

بررسی عددی موقعیت و طول پرش هیدرولیکی در سرریز سرسره‌ای

مینا روزگار^{۱*}، ناصر طالب بیدختی^۲، سید محراب امیری^۳

تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۹

چکیده

طول پرش هیدرولیکی و موقعیت آن فراسنجهای مهمی هستند که طول حوضچه آرامش را، تحت تاثیر قرار می دهند. همچنین به دلیل هزینه فراوانی که صرف ساخت این سازه می گردد می بایست برای کاهش طول پرش هیدرولیکی و در نتیجه کاهش طول حوضچه آرامش از تمامی امکانات و روش ها استفاده کرد. در این تحقیق پرش هیدرولیکی در سرریز سرسره‌ای با استفاده از نرم افزار فلوئنت، مورد شبیه سازی قرار گرفته است. همچنین، برای حل معادلات حاکمه از روش حجم محدود و برای ارزیابی آشفتگی جریان از الگوی $k - \epsilon$ معیار استفاده شده است. علاوه بر این از شبکه بندی منظم در یک شرایط مرزی مشخص استفاده گردیده و روش حجم سیال (VOF) برای حل سطح آزاد جریان به کار گرفته شده است. نتایج به دست آمده نشان دادند که در سرریزهای سرسره‌ای با افزایش بده در محدوده معین مورد آزمایش، به ازای شیب ثابت سرریز، طول پرش هیدرولیکی تا حدود ۱۲۰٪ افزایش یافته و همچنین با افزایش شیب سرریز در محدوده معین مورد آزمایش، به ازای بده ثابت و طول ثابت سرریز، طول پرش هیدرولیکی تا حدود ۴۳٪ کاهش می یابد. همچنین نتایج حاصل حاکی از آنند که افزایش بده و شیب هر کدام باعث به تاخیر افتادن مکانی پرش هیدرولیکی می شود تا جایی که در الگوهای در نظر گرفته محل شروع پرش با توجه به شرایط، در محدوده ای به اندازه روی شیب تا خارج از حوضچه اتفاق می افتد.

واژه های کلیدی: طول پرش هیدرولیکی، روش حجم سیال، نرم افزار فلوئنت

^۱ کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی دانشگاه شیراز

Email:rouzegar.m@gmail.com

^۲ استاد گروه آب و محیط زیست دانشگاه شیراز

^۳ استادیار گروه آب و محیط زیست دانشگاه شیراز

مقدمه

سینوسی که ارتفاع موج شکل را با ارتفاع نسبی و اعداد فرود مختلف بستر بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان دادند که عمق پایاب مورد نیاز برای تشکیل پرش بر روی بستر موج‌دار نسبت به بستر صاف کمتر، و ضریب تنش برشی در پرش هیدرولیکی در بستر موج‌دار نسبت به بستر صاف دارای افزایش قابل ملاحظه ای می باشد. خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بسترهای با زبری های نواری مستطیلی با دو ارتفاع ($t=1/5$ و $t=2/5$) و پنج فاصله زبری ($7/5$ و $6/5$ و 3 و $s=1/5$) در محدوده اعداد فرود 3 تا 10 به وسیله گوهری و فراهودی (۲۰۰۹) مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، با افزایش فاصله بین زبری ها عمق ثانویه پرش کاهش می‌یابد. همچنین، تغییر ارتفاع زبریها اثر چندانی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی ندارد.

نیسی و شفافی بجستان در سال ۱۳۸۸ به منظور بررسی اثر زبری کف در کاهش عمق مزدوج و در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه اقدام به انجام آزمایشهایی در محدوده اعداد فرود $4/5$ تا 12 کردند. زبری‌های مورد استفاده در این آزمایش ها لوزی شکل و دارای ارتفاع و سطح عمود بر جریان یکسانی بودند. این زبری‌ها در شرایط جریان متفاوتی با اعداد فرود در محدوده $4/9$ تا $12/4$ مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان دادند که زبری‌ها می توانند عمق متناوب پرش هیدرولیکی را تا $2/24$ درصد کاهش دهند. کم‌ترین و بیشترین میزان کاهش عمق مزدوج به ترتیب مربوط به اجزای زبرمستطیلی و مثلثی شکل بود.

آصفی و ضیایی (۱۳۹۰) تاثیر شیب معکوس را در حوضچه آرامش بر طول پرش مورد بررسی قرار دادند. ایشان برای مدل سازی از نرم افزار فلوئنت استفاده کردند. کارالهو و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی عددی و آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی پرداختند و به صورت تحلیلی رابطه‌ای در مورد روابط پرش هیدرولیکی استنتاج نمودند.

نیسی و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی با بستر زبر پرداختند. نتایج نشان دادند که این سازه عمق مزدوج را به میزان 53 درصد کاهش و راندمان را نسبت به پرش سنتی به اندازه 25 درصد افزایش می دهد. فراهودی و خلیلی (۲۰۱۴) رابطه‌ای انگاره‌ای برای برآورد حداقل عدد فرود برای تشکیل پرش هیدرولیکی در شیب های معکوس ارائه

جریان آبی که از روی سرریز سد با سرعت زیاد به پایین دست آن جریان می‌یابد ممکن است باعث تخریب و فرسایش کف رودخانه شده و خطراتی را متوجه سازه کند. بدین منظور، برای کاهش کارماید جنبشی جریان در پایین دست سدها از حوضچه‌های آرامش استفاده می‌شود. در فرآیند طراحی و ساخت حوضچه‌های آرامش موقعیت پرش هیدرولیکی و طول آن عوامل بسیار مهم و تعیین کننده‌ای می‌باشند. همچنین، سعی می‌شود که پرش تا حد امکان نزدیک به پنجه سرریز، بدون تاثیر بر جریان ورودی از روی سرریز تشکیل شود. به عبارت دیگر، سعی می‌گردد از فرار پرش در حوضچه آرامش جلوگیری شود. برای این منظور از روش‌های متعددی جهت به عقب راندن و از طرفی مهار کردن بیشتر پرش و کاهش طول پرش استفاده می‌کنند.

تحقیقات مختلفی در زمینه شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی صورت گرفته است. در سال ۱۹۶۸، یک منحنی، که مقدار $\frac{L}{y_2}$ را بر حسب Fz_1 معین می کند برای آبراههای مستطیلی پیشنهاد شد که آزمایشهای انجام گرفته به وسیله راجاراتنا (۱۹۶۵) آن را کاملا تایید کرد. سارکر و رودز (۲۰۰۲)، با شبیه‌سازی عددی و فیزیکی پرش هیدرولیکی را مورد بررسی قرار دادند. آنها از الگوی آشفتگی $k-\epsilon$ RNG به همراه روش حجم سیال VOF برای شبیه سازی سطح آزاد استفاده کردند. بین شبیه سازی عددی دو بعدی و نتایج آزمایشگاهی آنها تطابق مناسبی وجود داشت. ژائو و ومیسرا (۲۰۰۴)، پرش بر روی بستر با شیب کم را شبیه‌سازی کردند. معادلات حاکم مورد استفاده شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت مربوط به جریان‌های تراکم‌ناپذیر بوده‌اند که در یک شبیه سازی دو بعدی دارای الگوی آشفتگی $k-\epsilon$ به کار رفته اند. آنها برای تعیین سطح آزاد از روش VOF استفاده کردند. گونزالس و بمباردلی (۲۰۰۵)، برای شبیه سازی عددی دو بعدی و سه بعدی از الگوی آشفتگی $k-\epsilon$ و روش LES بهره بردند. آن‌ها با استفاده از نرم افزار تجاری Flow-3D به کمک معادلات جریان دو حالتی شبیه‌سازی خود را انجام دادند.

اید و راجاراتنا (2002)، توکیای (۲۰۰۵)، عباسپور و همکاران (2009) و بدیع زادگان و همکاران (1390) خصوصیات پرش هیدرولیکی بر روی بستر موج‌دار

نوسانهای نامنظم، لحظه‌ای و اتفاقی کمیت‌های میدان جریان را در هر لحظه و هر نقطه شبیه‌سازی کرد. بنابراین، چنانچه مقادیر سرعت و فشار یا هر کمیت دیگری مانند Φ را به مقادیر متوسط و زمانی تفکیک کنیم، روابط زیر برقرار می‌شوند.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i$$

$$p = \bar{p} + p'$$

$$\varphi_i = \bar{\varphi}_i + \varphi'_i$$

متوسط این کمیت‌ها بر حسب Φ چنین است:

$$\bar{\varphi}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_2}^{t_1 + \Delta t} \varphi_i dt$$

در روابط فوق Δt ، دوره تناوبی است که نوسانهای اتفاقی آشفته را بیان می‌کند. همچنین u_i مولفه سرعت لحظه‌ای در جهت x_i ، V لزجت جنبشی، ρ چگالی سیال، g مولفه شتاب ثقل در جهت i و p جمله فشار در هر نقطه از سیال می‌باشد.

با جایگزینی روابط قبل در معادلات پیوستگی و اندازه‌های حرکت، در معادله پیوستگی تغییری ایجاد نشده ولی در معادلات اندازه حرکت فرانسج $\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}$ اضافه می‌شود. بنابراین داریم:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

معادله اندازه حرکت:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_{x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - u'_i u'_j)$$

فرانسج $\rho u'_i u'_j$ همان تنش رینولدز است که بر سیال عمل کرده و اثر گردابه‌های آشفته‌گی را در آن اعمال می‌کند. در اکثر جریان‌های آشفته، مقدار تنش رینولدز بسیار بیشتر از تنش ناشی از لزجت مولکولی می‌باشد. تعیین فرانسج تنش رینولدز مشکل است که بدین منظور از الگوهای آشفته‌گی متفاوتی استفاده می‌گردد.

(Fluent User's Guide, Fluent Inc. 2001)

شبیه‌سازی جریان‌های آشفته و مدل‌های آشفته‌گی

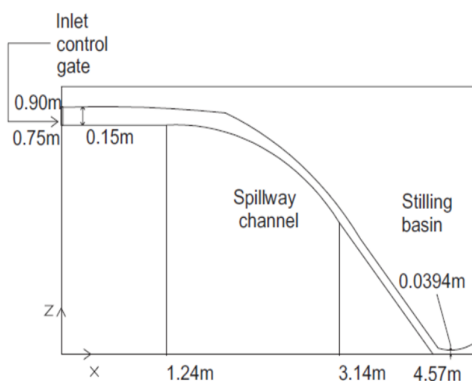
دادند. نتایج تحقیقات صورت گرفته در خصوص مشخصات پرش هیدرولیکی مستقیم در مقاطع دوزنقه‌ای نشان دادند که با به‌کارگیری اصول پیوستگی و اندازه حرکت و استفاده از فرضیاتی می‌توان رابطه انگاره‌ای را برای نسبت عمق ثانویه ارائه نمود که تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

مینایی و همکاران (۱۳۹۵) تاثیر آستانه پلکانی را بر موقعیت پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی نشان داده شد که آستانه پلکانی نسبت به آستانه شیبدار سهم بیشتری را در تثبیت پرش هیدرولیکی دارد. علاوه بر آن، روابطی نیز برای محاسبه میزان خروج پرش از حوضچه ارائه شد. کرباسی (۲۰۱۶)، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی TLBO طول پرش هیدرولیکی را تخمین زد. در این تحقیق طول پرش هیدرولیکی در یک آبراه مستطیلی بدون شیب تخمین زده شد. چرهیل و دبایج (۲۰۱۶) به بررسی آزمایشگاهی عمق‌های مزدوج در آبراه دوزنقه‌ای شیبدار پرداختند. در این تحقیق ارتباط بین عمق‌های مزدوج با شیب مورد بررسی قرار گرفت.

در مقاله حاضر سرریز سرسره‌ای با استفاده از نرم افزار فلوئنت شبیه‌سازی شد و تاثیر عواملی از جمله بده و شیب سرریز بر موقعیت و طول پرش هیدرولیکی بررسی گردید. تفاوت و نوآوری این تحقیق نسبت به کارهای انجام شده این است که در اینجا بر خلاف بیشتر کارهای انجام شده، کل سرریز و حوضچه آرامش شبیه‌سازی شده و بدین ترتیب شرایط شبیه‌سازی شده به شرایط واقعی نزدیک تر است. علاوه بر آن، متغیرها در این بررسی مربوط به سرریز بوده، حال آنکه در بیشتر تحقیق‌های انجام شده، متغیرهای حوضچه آرامش و تاثیر آن‌ها بر موقعیت و طول پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر آن، بیشتر بررسی‌های انجام شده در باره این موضوع به صورت آزمایشگاهی بوده و با توجه به هزینه بر بودن شبیه‌سازیهای آزمایشگاهی، این بررسی می‌تواند با شبیه‌سازی شرایط واقعی نتایج خوبی را در مورد شیب سرریز و بده بهینه برای طراحی حوضچه آرامش و سرریز در اختیار قرار دهد.

مواد و روش‌ها

در تحلیل عددی جریان آشفته می‌توان از روابط ناویراستوکس استفاده کرد، با این تفاوت که بتوان



شکل ۲- هندسه سرریز (کاروالهو، ۲۰۰۸).

بنابراین، شبیه سازی انجام شده با نتایج آزمایشگاهی دو مورد ذکر شده مقایسه گردید و صحت آن به تایید رسید که با همگرایی خوبی همراه بود.

تأثیر افزایش تعداد تکرار

با توجه به خاصیت پرش هیدرولیکی و زمان بر بودن تثبیت آن بر روی این گونه حوضچه ها، برای هر شبیه سازی به مدت ۵۰ ثانیه شبیه سازی صورت گرفت تا پرش در مکان مناسب خود تثبیت شود. در همه شبیه سازی ها موقعیت پرش از حدود ۴۰ ثانیه تثبیت گردیده و برای چند مورد اجازه داده شد تا زمان اجرای مدل تا ۱۷۰ ثانیه ادامه یابد و نهایتاً از تثبیت شبیه سازی در ۵۰ ثانیه اطمینان حاصل شد.

تأثیر افزایش تعداد المان شبکه محاسباتی

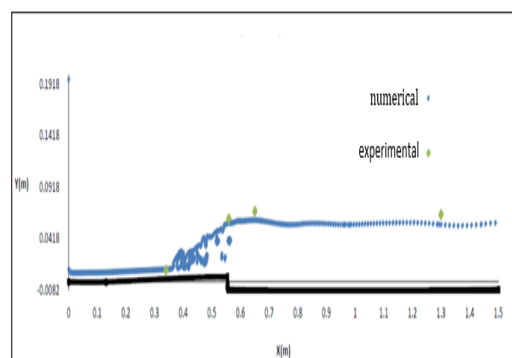
در مرحله بعد تصمیم بر آن شد که حساسیت مدل نسبت به تعداد المان بررسی گردد. در مرحله اول تعداد المان در حدود ۹۱۰۰۰ بود که در این مرحله، مشخصات پرش هیدرولیکی تطابق خوبی را با واقعیت داشت. در مرحله بعد، تعداد المان افزایش یافته و از شبکه ریزتری استفاده گردید، و در مجموع به حدود ۱۴۰۰۰۰ رسید. نتایج حاصل نشان دادند که از ۹۱۰۰۰ المان به بعد، مدل حالت پایدار پیدا کرده و نسبت به تغییر تعداد المان حساس نمی باشد.

در نهایت نتایج حل با نتایج ذکر شده در مقاله کوالهو و همکاران (۲۰۱۰)، مقایسه شده و تطبیق خوب نتایج مشاهده شد. به طوری که درصد خطا در محاسبه موقعیت و طول پرش ۴٪/۰/۰۱ اندازه گیری شده، که خطای قابل قبولی است. (شکل ۳)

تاکنون صدها الگوی آشفتگی ارائه شده اند که هریک برای وضعیت های خاص جریان و حتی در ناحیه ای خاص از میدان جریان معتبر و دقیق می باشند. هدف نهایی تمام الگوهای آشفتگی، محاسبه اندازه تنش رینولدز $-\rho u_i' u_j'$ در نقاط مختلف جریان می باشد. در این بررسی از الگوی $K - \epsilon$ معیار استفاده شده است. الگوی $K - \epsilon$ معیار یک الگوی نیمه تجربی است که بر پایه شبیه سازی معادلات انتقال برای کارمایه جنبشی آشفتگی (K)، و نرخ اضمحلال آشفتگی (ϵ)، استوار می باشد. رابطه انتقال برای K از رابطه صریح، و برای ϵ با استفاده از استدلال فیزیکی به دست می آید، که تشابه اندکی با معادل صریح ریاضی خود دارد.

صحت سنجی مدل

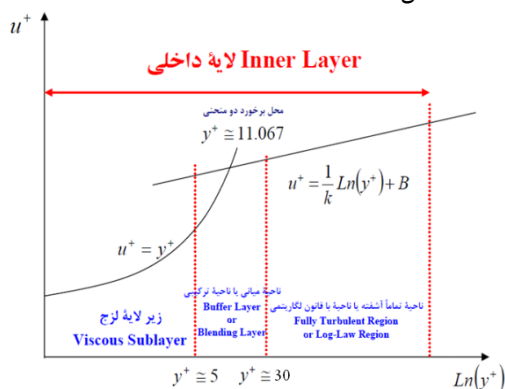
در این تحقیق برای صحت سنجی شبیه سازی انجام شده، در ابتدا مقاله آصفی و ضیائی (۱۳۹۰) در نرم افزار فلوئنت شبیه سازی گردید و به نتایج مشابهی رسید. ایشان به شبیه سازی عددی دو بعدی پرش هیدرولیکی روی سطوح شیب دار معکوس همراه با پله در آزمایشگاه پرداخته بودند که شرایط آن کاملاً بازسازی شد و خروجی ها با خروجی های ارائه گردیده در مقاله مقایسه شده و تطابق داشت. (شکل ۱)



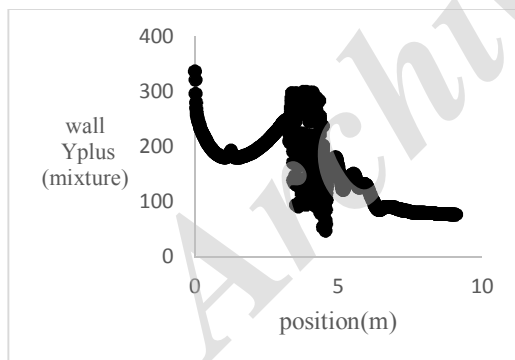
شکل ۱- مقایسه پروفیل سطح آب بین مدل عددی و آزمایشگاهی.

در مرحله بعد، برای اینکه هندسه، شباهت بیشتری به سرریزهای سرسره ای و پلکانی داشته باشد به مقاله کاروالهو و همکاران (۲۰۱۰) شبیه سازی شد و هندسه مشابه مقاله در نظر گرفته و شرایط کاملاً بازسازی گردید. شکل ۲ هندسه سرریز مدل شده را نشان می دهد.

نیمرخ سرعت درنواحی سه گانه لایه مرزی جریان- های آشفته مطابق شکل ۴ متفاوت از هم می‌باشند؛ به این ترتیب که در ناحیه زیر لایه لزوج نیمرخ سرعت به صورت خطی بوده، و در ناحیه آشفته به صورت لگاریتمی می‌باشد. در ناحیه میانی، نیز چون از نیمرخ خاصی تبعیت نمی‌کند، یک ناحیه ترکیبی است. روش توابع دیواره برای لایه‌های مرزی جریانات آشفته از تابع لگاریتمی ناحیه تماماً آشفته استفاده می‌کند، لذا بایستی طبق رابطه $Y^+ +$ اندازه اولین لایه مش‌بندی روی بستر به اندازه‌ای باشد که $Y^+ < 300$ (شکل ۵)

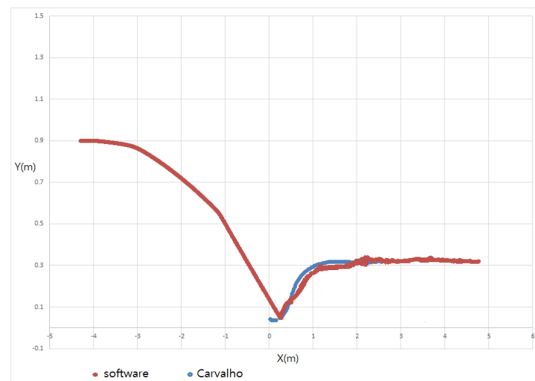


شکل ۴- پروفیل سرعت در نواحی مختلف لایه مرزی یک جریان آشفته



شکل ۵- نمودار Y^+ بر روی بستر سرریز و حوضچه.

در این شبیه‌سازی برای تحلیل جریان از الگوی چند حالتی VOF، و با فعال کردن گزینه جریان در آبراه روباز استفاده شد. به منظور تعیین فراسنج تنش رینولدز از مدل‌های آشفتنگی دو معادله ای ($k-\epsilon$ Standard) استفاده شده است. جهت تکمیل فرایند آماده‌سازی شبیه‌سازی عددی، از طرح PRESTO برای گسسته‌سازی فشار، الگوریتم PISO برای جفت نمودن سرعت و فشار، طرح Power Law برای انفصال جملات جابه‌جایی



شکل ۳- مقایسه پروفیل پرش هیدرولیکی مقاله کاروالهو و کار حاضر جهت صحت سنجی مدل

در جدول ۱ به مقایسه اختلاف مدل ساخته شده در نرم‌افزار و شبیه‌سازی مقاله پرداختیم. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد خطا در محاسبه طول پرش $0/4$ می‌باشد که خطای قابل قبولی است.

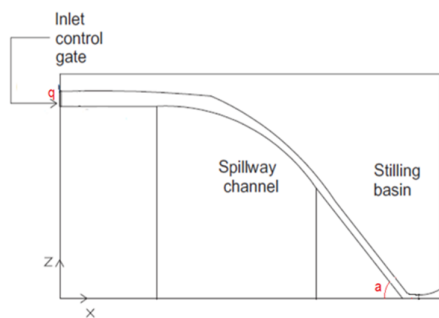
جدول ۱- مقایسه فراسنجهای کاروالهو و کار حاضر.

	L(m)
نرم‌افزار حاضر	1/992
کاروالهو	۲
اختلاف	0/008
درصد خطا%	0/4

مشخصات شبیه‌سازی‌های عددی سرریزهای Ogee

شبیه‌سازی‌های سرریز سرسره‌ای در ۶ شیب متفاوت سرریز ساخته شدند و به ازای هر شیب با ۸ بده مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند تا بدین ترتیب تاثیر تغییرات شیب و بده بر طول و موقعیت پرش هیدرولیکی مشخص شود.

برای ساختن و شبیه‌سازی هندسه از نرم‌افزار GAMBIT بهره‌وری گردید. برای شبکه‌بندی آن الگوی Quad-map به کار گرفته شد که حاصل المان‌های مربعی و مستطیلی می‌باشد. در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده این بررسی، از روش توابع دیواره (Wall Functions) برای تحلیل جریان در لایه مرزی استفاده شده است؛ بنابراین، مقدار Y^+ ، به عنوان شاخصی برای بررسی شرایط جریان در کنار جداره‌ها، برای روش توابع دیواره بایستی در محدوده $30 < Y^+ < 300$ قرار گیرد. Y^+ در واقع شاخصی برای تشخیص نوع ناحیه سه گانه لایه مرزی در جریانات آشفته است.



شکل ۸- شمایی از سرریز سرسره‌ای مدل شده (کاروالهو، ۲۰۰۸).

شیب‌های ساخته شده شده (درجه): ۱۵، ۱۷/۵، ۵۹، ۴۵، ۲۰، ۱۸/۸،
 سرعت‌های در نظر گرفته شده (m/s): ۰/۵، ۰/۷۵، ۰/۸۵، ۱/۰۰۵، ۱/۲، ۱/۵، ۲، ۳

مقایسه نتایج با USBR

نتایج استخراج شده با نتایج حاصل از نمودارهای USBR مقایسه گردیدند و میزان اختلاف طول پرش ۱۰٪-۰/۵ محاسبه شد. در جدول ۲ چند نمونه از نتایج عرضه گردیده اند.

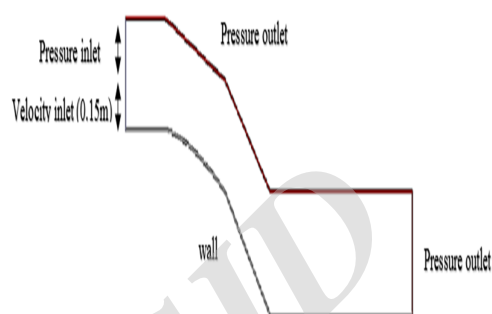
$$\% \text{اختلاف} = \frac{\text{طول پرش} - \text{طول پرش (USBR)}}{\text{طول پرش (USBR)}} \times 100$$

جدول ۲- مقایسه نتایج با USBR.

اختلاف %	طول پرش USBR (m)	طول پرش (m)	F1	شیب (درجه)	بده در واحد عرض (m ³ /s.m)
۹/۵۶	۱/۹۵	۱/۷۶	۴/۱۹	۱۷/۵	۰/۱۳
۱/۶۴	۲/۰۲	۱/۹۹	۳/۲۰	۱۷/۵	۰/۱۵
۰/۵۵	۱/۹۳	۱/۹۴	۴/۱۸	۱۷/۵	۰/۱۸
۶/۹۸	۱/۹۱	۱/۷۸	۳/۰۷	۱۷/۵	۰/۲۲
۵/۱۲	۱/۹۴	۱/۸۴	۳/۲۰	۱۸/۸	۰/۲۲
۵/۷۹	۱/۸۲	۱/۷۲	۱/۳۸	۱۸/۸	۰/۱۸

تاثیر افزایش بده بر طول و موقعیت پرش هیدرولیکی همان‌طور که مشاهده می‌شود، خروجی‌ها حاکی از آنند که با افزایش بده در سرریز سرسره‌ای طول پرش هیدرولیکی افزایش می‌یابد (شکل ۹).

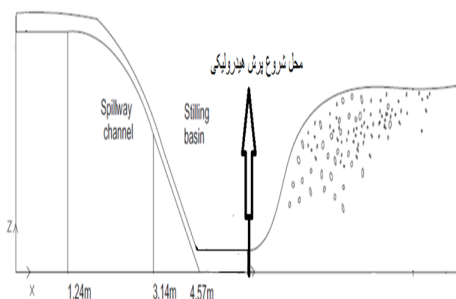
معادلات اندازه حرکت و First Order Upwind برای انفصال جملات جابه‌جایی معادلات آشفتگی بهره‌وری گردیده است. شرایط مرزی اعمال گردیده در شکل ۶ زیر قابل مشاهده است.



شکل ۶- شرایط مرزی.

نتایج و بحث

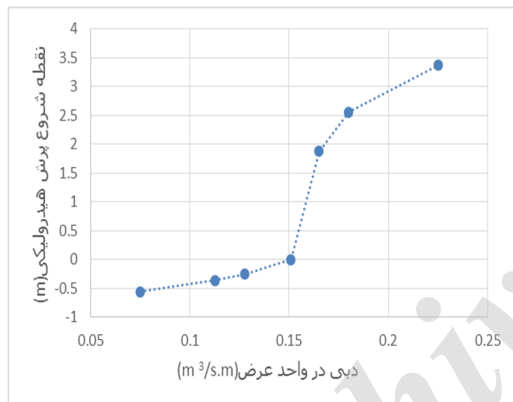
برای بررسی اثر افزایش بده و شیب سرریز بر موقعیت و طول پرش هیدرولیکی، مدل‌های سرریز Ogee برای بده‌ها و شیب‌های متفاوت شبیه‌سازی شده و نتیجه در حالت‌های متفاوت مقایسه گردید. در شکل ۷ هندسه سرریز معرفی گردیده و منظور از محل شروع پرش و طول پرش نشان داده شده است.



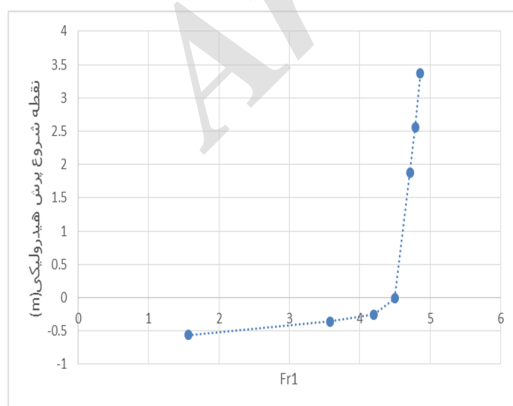
شکل ۷- هندسه سرریز و معرفی محل شروع پرش و طول پرش (کاروالهو، ۲۰۰۸).

برای سرریز سرسره‌ای ۲۳ نمونه ساخته شد. نمونه‌های ساخته شده در ۶ شیب متفاوت و ۸ بده مختلف دسته‌بندی گردید که البته برای بعضی بده‌ها پرش هیدرولیکی در محدوده حوضچه آرامش تعریف شده، اتفاق نمی‌افتد. (شکل ۸)

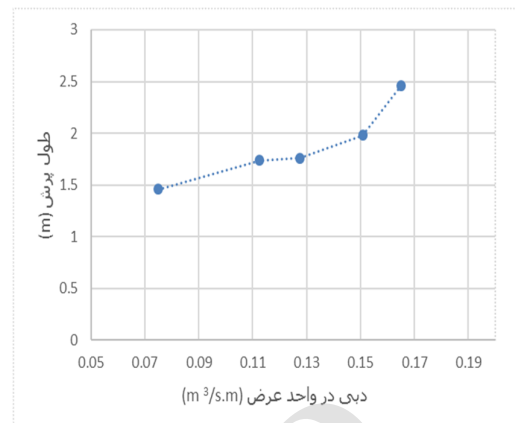
بده تا حدی باشد که با توجه به زیاد شدن Fr_1 پرش نتواند به گونه‌ای اتفاق بیفتد که به عمق نرمال حوضچه برسد، الزاماً یک نیمرخ آب قبل از شروع پرش شکل می‌گیرد تا عمق اولیه پرش مورد نیاز تامین شود و پس از آن پرش رخ دهد. علت به عقب رانده شدن ناگهانی محل شروع پرش در نمودار، تشکیل نیمرخ ذکر شده می‌باشد. همان طور که در شکل ۱۲ نیز مشاهده می‌شود، تغییر ناگهانی در محل پرش هیدرولیکی در محل تغییر ناگهانی عدد فرود اتفاق می‌افتد. در کتاب هیدرولیک فرنچ (۱۹۸۶)، تقسیم بندی برای پرش‌هایی که روی شیب اتفاق می‌افتد، با توجه به محل وقوع پرش انجام شده است، که جدول ۳ نشان دهنده این تقسیم بندی برای نقاط نمودار ۱۱ می‌باشد.



شکل ۱۱- تاثیر افزایش بده در واحد عرض در محل وقوع پرش هیدرولیکی در حوضچه برای سرریز سرسره ای با شیب ۱۷/۵.

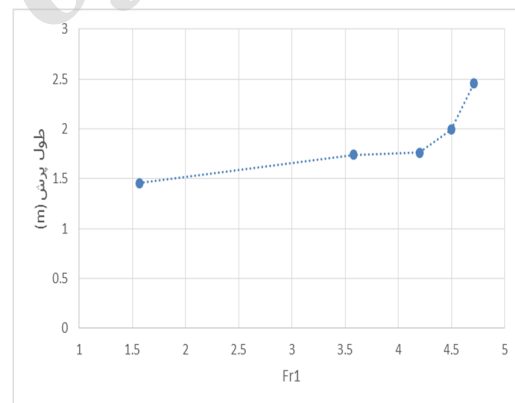


شکل ۱۲- تاثیر افزایش عدد فرود در محل وقوع پرش هیدرولیکی در حوضچه برای سرریز سرسره‌ای با شیب ۱۷/۵.



شکل ۹- تاثیر افزایش بده در واحد عرض در طول پرش هیدرولیکی برای سرریز سرسره ای با شیب ۱۷/۵.

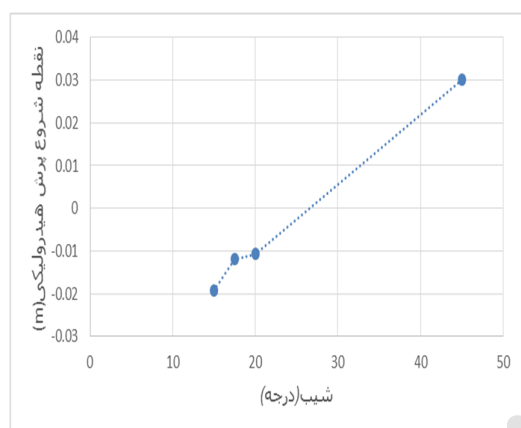
در شکل ۱۰ تاثیر افزایش سرعت در طول پرش هیدرولیکی با افزایش عدد فرود مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است، نمودار شکل ۹ قابل توجیه می‌باشد. با افزایش سرعت، عدد فرود و در نتیجه طول پرش افزایش یافته است.



شکل ۱۰- تاثیر افزایش عدد فرود در طول پرش هیدرولیکی برای سرریز سرسره‌ای با شیب ۱۷/۵.

علاوه بر آن، با افزایش سرعت، پرش به عقب رانده می‌شود تا جایی که پرش هیدرولیکی برای سرعت‌های بالاتر در محدوده حوضچه آرامش دیده نمی‌شود. در شکل ۱۱ موقعیت پرش در حوضچه آرامش نشان داده شده و مبدا مختصات نقطه شروع حوضچه منظور گردیده است. همان‌طور که در شکل مشخص است در بده $0.115 \text{ m}^3/\text{s.m}$ یک تغییر ناگهانی در محل وقوع پرش اتفاق می‌افتد. اگر بده واحد عرض بر روی سرریز زیاد شود Fr_1 (عدد فرود در نقطه شروع پرش) هم زیاد می‌شود. زمانی که زیاد شدن

نتایج هم‌چنان نشان می‌دهند که با افزایش شیب پرش هیدرولیکی به عقب رانده می‌شود، و در واقع، فاصله شروع پرش هیدرولیکی از پنجه سرریز افزایش می‌یابد که شکل ۱۴ مؤید این مسئله است. در این شکل موقعیت پرش در حوضچه آرامش نشان داده شده و مبدأ مختصات نقطه شروع حوضچه منظور گردیده است. در کتاب هیدرولیک فرنچ (۱۹۸۶)، تقسیم بندی برای پرش‌هایی که روی شیب اتفاق می‌افتد با توجه به محل وقوع پرش انجام شده است که جدول ۴ نشان دهنده این تقسیم بندی برای نقاط نمودار ۱۳ می‌باشد.



شکل ۱۴- تاثیر افزایش شیب در موقعیت پرش هیدرولیکی برای سرریز سرسره ای (سرعت ۱/۰۰۵).

جدول ۴- تقسیم بندی فرنچ برای پرش‌های اتفاق افتاده تحت بده واحد عرض ۰/۱۵ بر اساس تغییر شیب

نوع پرش	نقطه پایان پرش (m)	طول پرش (m)	نقطه شروع پرش (m)	Fr1	شیب
B	2/24	2/25	-0/02	4/9	15
B	1/98	1/9	-0/012	4/5	17/5
B	1/5	1/5	-0/01	3/9	20
در حوضچه تشکیل شده	1/3	1/3	0/03	2/4	45

نتیجه گیری

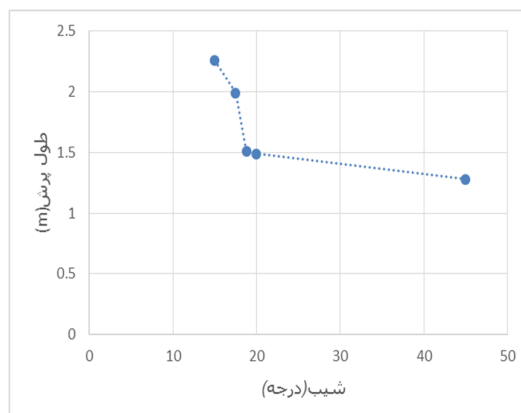
در این تحقیق از یک روش عددی برای شبیه سازی طول و موقعیت پرش هیدرولیکی در سرریز سرسره ای و پلکانی استفاده شده است. برای حل معادلات حاکمه از

$$k - \varepsilon$$

جدول ۳- تقسیم بندی فرنچ برای پرش‌های اتفاق افتاده روی شیب ۱۷/۵ بر اساس تغییر بده

نوع پرش	نقطه پایان پرش (m)	طول پرش (m)	نقطه شروع پرش (m)	Fr1	بده در واحد عرض (m/s,m)
B	0/9	1/46	-0/56	1/57	0/075
B	1/38	1/74	-0/36	3/58	0/11
B	1/51	1/76	-0/25	4/2	0/13
A	1/98	1/98	0	4/5	0/15
در حوضچه تشکیل شده	4/34	2/46	1/9	4/7	0/16

تاثیر افزایش شیب بر طول و موقعیت پرش هیدرولیکی همان‌طور که مشاهده می‌شود خروجی‌ها حاکی از آنند که با افزایش شیب در سرریز سرسره ای طول پرش هیدرولیکی کاهش می‌یابد (شکل ۱۳). همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، شیب نمودار در قسمت اول زیاد است و از شیب ۲۰ درجه به بعد طول پرش با سرعت کمتری تغییر می‌کند. علت این است که اگر محل شروع پرش روی شیب سرریز باشد، عامل شیب نیز موثر بر طول پرش می‌گردد. این در حالی است که اگر پرش کاملاً در حوضچه اتفاق بیفتد، به دلیل نبودن عامل شیب، تغییرات طول پرش هیدرولیکی با سرعت کمتری اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۳- تاثیر افزایش شیب در طول پرش هیدرولیکی برای سرریز سرسره ای (سرعت ۱/۰۰۵).

- 6) Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D. and Sadraddi, N. 2009. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Hydro-environmental Research* 3, 109-117
- 7) Carvalho, R.F., Lemos, C.M., and Ramos, C.M. 2010. Numerical computation of the flow in hydraulic jump stilling basins. *Hydraulic research* 46: 739-752.
- 8) Chanson, H., and Toombes, L. 2001. Experimental investigation of air entrainment in transition skimming flows down a stepped chute application to embankment overflow stepped spillways. URL: <http://www.uq.edu.au/~e2hchans>, Research Report No.CE 158, pp. 1-40.
- 9) Cherhabil, S. and Debabeche, M. 2016. Experimental study of sequent depths ratios of hydraulic jump in sloped trapezoidal channels. 6th International Symposium on Hydraulic Structures
- 10) Ead, S. and Rajaratnam, N. 2002. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Hydraulic Engineering ASCE* 128(7), 656-663
- 11) Farhoudi, j. and Khalili Shayan, H. 2014. Theoretical criterion for stability of free hydraulic jump on adverse stilling basins. *Hydraulic Structures* 1: 53-66.
- 12) French, R. 1987. *Open channel hydraulic*. McGraw-Hill book company: 89-101
- 13) Fluent. Inc\help\index.htm
- 14) Gonzalez, A., and Bombardelli, F. 2005. Two-phase flow theory and numerical models for hydraulic jumps, Including air entrainment in *Proceedings Of The International Association for Hydraulic Research Vol 1*: 28-29.
- 15) Gohari, A. and Farhoodi, J. 2009. The characteristics of hydraulic jump on rough bed stilling basins. *water engineering for sustainable environment, Vabcouver, British Columbia*, pp.9-14
- 16) Karbasi, M. 2016. Estimation of classical jump length teaching-learning based optimization algorithm. *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (8) 2947-2954
- 17) Rajaratnam, N. 1968. Hydraulic jump on rough bed. *Engineering Institute of Canada* 11, 1-8
- 18) Sarker, M.A. and Rhodes, D.G. 2002. Physical Modeling and CFD Applied to Hydraulic Jump, Cranfield University Report.
- 19) Sarker, M. and Rhodes, D. 2002. Physical Modeling and CFD Applied to Hydraulic Jump.
- 20) Tokyay, N. 2005. Effect of channel bed corrugations on hydraulic jumps. *Global Climate Change Conference*, 408-416
- 21) Zhao, Q. and Misra, S. Numerical study of a turbulent hydraulic jump. 17th Engineering Mechanics Conference, New York

روش حجم محدود و برای ارزیابی آشفتگی جریان از مدل معیار استفاده شده‌است. شبکه بندی مورد استفاده در این بررسی منظم بوده و روش حجم سیال (VOF) برای حل سطح آزاد جریان به کار گرفته شده‌است.

در سرریزهای سرسره‌ای مشخص شد که با افزایش بده، به ازای شیب ثابت سرریز، طول پرش هیدرولیکی تا حدود ۱۲۰٪ افزایش یافته‌است. همچنین، با افزایش شیب سرریز، به ازای بده ثابت و طول ثابت سرریز، طول پرش هیدرولیکی تا حدود ۴۳٪ کاهش می‌یابد.

نتایج هم‌چنین نشان دادند که با افزایش بده، به ازای شیب و طول ثابت سرریز، پرش هیدرولیکی به عقب رانده می‌شود، و در واقع فاصله شروع پرش هیدرولیکی از پنجه سرریز افزایش می‌یابد. علاوه بر آن با افزایش شیب سرریز، به ازای بده ثابت و طول ثابت سرریز، پرش هیدرولیکی به عقب رانده می‌شود و در واقع فاصله شروع پرش هیدرولیکی از پنجه سرریز افزایش می‌یابد.

بنابراین، در طراحی حوضچه آرامش، بده و شیب سرریز، دو عامل تاثیر گذار می‌باشند که بایستی با در نظر گرفتن کلیه شرایط به صورت بهینه انتخاب شوند.

منابع

- ۱) آصفی، م.، و.ع. ضیائی، ۱۳۹۰. شبیه سازی عددی دو بعدی پرش هیدرولیکی روی سطوح شیبدار معکوس همراه با پله در انتها با نرم افزار فلوئنت. ششمین کنگره ملی عمران. سمنان. 7-1.
- ۲) بدیعزادگان، ر.، ک.، اسماعیلی، ر.، فغفورمغربی، و م.، صانعی، ۱۳۹۰. مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه های آرامش کانال های آبیاری با بستر موجدار. آب و خاک ۲۵
- ۳) مینایی، ا.، م.، قدسیان، و م.، مهرآیین، ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش با آستانه پلکانی. عمران مدرس
- ۴) نیسی، ک. و م.، شفاعی بجستان، ۱۳۸۸. بررسی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تحت تاثیر اجزای زبر کف. دانش آب و خاک ۱۹
- ۵) نیسی، ک.، م.، شفاعی بجستان، م.، قمشی، و م.، کاشفی پور، ۱۳۹۲. بررسی مشخصات هیدرولیکی در حوضچه آرامش واگرای ناگهانی با بستر زبر. علوم و مهندسی آبیاری. ۳۷(۲). ۸۳-۹۳