‌کننده‌ی عمقی سد فریمان، سازه‌ای به طول کلی 56، عرض متغیر از 1 تا 9 و ارتفاع 4 متر است. ورودی حوضچه‌ی آرامش دریچه‌ای به ابعاد 1×1 متر است، که از طریق یک تونل به همان ابعاد دریچه و طول 3 متر به یک تبدیل متصل می‌شود. این تبدیل که عرض ابتدای آن یک متر و عرض انتهای آن درجایی که به حوضچه‌ی اصلی متصل می‌شود 3 متر است، دارای 15/2 متر طول و شیب 10% است. حوضچه‌ی آرامش مستطیلی شکل بوده و 18 متر طول دارد. در کنار دیواره‌های جانبی آن بلوک‌های کاهنده‌ی سرعت دوزنقه‌ای شکل به ارتفاع 70 سانتی‌متر به فاصله‌ی 2 متر از یکدیگر و به تعداد 7 بلوک در هر طرف جانمایی شده‌اند. حوضچه‌ی اصلی در انتها به یک قوس به شعاع 21 متر و زاویه‌ی 75 درجه متصل می‌شود که این قوس، دارای چهار پله به ارتفاع‌های متغیر از 20 تا 50 سانتی‌متر و طول‌های متغیر از 3 تا 8 متر است. دبی طراحی حوضچه $17 \frac{m^3}{s}$ می‌باشد.

با توجه به هندسه‌ی خاص و شیپوری شکل حوضچه‌ی آرامش سد فریمان، به‌منظور کاهش حجم و زمان محاسبات و با توجه به نتایج بدست آمده در بخش قبل، اندازه‌ی سلول‌ها در راستای طولی حوضچه برابر 25 سانتی‌متر و در دو راستای دیگر، برابر با 10 سانتی‌متر انتخاب شده‌اند.

بررسی، مقادیر MAE، RMSE و R^2 با مدل آشفتگی انتخاب شده برای شبکه ریز به ترتیب 0/13، 0/014 و 0/84 و برای شبکه درشت به ترتیب 0/07، 0/13 و 0/86 به دست آمد. با مقایسه‌ی نتایج نزدیک به هم برای دو شبکه مختلف و زمان محاسباتی بیشتر برای اندازه‌ی شبکه ریزتر، شبکه با اندازه‌ی درشت‌تر برای مدل‌سازی انتخاب گردید.

3- شبیه‌سازی عددی حوضچه‌ی آرامش سد فریمان

سد تاریخی فریمان در استان خراسان رضوی، در فاصله‌ی 11 کیلومتری شهر فریمان و 4 کیلومتری جنوب کارخانه‌ی قند فریمان، بر روی رودخانه‌ی فریمان احداث شده است. تاریخ ساخت سد فریمان به درستی معلوم نیست. اما از نظر سبک بنای سد، احتمالاً باید در عهد سلاطین مغول ساخته شده باشد و به روایتی نیز این سد در دوره‌ی صفویه ساخته شده و ساختمان آن را به شاه عباس دوم نسبت می‌دهند. البته سد اولیه در دوره‌ی قاجاریه و پهلوی افزایش ارتفاع داده شده و تعمیراتی بر روی آن انجام شده است. در حال حاضر از آب این سد به منظور تأمین آب شهرستان فریمان و روستاهای نقی آباد، قلعه نو، لوشاب و کارخانه قند فریمان و آبیاری مزارع کشاورزی استفاده می‌شود. مصالح به کار رفته در آن سنگ و ملات ساروج است. در زمان ساخت آن کف آن با آجر فرش شده بود که امروزه این آجرها در زیر انبوهی از رسوبات مدفون شده است. این سد دارای ارتفاع 23 متر از کف، 35 متر از شالوده و با طول تاج 140 متر می‌باشد. حجم کل سد



شکل 1 تصاویر به ترتیب از راست به چپ، سد فریمان و سازه‌های وابسته، تصاویر واقعی و شبیه‌سازی‌شده‌ی حوضچه‌ی آرامش سد توسط نرم‌افزار AutoCAD

شکل‌ها مشاهده می‌شود، عملکرد حوضچه در شرایط موجود نامطلوب می‌باشد. سرعت جریان در خروجی حوضچه از حدود 2 متر بر ثانیه در کف حوضچه تا 10 متر بر ثانیه در سطح آب می‌باشد. ضمناً در قوس، توزیع سرعت در پلان به صورت یکنواخت نمی‌باشد. در خصوص عدد فرود، مشاهده می‌گردد که جریان تحت این شرایط به رژیم زیربحرانی نرسیده است و پرش هیدرولیکی مطلوب در حوضچه تشکیل نمی‌شود. بنابراین، هندسه‌ی موجود و سازه‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی دارای عملکرد مناسبی نمی‌باشند.

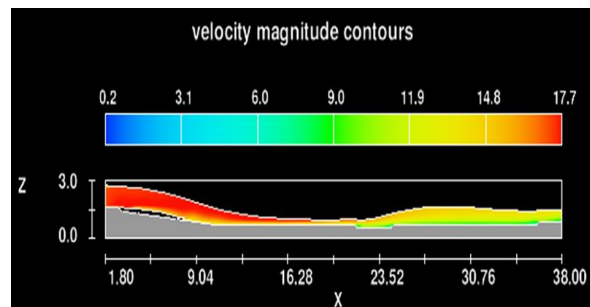
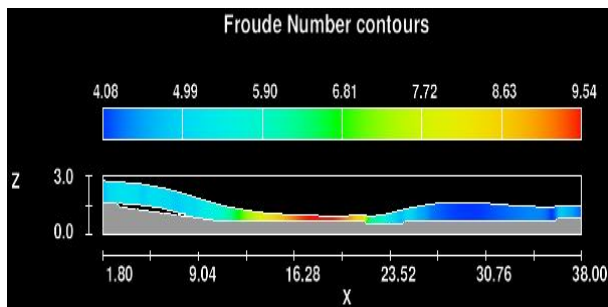
به‌منظور افزایش کارایی حوضچه‌ی آرامش همراه با کمترین تغییرات در حوضچه‌ی اولیه، راهکارهای مختلفی بررسی گردید. در این گزینه‌ها، روش‌های مختلف علاج-بخشی از جمله اضافه نمودن بافل به حوضچه، تغییر ابعاد حوضچه، اضافه نمودن ارتفاع آب‌پایه و دیگر راهکارهای تثبیت پرش هیدرولیکی به صورت منفرد و ترکیبی در مدل عددی آزمایش گردیدند.

شرایط مرزی در مدل عددی بدین ترتیب اعمال گردید: مرز ورودی، سرعت ثابت از زیر دریچه و برابر با 17 متر بر ثانیه که براساس اختلاف ارتفاع رقوم سطح آب در مخزن سد و دریچه‌ی تخلیه‌کننده‌ی تحتانی محاسبه گردیده است. مرز خروجی، شرط خروجی آزاد (outflow) در نظر گرفته شده است. در مرزهای صلب شرط دیوار و برای سطح آب از شرط مرزی تقارن استفاده شده است.

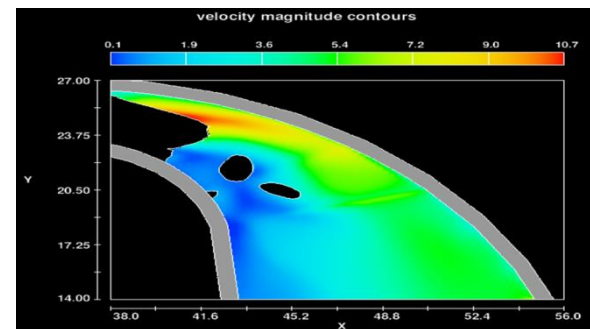
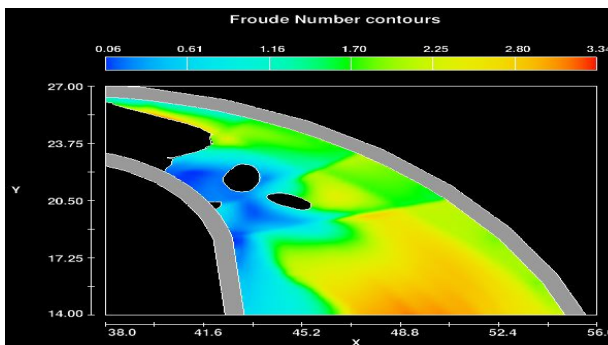
با توجه به آنچه که در بخش 2 و برای صحت‌سنجی نرم-افزار به دست آمد، برای شبیه‌سازی عددی حوضچه‌ی آرامش سد فریمان نیز از مدل آشفتگی RNG استفاده گردید.

4- بررسی عملکرد حوضچه و ارائه‌ی طرح اصلاحی

شبیه‌سازی حوضچه‌ی آرامش با مشخصات موجود که حوضچه‌ی غیر تیپ می‌باشد، در نرم‌افزار انجام گرفت و نتایج اجرای نرم‌افزار برای دو پارامتر سرعت و عدد فرود در شکل‌های 2 و 3 نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در



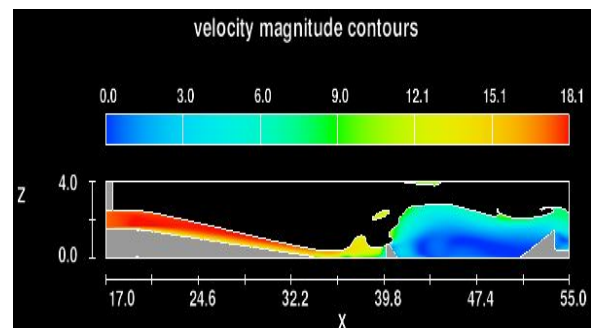
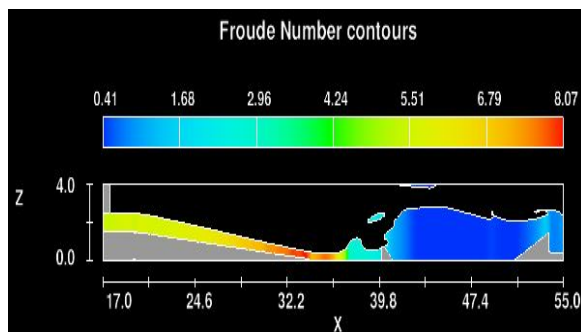
شکل 2 نمایش نیمرخ طولی سرعت (سمت راست) و عدد فرود (سمت چپ) در وضعیت موجود



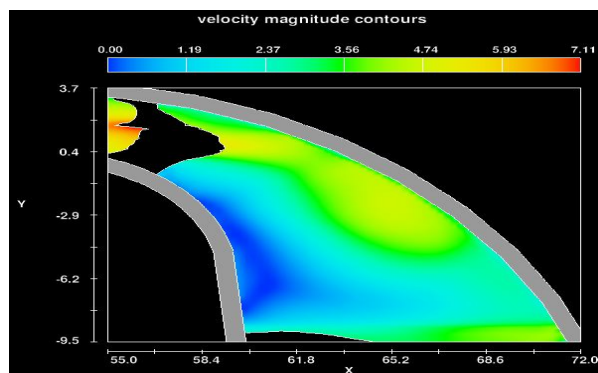
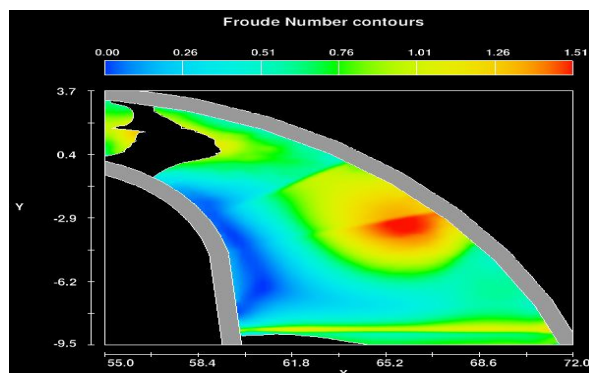
شکل 3 نمایش سرعت (سمت راست) و عدد فرود (سمت چپ) در قوس در وضعیت موجود

از تصاویر فوق پیداست که سرعت جریان در بخش مستقیم حوضچه و پس از آبپایه به خوبی کاهش یافته و در خروجی حوضچه نیز سرعت جریان از وضعیت موجود حوضچه پایین تر است. همان طور که در تصویر 3 دیده می شود، پرش هیدرولیکی در فضای بین بلوک های جدید و آبپایه تشکیل شده و عدد فرود به زیر یک کاهش پیدا می کند و جریان با حالت زیر بحرانی، همان طور که در شکل 4 نشان داده شده است، از حوضچه خارج می شود. به منظور بررسی تأثیر راهکار علاج بخشی حوضچه ی آرامش، بردارهای سرعت جریان در وضعیت های طرح اولیه و طرح اصلاحی از نرم افزار استخراج گردیده است و در شکل 5 نمایش داده شده اند. همان گونه که مشاهده می گردد، در وضعیت موجود، جریان با سرعتی به مراتب بیشتر از طرح اصلاحی از حوضچه خارج می گردد. در طرح اصلاحی، وجود بلوک های میانی منجر به تشکیل گردابه در حوضچه و تشکیل پرش هیدرولیکی و در نهایت استهلاک انرژی جنبشی جریان می گردد.

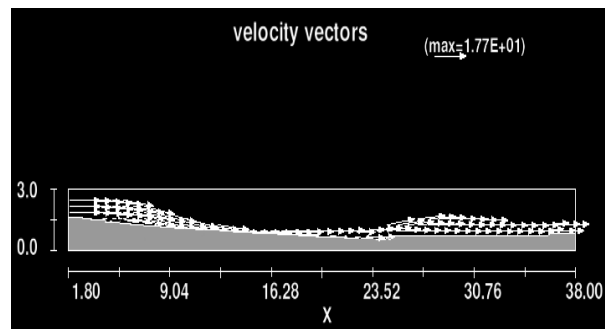
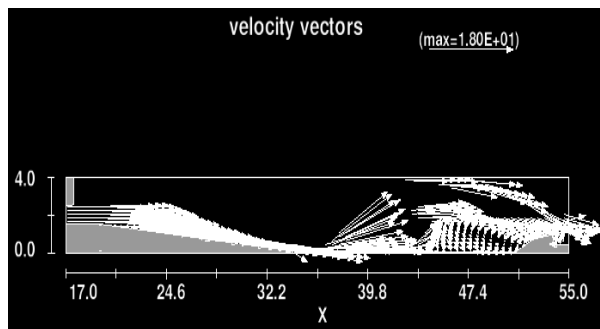
در نهایت مناسب ترین راهکار برای بهبود بخشیدن به عملکرد حوضچه با اضافه نمودن دو ردیف بلوک به کف حوضچه و یک آبپایه در انتهای حوضچه قبل از خم و نیز یک آبپایه در انتهای حوضچه به عنوان راهکارهای عملی برای اصلاح طرح موجود پیشنهادی بدست آمد. در این شرایط، جریان پس از تسکین در حوضچه و تغییر رژیم در بخش ابتدایی از فوق بحرانی به زیر بحرانی، وارد بستر رودخانه خواهد گردید و در نتیجه از تخریب کف در پایین دست ممانعت به عمل خواهد آمد. در شکل های 4 و 5 به ترتیب الگوی سرعت و عدد فرود جریان در حوضچه اصلاح شده نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود، سرعت جریان در حوضچه و قبل از ورود به خم انتهایی کاهش چشمگیری داشته و از الگوی یکنواختی در پلان تبعیت می کند. همچنین در بخش اول حوضچه، وجود پله ها منجر به کاهش عدد فرود به مقادیر کمتر از یک شده است که نشان دهنده ی تغییر رژیم جریان در حوضچه می باشد.



شکل 3 نمایش نیمرخ طولی سرعت (سمت راست) و عدد فرود (سمت چپ) در طرح اصلاحی حوضچه



شکل 4 نمایش سرعت (سمت راست) و عدد فرود (سمت چپ) در قوس در طرح اصلاحی حوضچه



شکل 5 نمایش بردارهای سرعت طرح موجود (سمت راست) و طرح اصلاحی (سمت چپ)

5- نتیجه گیری

در این پژوهش، چگونگی کارکرد حوضچه‌ی آرامش سد فریمان به کمک روش عددی بررسی گردید. بر اساس نتایج عددی مشخص شد که حوضچه‌ی آرامش، سرعت جریان برای دبی طرح را از 17 متر بر ثانیه به حدود 5 متر بر ثانیه کاهش می‌دهد و عدد فرود نیز از حدود 9/5 به 3/3 می‌رسد، اما این مقدار نشان‌دهنده‌ی این است جریان با حالت فوق بحرانی از حوضچه خارج می‌شود که نشان دهنده عملکرد نامناسب حوضچه بوده و مخرب برای پایین دست می‌باشد. در ادامه برای رفع این نقیصه، طرح‌های مختلفی برای بهبود عملکرد هیدرولیکی حوضچه بررسی گردید. برای این طرح‌ها، مدل‌سازی عددی صورت گرفت و نتایج آن‌ها مطالعه شد. در میان طرح‌های اصلاحی، با اضافه کردن دو ردیف بلوک در کف حوضچه و نیز یک آبپایه در انتهای بخش مستقیم و همچنین اضافه نمودن یک آبپایه در انتهای قسمت قوسی شکل حوضچه، نتایج قابل قبولی حاصل گردید. لازم به یادآوری می‌باشد که ابعاد بلوک‌ها و ارتفاع آبپایه بر اساس طراحی‌های حوضچه‌ی آرامش تیپ USBR II تعیین گردیده‌اند. از این پژوهش مشخص می‌گردد که بلوک‌های کناری در حوضچه‌ی آرامش نمی‌توانند به‌تنهایی برای استهلاک انرژی در حوضچه کافی باشند. همچنین وجود آبپایه برای تغییر رژیم جریان و کاهش طول پرش هیدرولیکی بسیار اهمیت دارد. به منظور تاثیرگذاری وجود بلوک‌ها و آبپایه، الگوی سرعت در حوضچه نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که بلوک‌ها و آبپایه توانسته‌اند شرایط گردابی در حوضچه به‌وجود آورده تا از این طریق انرژی جریان مستهلک گردد.

6- فهرست علائم

k-ε	مدل دومعادله‌ای انتقال آشفتگی
LES	مدل آشفتگی شبیه‌ساز گردابه‌های بزرگ
MAE	میانگین قدر مطلق خطاها
One-equation	مدل انتقال تک معادله‌ای آشفتگی
RNG	مدل آشفتگی گروه نرمال شده
RMSE	ریشه مربع متوسط خطاها
R ²	ضریب انطباق

7- منابع

- [1] حسینی سهی، م. و صالحی نیشابوری، ع.ا. (1388). شبیه‌سازی عددی جریان در حوضچه آرامش (مطالعه موردی سد تالوار). مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال پنجم، شماره 3، ص.ص. 64-67.
- [2] Ali A. M. and A. M. Negm. (2009). "Submerged flow characteristics in a pool type stilling basin with multi-end steps", Thirteenth International Water Technology Conference, Hurghada, Egypt.
- [3] Amorim B. J.C.C., Amante R.C.R. and V.D. Barbosa. (2015). "Experimental and numerical modeling of flow in a stilling basin", 36th IAHR World Congress, Hague, the Netherlands.
- [4] Babaali H., Shamsai A. and H. Vosoughifar. (2015). "Computational modeling of the hydraulic jump in the stilling basin with converged walls using CFD codes", Journal of Arab J Sci Eng., 40:381-395, DOI 10.1007/s13369-014-1466-z.
- [5] Carvalho R.F., Lemos C.M. and C.M. Ramos. (2008). "Numerical computation of the flow in hydraulic jump stilling basins", Journal of Hydraulic Research, 46(5), pp. 739-752.
- [6] Hager W. H. and R. Sinniger, (2015). "Flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise", Journal of Hydraulic Research, 23(2), pp. 101-113.