بررسی عددی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی با استفاده از نرمافزار

Flow-3D

محمد دهقان^۱، حجت کرمی^۲*

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مهندسی آب و سازههای هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران ۲- دانشیار گروه آموزشی عمران-آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران آدرس ایمیل: hkarami@semnan.ac.ir

چکیدہ

سرریزهای کلید پیانویی نوع جدیدی از سرریزها میباشند که برای بهبود ظرفیت تخلیه سدها طراحی می شوند. در این تحقیق با توجه به آزمایشگاهی بودن اکثر مطالعات صورت گرفته روی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی به مطالعه عددی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی با استفاده از نرمافزار Stow-3D پرداخته شده است. در این پژوهش شبیهسازی آبشستگی بستر پاییندست دو نوع سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی در شرایط هندسی و هیدرولیکی یکسان صورت گرفت. برای کالیبراسیون مدل از مطالعهی آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) در شرایط انتقال رسوب استفاده شد، سپس تعداد ۸۸ شبیهسازی عددی برای آبشستگی پاییندست دو نوع سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی در شرایط تقیال رسوب استفاده شد، سپس تعداد موضعی آبشستگی در سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای در عمقهای پایاب ۲۰/۰، ۲۰/۱ و ۲/۱ متر و هر سه دبی ۲۵، ۳۵ و ۲۵ لیتر بر ثانیه کمتر از سرریز کلید پیانویی مثلثی مشاهده شد. با افزایش ۲ برابری عمق پایاب در سرریز ذوزنقهای و مثلثی در شرایط تغییرات دبی و عمق پایاب صورت پذیرفت. تغییرات پیانویی مثلثی مشاهده شد. با افزایش ۲ برابری عمق پایاب در سرریز ذوزنقهای و مثلثی در شرایط تغییرات دبی و عمق پایاب صورت پذیرفت. تغییرات کاهش ۴۴ درصدی دبی در یک عمق پایاب ثابت به ترتیب در سرریز ذوزنقهای تا ۲۹٪ و در سرریز مثلثی تا ۲۶/۶٪ از عمق آبشستگی کاسته میشود. همچنین با در پاییندست سرریزهای مربری می می پیانویی دوزنقه و مثلثی ۲۰٪ و ۲۰ سرریز مثلثی تا ۲۶/۶٪ از عمق آبشستگی کاسته میشود. همچنین با

كلمات كليدي

سرریز کلید پیانویی مثلثی، سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای، حفره آبشستگی، شبیهسازی عددی، اعتبارسنجی نرمافزار Flow-3D

۱– مقدمه

از جمله مهمترین سازههایی که امروزه برای افزایش دادن ذخایر آبهای سطحی مورد استفاده قرار میگیرند سدها هستند. وجود یک طراحی دقیق برای اجزای این سازهها اهمیت فوقالعادهای دارد. از جمله اجزای مهم سدها میتوان به سرریزها اشاره کرد که در سدهای بزرگ برای تخلیه سیلاب از آن استفاده میشود. سرریزها نقش بسیار مهمی در تضمین ایمنی سدها ایفا میکنند [1]. برای عبور آبهای اضافی و سیلابها از بالادست به پاییندست سدها سرریزها دارای اهمیت بالایی هستند که یکی از سازههای مهم هر سد را تشکیل میدهند. سرریزها باید هم از لحاظ سازهای محکم و هم از جهت طراحی به گونهای باشند که توانایی انتقال آب به میزان مورد نیاز را داشته باشند[۲]. یکی از انواع سرریزها، سرریزهای کلید پیانویی هستند این نوع سرریزها شکل جدیدی از سرریزهای غیر خطی تاج طولانی هستند که توسط مؤسسه هیدروکووپ فرانسه و آزمایشگاه هیدرولیک ومحیط زیست دانشگاه بیسکارا الجزایر در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است[۳]. سرریزهای کلید پیانویی افزون بر ظرفیت آبگذری بیشتری که نسبت به سرریزهای ساده دارند، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه میباشند[۴]. برتریهای دیگر سرریزهای کلید پیانویی عبارتاند از: افزایش دبی بر واحد عرض عبوری از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه میباشند[۴]. برتریهای دیگر سرریزهای کلید پیانویی عبارتاند از: افزایش دبی بر واحد عرض عبوری از سرریزهای میم مقرون به صرفه میباشند[۴]. برتریهای دیگر سرریزهای کلید پیانویی عبارتاند از: افزایش دبی بر واحد عرض عبوری از سرریز تا ۱۰۰ مقرون به صرفه میباشند[۴]. برتریهای دیگر سرریزهای کلید پیانویی عبارتاند از: افزایش دبی بر واحد عرض عبوری از سرریزهای متر مکعب بر ثانیه بر متر، افزایش حداقل ۴ برابری دبی نسبت به سرریزهای خطی و هزینه نگهداری کمتر آه]. این ویژگیها سرریزهای مر محیع بر یانوی را به سازههای کارآمدی تبدیل کرده است. این نوع سرریز به طور عمده با هدف افزایش ظرفیت آبگذری روی سازههای موجود و همچنین به عنوان سازه کنترلی در سرریزهای نوساز استفاده میشود[۱]. به طور کلی سرریزهای کلید پیانویی به چهار نوع تقسیم میشوند:

- نوع A: دارای دو لبه آویزان (بیرون زدگی) همسان در بالادست و پایین دست سرریز است.
 - انواع B و C: که دارای یک لبه آویزان به ترتیب در بالادست و پاییندست است
 - نوع D: بدون لبهى آويزان.

چهار نوع مختلف سرریز کلید پیانویی در شکل (۱) قابل مشاهده است. همچنین این سرریزها دارای اشکال مختلف در پلان شامل مستطیلی، ذوزنقهای و مثلثی هستند.



Figure 1. Types of piano key weirs [6].

Wi اجزای یک سرریز کلید پیانویی نوع A که در شکل (۲) نشان داده شده عبارتاند از: P ارتفاع سرریز، W عرض کل سرریز، W عرض کلید ورودی، Wo عرض کلید خروجی، Si و So به ترتیب شیب کف کلیدهای ورودی و خروجی، B طول دیوار جانبی سرریز، Bi و B₀ به ترتیب طول بیرونزدگیهای ورودی و خروجی سرریز میباشند[۶]. شکل ۲: مشخصات هندسی سرریز کلید پیانویی نوع A [۶]. Figure 2. Geometrical specifications of a type piano key weir [6].

در سدها به علت فشار هیدرواستاتیکی نسبتاً زیاد اعمالی از طرف آب موجود در مخزن بر این سازه، لازم است علاوه بر کنترل شرایط هیدرولیکی و سازههای مستهلک کننده انرژی از جمله حوضچههای آرام، کنترل های پایداری سازه نیز بایستی به طور دقیق صورت پذیرد. آبشستگی موضعی از موضوعات مهم در مهندسی رودخانه و هیدرولیک جریان در بسترهای آبرفتی است. اگر در یک بازه مورد بررسی، مقدار رسوب وارد شده کمتر از مقدار رسوب خارج شده باشد، عمل فرسایش کف رودخانه رخ میدهد و بستر رودخانه به تدریج گود میشود. از جمله اثرات گود شدن بستر رودخانه در پاییندست، میتوان به مختل شدن پرش هیدرولیکی در بالادست و انتقال پرش میشود. از جمله اثرات گود شدن بستر رودخانه در پاییندست، میتوان به مختل شدن پرش هیدرولیکی در بالادست و انتقال پرش امیدرولیکی به پاییندست اشاره کرد. با افزایش گرادیان هیدرولیکی که در نهایت افزایش فشار بالابرنده و ایجاد پدیده تراوش را به همراه دارد بر خطرات آبشستگی در سازه افزوده میشود. از این رو پدیده آبشستگی در سازهها بسیار دارای اهمیت است و پیشبینی آن قبل از ساخت سازه امری ضروری است[7]. گسترش آبشستگی در سازههای هیدرولیکی میتواند عملکرد سازه را تحت تأثیر قرار داده و پایداری آن را به خطر اندازد[۷]. هزینههای بسیار زیاد ساخت سازههای مستهلک کننده انرژی مانند حوضچههای استغراق، حوضچههای آرامش مسبب افزایش بررسیهای آبشستگی در بستر رودخانهها و محافظت بیشتر آن شده است. در صورت استفاده از سازههای مستهلک کننده انرژی در پاییندست سرریزها همچنان بررسی آبشستگی پاییندست این سازهها دارای اهمیت است و از این جهت همواره پیش بینی شکل و ابعاد حفره آبشستگی در پاییندست این سازهها مورد توجه پژوهشگران بوده است.

مطالعات محدودی در رابطه با سرریزهای کلید پیانویی صورت گرفته که در این بین تعداد معدودی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی را مورد بررسی قرار دادهاند. بخشی از یافتهها و نتایج تحقیقات در رابطه با سرریزهای کلید پیانویی در ادامه ارائه میشود: نتایج مطالعات بر روی سرریزهای کلید پیانویی نشان می دهد؛ در ترازهای پایین، زیاد کردن تعداد دهانههای سرریز باعث افزایش کارایی سرریز می شود[۸]. با بررسی نسبت عرض کلید ورودی به خروجی در سرریزهای کلید پیانویی، نسبت عرض کلید ورودی به خروجی (Wi/Wo) در محدودهی ۱/۲۵ تا ۱/۵ بیشترین راندمان سرریز را به همراه داشت و همچنین با بررسی فنی-اقتصادی نسبت های (Wi/Wo=۱/۲۵)، با بررسی نسبت عرض کلید ورودی به خروجی در سرریزهای کلید پیانویی، نسبت عرض کلید ورودی به مای (Wi/Wo=۱/۲۵) به عنوان بهینه اقتصادی (الاسرات) به عنوان بهینه هیدرولیکی و نسبتهای (Wi/Wo و (۵/۹=۷/۹۳))، (Wi/Wo=۱/۳۳)) و (P/Wu=۱/۳۳) به عنوان بهینه هیدرولیکی و نسبتهای (۵/۷ه–۲۵))، (۱-Bi/Bo و (۵/۹=۷/۹۳)) به عنوان بهینه اقتصادی پیشنهاد شد[۵]. در مطالعهی هیدرولیکی سرریزهای کلید پیانویی مشخص شد که با ایجاد شیب و عرض کافی برای کلیدهای خروجی میتوان از تاثیر استغراق تاج اجتناب کرد و به طور کلی این سرریزها کارآمدتر از سرریزهای کنگرهای مستطیلی بدون شیب و با شیب ورودی و خروجی هستند[۹]. با زیگزاگی شدن نیمرخ تاج جانبی، بیشینه ضریب دبی در نسبت کنگرهای مستطیلی بدون شیب و با شیب وردی و خروجی هستند[۹]. با زیگزاگی شدن نیمرخ تاج جانبی، بیشینه ضریب دبی در نسبت زیگزاگی نسبت به استاندارد گزارش شده است[۱۰].

از جمله تحقیقات انجام شده در زمینهی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی میتوان به موارد زیر اشاره کرد: طبق ازمایشهایی که بر روی مشخصات حفره آبشستگی بستر فرسایش پذیری با رسوبات یکنواخت در پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و تغییر در میزان دبی و عمق پایاب انجام شد، افزایش عمق پایاب باعث کاهش بیشینه عمق آبشستگی میشود، همچنین افزایش دبی موجب افزایش ابعاد حفره آبشستگی میشود[۱۱]. در مطالعات آزمایشگاهی حول آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و بررسی تاثیر فراسنجههایی از قبیل دانه بندی رسوبات غیر چسبنده، دبی جریان، ارتفاع جت و عمق پایاب بر حفره آبشستگی مشخص شد که بیشینه عمق حفره آبشستگی به ویژگیهای رسوب، دبی، اختلاف ارتفاع جریان بالادست و پاییندست سرریز و عمق پایاب بستگی دارد [1۲].

در مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی پس از کفبند تعبیه شده در پاییندست سرریز کلید پیانویی مستطیلی این مهم حاصل شد که با افزایش طول مؤثر سرریز، عمق آب روی سرریز کاهش یافته و با کاهش سرعت برخورد جریان با بستر پاییندست میزان عمق آبشستگی نیز کاهش مییابد. افزون بر این، کاهش عمق پایاب موجب افزایش بیشینه عمق آبشستگی و دور شدن محل رخداد بیشینه عمق آبشستگی از انتهای کفبند میشود[۳]. در بررسی فیزیکی ابعاد حفره آبشستگی و همچنین تغییرپذیریهای عوارض بستر در پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای با تغییر دبی جریان و عمق پایاب مشخص شد برای دبی ثابت با افزایش ۲۱۲ درصدی عمق پایاب بیشینه عمق آبشستگی از پایه سرریز افزایش می باد و می پایاب مشخص شد برای دبی ثابت با افزایش سرریز افزایش می باد و شکل عوارض بستر در شرایط مختلف، به تقریب با هم یکسان میباشند[۶].

طبق مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته بر آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی مثلثی و ذوزنقهای در شرایط تغییرات عمق پایاب و دبی مشخص شد که در سرریزهای کلید پیانویی دو نوع جریان قالب وجود دارد؛ کلید ورودی جریانهای نزدیک شونده را به سمت خود کشیده و جریان از روی تاج ورودی به صورت ریزشی به سمت پاییندست تخلیه میشود. الگوی دوم جریان بر روی کلیدهای خروجی شکل می گیرد در این قسمت از سرریز جریان عبوری از روی تاج خروجی همانند یک جت به سمت پاییندست بخش شیبدار سرریز تخلیه میشود. همچنین جریان خروجی از کلید ورودی به سطح بستر در پاییندست برخورد کرده و با توجه به عمق پایاب موجود به صورت چرخش سطحی در عمق پایاب کم و اغتشاش سطحی در عمق پایاب زیاد ظاهر میشود. در هر دو نوع سرریز کلید پیانویی مثلثی و ذوزنقهای تغییرات عمق حفره آبشستگی در اعداد فرود ذره کمتر از ۳ (3) تا حد زیادی نزدیک به هم است. ۱۵مله بیشینه عمق حفره آبشستگی تا پای سرریز و طول حفره آبشستگی در سرریز کلید پیانویی مثلثی به طور میانگین ۳۷ درصد و ۱۸/۵ درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی دوزنقهای است. محج حفره آبشستگی در سرریز کلید پیانویی مثلثی به طور میانگین ۳۵ درصد و درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی مثلثی تا پای سریز و طول حفره آبشستگی در سرریز کلید پیانویی مثلثی به طور میانگین ۳۵ در ما درصد بیشتر از سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای است. حجم حفره آبشستگی در پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی به طور میانگین ۳۵ درصد و ار سریز کلید پیانویی ذوزنقهای است. حجم حفره آبشستگی در پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی در ۳ درمد بیشتر

امروزه نرمافزار Flow-3D به عنوان یک ابزار قدرتمند برای مدلسازی جریان سطح آزاد سه بعدی در پاییندست سازههای هیدرولیکی شناخته شده است[۱۴, ۱۵]. در این مطالعه، جهت شبیه سازی عددی آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی، دو سرریز کلید پیانویی مستطیلی ۵ و ۹ کلیدی توسط نرمافزار Flow-3D مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که نرمافزار Flow-3D به خوبی مشخصات حفره آبشستگی در پاییندست سرریز کلید پیانوی ۵ و ۹ کلیدی را مدلسازی کرده و تا حد زیادی با نتایج آزمایشگاهی شباهت دارد[10]. مدلسازی عددی آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی مستطیلی با شکل تاج معمولی و تاج زیگزاگی با نرمافزار Flow-3D و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نرمافزار مذکور حفره آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی را با خطای قابل قبولی مدلسازی میکند. در این مدلسازی چهار نوع تاج زیگزاگی با اشکال مثلثی، سینوسی، مستطیلی و نیمدایره مورد استفاده قرار گرفت و با زیگزاگی شدن تاج سرریز کلید پیانویی ابعاد حفره آبشستگی کاهش مییابد، بیشترین کاهش عمق آبشستگی با مثلثی شدن تاج سرریز به میزان ۴۰ درصد بود و همچنین بیشترین کاهش حجم حفره آبشستگی در این نوع سرریز مشاهده شد. دورترین فاصله بیشینه عمق آبشستگی در سرریز با تاج زیگزاگی مستطیلی رخ داد[۱۶]. مقایسه آزمایشگاهی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و ذوزنقهای با استفاده از دبیهای مختلف و سه عمق پایاب که جنس بستر پایین دست سرریز از مصالح شنی با قطر متوسط d₅₀= ۸/۷ mm به ارتفاع ۰/۲۵ متر بود، نشان داد با افزایش دبی و کاهش عمق پایاب ویژگیهای هندسی حفره آبشستگی افزایش مییابد. همچنین عمق آبشستگی در سرریز کلید پیانویی مستطیلی بیشاز سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای بوده به طوری که در همهی دبیها به طور میانگین عمق نسبی حفره آبشستگی در سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای سبت به سرریز کلید پیانویی مستطیلی ۷ درصد کاهش مییابد. درکالیبراسیون و مدلسازی عددی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مستطیلی با استفاده از نرمافزار Flow-3D، نتایج قابل قبول و با خطای کم در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

بدست آمد، در این مدلسازی در شرایط دبی، عمق پایاب و اختلاف ارتفاع بین پایاب و سرآب زیاد اختلاف پروفیل آبشستگی سرریزهای کلید پیانویی مستطیلی و ذوزنقهای کاهش مییابد[۱۷].

در مطالعه حاضر با بهره گیری از قابلیتهای نرمافزار Flow-3D، بعد از انجام اعتبارسنجی به شبیهسازی عددی آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی و مقایسه ویژگیهای آبشستگی بستر پایاب این دو سرریز پرداخته شده است. لازم به ذکر است در این پژوهش زاویه شیب در کلیدهای ورودی و خروجی سرریزهای مورد نظر از سرریزهای مطالعه شده در آزمایشهای پیشین بیشتر شده و تاثیر افزایش شیب در کلیدهای سرریز بر زاویه برخورد جت ریزشی به بستر پایاب و به دنبال آن تغییر در روند

۲- مواد و روشها

تجهيزات آزمايشگاهى

در این تحقیق از آزمایشات قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) برای واسنجی مدل عددی استفاده شده است، آزمایشات در یک فلوم به طول ۱۰ متر و عرض ۲/۷۵ متر با ارتفاع ۸/۰ متر انجام شده است، جنس کف فلوم از ورق گالوانیزه و دیوارههای آن از شیشه نشکن میباشد. عمق آب درون فلوم به وسیله دریچه تعبیه شده در انتهای آن کنترل میشود. جریان آب از یک مخزن زیرزمینی به وسیلهی یک پمپ با بیشینه دبی ۸۵ لیتر بر ثانیه تامین شده و سرریز کلید پیانویی مورد نظر در دو شکل پلان، به صورت مثلثی و ذوزنقهای در فاصله ۲ متری از انتهای فلوم نصب شده و آببندی آن صورت گرفته است. به منظور تعیین میزان آبشستگی بستر پاییندست سرریز کلید پیانویی، از ماسه یکنواخت با قطر میانگین mm 1.64=600 و انحراف معیار برابر با 1.24 ستفاده شده است. طول بستر قابل فرسایش پاییندست ۲۰۰ سانتیمتر و عرض و عمق لایه رسوبات به ترتیب ۷۵ و ۲/۱۵ سانتیمتر است. سرریز مورد استفاده برای ام صحتسنجی در پژوهش حاضر از سرریز نوع ذوزنقهای موجود در آزمایش قدسیان و همکاران انتخاب شد. این سرریز در نرمافزار Auto

شکل ۳: سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای [۱۳]. Figure 3. Trapezoidal piano key weir[13].

| جدول ۱: مشخصات هندسی سرریز کلید پیانویی دوزنقهای[۱۲]. | | |
|---|-----------|--|
| Table 1. Geometric characteristics of trapezoidal piano key wei | r [13]. | |
| Parameter | Value | |
| Number of key of the weir (N) | ٣ | |
| Total width of the weir (W:m) | •/ Y۵ | |
| Width of the inlet key (W _i :m) | ·/ 1VD | |
| Width of the outlet key (W ₀ :m) | • / • ۵ ١ | |
| Sidewall thickness (Ts:m) | •/•17 | |
| Lateral length of the weir (B:m) | • /۵ | |
| Upstream and Downstream overhang length (Bi and Bo:m) | ٠/١٢۵ | |
| Height of the PKW crest (P:m) | •/٢ | |

نحوه آماده سازی مدل عددی Flow-3D و هندسههای سرریزهای مورد نظر برای کالیبره کردن نرمافزار نام برده شده در این قسمت برای حالت دارای رسوب در پاییندست سرریز توضیح داده میشود.

با توجه به اینکه پدیده آبشستگی تابع زمان است، در مطالعه آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱)، دو آزمایش درازمدت ۱۲ ساعته برای بررسی زمانی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی انجام شد (شکل (۴))، در پژوهش مذکور با توجه به شیب نمودار و بر اساس معیار چیو (Chiew, 1992) جهت تعیین عمق تعادل آبشستگی، عمق آبشستگی پس از حدود ۵ ساعت به عنوان آبشستگی تعادلی انتخاب شده است[۱۳].



شکل ۴: نمودار توسعه زمانی عمق گودال آبشستگی در ۱۲ ساعت و زمان تعادل آبشستگی[۱۳]. Figure 4. Time development graph of scour pit depth in 12 hours and scour equilibrium time [13].

به دلیل ماهیت پژوهش حاضر که در رابطه با عمق و پروفیل طولی گودال آبشستگی میباشد، در شبیهسازیهای عددی صورت گرفته نیمی از طول بستر فرسایش پذیر یعنی ۱۰۰ سانتی متر ابتدایی بستر فرسایشی مورد بررسی قرار گرفته و از اعمال مابقی طول بستر رسوبی در مدلسازی صرفنظر شده است، زیرا هدف از این پژوهش صرفاً بررسی عددی آبشستگی در پایین دست سرریز کلید پیانویی است و با توجه به اینکه در مطالعه آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) محل حفر گودال آبشستگی در طول کمتر از ۱ متر از پایین دست سرریز کلید پیانویی واقع شده و از طرفی اعمال ۱ متر انتهایی بستر رسوبی برای شبیه سازی عددی، تفاوتی در نتایج گودال آبشستگی ایجاد نمی کند و فقط باعث افزایش بسیار زیاد در زمان شبیه سازی می شود.

در مطالعات عددی صورت گرفته برای صحتسنجی نرمافزار مورد استفاده به علت محدودیت زمانی و سختافزاری، فقط ۲۰ دقیقه از روند آبشستگی مطالعه قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) مدلسازی شد که البته میزان ۲۵٪ از کل عمق حفره آبشستگی در این مدت زمان اتفاق افتاده است، بنابر این مدلسازیهای عددی صورت گرفته با ۲۰ دقیقه ابتدایی نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. ضمناً این نکته قابل توجه است که با توجه به نمودار توسعه زمانی آبشستگی ارائه شده از مطالعه ی آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) بعد از گذشت ۲۰ دقیقه ابتدایی از زمان کل آبشستگی، سرعت حفر گودال آبشستگی نسبت به زمان بسیار کاهش پیدا کرده، به نحوی که در محدوده بازه زمانی ۲۰ تا ۳۰۰ دقیقه (۳۰۰ دقیقه برابر است با ۵ ساعت و زمان تعادل آبشستگی) تنها حدود ۲۰/۰ متر افزایش پیدا کرده است. به صورت میانگین به ازای هر ۲۰ دقیقه برابر است با ۵ ساعت و زمان تعادل آبشستگی) تنها حدود ۲۰/۰ متر افزایش ورت خواهد گرفت. از نظر هزینه محاسبات و زمان چند برابری برای شبیه سازی کل زمان تعادل آزمایش (۵ ساعت زمان تعادل) به ازای اضافه شدن هر ۲۰ دقیقه به زمان شبیه سازی، تاثیری در مقایسه بین نتایج مطالعه آزمایشگاهی مبنا و ملایش عمق گودال ورت خواهد شدن هر ۲۰ دقیقه به زمان شبیه سازی، تاثیری در مقایسه بین نتایج مطالعه آزمایشگاهی مبنا و مطالعه عددی حاضر نمی کند و نتایج صحیح مدل سازی عددی در ۲۰ دقیقه ابتدایی آزمایش قابل اتکاء خواهد بود. در این پژوهش از نوع شبکهبندی تودرتو بهره گرفته شد. هدف از استفاده از این نوع شبکهبندی پردازش با دقت بالاتر جریان عبوری در محل سرریز کلید پیانویی میباشد، مشبلوک اول مش اصلی و مشبلوک دوم مش فرعی (داخلی) است. تعداد ۱۳۹۰۲۰ مش محاسباتی در شبکهبندی متوسط استفاده شد که سایز این مشها در مشبلوک اول ۲۰۱۵ متر و در مشبلوک دوم ۲۰۱۰ متر است. مختصات مشبلوک اصلی به صورت 2015, Xmax بر 20.5, Ymin:0.0 , Ymax:0.4 متر است و Xmin:0.0 , Zmax متر است و مش فرعی نیز در مختصات رفتان رومان رومان که مند که بایز این مشرها در مشبلوک اول ۲۰۱۵ متر و در مشبلوک دوم ۲۰۱۰ می است. می می است و مش فرعی نیز در مختصات می می است (می است (می است) و Xmax این می است. می می است (می است) می م

پروفیل طولی آبشستگی آزمایشگاهی پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای بعد از گذشت ۲۰ دقیقه در شکل (۵) مشاهده میشود که X/L فاصله بیبعد از سرریز (فاصله ۱ متری از دیواره سرریز در پاییندست) و ds/ΔH عمق آبشستگی بیبعد شده با اختلاف ارتفاع سطح آب سرآب و پاییندست میباشد. در آزمایش منتخب از مطالعه آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) سطح آب در پاییندست در رقوم ۰/۵۶ متر و در بالادست سرریز ۱۹۷۲ متر و دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه است. حداکثر عمق آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای در مطالعه آزمایشگاهی ۱۹۳۳ متر برای آزمایش منتخب میباشد.



شکل ۵: پروفیل طولی آبشستگی بستر پایاب سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای[۱۳]. Figure 5. Longitudinal scouring profile of trapezoidal piano key weir bed [13].

شرایط مدلسازی های انجام شده برای کالیبراسون آبشستگی نرمافزار Flow-3D:

- به علت تنظیم جریان پایدار، عدم وجود اغتشاش در سطح آب و همچنین تنظیم ارتفاع سطح سیال در ابتدای کانال در مطالعه ی آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) شرایط ماندگار برای جریان وجود دارد و در شبیه سازی های صورت گرفته برای کالیبراسیون مدل سازی آبشستگی پایین دست سرریز کلید پیانویی از طول کانال بالادست سرریز به میزان ۷/۵ متر کاسته شده و به ۰/۵ متر کاهش یافته است.
- در شبیه سازی عددی از طول ۲ متری پایین دست سرریز به علت اینکه حفره آبشستگی در ۱ متر ابتدایی از طول پایین دست سرریز ایجاد شده، به ۱ متر کاهش پیدا کرده است.
- در شبیه سازی عددی از شرط مرزی Symmetry (مرز تقارن) در مرز Ymin به علت کاهش زمان شبیه سازی استفاده شده است.
- برای اعمال شرایط آزمایشگاهی بر مدل عددی، در پاییندست فلوم یک دیواره به ضخامت ۳ سانتیمتر و ارتفاع ۴۲/۵ سانتیمتر (برابر با ارتفاع رسوبات) در پاییندست سرریز قرار داده شده تا جریان سیال موجب ریزش بسته رسوبی نشود.

پارامتر شیلدز مورد نیاز برای اعمال در بخش Physics > Sediment scour > Critical sheilds number از نمودار شیلدز مورد نیاز برای اعمال در بخش استخراج شده و برای ذرات رسوبی مطالعه آزمایشگاهی مورد نظر، با قطر متوسط ۱۶۴-۰/۰۰ متر برابر با $\Theta_{cr} = 0.034$ بدست آمد. زاویه

اصطکاک داخلی رسوبات ۳۲ درجه در نظر گرفته شد. مدلسازی توسط شبکهبندی با تعداد کل مشرها ۱۰۵۱۲۰ عدد مش و نوع شبکهبندی مورد استفاده در کالیبراسیون مدل عددی Flow-3D از نوع تودرتو میباشد. مش بلوک اصلی (اول) اعمال شده بر مسئله (دارای مختصات -3.2) (C.0. خارای مختصات -3.2) و Flow-3D و Flow-3D به همین ترتیب مش فرعی (دوم) دارای مختصات -3.2) (C.0. دارای مختصات -3.2) به همین ترتیب مش فرعی (دوم) دارای مختصات -3.2) (C.0. دارای مختصات (3.2) (C.0. دارای مختصات -3.2) به همین ترتیب مش فرعی (دوم) دارای مختصات -3.2) (C.0. دارای مختصات (3.2) (C.0. دارای مختصات -3.2) به همین ترتیب مش فرعی (دوم) دارای مختصات -3.2) (C.0. دارای مختصات -3.2) به همین ترتیب مش فرعی (دوم) دارای مختصات -3.2) (C.0. دارای مختصات -3.2) به همین ترتیب مش فرعی (دوم) دارای مختصات -3.2) (C.0. دارای مختصات -3.2) به همین ترتیب مش فرعی (دوم) دارای مختصات -3.2) (C.0. دارای مختصات -3.2) به همین ترتیب مش فرعی (دوم) دارای مختصات -3.2) مربوب (C.0. دوم) دارای مختصات -3.2) در می دارای مختصات دارای مختصات -3.2) در می بلوک اصلی در جهت Z از سه مش پلان استفاده شده در مش بلوک اصلی به علت جدا سازی بخش حاوی رسوب از بخش بدون رسوب و اعمال سایز مش متفاوت برای دو بخش است. که طبق مش بهینه کسب شده در شبیه سازی های صورت گرفته برای کالیبراسیون جریان بدون رسوب در بلوک اصلی از سایز مش مشده می بلون در جهت Z اسای از سایز مش نمانت مدر در به تر در بین مش پلوک اولی در سازی برای مرز ورودی کرمان در استای شناخته (۲۰۱۵ می بهتر لبه تاج سرریز در نرمافزار است. شرایط مرزی به کار برده شده در این مدل سازی برای مرز ورودی کرمافزار است. کرمافزار است. کرمان که مرزی به کار برده شده در این مدل سازی برای مرز ورودی کرمان که حرمان در حیه در این مدل سازی برای مرز ورودی کرمافزار است. کرمان که در مدل که در مرز خروجی در مدل در (۶ شدی در مدل در مرز خروجی در مدل (۶) شبکهبندی بکار رفته در مدل سازی مذکور قابل مشاهده است.



شکل ۶: شبکهبندی بکار رفته در مدل کالیبراسیون آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی با نرمافزار Flow-3D. Figure 6. The grid used in the calibration model of scour downstream of the piano key weir with Flow-3D software.

همان طور که در شکل (۶) مشاهده می شود برای اعمال رسوبات به مدل عددی یک مکعب مستطیل به ترتیب با طول، عرض و ارتفاع ۱۰۰، ۷۵ و ۴۲/۵ با فرمت STL در نرمافزار Flow-3D به عنوان بسته رسوبی اضافه شد.

۳- کالیبراسیون انتقال رسوب و آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی

پس از صحتسنجی نرمافزار Flow-3D از نظر عملکرد صحیح در شبیهسازی هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز کلید پیانویی و دبی عبوری، سپس دریافت و ارائه نتایج قابل قبول از مدلسازیهای صورت گرفته، به کالیبراسیون آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای با بهره گیری از مطالعه آزمایشگاهی قدسیان و همکاران (۲۰۲۱) پرداخته شد. در این بخش ۵ شبیهسازی عددی اجرا شد که از این تعداد ۳ شبیهسازی در جهت رسیدن به مش بهینه برای صحتسنجی انتقال رسوب و آبشستگی با اعمال مدل آشفتگی NMG (علت انتخاب مدل آشفتگی RNG در ابتدا، قابلیتهای این مدل آشفتگی در شبیهسازی بوده است) و با استفاده از مدل انتقال رسوب میر-پیتر و مولر به انجام رسید و با مشخص شدن مش بهینه در محل رسوبات، ۲ شبیهسازی دیگر برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب با مدلهای آشفتگی ع-K و ۵۰-K صورت گرفته و نتایج برای انتخاب مناسب ترین مدل آشفتگی مقایسه شد. ضمناً توجه به این مناسب با مدلهای آشفتگی ع-K و ۵۰-K صورت گرفته و نتایج برای انتخاب مناسب ترین مدل آشفتگی مقایسه شد. نکته ضروری است که در نرمافزار Tlow-3D تنها از مدل انتقال رسوب میر-پیتر و مولر استفاده می شود و امکان کالیبراسون مدل های مختلف انتقال رسوب به وسیله این نرمافزار وجود ندارد. در پژوهش حاضر از شبیهسازی فیزیکی شماره ۱۱ مطالعه قدسیان و همکاران بر ثانیه، عمق پایاب ۱۳/۱۰ متر با ارتفاع آب از لبه سریز به کار برده شده از نوع ذوزنقهای و شرایط دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه، عمق پایاب ۱۳۵/۱۰ متر با ارتفاع آب از لبه سریز در بالادست ۲۰/۱۰ متر می باشد. نتایج حاصل از هر شبیهسازی مشاهده و ثبت گردید، این اطلاعات شامل حداکثر عمق آبشستگی طی زمان و مقادیر آبشستگی به ازای فواصل ۵ سانتیمتر از در قیقه در جدول (۲) است. در جدول (۲)، مقادیر حداکثر عمق آبشستگی طی زمان و مقادیر آبشستگی به ازای فواصل ۵ سانتیمتر از پاییندست سرریز کلید پیانویی برای مدل بهینه عددی (که از میان ۵ شبیهسازی انتخاب شده است) به همراه مقادیر حاصل از مطالعه آزمایشگاهی ارائه شده است.

| | | wei | r. | | |
|------------|----------------|------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| time (min) | dsm in Flow-3D | dsm in | Distance (cm) | Scouring depth in | Scouring depth in |
| | Model (m) | Experimental (m) | | Flow-3D model | Experimental |
| صفر | صفر | صفر | صفر | ۰ /۳۳۸۸ | ۰ /٣ |
| 1 | •/•۵۴ | •/•117 | ۵ | •/۲٩١٢۶ | •/777 |
| ۵ | •/•¥A | •/• ٢٢٣ | ١. | •/۲۶۵۳ | • /۲۵۸۵ |
| ٣ | ۰/۰۹۴ | •/•٣٣۴ | ۱۵ | •/۲۴۶۶٨ | ٠/٢۴ |
| ۴ | •/1•0 | •/•۴۴۲ | ۲. | ۰/۲۴۰ ۷ | • /YYXY |
| ۵ | •/11٣ | •/•۵۵ | ۲۵ | •/۲۴۶۸ | ۰/۲۳ |
| ۶ | •/174 | •/•۶۵۴ | ٣٠ | •/٢۶٢۵۴ | • /۲۴۳۵ |
| ٧ | ·/17V | ۰/۰۷۶ | ۳۵ | ٠/٢٧٩۴ | • /۲۶۵۳ |
| ٨ | •/١٢٨ | •/•184 | ۴. | •/٣•۶١٢ | • /۲۸۴۲ |
| ٩ | •/١٣٣ | • /• 981 | ۴۵ | •/٣۴٧٧٣ | • / ٣ • ٣٢ |
| 1. | ·/14Y | ۰/۱۰۶ | ۵۰ | ۰/۳۸·۴۲ | ·/۳۲۷۵۵ |
| 11 | •/١۴٨ | ·/110Y | ۵۵ | ٠ /٣٨٩ | ۰ /۳۵ · ۲ |
| ١٢ | •/\۵٣ | •/1808 | ۶. | •/٣٩٢٣١ | • /٣٧ |
| ١٣ | •/\۶ | •/١٣۴۴ | ۶۵ | ۰/۳۹۵۳ | •/٣٨٧ |
| ١۴ | •/180 | •/144 | γ. | ۰ /۳۹۸ | • / ۴ • ۳۳ |
| ۱۵ | •/\Y | •/1088 | ۷۵ | • /4 • 1 | •/4147 |
| 18 | •/\Y\ | •/1871 | κ. | •/*•** | •/4198 |
| ١٢ | •/176 | •/١٧١ | ٨۵ | ۰/۴۰۷ | ۰/۴۲۵ |
| ۱۸ | ·/\YA | •/\\% | ۹. | •/۴١٣ | •/۴۲٧ |
| ۱۹ | •/\\\ | ٠/١٨٩۵ | 90 | • /۴۲۲ | •/۴۳۱ |
| ۲۰ | •/\\\\ | •/\٩٣ | 1 | • /۴۲۸ | •/۴۳۲ |

جدول ۲: پروفیل طولی آبشستگی و تغییرات زمانی عمق آبشستگی در پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای. Table 2. Longitudinal scour profile and temporal changes of scour depth in the downstream of trapezoidal piano key

مقادیر مربوط به حداکثر عمق آبشستگی در هر دقیقه تا پایان شبیهسازی و پروفیل طولی آبشستگی برای هر یک از مدلسازیهای انجام شده در نرمافزار Tecplot فراخوانی و در قالب نمودارهایی با نتایج مشابه آزمایشگاهی مقایسه شد. همچنین معیارهای جذر میانگین مربعات خطا RMSE، میانگین قدرمطلق خطا MAE و ضریب تعیین R² برای هر یک از شبیهسازیهای صورت گرفته بدست آمده و برای انتخاب مش بهینه و مدل آشفتگی مناسب مورد مقایسه قرار گرفتهاند. شکلهای (۷) و (۸) نمودار تغییرات زمانی بیشینه عمق آبشستگی رسوبات و پروفیل طولی آبشستگی در انتهای زمان شبیهسازی را در پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای برای هر پنج مدل سازی عددی صورت گرفته نمایش میدهند.



شکل ۷: مقایسه نمودار تغییرات زمانی عمق آبشستگی برای سه نوع شبکهبندی مختلف در شکل سمت چپ، و سه مدل آشفتگی RNG، ε-X و K-& در شکل سمت راست.

Figure 7. Comparison of the graph of time changes of scour depth for three different grid types in the left figure, and three RNG, K-ε and K-ω disturbance models in the right figure.



شکل ۸: مقایسه پروفیل طولی آبشستگی بیبعد، در پایان ۲۰ دقیقه شبیهسازی عددی برای سه نوع شبکهبندی مختلف شکل سمت چپ و سه نوع مدل آشفتگی مورد استفاده در شکل سمت راست

Figure 8. Comparison of the longitudinal scour profile without unit, at the end of 20 minutes of numerical simulation for three different types of grids in the left figure and three types of turbulence models used in the right figure.

به صورت کلی بعد از انجام شبیه سازی ها در جهت انتخاب شبکه بندی مناسب و انتخاب Flow-3d صورت گرفت که مقادیر بدست بهینه، دو شبیه سازی جهت انتخاب مناسب ترین مدل آشفتگی برای کالیبراسون نرم افزار Flow-3d صورت گرفت که مقادیر بدست آمده برای پروفیل طولی آبشستگی و نمودار زمانی بیشینه عمق آبشستگی بدست آمده بعد از استخراج معیارهای جذر میانگین مربعات خطا RMSE، میانگین قدرمطلق خطا MAE و ضریب تعیین ²R برای پنج شبیه سازی عددی صورت گرفته استخراج شد. جدول (۳) معیارهای جذر میانگین مربعات خطا RMSE، میانگین قدرمطلق خطا MAE و ضریب تعیین ²R برای پنج شبیه سازی عددی صورت گرفته استخراج شد. جدول (۳) معیارهای جذر میانگین مربعات خطا MAE، میانگین قدرمطلق خطا MAE و ضریب تعیین ²R را برای مدل بهینه نمایش می دهد، بنابراین در شبیه سازی های مورد نظر در رابطه با آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی از سایز مشی که در نوع شبکه بندی Medium mesh size می هرد نظر در رابطه با آبشستگی عاین دست سرریزهای کلید پیانویی از سایز مشی که در نوع شبکه بندی

| Table 3. The measures of root mean square error RMSE, mean absolute value of error MAE and determination coefficient R ² extracted for the selected numerical model. | | | | |
|---|------|------------------|--|--|
| Parameter | dsm | Profile of Scour | | |
| RMSE | ٣/٧٧ | ۰/۲ · ۵۶ | | |
| MAE | ٣/١٥ | •/\۶٨ | | |

جدول ۳: معيارهای جذر ميانگين مربعات خطا RMSE، ميانگين قدرمطلق خطا MAE و ضريب تعيين R² برای مدل عددی منتخب.

برای بررسی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی با نرمافزار Flow-3D از مشخصات منتخب شامل نوع شبکهبندی، سایز مشها در مدل سازی و مدل آشفتگی میباشد که نزدیک ترین نتایج را به مطالعه آزمایشگاهی مورد نظردر اختیار ما قرار دادهاند. در این پژوهش از دو سرریز کلید پیانویی مثلثی و ذوزنقهای نوع A شامل مشخصاتی که در جدول (۴) آمده استفاده شد. سرریزهای مذکور بهعلاوهی رسوبات پاییندست و حجم آب بالادست هر دو نوع سرریز مثلثی و ذوزنقهای در نرمافزار Auto CAD 2022 ترسیم سپس با فرمت STL که فرمت قابل اجرا برای نرمافزار Flow-3D است ذخیره و در نرمافزار Flow-3D فراخوانی شد.

·/XVW1

·/98%

 \mathbb{R}^2

جدول ۴: مشخصات هندسی سرریز کلید پیانویی مثلثی و ذوزنقهای. Table 4. Geometric characteristics of triangular and trapezoidal piano key overflow.

| Parameter | Values | Weir |
|---|-------------|------------|
| | Trapezoidal | Triangular |
| Number of key of the weir (N) | ٣ | ٣ |
| Total width of the weir (W: m) | • /۶ | • /8 |
| Width of the inlet key (Wi: m) | •/•۵۵ | • /٢ |
| Width of the outlet key (W ₀ : m) | • / ۱۴۵ | - |
| Sidewall thickness (Ts: m) | •/•1٢ | •/17 |
| Lateral length of the weir (B: m) | • /۴ | • /۴ |
| Upstream and Downstream overhang length (B _i and B ₀ : m) | •/\ | • / 1 |
| Height of the PKW crest (P:m) | •/1٨ | •/\X |
| Slope of the inlet and outlet key (S_i and S_o : degree) | ٣٢ | ٣٢ |

سرریزهای کلید پیانویی طراحی شده روی سکویی به ارتفاع Pd =۰/۲۵ m واقع شدهاند و به منظور بررسی آبشستگی پاییندست سرریز سرریزهای کلید پیانویی از ماسه یکنواخت با قطر میانگین d₅₀ = ۰/۰۰۱۶۴ ستفاده شد. طول بستر فرسایش پذیر پاییندست سرریز ۱ متر با عرض ۰/۶ و ارتفاع ۱/۲۵ متر میباشد، همچنین طول کانال و آب بالادست سرریزها به ترتیب ۰/۵ و ۰/۴ متر از پایه و لبه تاج بالادست سرریزهای کلید پیانویی انتخاب شده است. شکل (۹) دو نوع سرریز کلید پیانویی مثلثی و ذوزنقهای به همراه حجم آب بالادست و رسوبات پاییندست را نمایش میدهد.



شکل ۹: شرایط اولیه آب بالادست سرریز و رسوبات در پاییندست سرریزهای کلید پیانویی مدل شده، الف : سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای، ب: سرریز کلید پیانویی مثلثی. Figure 9. Initial water conditions upstream of the weir and sediments downstream of the modeled piano key weir, a: trapezoidal piano key weir, b: triangular piano key weir.

در این پژوهش مدلسازی عددی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی مثلثی و ذوزنقهای به ازای تغییرات دبی و عمق پایاب مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت، برای رسیدن به این هدف تعداد ۱۸ شبیهسازی عددی با استفاده از نرمافزار Flow-3D صورت پذیرفت که مشخصات شبیهسازیهای صورت گرفته در جدول (۵) آمده که شامل:

شماره شبیهسازی، نوع شبیهسازی (TRA: ذوزنقهای، TRI: مثلثی)، دبی عبوری از سرریز (Q)، عمق پایاب (ht)، ارتفاع آب لبه تاج سرریز (H) و اختلاف ارتفاعی سطح آب در پاییندست سرریز و لبه تاج سرریز (AH) است.

شرایط اولیه اعمال شده به مدلها برای سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی شامل ارتفاع آب بالادست و پاییندست سرریزهای کلید پیانویی است. این شرایط برای هر دو نوع سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی در پاییندست شامل هد آب ۰/۳۵ ۰ ۰/۳ متر و در بالادست ارتفاع سطح آب ۰/۴۷ متر میباشد. شرایط اولیه اعمال شده در بالادست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی در نرمافزار اتوکد ترسیم شده و با فرمت STL در بخش مربوط به اعمال شرایط اولیه در مدل عددی Flow-3D فراخوانی شده است.

| Table 5. Hydraulic characteristics of numerical simulations made with Flow-3D software. | | | | | |
|---|------------|-----------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Test No | Test Names | Q (Lit/s) | ht (m) | H (m) | ΔH (m) |
| 1 | TRI 1 | ۰/۲۵ | •/•۵ | ٠/•۴ | •/1Y |
| 2 | TRI 2 | ۰/۲۵ | • / • Y۵ | •/•۴ | ٠/١۴۵ |
| 3 | TRI 3 | ۰/۲۵ | •/\ | •/•۴ | •/1٢ |
| 4 | TRI 4 | ۰/۳۵ | •/•۵ | •/•۴ | •/14 |
| ۵ | TRI 5 | ۰/۳۵ | • / • Y۵ | •/•۴ | ۰/۱۴۵ |
| ۶ | TRI 6 | ۰/۳۵ | •/) | •/•۴ | •/17 |
| ٧ | TRI 7 | •/۴۵ | ۰/۰۵ | •/•۴ | •/14 |
| ٨ | TRI 8 | ۰/۴۵ | • /• Y۵ | •/•۴ | ۰/۱۴۵ |
| ٩ | TRI 9 | ۰/۴۵ | • / \ | •/•۴ | •/17 |
| ۱. | TRA 1 | • / Y ۵ | ۰/۰۵ | •/•۴ | •/14 |
|)) | TRA 2 | • / Y ۵ | • /• Y۵ | •/•۴ | ٠/١۴۵ |
| ١٢ | TRA 3 | • / Y ۵ | •/1 | •/•۴ | •/17 |
| ١٣ | TRA 4 | ۰ /۳۵ | •/•۵ | ۰/۰۴ | •/14 |
| 14 | TRA 5 | ۰ /۳۵ | •/•Y۵ | ۰/۰۴ | ٠/١۴۵ |
| ۱۵ | TRA 6 | ۰ /۳۵ | •/\ | .1.4 | •/17 |
| 18 | TRA 7 | ٠/۴۵ | •/•۵ | •/•* | •/17 |
| ١٧ | TRA 8 | ۰/۴۵ | •/•۵ | •/•۴ | ٠/١۴۵ |
| ۱۸ | TRA 9 | ۰/۴۵ | • / • Y۵ | ٠/٠۴ | •/1٢ |
| | | | | | |

جدول ۵: مشخصات هیدرولیکی شبیه سازی های عددی صورت گرفته با نرمافزار Flow-3D.

۴- انجام تحقيق و ارائه يافتهها

Ymin:0/0m , Xmin:0/0m , Xmax:1/73m شامل Flow-3D شامل Xmin:0/0m , Xmin:0/0m , Xmax:1/73m مختصات شبکه محاسباتی اعمال شده به مدل ها در نرمافزار Flow-3D شامل Zmin:0/0m , Zmax:0/5m و Ymax:0/5m و Xmax:0/5m است. شبکه بندی مورد استفاده در این پژوهش مطابق با مش سایزهای منتخب در صحت- سنجی انتخاب گردید. همچنین شرایط مرزی سانتخاب شده برای شش وجه شبکه محاسباتی اصلی به صورت زیر است:
شرط مرزی بالادست (ورودی)؛ در این قسمت شرط مرزی علیه مرزی Volume flow rate انتخاب شد که در این مرز دبی

عبوری و ارتفاع سطح آب وارد شد.

- شرط مرزی پاییندست (خروجی)؛ در این بخش شرط مرزی Specified pressure انتخاب شد و ارتفاع سطح آب در مرز خروجی نیز وارد گردید.
 - شرط مرزی برای دیوارهها وکف کانال؛ برای این قسمتها (Y_{max} ،Y_{min} و Z_{min}) شرط مرزی Wall انتخاب شد.
 - شرط مرزی سطح آزاد؛ در بخش بالای کانال Z_{max} از این شرط مرزی بهره گرفته شد.

برای هر شش وجه مش بلوک فرعی (تو در تو) شرط مرزی سطح آزاد Symmetry جهت تبادل اطلاعات بین دو مش بلوک مورد استفاده قرار گرفت. بعد از انجام شبیه سازی های نام برده در جدول ۸ پیغام Solution is nearly steady در زمان شبیه سازی کمتر از ۶۰۰ ثانیه توسط نرمافزار Flow-3D نمایش داده شد که حاکی از رسیدن شبیه سازی به پایداری می باشد، بنابراین شبیه سازی ها عددی در زمان ۶۰۰ ثانیه متوقف شدند. نتایج مورد نظر شامل تغییرات زمانی عمق آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه ای و مثلثی، پروفیل طولی آبشستگی در پایان زمان شبیه سازی و پروفیل عرضی آبشستگی استخراج و ارائه شده است. در پژوهش حاضر آبشستگی پایین دست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه ای و مثلثی با تغییر در دبی و عمق پایاب مورد مقایسه قرار گرفته است.

۵- نتایج و بحث

نتایج حاصل از شبیهسازی عددی با استفاده از نرمافزار Flow-3D شامل تغییرات زمانی بیشینه عمق حفره آبشستگی نسبت به زمان در سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی است. شکل (۱۰) این نتایج را برای هر دو سرریز مورد نظر به صورت نمودار نمایش میدهد. طبق نتایج حاصل شده بیشترین کاهش موضعی در تراز بستر در هر سه دبی ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه و عمقهای پایاب ۰/۰۷۵ ۰/۰۷۵ و ۱/۰ متر در پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی رخ داده است.



شکل ۱۰: نمودار توسعه زمانی حفره آبشستگی در ۱۰ دقیقه برای سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی. Figure 10. Time development graph of scour hole in 10 minutes for trapezoidal and triangular piano key weirs.



ادامه شکل ۱۰: نمودار توسعه زمانی حفره آبشستگی در ۱۰ دقیقه برای سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی. Figure 10. Time development graph of scour hole in 10 minutes for trapezoidal and triangular piano key weirs.

با توجه به نتایج حاصل شده از مدلسازی عددی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی، تغییرات موضعی سطح بستر پاییندست در سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای برای تمام شرایط هیدرولیکی مدلسازی شده کمتر از سرریز کلید پیانویی مثلثی بوده و بین ۱۲٪ تا ۲۵٪ متغیر است. اختلاف حداکثر عمق آبشستگی پاییندست بین سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی به همراه درصد اختلاف بیشینه عمق آبشستگی بستر رسوبی بین دو سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی در جدول (۶) مشاهده میشود.

| جدول ۶: مقایسه حداکثر عمق ابشستگی شبیهسازی شده برای دو نوع سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی توسط نرمافزار Flow-3D. |
|---|
| Table 6. Comparison of the maximum scour depth simulated for two types of trapezoidal and triangular piano key weir |
| by Flow-3D software |

| Test No | Maximum flow depth TRI-PKW (m) | Maximum flow depth TRA-PKW (m) | درصد اختلاف بیشینه عمق - |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| | | | أبشستكى |
| Q=25 litr , ht=5cm | •/\\\\ | ۰/۱۳۵ | ۲۱/۹% |
| Q=25 litr , h _t =7.5 cm | •/1 m | -/1۲ | ۱۲/۴٪. |
| Q=25 litr , ht=10 cm | •/\YY | ۰/۰۹۵ | ۲۵/۲% |
| Q=35 litr , ht=5 cm | •/٢•٢ | · 1XQV | 22/27/ |
| Q=35 litr , ht=7.5 cm | •/\\% | •/١٣٩ | ۲۱%. |
| Q=35 litr , ht=10 cm | •/184 | ۰/۱۳۵ | ۱ ۲ /۷′/. |
| Q=45 litr , h _t =5 cm | •/774 | ·/\\\\ | ۲۳٪. |
| Q=45 litr , ht=7.5 cm | •/٢•۶ | •/187 | ۲ ۱/۳٪. |
| Q=45 litr , h _t =10 cm | ۰ /۲ · ۳ | ٠/١۵٩ | ۲۱/۷ ⁻ /. |

با افزایش عمق پایاب، بیشینه عمق آبشستگی در پاییندست هر دو نوع از سرریزهای کلید پیانویی مثلثی و ذوزنقهای به ازای دبی ثابت کاهش یافته است. افزایش عمق پایاب موجب اتلاف انرژی جتهای ریزشی از سرریز شده و با کاهش ظرفیت حمل رسوبات بستر توسط جریان آب، باعث کاهش بیشینه عمق آبشستگی در پاییندست سرریزهای مورد نظر می شود. در صورتی که در عمق پایاب ثابت با افزایش دبی عبوری از سرریز عمق حفره آبشستگی افزایش می یابد. کاهش تراز بستر رسوبی پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای به ترتیب در دبیهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش می یابد. کاهش تراز بستر رسوبی پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقه ای پایاب، ۲۹٪ ۱۱٪ و ۱۰٪ کاهش می باشد، همچنین برای سرریز کلید پیانویی مثلثی با افزایش ۱۱٪، ٪۲۰/۲۱ و ۸٪ و با افزایش ۲ برابری عمق پایاب، ۲۰٪ و با افزایش ۲ برابری عمق پایاب محم حفره آبشستگی در پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی به میزانهای ۲۰٪، ۱۱/۷۴٪ و ۱۱٪ کاهش می باش می باشد، همچنین برای سرریز کلید پیانویی مثلثی با افزایش ۱۵ برابری عمق پایاب، ۲۰٪، ۲۰/۱۲ و ۱۱/۷۴٪ و ۱۱٪ کاهش می باشد، همچنین برای سرریز کلید پیانویی مثلثی با افزایش ۱۵ برابری عمق پایاب، ۲۰٪، ۲۰/۱۴ و ۱۱/۷۴٪ و ۱۱/۷۶٪ و ۱۱٪ کاهش می باشد، همچنین برای سرریز کلید پیانویی مثلثی با افزایش ۲۰ برابری عمق پایاب، ۲۰٪، ۲۰/۱۴ و ۱۱/۷۴٪ و ۱۱/۷۶٪ و ۱۰٪ کاهش می باشد، همچنین برای سرریز کلید پیانویی مثلثی با افزایش ۱۵ برابری عمق پایاب، ۲۰٪، ۲۰/۱۴ و ۱۱/۷۴٪ و ۱۱/۷۴٪ و ۱۰٪ کاهش می باند و موری آر ۱۱/۳۰، ۲۰/۱۰ و ۱۱/۰۰ و ۱۰۰ متر در سرریز کلید پیانویی ذوزنقه ای با کاهش ۲۲ درصدی دبی عبوری از سرریز ۱۱/۳٪، ۲۰/۱۰ و ۱۵٪ کاهش عمق حفره آبشستگی و با کاهش ۴۴ درصدی دبی عبوری از سرریز به میزانهای ۲۰/۳۸، ۲۰/۲۵ و ۴۰٪ کاهش در بیشینه عمق آبشستگی بستر پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقه و می ر مدلسازی عددی آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی با کاهش ۲۲ و ۴۴ درصدی دبی عبوری از سرریز به ترتیب ۱۲/۲ / /۱۹ و ۱۹٪ کاهش و به میزانهای /۲/۸۲، /۲۴/۸۲ و ۳۷/۵۲ کاهش در بیشینه عمق آبشستگی به ترتیب در عمقهای پایاب ۲۰/۵۰ و ۱/۰ متر مشاهده شد. برای درک بهتر تاثیر تغییرات دبی و عمق پایاب بر عمق حفره آبشستگی، شکل (۱۱) به صورت نمودار ارائه گردیده است. در شکل (۱۱) محور عمودی عمق بیعد شده آبشستگی پاییندست سرریز با ارتفاع سرریز و محور افقی مقدار دبی و عمق پایاب بر عمق حفره آبشستگی، شکل (۱۱) به صورت نمودار و معق پایاب را نمایش می دهد. برای درک بهتر تاثیر تغییرات دبی و عمق پایاب بر عمق حفره آبشستگی، شکل (۱۱) به صورت نمودار ارائه گردیده است. در شکل (۱۱) محور عمودی عمق بیعد شده آبشستگی پاییندست سرریز با ارتفاع سرریز و محور افقی مقدار دبی و عمق پایاب را نمایش می دهد. همان طور که از نتایج برداشت می شود افزایش عمق پایاب در مدلسازیها در حالت کمترین میزان دبی جریان عبوری از سرریز بیشترین تاثیر را در کاهش بیشینه عمق آبشستگی پاییندست هر دو نوع سرریز کلید پیانویی ذوزنقه و مثلثی جریان عبوری از سرریز بیشترین تاثیر را در کاهش بیشینه عمق آبشستگی پاییندست هر دو نوع سرریز کلید پیانویی ذوزنقه و مثلثی داشته است. با توجه به نمودارهای شکل (۱۱) با افزایش دبی عبوری از سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقه و مثلثی با هر میزان از عمق پایاب نتایج از فایش بیشینه عمق آبشستگی پاییندست هر دو نوع سرریز کلید پیانویی ذوزنو ای و مثلثی با هر میزان از عمق بایاب نتایج افزایش بیشینه عمق حفره بستر رسوبی به یکدیگر نزدیک می شود و برعکس در مدل سازی های انجام شده برای هر دو نوع سرریز در هر دبی با افزایش عمق رایاب تغییرات بیشنه عمق آبشستگی با یک الگوی ثابت تغییر کرده است.



شکل ۱۱: نمودار تغییرات عمق حفره آبشستگی به ازای افزایش عمق پایاب و افزایش دبی عبوری از سرریز. Figure 11. The graph of changes in the depth of the scour hole due to the increase in the depth of the footing and the increase in the flow through the weir.

در پاییندست سرریز، جریان عبوری از روی بستر رسوبی، باعث آبشستگی بستر میشود. محل آغاز آبشستگی بیدرنگ پس از دیواره سرریز میباشد. با گذشت زمان، ابعاد حفره آبشستگی بزرگتر شده و جریان عبوری درون این حفره به صورت جریان چرخشی در میآید.

۶- پروفیل طولی آبشستگی

پروفیل طولی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای در حالتهای مختلف مدلسازی شده، مورد مقایسه قرار گرفت و تاثیر شرایط هیدرولیکی مختلف بر کیفیت و کمیت حفره آبشستگی در بستر رسوبی بررسی شد. شکل (۱۲) پروفیل طولی آبشستگی بستر فرسایشی پاییندست را برای سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای نمایش میدهد.







ادامه شکل ۱۲: پروفیل طولی آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای. Figure 12. Longitudinal profile of scour downstream of trapezoidal piano key weir.

با بررسی پروفیل طولی آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای مشخص شد که بیشینه عمق آبشستگی به ترتیب در دبیهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۱/۵ برابری عمق پایاب ۱۵٪، ٪/۰ و ٪/۰۰ در فاصله بیشتری از پایه سرریز ایجاد شده سپس با افزایش ۲ برابری عمق پایاب به میزان ۱۵٪، ٪۵ و ٪/۰۰ افزایش فاصله بیشنه عمق آبشستگی از پایه سرریز مشاهده شد. طبق پروفیل طولی آبشستگی موجود در شکل (۱۲) برای دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه افزایش عمق پایاب تغییر محسوسی در فاصله بیشینه عمق حفره آبشستگی از پایه سرریز ایجاد نمی کند و فقط بر ابعاد حفره آبشستگی تاثیر گذار است. این در حالی است که در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۲۰/۰ متر اختلاف بین بیشینه عمق آبشستگی و حداکثر عمق بستر در لبه پایه سرریز کمتر از ۳۰۰۰ متر است و می توان گفت بیشینه عمق آبشستگی در لبه پایه سرریز اتفاق افتاده است.

طول حفره آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی ذورنقدای با ایجاد تغییرات در دبی عبوری از سرریز و عمق پایاب افزایش یا کاهش پیدا می کند به این صورت که در عمق پایاب ثابت با افزایش دبی عبوری از سرریز طول حفره آبشستگی افزایش می ابد در حالی که در دبی ثابت با افزایش عمق پایاب طول حفره آبشستگی کمتر خواهد بود. طول حفره آبشستگی برای دبیهای ثابت ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۱/۵ برابری عمق پایاب ۵٪، ۵٪ و ۱۵٪ کمتر میشود، در حالی که با افزایش ۲ برابری عمق پایاب افزایش محسوسی در تغییرات طول حفره آبشستگی ایجاد نمی شود و کاهش طول حفره آبشستگی ۵٪، ۵٪ و ۱۵٪ است. به همین صورت با افزایش دبی در عمقهای پایاب ثابت، به ترتیب در عمقهای پایاب ۵۰٪، ۵٪ در دبی عبوری از سرریز کلید پیانویی ذوزنقدای ۱۸٪ سریز طول حفره آبشستگی در هر سه عمق پایاب ۵٪ افزایش می باد و با افزایش ۸۰٪ در دبی عبوری از سرریز کلید پیانویی ذوزنقدای ۵۱٪، ۵٪ و ۵٪ است. با توجه به نتایج حاصل شده افزایش عمق پایاب در دبیهای بالاتر و افزایش دبی در عمقهای پایاب کمتر تاثیر بیشتری بر تغییر طول حفره آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقدای داشته است.

یکی از پارامترهای مهم برای تحلیل آبشستگی در پژوهش حاضر عمق آبشستگی در محل لبه پایه سرریز میباشد. تغییرات این پارامتر در پایین دست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای در عمقهای پایاب ۲۰/۵، ۲۰/۵ و ۲/۱ متر با افزایش ۴۰ درصدی دبی به ترتیب ۲۵٫۸، ۲۷ و ۲۲٫۴ افزایش داشته، این افزایش عمق آبشستگی با افزایش ۸۰ درصدی دبی بیشتر شده و برابر با ۲۵٫۸، ۲۰۱ و ۲۹٫۸ ماشد. در حالت دبی ثابت به ترتیب برای دبیهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۲۵ برابری عمق پایاب ۲۰۰۸، ۱۵/۱ کاهش عمق آبشستگی در لبه پایه سرریز رخ داده و با بیشتر شدن عمق پایاب به میزان ۲ برابر مقدار اولیه ۲۰٫۴ و ۲۵٫۸۷ کاهش در عمق آبشستگی در لبه پایه سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای ایجاد شد. در شکل (۱۳) تغییرات آبشستگی لبه پایه سرریز به صورت نمودار در ازای تغییرات دبی و عمق پایاب نمایش داده شده است، که محور افقی تغییرات دبی و عمق پایاب و محور عمودی میزان آبشستگی بستر در لبه پایه سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای را نشان میدهد.



شکل ۱۳: نمودار تغییرات آبشستگی در لبه پایه سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای در ازای تغییرات دبی و عمق پایاب. Figure 13. The diagram of scouring changes at the base edge of the trapezoidal piano key weir in exchange for changes in flow rate and depth of abutment.



شکل ۱۴: پروفیل طولی آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی در ازای تغییرات دبی و عمق پایاب. Figure 14. Longitudinal profile of the scour downstream of the triangular piano key weir in exchange for the changes in flow rate and depth.



ادامه شکل ۱۴: پروفیل طولی آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی در ازای تغییرات دبی و عمق پایاب. Figure 14. Longitudinal profile of the scour downstream of the triangular piano key weir in exchange for the changes in flow rate and depth.

با توجه به پروفیل طولی آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی در دبیهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۱/۵ برابری عمق پایاب، ۵٪ افزایش در فاصله بیشینه عمق آبشستگی از پایه سرریز ایجاد می شود، این در حالی است که با افزایش ۲ برابری عمق پایاب افزایش فاصله بیشینه عمق آبشستگی از پایه سرریز کلید پیانویی مثلثی در دبی ۲۵ و ۳۵ لیتر بر ثانیه نسبت به حالت قبل تغییری نمی کند، اما این تغییرات برای دبیهای ۴۵ لیتر بر ثانیه بیشتر بوده و ۱۰٪ است.

در مقایسه صورت گرفته، با افزایش دبی به ترتیب در عمقهای پایاب ثابت ۰/۰۵، ۰/۰۵ و ۰/۰ متر با افزایش ۴۰٪ دبی عبوری تغییرات فاصله بیشینه عمق حفره آبشستگی تا پایه سرریز در هر سه عمق پایاب ۵٪ است و با افزایش ۸۰٪ دبی عبوری از سرریز به ترتیب ۵٪، ۵٪ و ۱۰٪ می باشد. بنابراین دو پارامتر دبی و عمق پایاب با فاصله بیشینه عمق حفره آبشستگی از پایه سرریز رابطه مستقیم دارند.

روند تغییرات طول حفره آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی به گونهای است که در صورت افزایش ۴۰٪ در دبی عبوری از سرریز برای هر سه عمقهای پایاب ۲۰/۰۵، ۹/۰۰ و ۰/۰۱ متر، افزایش طول حفره آبشستگی به میزان ۱۰٪ بوده و با افزایش ۴۰ دبی عبوری از سرریز نیز میزان افزایش طول حفره آبشستگی ۱۰٪ خواهد بود به طوری که تاثیر افزایش دبی از ۲۵ لیتر بر ثانیه به ۴۵ لیتر بر ثانیه نسبت به افزایش دبی از ۲۵ لیتر بر ثانیه به ۳۵ لیتر بر ثانیه روی افزایش طول حفره رسوبات تفاوتی ندارد و طول حفره تغییری نمی کند. از سوی دیگر برای هر سه دبی ثابت ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه با افزایش ۱/۵ برابری عمق پایاب طول حفره آبشستگی ۵٪ کاهش مییابد و با افزایش ۲ برابری عمق پایاب افزایش عمق پایاب از ۰/۰۵ متر به ۰/۱ متر، این میزان کاهش طول در حفره نسبت به حالت عمق پایاب ۰/۰۷۵ متر تغییری ندارد و نتیجه برابر با ۵٪ کاهش طول حفره، در رسوبات شسته شده بستر پاییندست سرریز میباشد.

میزان آبشستگی در پای سرریز کلید پیانویی مثلثی با افزایش عمق پایاب برای دبیهای ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه کاهش پیدا می کند، با تغییر عمق پایاب از ۲۰/۵ به ۲۰/۷۵ متر به ترتیب./۱۶/۵ ، /۳۲/۳ و /۱۷/۵ سپس با افزایش ۲ برابری عمق پایاب یعنی افزایش عمق پایاب از ۲۰/۵ به ۲۱، متر موجب کاهش /۲۲/۷، /۲۵ و /۱۸/۵ در عمق آبشستگی لبه سرریز کلید پیانویی مثلثی می شود. در عمقهای پایاب ثابت ۲۰/۵، ۲۰/۵ و ۲۱، متر با افزایش ۴۰ درصدی دبی عبوری به ترتیب /۲۶، ۱۶/۱ و ۲۲/۵ و با افزایش ۲۰ درصدی دبی /۳۲۰، /۲۵/۳ و /۲۰ افزایش عمق آبشستگی در لبه سرریز اتفاق افتاده است. برای نمایش و درک بهتر تغییرات آبشستگی لبه پایه سرریز کلید پیانویی مثلثی به صورت نمودار در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. محور افقی تغییرات دبی و عمق پایاب و محور عمودی میزان آبشستگی بستر در لبه پایه سرریز را نشان می دهد.



شکل ۱۵: نمودار تغییرات آبشستگی در لبه پایه سرریز کلید پیانویی مثلثی در ازای تغییرات دبی و عمق پایاب. Figure 15. The diagram of scouring changes at the base edge of the triangular piano key weir in exchange for the changes in flow rate and depth of abutment.

۷- يروفيل عرضي

پروفیل عرضی آبشستگی در کانال به طور کامل متقارن نیست. متقارن نبودن پروفیل عرضی آبشستگی پاییندست سرریزهای کلید پیانویی در تحقیقات آزمایشگاهی پیشین از جمله احمدی دهرشید و گوهری نیز گزارش شده است[۳]، آنها دلیل غیریکنواختی پروفیل آبشستگی در عرض کانال را به آشفته بودن جریان در پایاب و تصادفی بودن بردارهای سرعت در این ناحیه نسبت دادند. شکلهای (۱۶ و ۱۷) پروفیل عرضی آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی را برای تغییرات دبی و عمق پایاب نمایش میده.



همان طور که در شکل (۱۶) دیده میشود میزان آبشستگی در محل پاییندست کلیدهای خروجی سرریز بیشتر از کلیدهای ورودی

است. اختلاف بین کمترین میزان آبشستگی و بیشینه عمق آبشستگی در رخ نماهای عرضی آبشستگی بستر رسوبی در پاییندست سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای برای دبی و عمقهای پایاب مختلف بین ۲۵ ۰/۰ و ۲۰/۶۲۰ متر است و به ترتیب برای دبیهای ثابت ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه در عمقهای پایاب متفاوت بین ۱۸٪–۲۳٪، ۲۰٪–۲۵٪ و ۱۸٪–۲۱٪ ارتفاع بستر رسوبی را تشکیل میدهد. پروفیل عرضی آبستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی در شکل (۱۷) به نمایش گذاشته شده است.







ادامه شکل ۱۷: پروفیل عرضی آبشستگی پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی. Figure 17. Transverse profile of the scour downstream of the triangular piano key weir.

طبق اطلاعات شکل (۱۷) اختلاف بین کمترین میزان آبشستگی و بیشینه عمق آبشستگی در رخ نماهای عرضی آبشستگی بستر رسوبی در پایین دست سرریز کلید پیانویی مثلثی برای دبی و عمقهای پایاب مختلف تقریبا بین ۲۰/۲۲ تا ۲۰/۰۸ متر است و به ترتیب برای دبیهای ثابت ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه در عمقهای پایاب متفاوت بین./۵/۲۲ ۲۲٪، ۱۸٪- ./۷/۷۲ و ۲۹٪ - ./۱۹/۱۶ کل میزان ارتفاع رسوبات آبشستگی را تشکیل می دهد. اختلاف ارتفاع بین بیشینه و کمینه عمق آبشستگی در سرریز کلید پیانویی مثلثی با افزایش در عمقهای پایاب متفاوت بین./۵/۲۲ ۲۲٪، ۱۸٪- ./۷/۷ و ۲۹٪ - ./۱۹/۱۰ کل میزان ارتفاع رسوبات آبشستگی را تشکیل می دهد. اختلاف ارتفاع بین بیشینه و کمینه عمق آبشستگی در سرریز کلید پیانویی مثلثی با افزایش دبی و عمق پایاب کاهش پیدا کرده ولی در سرریز کلید پیانوی ذوزنقهای با افزایش دبی و عمق پایاب این اختلاف عمق در حفره آبشستگی در حالتهای مختلف هیدرولیکی برای سرریز دفزانهای ای افزایش دبی و عمق پایاب کاهش پیدا کرده ولی در سرریز کلید پیانوی می فرینه ی عرضی آبشستگی در حالتهای مختلف هیدرولیکی برای سرریز دفزنقهای کا افزایش دبی و عمق پایاب کاه می پیدا کرده ولی در سرریز کلید پیانوی دوزنقهای با افزایش دبی و عمق پایاب این اختلاف عمق در حفره آبشستگی افزایش می یاد، اما میزان تغییرات بیشینه و کمینه پروفیل عرضی آبشستگی در حالتهای مختلف هیدرولیکی برای سرریز ذوزنقهای ٪۸/۶ و در سریزهای کلید پیانویی نوزنقهای و مثلثی در راستای X و نقطه ۵/۵=۲ متر (دیواره راست کانال) برابر با ٪۴۳/۵ و ۴۴٪ و در نقطه 6/۵=۲ متر (دیواره چپ کانال) ۲۰٪ و ٪۵/۸

۸- ویژگیهای هندسی حفره آبشستگی

در ادامه پارامترهایی از جمله فاصله محل بیشینه عمق حفره آبشستگی تا پای سرریز (L_s)، طول حفره آبشستگی (L₀) و عمق آبشستگی در پای سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی (Z_f) به صورت خلاصه در جدول (Y) ارائه شده است.

| Table 7. Geometrical chai | racteristics of scour hole down | stream of trapezoidal and tria | ngular piano key weir. |
|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--|
| Test No | $L_{s}(cm)$ | L _o (cm) | $\mathbf{Z}_{\mathbf{f}}(\mathbf{cm})$ |
| TRA-1 | صفر | ۴۵ | -11%/4 |
| TRA-2 | ۱۵ | ۴۰ | -1·/VΔ |
| TRA-3 | ۱۵ | ۴. | <i>→\</i> /1 |
| TRA-4 | ۵ | ۵۰ | -14/20 |
| TRA-5 | ۵ | ۴۵ | -11/4 |

جدول ۷: ویژگیهای هندسی حفره آبشستگی در پاییندست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی.

ادامه جدول ۷: ویژگیهای هندسی حفره آبشستگی در پاییندست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی. Table 7. Geometrical characteristics of scour hole downstream of trapezoidal and triangular piano key weir.

| Test No | L _s (cm) | L ₀ (cm) | Z _f (cm) |
|---------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| TRA-6 | ۱. | ۴۵ | -1 • / 1 |
| TRA-7 | ۱۵ | ۶. | -14/20 |
| TRA-8 | ۱۵ | ۴۵ | -17 |
| TRA-9 | ۱۵ | ۴۵ | -17 |
| TRI-10 | ۵ | ۴. | -14/4 |
| TRI-11 | ۵ | ۳۵ | -17 |
| TRI -12 | ۵ | ۳۵ | -11/۲ |
| TRI -13 | ۱. | ۵۰ | $-\lambda \lambda / \lambda$ |
| TRI -14 | ١. | ۴۵ | -17/9 |
| TRI -15 | ۱. | ۴۵ | - <i>\ \</i> /Y |
| TRI -16 | ۱. | ۵۰ | -19/7 |
| TRI -17 | ١٠ | ۴۵ | -10/9 |
| TRI -18 | ۱۵ | ۴۵ | $-1\Delta/V$ |

شکل (۱۸) خطوط جریان را برای جریان عبوری از سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی و کلیدهای ورودی و خروجی در دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۰/۱ متر، همراه با کانتورهای اندازه سرعت نشان می دهد. جریان عبوری از هر دو نوع سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی یکسان است. جریان به دو صورت از سرریز می گذرد، در کلید ورودی با عبور جریان از روی تاج ورودی به صورت ریزشی و در کلید خروجی جریان عبوری از تاج خروجی به صورت یک جت به سمت پایین دست بخش شیب دار تخلیه می شود. جریان خروجی از کلید ورودی به سطح بستر برخورد نموده و باعث ایجاد یک ناحیه چرخشی در زیر کلید ورودی می شود، همچنین الگوی دوم جریان بر روی کلید خروجی شکل می گیرد. جریان ورودی به کلید خروجی با جریانهای ریزشی از تاجهای کناری تلاقی پیدا می کند و هنگامی که جریان از کلید خروجی شکل می گیرد. جریان ورودی به کلید خروجی با جریانهای ریزشی از تاجهای کناری تلاقی پیدا می کند و آبشستگی بیشتر در جلوی کلید خروجی است. همان طور که در شکل سه بعدی خطوط جریان مشخص است جریان بعد از برخورد با آبشستگی بیشتر در جلوی کلید خروجی است. همان طور که در شکل سه بعدی خطوط جریان مشخص است جریان بعد از برخورد با





شکل ۱۸: خطوط جریان برای جریان عبوری از سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی. Figure 18. Flow lines for the flow through trapezoidal and triangular piano key weir.

جهت درک بهتر از محل و چگونگی تأثیرات جریان بر آبشستگی بستر رسوبی مقادیر انرژی آشفتگی به صورت کانتور رنگی دو بعدی در نرمفزار Tecplot ترسیم و به صورت شکل (۱۹) برای هر دو نوع سرریز کلید پیانویی ذوزنقدای و مثلثی ارائه شده است. لازم به ذکر است که انرژی آشفتگی در نرمافزار Tecplot با نماد TKE شناخته میشود. همانطور که در این شکل مشاهده میشود حداکثر مقدار انرژی آشفتگی در پاییندست سرریز کلید پیانویی مثلثی بیشتر از سرریز کلید پیانویی ذوزنقدای است که تا حدودی با مقدار در پاییندست این دو نوع سرریز هم خوانی دارد.



شکل ۱۹: کانتور رنگی برای مقادیر انرژی آشفتگی. Figure 19. Colored contours for perturbation energy values.

۹- نتیجه گیری

به طور کلی می توان گفت در صورت ثابت بودن مشخصات رسوب مانند قطر میانگین ذرات رسوب، انحراف معیار هندسی ذرات و چگالی رسوبات، از عوامل تأثیر گذار بر انتقال رسوبات پاییندست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی طبق نتایج حاصل شده از شبیهسازی عددی، میزان عمق پایاب و دبی عبوری از سرریز است. به این صورت که افزایش عمق پایاب در شرایط دبی عبوری ثابت سبب اتلاف بیشتر انرژی جتهای ریزشی از کلیدهای سرریز کلید پیانویی شده و با کاهش نیروی برخورد کننده به بستر رسوبی ابعاد آبشستگی کاهش پیدا می کند. این کاهش در ابعاد حفره آبشستگی با افزایش عمق پایاب شامل کاهش در طول حفره آبشستگی، کاهش بیشینه عمق حفره آبشستگی، کاهش میزان عمق آبشستگی در پای سرریز و کاهش فاصله بیشینه عمق حفره آبشستگی از پایه سرریز می باشد. با توجه به نمودارهای تغییریذیری مشخصات حفره آبشستگی در ازای تغییرات عمق پایاب ذکر شده می توان نتیجه گرفت که به صورت تقريبي با افزايش عمق پاياب به صورت تصاعد عددي مشخصات حفره آبشستگي با روندي ثابت تغيير مي كند. همچنين تغييرات دبی، ابعاد هندسی حفره آبشستگی را دچار دگرگونی میکند؛ اما برخلاف عمق پایاب، افزایش دبی عبوری از سرریز در هر دو سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای و مثلثی مورد مطالعه موجب افزایش عمق حفره آبشستگی و افزایش در طول حفره آبشستگی، افزایش بیشینه عمق حفره آبشستگی، افزایش میزان عمق آبشستگی در پای سرریز و افزایش فاصله بیشینه عمق حفره آبشستگی از پایه سرریزهای مورد نظر می شود.

در تمام مدلسازیهای صورت گرفته کاهش سطح بستر رسویی در پاییندست سرریزهای کلید پیانویی ذوزنقهای بین ۱۲٪ تا ۲۵٪ کمتر از سرریز کلید پیانویی مثلثی است، به طور کلی همه یابعاد حفره آبشستگی در مشخصات مشابه جریان عبوری از سرریز و عمق یایاب برای سرریز کلید پیانویی مثلثی به غیر از طول حفره آبشستگی و فاصله بیشینه عمق حفره آبشستگی از پایه سرریز از سرریز کلید پیانویی ذوزنقهای بیشتر است.

١٠- فهرست علائم

محل قرار گیری این بخش قبل از مراجع است و باید در ابتدا علائم انگلیسی و سپس علائم یونانی به ترتیب حروف الفبا و مشابه با آنچه که در ادامه خواهد آمد، بیان شوند:

علائم انگلیسی

Α

مدل سرریز دارای پیشانی В طول جانبی سرریز (m) Bi طول بیرونزدگی بالادست سرریز (m) طول بیرون زدگی پاییندست سرریز (m) Bo Cdضریب آبگذری (-) D مدل سرريز بدون پيشاني بیشینه عمق حفره آبشستگی (m) ds,m قطر میانگین مصالح بستر (m) d_{50} شتاب ثقل (ms⁻²) g H ارتفاع آب بر روی تاج سرریز (m) عمق پایاب (m) Ht طول مؤثر سرریز (m) L_e L_o طول حفره آبشستگی (m) فاصله بیشینه عمق آبشستگی تا سرریز (m) Ls Ν تعداد کلیدهای سرریز (m) ارتفاع تاج سرريز (m)

(m³/s) دبی (m³/s)

- شيب کف کليد ورودی (deg)
- So شيب کف کليد خروجي (deg)
 - (m) ضخامت جدار سرریز T_s
 - مدل سرريز ذوزنقهاى T_{ra}
 - Tri مدل سرریز مثلثی
 - W عرض سرریز (m)
 - Wi عرض کلید ورودی (m)
- *Wo* عرض کلید خروجی (m)
- (m) فاصله طولى از ديوار پاييندست سرريز
- (m) فاصله عرضي از ديوار سمت راست كانال (m)
 - (m) عمق آبشستگی در جلوی پایه سرریز (m)

علائم يونانى

- (-) انحراف معيار هندسي ذرات (-) انحراف ا
- (Kg/m³) جرم مخصوص ذرات (ho_s
- ر (Kg/m³) جرم مخصوص آب (β-m-
- (deg) زاویه اصطکاک داخلی رسوب (heta

۱۱- منابع و مراجع

[1] M. Shirian, Numerical Modeling of the Piano Key Weir and Study on geometrical Parameters Function, 2015, (In Persian).

[2] A. Afshar, G. Nik Sefat, Designing hydraulic structures of small dams, University of Science and Iranian industry, (1367) 320, (In Persian).

[3] A. Ahmadi Dehrashid, S. Gohari, Experimental Study of Downstream Scour of Piano Key Weirs, J. Water and Soil Conservation, 26(1) (2019) 91-109, (In Persian).

[4] A. Mehboudi, J. Attari, S.A. Seyed Abbas Hosseini, M.R. Jalili Ghazizadeh, Experimental study comparing Piano Key weir with artillery and linear Weirs, , in: 13th Iranian Hydraulic Conference, University of Tabriz, Iran, 2014, (In Persian).

[5] O. Machiels, Experimental study of the hydraulic behavior of Piano Key Weirs, University of Liège, 2012.

[6] A. Ghafouri, M. Ghodsian, C. Abdi Chooplou, Experimental Study on the Effects of Discharge and Tailwater Depth on Bed Topography Downstream of a Trapezoidal Piano Key Weir, Journal of Hydraulics, 15(3) (2020) 107-122, (In Persian).

[7] A. Bey, M. Faruque, R. Balachandar, Two-dimensional scour hole problem: Role of fluid structures, Journal of Hydraulic Engineering, 133(4) (2007) 414-430.

[8] O. Machiels, S. Erpicum, P. Archambeau, B. Dewals, M. Pirotton, Parapet wall effect on piano key weir efficiency, Journal of irrigation and drainage engineering, 139(6) (2013) 506-511.

[9] S. Abbasi, M. Eskandari, Hydraulic behavior of piano key Weir, in: 13th Iranian Hydraulic Conference, Department of Water Engineering, University of Tabriz, 2014, (In Persian).

[10] S. Moradi, H. Shahsavari, A. Arfa, K. Esmaili, Hydraulic Type-A Piano Key weirs Zigzag Lateral Crest, Journal of Ferdowsi Civil Engineering, 33(1) (2020) 1-16, (In Persian).

[11] F. Ahmadi Dehrashid, S. Gohari, Investigating the effect of discharge and tailwater depth on the dimensions of score hole downstream of a Piano Key Weir, in: International Conference on Civil Engineering, Tehran, 2016, (In Persian).

[12] S. Jüstrich, M. Pfister, A.J. Schleiss, Mobile riverbed scour downstream of a piano key weir, Journal of Hydraulic Engineering, 142(11) (2016) 04016043.

[13] M. Ghodsian, C. Abdi Choploo, A. Ghafouri, Scouring Downstream of Triangular and Trapezoidal Pianos Key Weirs. Journal of Hydraulics, Civil Engineering Journal, 16(2) (2021) 43-58, (In Persian).

[14] K. Morovati, A. Eghbalzadeh, S. Soori, Numerical Study of Energy Dissipation of Pooled Stepped Spillways, Civil Engineering Journal, 2(5) (2016) 208-220.

[15] F. Ahmadi Dehrashid, S. Gohari, Numerical simulation of local scour downstream of Piano Key Weir, Journal of water and soil protection research, 26(1) (2019) 91-109, (In Persian).

[16] C.A. Chooplou, M. Ghodsian, D. Abediakbar, A. Ghafouri, Experimental and Numerical Studies of the Influence of Zigzag Crests with Various Geometries on the Flow Field and Scour Downstream of Rectangular Piano Key Weirs, (2022).

[17] A.M. Yazdi, S. Hoseini, S. Nazari, M. Fazeli, Numerical and experimental analysis of scour downstream of piano key weirs, Sādhanā, 47(4) (2022) 189.

۲٨

Numerical investigation of scour downstream of piano key Weirs using Flow-3D software

Mohammad Dehghan¹, Hojat Karami²¹

¹ M.Sc., Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
² Associate Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

In this research, the numerical simulation of the scouring of the downstream bed of two types of trapezoidal and triangular piano key series in the same geometric and hydraulic conditions has been done using the Flow-3D numerical model. To carry out the calibration process of the desired numerical model, the laboratory study of Ghodsian et al. (2021) was used in the conditions of sediment transfer. After the software calibration, the accuracy of the R² criterion for the longitudinal profile of scour and the maximum depth of scour downstream of the weir was equal to 0/9338 and 0/873, respectively. Eighteen numerical simulations for scour downstream of two types of trapezoidal and triangular piano key weirs were carried out under the conditions of changes in discharge and depth of abutment, and the local changes of scour in a trapezoidal piano key weir at a depth of 0/05, 0/075 and 0/1 meters and all three The flow rate of 25, 35 and 45 liters/second was observed less than the weir of the triangular piano key. By doubling the depth of the weir in the trapezoidal weir up to 29% and in the triangular weir up to 26/6%, the scour depth decreases. Also, with a 44% decrease in discharge at a constant depth of aquifer, a 40% and 37/4% decrease in the maximum scour hole depth was observed in the trapezoidal and triangular weir, respectively. The increase in the depth of the floodplain causes the loss of energy of the falling jets from the weir, and by reducing the capacity of the bed sediments carried by the water flow, it causes a decrease in the maximum scour depth downstream of the desired weirs. It was observed that with the increase of the flow through both types of trapezoidal and triangular piano key weirs in the condition of constant depth of the abutment, the scour rate in the sedimentary bed for both types of weirs approaches.

KEYWORDS

Triangular piano key weir, Trapezoidal piano key weir, scour hole, Numerical simulation, Validation of Flow-3D software.

¹ Corresponding Author: Email: hkarami@semnan.ac.ir