نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال چهارم / شماره سیزدهم / تابستان ۱۳۹۶

Journal of Dam and Hydroelectric Power Plant
4rd Year / No. 13 / March 2017

تحلیل پارامترهای هیدرودینامیکی جریان در حوضچه‌های آرامش استاندارد نوع I، II و III

فائزه تاج‌آبادی[۱]
احسان جباری[۲]
حامد سرکرده*[۳]

چکیده

در پژوهش حاضر، حوضچه‌های آرامش نوع I،II و III بعد از صحت‌سنجی با مدل آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی شده و ضمن بررسی پرش هیدرولیکی، پارامترهای هیدرودینامیکی جریان مانند فشار، سرعت، شدت آشفتگی و ورتیسیتی مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفتند. از مدل‌های RNG و VOF برای شبیه‌سازی آشفتگی و سطح آزاد جریان استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کارایی حوضچه نوع III و II از حوضچه نوع I بیشتر است و این کارایی به دلیل تأثیر قابل‌توجه بلوک‌های پای تندآب در حوضچه نوع III و آب‌پایه انتهایی در حوضچه نوع II است. همچنین وجود موانع در حین پرش هیدرولیکی تأثیر چندانی بر شدت آشفتگی نداشته اما در انتهای پایاب باعث کاهش شدت تلاطم و آشفتگی شده به‌طوری‌که این پارامتر در حوضچه‌های نوع II و III نسبت به حوضچه نوع I به ترتیب در حدود ۱۲٪ و ۲۷٪ کمتر است و درنتیجه باعث کاهش خسارت می‌شود. ورتیسیتی در حوضچه نوع II به ترتیب در حدود ۹۸٪ و ۶۷٪ نسبت به حوضچه نوع I و III کمتر است و در پایاب این حوضچه ورتیسیتی تقریباً صفر است و فقط حرکت انتقالی وجود دارد. درنتیجه این حوضچه در آرام کردن جریان نقش مهم‌تری از دو حوضچه دیگر دارد.

کلمات کلیدی:

حوضچه‌های آرامش نوع I,II,III، مدل عددی، شدت آشفتگی، تغییرات فشار و سرعت، ورتیسیتی

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۶ تاریخ پذیرش: ۹۶/۲/۱۹

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه قم
۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم
۳. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری،sarkardeh@hsu.ac.ir

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]

مقدمه

حوضچه‌های آرامش با تشکیل پرش هیدرولیکی به‌منظور استهلاک انرژی جریان پرسرعت خروجی از تخلیه کننده‌ها، تونل‌ها و سرریزها به کار می‌روند تا پایداری بستر پایین‌دست حوضچه تأمین شود. پرش هیدرولیکی از نوع جریان‌های متغیر سریع است که با تغییر جریان از فوق‌بحرانی به زیربحرانی در جریان‌های با سطح آزاد تشکیل می‌شود و همراه با تلاطم و پیچش سطحی و اختلاط هوا در جریان آب است. اداره احیاء اراضی ایالات‌متحده[1] USBR به انجام آزمایش‌هایی بر روی مدل‌های فیزیکی پرداخت و در سال ۱۹۵۸، نشریه‌ای با نام "طراحی هیدرولیکی حوضچه‌های آرامش و مستهلک کننده انرژی" ارائه کرد که یکی از مراجع موجود بین مهندسان برای طراحی مستهلک کننده‌های انرژی محسوب می‌شود. تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بسیاری روی حوضچه‌های آرامش USBR انجام شده است. پیلای[2] (۱۹۶۹) برای بهینه نمودن حوضچه استاندار نوع III بلوک‌های آرام‌کننده کف حوضچه را با بلوک‌های گوه‌ای با زاویه رأس ۱۲۰ درجه تعویض نمود و این بلوک‌ها باعث کاهش طول حوضچه شده و احتمال بروز کاویتاسیون را کاهش دادند. بهروزی راد و فتحی‌مقدم (۱۳۸۷) در مطالعات خود به بررسی چگونگی تأثیرگذاری تغییر ارتفاع آب‌پایه بتنی پیوسته بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سد گلابر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که چنانچه ارتفاع آب‌پایه بتنی کمتر از مقدار موردنیاز انتخاب گردد، پرش به سمت پایین‌دست حرکت کرده و اگر بیشتر از ارتفاع موردنیاز باشد، پرش به سمت بالادست حرکت می‌کند و مستغرق خواهد شد و خطر فرسایش را کاهش می‌دهد. شفاعی بجستان و نیسی[3] (۲۰۰۹) با جایگذاری بلوک‌های لوزی شکل در حوضچه آرامش به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی پرداختند و نتیجه گرفتند که طول پرش هیدرولیکی در مقایسه با حوضچه‌های USBR و SAF کمتر است. همچنین نشان دادند که عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی در محدوده اعداد فرود ۴/۵ تا ۱۲ به ترتیب به میزان ۲۶٪ و ۳۶٪ کاهش می‌یابد. تنکابنی و همکاران (۱۳۹۲) نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بلوک‌های حوضچه نوع II را توسط نرم‌افزار Flow 3D و با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی حوضچه آرامش سد گلابر محاسبه کردند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات نوسان‌های فشار با عدد فرود فوق‌بحرانی پرش در وجوه مختلف بلوک پای تندآب افزایش می‌یابد. مردانی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه خود به بررسی تأثیر بلوک در استهلاک انرژی و آب‌شستگی پایین‌دست حوضچه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با توجه به هندسه حوضچه آرامش، نحوه چینش بلوک‌ها و عدد فرود، استفاده از بلوک می‌تواند به‌طور میانگین ۱۵٪ موجب افزایش استهلاک انرژی گردد. همچنین استفاده از سطح زبر باعث کاهش عمق ثانویه بین ۱۸ درصد تا ۳۷ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی بین ۲۷ درصد تا ۶۷ درصد نسبت به سطح صاف شود. همچنین استفاده از بلوک باعث کاهش پارامتر آب‌شستگی نسبت به حالت استاندارد USBR می‌شود. حبیب زاده و راجاراتنام[4] (۲۰۱۲) به مطالعه آزمایشگاهی عملکرد بلوک‌های آرام‌کننده در پرش هیدرولیکی مستغرق پرداختند و عملکرد بلوک‌ها را در دو رژیم جریان متفاوت بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در رژیمی که نسبت استغراق کمتراست، استهلاک بیشتر و تنش وارد بر کف در پایین‌دست بلوک‌ها کمتراست. علیخانی[5] و همکاران (۲۰۰۹) به انجام آزمایش‌هایی برای ارزیابی تأثیرات یک آب‌پایه بتنی پیوسته و موقعیت آن روی عمق و طول پرش هیدرولیکی اجباری به‌طوری‌که تحت تأثیر عمق پایاب نباشد، پرداختند و یک رابطه جدید بین ارتفاع آب‌پایه و موقعیت آن، عمق ثانویه پرش و طول پرش ارائه دادند. در مطالعات عددی، صباغ یزدی و رستمی[6] (۲۰۰۷) مشخصات آشفتگی جریان در پرش هیدرولیکی را بررسی کردند. در این شبیه‌سازی سه‌بعدی از مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ و RNG استفاده شده است. آن‌ها مشاهده کردند که مدل آشفتگی RNG نسبت به مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ در پیش‌بینی پروفیل سرعت و توزیع فشار بهتر است. صاحبی وایقان و همکاران (۱۳۹۲) به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا با نرم‌افزار Fluent پرداختند. نتایج آن‌ها کارایی حوضچه‌های واگرا را در کاهش طول پرش نسبت به حوضچه‌های کلاسیک نشان داد. همچنین مدل عددی، گردابه‌های ایجادشده درنتیجه واگرایی دیوارها را به‌خوبی مطابق با بررسی‌های تجربی نشان

1. US Bureau of Reclamtion
2. Pillai
3. Shafai-Bajestan & Neisi
4. Habibzade & Rajaratnam
5. Alikhani
6. Sabbagh-Yazdi & Rostami

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]

داده است. این گرداب‌ها در اعداد فرود بالا در یک سمت دیواره تشکیل‌شده و در اعداد فرود پایین‌تر در دو طرف دیواره‌های واگرا ایجاد می‌شوند و شدت تشکیل این گرداب‌ها با افزایش زاویه واگرایی دیوارها بیشتر می‌شود. باباعلی[1] و همکاران (۲۰۱۵) به شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش استاندارد نوع II با دیواره‌های همگرا و با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و *RNG* پرداختند و نتایج نشان داد که در تمام دبی‌ها عملکرد حوضچه با دیواره‌های همگرا از حوضچه با دیواره‌های موازی بهتر است و مدل آشفتگی RNG در مقایسه با $k-\varepsilon$ نتایج شبیه‌سازی بهتری را ارائه می‌دهد. بلکشاهی لاشه و مرتضوی (۲۰۱۶) تأثیر عدد فرود و سرعت بر تغییرات فشار وارده در پرش هیدرولیکی بر کف حوضچه را به کمک نرم‌افزار Fluent بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که میزان دبی بر تغییرات فشار هیدرواستاتیک کف حوضچه آرامش تأثیرگذار است و محل تشکیل پرش نیز بر فشار هیدرواستاتیکی کف حوضچه آرامش تأثیر بسزایی دارد و عدد فرود و سرعت نیز بر نوسان‌های ایجادشده در پرش مؤثر است. ولارو[2] و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی عددی عملکرد حوضچه آرامش نوع III در پایین‌دست یک شوت صاف و پلکانی با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D و مدل آشفتگی RNGدر محدوده عدد فرود ۳/۱ تا ۹/۵ پرداختند و به این نتیجه رسیدند زمانی که از شوت پلکانی استفاده می‌شود، مقدار آشفتگی پرش در پایین‌دست شوت کمتر از شوت صاف است و این کاهش برای اعداد فرود کمتر، کمتر است.

استفاده از مدل‌های عددی در کنار مدل‌های آزمایشگاهی در مسائل مختلف هیدرولیکی انجام شده است. این تحقیقات نشان داده است که این دو روش می‌توانند به‌صورت موازی به حل مسائل پیچیده هیدرولیکی کمک کنند (Jorabloo et al. 2011; Maghsoodi et al. 2012; Sarkardeh et al. 2014).

بااینکه تحقیقات زیادی روی حوضچه‌های آرامش انجام شده است، اما تحقیق جامعی روی مقایسه و تحلیل پارامترهای هیدرودینامیکی و عملکرد حوضچه‌های آرامش در پایین‌دست سدهای بلند انجام نشده است. لذا هدف از این تحقیق، مقایسه این پارامترها در سه نوع استاندارد حوضچه آرامش است. در این راستا، پس از شبکه‌بندی، تعیین مدل آشفتگی و صحت‌سنجی مدل عددی، پارامترهای فشار، سرعت، ورتیسیتی و شدت آشفتگی در هر سه حوضچه مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

نرم‌افزار Flow 3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریب‌های حجم‌های محدود حل می‌کند. در این نرم‌افزار برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد از تابع حجم سیال (VOF[3])، استفاده می‌شود. این تابع، مقدار حجم سیال را در سلول محاسباتی بیان و توسط رابطه (۱) نشان داده می‌شود. همچنین برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی از روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR[4]) استفاده شده است.

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{1}{V_f}[\frac{\partial}{\partial x}(FA_x u)+\frac{\partial}{\partial y}(FA_y v)+\frac{\partial}{\partial y}(FA_z w)]=0 \qquad (۱)$$

که F به نوع مسئله موردبررسی بستگی دارد. در جریان‌های تک فازی، F بیانگر حجم سلول است که توسط سیال اشغال شده است؛ بنابراین در مناطقی که سیال وجود دارد F=1 و در مناطقی که حباب و حفره وجود دارد F=0 می‌باشد (ماروسی و همکاران، ۱۳۹۲). معادلات حاکم بر جریان سیال شامل پیوستگی و مومنتوم است. برای یک سیال غیرقابل تراکم در مختصات کارتزین و با فرض نامتخلل بودن مسئله معادله پیوستگی به‌صورت زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x)+\frac{\partial}{\partial y}(vA_y)+\frac{\partial}{\partial z}(wA_z)=0 \qquad (۲)$$

که در آن u,v,w و A_x, A_y, A_z به ترتیب سرعت و نسبت مساحت در راستاهای x,y,z است. م استلات مومنتوم یا حرکت، از حل معادلات ناویر-استوکس حاصل می‌شود. با توجه به غیرقابل‌تراکم بودن سیال و نیز نامتخلل بودن مسئله، ثابت بودن مرزهای جامد و انتخاب راستای z به‌عنوان راستای ثقل که درنتیجه تنها شتاب ثقل وارد بر جریان خواهد بود و استفاده از مختصات کارتزین، معادلات ناویر-استوکس به‌صورت ذیل درمی‌آید (شجاعیان و کاشفی پور، ۱۳۹۲).

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_f}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial y}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right\}=-\frac{1}{\rho}(\frac{\partial p}{\partial x}) \qquad (۳)$$

1. Babaali
2. velaro
3. Volume of Fluid
4. Fractional Area-Volume Obstacle Representation

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

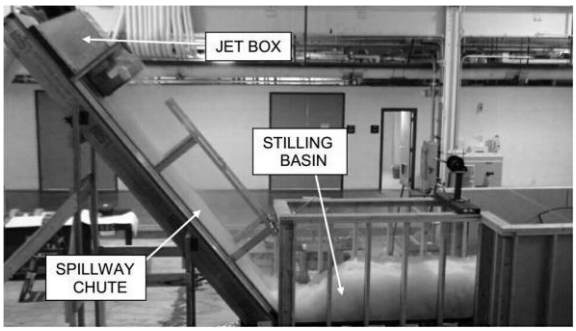
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]

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

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

که V_f جزئی از حجم باز برای جریان و ρ چگالی سیال، P فشار سیال و g_z شتاب گرانش زمین در راستای Z است.

در این پژوهش از نتایج آزمایشگاهی گزارش‌شده توسط USBR با نام طراحی هیدرولیکی حوضچه‌های آرامش و مستهلک کننده‌های انرژی (نشریه ۲۵) استفاده شده است. در این آزمایش‌های برای مدل‌سازی حوضچه آرامش استاندارد نوع I، II و III از فلومی با شیب شوت ۱:۰/۷ و عرض ۰/۶۰۹ متر و ظرفیت دبی ۰/۴۵۲ مترمکعب بر ثانیه استفاده شده است. هم‌چنین برای فراهم آوردن سرعت بالا در اعداد فرود بزرگ‌تر در ابتدای شوت، جت باکسی تعبیه شده است. برای مقایسه بهتر پارامترهای هیدرودینامیکی جریان از قبیل فشار و سرعت، کلیه آزمایش‌ها برای سه نوع حوضچه در عدد فرود یکسان ۹/۱۶ انجام شده است. در شکل (۱) مدل آزمایشگاهی حوضچه‌ها نشان داده شده است.

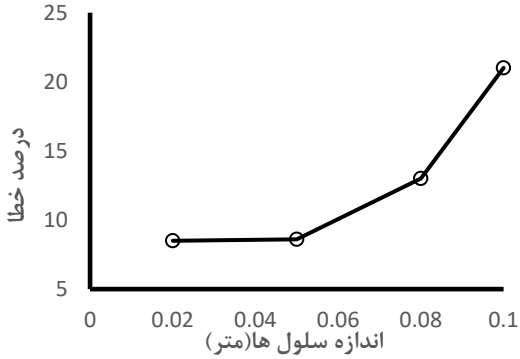


شکل (۱): مدل آزمایشگاهی (پترکا[1]، ۱۹۷۸)

برای شبیه‌سازی عددی، به دلیل داشتن مقدار دبی در مدل آزمایشگاهی (مطابق جدول (۱))، از شرط مرزی Volume Flow Rate در بالادست و به دلیل وجود عمق پایاب در مدل آزمایشگاهی از شرط مرزی Specified pressure در پایین‌دست و برای کف حوضچه و دیواره‌ها از شرط مرزی Wall استفاده شده است.

به‌منظور بدست آوردن ابعاد بهینه شبکه و تحلیل حساسیت شبیه‌سازی به ابعاد شبکه، شبکه مکعبی سه‌بعدی با ابعاد مختلف ۱۰، ۸، ۵ و ۲ سانتیمتر موردبررسی قرار گرفت. درنهایت با توجه به شکل (۲) ابعاد ۲ سانتی‌متر انتخاب شد.

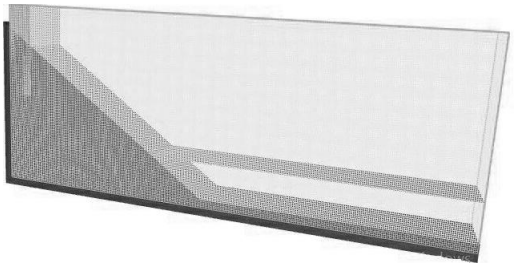
1. Peterka



شکل (۲): درصد خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی

شایان ذکر است که شکل (۲) با توجه به مقدار درصد خطا نسبت به مدل آزمایشگاهی، برای پارامتر سرعت در پنجه پرش برای چهار اندازه متفاوت شبکه‌بندی رسم شده است.

در تعریف شرایط اولیه از آب به‌عنوان سیال تراکم‌ناپذیر با چگالی(kg/m^3) ۱۰۰۰ و لزجت دینامیکی (kg/m/s) ۰/۰۰۱ در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. به‌منظور کاهش زمان محاسبات و پایداری سریع‌تر جریان در مدل عددی، ناحیه‌ای پر از سیال در مدل عددی که به‌صورت مکعبی روی ابتدای شوت در شکل نشان داده‌شده، به‌عنوان شرایط اولیه مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شد تا جریان توسعه‌یافته همانند مدل آزمایشگاهی وارد حوضچه شود (ولارو[2]، ۲۰۱۶).



شکل (۳): شرط اولیه و شبکه‌بندی در مدل عددی

در راستای انتخاب مدل آشفتگی در این تحقیق، نتایج کار پژوهشگرانی چون صباغ یزدی و رستمی[3] (۲۰۰۷)، صباغ یزدی و همکاران (۱۳۸۷) و شجاعیان و کاشفی‌پور (۱۳۹۲) درزمینه‌ی شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار Flow 3D نشان می‌داد که مدل آشفتگی RNG[4] و $k-\varepsilon$ پرکاربردترین مدل‌هایی هستند که برای شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش مورد استفاده قرار می‌گیرند و مقایسه‌ای که این محققان بین نتایج حاصل از این دو مدل انجام دادند،

2. Velaro
3. Sabbagh-Yazdi & Rostami
4. Renormalized group

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]

بیانگر این موضوع بود که مدل آشفتگی RN در ترکیب با روش VOF دارای دقت بیشتری نسبت به مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ است. بر همین اساس در این تحقیق، گزینه‌های بررسی‌شده در نرم‌افزار با مدل آشفتگی RNG مورد مطالعه قرار گرفته است.

مدل آشفتگی RNG با به‌کارگیری یک روش آماری پیچیده روی معادلات لحظه‌ای ناویر-استوکس به دست می‌آید. این مدل از دو معادله انتقال شامل انرژی جنبشی جریان آشفته K و نرخ اتلاف انرژی جنبشی ε، به‌صورت زیر، برای حل معادلات ناویر استوکس استفاده می‌کند.

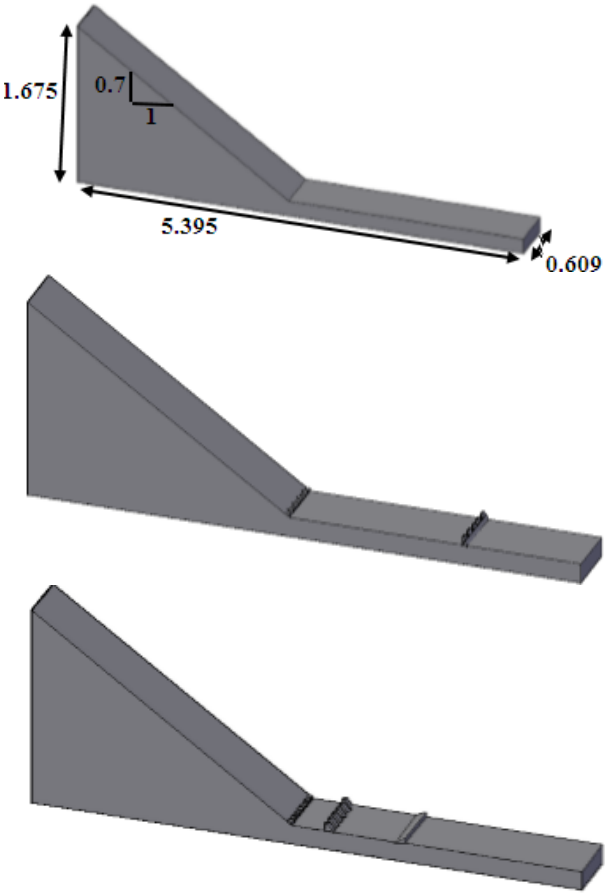
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha_k \mu_{eff}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_m \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)$$

$$-C\rho_{2\varepsilon\rho}\frac{\varepsilon^2}{k}-R_\varepsilon$$

در این معادلات μ_{eff}به‌صورت مجموع لزجت آشفتگی و مولکولی تعریف می‌شود. G_b و G_k میزان تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از شناوری و گرادیان سرعت متوسط هستند. Y_m توزیع انبساط و انقباض نوسان‌های جریان تراکم‌پذیر آشفته را نسبت به نرخ هدررفت کلی نشان می‌دهد. $C_{1\varepsilon}$، $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ ضرایب ثابت می‌باشند. α_k و α_ϵ عکس اعداد پرانتل مؤثر انرژی جنبشی جریان آشفته و نرخ زوال هستند و R_ε ترمی به‌منظور محاسبه صحیح جریان در گرادیان کرنش زیاد است(شجاعی‌فرد و طلحانی، ۱۳۹۱).

شکل (۴) هندسه سه حوضچه را نشان می‌دهد: حوضچه نوع II شامل بلوک‌های پای تنداب و پایاب انتهایی دندانه‌ای و همچنین حوضچه نوع III علاوه بر بلوک‌های پای تندآب و آستانه انتهایی، بلوک‌های جداکننده در پایین‌دست بلوک‌های پای تندآب قرارگرفته و به همین دلیل می‌توان از یک حوضچه آرامش کوچک‌تر با آستانه پایانی ساده‌تر استفاده کرد (زراتی و همکاران، ۱۳۹۲).



شکل (۴): حوضچه‌های آرامش نوع I، II و III

در شکل (۴) ابعاد مدل عددی برحسب متر برای حوضچه نوع I با توجه به مدل فیزیکی نشان داده شده است که به دلیل یکی بودن شرایط آزمایش برای سه حوضچه، این اندازه ها برای دو حوضچه دیگر نیز صدق می‌کند. جدول (۱) شرایط مدل آزمایشگاهی را برای سه حوضچه استاندارد نشان می‌دهد که در آن Q دبی کل، q دبی بر واحد عرض حوضچه‌ها، W عرض حوضچه، T_w عمق پایاب، D_1 و D_2 به ترتیب عمق اولیه و ثانویه پرش، L طول پرش و V_1 و Fr_1 به ترتیب سرعت و عدد فرود در مقطع اولیه پرش است.

جدول (۱): شرایط آزمایشگاهی حوضچه‌های آرامش نوع I، II و III

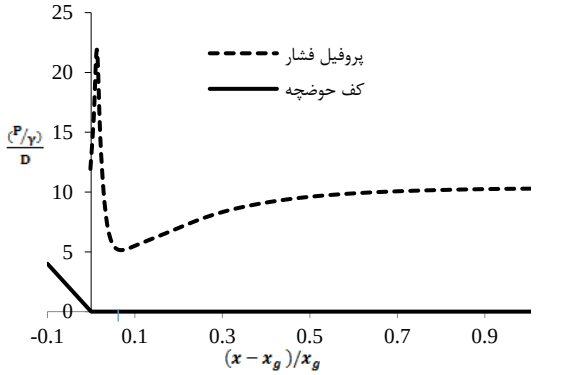
	$Q\ (m^3/s)$	$W\ (m)$	$q\ (m^2/s)$	$T_W(m)$	$V_1(m)$	$D_1(m)$	$L(m)$	Fr_1	D_2/D_1	L/D_2
Type I	۰/۱۱۳	۰/۶۰۹	۰/۶۰۹	۰/۴۳۱	۵/۳	۰/۰۳۴۱	۲/۵۵۴	۹/۱۶	۱۲/۶۴	۵/۹۳
Type II	۰/۱۱۳	۰/۶۰۹	۰/۶۰۹	۰/۴۳۵	۵/۳۴	۰/۰۳۴۱	۱/۸۵۹	۹/۱۶	۱۲/۵۴	۴/۲۷
Type III	۰/۱۱۳	۰/۶۰۹	۰/۶۰۹	۰/۴۳۵	۵/۳۴	۰/۰۳۴۱	۱/۱۲۸	۹/۱۶	۱۲/۵۴	۲/۵۹

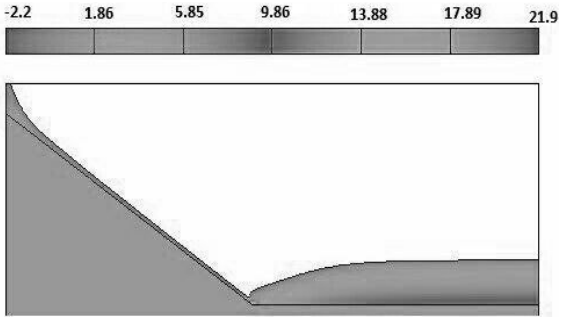
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]

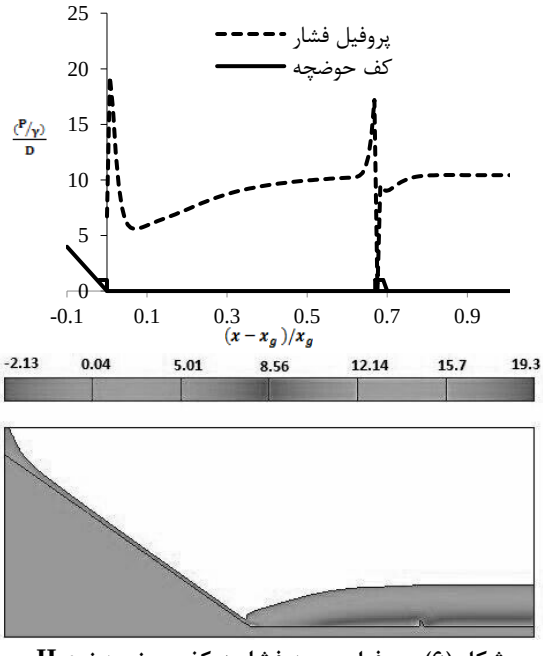
نتایج و بحث

شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) پروفیل بی‌بعد فشار را به ترتیب برای حوضچه‌های نوع I،II وIII در کف حوضچه نشان می‌دهد که در آن x_g محل برخورد شوت و حوضچه در ابتدای شوت و γ وزن مخصوص آب و برابر با (N/m^3) ۱۰۰۰۰و D وعمق اولیه پرش و برابر با ۰/۰۳۴۱ متر در سه حوضچه است.

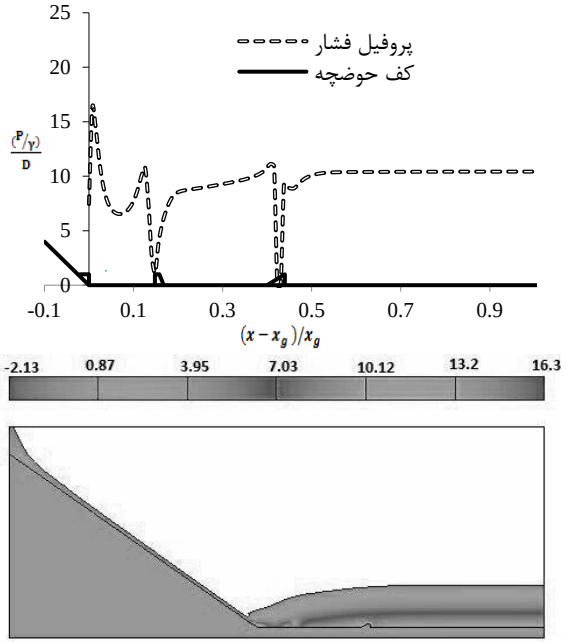




شکل (۵): پروفیل بی‌بعد فشار در کف حوضچه نوع I (x_g=۲/۳۹، D=۰/۰۳۴۱ و Q=۰/۱۱۳)



شکل (۶): پروفیل بی‌بعد فشار درکف حوضچه نوع II



شکل (۷): پروفیل بی‌بعد فشار درکف حوضچه نوع III

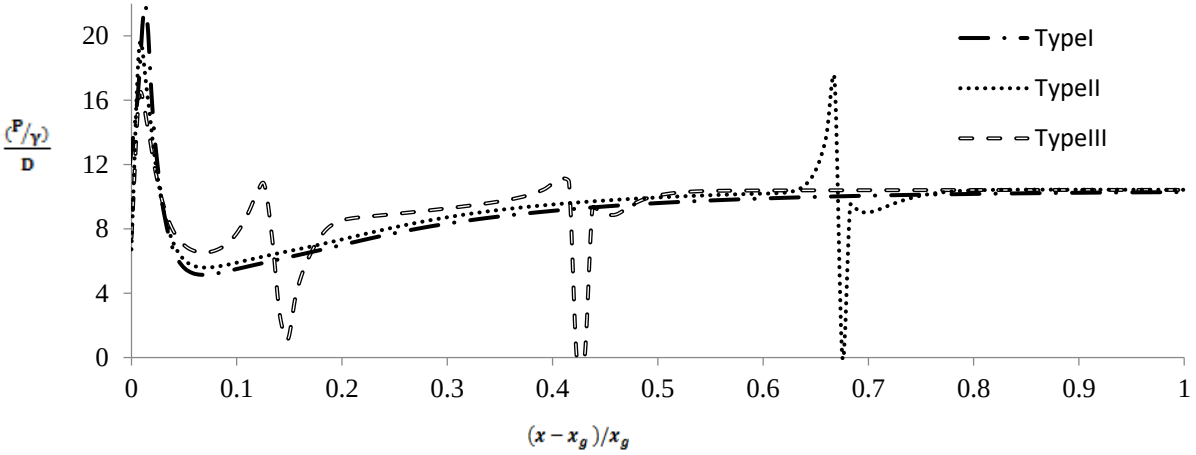
همان‌طور که از شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) مشخص است، برای هر سه نوع حوضچه در محل برخورد جت به سطح افقی حوضچه به علت تغییر مسیر جریان و برخورد آن به کف افقی، فشار افزایش می‌یابد. پس‌ازآن به علت تشکیل پرش هیدرولیکی، انحنای شدید خطوط جریان مشاهده می‌شود و این مطلب توزیع هیدرواستاتیک فشار را نقض می‌کند و با نزدیک شدن به انتهای حوضچه و پایان پرش، توزیع فشار هیدرواستاتیک شده و جریان شبیه به جریان در کانال‌های باز می‌شود. در ادامه با برخورد جریان به موانع و زبری‌های کف حوضچه ازجمله بلوک‌ها و آب‌پایه‌های انتهایی، فشار ابتدا افزایش‌یافته و سپس کاهش می‌یابد. این افزایش فشار در حوضچه نوع II در محل قرارگیری آب‌پایه به میزان ۳۸٪ از حوضچه نوع III بیشتر است.

شکل (۸) مقایسه پروفیل‌های بی‌بعد فشار را برای سه حوضچه نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۸) مشخص می‌شود با ورود جت آب به حوضچه به علت تغییر مسیر جریان و جدایش آن از سطح مورب، فشار در سه حوضچه افزایش‌یافته است، اما این افزایش به دلیل وجود بلوک‌های پای تندآب برای حوضچه‌های نوع II و III نسبت به حوضچه نوع I به ترتیب به میزان ۱۲٪ و ۲۶٪ کمتر است. در این حوضچه‌ها به دلیل وجود بلوک پای تندآب برخورد جریان ورودی ابتدا با سطح بلوک تندآب صورت می‌گیرد. درنتیجه

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]

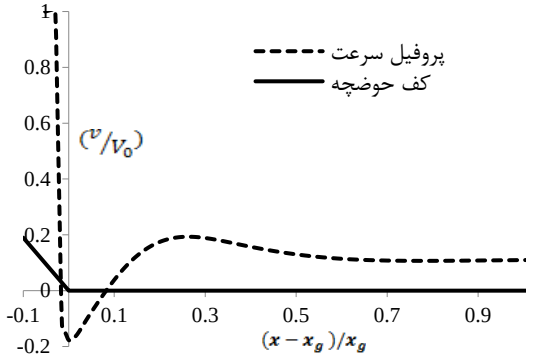
باعث جدایش کمتر جریان شده، همچنین به دلیل پخش جریان ورودی در بلوک‌های پای تندآب، افزایش فشار نسبت به حوضچه بدون بلوک کمتر است. این تفاوت در حوضچه‌های نوع II و III به دلیل تفاوت در هندسه این بلوک‌ها در دو حوضچه است؛ که نشان می‌دهد بلوک‌های پای تندآب حوضچه نوع III کارایی بیشتری در کاهش فشار در ورودی حوضچه نسبت به حوضچه نوع II دارند.

با مشاهده شکل‌های (۷) و (۸) روشن می‌شود که تأثیر آب‌پایه انتهایی در افزایش و سپس کاهش فشار به دلیل افزایش عمق آب در برخورد با این دو مانع، به میزان ۱۰ درصد از بلوک‌های آرام‌کننده بیشتر است و این امر به‌این‌علت است که بین بلوک‌های آرام‌کننده فضای خالی برای خروج آب وجود دارد و درنتیجه از شدت فشار آب کاسته می‌شود، درصورتی‌که آب‌پایه انتهایی به‌صورت پیوسته است و درنتیجه فشار جریان در برخورد با این مانع افزایش‌یافته و پس‌ازآن کاهش می‌یابد. از مقایسه پروفیل فشار در حوضچه‌های نوع II و III تأثیر آب‌پایه انتهایی در افزایش و سپس کاهش فشار مشخص می‌شود. آب‌پایه در حوضچه نوع II تأثیر بیشتری در افزایش فشار به میزان ۳۶/۸۶٪ نسبت به حوضچه نوع III دارد. همچنین با توجه به شکل (۸) مشخص می‌شود که حضور بلوک و آب‌پایه در دو حوضچه نوع II و III باعث کاهش طول پرش نسبت به حوضچه نوع I به ترتیب به میزان ۲۵/۲٪ و ۵۵/۸٪ شده است.

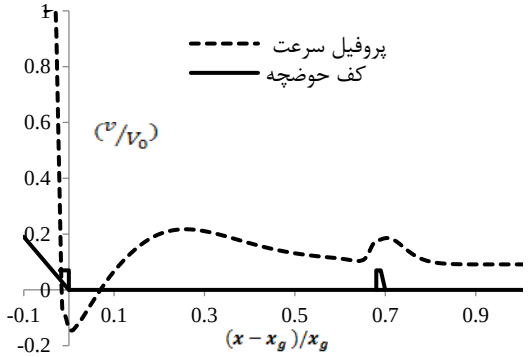


شکل (۸): پروفیل بی‌بعد فشار کف برای سه نوع حوضچه (x_g=۲/۳۹، D=۰/۰۳۴۱ و Q=۰/۱۱۳)

شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) پروفیل بی‌بعد سرعت افقی را به ترتیب برای حوضچه‌های نوع I، II و III نشان می‌دهند.



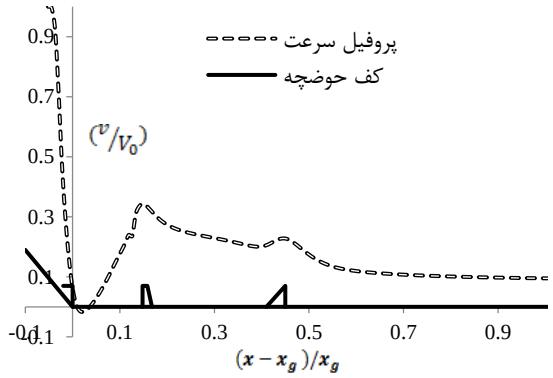
شکل (۹): پروفیل بی‌بعد سرعت در حوضچه نوع I (x_g=۲/۳۹، V_0=۵/۳ و Q=۰/۱۱۳)



شکل (۱۰): پروفیل بی‌بعد سرعت در حوضچه نوع II (x_g=۲/۳۹، V_0=۵/۳۴ و Q=۰/۱۱۳)

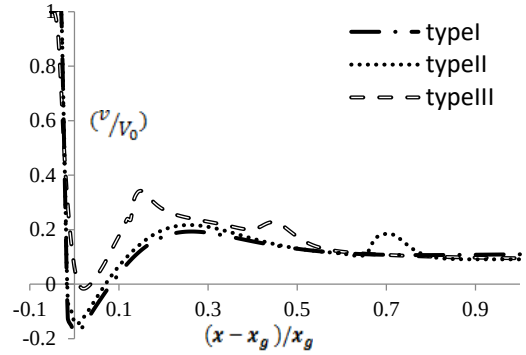
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]



شکل (۱۱): پروفیل بی‌بعد سرعت در حوضچه نوع III (x_g=۲/۳۹، v_0=۵/۳۴ و Q=۰/۱۱۳)

که در آن V_0 سرعت در پنجه پرش است. برای هر سه نوع حوضچه شرایط ورودی یکسان (عدد فرود ۹/۱۶) بوده و جریان با سرعت و انرژی جنبشی زیاد وارد حوضچه می‌شود. در ابتدا و در پنجه پرش به دلیل جدایش جریان از سطح شوت به دلیل برخورد سطوح باهم، مقدار زیادی هوا وارد جریان شده و به دلیل وجود سرعت بالا، گردابه‌ها و درنتیجه جریان برگشتی و سرعت منفی ایجاد می‌شود. این سرعت منفی در حوضچه‌های نوع II و I به‌دلیل وجود بلوک پای تندآب و شکستگی کمتر جریان، نسبت به حوضچه نوع I به ترتیب ۱۲٪ و ۲۱٪ کمتر است و این نشان از کارایی بهتر بلوک پای تندآب در حوضچه ننوع IIIنسبت به نوع II است. شکل (۱۲) پروفیل بی‌بعد سرعت افقی را برای حوضچه‌های نوع I، II و III نشان می‌دهد.



شکل (۱۲): پروفیل بی‌بعد سرعت سه حوضچه (x_g=۲/۳۹ و Q=۰/۱۱۳)

در شکل (۱۲)، سرعت در سه نوع حوضچه با شیب زیادتری کاهش می‌یابد و در ادامه با پایان یافتن پرش از شدت نوسان‌های سرعت کاسته شده و برای سه نوع حوضچه به مقدار ثابت و یکسانی می‌رسد. با مقایسه پروفیل بی‌بعد سرعت در حوضچه‌های نوع II و III مشخص می‌شود که موانع در حوضچه نوع III باعث افزایش فشار شده و پروفیل فشار در حوضچه نوع III بالاتر از دو نوع حوضچه دیگر قرار دارد؛ اما به دلیل اینکه سرعت جریان در برخورد با موانع ابتدا کاهش یافته و سپس به دلیل کاهش سطع مقطع عبور جریان در راستای عمود بر راستای جریان افزایش می‌یابد، این کاهش سرعت در حوضچه نوع II نسبت به نوع III در آب‌پایه انتهایی به میزان ۴۶٪ بیشتر است. درنتیجه عملکرد آب‌پایه انتهایی در حوضچه نوع II در کاهش سرعت از نوع III بهتر است.

در این بخش پارامتر شدت آشفتگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل آشفتگی دو معادله‌ای RNG مدلی مبتنی بر معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناویر-استوکس است. در معادلات رینولدز متغیرهای وابسته در معادلات بقاء به دو قسمت متوسط زمانی و نوسانی تجزیه می‌شوند و سپس این معادله‌ها نسبت به زمان انتگرال‌گیری می‌شوند. مقدار متوسط زمانی f به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\overline{f}=\frac{1}{\Delta T}\int_{t_0}^{t_0+\Delta t}(f.\Delta t) \qquad (۵)$$

مقدار متوسط زمانی کمیت‌های نوسانی صفر است:

$$\overline{f'}=\frac{1}{\Delta T}\int_{t_0}^{t_0+\Delta t}f'.\Delta t=0 \qquad (۶)$$

اما توان دوم مقادیر هر نوسان صفر نیست:

$$f'^2=\frac{1}{\Delta T}\int_{t_0}^{t_0+\Delta t}(f-\overline{f})^2.dt\neq 0 \qquad (۷)$$

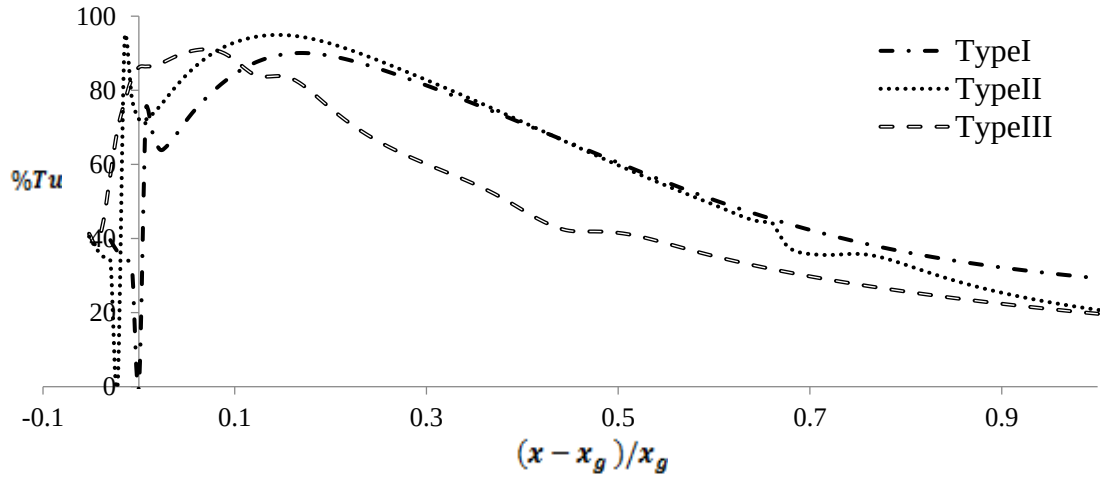
که ریشه دوم این کمیت یعنی مقادیر اندازه‌گیری شده نوسان‌ها، معیاری از آشفتگی و اغتشاش است (شجاعی فرد و طلحانی، ۱۳۹۱). برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های نوسانی سرعت از تعریف V_{RMS} می‌توان استفاده کرد:

$$V_{RMS}=\sqrt{\overline{V'^2}}=\left[\frac{1}{\Delta t}\int_0^{\Delta t}V'^2.dt\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (۸)$$

$$K_T=\frac{1}{2}\overline{(u'^2+v'^2+w'^2)}\approx V_{RMS}^2 \qquad (۹)$$

که در آن u',v',w' به ترتیب مؤلفه‌های نوسانی سرعت در راستای x,y,z و K_T انرژی جنبشی آشفتگی است. پارامتر شدت آشفتگی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]



شکل (۱۳): پروفیل شدت آشفتگی در طول پرش برای سه نوع حوضچه (x_g=۲/۳۹ و Q=۰/۱۱۳)

$$Tu=\sqrt{\frac{K_T}{\overline{K}}} \qquad (۱۰)$$

که در آن $\overline{K}$ انرژی جنبشی متوسط است:

$$\overline{K}=\frac{\int_{\forall}\frac{1}{2}\rho.(u^2+v^2+w^2)d\forall}{\int_{\forall}\rho.d\forall} \qquad (۱۱)$$

$\forall$ حجم محدود محاسباتی است (حیدری نژاد، ۱۳۸۸). شکل (۱۳) پارامتر شدت آشفتگی در طول حوضچه را برای سه نوع حوضچه نشان می‌دهد. این پارامتر نشان‌دهنده میزان آشفتگی در قسمت‌های مختلف جریان است. مقدار صفر بیانگر جریان لایه‌ای است. همان‌طور که از شکل (۱۳) مشخص است، برای سه حوضچه شدت آشفتگی در طول حوضچه در حال کاهش است. همچنین به دلیل تلاطم بالای جریان در حوضچه‌ها مقدار این پارامتر در محل وقوع پرش بالا است. به‌تدریج با نزدیک شدن به انتهای حوضچه با استهلاک انرژی آشفتگی جریان و به‌دنبال آن کاهش نوسان‌های سرعت، مقدار شدت آشفتگی نیز کاهش یافته است. علاوه بر این به دلیل وجود موانع در حوضچه‌های نوع II و III آشفتگی و شکل‌گیری گردابه‌های ناشی از آن‌ها بیشتر و به‌دنبال آن شدت آشفتگی در این دو نوع حوضچه در ابتدای پرش به میزان ۴٪ بیشتر از حوضچه نوع I است. این نشان می‌دهد که بلوک‌ها و آب‌پایه‌ها تأثیر چندانی بر شدت آشفتگی ندارند. همچنین با فاصله گرفتن از بلوک‌ها کارایی آن‌ها کاهش یافته است. با توجه به شکل، در انتهای پرش، شدت آشفتگی در حوضچه‌های نوع II و III نسبت به نوع I به ترتیب به میزان ۱۱/۷۶٪ و ۲۶/۷۲٪ کمتر است و این نشان از کارایی بهتر این حوضچه‌ها در کاهش شدت آشفتگی و تلاطم جریان در انتهای پرش و درنتیجه کاهش خسارات وارده به پایین‌دست است.

در ادامه ورتیسیتی[1] جریان حول محورهای z,y,x مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقدار چرخش توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$W=\frac{1}{2}\left[curl\vec{V}\right]=\frac{1}{2}\left[\vec{\nabla}\times\vec{V}\right] \qquad (۱۲)$$

$$W=\frac{1}{2}\left[(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z})i+(\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial z})j+(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y})k\right] \qquad (۱۳)$$

$$W=\frac{1}{2}\left[w_x i+w_y j+w_z k\right] \qquad (۱۴)$$

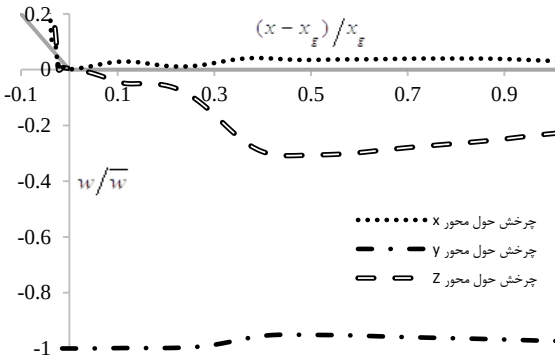
که در آن w,v,u به ترتیب سرعت در راستاهای z,y,x و w_z,w_y,w_x به ترتیب چرخش حول محورهای z,y,x هستند. شکل‌های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) به ترتیب پروفیل بی‌بعد ورتیسیتی را برای حوضچه‌های نوع I، II و III نشان می‌دهند؛ که در آن $\overline{w}$ در هر نقطه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{w}=\sqrt{(w_x^2+w_y^2+w_z^2)} \qquad (۱۵)$$

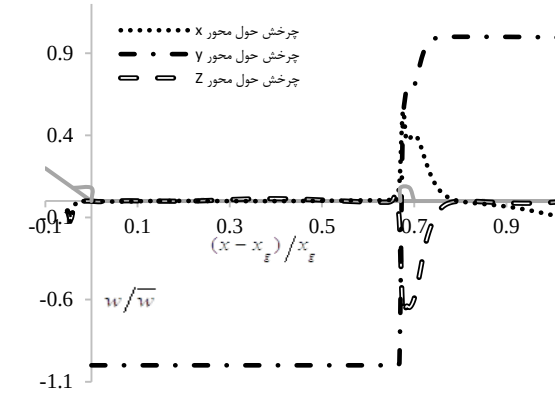
1 Vorticity

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

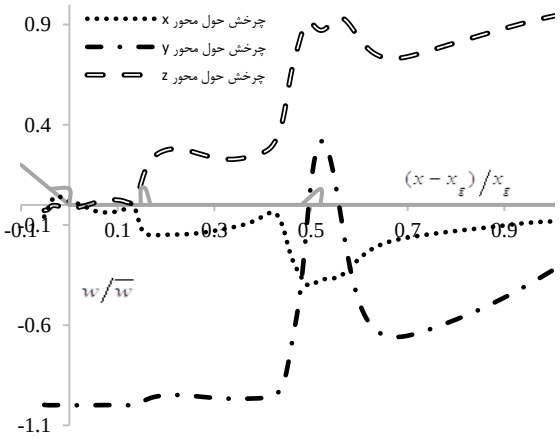
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]



شکل (۱۴): پروفیل بی‌بعد چرخش در حوضچه نوع **I(x_g=۲/۳۹ و Q=۰/۱۱۳)**



شکل (۱۵): پروفیل بی‌بعد چرخش در حوضچه نوع **II(x_g=۲/۳۹ و Q=۰/۱۱۳)**



شکل (۱۶): پروفیل بی‌بعد چرخش در حوضچه نوع **III(x_g=۲/۳۹ و Q=۰/۱۱۳)**

با توجه به شکل (۱۴) چرخش حول محور x مثبت (پادساعت‌گرد) است و چرخش حول دو محور دیگر منفی (ساعت‌گرد) است. در ابتدای حوضچه به دلیل تشکیل پرش، پروفیل چرخش دارای نوسان بوده و در انتهای حوضچه با کاهش نوسانات به مقدار ثابتی می‌رسد. همچنین مقدار چرخش حول محور y (صفحه xz) در مقایسه با دو محور دیگر بیشترین مقدار را دارد و در مقایسه با چرخش حول محورهای x و y به ترتیب به‌طور متوسط به میزان ۹۶ و ۶۷/۶۵٪ درصد بیشتر است. ازآنجاکه میزان چرخش گردابه‌ها یکی از دلایل آرام شدن جریان است درنتیجه چرخش حول محور y نقش تعیین‌کننده‌ای در آرام شدن جریان در طول حوضچه را دارد.

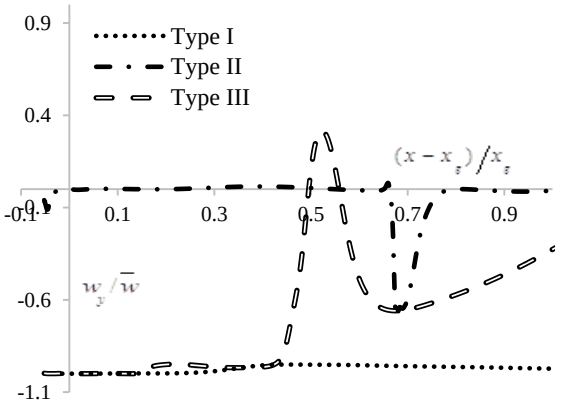
همچنین با توجه به شکل (۱۵) معلوم می‌شود که در حوضچه نوع II چرخش حول محورهای x و z ناچیز و تقریباً صفر است؛ اما جهت چرخش حول محور y منفی (ساعت‌گرد) بوده و به‌طور متوسط به میزان ۹۷ درصد از چرخش حول دو محور دیگر بیشتر است. همچنین آب‌پایه انتهایی باعث افزایش میزان چرخش و تغییر جهت چرخش برای چرخش حول سه محور شده که باز هم این مقدار برای چرخش حول محور y به میزان ۴۲/۷۷ و ۱۶/۵ درصد به ترتیب از چرخش حول محورهای x و z بیشتر است.

شکل (۱۶) میزان چرخش حول سه محور اصلی را برای حوضچه نوع III نشان می‌دهد. با توجه به شکل، میزان چرخش حول محور y برای این حوضچه در مقایسه با چرخش حول محورهای x و z به‌طور متوسط به میزان ۸۶/۳۷ و ۷۱/۴۹ درصد بیشتر است همچنین بلوک‌های آرام‌کننده در حوضچه نوع III تأثیر چندانی روی چرخش حول محور y نداشته است؛ اما روی چرخش حول محور x و z مؤثر است و باعث افزایش میزان چرخش به ترتیب به میزان ۸۶ و ۹۱ درصد روی این دو محور شده، اما جهت چرخش را تغییر نداده است. همچنین در این حوضچه آب‌پایه انتهایی نیز باعث افزایش چرخش شده است که این میزان برای چرخش حول محور y نسبت به چرخش حول محورهای x و z به ترتیب ۸۴/۷۳ و ۲۳/۰۳ درصد بیشتر است. آب‌پایه انتهایی در این حوضچه نیز باعث تغییر در جهت چرخش شده است.

با توجه به بحث‌های ذکر شده، میزان چرخش حول محور y به مقدار زیادی از میزان چرخش حول دو محور دیگر بیشتر است. همچنین به‌دلیل انجام تحلیل‌ها در طول حوضچه و در صفحه xz، چرخش حول این محور نقش مهم‌تری را از چرخش حول دو محور دیگر ایفا می‌کند. درنتیجه برای

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]

مقایسه چرخش در سه حوضچه استاندارد، چرخش حول محور y در شکل (۱۷) مدنظر قرار می‌گیرد. شکل (۱۷) پروفیل بی‌بعد چرخش را برای سه حوضچه حول محور y نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): پروفیل بی‌بعد چرخش در سه حوضچه حول محور y(x_g=۲/۳۹ و Q=۰/۱۱۳)

با توجه به شکل (۱۷)، چرخش در ابتدای حوضچه برای سه نوع حوضچه تقریبا ثابت است و فقط به دلیل تشکیل پرش اندکی نوسان دارد. چرخش در حوضچه نوع I و III منفی و پادساعت‌گرد است و در حوضچه نوع I چرخش در طول حوضچه که هیچ مانعی در مسیر آن نیست تقریباً ثابت است؛ اما در حوضچه نوع II و III با برخورد جریان به آب‌پایه جهت چرخش جریان عوض شده و میزان چرخش نیز افزایش یافته است. به‌طوری‌که میزان چرخش در محل قرارگیری آب‌پایه انتهایی در حوضچه نوع III به میزان ۶۶ درصد نسبت به نوع II بیشتر است؛ اما در پایاب حوضچه‌ها چرخش در حوضچه نوع II به ترتیب به میزان ۹۸ و ۶۶/۶ درصد نسبت به حوضچه نوع I و III کمتر است. در پایاب این حوضچه چرخش تقریباً صفر است و جریان آرام شده و استهلاک انرژی ناچیز است و فقط حرکت انتقالی وجود دارد. درنتیجه این حوضچه در آرام کردن جریان نقش مهم‌تری از دو حوضچه دیگر دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش حوضچه‌های آرامش استاندارد نوع I،II و III شبیه‌سازی عددی شده‌اند و ضمن بررسی پرش هیدرولیکی در هر یک، پارامترهای هیدرودینامیکی جریان ازجمله فشار، سرعت، ورتیسیتی و شدت آشفتگی در این سه نوع استاندارد حوضچه مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفتند. در مدل عددی سطح آزاد با استفاده از تابع حجم سیال (VOF) و سطوح جامد با استفاده از تابع کسر سیال (FAVOR) و از مدل آشفتگیRNG برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کارایی حوضچه نوع III و II از نوع I بیشتراست و این کارایی به دلیل تأثیر قابل‌توجه بلوک‌های پای تندآب در حوضچه نوع III و آب‌پایه انتهایی در حوضچه نوع II است. به‌طوری‌که بلوک‌های پای تندآب در حوضچه نوع III باعث کاهش فشار به میزان ۱۵ درصد و کاهش سرعت منفی به میزان ۱۰درصد نسبت به حوضچه نوع II در ابتدای حوضچه می‌شود. آب‌پایه انتهایی در حوضچه نوع II باعث افزایش ۳۷ درصدی فشار و کاهش ۴۶ درصدی سرعت نسبت به حوضچه نوع III می‌شود. همچنین وجود موانع در حین پرش تأثیر چندانی بر شدت آشفتگی نداشته اما در انتهای پایاب باعث کاهش شدت تلاطم و آشفتگی شده است. به‌طوری‌که این پارامتر در حوضچه‌های نوع II و III نسبت به نوع I به ترتیب به میزان ۱۲و ۲۷ درصد کمتر است و درنتیجه باعث کاهش خسارت می‌شود. همچنین در بررسی ورتیسیتی در سه حوضچه‌های مشخص شد که چرخش حول محور y و در صفحه xz به‌طور متوسط ۱۲/ ۹۳ و ۷۸/۶۶ درصد به ترتیب از میزان چرخش حول محور x و y بیشتر است. همچنین وجود بلوک‌های پای تندآب در حوضچه‌های نوع II و III تأثیری روی ورتیسیتی نداشته است. اما بلوک‌های آرام‌کننده در حوضچه نوع III باعث افزایش میزان ورتیسیتی به میزان ۸۶ و ۹۱ درصد به ترتیب حول محورهای x و z شده اما تأثیر چندانی روی چرخش حول محور y نداشته است. وجود آب‌پایه انتهایی نیز به‌طور متوسط باعث افزایش و تغییر جهت چرخش به میزان ۶۳/۸ و ۱۹/۸ درصد در دو حوضچه به ترتیب حول محورهای x و z شده است. همچنین در پایاب حوضچه‌ها چرخش در حوضچه نوع II به ترتیب به میزان ۹۸ و ۶۶/۶ درصد نسبت به حوضچه نوع I و III کمتر است درنتیجه در پایاب این حوضچه چرخش تقریباً صفر است و جریان آرام شده و استهلاک انرژی ناچیز است و فقط حرکت انتقالی

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]

وجود دارد. درنتیجه این حوضچه در آرام کردن جریان نقش مهم‌تری از دو حوضچه دیگر دارد.

مراجع

۱- بلکشاهی لاشه، ن.، مرتضوی، ح. (۱۳۹۴)، "اثر افزایش عدد فرود بر تغییرات فشار موجود در پرش هیدرولیکی"، دومین اجلاس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در عمران، معماری و شهرسازی، استانبول، ترکیه آب ایران، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- تنکابنی، م.، مردشتی، ا. (۱۳۹۲). "محاسبه نیروهای هیدرودینامیکی بر روی بلوک‌های اول حوضچه آرامش USBRII توسط نرم‌افزار Flow3D "، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه زاهدان، زاهدان

۳- بهروزی راد، ر.، فتحی مقدم، م. (۱۳۸۷). "بررسی تأثیر آب‌پایه بتنی پیوسته بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش استاندارد نوع ۲"، سومین اجلاس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، تبریز

۴- حیدری نژاد، ق. (۱۳۸۸) "مقدمه‌ای بر آشفتگی"، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس

۵- زراتی، ا.، روشن، ر.، سرکرده، ح. (۱۳۹۲) "اصول و مبانی طراحی سازه‌های هیدرولیکی". انتشارات فدک ایساتیس

۶- شجاعی‌فرد، م، طلحانی، م. (۱۳۹۱) "مقدمه‌ای بر جریان‌های آشفته و مدل‌سازی آن" انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران

۷- شجاعیان، ز.، کاشفی پور، م. (۱۳۹۲)، "شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش سد مخزنی نمرود، "نشریه آب و خاک، جلد ۲۳، شماره۲

۸- صاحبی وایقان، ف.، فرسادی زاده، د.، اسمعیلی ورکی، م.، عباسپور، ا.، حسین زاده دلیر، ع. (۱۳۹۲)، "مقایسه مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ در شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی در مقاطع مستطیلی واگرا با استفاده از نرم‌افزار Fluent" نشریه آب و خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۹- صباغ یزدی، س.، شاملو، ح.، رستمی، ف. (۱۳۸۷)، "بررسی عددی در حوضچه آرامش پرش هیدرولیکی با استفاده از روش VOF"، دومین اجلاس ملی سد و نیروگاه‌های برق‌آبی

۱۰- مردانی، م. (۱۳۹۴)، "بررسی تجربی تأثیر مانع مستهلک کننده انرژی بر آشفتگی جریان در حوضچه آرامش، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

۱۱- نقشبند، ش. (۱۳۹۴)، "تحلیل و بررسی آزمایشگاهی و عددی جریان در یک حوضچه *آرامش نامتعارف*" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی آل طه، تهران.

12- Alikhani, A., Behrozi-Rad, R., Fathi-Moghadam, M. (2009), Hydraulic jump in stilling basin with Vertical end sill, international journal of physical sciences 5(1), 25-29

13- Babaali, H., Shamsai, A., Vosughifar, H. (2015), Computational Modeling of the Hydraulic Jump in the Stilling Basin with Convergence Walls Using CFD Codes, Arab J Sci Eng, 40:381-395

14- Habibzadeh, A., Rajaratnam, N. (2012), Performance of Baffle Blocks in Submerged Hydraulic Jumps. j. Hydraul. Eng, ASCE

15- Mardani, M., Rahimzadeh, H., Sarkardeh, H. (2015), Analysis and Assessment of Installing Blocks on Performance of Stilling Basin, Modares Mechanical Engineering, 15(6), 31-41 (In Persian)

16- Peterka, A.J. (1978), Hydraulic Design of Stilling Basin and Energy Dissipators. 7th Ed, Engineering Monograph, USBR

17- Pillai, N.N., Unny, T.E. (1964), Shapes of appurtenances in stilling basins, Journal of Hydraulic Division ASCE

18- Sabbagh-Yazdi, Rostami, F. (2007), Turbulent Modeling Effects on Finite Volume Solution of Three Dimensional Aerated Hydraulic Jumps using Volume of Fluid,12th WSEAS Int. Conf. on APPLIED MATHEMATICS, Egypt, 29-31

19- Shafai-Bajestan, M., Neisi, k. (2009), A new roughened bed hydraulic jump stilling basin, Applied SCi, 2: 436-445

20- Velaro, D., Bung, D., Crookstone, B., Matos, J. (2016), Numerical investigation of USBR Type III stilling basin performance downstream of smooth and stepped spillways, 6th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Portland

21- Jorabloo, M., Maghsoodi, R., Sarkardeh, H. (2011). 3D Simulation of Flow over Flip Buckets at Dams, *Journal of American Science*, 7(6): 931-936

22- Maghsoodi, R., Roozgar, M.S., Chau, K.W., Sarkardeh, H. (2012). 3D Simulation of Dam Break Flows, *Journal of Dam Engineering*,2:1-17

23- Sarkardeh, H., Zarrati, A.R., Jabbari, E., Marosi, M. (2014). Numerical Simulation and Analysis of Flow in a Reservoir in the Presence of Vortex, *Journal of Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(4): 598–608

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1396.4.13.5.0]