

شبیه‌سازی عددی جریان در حوضچه آرامش USBR II با دیواره‌های همگرا و پله‌های انتهایی

حمیدرضا باباعلی^۱، علیرضا مجتهدی^{۲*}، نسیم سوری^۳، صبا سوری^۴

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۵ تاریخ پذیرش: ۹۹/۵/۲۵

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خرم آباد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تبریز

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تبریز

۴- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران- مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه سمنان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: A.Mojtahed@tabrizu.ac.ir

چکیده

حوضچه‌های آرامش از مهمترین سازه‌های مستهلک کننده انرژی می‌باشند بطوریکه تغییر شکل حوضچه آرامش می‌تواند باعث عملکرد هیدرولیکی بهتر آنها شود. در این مطالعه، با پلکانی کردن انتهای حوضچه آرامش USBR II مدل سد نازل‌وچای و همگرا نمودن دیواره‌های حوضچه، پارامترهای فشار، پروفیل سطح آب، راندمان پرش هیدرولیکی و استهلاك انرژی جنبشی بررسی شد. برای این منظور در نرم‌افزار Flow-3D با استفاده از روش VOF و مدل آشفتگی RNG، جریان در حوضچه آرامش همگرا با زوایای همگرایی ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۳/۵ درجه برای دبی ۸۳۰ متر مکعب بر ثانیه شبیه‌سازی گردید. جهت صحت‌سنجی مدل عددی، از مقادیر آزمایشگاهی فشار استفاده شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که پلکانی کردن انتهای حوضچه و همگرایی دیواره‌ها باعث افزایش عمق پایاب و مانع خروج پرش از حوضچه آرامش می‌گردد. همچنین، همگرا کردن دیواره‌های حوضچه تأثیر مثبتی بر راندمان دارد. همگرا کردن دیواره‌ها باعث مستغرق شدن پرش هیدرولیکی می‌شود، درحالی‌که پرش در حوضچه آرامش با دیواره‌های موازی بصورت آزاد می‌باشد. بهترین زاویه همگرایی از نظر عملکرد، حوضچه با زاویه همگرایی ۵ درجه می‌باشد که راندمان به میزان ۱۳۶ درصد نسبت به حوضچه با دیواره‌های موازی افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج استهلاك انرژی برای مقاطع مختلف حوضچه در اعماق متفاوت نشان داد که حداکثر استهلاك انرژی در اعماقی بین ۲۰-۳۰ درصد عمق جریان رخ می‌دهد که در نظر گرفتن این نکته، باعث طراحی سازه‌ای بهتر حوضچه آرامش می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آشفتگی، استهلاك انرژی، راندمان پرش هیدرولیکی، زوایای همگرایی، حوضچه آرامش همگرا، مدل‌سازی عددی

Numerical Simulation of Flow in the USBR II Stilling Basin with Converging Walls and End Steps

H.R Babaali¹, A.R Mojtahedi^{2*}, N Soori³, S Soori⁴

Received: March 25, 2018 Accepted: August 15, 2020

¹Assist. Prof., Dept. of Eng., Faculty of Civil Engineering, Azad University, Khorramabad Branch, Lorestan, Iran

² Assoc. Prof., Dept. of Water Resources Eng., Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran

³ M.Sc. Student, Dept. of Water Resources Eng., Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran

⁴ Ph.D. Student, Dept. of Water Eng. and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

*Corresponding Author, Email: A.Mojtahedi@tabrizu.ac.ir

Abstract

The stilling basins are of the most important energy dissipater structures, and changes in their shape lead to a better hydraulic performance of them. In this study, the impacts of steps at the end of USBR II stilling basin of Nazloo-Chay dam and walls convergence on the pressure, water surface profile, efficiency of hydraulic jump and energy dissipation were investigated. For this purpose, the flow was simulated using the VOF method and RNG turbulent model in the converging stilling basin (with convergence angle of 5°, 7.5°, 10° and 12.5°) and discharge rate of 830 m³ s⁻¹. The numerical model was verified by pressure's experimental data. The results showed that existence end steps and convergence walls led to an increase in tail water depth and prevented hydraulic jump from exhausting out of stilling basin. Also, the convergence walls caused the jump to be submerged contrary to the free jump occurring in stilling basins with parallel walls having free jumps. Convergence Walls had a positive impact on the efficiency of the hydraulic jump. In this study, the converging stilling basin with 5° convergence angel gave a great performance, and the efficiency increased by 136% in comparison to stilling basin with parallel walls. The comparison of the results of energy dissipation for different sections of stilling basin at different flow depths demonstrated that the maximum energy dissipation occurred in the depths between 20-30% of flow depth. These results may be considered for improving the stilling basins design.

Keywords: Convergent angels, Convergence stilling basin, Efficiency of hydraulic jump, Energy dissipation, Numerical model, Turbulence

مقدمه

معمولاً از المان‌هایی استفاده می‌شود که نه تنها موجب ایجاد یک پرش هیدرولیکی مناسب همراه با کاهش انرژی در داخل حوضچه آرامش می‌شوند، بلکه شرایط پایداری آن نیز را تأمین می‌کنند که می‌توان به کاربرد آنها در تثبیت، کنترل، کاهش طول پرش، عمق ثانویه و افزایش راندمان پرش هیدرولیکی اشاره کرد. در حوضچه آرامش، المان‌های اصلی مختلف بصورت هندسه کف (پله، آستانه)، هندسه پلان (انبساط تدریجی و یا ناگهانی)، ناهمواری‌های دیوار (برای افزایش نیروی برشی) و تغییر در دبی جریان (بوسیله اضافه کردن موضعی آن یا بصورت استخراج آب) می‌باشد. فورستر

حوضچه آرامش یکی از متداول‌ترین سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست تنداب‌ها هستند که با توجه به شرایط تنداب و جریان آب، از انواع مختلف و استاندارد این سازه در پروژه‌ها استفاده می‌شود. در این سازه‌ها تشکیل پرش هیدرولیکی موجب استهلاک انرژی می‌شود (چانسون، ۲۰۱۵).

ایجاد پرش هیدرولیکی بعنوان یک عامل مهم انرژی‌گیرنده مورد توجه محققین مختلف بوده است؛ مخصوصاً در مواردی که بتواند موقعیت پرش هیدرولیکی را کنترل نمایند. بر این اساس در ساختمان حوضچه‌های آرامش،

تشکیل گردابه‌هایی روی پله منجر به افزایش استهلاک انرژی و پایداری پرش می‌شود.

تاکنون تحقیقات بسیاری روی حوضچه‌های آرامش با دیواره‌های موازی و واگرا توسط اربهابهیراما و ابلا (۱۹۷۱)، خلیفه و مک‌کروکودال (۱۹۸۰)، اسمعیلی‌ورکی (۲۰۰۳)، امید و همکاران (۲۰۰۷)، شجاعیان و همکاران (۲۰۱۱)، بختیاری و کاشفی‌پور (۲۰۰۸) و کاسی (۲۰۱۰) و صاحبی و همکاران (۲۰۱۲) و دیگر محققان صورت گرفته است، اما در زمینه حوضچه آرامش با دیواره‌های همگرا مطالعات اندکی انجام شده است. لذا در این مطالعه، پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با دیواره‌های همگرا مورد بررسی قرار گرفته است.

پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با دیواره‌های همگرا اولین بار توسط آپین (۱۹۵۱) مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نظر آپین، پرش در مقاطع همگرا دارای مشخصات جریان موجی بر روی سطح آب بدون ایجاد گردابه می‌باشد. این نوع پرش عموماً درون کانال‌های مستطیلی با تنگ‌شدگی عرض رخ می‌دهد که می‌تواند اثر فرسایشی بر روی دیواره‌ها داشته باشد. پیرستانی و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر دیواره‌های همگرا بر استهلاک انرژی در حوضچه آرامش را بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. باباعلی و همکاران (۲۰۱۵) پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با دیواره‌های همگرا را با استفاده از CFD شبیه‌سازی کردند. باباعلی و همکاران (۲۰۱۸) نوسانات فشار در حوضچه آرامش USBR II با دیواره‌های همگرا با استفاده از مدل‌های آشفتگی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد با توجه به اینکه در بعضی از نقاط فشار استاتیکی منفی بوده است، برای افزایش عمق پایاب بلوک‌های انرژی‌گیر در قسمت انتهای حوضچه حذف و سطح شیب‌دار حوضچه به سطح پلکانی تبدیل شد. با بررسی توزیع فشار کف حوضچه بعثت نوسانات فشار بخصوص در ورودی حوضچه، فشار از توزیع هیدرواستاتیک کمتر تبعیت می-

و اسکرینند (۱۹۵۰) اولین کسانی بودند که مطالعاتی را درباره پرش هیدرولیکی روی پله‌های معکوس انجام دادند. ابریشمی و اسماعیلی (۲۰۰۰ و ۲۰۰۱) پرش هیدرولیکی را روی کانال‌های با شیب معکوس و پله منفی بررسی کردند و نمودارهایی برای دستیابی به الگوهای با ارتفاع مناسب پله ارائه دادند. در سد سیاه‌بیشه و گتوندعلیا از آستانه انتهایی پلکانی در حوضچه آرامش جهت حفظ پرش در حوضچه استفاده شده است (بی نام ۲۰۰۸). اثر پارامترهایی چون عمق پایاب، هندسه آستانه و موقعیت قرارگیری آن درون حوضچه آرامش با آستانه پلکانی بصورت آزمایشگاهی توسط مینایی گیگلو و همکاران (۲۰۱۶) بررسی شد. سپس روابطی را برای محاسبه میزان خروج پرش از حوضچه ارائه دادند.

جمال و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر شکل‌های حوضچه آرامش با ارتفاع‌های مختلف پله انتهایی را بر خصوصیات پرش هیدرولیکی مستغرق و استهلاک انرژی پایین‌دست دریچه قطاعی بررسی کردند. بایون و همکاران (۲۰۱۶) عملکرد مدل‌سازی عددی پرش هیدرولیکی اعداد رینولدز پایین با استفاده از Flow-3D و OpenFOAM ارزیابی کردند. سوری و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از بهینه‌کردن موانع ابتدایی و انتهایی حوضچه آرامش پارامترهای فشار، پروفیل سطح آب، انرژی جنبشی آشفتگی و استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی در حوضچه آرامش همگرا را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور با تغییر در ضخامت و ارتفاع بلوک‌های انتهای تنداب و تعداد پلکان در انتهای حوضچه آرامش USBR II، بهینه‌ترین حالت حوضچه آرامش انتخاب شد. نتایج این مطالعه نشان داد که حوضچه آرامش با موانع ورودی دارای ارتفاع ۱ و ۱/۵ برابر حالت استاندارد و سه پله در انتها، بعنوان بهینه‌ترین حالت حوضچه آرامش انتخاب شد. همچنین نتایج نشان داد که پرش هیدرولیکی روی سطوح شیب‌دار معکوس با گذاشتن پله منفی در انتهای حوضچه آرامش بعثت

باشد. ابتدای آبراهه پایاب با شیب معکوس ۳:۱ از بستر حوضچه آرامش به طول ۲۱ متر به سطح افقی با تراز ۱۴۰۳ متر به مسیر رودخانه منتهی می‌گردد. رودخانه به طول ۳۰۶ متر و بستر به تراز ۱۴۰۰ متر و سطح توپوگرافی تا تراز ۱۴۱۵ متر برگرفته از نقشه در مدل اجرا شده است. سیستم تخلیه سیلاب سد شامل کانال ورودی، سرریز آزاد اوجی، تنداب و حوضچه آرامش USBR II می‌باشد (بی نام ۲۰۰۶). در شکل ۱ اجزای مدل هیدرولیکی سد نازلو چای مشاهده می‌شود.



شکل ۱- مدل هیدرولیکی سد نازلو چای.

مدل عددی Flow-3D

اگرچه الگوی جریان عبوری در حوضچه‌های آرامش بسیار پیچیده می‌باشد، معادلات ناویر-استوکس می‌توانند توصیف ریاضیاتی درباره حوضچه آرامش ارائه دهند. امروزه، شبیه‌سازی عددی سه بعدی جریان‌های سطح آزاد به روشی سودمند و مقرون به صرفه تبدیل شده است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ وو و ژانگ، ۲۰۱۰). مدل‌های عددی مختلفی برای شبیه‌سازی آشفتگی وجود دارد که برای مدل‌سازی معادلات ناویراستوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز^۱ با مدل‌های ادی ویسکوزیته، برای سرعت بالا و کاربردهای گسترده مهندسی استفاده می‌شوند (فلدر و چانسون، ۲۰۱۳؛ دیویدسون، ۲۰۱۵). از جمله آنها می‌توان به Flow-3D اشاره کرد. نرم‌افزار Flow-3D برای حل معادلات RAN از روش حجم محدود استفاده می‌کند. این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی رفتار

کند و با کاهش نوسانات فشار در انتهای حوضچه فشار به فشار استاتیکی نزدیکتر می‌شود.

در این مطالعه برای توسعه تحقیقات انجام شده، به بررسی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با دیواره-های همگرا در دبی ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه پرداخته شده است. برای این منظور با اضافه کردن ۴ زاویه همگرایی ۵/۷، ۱۰ و ۱۲ درجه به دیواره‌ها و همچنین اضافه کردن سطوح پلکانی به انتهای حوضچه آرامش USBR II مدل سد نازلوچای، جریان در حوضچه آرامش شبیه‌سازی شده است. سپس پارامترهای سرعت، فشار، پروفیل سطح آب و راندمان پرش هیدرولیکی بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

سد مخزنی نازلوچای از نوع خاکی با هسته رسی به ارتفاع ۱۰۰ متر روی رودخانه نازلوچای در شمال غربی ارومیه احداث گردیده است. مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد بر مبنای تشابه عدد بی‌بعد فرود، با مقیاس ۱:۴۰ ساخته شده است. ابعاد مخزن بالادست در مدل (۷/۵*۷/۶*۳/۵ متر- عرض*طول*ارتفاع) و مخزن پایین‌دست (۶/۲*۷/۶*۱/۲۵ متر عرض*طول*ارتفاع) می‌باشد. حوضچه آرامش سد برای سیلاب ۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه با دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله طراحی شده است که این دبی باعث می‌گردد ارتفاع آب روی سرریز ۳/۵، تراز آستانه سرریز ۱۴/۹۲، عرض ناخالص سرریز ۴۲ و طول آن ۷۰ متر باشد. سرریز و پایه میانی به ضخامت ۲ متر از جنس پلکسی‌گلاس شفاف ساخته شده است. عرض تنداب همگرا (از ۴۲ به ۳۰ متر)، طول افقی آن ۲۶۰/۱۶ متر و از تراز ۱۴۸۳/۷۰ تا ۱۳۹۶ متر می‌باشد. جنس کف، تنداب و دیوارهای دو طرف آن، دیواره‌های مدل سرریز و حوضچه آرامش از پلکسی-گلاس شفاف و جنس بلوک‌های انرژی‌گیر از چوب با پوشش رنگ روغنی می‌باشد. حوضچه آرامش دارای طول ۴۳، عرض ثابت ۳۰ و تراز بستر ۱۳۹۶ متر می-

¹ Reynolds-Averaged Navier-Stokes

متوسط مساحت جریان (u,v,w) متوسط سرعت در جهت‌های (x,y,z) می‌باشد.

مدل‌سازی عددی جریان در حوضچه آرامش همگرا بر اساس مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه جهت شبه‌سازی الگوی جریان در حوضچه آرامش همگرا، از مدل آزمایشگاهی حوضچه آرامش USBR II سد نازلو چای با مقیاس ۱:۴۰، دوره بازگشت ۱۰۰۰۰ ساله استفاده شده است و جریان عبوری از روی مدل ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. مطابق شکل ۲، حوضچه آرامش همگرا با زوایای همگرایی ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ درجه و انتها پله‌ایی در نرم-افزار Flow-3D مدل‌سازی شد.

مش‌بندی و شرایط مرزی

در این مطالعه مش‌بندی میدان محاسبات با استفاده از یک مش بلاک انجام شد. جهت رعایت نسبت اندازه سلول‌های مش در سه جهت X/Z ، X/Y و Y/Z باید نسبت هر کدام کمتر از ۳ باشد و هر چقدر این نسبت به یک نزدیک‌تر باشد، مدل عددی از دقت بالاتری برخوردار خواهد بود.

در این مطالعه با رعایت هر سه نسبت، تعداد کل سلول‌ها تقریباً ۸۶۴۰۰۰ سلول در نظر گرفته شد. در ورودی مدل با توجه به مشخص بودن سرعت از شرط مرزی سرعت و در خروجی پایین‌دست نیز از شرط مرزی فشار مخصوص استفاده شد. همچنین در بالای مدل که در تماس با اتمسفر است و بقیه مرزها، شرط مرزی متقارن تعریف شد. همچنین، با توجه به وجود تنش‌های برشی مماسی در کف حوضچه ناشی از جریان عبوری، از شرط مرزی صلب بایستی استفاده شود.

سیال در سطح آزاد از روش حجم سیال (VOF)^۱ و برای موانع و احجام صلب از روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR)^۲ استفاده می‌کند. در این نرم‌افزار معادلات پیوستگی، مومنتم و پروفیل سطح آزاد جریان بصورت زیر تعریف می‌شوند:

معادله پیوستگی

معادله پیوستگی جرم بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(uA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(vA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(wA_z)}{\partial z} = 0 \quad [1]$$

در این معادله: V_F کسر حجم جریان، ρ چگالی سیال، مؤلفه‌های سرعت (u,v,w) و (A_x, A_y, A_z) کسر سطح جریان در جهت‌های (x, y, z) می‌باشند.

معادله مومنتم

معادلات حرکت برای سرعت‌های جزئی در سیال در جهت‌های مختلف محور مختصات بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \{uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z}\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \{uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z}\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \{uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z}\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad [2]$$

مؤلفه‌های P فشار، G_x, G_y, G_z شتاب‌های جرم و (f_x, f_y, f_z) شتاب‌های لزجت می‌باشند.

پروفیل سطح آزاد جریان

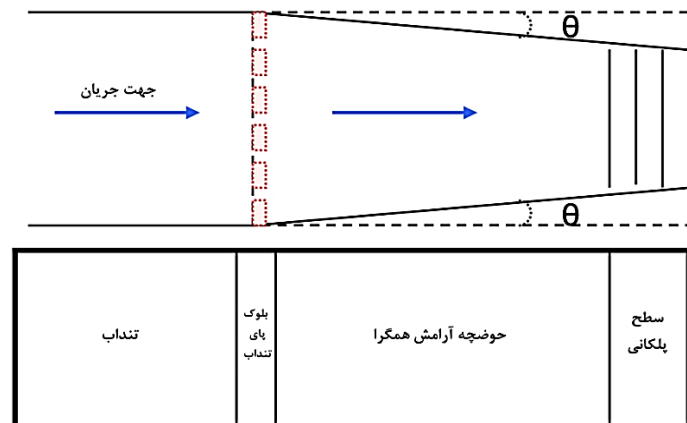
پروفیل سطح آزاد با استفاده از تابع حجم سیال (VOF) یعنی $F(x,y,z)$ تخمین زده می‌شود. این تابع مقدار حجم سیال را در سلول محاسباتی نشان می‌دهد که بصورت معادله ۳ بیان می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) \right\} = 0 \quad [3]$$

در این رابطه، تابع F نسبت سیال دارای مقادیری بین $[0,1]$ می‌باشد که $F=1$ نشان‌دهنده وجود سیال و $F=0$ بیانگر عدم وجود سیال است. همچنین در این رابطه A

¹ Volume of Fluid

² Fractional Area/Volume Obstacle Representation



شکل ۲- حوضچه آرامش مورد مطالعه با دیواره‌های همگرا.

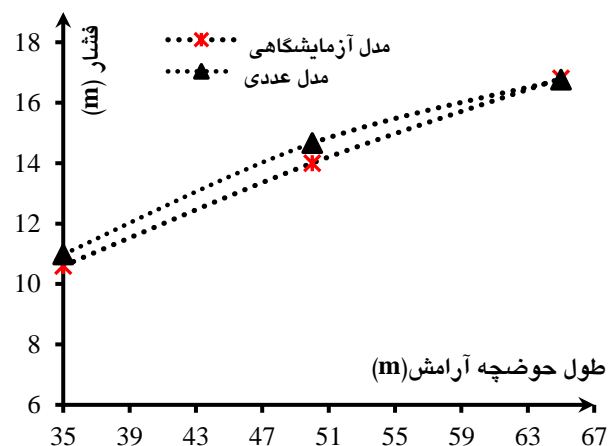
نرم‌افزار Flow-3D برای مدل‌سازی موانع، برای در نظر گرفتن بلوک‌های حوضچه می‌بایست از یک شبکه با دقت کافی استفاده کرد. از آنجاییکه از یک شبکه مکعب مستطیلی استفاده شده، به تأثیر ابعاد شبکه (مش‌بندی) بر روی دقت نتایج حاصله پرداخته شده است. جهت حصول اطمینان و جهت رسیدن به بهترین ابعاد مش-بندی، ۲۴ مدل با ابعادهای متفاوت شبیه‌سازی شده است که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. جهت اطمینان از حصول نتایج دقیق‌تر و همچنین بررسی آنالیز حساسیت، شبکه‌های مش‌بندی شده طبق جدول ۱ مجدد کنترل گردید. در صورتی که مجموع سلول‌ها بیش از ۵۰۰ هزار گردند نتایج تطابق بسیار خوبی با مدل آزمایشگاهی دارند. براساس پارامترهایی نظیر زمان شبیه‌سازی حل عددی، حجم فایل و دقت نتایج، تعداد ۸۶۴۰۰۰ سلول جهت شبیه‌سازی نتایج نهایی انتخاب گردید. بدیهی است اگر اعداد بیشتر از این عدد گردند در نتایج تفاوت بسیار ناچیزی با هم دارند که این امر بخوبی در جدول ۱ ارائه شده است.

با توجه به مشکلاتی که در عملکرد طرح اولیه مدل حوضچه آرامش USBR II سد نازل‌چای برای دبی‌های بیشتر از دبی طراحی وجود داشت، با تغییر در ساختار حوضچه آرامش می‌توان عملکرد آن را بهبود داد. برای این منظور می‌توان با پلکانی کردن ساختار انتهایی حوضچه آرامش و همگرا کردن دیواره‌های حوضچه

نتایج و بحث

صحت‌سنجی مدل عددی

جهت اندازه‌گیری مقادیر فشار استاتیک، از آستانه سرریز تا انتهای حوضچه آرامش پیزومترهایی نصب شد. مطابق شکل ۳ برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده در این مطالعه، از مقادیر آزمایشگاهی فشار استاتیکی در دبی ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه با مدل آشفتگی RNG استفاده شد. با توجه به شکل ۳ می‌توان دریافت که مقادیر عددی و آزمایشگاهی در تطابق خوبی هستند.



شکل ۳- صحت‌سنجی مقادیر فشار استاتیک در حوضچه آرامش همگرا.

واسنجی مدل عددی

برای شبیه‌سازی حوضچه آرامش از یک شبکه سه بعدی در مقیاس واقعی استفاده شد. با توجه به استفاده

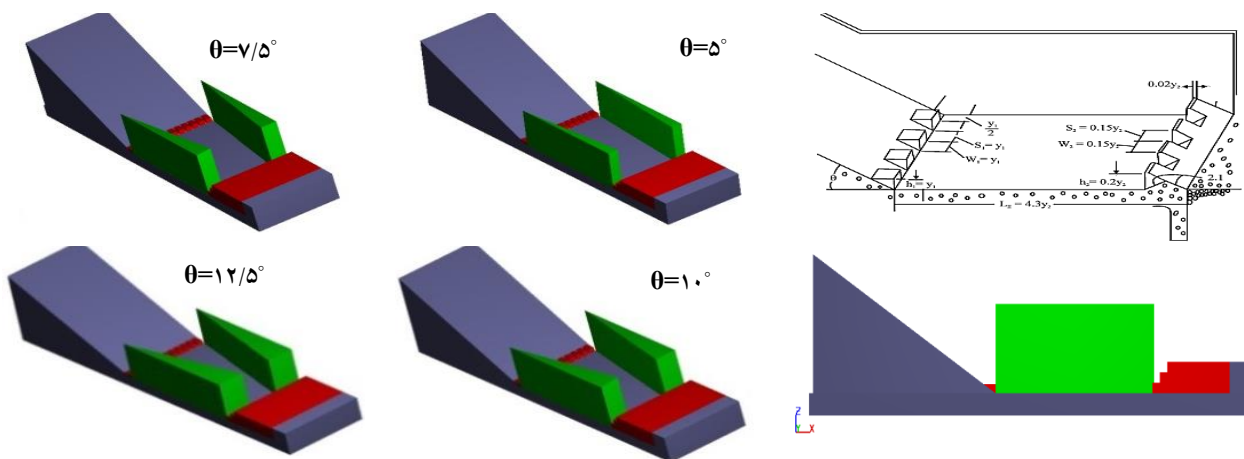
بررسی شد. در شکل ۴ تغییرات اعمال شده در حوضچه آرامش USBR II نشان داده شده است.

باعث افزایش عمق پایاب، تثبیت پرش و ایجاد پرش مستغرق در پایین‌دست حوضچه آرامش شد.

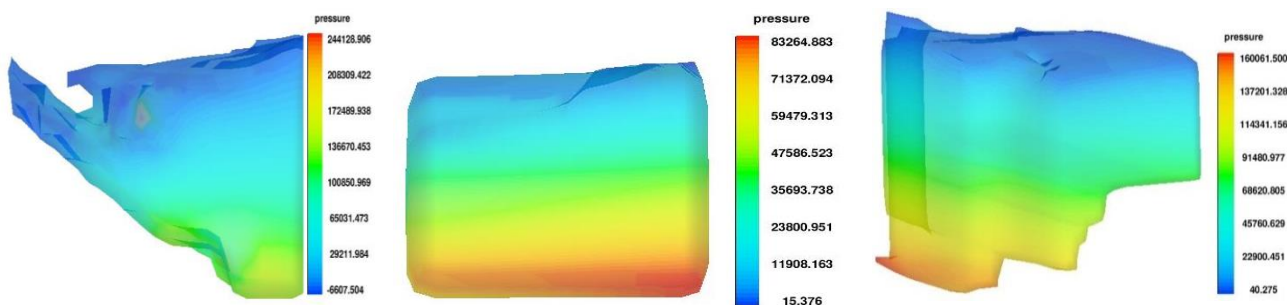
در این مطالعه، پارامترهای فشار، پروفیل سطح آب، انرژی جنبشی، استهلاک انرژی و راندمان در حوضچه آرامش با دیواره‌های همگرا و انتهای پلکانی به ازای دبی ۸۳۰ متر مکعب بر ثانیه با استفاده از مدل آشفتگی RNG

جدول ۱- نتایج آنالیز حساسیت شبکه مش‌بندی.

ابعاد مش‌بندی در مدل اصلی (m)	تعداد کل مش‌ها	عمق آب	
		مدل آزمایشگاهی	مدل عددی
۳*۳*۳	۲۴۰۰	۱۱/۴	۳/۲۹
۲/۷۵*۲/۷۵*۲/۷۵	۳۱۶۸	۱۱/۴	۳/۴۱
۲/۵*۲/۵*۲/۵	۴۳۲۰	۱۱/۴	۴/۰۳
۲/۲۵*۲/۲۵*۲/۲۵	۵۷۲۰	۱۱/۴	۴/۵
۲*۲*۲	۸۱۰۰	۱۱/۴	۵/۵۶
۱/۷۵*۱/۷۵*۱/۷۵	۱۳۱۰۴	۱۱/۴	۶/۴
۱/۵*۱/۵*۱/۵	۱۹۲۰۰	۱۱/۴	۵/۸
۱/۲۵*۱/۲۵*۱/۲۵	۳۴۵۶۰	۱۱/۴	۸/۸
۱*۱*۱	۶۴۸۰۰	۱۱/۴	۱۰/۶۹
۰/۹*۰/۹*۰/۹	۸۸۴۰۰	۱۱/۴	۱۰/۵۸
۰/۸*۰/۸*۰/۸	۱۲۷۶۸۰	۱۱/۴	۱۰/۹۸
۰/۷*۰/۷*۰/۷	۱۹۳۵۳۹	۱۱/۴	۱۱/۶۸
۰/۶*۰/۶*۰/۶	۳۰۰۰۰۰	۱۱/۴	۱۱/۱۱
۰/۵*۰/۵*۰/۵	۵۱۸۰۰۰	۱۱/۴	۱۱/۳۲
۰/۴*۰/۴*۰/۴	۱۰۱۲۵۰۰	۱۱/۴	۱۱/۳۳
۰/۳*۰/۳*۰/۳	۲۴۰۰۰۰۰	۱۱/۴	۱۱/۲۱
۰/۲*۰/۲*۰/۲	۱۳۵۰۰۰۰	۱۱/۴	۱۱/۳۷
۰/۵*۰/۵*۰/۳	۸۶۴۰۰۰	۱۱/۴	۱۱/۴۲
۰/۶*۰/۶*۰/۳	۶۰۰۰۰۰	۱۱/۴	۱۱/۲۳
۰/۵*۰/۵*۰/۴	۶۴۸۰۰۰	۱۱/۴	۱۱/۳۶
۰/۶*۰/۶*۰/۴	۴۵۰۰۰۰	۱۱/۴	۱۱/۳۶
۰/۳*۰/۳*۰/۵	۱۴۴۰۰۰۰	۱۱/۴	۱۱/۲۵
۰/۴*۰/۴*۰/۵	۸۱۰۰۰۰	۱۱/۴	۱۰/۷۵
۰/۶*۰/۶*۰/۵	۳۶۰۰۰۰	۱۱/۴	۱۰/۲



شکل ۳- تغییرات اعمال شده در حوضچه آرامش USBR II



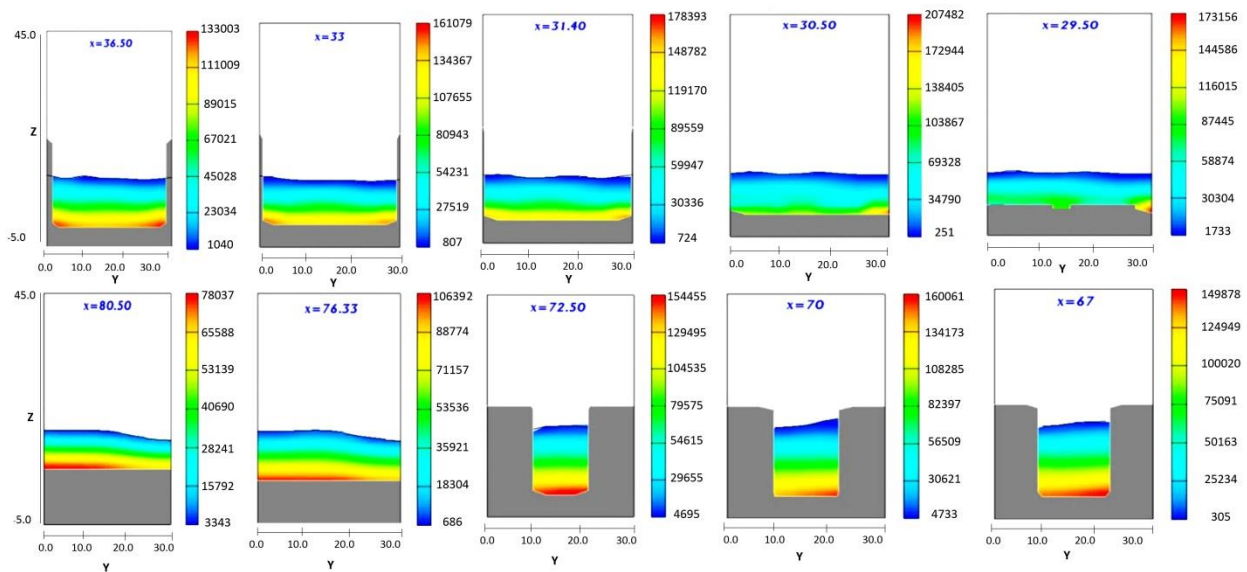
شکل ۵- فشار وارده بر موانع ابتدایی، پله‌های انتهایی و کف در حوضچه آرامش همگرا.

تغییرات فشار در حوضچه آرامش همگرا

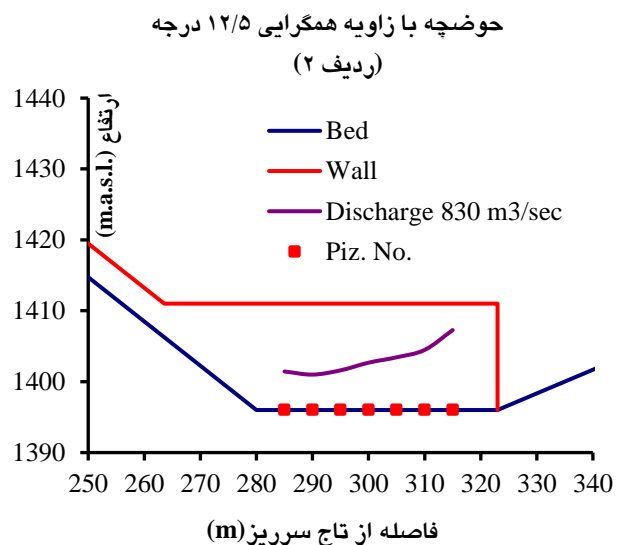
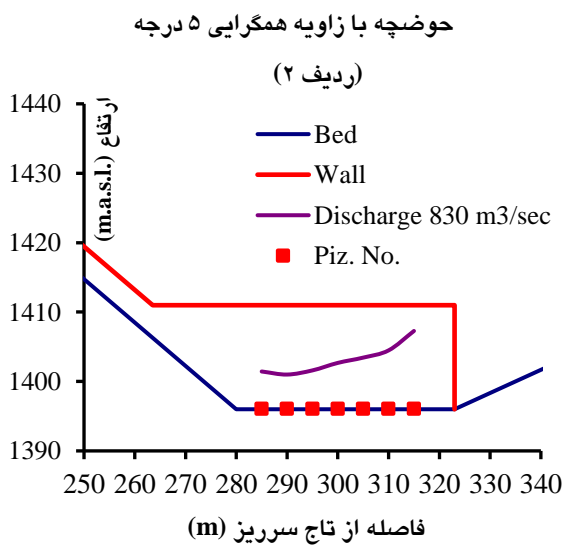
در پرش هیدرولیکی بعلت نوسانات فشار در ورودی حوضچه، فشار از توزیع هیدرواستاتیک کمتر تبعیت می‌کند و هرچه دامنه نوسانات در انتهای حوضچه کاهش می‌یابد فشار به فشار استاتیکی نزدیک‌تر می‌شود، بطوریکه در انتهای حوضچه، فشار تقریباً هیدرواستاتیک می‌باشد. مطابق شکل ۵ این امر بخوبی توسط مدل عددی دیده می‌شود. با توجه به شبیه‌سازی مقدار فشار حول موانع موجود در حوضچه، در نواحی که انتظار می‌رود بعلت برخورد جریان با این موانع فشار افزایش یابد، این مسئله دیده می‌شود. همچنین، اختلاف فشار بین سه ناحیه حوضچه آرامش کاملاً منطقی محاسبه شده است. در شکل ۶ مقادیر فشار وارده در صفحه (z-y) و طول‌های متفاوت (انتهای حوضچه) ارائه شده است. در این مطالعه پارامتر فشار در کل مدل‌های آزمایشگاهی

فشار دینامیکی در نظر گرفته شده است. بدین صورت که فشارهای اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده در این پژوهش شامل فشار لحظه‌ای بوده است که دارای حداقل و حداکثر نوسانات می‌باشند. همچنین در این پژوهش، پارامتر فشار با تأکید بر روی فشار هیدرواستاتیک بررسی گردیده است. با توجه به اینکه این پژوهش، پژوهشی عددی-آزمایشگاهی بوده و برای اولین بار در مورد استهلاك انرژی در طول حوضچه و در اعماق مختلف انجام شده است، هدف ارائه یک ایده است که سایر محققان بتوانند آن را کامل نمایند. بنابراین، با استفاده از مدل‌های عددی که اثبات شده‌اند و تقریب خوبی از شرایط واقعی جریان را ارائه می‌کنند برآحتی می‌توان محل‌هایی که حداکثر و حداقل استهلاك انرژی رخ می‌دهد را شناسایی و سازه‌های جدیدی را تعریف نمود تا میزان استهلاك انرژی افزایش

یابد. در این مطالعه، فشار استاتیکی در طول حوضچه برای همگرایی‌های مختلف در سه ردیف پیزومتر واقع در کف حوضچه آرامش محاسبه شده است. در شکل ۷ فشار استاتیکی محاسبه شده در طول حوضچه آرامش همگرا برای ردیف وسط ارائه شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش زاویه همگرایی در طول حوضچه آرامش، فشار اولیه نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۶ - مقادیر فشار وارده در صفحه (Z-Y) و طول های متفاوت (انتهای حوضچه).



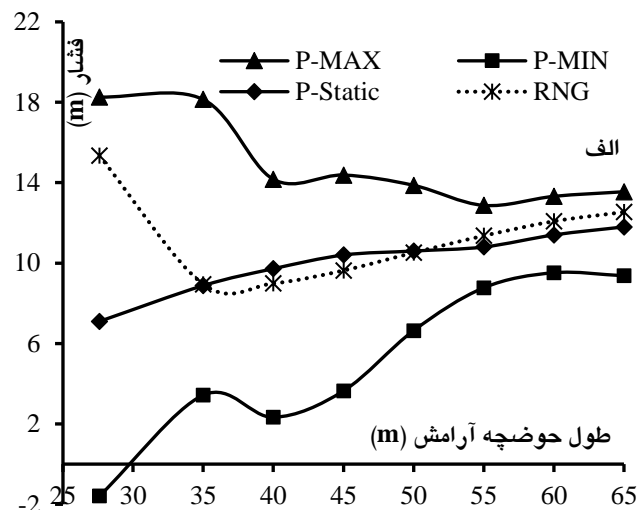
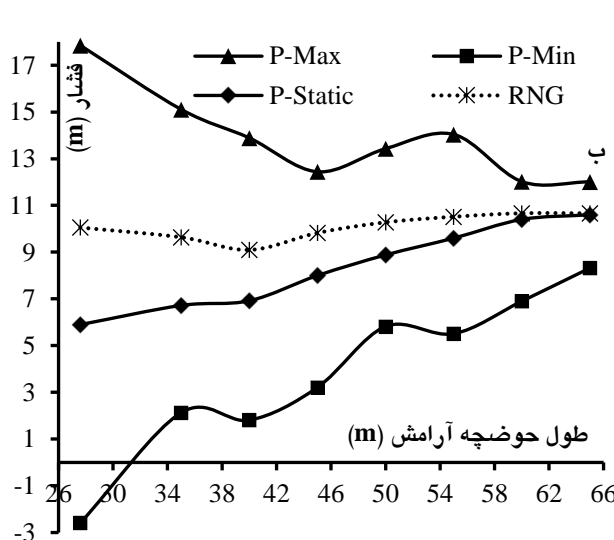
شکل ۷- فشار استاتیکی محاسبه شده در طول حوضچه آرامش همگرا.

تغییرات فشار هیدرواستاتیک درون حوضچه آرامش با زوایای همگرایی مختلف در دبی ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه

در شکل ۸ تغییرات فشار استاتیک محاسبه شده برای زوایای همگرایی ۵ و ۱۲/۵ درجه در دبی ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه برای مدل آشفتگی RNG ارایه شده است. باتوجه به شکل برای تغییرات فشار هیدرواستاتیک درون حوضچه آرامش، می‌توان استنباط کرد که فشار استاتیک مقادیری بین فشار ماکزیمم و مینیمم و نزدیک به فشار محاسبه شده توسط مدل آشفتگی RNG را دارد. برای مقایسه دقیق‌تر این مقادیر با استفاده از تحلیل آماری

مقادیر فشار ماکزیمم، مینیمم و فشار استاتیک برای مدل آشفتگی RNG بصورت جدول ۲ بدست آمده است. در جدول ۲، مقادیر ماکزیمم و مینیمم فشارهای استاتیکی برای دبی ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه برای زوایای همگرایی اندازه‌گیری شده آورده شده است.

مقادیر ماکزیمم فشار بعلت برخورد مستقیم جت تنداب به کف حوضچه، در ابتدای حوضچه‌ها اتفاق افتاده و فشارهای مینیمم هم در قسمت‌های انتهایی حوضچه، که در آنجا جریان خروجی آرام شده است، اتفاق می‌افتد.



شکل ۸- تغییرات فشار هیدرواستاتیک درون حوضچه آرامش همگرا- دبی ۸۳۰ متر مکعب بر ثانیه، الف- حوضچه با زاویه همگرایی ۵ درجه، ب- حوضچه با زاویه همگرایی ۱۲/۵ درجه.

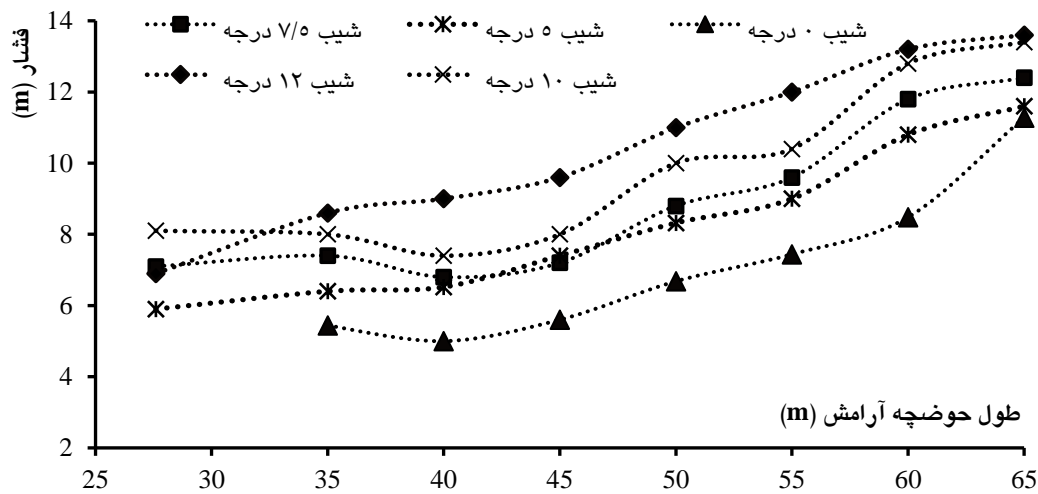
جدول ۲- مقایسه روش‌ها و فشارهای مورد مطالعه برای زوایای همگرایی مختلف در دبی ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه.

روش	فشار	اختلاف میانگین‌ها	سطح معنی‌داری (P-value)
زاویه همگرایی ۵ درجه	Max	۷/۳۵۵ (*)	۰/۰۰۵
	Min	۱۱/۹۵۷ (*)	۰/۰۰۰
	Static	۳/۱۱۷ (*)	۰/۰۰۰
زاویه همگرایی ۷/۵ درجه	Max	۱۲/۲۵۷ (*)	۰/۰۰۰
	Min	۵/۷۳۳ (*)	۰/۰۰۰
	Static	۱/۵۴۶ (*)	۰/۰۲۴
زاویه همگرایی ۱۰ درجه	Max	۷/۵۲۴ (*)	۰/۰۰۲
	Min	۱۲/۶۳۵ (*)	۰/۰۰۰

۰/۰۰۰	(*)۳/۲۴۱	Static	
۰/۰۰۱	(*)-۸/۶۹۹	Max	
۰/۰۰۰	(*)۱۳/۱۹۶	Min	زاویه همگرایی ۱۲/۵ درجه
۰/۰۰۰	(*)۳/۱۹۶	Static	

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه همگرایی، مقادیر فشار نیز افزایش یافته است. با همگرا کردن دیواره‌های حوضچه، طول پرش هیدرولیکی جریان در خروجی حوضچه کاهش می‌یابد و عملکرد جریان در فشار استاتیکی محاسبه شده در طول حوضچه با زاویه همگرایی ۷/۵ درجه حوضچه آرامش، آبراهه پایاب و رودخانه متناسب می‌شود.

از نتایج بدست آمده از جدول ۲ می‌توان چنین استنباط کرد که مقادیر فشار بدست آمده از روش مدل آشفتگی RNG مابین فشار استاتیک و ماکزیمم واقع شده است، بطوریکه مدل عددی برآورد کننده‌ی مناسبی برای فشار استاتیک می‌باشد. در شکل ۹ مقادیر عددی فشار برای زوایای همگرایی ۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ درجه ارائه شده است.



شکل ۹- فشار استاتیک محاسبه شده توسط مدل عددی در حوضچه آرامش با دیواره‌های موازی و همگرا.

هیدرولیکی با استفاده معادلات ۴ و ۵ برای دیواره‌های موازی و همگرا محاسبه شده است.

$$E_1 = y_1 + \frac{v_1^2}{2g}, \quad E_2 = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad [4]$$

$$\eta = \frac{(E_1 - E_2)}{E_1} * 100 \quad [5]$$

در روابط بالا؛ y عمق جریان، E انرژی مخصوص، V سرعت و اندیس‌های ۱ و ۲ برای مقاطع قبل و بعد از پرش می‌باشد.

راندمان پرش هیدرولیکی

با همگرا کردن دیواره‌های حوضچه آرامش پرش هیدرولیکی بصورت مستغرق تشکیل می‌شود. براساس مطالعات راجاراتنام (۱۹۶۶)، در این حالت پرش هیدرولیکی از نوع B بوده و y_1 عمق در شروع شکل‌گیری پرش و y_2 عمق در انتهای پرش می‌باشد. راندمان پرش

افزایش راندمان ندارد. بنابراین، بهترین زاویه همگرایی از نظر عملکرد حوضچه آرامش، زاویه همگرایی ۵ درجه می‌باشد.

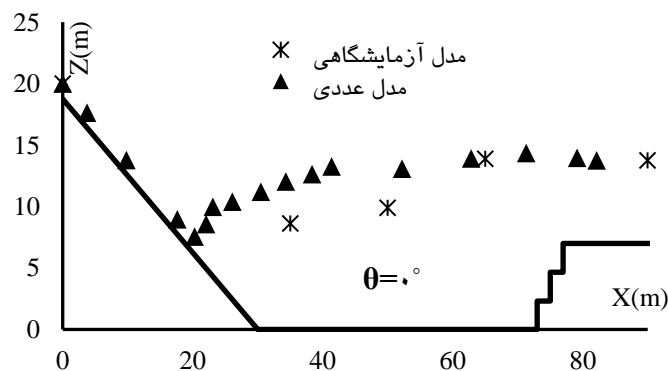
در جدول ۳، راندمان پرش برای حوضچه آرامش با دیواره‌های موازی و همگرا در دبی ۸۳۰ مترمکعب ارائه شده است. براساس جدول ۳، مقایسه راندمان پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش نشان می‌دهد پرش هیدرولیکی در حوضچه با دیواره همگرا بهتر از حالت دیواره‌ی موازی بوده است بطوریکه با افزایش زاویه همگرایی این اختلاف واضح‌تر می‌باشد. همچنین، افزایش زاویه همگرایی از ۵ به ۱۲/۵ درجه تأثیر چندانی در

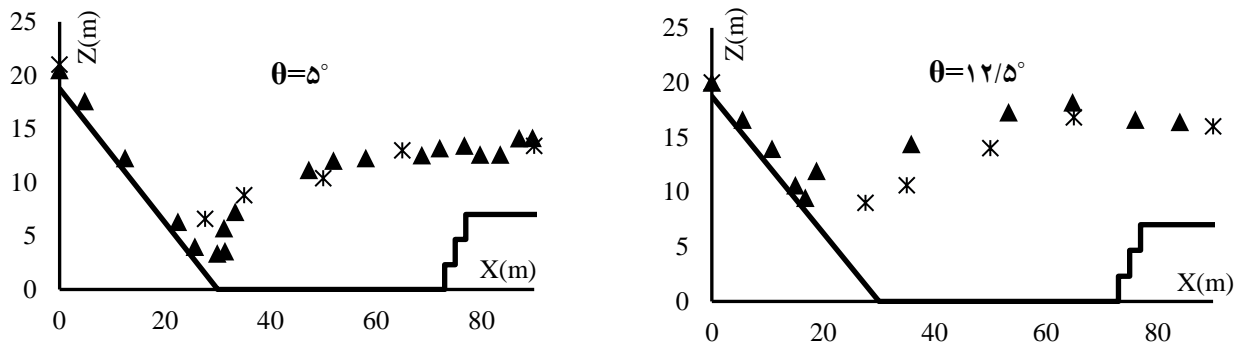
جدول ۳- راندمان پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش در دبی ۸۳۰ مترمکعب برثانیه.

راندمان (%)	زاویه‌ی همگرایی دیواره
۳۳/۳	موازی
۷۸/۵	با همگرایی ۵ درجه
۴۷/۳	با همگرایی ۷/۵ درجه
۵۱/۷	با همگرایی ۱۰ درجه
۶۲/۳	با همگرایی ۱۲/۵ درجه

گیری‌های آزمایشگاهی دارای تطابق خوبی می‌باشد. همچنین در نواحی ابتدایی پرش، بعلت نوسانات شدید سطح آب و آشفتگی زیاد جریان، مقادیر محاسبه شده با مقادیر اندازه‌گیری شده اندکی تفاوت دارند، ولی این اختلاف در انتهای پرش بعلت کاهش تلاطم جریان و افزایش افت انرژی، بشدت کاهش می‌یابد.

پروفیل سطح آب در حوضچه آرامش همگرا در شکل ۱۰، پروفیل سطح آب برای مقادیر عددی و آزمایشگاهی در دبی ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه در حوضچه آرامش با دیواره‌های موازی و همگرا با زوایای همگرایی مختلف مقایسه شده است. با مقایسه پروفیل سطح آب مشاهده می‌شود که مدل عددی در مقایسه با اندازه



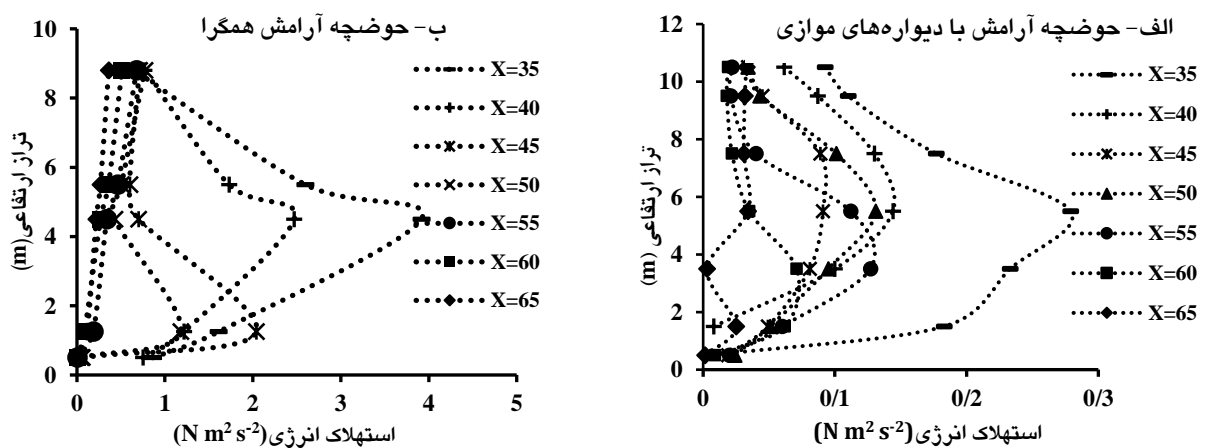


شکل ۱۰- پروفیل سطح آب در حوضچه آرامش همگرا و موازی.

صورتیکه در طراحی سازه‌های حوضچه آرامش این نکته در نظر گرفته شود کارایی حوضچه آرامش بیشتر می‌گردد. همچنین با مقایسه شکل ۱۱ (الف و ب) مشاهده می‌شود که با اعمال زاویه همگرایی به دیواره‌های حوضچه، میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد که این بیانگر تأثیر مثبت همگرایی دیواره‌ها می‌باشد بطوریکه در مقطع ابتدایی حوضچه، در تراز ۵/۵ متر از کف حوضچه از مقدار ۰/۳ به ۴ نیوتن مترمربع بر مجذور ثانیه می‌رسد.

استهلاک انرژی

در شکل ۱۱، استهلاک انرژی برای ترازهای مختلف ارتفاعی در حوضچه آرامش همگرای انتها پله‌ای برای مدل آشفتگی RNG به ازای دبی ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شده است. با توجه به شکل می‌توان بیان کرد حداکثر استهلاک انرژی تقریباً در مقاطع ابتدایی حوضچه آرامش رخ می‌دهد و در مابقی مسیر، جریان تلاطم و آشفتگی کمتری دارد. همچنین برای ترازهای مختلف ارتفاعی می‌توان بیان کرد که حداکثر استهلاک انرژی جنبشی در اعماقی بین ۲۰-۳۰ درصد ایجاد می‌گردد. در



شکل ۱۱- استهلاک انرژی در حوضچه آرامش.

عمق پایاب از جمله روش‌هایی هستند که برای عملکرد بهتر حوضچه آرامش بکار گرفته می‌شوند. در این مطالعه جهت تأمین عملکرد بهتر حوضچه آرامش، بلوک‌های

نتیجه‌گیری کلی

تغییر شکل مقطع، پلان حوضچه آرامش و افزایش

نشان داد که پلکانی کردن انتهای حوضچه آرامش USBR II و همگرا کردن دیواره‌ها، اگرچه باعث افزایش عمق پایاب می‌شود، اما انتقال پرش هیدرولیکی به داخل حوضچه آرامش و در نهایت مستغرق شدن پرش را به همراه دارد. با توجه به مقادیر راندمان محاسبه شده، عملکرد پرش هیدرولیکی در حوضچه با دیواره همگرا، بهتر از حالت موازی بوده است بطوریکه زاویه ۵ درجه بهترین عملکرد را برای حوضچه آرامش همگرا نشان می‌دهد.

انرژی‌گیر در انتهای حوضچه آرامش USBR II مدل سد نازل‌وچای به پله‌های معکوس، و دیواره‌های موازی حوضچه به دیواره‌های همگرا تغییر یافته است. برای شبیه‌سازی عددی جریان در حوضچه آرامش از نرم‌افزار Flow-3D و برای بدست آوردن پروفیل سطح آب از روش VOF به ازای دبی ۸۳۰ مترمکعب بر ثانیه استفاده شده است. نتایج صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی فشار در حوضچه آرامش همگرا نشان داد که مدل RNG دارای تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد. نتایج این مطالعه

منابع مورد استفاده

- Abrishami J and Esmaeili K, 2000. Hydraulic jump over negative slopes with negative steps. *Journal of Advanced Materials in Engineering* 19(2): 97-110 (In Persian with English abstract).
- Abrishami J and Esmaeili K, 2001. Determination of the relationship between before- and after-jump depths and step height in order to control hydraulic jump over pools with a positive or negative slope. *International Conference on Hydraulic Structures of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman* (In Persian with English abstract).
- Anonymous, 2006. Hydraulic Model of Nazloochoai Dam Stilling Basin, Water Research Institute, Tehran, Iran (In Persian).
- Anonymous, 2008. Hydraulic Model of Lower Discharge of Gotvand upper Dam. Water Research Institute. Tehran, Iran (In Persian).
- Anonymous, 2008. Excellence in Flow Modeling Software, V 9.3, Flow Science, Inc., Santa Fe, N.M.
- Arabhabhira A and Abella AU, 1971. Hydraulic jump within gradually expanding channel. *Journal of Hydraulic Engineering American Society of Civil Engineers* 97(1):31-42.
- Babaali H, Shamsai A and Vosoughifar H, 2015. Computational modeling of the hydraulic jump in the stilling basin with convergence walls using CFD codes. *Arabian Journal Science Engineering* 40(2):381-395.
- Babaali HR, Soori N, Soori S, Mojtahedi AR and Hamedi AM, 2018. Static pressure estimation on converging USBR II Stilling Basin: Numerical Approach. *International Journal of Science and Engineering Investigations* 7(79): 2251-8843.
- Bakhtiari M, and Kashafipour M, 2008. Investigation of hydraulic properties of jumping parameters in divergent sections. 4th National Congress of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran (In Persian with English abstract).
- Bayon A, Valero D, García-Bartual R, Valles-Moran FJ and Amparo Lopez-Jimenez P, 2016. Performance assessment of OpenFOAM and Flow-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modeling and Software* 80:322-335.
- Chanson H, 2015. *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*. IAHR Monographs, CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group.
- Davidson P, 2015. *Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers*. Oxford University Press. USA.
- Esmaili K and Abrishami J, 2000. Hydraulic jump over negative slopes with negative steps. *Journal of Advanced Materials in Engineering* 19(2): 97-110 (In Persian with English abstract).
- Esmaili M, 2003. Study of the properties of diverging hydraulic leakage in a trapezoidal relaxation pool. M.Sc. thesis, Faculty of Agriculture, University of Tehran (In Persian with English abstract).
- Felder S and Chanson H, 2013. Aeration, flow instabilities, and residual energy on pooled stepped spillways of embankment dams. *Journal of Irrigation Drainage Engineering* 139(10):880-887.

- Forster JW and Skrinde RA, 1950. Control of the hydraulic jump by sill. *Transaction of American Society of Civil Engineers* 115(2415):988-991.
- Gamal HE, Abdelazim MA, Neveen BA and Ahmed MI, 2016. Effect of end step shape in the performance of stilling basins downstream radial gates. *Journal of Scientific Research and Reports* 9(1):1-9.
- Ippen AT, 1951. Mechanics of supercritical flow. *Transaction of American Society of Civil Engineer* 116:268-295.
- Kassi Kozani A, 2010. Experimental study of the properties of diverging hydraulic jumps in a stilling basin with a reverse slope. M.Sc. thesis, Faculty of Agriculture, University of Tehran (In Persian with English abstract).
- Khelifa AM and McCorquodale AM, 1980. Submerged radial hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers* 106(HY3):355-367.
- Minaei Gigloo A, Ghodsian M and Mehraein M, 2016. Experimental investigation of hydraulic jump in stilling basin with stepped sill. *Modares Civil Engineering* 16(1):146-156 (In Persian with English abstract).
- Omid MH, Esmaeili Varaki M and Narayanan R, 2007. Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel. *Journal of Hydraulic Research* (4):512-518.
- Pirestani MR, Razmkhah A and Ghobadi F, 2012. Effect of convergence walls on energy dissipation in stilling basin by physical modelling. *International Journal of Thermal and Fluid Science* 1(1):1-10.
- Sahebfi F, Esmaili M, Navabian M and Amiri Z, 2012. Economic evaluation of the effect of divergence of stilling basin walls on changes in construction costs. 11th Iranian Hydraulic Conference. November 18-18, Urmia University, Urmia, Iran (In Persian with English abstract).
- Shojaeian Z, Hosseinzadeh Delir A, Forsadizadeh D and Salmasi F, 2011. Investigation of hydraulic jump properties in divergent rectangular sections with inverse slope. *Water and Soil Science- University of Tabriz*, 21(3): 50-60 (In Persian with English abstract).
- Soori S, Babaali HR and Soori N, 2017. An optimal design of the inlet and outlet obstacles at USBR II stilling basin. *International Journal of Science and Engineering Applications* 6(5):134-142.
- Wang K, Jin S and Liu G, 2009. Numerical modeling of free-surface flows with bottom and surface-layer pressure treatment. *Journal of Hydrodynamics* 21(3):352-359.
- Wu JH and Wan-Zheng AI, 2010. Flows through energy dissipaters with sudden reduction and sudden enlargement forms. *Journal of Hydrodynamics* 22(3):360-365.