

## مقایسه رفتار سرریزهای اوجی و کلیدپیانویی تحت جریانهای غیرماندگار

بهزاد نوروزی<sup>۱</sup>، جلال بازرگان<sup>۲</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱

مقاله پژوهشی

### چکیده

تحلیل جریان غیرماندگار در آستانه سرریزها، به جهت لزوم تعیین دقیق میزان دبی عبوری و ارتفاع تیغه آب بر روی آنها، بسیار حائز اهمیت است. به دلیل تفاوت در ماهیت جریانهای ماندگار و غیرماندگار و به علت تأثیر ترمهای مختلف معادله سنت و نانت، منحنی اشل-دبی سرریزها تحت این نوع جریانها با یکدیگر متفاوت می‌باشد. در این تحقیق جریان سه‌بعدی سطح آزاد بر روی سرریزهای اوجی و کلید پیانویی تحت جریانهای ماندگار و غیرماندگار با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D مدل‌سازی عددی شده و تأثیر انواع هیدروگرافهای ورودی به ازای پایه‌های زمانی متعدد بررسی شد. بر اساس نتایج حاصله، منحنی واحد اشل-دبی در جریان ماندگار در شرایط غیرماندگار به صورت منحنی حلقوی تبدیل می‌شود. در هر دو نوع سرریز هر چه پایه زمانی هیدروگراف بیشتر می‌شود، منحنی اشل-دبی از حالت حلقوی خارج شده و به یک منحنی واحد سوق پیدا کرده و با افزایش زمان پایه هیدروگراف در نهایت بر منحنی اشل-دبی در حالت ماندگار منطبق می‌گردد. در هر دو نوع سرریز مورد مطالعه اختلاف ارتفاع هد آب، به ازای دبی ثابت در هیدروگراف با زمان پایه کمتر یعنی هیدروگراف با شیب شاخه‌های صعودی و نزولی بیشتر، بزرگتر است. مقادیر میانگین اختلاف ارتفاع تیغه آب به ازای دبی یکسان در منحنی حلقوی شکل دبی-اشل در سرریز اوجی به ازای هیدروگراف‌های با گام زمانی ۴ و ۱۰ و ۴۰ ثانیه به ترتیب ۰/۰۲۳ و ۰/۰۱۳ و ۰/۰۰۸ متر و برای سرریز کلید پیانویی به ترتیب ۰/۰۲۴ و ۰/۰۱۹ و ۰/۰۰۹ متر برآورد شده است. به عبارتی در هیدروگرافهای ورودی با شیب‌های تندتر در آستانه سرریزهای واقع در کانالها و یا سرریزهای استفاده شده بصورت بند انحرافی، حتماً جریان بایستی به صورت غیرماندگار تحلیل گردد. به ازای ارتفاع سرریز یکسان و هیدروگراف ورودی ثابت، تغییرات هد آب در سرریز کلید پیانویی نسبت به سرریز اوجی بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: جریان غیرماندگار، معادلات سنت و نانت، سرریز اوجی، سرریز کلید پیانویی، منحنی اشل-دبی

<sup>۱</sup> دانشجو دکتری، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، ۰۹۱۰۴۰۷۳۸۱۴  
noroozi@znu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، ۰۹۱۲۱۴۱۲۴۸۸  
jbazargan@znu.ac.ir

## مقدمه

برای تعیین دبی عبوری از روی سرریز لازم است که ضرایب تخلیه هر سرریز معلوم باشد. ضرایب تخلیه سرریزها با برقراری جریان ماندگار بر روی آنها تعیین می‌شود. از آنجا که در طبیعت عملاً جریانهای ماندگار و غیرماندگار در کانالها اتفاق می‌افتد، بایستی صحت کاربرد ضرایب تخلیه به دست آمده از جریانهای ماندگار برای جریانهای غیر ماندگار بررسی شود (Aricò, 2009). جریان غیردائمی عبارت است از جریانی که در یک مقطع، دبی یا عمق یا هر دو در اثر تغییرات زمانی تغییر می‌کنند. جریانهای غیردائمی بر پایه معادلات سنت-ونانت قرار دارند. با توجه به اینکه حل این معادلات مشکل می‌باشد بنابراین جهت حل آن، با توجه به شرایط مسئله ساده سازی‌هایی صورت می‌گیرد و بعضی ترم‌های آن حذف می‌گردد. جریانهای غیردائمی ممکن است در اثر وقوع سیلابهای حاصل از بارندگی های شدید و یا ذوب برف‌ها، شکست سدها، امواج ناشی از جزر و مد دریاها و یا باز و بسته شدن سریع دریچه‌ها ایجاد شود که در نتیجه آن کمیت‌های هیدرولیکی نظیر عمق، سرعت و دبی جریان بصورت تابعی از زمان و مکان بیان می‌گردد (Chow, 1959). جریانهای غیردائمی بر اساس چگونگی تغییرات کمیت‌های هیدرولیکی در مسیر جریان بصورت جریانهای غیر دائمی متغییر تدریجی و جریانهای غیردائمی متغییر سریع دسته‌بندی می‌شوند. معادلات حاکم بر جریانهای غیردائمی متغییر تدریجی، معادلات پیوستگی جریان و دینامیکی در جریانهای متغییر دائمی می‌باشد که تحت عنوان معادلات سنت وونانت مشهور می‌باشند (Chow, 1959). معادلات سنت - وونانت در حالت کلی با صرف نظر کردن از جریان جانبی به صورت روابط (Chow, 1959) و (Clemmens et al. 2001) می‌باشند که دستگاهی با مشتقات جزئی و از نوع هیپربولیک هستند (Chow, 1959).

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

معادله اندازه حرکت:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{l}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2)$$

جهت تحلیل جریان غیر ماندگار با استفاده از روش‌های روندیابی هیدرولیکی، از معادله پیوستگی جریان و معادله اندازه حرکت استفاده شده و اساس آن بر تئوری جریانهای غیردائمی (معادلات سنت - وونانت)، استوار است (Shaw, 1994). روش‌های روندیابی هیدرولیکی با توجه به عبارتهای درگیر از معادله اندازه حرکت به سه دسته روندیابی موج سینماتیک، موج دیفیوژن و موج دینامیک تقسیم می‌شوند. ساده‌ترین فرم مدل روندیابی هیدرولیکی، مدل موج سینماتیک است که در آن از عبارتهای فشار، شتاب انتقالی و شتاب محلی در معادله اندازه حرکت صرف نظر شده است (Chow et al. 1988). اولین مطالعات در زمینه موج سینماتیک توسط Lighthill and Whitham (1955) انجام شد. آنها برای مدلسازی حرکت موج سیل در رودخانه‌های طویل از موج سینماتیک استفاده کردند (Lighthill and Whitham 1995). امروزه تئوری موج سینماتیک در فرآیندهای مختلف هیدرولوژیکی از جمله جریانهای سطحی، جریان در کانالها، جریانهای غیر اشباع، جریان در شیارها و کناره‌ها و هیدرولیک رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Singh et al. 1996). محققین بسیاری از جمله کاتاپودس سال ۱۹۸۲، دالوز ویرا سال ۱۹۸۳، فریک سال ۱۹۸۵ و پونس سال ۱۹۹۰ در زمینه حذف ترم‌های شتاب و فشار و ساده‌سازی معادلات سنت - وونانت تحقیق کرده‌اند (Ponce, 1990). Hormodka and Guymo (1983) نشان دادند که در موج دیفیوژن ترمهای اینرسی آنقدر کوچک هستند که قابل صرف نظر کردن می‌باشند. اگر ترم‌های اینرسی از معادله مومنوم حذف شوند معادله موج دیفیوژن بدست می‌آید (Hormodka and Guymon, 1983). (Jolliffe 1989) با تحقیق در مورد موج دیفیوژن نشان داد که در موج دیفیوژن بر خلاف موج دینامیک اینرسی مقادیری جزئی هستند (Jolliffe, 1989). مطالعات انجام شده توسط Lighthill and Woolhiser and Liggett، Whitham (1955) و (1967) و Ponce (1990) بیان می‌کند که موج

استفاده از تئوری جریان غیرماندگار متغیر سریع، اثر موج را نیز در محاسبات وارد نمود. Johnson and Green (1977) در برخی از سناریوهای تحقیق خود، دبی ورودی به سامانه را نیز برقرار نمود. نتایج نشانگر خطای حداکثر ۳ درصد در صورت وجود دبی ورودی و حداکثر ۱/۵ درصد در صورت عدم وجود دبی ورودی بود. خطاهای بالای موجود در تحقیقات پیشین توسط Johnson and Green (1977) به حدود ۱/۵ درصد کاهش یافت. به طور عمومی نتایج حل معادله مخزن و فرآیند روندیابی نشانگر وقوع دبی بیشتر از دبی ماندگار در شاخه صعودی و کمتر از دبی ماندگار در شاخه نزولی است. دلیل این امر به شتابهای مثبت در شاخه صعودی و شتابهای منفی در شاخه نزولی بر میگردد. اما مطابق شکل ۱ نتیجه تحقیق Kuhnle and Bowie (1992) نشانگر وقوع دو نوع مختلف حلقوی در رودخانه Goodwin Creek است بطوریکه در شکل ۱-الف مقدار دبی در شاخه صعودی بیشتر از شاخه نزولی است و این روند با تئوری جریان غیرماندگار همخوانی دارد اما شکل ۱-ب عکس تئوری بوده و با هیدرودینامیک جریان قابل توصیف، Kuhnle and Bowie (1992) نیست. بر اساس استنباط تغییرات زبری بستر آبراهه و تولید و زوال شکنجها در طول عبور هیدروگراف سیل باعث وقوع رفتار مشابه شکل ۱-ب شده است.

سینماتیک در بسیاری از جریانهای سطحی تخمین مناسبی است و بسیاری از جریانهای در کانالها را می‌توان توسط موج دیفیوژن مدل کرد. بررسی مطالعات پیشین بیانگر این است که جریان غیرماندگار در مخازن و پشت سرریزها با دو رویکرد مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است: (الف) روندیابی مخزن که در آن تغییرات شکل هیدروگراف ورودی به یک مخزن و شکل هیدروگراف خروجی از آن مورد بررسی قرار گرفته است، (ب) استفاده از روش فروکش مخزن که هدف اصلی در آن، کاربرد تغییرات حجم مخزن در واسنجی سرریز انتهای مخزن بوده است. در هر دو دسته تحقیقات بالا، معادله مخزن (رابطه ۳) اساس تعیین دبی غیرماندگار عبوری از سازه انتهایی مخزن بوده است (Fread, 1985, Carter and Godfrey, 1960, De Laine, 1964 and Johnson, F. A. and Green, 1977).

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (3)$$

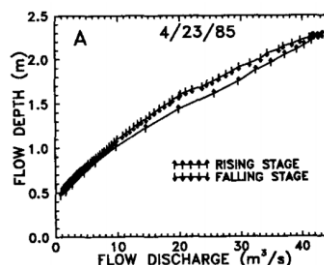
که در آن  $I$ ،  $O$  و  $S$  به ترتیب عبارتند از دبی ورودی به مخزن، دبی خروجی از آن و حجم ذخیره در مخزن.  $DS/dt$  نیز عبارت است از نرخ تغییرات زمانی حجم آب در مخزن پشت سرریز. در خصوص استفاده از روش فروکش مخزن در واسنجی سرریزها، این روش برای اولین بار توسط De Laine (1964) پیشنهاد شد. Rowe (1969) از روش فروکش مخزن برای واسنجی فلوام نوع H استفاده نمود (Johnson and Green, 1977). برای کاهش اثر امواج ناشی از برداشت مانع، رفع انسداد در آزمایشهای تحقیق Rowe (1969) به صورت تدریجی انجام شد. Johnson and Green (1977) سعی در شناسایی و معرفی فاکتورهای مؤثر در صحت نتایج حاصل از روش فروکش مخزن و دخالت دادن آنها در محاسبات قبلی نمودند. فاکتورهای مؤثر معرفی شده توسط Johnson and Green (1977) عبارتند از: تحلیل منحنی فروکش، اندازه مخزن، زمان برداشت مانع از روی تاج سرریز، حرکت موج تولید شده در اثر برداشت مانع و برقرار بودن دبی ورودی در طول فروکش. Johnson and Green (1977) برای بررسی اثر این فاکتورها، آزمایش‌هایی بر روی سرریز مثلثی ۹۰ درجه انجام داد و با

$$Q = C_d \times \frac{8}{15} \times \tan \frac{\alpha}{2} \times \sqrt{2gh^5} \quad (۴)$$

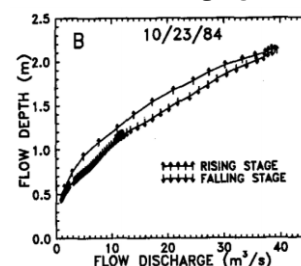
امینی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از روش عددی به بررسی جریان غیرماندگار ناگهانی در کانالهای آبیاری پرداختند و نشان دادند هر چه دبی عبوری در لحظه بسته شدن دریاچه بیشتر باشد، خطاهای حل عددی نیز افزایش یافته و کاربرد همزمان روش MacCormack و TVD می‌تواند خطای حل عددی را کاهش دهد و نوسانات سطح آب را مطابق با واقعیت شبیه‌سازی نماید.

Dabbling et al (2017) به مقایسه تأثیر سرریزهای اوجی، کنگره‌ای و کنگره‌ای دندانه‌ای بر روی هیدروگراف پایین‌دست پرداختند. در این تحقیق سرریزهای مورد مطالعه با عرض کانال و ارتفاع یکسان را تحت ۴ نوع هیدروگراف مختلف قرار داده و اثرات آنها بر روی هیدروگراف خروجی در پایین دست سرریز بررسی نمودند. آنها نشان دادند با وجود اینکه سرریزهای کنگره‌ای به دلیل عبور بیشتر جریان از روی خود ایمنی سدها در مقابل سیلابهای بزرگ را بالا می‌برند با این وجود به دلیل افزایش دبی عبوری از روی سرریز پتانسیل سیل‌های پایین دست افزایش می‌یابد. سرریزهای کنگره‌ای دندانه‌ای ضمن بهبود عملکرد هیدرولیکی در مقابل سیلابهای بزرگتر، پتانسیل وقوع سیلابهای پایین دست را کاهش می‌دهد.

برآورد نادرست دبی‌های عبوری از سرریز سدها در شرایط سیلابی می‌تواند آثار بسیار مخربی داشته و ساکنین پایین‌دست را دچار خسارت نماید و همچنین تعیین نادرست دبی عبوری از سازه‌های موجود در کانالها در طول بهره‌برداری می‌تواند علاوه بر تحویل حجمی نادرست آب، در بهره‌برداری نیز اختلالاتی بوجود آورد لذا تعیین مقادیر دبی جریان غیرماندگار برای شرایط حاکم بر این دو ضرورت دارد (قاسم زاده و کوچک زاده، ۱۳۹۶). مروری بر تحقیقات پیشین که در بالا ارائه شد، حاکی از این است که در خصوص اختلاف بین دبی عبوری از سرریزها در شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار اتفاق نظر وجود ندارد.



الف: وقوع دبی بالاتر در شاخه صعودی



ب: وقوع دبی بالاتر در شاخه نزولی

شکل (۱): مثالهایی از دو نوع مختلف حلقوی (Kuhnle and Bowie, 1992)

Bazaz (2008) تحقیقی را در آزمایشگاه تحقیقات آب دانشگاه تهران به منظور تعیین ضرایب تخلیه سرریزهای لبه تیز در جریان غیرماندگار انجام داد. در تحقیق وی، مقایسه حجم زیر هیدروگراف دبی خروجی و تغییرات حجم مخزن برای تعیین تأثیر غیرماندگاری جریان بر دبی عبوری از سرریزها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشانگر وجود اختلاف بین دبی ماندگار و غیرماندگار بوده و بنابراین استفاده از روابط ماندگار باعث وقوع خطا در برآورد دبی در شرایط غیرماندگار می‌گردد. بر اساس نتایج تحقیق، میزان خطا در سرریزهای مثلثی نسبت به سایر شکلهای سرریز نسبتاً کمتر بود. Bazaz (2008) ضرایب اصلاحی برای معادلات دبی-اشل سرریزها ارائه نمود تا برآورد درستی در جریان غیرماندگار ارائه نمایند. Chanson and Wang (2013) تعیین ضریب دبی در جریان غیرماندگار عبوری از سرریز لبه تیز مثلثی انجام دادند. روش آزمایش‌های تحقیق آنها نیز مشابه روش فروکش مخزن بود. نتایج تحقیق Chanson and Wang (2013) بیانگر این بود که رابطه متداول دبی-اشل سرریز مثلثی با ضریب دبی  $C_d$  برابر  $0.58$  (رابطه ۴) در شرایط مورد بررسی تحقیق، نتایج درستی را ارائه می‌کند.

Flow-3D از روش جزء حجمی (Volume-Fraction Method) برای مشخص کردن هندسه سرریز و سطح آزاد سیال در میدان حل استفاده می‌کند. روش‌های VOF و FAVOR مثال‌هایی از این روشها هستند. الگوریتم جزء سطح/حجم بیانگر مانع (FAVOR) برای تعریف هندسه در روش حجم محدود بکار رفته است. این الگوریتم موانع داخل میدان را در سلول‌های محاسباتی به صورت مقدار جزئی بین ۰ و ۱ در نظر می‌گیرد به نحوی که اگر کل سلول توسط مانع پر شده باشد، مقدار جزء حجم یا سطح برابر ۱ خواهد بود. سطح آزاد جریان با استفاده از الگوریتم جزء حجم سیال (VOF) تعیین می‌شود. در این روش، زمانی که جریان دارای سطح آزاد است، تمام سلول‌های محاسباتی پر از سیال نیستند و تعدادی از سلول‌ها که در سطح جریان قرار دارند، نیمه پر هستند. روش مناسب برای نشان دادن وضعیت سلول‌ها این است که کمیتی به نام  $F$ ، که بیانگر جزئی از سلول است که توسط سیال پر شده است، تعریف شود. این کمیت تابع جزء حجم سیال نامیده می‌شود. با دانستن مقدار  $F$  می‌توان محل سطح آزاد و زاویه آن را در میان سلول‌های میدان حل مشخص کرد. این عمل با کنترل کردن مقدار سیال در سلول‌های مجاور امکان پذیر است. در این نرم‌افزار، معادلات غیردائم حاکم با روش حجم محدود، حل عددی می‌شوند. معادلات شبه ضمنی حاصله به صورت تکراری و با استفاده از تکنیک‌های تخفیف حل می‌شوند که در این مقاله از تکنیک GMRES به‌عنوان حل‌گر ضمنی فشار استفاده شده است. الگوی حل و انفصال معادله مومنتوم از نوع صریح درجه ۱ می‌باشد که بر سرعت حل میدان می‌افزاید. برای انفصال میدان از شبکه بندی کارترین استفاده شده است. در این نرم افزار دو شرط زیر برای ایجاد شبکه بندی مناسب برای میدان حل ارایه توصیه شده است: الف) نسبت اندازه سلولهای مجاور به ۱ نزدیک بوده و از ۱/۲۵ تجاوز نکند. ب) نسبت ابعادی سلولها به ۱ نزدیک بوده و از ۳ تجاوز نکند. در خصوص پارامترهای جریان متلاطم، آشفتگی اصلی در این مساله بر روی سرریز رخ داده و پارامترهای مربوطه که به صورت انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ استهلاک آن می

سرریزهای کلیدپیانویی (Piano Key Weir) شکل اصلاح شده سرریزهای کنگره‌ای می‌باشند و جزو سازه‌هایی هستند که عملکرد آنها بصورت ضریب تخلیه مناسب در تحقیقات قبلی تحت جریان ماندگار به اثبات رسیده است. در عمده تحقیقات صورت گرفته گذشته به بررسی عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کلیدپیانویی تحت جریان ماندگار پرداخته شده و تا کنون تأثیر جریان غیرماندگار بر عملکرد هیدرولیکی و ضریب آبگذری این نوع سرریزها انجام نشده است. پژوهش حاضر با درک این ضرورت، تأثیر غیرماندگاری جریان را بر میزان دبی عبوری از سرریزهای اوجی و کلیدپیانویی را مورد بررسی قرار داد. فرض اولیه تحقیق این بود که دبی عبوری از تاج سرریزها در حالت عبور جریان غیرماندگار از دبی-اشل ماندگار پیروی نمی‌کند.

#### مواد و روش‌ها

در این مقاله از نرم افزار FLOW-3D برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده‌است. معادلات حاکم بر مساله مورد نظر، معادلات بقای جرم و اندازه حرکت می‌باشند. این معادلات در جریان‌های دوفازی در سیستم مختصات کارترین  $(x_i)$  با مؤلفه‌های سرعت  $(u_i)$  و  $i=1,2,3$  به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$V_F \frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} (\rho u_i A_i) = 0 \quad (\delta)$$

$$\frac{\delta u_i}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u_j A_i \frac{\delta u_i}{\delta x_j} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x_i} + G_i + f_i \quad (\epsilon)$$

در این معادلات،  $\rho$  چگالی آب،  $V_F$  جزء حجم باز برای برقراری جریان در الگوریتم FAVOR و  $A_i$  جزء سطح باز برای برقراری جریان در جهت  $i$  ام می‌باشد. در معادلات بقای اندازه حرکت،  $P$  بیان‌گر فشار بوده و  $(G_i)$  و  $(f_i)$  به ترتیب بیان‌گر مؤلفه‌های شتاب کالبدی و شتاب ناشی از لزجت برای راستای  $i$  ام می‌باشند. شتاب لزجت شامل اثر لزجت دینامیکی سیال  $(\mu_i)$  و نیز آشفتگی جریان  $(\mu_t)$  می‌باشد. برای مدل‌سازی آشفتگی در مسائل هیدرولیک، عمدتاً از مدل‌های دو معادله‌ای استفاده می‌شود. نرم افزار

توسط Anderson (2011) مدلسازی شده است. برای صحت‌سنجی روش عددی در مدل سرریز لبه‌تیز، نمودار ضریب دبی سرریز لبه تیز به ازای نسبت‌های مختلف هد آب روی تراز تاج سرریز ترسیم و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده که نتایج به صورت نمودار شکل ۲ ارائه شده است. مطابق شکل نتایج روش عددی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. با توجه به شکل مزبور برای محدوده وسیعی از هد روی سرریز رابطه بین هد و ضریب دبی خطی بوده و برای نسبت‌های  $H/W$  بزرگ ارتباط بین ضریب دبی و این پارامتر غیرخطی شده و در نهایت به یک مقدار ثابت میل می‌کند.

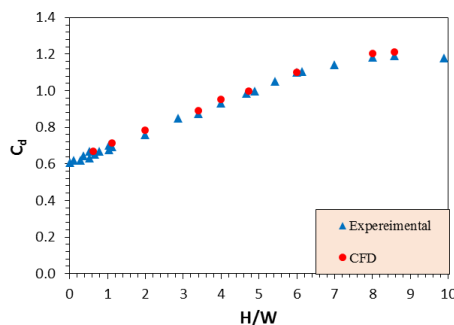
در شکل ۳ پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی نشان داده شده است. هندسه سه‌بعدی مدل عددی سرریز کلید پیانویی به همراه شرایط مرزی مورد استفاده در شکل ۴ نشان داده شده است. از یک بلوک محاسباتی با شبکه بندی کارتیزین برای انفصال میدان حل استفاده شده است. به منظور شبکه بندی میدان از مش یکنواخت شامل ۲ میلیون مش استفاده شده است. نسبت ابعاد در هر جهت برابر یک بوده و شبکه بندی به حدی ریز می‌باشد که ضمن شناخت کامل هندسه سرریز، سکو و رمپ با استفاده از الگوریتم FAVOR، جزئیات ریز میدان در نواحی اطراف سرریز نظیر نواحی جدایی جریان با دقت بالا توسط مدل عددی قابل شبیه سازی می‌باشد. شرایط مرزی مورد استفاده در شکل بر روی وجوه مختلف بلوک محاسباتی نمایش داده شده است.

باشند (که در محاسبه تنش های رینولدز و بستن معادلات حاکم مورد استفاده قرار می‌گیرند) حین حل و بر اساس میدان جریان بر روی سرریز تعیین می‌شوند. مدل آشفتگی مورد استفاده در این مقاله (RNG k-ε) است که بنا بر توصیه شرکت Flowscience و تجربیات قبلی محققین مختلف، با توجه به اعمال اثرات انحنای خطوط جریان در معادلات حرکت، مناسب ترین مدل برای شبیه سازی جریان بر روی سازه های هیدرولیکی می‌باشد. شایان ذکر است با توجه به اینکه مدل آزمایشگاهی سرریزها از پلکسی گلاس ساخته شده و کف و جداره های کانال نیز کاملاً صاف بوده است. به همین علت، در مدل عددی نیز بدنه سرریز و جداره های کانال کاملاً صاف در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن با توجه به اینکه طول کانال بالادست تا محل سرریز کوتاه می‌باشد، افت اصطکاکی بسیار ناچیز خواهد بود.

در بخش های آتی جزئیات ساخت مدل‌های عددی، همگرایی و صحت سنجی ارائه شده و نتایج حاصل از شبیه سازی‌ها برای تحلیل هیدرودینامیکی استفاده شده است.

### صحت‌سنجی مدل عددی

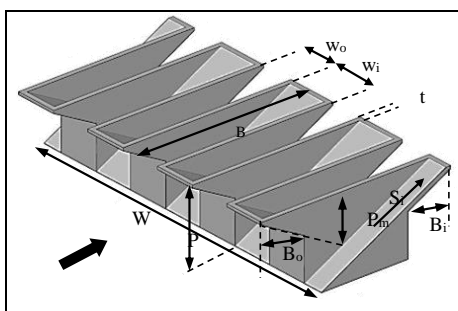
به منظور صحت‌سنجی روند مدل‌سازی و نیز حصول اطمینان از شرایط مرزی مورد استفاده در جریان ماندگار، مدل عددی سه‌بعدی متناظر با سرریز اوجی مدل آزمایشگاهی (Ramamurthy et al (1987) و مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی سرریز کلیدپیانویی



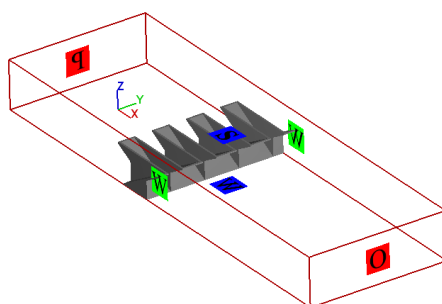
شکل (۲): نمودار مقایسه ضریب دبی  $C_d$  مدل عددی و آزمایشگاهی در مقابل  $H/W$  سرریز لبه تیز

تغییرات زمانی سطح آب در ورودی مدل، در طول حل کنترل شد. بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته، زمان ۱۵ ثانیه برای همگرایی مدل و همچنین شکل‌گیری جریان دائمی کفایت می‌کند.

مدلسازی عددی برای سرریز کلیدپیانویی به ازای ۹ مقدار نسبت  $H/P$  از ۰/۰۵ تا ۰/۸ صورت گرفته است که  $H$  بیانگر هد استاتیکی آب بر روی سرریز می‌باشد. به منظور اطمینان از همگرایی حل و همچنین تثبیت کامل شرایط اعمالی به مدل، دبی خروجی از میدان و همچنین

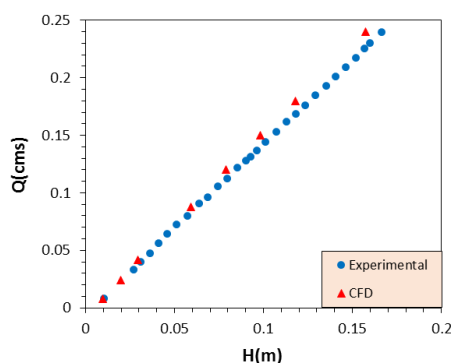


شکل (۳): پارامترهای هندسی سرریز کلیدپیانویی



شکل (۴): هندسه سرریز کلیدپیانویی و شرایط مرزی

در شکل ۵ مقادیر دبی پیش‌بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی به ازای نسبت‌های مختلف  $H/P$  ارائه شده است.



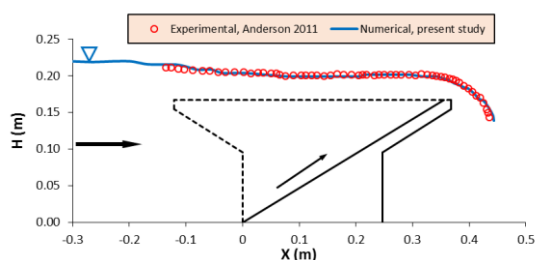
شکل (۵): مقایسه دبی آزمایشگاهی و مدلسازی شده سرریز کلیدپیانویی

(MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب همبستگی (R) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است. مقدار پارامترهای مزبور به ترتیب،

لازم به یادآوری است که  $H$  بیانگر هد کل جریان نزدیک شونده می‌باشد. به منظور مقایسه کمی نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی از آماره‌های میانگین اریبی

حالت  $H/P=0.3$  مقایسه شده است. با توجه به شکل مزبور، انطباق پروفیل‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در بخش‌های مختلف سرریز مناسب بوده و نشانگر صحت مدل‌سازی عددی می‌باشد.

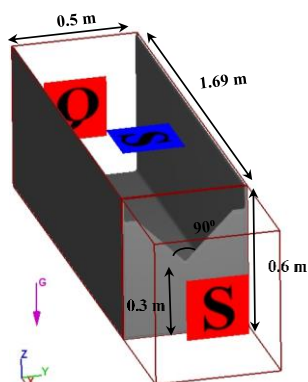
با توجه به مقادیر حاصله، همخوانی بسیار خوبی بین نتایج مدل داده‌های آزمایشگاهی موجود برقرار می‌باشد. در شکل ۶ پروفیل طولی سطح آب بر روی کلید ورودی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی در



شکل (۶): مقایسه پروفیل سطح آب بر روی کلید ورودی بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل عددی برای  $H/P=0.3$

سرریز مدل آزمایشگاهی و هندسه سه‌بعدی به همراه شرایط مرزی مورد استفاده در مدل عددی در شکل ۷ نشان داده شده است.

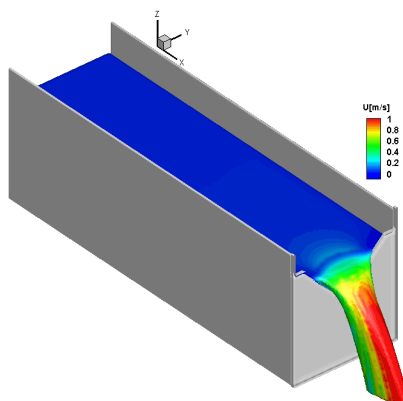
به منظور صحت‌سنجی روند مدل‌سازی و نیز حصول اطمینان از شرایط مرزی مورد استفاده در جریان غیرماندگار، مدل آزمایشگاهی قاسم‌زاده و همکاران در سال ۱۳۹۶ مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات مخزن و



شکل (۷): هندسه مخزن و سرریز مثلثی و شرایط مرزی

در شکل ۱۰ الگوی عمومی جریان عبوری از سرریز نشان داده شده است.

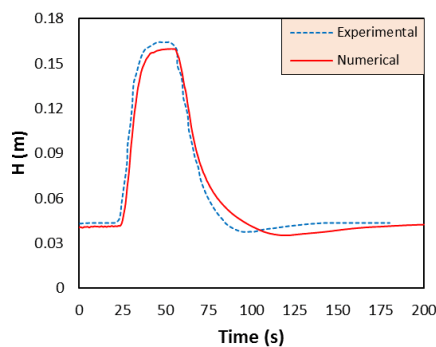




شکل (۵): الگوی جریان شبیه‌سازی شده

آزمایشگاهی از آماره‌های میانگین اربیبی (MBE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب همبستگی (R) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است. مقدار پارامترهای مزبور به ترتیب،  $0/00166$ ،  $0/00824$ ،  $0/96$  و  $0/0114$  می‌باشد. با توجه به مقادیر حاصله و نمودار شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود که همخوانی بسیار خوبی بین نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی برقرار می‌باشد

جهت صحت‌سنجی مدل عددی، دبی مدل آزمایشگاهی به صورت هیدروگراف ورودی به نرم‌افزار تعریف و پروفیل سطح آب حاصل از مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و نتیجه آن در شکل ۸ ارائه شده است. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود نتایج مدل عددی همخوانی بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. به منظور مقایسه کمی نتایج مدل عددی با مقادیر



شکل (۸): مقایسه هیدروگراف پروفیل سطح آب مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی

مدل‌های مورد مطالعه، که مشخصات آنها طبق جدول-های ۱ و ۲ ارائه شده است، در محیط از نرم افزار اتوکد ترسیم شد و با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D تحت جریان غیرماندگار قرار گرفت.

### مدلسازی

به منظور بررسی تأثیر جریان غیرماندگار بر عملکرد سرریزهای اوجی و کلید پیانویی، ابتدا برای عرض کانال ۲۳ سانتی متر سرریز اوجی با استفاده از استاندارد USBR طراحی و سپس برای همان عرض کانال و ارتفاع بدست آمده، سرریز کلیدپیانویی طراحی گردید. هندسه

جدول (۱): مقادیر هندسی مدل عددی سرریز اوجی

(تمامی ابعاد به متر)

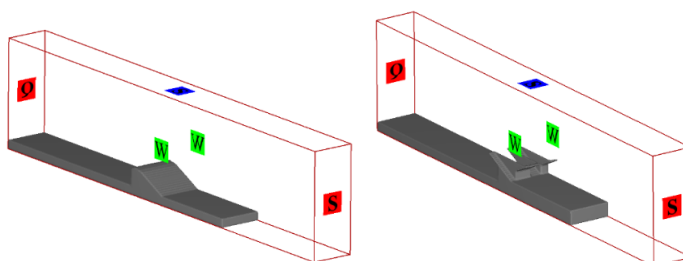
پارامتر	P	W	k	n
مقدار	۰/۱	۰/۲۳	۰/۴۸۵	۱/۸۳

جدول (۲): مقادیر هندسی سرریز کلید پیانویی

(تمامی ابعاد به متر)

پارامتر	P	P <sub>m</sub>	L	W <sub>i</sub>	W <sub>o</sub>	B <sub>i</sub> =B <sub>o</sub>	T
مقدار	۰/۱	۰/۰۷	۱/۱۰۲	۰/۰۷۵	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۰۰۹

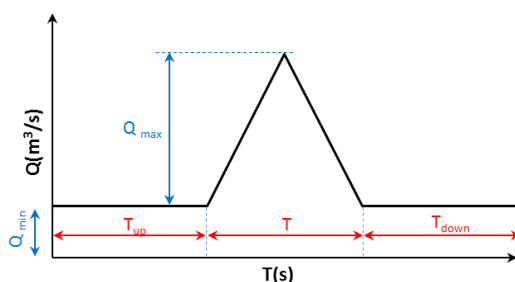
مدل سه بعدی هندسه سرریزهای مورد بررسی و شرایط مرزی مدل عددی در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل (۹): هندسه سرریز اوجی و کلید پیانویی و شرایط مرزی

نظر گرفته شده است. جریان غیرماندگار که بصورت هیدروگراف اشل-دبی وارد کانال می‌شود، همانند شکل ۱۰ می‌باشد. بسته به مدت زمان پخش سیلاب در هیدروگراف (T) نوع هیدروگراف ورودی متفاوت خواهد بود. به منظور بررسی هیدرودینامیک این نوع از سرریزهای اوجی و کلید پیانویی، تعداد طرح مختلف که در آنها  $Q_{\min}=10 \text{ m}^3/\text{s}$ ،  $Q_{\max}=100 \text{ m}^3/\text{s}$  و  $T_{\text{down}}=20\text{s}$  در نظر گرفته شد. عملکرد سرریزهای مورد مطالعه تحت این هیدروگراف‌ها بررسی شد.

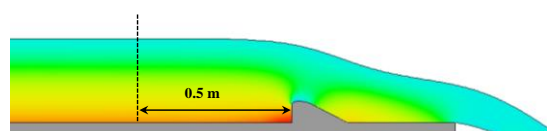
همانطوریکه در شکل ۹ نشان داده شده است، کف مدل (محل خروجی جریان) خالی و بدون مانع در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی عددی از یک بلوک شبکه بندی استفاده شده است. صفحه  $Z_{\min}$  بلوک پایین-دست به اندازه کافی پایین‌تر از انتهای شیب کلیدهای خروجی در نظر گرفته شده و ضمن اعمال شرط مرزی خروجی، شرایط بهره‌برداری از سرریز بصورت سرریز سد، بدون استغراق در پایاب و ریزشی آزاد را فراهم نموده است. در مدل‌های مورد مطالعه شیب بستر ( $S_0$ ) صفر در



شکل (۱۰): جزئیات شماتیک هیدروگراف ورودی به کانال

سرریز به عنوان مقطع کنترل انتخاب و نتایج در آن مقطع بررسی و ارائه شده‌اند. به دلیل استفاده از سرریز با ارتفاع-های مختلف و نیز هیدروگراف متقارن با پایه زمانی و دبی متفاوت جهت بررسی مدل‌ها بر اساس پارامترهای مورد استفاده کدگذاری شدند. سرریز اوجی با OG، سرریز کلیدپیانویی با PKW، سرریز با ارتفاع متغییر x با Px و هیدروگراف ورودی با مدت زمان غیرماندگار x بصورت Tx نشان داده شده است.

جهت بررسی نتایج جریان غیرماندگار، ابتدا بایستی مقطعی به عنوان مقطع کنترل برای همه مدل‌ها مشخص گردد. بدین منظور ابتدا سرریزها تحت جریان ماندگار مدل‌سازی شده و پروفیل سطح آب در بالادست کانال به فواصل مختلف از سرریز بررسی و فاصله‌ای که در آن پروفیل به حالت یکنواخت و ثابت می‌رسد به عنوان مقطع کنترل جهت بررسی در حالت‌های مختلف جریان غیرماندگار در نظر گرفته شد. همانگونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، مقطع به فاصله ۰/۵ متر بالادست

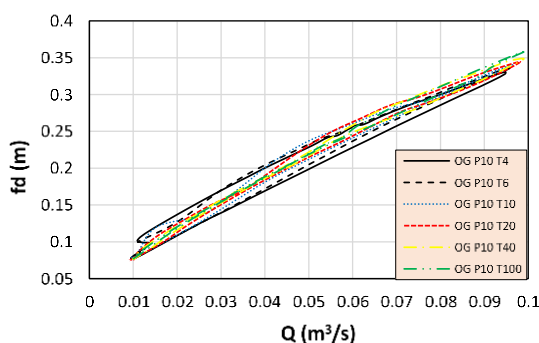


شکل (۱۱): مقطع کنترل بالادست سرریز

## نتایج و بحث

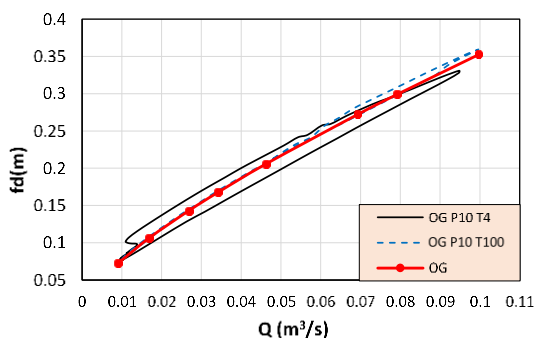
یافته و به سمت منحنی واحد سوق پیدا می‌کند که دلیل آن این است که در هیدروگراف با پایه زمانی کمتر ترم‌های  $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  در رابطه ۲ معنادار بوده و موج بصورت دیفیوژن می‌باشد که با افزایش گام زمانی تأثیر این ترم کمتر شده و موج به حالت سینماتیک تبدیل می‌شود. این به معنای آن است که در تحلیل جریان‌های غیرماندگار در آستانه سرریزهای واقع در کانالها و یا سرریزهای استفاده شده بصورت بند انحرافی، چنانچه هیدروگراف دارای شیب تند باشد، حتماً بایستی جریان به صورت غیرماندگار تحلیل گردد و تحلیل جریان در حالت ماندگار کاملاً تقریبی بوده و غیر قابل استناد می‌باشد.

مدلهای مورد مطالعه در این تحقیق تحت جریان‌های غیرماندگار به ازای هیدروگراف‌های مختلف قرار گرفتند. مطالعه حاضر به ازای هندسه‌های مشخصات کانال (طول و عرض و ...) هندسه سرریزهای مشخص با ارتفاع و عرض سرریز ثابت و به ازای هیدروگراف‌های متقارن با گام زمانی مختلف انجام گرفت. در شکل ۱۲ منحنی اشل-دبی سرریز اوجی با ارتفاع ثابت و به ازای هیدروگراف‌های ورودی با گام زمانی مختلف نشان داده شده است. با افزایش شیب شاخه‌های صعودی و نزولی هیدروگراف ورودی به کانال، پهنای حلقه منحنی دبی-اشل افزایش یافته و از حالت منحنی منفرد بیشتر فاصله می‌گیرد. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود با افزایش زمان پایه هیدروگراف ورودی از ۴ تا ۱۰۰ ثانیه پهنای حلقه منحنی اشل-دبی کاهش



شکل (۱۲): منحنی های دبی-اشل حلقوی سرریز اوجی به ازای هیدروگراف های ورودی با زمان پایه مختلف گام زمانی ۴ و ۱۰۰ ثانیه در مقابل منحنی دبی-اشل سرریز اوجی تحت جریان ماندگار نشان داده شده است.

در شکل ۱۳ منحنی دبی اشل سرریز اوجی به ازای جریان غیرماندگار به ازای هیدروگراف های ورودی متقارن با



شکل (۱۳): منحنی های دبی-اشل حلقوی سرریز اوجی به ازای جریان غیرماندگار در مقابل جریان ماندگار

سطح آب، دبی به ازای یک عمق جریان، دو مقدار متفاوت خواهد داشت. همچنین با توجه به شکل می توان گفت که هر چقدر زمان هیدروگراف ورودی به حوضه بیشتر باشد منحنی اشل-دبی به حالت جریان ماندگار نزدیک تر می شود.

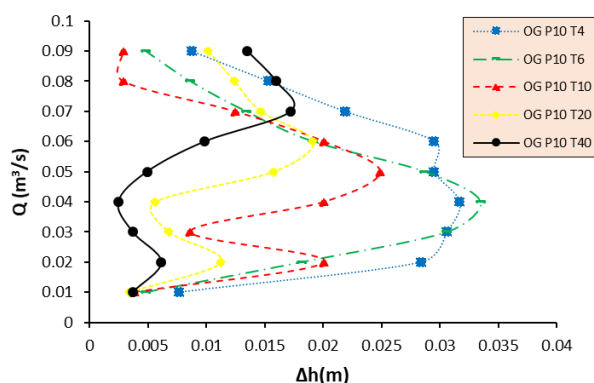
همانگونه که در شکل ۱۳ مشخص است با افزایش گام زمانی هیدروگراف از ۴ ثانیه به ۱۰۰ ثانیه منحنی دبی-اشل از حالت حلقوی خارج و به سمت منحنی واحد که در حقیقت حالت منحنی دبی اشل جریان ماندگار نزدیک است، سوق پیدا می کند. دلیل این امر همانگونه که در جدول ۳ نشان داده شده این است که با افزایش گام زمانی تأثیر ترم مربوط به  $\frac{I}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  در معادله سنت و نانت کاهش یافته و در نتیجه نوع جریان به حالت جریان ماندگار نزدیک می شود. با توجه به شکل ملاحظه می شود که در جریانهای غیردائمی به ازای یک مقدار عمق جریان H، دو مقدار دبی متفاوت یکی برای مرحله افزایش و دیگری برای فروکش سیلاب بدست می آید و یا به بیان دیگر در جریانهای غیر دائمی، بسته به افزایش یا کاهش

جدول (۳): مقدار ترم  $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  در معادله سنت و نانت به ازای هیدروگراف با پایه زمانی متفاوت برای سرریز اوجی

زمان توزیع هیدروگراف	$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$	$\frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x}$	$\frac{\partial h}{\partial x}$	$\left( \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \right) \times \frac{1}{\frac{\partial h}{\partial x}}$ %
۴	۲۶۳/۸۹	۱۳۶/۹۱	۳۵۹/۲۲	٪ ۷۳/۴
۶	۲۶۱/۵۷	۱۴۰/۲۱	۳۶۸/۲۱	٪ ۷۱
۱۰	۲۵۹/۷۱	۱۴۵/۱۴	۳۷۴/۷۳	٪ ۶۹/۳
۲۰	۶۴/۶۸	۲۸۰/۲۶	۴۱۳/۳۷	٪ ۱۵/۶
۴۰	۲۱/۱۳	۱۲۹/۵۵	۲۲۰/۸۴	٪ ۹/۵
۱۰۰	۶/۷۸	۹۴/۷۰	۱۸۳/۰۴	٪ ۳/۷

بصورت غیرماندگار در سرریزهای اوجی را هرچه بیشتر نمایان می‌کند. در ادامه به بررسی عملکرد سرریز کلیدپیانویی در مقابل جریان غیرماندگار پرداخته می‌شود. در شکل ۱۵ منحنی اشل-دبی حلقوی سرریز کلید پیانویی به ازای هیدروگراف‌های ورودی متقارن با زمان پایه متفاوت نشان داده شده است. دلیل این امر همانگونه که در جدول ۴ نشان داده شده، این است که با افزایش گام زمانی تأثیر ترم مربوط به  $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  در معادله سنت و نانت کاهش یافته و در نتیجه نوع جریان به حالت جریان ماندگار نزدیک می‌شود.

در شکل ۱۴ منحنی دبی در مقابل تغییرات هد جریان در شاخه‌های صعودی و نزولی برای سرریز اوجی با ارتفاع ثابت ۱۰ سانتی‌متر به ازای هیدروگراف با پایه زمانی متفاوت نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که تغییرات هد به ازای دبی ثابت، در هیدروگراف با گام زمانی کمتر، بیشتر مشاهده می‌شود. این به این دلیل می‌باشد که با کاهش گام زمانی، تغییرات شیب شاخه‌های صعودی و نزولی هیدروگراف بیشتر شده و سرعت جریان نزدیک شونده به سرریز افزایش یافته و در نتیجه تأثیر ترم  $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  در رابطه ۲ بصورت معنادار بوده و ماهیت جریان غیرماندگار بیشتر نمایان می‌شود و لزوم تحلیل جریان



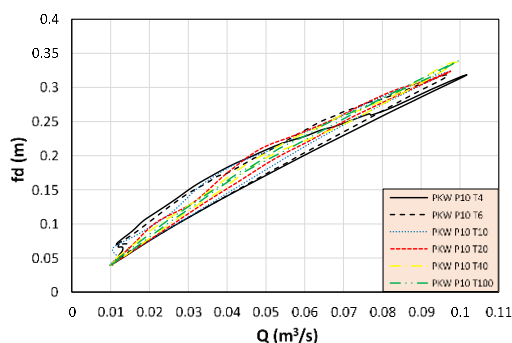
شکل (۱۴): منحنی دبی در مقابل تغییرات هد جریان برای سرریز اوجی

دبی در شاخه صعودی و نزولی منحنی‌های اشل-دبی در مقایسه با سرریز اوجی بیشتر می‌باشد. این کاهش اختلاف دبی در شاخه صعودی و نزولی در مقایسه با سرریز اوجی

همانگونه که در شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود روند کلی تغییر منحنی‌ها همانند منحنی‌های دبی اشل سرریز اوجی می‌باشد با این تفاوت که در سرریز کلید پیانویی تغییرات

جریان تشکیل شده در یک دبی مشخص در سرریز کلید پیانویی در مقایسه با سرریز اوجی می‌یابد و در نتیجه سرعت نزدیک‌شونده به سرریز افزایش می‌یابد.

به دلیل افزایش طول موثر سرریز کلیدپیانویی در مقایسه با سرریز اوجی به ازای عرض کانال ثابت می‌باشد، به این صورت که با افزایش طول موثر به ازای دبی ثابت ارتفاع



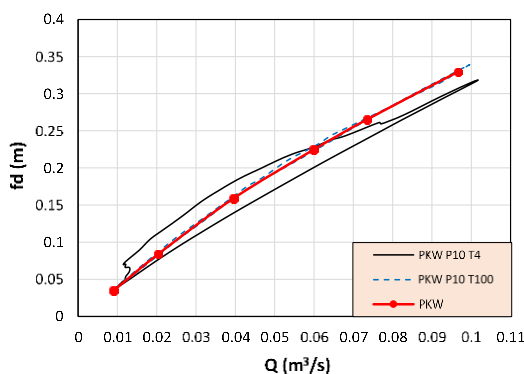
شکل (۱۵): منحنی‌های دبی-اشل حلقوی سرریز اوجی به ازای جریان غیرمانگار در مقابل جریان ماندگار

شکل همانند سرریز اوجی در سرریز کلیدپیانویی نیز با افزایش گام زمانی هیدروگراف از ۴ ثانیه به ۱۰۰ ثانیه منحنی دبی-اشل از حالت حلقوی خارج و به سمت منحنی واحد که در حقیقت حالت منحنی دبی اشل جریان ماندگار نزدیک است، سوق پیدا می‌کند.

در شکل ۱۶ منحنی اشل-دبی سرریز کلیدپیانویی به ازای جریان غیرمانگار به ازای هیدروگراف‌های ورودی با گام زمانی ۴ و ۱۰۰ ثانیه در مقابل منحنی دبی-اشل تحت جریان ماندگار نشان داده شده است. با توجه به

جدول (۴): مقدار ترم  $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  در معادله سنت و نانت به ازای هیدروگراف با پایه زمانی متفاوت برای سرریز کلیدپیانویی

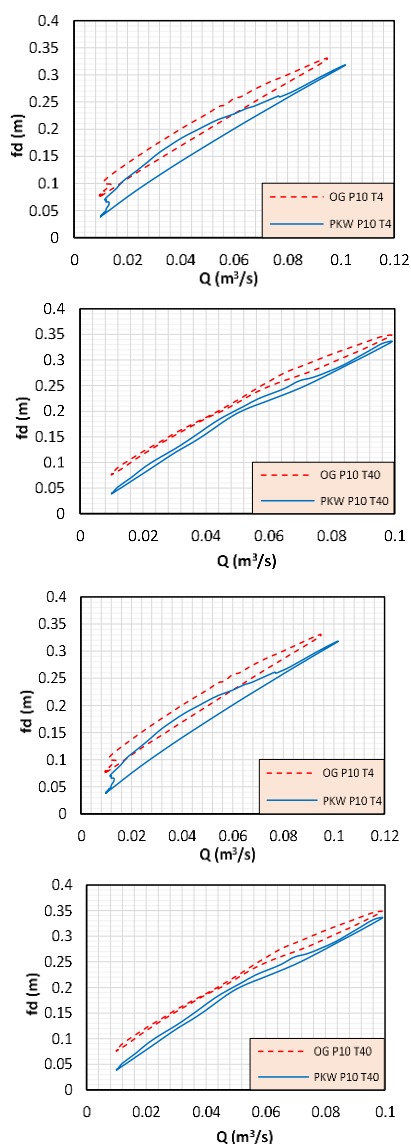
زمان توزیع هیدروگراف	$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$	$\frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x}$	$\frac{\partial h}{\partial x}$	$\left( \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \right) \times \frac{1}{\frac{\partial h}{\partial x}}$ %
۴	۲۴۵/۴۶	۱۶۵/۱۴	۳۴۶/۴۰	٪ ۷۰/۱۸
۶	۲۶۳/۹۳	۱۸۱/۰۱	۳۹۶/۲۸	٪ ۶۶/۱۶
۱۰	۵۹/۲۱	۲۱۱/۹۳	۳۳۰/۷۴	٪ ۶۴/۱
۲۰	۲۷/۱۷	۱۹۸/۷۵	۲۹۴/۰۸	٪ ۹/۲۴
۴۰	۱۸/۵۱	۱۴۷/۹۹	۲۳۵/۹۹	٪ ۷/۱۸
۱۰۰	۵/۷۶	۱۱۵/۴۴	۲۰۱/۶۸	٪ ۲/۸۵



شکل (۱۶): منحنی های دبی-اشل حلقوی سرریز کلیدپیانویی به ازای جریان غیرماندگار در مقابل جریان ماندگار

ملاحظه می‌شود که تغییرات هد آب در سرریز کلید پیانویی با ارتفاع و زمان پایه دبی ثابت با سرریز اوجی، بیشتر می‌باشد. این بدان معناست که سرریز اوجی در مقابل جریان غیرماندگار عملکرد بهتری دارد و اختلاف هد در شاخه‌های صعودی و نزولی سرریز اوجی در مقایسه با سرریز کلیدپیانویی کمتر است. به عبارتی پهنای منحنی حلقوی اشل-دبی سرریزهای اوجی کمتر بوده و اختلاف هد آب تشکیل شده بر روی سرریز به ازای یک دبی ثابت، کمتر از سرریز کلیدپیانویی می‌باشد.

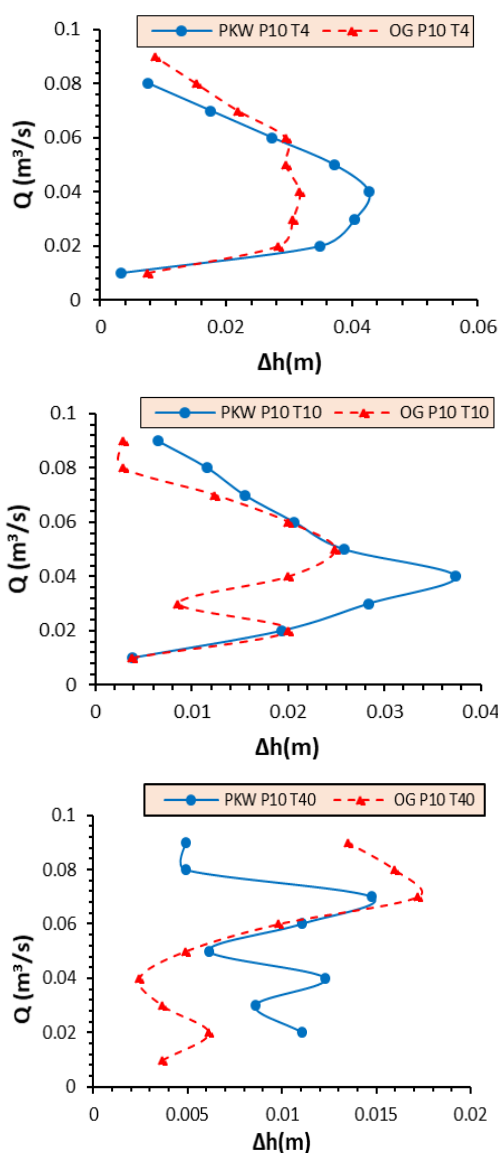
در شکل ۱۷ منحنی‌های اشل-دبی سرریز اوجی در مقابل سرریز کلیدپیانویی با ارتفاع سرریز ثابت ۱۰ سانتی متر و به ازای هیدروگراف‌های ورودی با زمان پایه متفاوت نشان داده شده است. همانطوریکه در شکل ملاحظه می‌شود در هر دو نوع سرریز اختلاف ارتفاع هد آب، به ازای دبی ثابت در هیدروگراف با زمان کمتر یعنی هیدروگراف با شیب شاخه‌های صعودی و نزولی بیشتر، بزرگتر است. با افزایش زمان پایه دبی ورودی از ۴ به ۴۰ ثانیه تغییرات هد آب کمتر می‌شود. با توجه به شکل



شکل (۱۷): منحنی‌های دبی-اشل حلقوی سرریز کلیدپیانویی در مقابل سرریز اوجی

مقدار میانگین اختلاف ارتفاع تیغه آب به ازای دبی یکسان در منحنی حلقوی شکل اشل-دبی در سرریز اوجی و کلید پیانویی به ازای هیدروگراف های با گام زمانی ۴ و ۱۰ و ۴۰ ثانیه آنها در جدول ۵ نشان داده شده است.

به منظور بررسی بهتر تغییرات هد در مقابل دبی تغییرات هد به ازای دبی‌های ثابت برای سرریز کلیدپیانویی و اوجی با ارتفاع سرریز ثابت و هیدروگراف با دبی پایه زمانی مختلف در شکل ۱۸ و مقدار عددی درصد



شکل (۱۸): منحنی‌های دبی در مقابل تغییرات هد جریان به ازای سرریزهای کلید پیانویی و اوجی

بوده که نشان دهنده تأثیر مضاعف رفتار جریان در حالت ماندگار و غیرماندگار سرریز کلیدپیانویی نسبت به سرریز اوجی می‌باشد. دلیل نوسانات موجود در نمودارهای شکل ۱۸ به ازای هیدروگراف با پایه‌های زمانی بیشتر وقوع

همانطوریکه در جدول ۵ ملاحظه می‌شود مقادیر  $\Delta h$  در ناحیه هیدروگراف با دبی بیشتر، در سرریزهای اوجی کمتر از سرریزهای کلیدپیانویی است. به عبارتی پهنای حلقه منحنی اشل-دبی در سرریزهای کلیدپیانویی بیشتر



استغراق در پایین دست و تاثیر آن بر عملکرد سرریزها می‌باشد.

جدول (۵): مقدار عددی میانگین اختلاف ارتفاع تیغه آب به ازای دبی یکسان در منحنی حلقوی شکل دبی-اشل

درصد اختلاف $\Delta h$	$\Delta h(m)$	نوع سرریز
۵/۹۱	۰/۰۲۲۶	OG P10 T4
	۰/۰۲۳۹	PKW P10 T4
۴۵/۹۷	۰/۰۱۲۹	OG P10 T10
	۰/۰۱۸۸	PKW P10 T10
۳/۱۷	۰/۰۰۸۶	OG P10 T40
	۰/۰۰۸۹	PKW P10 T40

### نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوی سه‌بعدی جریان بر روی سرریزهای اوجی و کلیدپیانویی واقع در کانال در حالت ماندگار و غیرماندگار مدلسازی عددی شد. سرریزها بر اساس نوع سرریز و با ارتفاع‌های مختلف تحت هیدروگراف‌های متعدد با مقدار زمان پایه متفاوت قرار گرفتند. برخی از نتایج حاصله بصورت زیر می‌باشد:

۱- منحنی اشل-دبی هر دو نوع سرریز اوجی و کلیدپیانویی تحت هیدروگراف‌های با زمان پایه کوچکتر به حالت حلقوی بوده که با افزایش زمان پایه هیدروگراف به دلیل کاهش مقدار ترم  $\frac{I}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  معادلات سنت و نانت منحنی از حالت حلقوی خارج و به منحنی واحد جریان ماندگار سوق پیدا کرده و نهایتاً بر آن منطبق می‌شود.

۲- در هر دو نوع سرریز مورد مطالعه تحت جریانهای غیردائمی به ازای یک مقدار عمق جریان  $H$ ، دو مقدار دبی متفاوت، یکی برای مرحله افزایش و دیگری برای مرحله فروکش سیلاب بدست می‌آید. این به معنای آن است که در تحلیل جریان‌های غیرماندگار در آستانه سرریزهای واقع در کانالها و یا سرریزهای استفاده شده بصورت بند انحرافی، چنانچه هیدروگراف دارای شیب تند باشد، حتماً جریان بایستی به صورت غیرماندگار تحلیل گردد و تحلیل‌های جریان در حالت ماندگار کاملاً تقریبی بوده و غیر قابل قبول می‌باشد.

۳- سرریزهای کلیدپیانویی و اوجی با ارتفاع یکسان تحت هیدروگراف‌های ورودی با زمان دبی پایه ثابت قرار گرفتند که به دلیل کاهش هد آب روی سرریز کلیدپیانویی، سرعت جریان نزدیک شونده به آن افزایش یافته و در نتیجه تأثیر ترم  $\frac{I}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  معادلات سنت و نانت بیشتر می‌شود که این امر منجر به افزایش تغییرات هد آب به ازای یک دبی ثابت در سرریز کلیدپیانویی می‌شود. این بدان معناست که سرریز اوجی در مقابل جریان غیرماندگار عملکرد بهتری دارد و اختلاف هد در شاخه-های صعودی و نزولی سرریز اوجی در مقایسه با سرریز کلیدپیانویی کمتر است. به عبارتی با توجه به شکل و جدول ۵ منحنی اشل-دبی در سرریزهای اوجی نسبت به سرریزهای کلیدپیانویی حلقه با پهنای کمتر و نزدیکتر به منحنی واحد دارد.

بررسی سرریزها تحت شرایط مختلف جریان غیرماندگار، لزوم بررسی و طراحی سرریزها در حالت غیرماندگار را نمایان می‌کند. علیرغم اینکه سرریزهای کلیدپیانویی بدلیل شکل هندسی از جمله افزایش طول مؤثر و نیز توزیع یکنواخت جریان ضریب دبی در حالت ماندگار را بهبود می‌بخشد با این حال بدلیل افزایش سرعت نزدیک‌شونده به سرریز باعث بیشتر شدن تأثیر ترم‌های  $\frac{I}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  معادلات سنت و نانت بیشتر شده و



لزوم بررسی این نوع سرریز تحت شرایط جریان غیرماندگار را بیشتر می‌کند.

## منابع

- امینی، ر.، ح. قدوسی و ک. شاهرودی. ۱۳۹۷. شبیه‌سازی جریان غیرماندگار ناگهانی در کانالهای آبیاری با استفاده از روش عددی MacCormack-TVD. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، سال دهم، شماره ۳۹، ص ۲۱-۱۳.
- قاسم زاده، ف.، ص. کوچک زاده. ۱۳۹۶. جریان غیرماندگار در سرریز لبه‌تیز مثلثی واقع در انتهای یک مخزن. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۸، شماره ۳، ص ۵۱۴-۵۰۳.
- Anderson, R.M. 2011. Piano key weir head discharge relationships. M.S. thesis. Utah State Univ, Logan, U.
- Aricò, C., C. Nasello and T. Tucciarelli. 2009. Using unsteady-state water level data to estimate channel roughness and discharge hydrograph. *Advances in Water Resources*, 32.8.1223.
- Bazaz, A. 2008. Discharge coefficient of weirs in unsteady flow. MSc thesis. Tehran University (In Persian).
- Bos, MG. 1989. Discharge measurement structures. Publication no. 161. Delft Hydraulic Laboratory, Delft: The Netherlands (Also Publication no. 20. ILRI. Wageningen. The Netherlands).
- Carter, R.W., R.G. Godfre. 1960. Storage and flood routing. USGS report iv p 81-104: ill. ;23 cm.
- Chanson, H., H. Wang. 2013. Unsteady discharge calibration of a large V-notch weir. *Flow Measurement and Instrumentation*. 29.19– 24.
- Chaudhry, M.H. 2008. *Open-Channel Flow*. Second Edition. Springer Science+Business Media, LLC. New York.
- Chow, V.T. *Open channel Hydraulics*. Mc Graw- Hill Company.
- Clemmens, A.J., T.L. Wahl, M.G. Bos and J.A. Replogle. 2001. *Water Measurement with Flumes and Weir* Publication no, 58. ILRI. Wageningen. The Netherlands.
- Cunge, J.A. 1969. On the subject of a flood p opaga ion compu a ional me hod J H d aul esou.
- Dabling, M.R., B.P. Tullis. 2017. Modifying the downstream hydrograph withstaged labyrinth weirs. *Journal of Applied Water Engineering and Research*.
- De Laine, R.J. 1964. Calibration of weirs using the rate of pondage drawdown. *Journal of hydrology*, 2.130-140.
- Fiorentini, M., S. Orlandini. 2013. Robust numerical solution of the reservoir routing equation. *Advances in Water Resources*, 59. P.123–132.
- Fread, D.L. 1985. *Channel routing*. Hydrological Forecasting. John Wiley and sons Ltd New York. John Wiley and Sons, p.437–503.
- Hager, W., R. Sinniger. 1985. Flood Storage in Reservoirs. *J. Irrig. Drain Eng*, 111(1). 76–85.
- Henderson, F.M. 1966. *Open channel flow*. New York. MacMillan, 522 p.
- Hormodka, T.V., G.L. Guymon. 1983. Mass lumping model of the linear diffusion equation. *Adv in Water Resource*, 6.79-83.
- Jolliffe, I.B. 1989. Computation of dynamic waves in channel networks. *J hydraulic Eng ASCE*, 110(10).1357-1370.
- Johnson, F. A., C.S. Green. 1977. The calibration of sharp crested weirs by the pondage drawdown method. *Journal of Hydrology*, 33-363-373.
- Kuhnle, R.A., A.J. Bowie. 1992. Loop Rating Curves from Goodwin Creek. *Proceedings of the Hydraulic Engineering sessions at Water Forum 92*. Baltimore. Maryland. August. 2–6.1992 (Published by American Society of Civil Engineers).
- Lighthill, M.J., G. B. Whitham. 1955. *on Kinematic Waves: 1. Flood Movement in Long Rivers* Proceedings Royal Society of London Series, A.229.pp. 281-361.



Ponce, V.M. 1990. Generalized diffusive wave equation with inertial effects. *Water Resource, Res* 26(5).1099-1101.

Raghunath, H.M. 2006. *Hydrology: Principles Analysis Design* New Age International (P) Ltd Publishers.

Ramamurthy, AS., US. Tim and MVJ. Rao. 1987. Flow over sharp-crested plate weirs. *J Irrig Drainage Eng ASCE*, 113(2): 163–172.

Singh, V.P., G.T. Wong and D.D. Adrian. 1996. Flood routing based on diffusion wave equation using mining cell method. *Hydrological processes*, 11.1881-1894.

Woolhiser, D.A., J.A. Liggett. 1967. Unsteady one-dimensional flow over a plane: the rising hydrograph. *Water Resources Research*, 3(3).753-841.



## Comparing the Behavior of Ogee and Piano Key Weirs under Unsteady Flows

Behzad Noroozi<sup>1</sup>, Jalal Bazargan<sup>2</sup>

### Abstract

Analysis of the unsteady flow on the weir end sill is fundamental to determining the passing flow's exact flow discharge and height. Due to the difference between the steady and unsteady flows and the effect of different terms of the Saint-Venant equation, the weirs' stage-discharge curves under the two types of flows are different. In the present study, 3D free-surface flow on the Ogee and the Piano-key weirs under steady and unsteady flows was modeled using the FLOW-3D numerical model, and the effect of different input hydrographs for multiple time bases was investigated. Based on the obtained results, the steady flow condition's unit stage-discharge curve turned into a circular curve in the case of the unsteady flow condition. In both types of the weirs, by increasing the hydrograph time base, the stage-discharge curve changed from a circular curve into a unit curve and finally conformed to the steady-state's stage-discharge curve. In both types of studied weirs, for a constant flow discharge, the water head difference was more considerable for the hydrograph with smaller base-time, i.e. the hydrograph with steeper ascending and descending branches. The amount of head difference in the ogee weir due to your hydrographs with time steps of 4, 10, and 40 seconds is 0.023, 0.013, and 0.008, respectively, and for the piano key weir is 0.024, 0.019, and 0.009. In other words, for steeper input hydrographs on the end-sill of the weirs located on the channels or the weirs used as a diversion, an unsteady flow analysis should be performed. For a fixed weir height and a fixed input hydrograph, water head changes of the Piano key weir were greater than the Ogee weir.

**Keywords:** Unsteady flow, Saint-Venant equations, Ogee weir, Piano key weir, stage-discharge curve.

<sup>1</sup> PhD Student of Water engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: noroozi@znu.ac.ir

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: jbazargan@znu.ac.ir

## Research Paper

## Comparing the Behavior of Ogee and Piano Key Weirs under Unsteady Flows

Behzad Noroozi <sup>1</sup>,Jalal Bazargan <sup>2\*</sup>,

<sup>1</sup> PhD Student of Water engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: noroozi@znu.ac.ir

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: jbazargan@znu.ac.ir



10.22125/IWE.2020.236586.1379

Received:  
**June 24, 2020**  
Accepted:  
**November 1, 2020**  
Available online:  
**March.13.2022**

Keywords:  
**Unsteady flow, Saint-Venant equations, Ogee weir, Piano key weir, stage-discharge curve.**

### Abstract

Analysis of the unsteady flow on the weir end sill is fundamental to determining the passing flow's exact flow discharge and height. Due to the difference between the steady and unsteady flows and the effect of different terms of the Saint-Venant equation, the weirs' stage-discharge curves under the two types of flows are different. In the present study, 3D free-surface flow on the Ogee and the Piano-key weirs under steady and unsteady flows was modeled using the FLOW-3D numerical model, and the effect of different input hydrographs for multiple time bases was investigated. Based on the obtained results, the steady flow condition's unit stage-discharge curve turned into a circular curve in the case of the unsteady flow condition. In both types of the weirs, by increasing the hydrograph time base, the stage-discharge curve changed from a circular curve into a unit curve and finally conformed to the steady-state's stage-discharge curve. In both types of studied weirs, for a constant flow discharge, the water head difference was more considerable for the hydrograph with smaller base-time, i.e. the hydrograph with steeper ascending and descending branches. The amount of head difference in the ogee weir due to your hydrographs with time steps of 4, 10, and 40 seconds is 0.023, 0.013, and 0.008, respectively, and for the piano key weir is 0.024, 0.019, and 0.009. In other words, for steeper input hydrographs on the end-sill of the weirs located on the channels or the weirs used as a diversion, an unsteady flow analysis should be performed. For a fixed weir height and a fixed input hydrograph, water head changes of the Piano key weir were greater than the Ogee weir.

\* Corresponding Author: Jalal Bazargan

## 1. Introduction

To analyze unsteady flow using hydraulic routing methods, the continuity equation and the momentum equation are which are based on the unsteady flow theory (Saint-Venant equations). Piano Key Weir is a modified form of the indented weirs and is considered as a structure with confirmed efficiency having a proper discharge coefficient under steady flow state. So far, the effect of unsteady flow on hydraulic performance and discharge coefficient of this type of weir has not been studied. Therefore, the effect of unsteady flow on the flow discharge passing over Ogee and Piano Key Weirs was studied in the present study.

## 2. Materials and Methods

FLOW-3D® software package was used to numerically simulate the flow pattern. In this paper, the commercially available CFD program Flow-3D, which utilizes the finite volume scheme for structured meshes was used for solving the unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations in conjunction with the RNG k- $\epsilon$  closure model. In the utilized software, the Fractional Area/Volume Obstacle Representation (FAVOR) method is used to inspect the geometry in the finite volume mesh. FAVOR appoints the obstacles in a calculation cell with a fractional value between 0 to 1 as obstacle fills in the cell. The geometry of the obstacle is placed in the mesh by setting the area fractions on the cell faces along with the volume fraction open to flow. This approach creates an independent geometry structure on the grid, and then the complex obstacle such as spillways, mechanical parts and domains with natural bed topography can be produced in an easier way than other software. In order to study the effect of unsteady flow on the performance of Ogee and Piano Key Weirs, an Ogee weir was first designed on a channel with a width of 23 cm considering the USBR standards. Then, the Piano Key Weir was designed on the same channel considering the obtained height. The geometry of the studied models was developed in AutoCAD software. Then, models were subjected to unsteady flow using FLOW-3D numerical model for hydrographs considering different base times.

The three-dimensional model of the studied weirs and the boundary conditions of the numerical model are shown in Fig. 1.

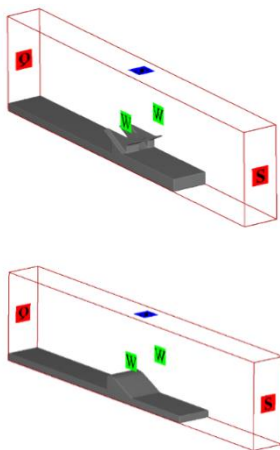
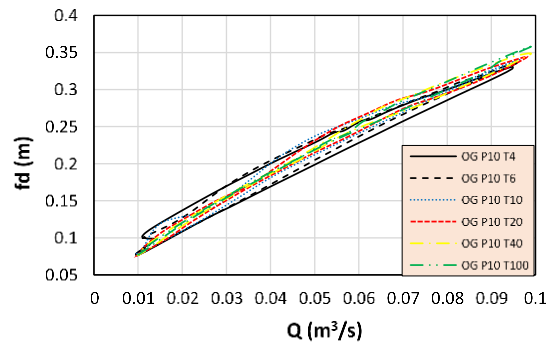


Figure 1. The Ogee and Piano Key Weir geometries and boundary conditions

## 3. Results

As can be seen from Fig.2, by increasing the base time of the input hydrograph from 4 to 100 seconds, the width of the stage-discharge curve ring decreased and tended to the unit curve. This is because in the hydrograph with a shorter base time, terms are significant and the wave is of diffusion type, and by increasing the time step, the effect of the term is decreased and the wave is transformed to the kinematic type.



**Figure 2.** Ring stage-discharge curves of the Ogee weir for input hydrographs with different base times

In both the Ogee and Piano Key Weirs, changes in the slope of the ascending and descending branches of the hydrograph increased and the approaching flow velocity to the weir increased by decreasing time step. Therefore, the effect of term is significant in Eq. 2 and the nature of the unsteady flow becomes more visible.

**Table 5.** The mean difference in water height for a constant discharge in the ring stage-discharge curve.

$\left( \left( \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \right) \times \frac{1}{\frac{\partial h}{\partial x}} \right) \%$	$\frac{\partial h}{\partial x}$	$\frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x}$	$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$	Time(s)
70.8	346.4	165.14	245.46	4
66.6	396.28	181.01	263.93	6
64.1	330.74	211.93	59.21	10
9.24	294.08	198.75	27.17	20
7.8	235.99	147.99	18.51	40
2.85	201.68	115.44	5.76	100

As shown in Table 5, changes in flow head ( $\Delta h$ ) in the hydrograph zone with higher discharge in the Ogee weirs is smaller than those in the PKWs. In other words, the width of the stage-discharge curve ring is greater in the PKWs, indicating the double effect of flow behavior in the steady and unsteady states of the PKWs compared to the Ogee weirs.

#### 4. Discussion and Conclusion

Some of the obtained results are as follows:

1. The stage-discharge curves of both the Ogee and Piano Key Weirs for hydrographs with a shorter base time are close to the ring curves. By increasing the base time of the hydrograph, the curve tends from the ring curve to the unit curve of the steady flow and finally fits the unit curve.
2. In the analysis of unsteady flows at the weir sill, in the case of steep hydrograph, the unsteady flow analysis must be performed.
3. The Ogee weir has a better performance in the case of unsteady flow state with a lower head difference between the ascending and descending branches in the Ogee weirs compared to the PKWs.
4. The PKW can improve the discharge coefficient in the steady flow state because of its geometry. However, due to the increase in the approaching flow velocity to the weir, it is necessary to study the PKWs under unsteady flow state.

## 5. Six important references

1. Anderson, R.M. 2011. Piano key weir head discharge relationships. M.S. thesis. Utah State Univ, Logan, U.
2. Bazaz, A. 2008. Discharge coefficient of weirs in unsteady flow. MSc thesis. Tehran University (In Persian).  
Ghasemzadeh, F., S. Kouchakzadeh. 2008. Unsteady Flow in V-Notch Weir Located at the End of a Storage. Iranian Journal of Soil and Water Research, Volume 48, Issue 3, 503-514.
3. Chanson, H., H. Wang. 2013. Unsteady discharge calibration of a large V-notch weir. Flow Measurement and Instrumentation. 29.19– 24.
4. Dabling, M.R., B.P. Tullis. 2017. Modifying the downstream hydrograph withstaged labyrinth weirs. Journal of Applied Water Engineering and Research.
5. Kuhnle, R.A., A.J. Bowie. 1992. Loop Rating Curves from Goodwin Creek. Proceedings of the Hydraulic Engineering sessions at Water Forum 92. Baltimore. Maryland. August. 2– 6.1992 (Published by American Society of Civil Engineers).
6. Ramamurthy, AS., US. Tim and MVJ. Rao. 1987. Flow over sharp-crested plate weirs. J Irrig Drainage Eng ASCE, 113(2): 163–172.

## Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.