

بررسی تاثیر زاویه واگرایی حوضچه آرامش و موقعیت آبپایه بر خصوصیات پرش هیدرولیکی با مدل سازی عددی

فرهاد هوشیاری پور^{۱*}، مصطفی دهقان^۲، سید حسین مهاجری^۳

^۱ گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ گروه مهندسی عمران، واحد لامرد، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۵ تیر ۱۳۹۶

بازنگری: ۲۱ بهمن ۱۳۹۶

پذیرش: ۲۱ بهمن ۱۳۹۶

ارائه آنلاین: ۲۵ بهمن ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

پرش هیدرولیکی

استهلاک انرژی

طول پرش

عمق ثانویه پرش

فلوئنت

آب پایه

چکیده: حوضچه‌های آرامش واگرا به دلیل کارایی هیدرولیکی قابل قبول و داشتن نقش تبدیل بین سازه بالادست و پایین دست، مورد توجه طراحان هستند. در مقاله حاضر به کمک شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار فلوئنت، تاثیر آبپایه انتهایی بر مشخصات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی در حوضچه‌های آرامش واگرایی تدریجی مطالعه می‌گردد. برای انجام این کار حوضچه‌ای با دو زاویه مختلف واگرایی و چهار موقعیت مختلف آبپایه در محدوده عدد فرود ۴ تا ۸ مدل سازی شد. مطابق نتایج با افزایش میزان واگرایی، عمق ثانویه و طول پرش کاهش و استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. همچنین هرچه آبپایه به ابتدای حوضچه نزدیکتر باشد عمق ثانویه، طول پرش و استهلاک انرژی کم‌تر و در نقاط نزدیک، پرش ایجاد شده نوسانی خواهد بود. بر اساس نتایج کمی، در یک واگرایی مشخص، موقعیت آبپایه می‌تواند تا ۲۰٪ کاهش عمق ثانویه، تا ۹۰٪ افزایش میزان استهلاک انرژی و تا ۲۶٪ کاهش طول پرش را به همراه داشته باشد.

۱- مقدمه

بطور وسیع توسط پترکا^[۳] و هاگر و برمن^[۴] مورد بررسی قرار گرفت. حوضچه‌های آرامش واگرا از این نظر که می‌توانند بدون نیاز به تبدیل بین سازه‌های هیدرولیکی بالادست و پایین دست با مقاطع مختلف به کار برده شوند، بسیار مورد توجه طراحان می‌باشد [۵]. امید^۴ و همکاران [۶] ضمن بررسی تئوری و آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی واگرا در کانال با مقطع دوزنقه‌ای نشان دادند که حوضچه‌های آرامش واگرا دارای عملکرد مناسبی در کاهش نسبت اعماق مزدوج، کاهش طول نسبی و افزایش افت انرژی دارند. بنابراین این نوع حوضچه‌ها می‌تواند جایگزین مناسبی برای حوضچه‌های کلاسیک مرسوم باشد. اولین آزمایش‌های در مورد پرش هیدرولیکی در مقطع واگرا توسط ریگل^۵ و همکاران [۷] انجام گرفت. افراد زیادی روی اینگونه حوضچه‌ها مطالعه کرده اند [۸-۱۲]. هگر^۶ [۱۳] برخی از این مراجع را جمع آوری، مرور و ارزیابی کرده‌است.

پرش هیدرولیکی موضوعی است که در مهندسی هیدرولیک، به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در صورتی که یک جریان فوق بحرانی در قسمتی از مسیر بنا بر شرایط و موقعیت کانال به یک جریان زیربحرانی تبدیل شود، پرش هیدرولیکی اتفاق می‌افتد [۱]. هم‌زمان با جهش هیدرولیکی، آشفتگی‌های زیادی به صورت گردابه‌های شدید و جریان غلتابی معکوس در جریان ایجاد می‌شود. غلتاب باعث ورود قابل ملاحظه‌ای هوا شده و سطح آب دارای ظاهری کف آلود و آشفته می‌شود. پرش هیدرولیکی در عین حال که ماندگار است، ولی حول موقعیت متوسطی نوسان نموده و بنابراین سطح آب ناهموار خواهد بود. بیدون^۱ در قرن هجدهم میلادی در مورد پرش‌های کلاسیک آزمایش‌هایی را انجام داد و روابطی را برای تخمین طول پرش هیدرولیکی و نسبت عمق مزدوج بدست آورد [۲]. این نوع پرش

2 Peterka

3 Hager and Bremen

4 Omid

5 Riegel

6 Hager

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Hooshyarypor@srbiau.ac.ir

1 Giorgio Bidone

بر روی تاثیر توام زاویه واگرایی و شیب‌های جانبی دیواره حوضچه بر جهش هیدرولیکی مطالعاتی را انجام دادند و دو رابطه تحلیلی با فرض پروفیل جهش ربع بیضی برای نسبت عمق ثانویه و افت نسبت انرژی ارائه دادند. نتایج و آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش زاویه واگرایی، طول نسبی جهش و نسبت عمق ثانویه کاهش و افت نسبی انرژی افزایش می‌یابد. نتایج مطالعات فوق‌الذکر حاکی از تاثیر بلوک‌های میانی، اندازه و تراکم آنها بر مشخصات پرش و استهلاک انرژی در حوضچه آرامش واگرا است. علیرغم همه تحقیقات انجام شده، تاکنون مطالعه تخصصی روی تاثیر موقعیت آب پایه انتهایی بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های واگرا انجام نشده‌است. از طرفی عمده مطالعات انجام شده در این زمینه آزمایشگاهی بوده و بنابراین داده‌ها و اطلاعات زیادی در این زمینه موجود است. به نظر می‌رسد با توجه به در اختیار بودن این اطلاعات استفاده از روش‌های عددی می‌تواند به پیشبرد مطالعات در این زمینه کمک نماید. بر این اساس هدف مطالعه حاضر بررسی اثر هم‌زمان تغییر موقعیت آب پایه انتهایی و مقدار زاویه واگرایی روی مشخصات پرش هیدرولیکی و میزان استهلاک انرژی در حوضچه‌های آرامش واگرا است که در آن با تکیه بر اطلاعات آزمایشگاهی موجود، از روش عددی استفاده خواهد شد. بعلاوه در این تحقیق تلاش خواهد شد با ارزیابی پارامترهای موثر بر پدیده، روابطی ساده برای برآورد سه پارامتر مهم در حوضچه‌های آرامش (۱) میزان استهلاک انرژی که هدف اصلی ساخت حوضچه آرامش می‌باشد، (۲) عمق ثانویه پرش که در طراحی ارتفاع دیوارها مورد نیاز است و (۳) طول پرش که تعیین کننده طول حوضچه و اقتصاد اصلی طرح می‌باشد، ارائه گردد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- پارامترهای موثر و تحلیل ابعادی

مطابق تحقیقات انجام شده [۵ و ۱۳ و ۱۷ و ۲۴] در پرش هیدرولیکی واگرا در مقطع مستطیلی پارامترهای موثر عبارتند از: θ زاویه واگرایی حوضچه آرامش واگرا برابر $(B_2 - B_1)/L$ که در آن B_1 و B_2 به ترتیب عرض حوضچه در ورودی و خروجی و L طول حوضچه می‌باشد، S_0 شیب کف حوضچه، y_1 عمق اولیه پرش، y_2 عمق ثانویه پرش، v_1 سرعت جریان در محل عمق اولیه پرش، μ لزجت دینامیک، L_j طول پرش، ρ چگالی سیال، v_2 سرعت جریان بعد از پرش، g شتاب ثقل و ΔE افت انرژی. در صورتی که در حوضچه از بلوک‌های میانی و آب پایه استفاده شده باشد، مشخصات هندسی بلوک‌ها مثل فاصله قرارگیری آنها در حوضچه (d_s) نیز بر پدیده پرش تاثیر گذار خواهند بود. بنابراین:

$$F_1(\theta, y_1, y_2, v_1, v_2, \nu, g, L_j, \rho, S_0, \Delta E, d_s) = 0 \quad (1)$$

با استفاده از تئوری Π -باکینگهام^۷ و فرض g ، ρ و y_1 به عنوان متغیر تکراری [۲۴ و ۲۵]، معادله ۱ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$F_2(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9) = 0 \quad (2)$$

7 Buckingham π theorem

عربهبهیراما^۱ و همکاران [۱۴] در مورد اثرات واگرایی دیواره‌های حوضچه بر مشخصات پرش مطالعاتی را انجام دادند. آنها دریافتند که واگرایی باعث کاهش نسبت عمق ثانویه، کاهش طول پرش و افزایش میزان تلفات انرژی می‌شود. قویسی^۲ و همکاران [۱۵] در یک مطالعه آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرا با مقطع دوزنقه را با در نظر گرفتن بلوک‌های میانی به ازای واگرایی‌های مختلف بررسی کرده و بیان کردند با افزایش زاویه واگرایی میزان استهلاک انرژی نیز افزایش می‌یابد. نیسی و همکاران [۱۶] اثر زبری را بر جریان در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی بررسی کرده و بیان کردند که در شرایط بستر زبر، پرش نامتقارن‌تری نسبت به حوضچه صاف ایجاد می‌شود، عمق ثانویه تا ۵۳ درصد کاهش و راندمان پرش نسبت به حوضچه معمولی ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. برمن و هگر [۱۷] نیز خصوصیات جریان در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی را بررسی نمودند. ایشان تاثیر جریان بر بلوک‌های مستهلک‌کننده انرژی را در حالت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند حوضچه مورد مطالعه می‌تواند جایگزین مناسبی برای حوضچه آرامش USBR تپ III باشد. ایشان عنوان کردند که طرح ارائه شده تحت تاثیر شرایط جریان بوده در غیر این صورت بلوک‌های میانی تحت تاثیر کاویتاسیون^۳ قرار می‌گیرند. وفایی^۴ [۱۲] نشان داد که طول پرش و استهلاک انرژی در حوضچه آرامش واگرا تحت تاثیر تعداد و تراکم بلوک‌های میانی است. ایشان تراکم ۰.۸٪ را برای بلوک‌های استوانه‌ای پیشنهاد دادند. خلیفه^۵ و همکاران [۱۸] خصوصیات پرش هیدرولیکی شعاعی را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که واگرایی دیواره‌ها موجب کاهش طول پرش تا ۷۰ درصد و افزایش افت انرژی تا ۱۵ درصد نسبت به پرش کلاسیک می‌گردد و همچنین نسبت عمق ثانویه برای اعداد فرود بزرگتر از ۳ کاهش می‌یابد. ارتفاع بلوک‌های میانی و موقعیت بهینه بلوک‌ها توسط نتلتون و مک‌کورکودال^۶ [۱۹ و ۲۰] ارزیابی و ارائه شد. مطالعات دیگری نشان داده است که ارتفاع آب پایه بر مشخصات پرش هیدرولیکی تاثیرگذار است [۲۱]. ایشان از آب پایه پیوسته در انتهای حوضه برای کاهش طول آن استفاده کردند و توانستند ضمن حفظ عملکرد، ۲۵٪ طول حوضچه را کاهش دهند. در مطالعه آزمایشگاهی دیگری تاثیر زاویه واگرایی و شیب معکوس در کف حوضچه مطالعه گردید [۲۲]. در این مطالعه ارزیابی نتایج با توجه به میزان آبشستگی در پایین دست و فاصله آن تا آب پایه انتهایی انجام گردید. نتایج نشان داد که افزایش شیب معکوس بستر تا ۰.۸٪ می‌تواند باعث کاهش ۴۷٪ عمق مزدوج و کاهش ۳۵٪ طول پرش و افزایش ۲۰٪ استهلاک انرژی گردد. همچنین افزایش ۱۰٪ زاویه واگرایی باعث کاهش به ترتیب ۵۱ و ۳۸ درصد عمق مزدوج و طول پرش و افزایش ۲۳ درصدی استهلاک انرژی گردید. امید و همکاران [۲۳]

1 Arabhabhirama

2 Ghozeisi

3 Cavitation

4 Wafaie

5 Khalifa

6 Nettleton and Mc-corquodal

از معادلات ۱۲ تا ۱۵ در این تحقیق استفاده خواهد شد و توابع F_3 تا F_6 با استفاده از یک رابطه خطی چند متغیره و روش بهینه سازی بدست خواهند آمد.

۲-۲- مطالعات آزمایشگاهی

دیانت [۲۶] در یک تحقیق آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شیراز یک سری آزمایش‌های روی حوضچه آرامش واگرا انجام داد. این مدل شامل یک مخزن و شوت در بالادست و یک کانال آزمایشگاهی با دیواره‌هایی از جنس پلکسی گلاس به عرض ۰/۲ متر، ارتفاع ۰/۴ متر و طول ۴ متر در پایین دست می‌باشد. جزئیات فلوم استفاده شده در شکل ۱ ارائه شده است. آزمایش‌های انجام شده شامل مجموعاً ۱۶ آزمایش در محدوده شیب کف صفر تا ۱/۵ درجه، با دبی‌های ۴ تا ۲۱ لیتر در ثانیه و واگرایی ۲۰-۵ و ۲۰-۱۰ (به صورت B_1-B_2) انجام گردیده است. مخزن بالادست به ابعاد $۰/۳۳ \times ۰/۸۷ \times ۰/۷۶$ متر به کمک یک شوت با ابعاد $۰/۵ \times ۰/۲ \times ۰/۴$ متر و شیب طولی ۱۸/۸ درجه، مخزن را به کانال افقی پایین دست متصل می‌نماید. کانال مستطیلی پایین دست به طول $L=۴$ m معرف حوضچه آرامش می‌باشد که با تعبیه کردن دیواره پلکسی گلاس واگرا در آن، حوضچه واگرا شبیه سازی شده است.

دیانت [۲۶] در مدل خود پارامترهای دبی، عمق اولیه پرش هیدرولیکی، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی، طول پرش، عرض در ابتدای تبدیل، عرض در انتهای تبدیل و طول غلطان پرش را اندازه‌گیری و گزارش نمود که در این تحقیق از این اطلاعات استفاده شده است. به منظور ارزیابی آزمایش‌های انجام شده، ابتدا نتایج دیانت از نظر اثر مقیاس بررسی گردید. معیار مورد استفاده، فاکتور شکل $\omega = y_1/b$ ارائه شده توسط هگر [۴] می‌باشد که مقدار آن باید از مقدار آستانه ω_1 (تابعی از عدد فرود و عدد رینولدز ابتدای پرش) کمتر باشد در غیر اینصورت اثر مقیاس غیر قابل در نظر گرفتن خواهد بود. با توجه به اینکه در آزمایش‌های دیانت، حداکثر مقدار ω در آزمایشگاه برابر ۰/۲ و ω_1 برابر ۰/۴۴ می‌باشد، لذا اثر مقیاس بر نتایج قابل اغماض خواهد بود.

که در آن پارامترهای بی بعد عبارتند از

$$\pi_1 = y_2 / y_1 \quad (۳)$$

$$\pi_2 = L_j / y_1 \quad (۴)$$

$$\pi_3 = v_1 / \sqrt{(gy_1)} = Fr_1 \quad (۵)$$

$$\pi_4 = v_2 / \sqrt{(gy_2)} = Fr_2 \quad (۶)$$

$$\pi_5 = \rho \sqrt{(gy_1^3)} / \mu \cong Re \quad (۷)$$

$$\pi_6 = \Delta E / y_1 \quad (۸)$$

$$\pi_7 = d_s / y_1 \quad (۹)$$

$$\pi_8 = \theta \quad (۱۰)$$

$$\pi_9 = S_0 \quad (۱۱)$$

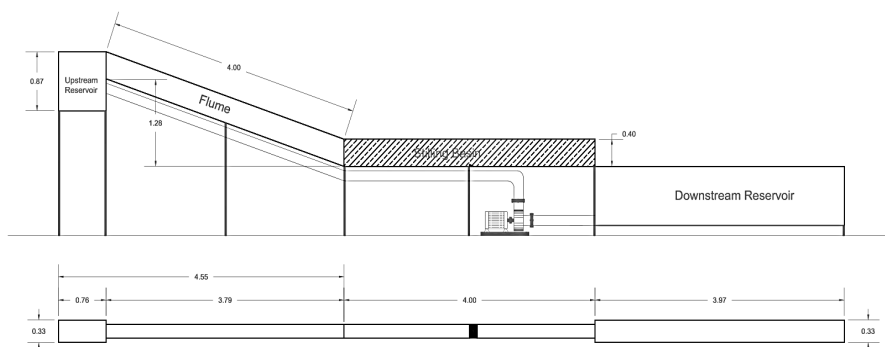
لازم به ذکر است که در این تحقیق، عرض حوضچه در نقاط مختلف با توجه به مقدار دبی، سرعت و عمق قابل محاسبه است لذا در معادله ۱ از ذکر عرض کانال به عنوان پارامتر مستقل، صرف نظر شده است. از آنجا که جریان فوق بحرانی و سرعت جریان از روی سرریز بسیار زیاد است جریان کاملاً آشفته بوده، بنابراین می‌توان از اثر لزجت و عدد رینولدز (معادله ۷) صرف نظر کرد. در اینصورت با تفکیک پارامترهای مستقل و وابسته، لحاظ فرضیات و ساده سازی مطابق سایر مطالعات تحقیقات انجام شده و صرف نظر از شیب ناچیز کف حوضچه در مطالعه حاضر ($S_0=0$)، می‌توان رابطه (۲) را به صورت زیر نوشت:

$$y_2 / y_1 = F_3(Fr_1, d_s / y_1, \theta) \quad (۱۲)$$

$$\Delta E / y_1 = F_4(y_2 / y_1, Fr_1, d_s / y_1, \theta) \quad (۱۳)$$

$$L_j / y_1 = F_5(y_2 / y_1, Fr_1, d_s / y_1, \theta) \quad (۱۴)$$

$$Fr_2 = F_6(y_2 / y_1, Fr_1, d_s / y_1, \theta) \quad (۱۵)$$



شکل ۱. مشخصات مدل آزمایشگاهی استفاده شده توسط دیانت [۲۴]

Fig. 1. Schematic of the physical model used by Dianat [24]

۲-۳- نرم‌افزار فلوئنت

از نرم‌افزار فلوئنت^۱ برای مدل‌سازی جریان در حوضچه‌های آرامش بارها استفاده شده و نتایج خوبی حاصل شده‌است [۲۷ و ۲۸]. فلوئنت یک نرم‌افزار برنامه‌نویسی پیشرفته برای مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه‌های پیچیده می‌باشد. این نرم‌افزار امکان تغییر شبکه، به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه‌های بی‌سازمان و پیچیده را فراهم می‌سازد. فلوئنت به کاربر اجازه می‌دهد شبکه و افزایش دقت مدل‌سازی را با ریز کردن شبکه در مرزها و دیگر مکان‌های مورد نیاز مثلاً در محدوده‌هایی با گرادین بالا را می‌دهد [۲۹]. لازم به ذکر است که فلوئنت قبل از مدل‌سازی نیاز به یک پیش‌پردازنده دارد که در آن باید میدان جریان تعریف شود، مش بندی شده و در نهایت شرایط مرزی آن تعریف گردد. در این تحقیق برای انجام این کار از نرم‌افزار گمبیت^۲ استفاده می‌شود.

۲-۴- معادلات حاکم بر جریان

روابط حاکم بر جریان، معادلات ناویر-استوکس شامل یک معادله پیوستگی و سه معادله مومنتوم می‌باشد. معادله پیوستگی بیان ریاضی قانون بقای جرم است که در سیستم مختصات کارتزین برای یک سیال سیال نیوتنی و تراکم ناپذیر به صورت زیر بیان می‌گردد [۳۰]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (16)$$

که در آن u_i مولفه سرعت، t زمان و x_i جهت محور مختصات می‌باشد. معادلات مومنتوم نیز در دستگاه مختصات کارتزین به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + X_i \quad (17)$$

که در آن ρ چگالی، μ ویسکوزیته دینامیک، X_i مولفه نیروهای حجمی در جهت i و p فشار است.

در این تحقیق برای تعیین سطح آزاد از روش حجم سیال^۳ (VOF) استفاده می‌شود. در این روش هدف حل معادلات جریانی شامل دو یا چند سیال (فاز) مخلوط‌نشده است. در هر سلول از شبکه، هر فاز بوسیله کسری از حجم سلول نشان داده می‌شود که مجموع کسرها کل حجمی کلیه فازها در یک سلول، برابر واحد است. معادله پیوستگی مربوط به محاسبه α_2 و مقدار α_1 ، به صورت زیر می‌باشد [۳۰]:

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_j} = 0 \quad (18)$$

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_2$$

در روش VOF برای تعیین میدان سرعت در کلیه فازها، تک معادله مومنتوم زیر حل خواهد شد:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i + F_i \quad (19)$$

که در آن ρg_i و F_i به ترتیب نیروی حجمی گرانشی و نیروی حجمی خارجی می‌باشند.

۳- روش انجام کار

در تحقیق حاضر، مطالعات در دو حالت دست بندی می‌شود. در حالت اول دبی ثابت ($Q=6 \text{ l/s}$) و موقعیت آب پایه نسبت به ورودی حوضچه در فواصل مختلف ۲، ۳/۵، ۳ و ۴/۵ متر قرار داده می‌شود تا تاثیر محل آب پایه انتهایی بر مشخصات پرش هیدرولیکی و استهلاک انرژی ارزیابی گردد. در حالت دوم موقعیت آب پایه ثابت در نظر گرفته می‌شود ($x=2/5 \text{ m}$) و دبی‌های مختلف ۳ تا ۱۲ لیتر بر ثانیه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که کلیه آزمایش‌های به ازای دو واگرایی مختلف از عرض ۱۰ سانتی‌متر در ابتدای حوضچه تا عرض ۲۰ سانتی‌متر در انتهای حوضچه (واگرایی ۲۰-۱۰) و واگرایی ۲۰-۵ تکرار می‌گردد.

۳-۱- مشخصات آب پایه انتهایی

بر اساس نتایج آزمایشگاهی دیانت [۲۶] به ازای دبی کم‌تر از ۶ لیتر بر ثانیه، عدد فرود ورودی به حوضچه آرامش مورد مطالعه کم‌تر از ۴/۵ بوده است؛ لذا حوضچه تیپ IV USBR مناسب طراحی خواهد بود. بر اساس استاندارد حوضچه تیپ IV ارتفاع آب پایه انتهایی برابر $y_1=1/25$ است. بنابراین با توجه به عمق اولیه کم‌تر از ۰/۲۳ متر در آزمایش‌های انجام شده، ارتفاع آب پایه انتهایی ۰/۰۳ متر در نظر گرفته شده‌است.

۳-۲- شرایط مرزی و اولیه مدل عددی

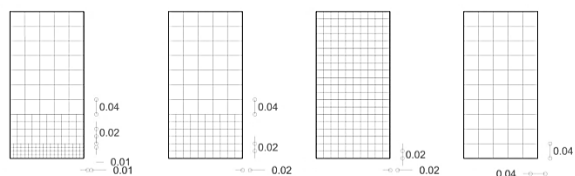
شرایط مرزی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده‌است. مرزهای نفوذناپذیر مثل کف و دیواره‌های مخزن و فلوم با شرط مرزی دیواره جامد (Wall)، مرز خروجی جریان با شرط مرزی ریزش آزاد (Pressure outlet) و سطوح فوقانی با شرط مرزی Symmetry تعریف شده‌است.

- 1 Fluent
- 2 GAMBIT
- 3 Volume of fluid

جدول ۱. تنظیمات مدل عددی فلونت جهت حل مساله

Table. 1. Fluent numerical model set up for the problem solving

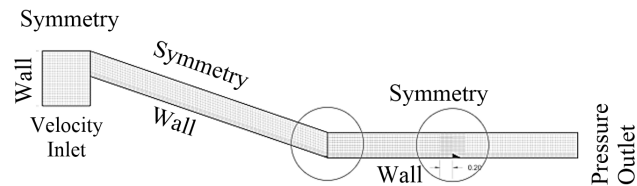
عنوان	طرح استفاده شده	جزئیات طرح
الگوریتم کوپل سرعت و فشار	PISO	ضریب اصلاح چولگی و همسایگی برابر یک
گسسته سازی معادلات	Upwind مرتبه دوم	برای گسسته سازی معادلات مومنوم
گسسته سازی معادلات	Upwind مرتبه اول	برای گسسته سازی معادلات آشفستگی
مقادیر Residual	Geo-Reconstruct	برای گسسته سازی معادله حجم سیال
ضرایب زیر تخفیف		ضرایب زیر تخفیف فشار برابر ۰/۳، ممنتوم برابر ۰/۷، انرژی سینماتیک آشفستگی و نرخ استهلاك انرژی برابر ۰/۸ و برای بقیه پارامترها مقدار یک
مقادیر Residual		برای کلیه معادلات پیوستگی، مومنوم و آشفستگی برابر با ۰/۰۰۱



شکل ۳. انواع مش تهیه شده برای آنالیز حساسیت ابعاد مش ها (اندازه ها بر حسب متر هستند)

Fig. 3. Different mesh types for sensitivity analysis of mesh sizes (SI system)

لازم به ذکر است که در مدل سازی به منظور آنالیز حساسیت اندازه مش و صحت سنجی مدل، دبی جریان ۶ لیتر در ثانیه، واگرایی ۲۰-۵ و آب پایه در فاصله ۳/۵ متری ورودی حوضچه قرار داده شد و از قرار دادن بلوک انتهایی صرف نظر گردید. برای مقایسه نتایج مدل عددی با داده های آزمایشگاهی، پارامترهای عمق اولیه و ثانویه پرش و سرعت جریان قبل و بعد از پرش اندازه گیری گردید.



شکل ۲. شرایط مرزی تعریف شده روی مرزهای میدان حل (نمای جانبی)

Fig. 2. Boundary conditions for the solution space (vertical section view)

به عنوان شرایط اولیه، در ابتدای مدل سازی تمامی سرعت ها در مخزن و کانال و حوضچه صفر فرض می شود. جریان به صورت دو فاز آب و هوا در نظر گرفته شده و در تعریف خصوصیات فیزیکی سیال، چگالی آب و هوا به ترتیب برابر با $998/2 \text{ kg/m}^3$ و $1/225 \text{ kg/m}^3$ ، ویسکوزیته دینامیکی آب و هوا به ترتیب برابر با 10^{-3} و 10^{-4} تراکم ناپذیر فرض شده است.

۳-۳- تولید شبکه محاسباتی

تولید شبکه محاسباتی در این پژوهش با نرم افزار GAMBIT انجام شده است. برای مش بندی میدان جریان از شبکه با سازمان و سلول های مستطیلی هم اندازه استفاده شده است بنابراین شبکه کاملاً هموار با نسبت ابعاد یک بوده و چولگی مش در حوضچه آرامش برابر با صفر خواهد بود.

۳-۴- تنظیمات مدل

مرور مقالات و سایر پژوهش های انجام شده در زمینه پرش هیدرولیکی نشان می دهد که مدل سازی آشفستگی با روش K-ε-RNG شرایط پرش را به خوبی مدل سازی می نماید [۳۱ و ۳۲]. لذا در این تحقیق از این روش استفاده گردید. با توجه به تجربه نویسندگان مقاله و مرور سایر مقالات منتشر شده، سایر تنظیمات حل مدل عددی در جدول ۱ آمده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- آنالیز حساسیت ابعاد مش و صحت سنجی مدل

به منظور انتخاب یک شبکه محاسباتی بهینه، آنالیز حساسیت روی چهار شبکه با مش مربعی با ابعاد الف) 40×40 میلی متر و ب) 20×20 میلی متر، ج) یک شبکه با مش ترکیبی 40×40 میلی متر و 20×20 میلی متر و د) یک شبکه با مش ترکیبی 20×20 ، 40×40 و 10×10 میلی متر انجام گرفت (شکل ۳). با ثابت در نظر گرفتن گام زمانی محاسبات در هر مدل برابر S $\Delta t = 0/05$ ، اجرای مدل به ازای هر چهار شبکه محاسباتی، پایدار بود. با Δx و Δx در نظر گرفته شده، عدد کورانت گلوبال در سلول های هر چهار شبکه از ۱۵ بوده است.

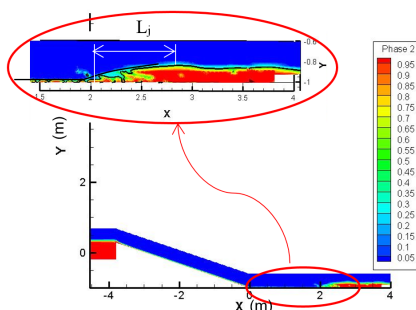
قرار گرفته است. همچنین سطح آب طوری در نظر گرفته شده است که در آن مقدار VOF برابر ۰/۵ است. همان طور که نشان داده شده است، پرش در فاصله ۲/۰۲ متری از ابتدای حوضچه آرامش تشکیل شده است. عمق اولیه پرش ۱۸ میلی متر، عمق ثانویه پرش ۱۵۵ میلی متر و طول پرش ۷۸ سانتی متر است. با اندازه گیری نرخ جرم عبوری از مقاطع مختلف حوضچه آرامش، سرعت جریان قبل و بعد از پرش به ترتیب برابر ۲/۱۸ و ۰/۲۲۳ متر بر ثانیه خواهد بود (جدول ۳). لازم به ذکر است که به دلیل واگرایی عرض حوضچه در شروع و انتهای پرش متفاوت خواهد بود (در اینجا به ترتیب ۱۵۳ و ۱۷۳ میلی متر).

همانطور که در شکل ۵ نیز نشان داده شده است، جریان در ابتدای پرش آشفتگی زیادی دارد و غلطش جریان موجب ترکیب هوا با آب می گردد. به همین دلیل در این نقطه انتخاب یک سطح ثابت برای تفکیک آب و هوا امکان پذیر نیست و مطابق آنچه در واقعیت نیز مشاهده می شود، سطحی کاملاً آشفته است که حول مقدار مشخصی نوسان می نماید.

جدول ۲. صحت سنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی

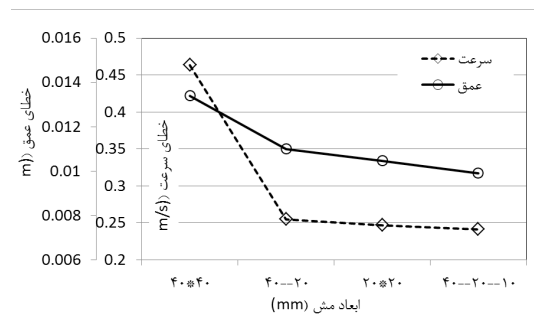
Table 2. Validation of the numerical model with the laboratory results

پارامتر	آزمایشگاهی [۲۶]	عددی با نرم افزار	AE(%)	RMSE (m)/(m/s)
y_1	۰/۰۲	۰/۰۱۸	-۱۰	۰/۰۰۲
y_2	۰/۰۷	۰/۰۸۵	۲۱/۴۳	۰/۰۱۵
متوسط خطا				
v_1	۱/۸۲	۲/۱۸	۵/۷۱	۰/۰۱۱
v_2	۰/۴۲	۰/۴	-۴/۷۲	۰/۰۰۲
متوسط خطا				
			۷/۵۳	۰/۲۵۵



شکل ۵. موقعیت پرش هیدرولیکی به ازای واگرایی ۱۰-۲۰ و آب پایه در $X=x/B_1=35$

Fig. 5. Hydraulic jump position for divergence of 10-20 while end-sill is at $X = x/B_1 = 35$



شکل ۴. مقایسه خطای مدل عددی با ابعاد مختلف مش

Fig. 4. Error values for the numerical Model with Different Mesh sizes

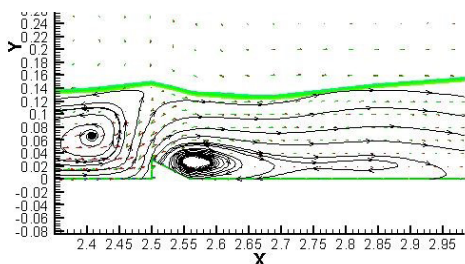
مقایسه نتایج نشان می دهد که خطای مدل با مش ۴۰-۲۰-۱۰ میلی متری به ازای سرعت و عمق کمتر از سایر مدلها است (حدوداً ۱۰٪ برای عمق و ۵٪ برای سرعت جریان نسبت به مش ۴۰-۲۰ میلی متری) لیکن زمان محاسبات این مش (۵ ساعت) بیش از پنج برابر مش ۴۰-۲۰ میلی متری است. در مش ۴۰ میلی متری به دلیل بزرگ بودن ابعاد مش در مجاورت بستر و با توجه به عمق کمتر از ۳۰ میلی متر جریان در ورودی حوضچه آرامش، سطح آزاد و عمق جریان با دقت مناسبی بدست نمی آید؛ لذا نتایج مش ۴۰ میلی متری با خطای زیادی همراه است (شکل ۴). علیرغم اینکه زمان محاسبات کوتاه و کم تر از ۳۰ دقیقه می باشد. مقایسه نتایج مش ترکیبی ۴۰ و ۲۰ میلی متری با سایر مش ها نشان می دهد که خطای مدل سازی برای عمق و سرعت جریان در مقایسه با مش های ریزتر کم تر از ۵٪ است در حالیکه زمان محاسبات کم تر از ۲ ساعت می باشد یعنی ۴۰ درصد زمان حل در ریزترین مش در نظر گرفته شده. بنابراین با در نظر گرفتن دو مولفه دقت نتایج و زمان مدل سازی، در نهایت مش شکل ۳ (ج) به عنوان شبکه محاسباتی مناسب انتخاب گردید.

با در نظر گرفتن مش ترکیبی ۴۰-۲۰ میلی متری، نتایج بدست آمده از مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که نتایج در جدول ۲ آمده است. نتایج صحت سنجی نشان می دهد که درصد خطای پیش بینی عمق اولیه و ثانویه در مجموع برابر ۵/۷ درصد و RMSE آن ۰/۰۱۱ متر است. بعلاوه مقادیر AE و RMSE برای سرعت جریان قبل و بعد از پرش برابر ۷/۵٪ و ۰/۲۵ متر بر ثانیه است.

۴-۲- نتایج مدل عددی به ازای دبی و واگرایی مختلف

در بخش اول این تحقیق جریان با دبی ورودی ۶ لیتر در ثانیه به صورت غیر ماندگار در کانال و حوضچه آرامش واگرا در نظر گرفته شد و مدل سازی تا زمانی ادامه پیدا کرد که موقعیت پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش تثبیت گردد. در شکل ۵ موقعیت پرش هیدرولیکی، محل وقوع پرش و مشخصات آن در واگرایی ۱۰-۲۰ ($B_1=0/1$ m) ارائه شده است. در این شکل آب پایه انتهایی در فاصله ۳/۵ متری از ابتدای حوضچه یا در $35=X=x/B_1$

مدل سازی مشابه ای برای حوضچه با واگرایی ۲۰-۵ ($B_1=0.5$ m) انجام گردید. پروفیل سطح آب بدست آمده در حوضچه به ازای موقعیت های مختلف آب پایه انتهایی در پیوست ۱ آمده است. در واگرایی ۲۰-۵ پرش هیدرولیکی تشکیل شده در موقعیت $X=20$ m و $X=35$ و نوسانی است و نوسانات ایجاد شده به پایین دست انتقال داده می شود. در این حالت پرش به طور کامل تشکیل نشده است و شرایط پرش رضایت بخش نیست. در شکل ۸ خطوط جریان در مجاورت آب پایه در واگرایی ۲۰-۵ نشان داده شده است.



شکل ۸. خطوط جریان در مجاورت آب پایه به ازای واگرایی ۲۰-۵ و آب پایه در $X=50$

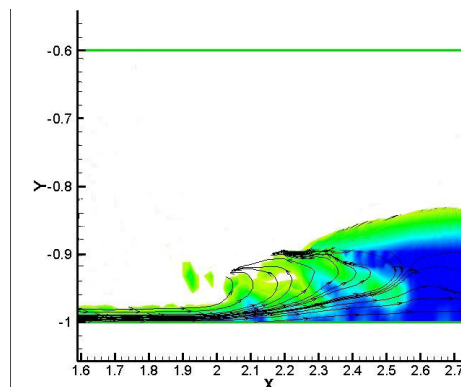
Fig. 8. Stream lines in the vicinity of the end-sill for divergence of 5-20 where end-sill is at $X=50$

مشاهده می شود که پس از آب پایه بلافاصله یک جریان چرخشی ایجاد شده است که بتدریج در پایین دست از بین می رود. بعلاوه قبل از آب پایه نیز جریان چرخشی ناشی از پرش هیدرولیکی دیده می شود که نمایانگر شرایط غلطش جریان در پرش هیدرولیکی است. در شکل ۹ توزیع فشار هیدرواستاتیک در جریان پرش هیدرولیکی قبل و بعد از آب پایه نشان داده شده است. مشاهده می شود که اندکی قبل از آب پایه فشار هیدرواستاتیک یک افزایش ناگهانی را تجربه می نماید که دلیل آن تبدیل فشار هیدرواستاتیک به فشار هیدرواستاتیک است که نتیجه آن اعمال نیروی مونتوم قابل توجه به آب پایه است. شرایط فشار بعد از آب پایه کاملاً متفاوت از قبل از آب پایه است.

در حالت دوم با در نظر گرفتن واگرایی ۲۰-۵، شرایط جریان در حوضچه آرامش با تغییر دبی ورودی در محدوده عدد فرود $4/82$ تا $7/64$ مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار آب پایه در فاصله $X=2/5$ m ثابت در نظر گرفته و در هر بار مدل سازی دبی جریان تغییر داده شد. دبی های لحاظ شده در این بخش از تحقیق عبارتند از ۳، ۴، ۵، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ لیت بر ثانیه (جدول ۳). متناظر با دبیهای تغییر داده شده، عدد فرود جریان در مقطع ورودی در جدول ۴ آمده است. در پیوست ۲ نیز وضعیت پرش در حوضچه به ازای هر دبی نشان داده شده است.

اطلاعاتی که برای تحلیل نتایج مورد نیاز است، شامل عمق اولیه و ثانویه پرش y_1 و y_2 ، دبی Q ، فاصله آب پایه تا ورودی حوضچه d_s ، فاصله

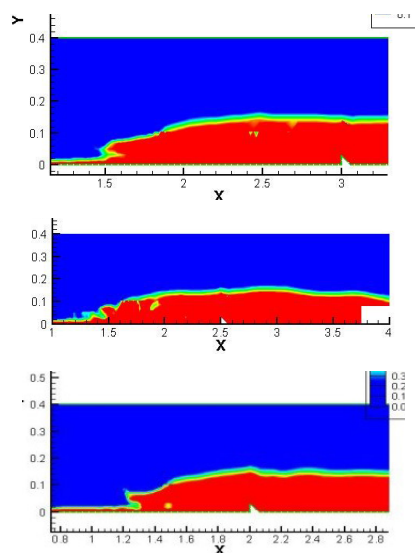
در شکل ۶ خطوط جریان در محل پرش هیدرولیکی نشان داده شده است.



شکل ۶ خطوط جریان در محل پرش هیدرولیکی به ازای واگرایی ۲۰-۱۰ و آب پایه در $X=35$

Fig. 6. The flow lines at the hydraulic jump location for divergence of 10-20 and end-sill is at $X=35$

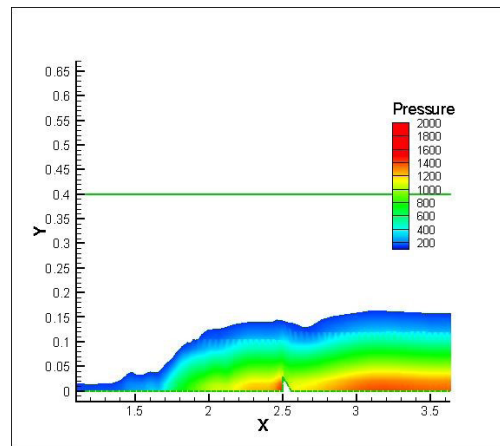
در شکل ۷ موقعیت مکانی تشکیل پرش هیدرولیکی و عمق آب قبل و بعد از پرش در واگرایی ۲۰-۱۰ به ازای موقعیت های مختلف آب پایه نشان داده شده است. با مقایسه با شکل ۵ مشخص است که در تمامی این حالات عمق پایاب تامین شده و پرش کامل و بدون نوسان تشکیل شده است.



شکل ۷. وضعیت پرش هیدرولیکی به ازای واگرایی ۲۰-۱۰ و آب پایه در الف) $X=30$ ، ب) $X=25$ و ج) $X=20$

Fig. 7. Hydraulic jump for divergence of 10-20 where end-sill is at a) $X=30$, B) $X=25$ and C) $X=20$

نقطه آغاز و پایان پرش تا ورودی حوضچه X_1 و X_2 و عرض حوضچه در نقطه آغاز و پایان جهش b_1 و b_2 می‌باشد که در جدول ۳ ارائه شده اند.



شکل ۹ توزیع فشار در مجاورت آب پایه به ازای واگرایی ۵-۲۰ و آب پایه در $X=50$

Fig. 9. Distribution of the pressure in the vicinity of end-sill for divergence of 5-20 while end-sill is at $X=50$

جدول ۳. داده‌های استخراج شده از مدل عددی بر اساس مشخصات پرش هیدرولیکی

Table. 3. Results of the numerical model based on the hydraulic jump characteristics

ΔE (m)	L_j (m)	b_2 (m)	b_1 (m)	y_2 (m)	y_1 (m)	x_2 (m)	x_1 (m)	Q (m ³ /s)	d_s (m)	واگرایی
۰/۳۶	۰/۶	۰/۱۲	۰/۰۹۹	۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۸۵	۱/۲۵	۰/۰۰۶	۲	۲۰-۵
۰/۳۱	۰/۷۷	۰/۱۳۹	۰/۱۰۸	۰/۱۳۵	۰/۰۱۹	۲/۲۵	۱/۴۸	۰/۰۰۶	۲/۵	
۰/۱۹	۰/۷۷	۰/۱۵۱	۰/۱۲۰	۰/۱۴	۰/۰۲	۲/۵۵	۱/۷۸	۰/۰۰۶	۳	
۰/۲	۰/۸۱	۰/۱۵۵	۰/۱۲۳	۰/۱۵	۰/۰۱۹	۲/۶۵	۱/۸۴	۰/۰۰۶	۳/۵	
۰/۱۱	۰/۳	۰/۱۱۳	۰/۱۰۱	۰/۱	۰/۰۱۵	۰/۰۲۵	۱/۳	۰/۰۰۳	۲/۵	۲۰-۵
۰/۱	۰/۴۶	۰/۱۳۸	۰/۱۱۹	۰/۱۱۲	۰/۰۱۷	۰/۰۳	۱/۷۶	۰/۰۰۴	۲/۵	
۰/۲۲	۰/۷۹	۰/۱۳۹	۰/۱۰۸	۰/۱۳	۰/۰۱۸	۰/۰۳	۱/۴۶	۰/۰۰۵	۲/۵	
۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۱۳۹	۰/۱۱۸	۰/۱۲۵	۰/۰۲۰	۰/۰۴	۱/۷۳	۰/۰۰۸	۲/۵	
۰/۴۴	۰/۵۳	۰/۱۴۰	۰/۱۱۹	۰/۱۵	۰/۰۲۵	۰/۰۵۸	۱/۷۵	۰/۰۱۰	۲/۵	۲۰-۱۰
۰/۳۳	۰/۶	۰/۱۴۹	۰/۱۲۵	۰/۲۲	۰/۰۳۰	۰/۰۷	۱/۹	۰/۰۱۲	۲/۵	
۰/۱۹	۰/۷۷	۰/۱۵۵	۰/۱۳۵	۰/۱۳	۰/۰۱۸	۲/۱	۱/۳۳	۰/۰۰۶	۲	
۰/۱۸	۰/۷۹	۰/۱۵۶	۰/۱۳۵	۰/۱۴	۰/۰۱۸	۲/۱۴	۱/۳۵	۰/۰۰۶	۲/۵	
۰/۱۶	۰/۸۹	۰/۱۶۲	۰/۱۳۹	۰/۱۵	۰/۰۱۸	۲/۳۸	۱/۴۹	۰/۰۰۶	۳	۲۰-۱۰
۰/۱	۰/۷۸	۰/۱۷۳	۰/۱۵۳	۰/۱۵۵	۰/۰۱۸	۲/۸	۲/۰۲	۰/۰۰۶	۳/۵	

جدول ۴. مقدار پارامترهای بی بعد مطابق با نتایج مدل و معادلات ۱۲ تا ۱۵

Table 4. The value of the dimensionless parameters in accordance with the results of the model and Eqs. (12) to (15)

$\Delta E/y_1$	L_j/y_1	Fr_2	y_2/y_1	Fr_1	d_s/y_1	$\tan \theta$
۱۷/۹۶	۳۰/۰۰	۰/۳۸۴	۶/۰۰	۶/۸۲	۱۰۰	۰/۰۱۹
۱۶/۵۶	۴۰/۵۳	۰/۲۷۸	۷/۱۱	۶/۷۵	۱۳۱/۵	۰/۰۱۹
۹/۷۲	۳۸/۵۰	۰/۲۴۲	۷/۰۰	۵/۶۳	۱۵۰	۰/۰۱۹
۱۰/۶۱	۴۲/۶۳	۰/۲۱۳	۷/۸۹	۵/۹۷	۱۸۴/۲	۰/۰۱۹
۷/۴۲	۲۰/۰۰	۰/۲۶۸	۶/۶۷	۵/۱۵	۱۶۶/۷	۰/۰۱۹
۵/۹۳	۲۷/۰۶	۰/۲۴۷	۶/۵۹	۴/۸۲	۱۴۷/۱	۰/۰۱۹
۱۲/۲۹	۴۳/۸۹	۰/۲۴۵	۷/۲۲	۶/۱۴	۱۳۸/۹	۰/۰۱۹
۲۳/۴۹	۲۶/۰۰	۰/۴۱۶	۹/۲۵	۷/۶۴	۱۲۵	۰/۰۱۹
۱۷/۵۷	۲۱/۲۰	۰/۳۹۲	۶/۰۰	۶/۷۹	۱۰۰	۰/۰۱۹
۱۰/۸۴	۲۰/۰۰	۰/۲۴۹	۷/۳۳	۵/۹۰	۸۳/۳	۰/۰۱۹
۱۰/۷۹	۴۲/۷۸	۰/۲۶۴	۷/۲۲	۵/۸۸	۱۱۱/۱	۰/۰۱۳
۱۰/۲۷	۴۳/۸۹	۰/۲۳۴	۷/۷۸	۵/۸۶	۱۳۸/۹	۰/۰۱۳
۸/۷۸	۴۹/۴۴	۰/۲۰۴	۸/۳۳	۵/۷۱	۱۶۶/۷	۰/۰۱۳
۵/۶۹	۴۳/۳۳	۰/۱۸۱	۸/۶۱	۵/۱۹	۱۹۴/۴	۰/۰۱۳

شده‌است. بر اساس این ماتریس پارامتر y_2/y_1 ، در یک محدوده ضریب همبستگی ۰/۵ تا ۰/۷ به سه پارامتر d_s/y_1 ، $\tan \theta$ و Fr_1 وابسته است. به همین ترتیب وابستگی Fr_2 و L_j/y_1 و $\Delta E/y_1$ به سایر پارامترها از این ماتریس قابل استخراج است.

	$\tan \theta$	d_s/y_1	Fr_1	y_2/y_1	Fr_2	L_j/y_1	$\Delta E/y_1$
$\tan \theta$	1						
d_s/y_1	-0.3	1					
Fr_1	0.31	-0.53	1				
y_2/y_1	-0.7	0.63	-0.5	1			
Fr_2	0.47	-0.64	0.79	-0.87	1		
L_j/y_1	-0.6	0.5	-0.1	0.726	-0.7	1	
$\Delta E/y_1$	0.4	-0.57	0.99	-0.61	0.3	-0.3	1

شکل ۱۰. ماتریس همبستگی پارامترهای بی بعد بر اساس نتایج تحلیل عددی

Fig. 10. Correlation matrix of dimensionless parameters based on numerical analysis results

طول پرش و افت انرژی در این جدول از معادله زیر حاصل شده‌است:

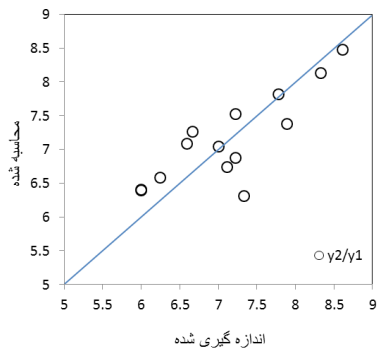
$$L_j = x_2 - x_1 \quad (20)$$

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left(y_1 + \frac{Q^2}{2g(y_1 b_1)^2} \right) - \left(y_2 + \frac{Q^2}{2g(y_2 b_2)^2} \right) \quad (21)$$

نتایج نشان می‌دهد که در واگرایی ثابت تغییر موقعیت آب پایه در استهلاک انرژی و مشخصات پرش هیدرولیکی تاثیر زیادی داشته است. مقایسه نتایج هر موقعیت آب پایه در واگرایی ۲۰-۵ با نتایج حاصل از شرایطی که در آن آب پایه در دورترین نقطه $X=3/5$ m قرار گرفته‌است، حاکی از ۲۰٪ کاهش عمق ثانویه پرش، ۷۸٪ افزایش میزان استهلاک انرژی و ۲۶٪ کاهش طول پرش است. در واگرایی ۲۰-۱۰ نیز آب پایه موجب کاهش ارتفاع ۲۰ درصدی عمق ثانویه پرش، افزایش ۹۰ درصدی میزان استهلاک انرژی و کاهش ۱۴ درصدی طول پرش گردیده است.

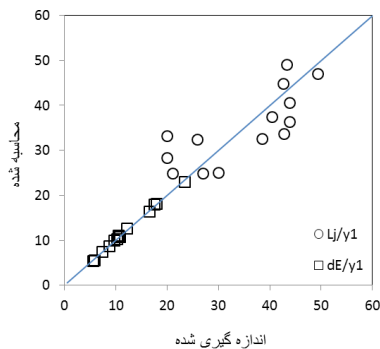
با توجه به تحلیل ابعادی انجام شده و معادلات ۱۲ تا ۱۵، پارامترهای بی بعد موثر بر جریان در حوضچه محاسبه شده و نتایج بدست آمده در جدول ۴ خلاصه شده‌است.

در شکل ۱۰ ماتریس همبستگی پارامترهای بی بعد محاسبه و ارائه



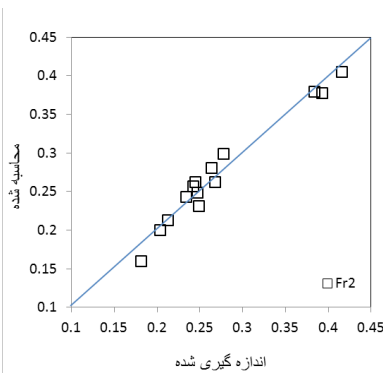
شکل ۱۱: مقایسه مقادیر محاسبه شده y_2/y_1 از معادله ۲۲ با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه

Fig. 11. Comparing the calculated y_2/y_1 from Eq. (22) with the laboratory values



شکل ۱۲: مقایسه مقادیر محاسبه شده $\Delta E/y_1$ و L_j/y_1 از معادلات ۲۳ و ۲۴ با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه

Fig. 12. Comparison of the calculated $\Delta E/y_1$ and L_j/y_1 from Eqs. (23) and (24) with the laboratory values



شکل ۱۳: مقایسه مقادیر محاسبه شده Fr_2 از معادله ۲۵ با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه

Fig. 13. Comparison of the calculated Fr_2 from Eq. (25) with the laboratory values

به منظور تعیین توابع مجهول در معادلات ۱۲ تا ۱۵، از رابطه خطی چند متغیره که در حالت کلی به صورت $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$ نوشته می‌شود، استفاده گردیده است که در آن برای تعیین ضرایب ثابت از رویکرد بهینه سازی استفاده ده است. در روش بهینه سازی ضرایب به نحوی تعیین شده اند که نتایج حاصل از معادله، حداقل خطا (متوسط ریشه مربعات خطا) را نسبت به مقادیر اندازه گیری شده داشته باشند. بر این اساس خواهیم داشت:

$$\frac{y_2}{y_1} = 8.735 - 0.095Fr_1 + 0.011 \frac{d_s}{y_1} - \dots \quad (22)$$

$$146.82 \tan \theta$$

$$\frac{\Delta E}{y_1} = -16.187 - 1.292 \frac{y_2}{y_1} + 6.072Fr_1 + \dots \quad (23)$$

$$0.006 \frac{d_s}{y_1} + 0.391 \tan \theta$$

$$\frac{L_j}{y_1} = -68.979 + 9.799 \frac{y_2}{y_1} + 4.314Fr_1 + \dots \quad (24)$$

$$0.058 \frac{d_s}{y_1} - 2.696 \tan \theta$$

$$Fr_2 = 0.592 - 0.075 \frac{y_2}{y_1} + 0.048Fr_1 + \dots \quad (25)$$

$$0.0002 \frac{d_s}{y_1} - 5.803 \tan \theta$$

دقت این معادلات با استفاده از دو معیار ضریب تعیین (R^2)، متوسط ریشه مربعات خطا (RMSE) و درصد خطا (AE) در جدول ۵ ارائه گردیده است. نتایج جدول ۵ نشان دهنده دقت قابل قبول معادلات در برآورد پارامترهای هیدرولیکی حوضچه واگرا است. هر چند معادله ۲۴ نسبت به سایر معادلات دارای ضریب تعیین کمتر و خطای بیشتری است که برای استفاده از آن باید با احتیاط بیشتری برخورد نمود. با توجه به معیار AE، همه روابط جز معادله ۲۵، پیش بینی دست بالا دارند.

جدول ۵. معیارهای ارزیابی معادلات ۲۱ تا ۲۴

Table. 5. Evaluation criteria for Eqs. (21) to (24)

معادله	R^2	RMSE	AE (%)
(۲۲)	۰/۶۷	۰/۴۴۴	۰/۴۱
(۲۳)	۰/۹۸	۰/۲۸۵	۰/۰۳
(۲۴)	۰/۶۱	۶/۳۵	۴/۷۴
(۲۵)	۰/۹۶	۰/۰۱۳	-۰/۶۱

در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نتایج حاصل از روابط توسعه داده شده در مقابل مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه ارائه شده‌است.

۵- نتیجه گیری

یکی از روش‌های استهلاک انرژی سینماتیک جریان در انتهای سازه‌های هیدرولیکی، تشکیل پرش هیدرولیکی و کنترل آن در حوضچه آرامش است. حوضچه آرامش واگرا به دلیل عدم نیاز به تبدیل در ابتدا و انتهای آن، بسیار مورد اقبال طراحان است. معمولاً این نوع حوضچه در خروجی تونل‌ها به وفور استفاده می‌شود. مطالعات متعددی نشان داده است که کارایی و میزان استهلاک انرژی در حوضچه‌های آرامش وابسته به مشخصات هندسی آن و مشخصات بلوک‌های میانی و آب پایه است. بر این اساس در تحقیق حاضر اثر موقعیت آب پایه انتهایی در واگرایی‌های مختلف حوضچه بر مشخصات پرش هیدرولیکی و میزان استهلاک انرژی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انجام این کار از نرم‌افزار فلوئنت که مدلی عددی بر پایه روش حجم محدود می‌باشد، در دو حالت استفاده گردید. در حالت اول دبی ثابت و موقعیت آب پایه متفاوت در نظر گرفته شد و در حالت دوم با فرض ثابت بودن موقعیت آب پایه انتهایی، تاثیر دبی بر روی نتایج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که مقدار واگرایی و فاصله آب پایه تا ابتدای حوضچه می‌تواند تاثیر زیادی بر شرایط پرش هیدرولیکی داشته باشد. با فرض واگرایی یکسان، موقعیت آب پایه می‌تواند تا ۹۰٪ افزایش میزان استهلاک انرژی و ۲۶٪ کاهش طول پرش را به همراه داشته باشد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده و تحلیل ابعادی پارامترهای بی‌بعد، روابطی حاصل شد که قادر است با دقت قابل قبولی مشخصات پرش هیدرولیکی و میزان افت انرژی در حوضچه آرام و واگرا را پیش بینی نماید. بر اساس این روابط، طراح می‌تواند کارایی طرح خود را در مقدار استهلاک انرژی، عمق ثانویه ایجاد شده (یا ارتفاع دیواره مورد نیاز حوضچه) و طول پرش (یا طول حوضچه) ارزیابی نماید.

مراجع

- [1] Z. Shojaeian, S.M. Kashefipoor, Numerical simulation of hydraulic jump in Namroud dam stilling basin, *Water and Soil Science*, 23(2) (2013) 283-295 (In Persian).
- [2] Z. Shojaeian, A. Hosseinzadeh Dalir, M. Daryae, S.M. Kashefipoor, D. Farsadzadeh, Application of Artificial Neural Network to Estimate Hydraulic Jump Characteristics in Divergent Rectangular Sections on Inverse Slope, *Water and Soil Science*, 22(3) (2012) 115-126 (in Persian).
- [3] A.J. Peterka, Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph, No.25, Denver, Col. 1984.
- [4] W.H. Hager, R. Bremen, Classical hydraulic jump Sequent Depths Ratio, *Journal of Hydraulic Research*, 27(5) (1989) 566-585.
- [5] M.H. Omid, A. Gord-Noshahri, S. Kouchakzadeh, Sill-controlled hydraulic jump in a gradually expanding channel, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 163(10) (2015) 515-522.
- [6] M.H. Omid, M. Ismaeil-Varaki, Theoretical and laboratory study of divergent hydraulic jumps in trapezoidal channels, *Journal of Agricultural Science and Technology*, 9(2) (2005) 17-29 (in Persian).
- [7] R.M. Riegel, J.C. Beebe, The hydraulic jump as a means of dissipating energy, *Miami Conservancy District Tech. Rep.*, part III, 1917.
- [8] G.M. Abdel-Aal, A.A. El-Saiad, O.K. Saleh, Hydraulic Jump within a Diverging Rectangular Channel, *Engineering Research Journal*, 57(1998) 118-128.
- [9] G.M. Abdel-Aal, Study of Stilling Basin in Non-Prismatic channels, *Scientific Bulletin, Faculty of Engineering, Ain Shams University*, Vol. 35, 2000.
- [10] P.W. France, Analysis of The Hydraulic Jump within a Diverging Rectangular Channel, *Proc. Instn. Civil Engineering. Part 2*, 71(1981) 369-378.
- [11] A. Rubatta, Hydraulic Jump in Canal Divergence, *L'Energia Elettrica*, 41(5) (1963) 783-790.
- [12] E.M. Wafaie, Design of Roughened Bed Radial Stilling Basins Applied to Egyptian Practice, Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, Ain Shams University, Cairo, Egypt, 1992.
- [13] W.H. Hager, Energy Dissipators and Hydraulic Jump, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1992.
- [14] A. Arabhabhrama, A. Abella, Hydraulic Jump within Gradually Expanding Channel, *J. Hydraul. Division*, 97(HY1) (1971) 31-34.
- [15] H. Ghozeisi, M.H. Omid, G.A. Kiker, Investigation of the effect of expansion angle on gradually expanding hydraulic jump in trapezoidal channel, Conference: 2016 American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), July 2016, DOI: 10.13140/RG.2.2.25563.98080.
- [16] K. Niysi, M. Shafaeabjastan, M. Ghomeshi, S.M. Kashefipoor, Investigation of Hydraulic Jump Characteristics at Roughened Bed of Sudden Expansion Stilling Basin, *Irrigation Science and Engineering*, 37(2) (2013) 83-93 (in Persian).
- [17] R. Bremen, W.H. Hager, Expanding stilling basin, *Proc. ICE, Water, Maritime and Energy*, 106(1994) 215-228.
- [18] A. Khalifa, J. McCorquodale, Simulation of the radial hydraulic jump, *Journal of Hydraulic Research*, 30(2) (1992) 149-163.

- thesis, Shiraz University, Faculty of Mechanical Engineering, 2013.
- [27] M. Asefi, A.N. ziaei, Two-dimensional numerical simulation of hydraulic jump on inverse slope channels having end-sill with FLUENT, Sixth National Congress of Civil Engineering, 6 and 7 May 2011, Semnan, Iran (in Persian).
- [28] F. Jafari, S.A.A. Salehi Neishabouri, Investigating the Effect of Mid Blocks of stilling Basin on Flow in Submerged Hydraulic Jump, Journal of Modarres Civil Engineering, 14(2013) 37-47 (in Persian).
- [29] FLUENT 6.1 user's guide. Lebanon, NH, Fluent Inc., 2003.
- [30] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Pearson Education. Pearson Education Limited, 2007.
- [31] H. Babaali, A. Shamsai, H. Vosoughifar, Computational Modeling of the Hydraulic Jump in the Stilling Basin with Convergence Walls Using CFD Codes, Arab. J. Sci. Eng., 40(2015) 381-395.
- [32] Y. Shekari, M. Javan, A. Eghbalzadeh, Effect of turbulence models on the submerged hydraulic jump simulation, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 56(3) (2015)454-46.
- [19] P.C. Nettleton, J.A. Mc-corquodal, Radial stilling basin with baffles, Proceeding Canadian Society for Civil Engineering Montreal, Canada, 2(1983) 561-670.
- [20] P.C. Nettleton, J.A. McCorquodale, Radial Stilling Basins with Baffles, Canadian Journal civil Engineering, 16(4) (1989) 489-497.
- [21] O.S. Rageh, Effect of Baffle Blocks on the Performance of Radial Hydraulic Jump, Proc. 4th Int. Water Technology Conf. (IWTC99), Alex., Egypt, April 1999, 255-269.
- [22] D.V.S. Verma, A. Goel, B.B. Singh, Studies on stilling basins with diverging side walls, Water and Energy International, 60(1) (2003) 23-29.
- [23] M.H. Omid, M. Esmaeeli Varaki, R. Narayanan, Gradually expanding hydraulic jump in trapezoidal channel, Journal of Hydraulic Research, 45(4) (2007) 512-518.
- [24] M. Esmaeili Varaki, A. Kasi, J. Farhoudi, D. Sen, Hydraulic Jump in a Diverging Channel With an Adverse Slope, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 38(C1) (2014) 111-121.
- [25] M. Shafai Bejestan, K. Neisi, A New Roughened Bed Hydraulic Jump Stilling Basin, Asian Journal of Applied Sciences 2(5) (2009) 436-445.
- [26] J. Diant, A laboratory study of the effect of divergence on hydraulic jump in a divergent stilling basin, Master's

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

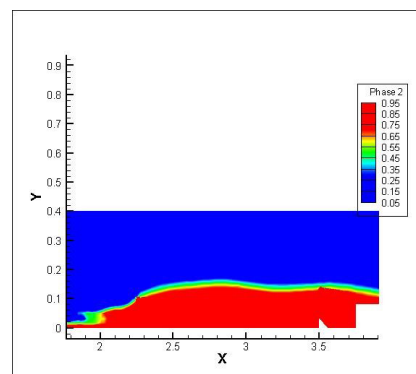
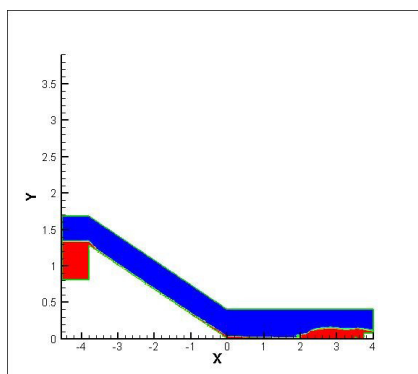
Please cite this article using:

F. Hooshyaripor, M. Dehghan, S. H. Mohajeri, Numerical Simulation of Effect of Expansion Angle and End-sill Location on the Hydraulic Jump in Gradually Expanding Stilling Basins, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(1) (2019) 85-98.

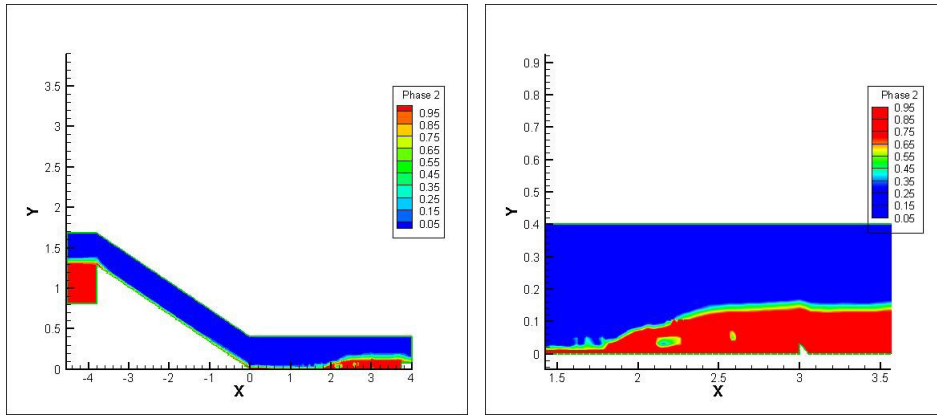
DOI: 10.22060/ceej.2018.13151.5337



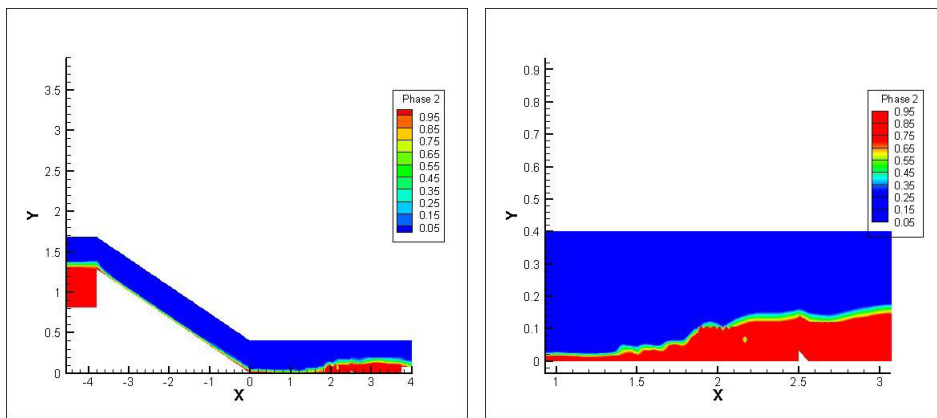
بیوست ۱: مشخصات و موقعیت پرش هیدرولیکی در واگرایی ۵-۲۰ به ازای موقعیت‌های مختلف آب پایه انتهایی



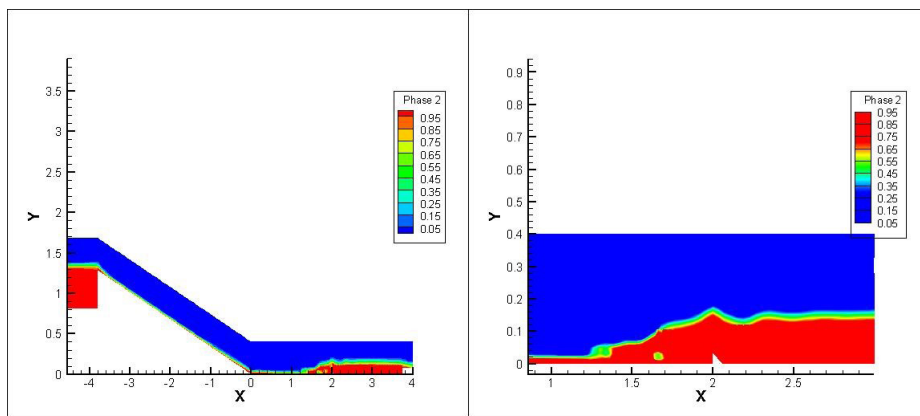
(الف) آب پایه در $X = ۳/۵$ m



(الف) آب پایه در $X = 3.0$ m

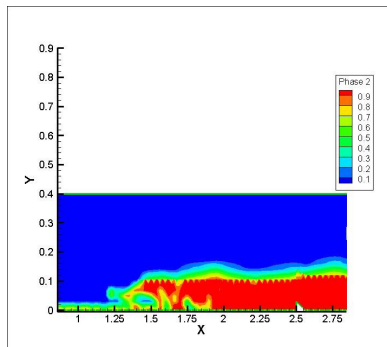


(الف) آب پایه در $X = 2.5$ m

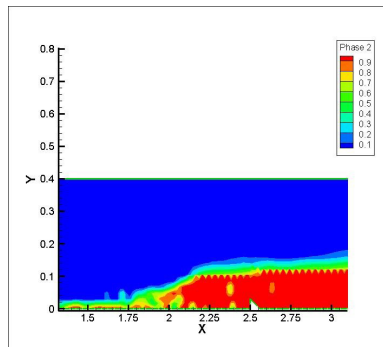


(الف) آب پایه در $X = 2.0$ m

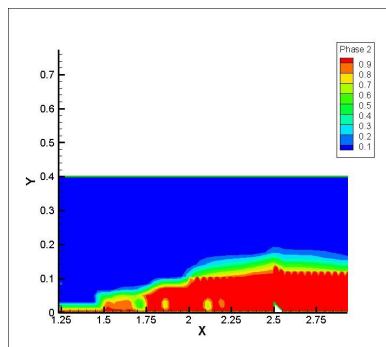
پیوست ۲: مشخصات و موقعیت پرش هیدرولیکی به ازای دبی‌های مختلف در واگرایی ۵-۲۰



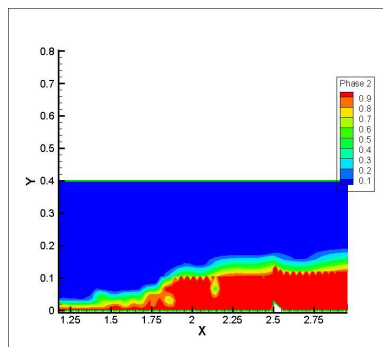
$Q=0.03 \text{ m}^3/\text{s}$



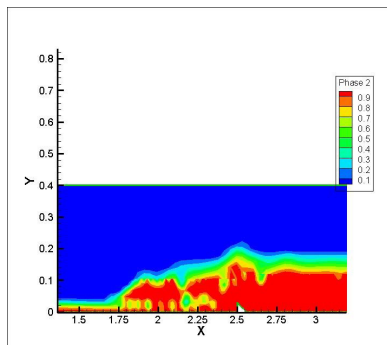
$Q=0.04 \text{ m}^3/\text{s}$



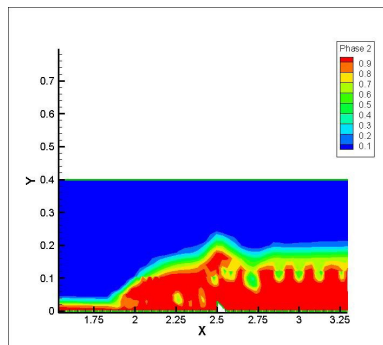
$Q=0.05 \text{ m}^3/\text{s}$



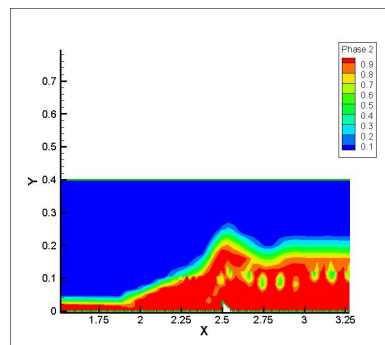
$Q=0.06 \text{ m}^3/\text{s}$



$Q=0.08 \text{ m}^3/\text{s}$



$Q=0.10 \text{ m}^3/\text{s}$



$Q=0.12 \text{ m}^3/\text{s}$