

بررسی آزمایشگاهی تاثیر آستانه بر ضریب دبی دریاچه قطاعی در شرایط جریان آزاد

میثم نوری، فرزین سلماسی*

دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده:

در این تحقیق تاثیر آستانه بر ضریب دبی دریاچه قطاعی در جریان آزاد به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. پارامترهای مورد مطالعه شامل طول، شیب بالادست، شیب پایین دست و ارتفاع آستانه می باشد. هم چنین تاثیر موقعیت قرارگیری آستانه بر روی ضریب دبی نیز مورد بررسی قرار گرفت به طوری که در حالت اول با بسته شدن دریاچه، آستانه در زیر دریاچه قرار گرفت و در حالت دوم با بسته شدن دریاچه، آستانه در جلوی دریاچه قرار گرفت. ۴۳ مدل فیزیکی با استفاده از اشکال مختلف آستانه ها و هم چنین تغییر ابعاد آستانه ها برای یک شکل خاص طراحی شد که برای هر مدل ۱۰ دبی مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که آستانه هایی که با باز شدن دریاچه، جلوی آن قرار می گیرند (آستانه های حالت دوم)، به صورت یک مانع عمل می کنند و موجب کاهش ضریب دبی خواهند شد. اما تاثیر آستانه های حالت اول مثبت ارزیابی شد. در بین آستانه های حالت اول، آستانه نیم دایره ای بیشترین تاثیر را بر ضریب دبی دارد که باعث افزایش ۳۰ درصدی آن می شود. هم چنین آستانه های مستطیلی و دوزنقه ای همواره باعث افزایش ضریب دبی می شوند. در این آستانه ها میزان افزایش ضریب دبی بستگی به نسبت طول به ارتفاع آستانه (L/Z) دارد به طوری که در (L/Z) های کم تر میزان ضریب دبی تا ۲۵ درصد بیش تر خواهد شد.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۶ تیر ۱۳۹۶
بازنگری: ۱ بهمن ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۴ اسفند ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۶ اسفند ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

دریاچه قطاعی
ضریب دبی
آستانه
جریان آزاد
اندازه گیری دبی جریان

۱- مقدمه

دریاچه ها سازه هایی هستند که به منظورهای مختلف از جمله قطع و وصل جریان، تنظیم دبی و یا تنظیم سطح آب به کار می روند [۱]. از جمله پرکاربردترین دریاچه ها، دریاچه های قطاعی هستند که برای آبیگری و اندازه گیری دبی مورد استفاده قرار می گیرند. از آنجا که نیروی لازم برای باز کردن دریاچه کشویی زیاد است، طراحان سازه هیدرولیکی دریاچه های قطاعی را به عنوان دریاچه کنترل سطح آب و دبی مورد توجه قرار می دهند. دریاچه های قطاعی دارای پوسته استوانه ای هستند. از اینرو برآیند نیروهای فشار آب وارد بر دریاچه از محور آن میگذرد و گشتاوری را حول آن به وجود نمی آورد. در نتیجه نیروی لازم جهت بالا کشیدن دریاچه می بایست فقط با نیروی وزن دریاچه مقابله نماید. برتری دریاچه های قطاعی نسبت به دریاچه های کشویی عبارتند از سهولت در بهره برداری و نگهداری، عدم احتیاج به شیار در تکیه گاه ها، عدم احتیاج به چرخ و تاسیسات دیگر نظیر ریل و قرقره و کاهش قابل توجه نیرو جهت باز و بسته کردن دریاچه. ارتفاع دریاچه های قطاعی از ۲ تا ۱۴ متر و عرض دهانه آن ها از ۳ تا ۴۰ متر متغیر

است [۱]. حداکثر حاصلضرب عرض در ارتفاع، ۳۰۰ متر مربع می باشد [۱]. عامل مهم در کاربرد دریاچه های قطاعی با توجه به ثابت بودن و مشخص بودن سایر پارامترها، تعیین مناسب ضریب دبی با توجه به شرایط جریان و شرایط استفاده از دریاچه است. دریاچه های قطاعی هم در جریان مستغرق و هم با جریان آزاد کار می کنند که برای هر کدام از شرایط پارامترهای خاصی موثر هستند. با توجه به مطالعات مختلف صورت گرفته، وجود آستانه در کف کانال میتواند هم موجب بهبود عملکرد دریاچه شود و هم می تواند تأثیر عکس در عملکرد آن بگذارد [۲]. از فواید آستانه در زیر دریاچه های قطاعی میتوان جلوگیری از تاثیر رسوبات بر کارکرد دریاچه و تغییر ضریب دبی به ازای حالت های مختلف دریاچه و متعاقباً تغییر دبی جریان را نام برد. در واقع وجود آستانه در زیر دریاچه ها، ارتفاع دریاچه ها را کم می کند و تاثیر نیروی فشاری آب را بر آن کاهش میدهد، سپس با توجه به کاهش ارتفاع دریاچه ها، وزن دریاچه ها نیز کم میشود. پس وجود آستانه، البته در موقعیت مناسب و شکل مناسب موجب بهبود عملکرد دریاچه می شود که در این مطالعه سعی خواهد شد موقعیت و شکل مناسب آستانه معرفی شود. مطالعات متعددی در بررسی تاثیر آستانه در زیر دریاچه ها بر خصوصیات

* نویسنده عهده دار مکاتبات: salmasi@tabrizu.ac.ir

در شکل ۱، y_0 عمق آب در بالادست دریاچه، Y ارتفاع محور دریاچه، y_1 عمق آب در مقطع فشردگی، y_2 عمق آب در پایین دست دریاچه، R شعاع، θ زاویه لبه دریاچه با افق و w بازشدگی دریاچه و y_2 عمق آب در شرایط جریان مستغرق است. شاهرخ‌نیا و جوان [۸] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، روابطی را برای تخمین ضریب دبی جریان در دریاچه‌های قطاعی تحت شرایط آزاد و مستغرق ارائه نموده‌اند. از بین روابط ارائه شده در مطالعه آن‌ها که حاصل برازش معادله چند متغیره غیرخطی بوده است روابط ۱ و ۲ بهترین نتایج را داشته‌اند.

$$c_d = 0.46 \left(\frac{\theta}{90}\right)^{-0.36} \left(\frac{y_0}{w}\right)^{0.12} \quad (1) \quad \text{جریان آزاد}$$

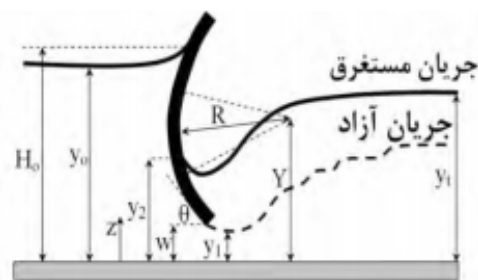
$$c_d = 0.53 \left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.87} \left(\frac{y_0 - y_L}{w}\right)^{0.33} \quad (2) \quad \text{جریان مستغرق}$$

نجم و همکاران [۹] به بررسی تاثیر آستانه در زیر دریاچه، بر روی مشخصات جریان مستغرق پرداختند. محققین در این مطالعه آزمایشگاهی از فلومی با عرض ۱۰ سانتی‌متر، عمق ۳۱ سانتی‌متر و طول ۳ متر بهره برده‌اند. تاثیر قابل ملاحظه آستانه بر ضریب دبی از نتایج این مطالعه بوده است و عنوان شده است که تغییرات ضریب دبی در دریاچه‌های با آستانه، به عدد فرود جریان زیر دریاچه و همچنین اختلاف بار آبی بالادست و پایین دست دریاچه بستگی دارد. فهمی صلاح [۱۰] برای بررسی تاثیر آستانه، مطالعه‌ای آزمایشگاهی انجام داده است. در این مطالعه محقق برای بیان تاثیر آستانه، از دریاچه‌های با آستانه و بدون آستانه استفاده کرده است و تاثیر ارتفاع آستانه را بر ضریب دبی، ضریب انقباض، طول پرش، عمق آب برگشت داده شده، سرعت و انرژی جریان، مورد بررسی قرار داده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که ارتفاع آستانه عامل اصلی تغییرات ضریب انقباض می‌باشد. با افزایش ارتفاع آستانه، ضریب دبی افزایش خواهد یافت. با افزایش ارتفاع آستانه، طول پرش و عمق آب برگشت داده شده کم خواهد شد ولی انرژی تلف شده افزایش خواهد یافت. دریاچه‌های شعاعی آستانه دار مستغرق، نسبت به دریاچه‌های بدون آستانه به حوضچه آرامش طولی تری نیاز دارند.

امر و آیدین [۱۱] تاثیر آستانه‌ها در زیر دریاچه را در جریان مستغرق به صورت عددی بررسی نموده‌اند. خطوط سرعت جریان و اندازه سرعت برای هر شکل آستانه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که قرارگیری آستانه در پایین دست دریاچه، سرعت جریان را در محدوده مورد بررسی کاهش خواهد داد. شاکر [۱۲] در مطالعه‌ای به بررسی جریان مستغرق در زیر دریاچه با آستانه‌های پله‌ای پرداخته است. شاکر استفاده از آستانه‌های پله‌ای را موجب کاهش هزینه‌های ساخت و ساز عنوان کرده است. مطالعه آزمایشگاهی برای پنج گروه از مدل‌ها انجام شده است و در هر مدل ارتفاع آستانه‌های پله‌ای و بازشدگی دریاچه مورد تغییر واقع شده است. تاثیر آستانه‌های پله‌ای بر عملکرد دریاچه‌های قائم مثبت ارزیابی شده است. از نتایج این مطالعه می‌توان این نکته را بیان نمود که با افزایش ارتفاع آستانه پله‌ای تا یک مقدار ثابت، میزان ضریب دبی افزایش خواهد یافت، اما با

جریان صورت گرفته است. سرهان [۳] در مطالعه‌ای با تغییر ارتفاع آستانه منشوری، به تاثیر آستانه در جریان مستغرق پرداخته است. در این مطالعه چهار آستانه منشوری با ارتفاع‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع آستانه منشوری، ضریب دبی جریان افزایش خواهد یافت و همچنین با کاهش بازشدگی دریاچه، ضریب دبی کاهش خواهد یافت. به طور کلی، تاثیر آستانه منشوری بر روی عملکرد دریاچه مثبت ارزیابی شده است. محققین این مطالعه، رابطه رگرسیونی برای محاسبه ضریب دبی در دریاچه‌ها با وجود آستانه منشوری ارائه نموده‌اند. سعد [۴] در مطالعه‌ای از آستانه‌هایی با تاج مدور در زیر دریاچه استفاده کرده است و تاثیر این شکل از آستانه‌ها را بر روی مشخصات جریان فوق بحرانی آزاد بررسی کرده است. نتایج حاصل از مطالعه سعد نشان دهنده این موضوع است که در دریاچه‌های با آستانه، مهم‌ترین عامل موثر در ضریب دبی، شکل هندسی آستانه می‌باشد. سعید و همکاران [۵] تاثیر قرارگیری آستانه‌های دوزنقه‌ای در زیر دریاچه بر ضریب دبی جریان مستغرق را بررسی کرده‌اند. در مطالعه مذکور، شیب پایین دست آستانه‌ها و همچنین ارتفاع آن‌ها تغییر داشته‌اند. با استفاده از متغیرهای مذکور، مدل‌های متفاوتی برای بررسی تاثیر آستانه‌ها به کار رفته است. افزایش میزان ضریب دبی با افزایش شیب پایین دست آستانه‌های دوزنقه‌ای از نتایج این مطالعه می‌باشد.

نوبین و سعد [۶] مطالعه‌ای آزمایشگاهی در فلومی به طول ۲۵۰ سانتی‌متر، به عرض ۱۵ سانتی‌متر و به عمق ۳۰ سانتی‌متر انجام داده‌اند و به بررسی تاثیر آستانه‌هایی با تاج مدور بر ضریب دبی پرداخته‌اند. در این مطالعه آزمایشگاهی، ۷ مدل اجرا شده است که در این مدل‌ها، شیب بالادست، شیب پایین دست و ارتفاع آستانه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که مهم‌ترین فاکتور موثر در ضریب دبی، نسبت B/Z (ارتفاع آستانه و عرض قاعده آستانه) می‌باشد. همچنین محققین این مطالعه ذکر نموده‌اند که استفاده از آستانه‌هایی با تاج مدور نسبت به آستانه‌هایی با تاج مسطح، ضریب دبی بیشتری را ایجاد خواهند کرد. شکل ۱ یک دریاچه قطاعی با جریان آزاد و مستغرق را نشان می‌دهد [۷].



شکل ۱. دریاچه قطاعی در جریان آزاد و مستغرق [۷]

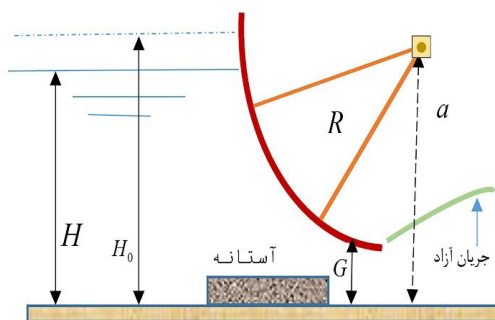
Fig. 1. Radial gate in submerged and free flow [7]

هدف از تحقیق حاضر بررسی آزمایشگاهی تاثیر آستانه بر ضریب دبی دریاچه قطاعی در شرایط جریان آزاد می‌باشد. برای این منظور ۴۳ مدل فیزیکی با آستانه‌های مثلثی، دایره‌ای، نیم‌دایره‌ای، ذوزنقه‌ای و مستطیلی مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به تغییرات دبی جریان، در کل ۷۴۰ آزمایش انجام شد و نتایج حاصل به صورت نمودارهایی بر اساس پارامترهای بی‌بعد که نشان‌دهنده رابطه بین متغیرها است، رسم شد. لازم به ذکر است در مطالعه‌های انجام شده قبلی در رابطه با آستانه، اغلب آستانه ذوزنقه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌است و برای اولین بار، در این مطالعه انواع مختلف شکل آستانه بررسی شده‌است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- پارامترها و نمونه مورد مطالعه

دریاچه قطاعی مورد مطالعه در این تحقیق دریاچه‌ای به صورت ارائه شده در شکل ۳ است.



شکل ۳. نمونه ای از دریاچه و آستانه مورد مطالعه در این تحقیق

Fig. 3. An example of the studied gate and sill

پارامترهای موثر بر هیدرولیک جریان از زیر دریاچه قطاعی شامل عوامل هندسی آستانه‌ها و عوامل هیدرولیکی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. همچنین شکل‌های ۴ و ۵ نیز دو نوع متفاوت از نحوه قرارگیری آستانه‌ها در مسیر جریان را نشان می‌دهند که در بخش نتایج به مقایسه دو موقعیت قرارگیری آستانه در شکل ۴ و ۵ پرداخته شده‌است. برخی از اشکال آستانه‌های استفاده شده در شکل ۶ نشان داده شده‌است.

جدول ۲ حالت‌های مختلف آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

افزایش ارتفاع آستانه به بیش از مقدار مذکور، تاثیر آستانه پله‌ای معکوس خواهد شد و تاثیر منفی بر میزان ضریب دبی خواهد گذاشت. همچنین با وجود آستانه‌های پله‌ای، با افزایش بازشدگی دریاچه و عدد فرود جریان زیر دریاچه، ضریب دبی افزایش خواهد یافت. سپس رابطه رگرسیونی برای محاسبه ضریب دبی ارائه شده‌است که با مقایسه نتایج حاصل از این معادله و نتایج آزمایشگاهی، استفاده از نتایج معادله ارائه شده قابل قبول ارزیابی شده‌است. سلما [۱۳] در مطالعه‌ای، سه مدل از آستانه‌ها را با تغییر شیب پایین‌دست مورد بررسی قرار داده‌است. او در مطالعه آزمایشگاهی خود به این نکته اشاره کرده‌است که میزان ضریب دبی در دریاچه‌های با آستانه نسبت به دریاچه‌های بدون آستانه افزایش خواهد یافت. الگانینی و همکاران [۱۴] در مطالعه خود، به این نکته اشاره داشته‌اند که کاربرد آستانه با کم‌ترین ارتفاع در زیر دریاچه‌ها، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در اتلاف انرژی خواهد داشت. شکل ۲(الف)، نمونه ای از کاربرد دریاچه‌های قطاعی به همراه آستانه بر روی سد اندرسن در منطقه کالیفرنای آمریکا را نشان می‌دهد که مهندسین ارتش آمریکا [۱۵] در سال ۲۰۱۱ احداث آن را به پایان رسانده‌اند. همچنین شکل ۲(ب) نیز نمونه‌ای از دریاچه قطاعی به همراه آستانه در سد مکاپاین بر روی رودخانه اهائو را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۲. تصاویر دریاچه قطاعی به همراه آستانه در سد اندرسن (الف) و در سد مکاپاین (ب)

Fig. 2. Radial gate images, (a): Anderson dam and (b): McAlpine dam

جدول ۱. پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه

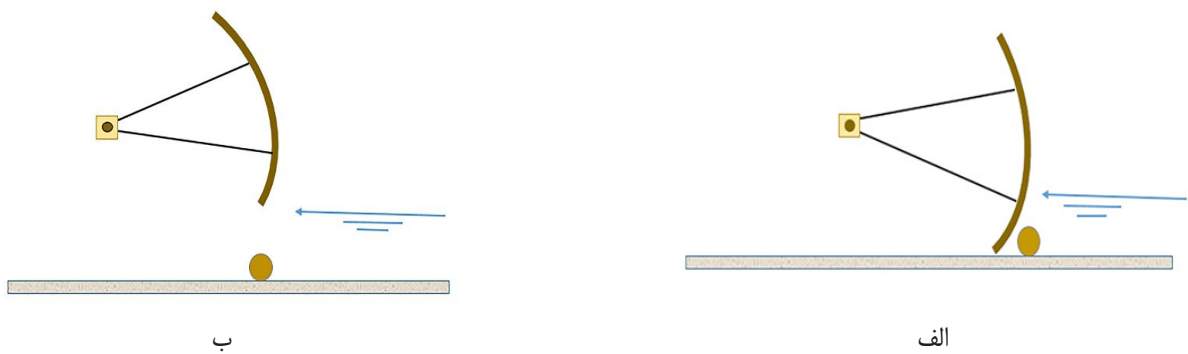
Table. 1. Study parameters

نماد	پارامتر (واحد)	نماد	پارامتر (واحد)
Q	دبی عبوری از دریچه (لیتر بر ثانیه)	H	عمق بالادست (سانتی‌متر)
q	دبی در واحد عرض دریچه (لیتر بر ثانیه بر متر)	a	ارتفاع محور دریچه تا کف (سانتی‌متر)
C_d	ضریب دبی دریچه	R	شعاع دریچه (سانتی‌متر)
USS	شیب بالادست	G	بازشدگی دریچه (سانتی‌متر)
DSS	شیب پایین‌دست	Z	ارتفاع آستانه (سانتی‌متر)
C_s	نسبت ضریب دبی دریچه با آستانه به دریچه بدون آستانه	L	طول آستانه مستطیلی و دوزنقه‌ای (سانتی‌متر)



شکل ۴. نحوه قرار گرفتن آستانه دایره ای (حالت اول)، دریچه بسته (الف) و دریچه باز (ب)

Fig. 4. Sill location under the gate (case 1), (a): closed gate and (b): open gate



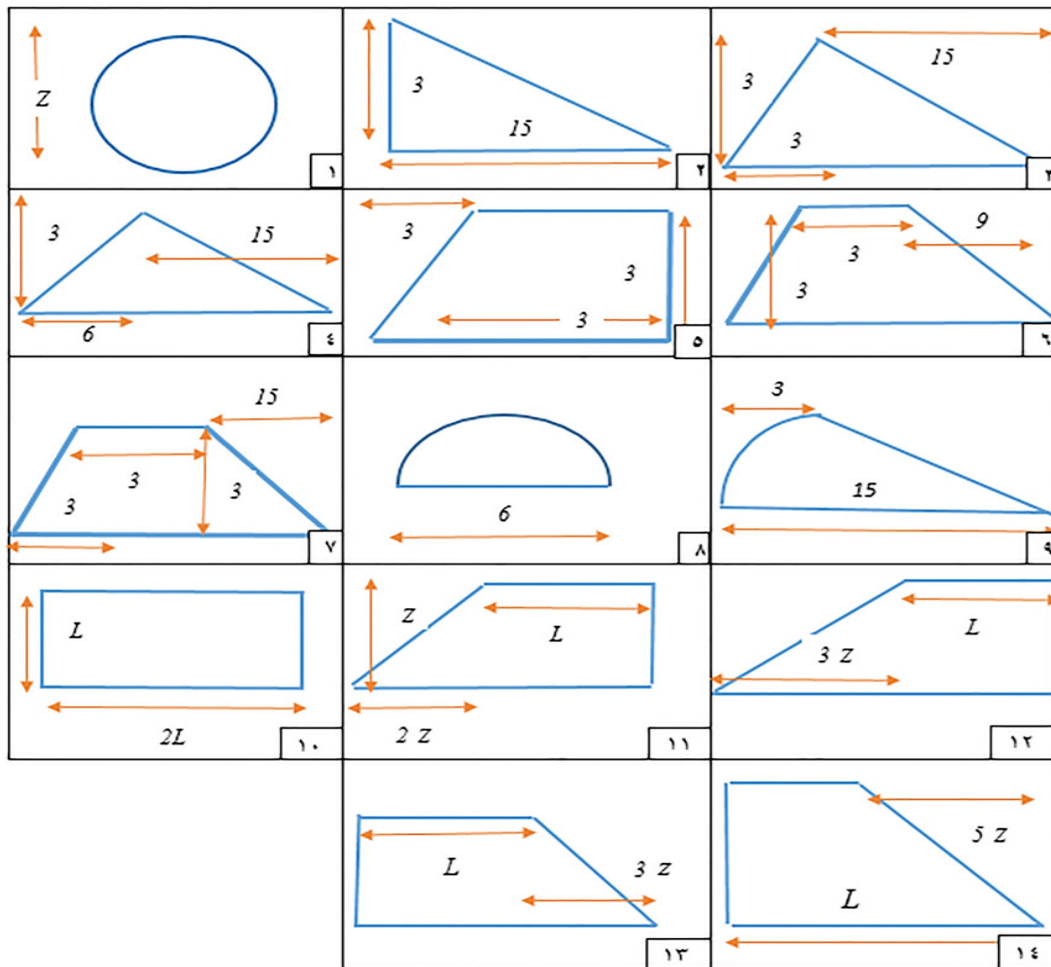
شکل ۵. نحوه قرار گرفتن آستانه دایره ای (حالت دوم)، دریچه بسته (الف) و دریچه باز (ب)

Fig. 5. Sill location under the gate (case 2), (a): closed gate and (b): open gate

جدول ۲. حالت‌هایی از آزمایش‌های انجام شده

Table. 2. Physical models used in this study

موقعیت آستانه	شماره آستانه	بازشدگی (سانتی‌متر)	توضیحات (واحد متغیرها: سانتی‌متر)	موقعیت آستانه	شماره آستانه	بازشدگی (سانتی‌متر)	توضیحات (واحد متغیرها: سانتی‌متر)
با آستانه	۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۱، ۲	۶	$a=30$	شیب پایین‌دست	۵، ۶، ۷	۳	$a=30$
			$R=30$				
تأثیر ارتفاع آستانه	۱	۱/۵	$a=30$	آستانه غیر چند وجهی	۱، ۸، ۹	۱/۵	$a=30$
			$R=30$				$R=30$
			$Z=3$				$Z=1/5, 1/2, 9, 6, 3$
تأثیر ارتفاع آستانه	۱	۳	$a=30$	آستانه غیر چند وجهی	۱، ۸، ۹	۳	$a=30$
			$R=30$				$R=30$
			$Z=3$				$Z=1/5, 1/2, 9, 6, 3$
شیب بالادست	۲، ۳، ۴	۱/۵	$a=30$	تأثیر شکل	۱، ۴، ۵	۱/۵	$a=30$
			$R=30$				$R=30$
			$Z=3$				
شیب بالادست	۲، ۳، ۴	۳	$a=30$	تأثیر شکل	۱، ۴، ۵	۳	$a=30$
			$R=30$				$R=30$
			$Z=3$				
تأثیر شکل آستانه	۱۰، ۱۲، ۱۳	۱/۵	$a=30$	تأثیر (L/Z)	۱۰	۱/۵، ۳، ۴/۵	$a=30$
			$R=30$				$R=30$
			$Z=3, 4/5$				$Z=3, 4/5$
			$L=6, 9, 15$				$L=6, 9, 15$
تأثیر شیب پایین‌دست	۱۳، ۱۴	۱/۵	$a=30$	تأثیر شیب بالادست	۱۱، ۱۲	۱/۵	$a=30$
			$R=30$				$R=30$
			$Z=3, 4/5$				$Z=3, 4/5$
			$L=6, 9, 15$				$L=6, 9, 15$



شکل ۶. نمونه‌هایی از شکل آستانه‌های به کار رفته در تحقیق (اعداد بر حسب سانتی‌متر)

Fig. 6. Cross sectional shapes of sills used in the present study (units are cm)

۲-۳- اندازه‌گیری دبی جریان و عمق آب

جریان خروجی از فلوم ابتدا وارد یک مخزن جمع‌آوری کننده جریان شده، سپس از طریق یک لوله مخروطی شکل ناقص مشبک وارد مخزن آرام‌کننده شده و در نهایت جریان از روی یک سرریز لبه تیز مستطیلی فشرده با عرض ۰/۶ متر واسنجی شده، عبور می‌کند که اندازه‌گیری دبی جریان با استفاده از این سرریز صورت می‌گیرد. رابطه دبی در این سرریز به صورت رابطه ۳ می‌باشد.

$$Q = 1000 * 1.708 (0.6 - H) * H^{1.5} \quad (3)$$

در این رابطه ارتفاع آب بالای تاج سرریز مستطیلی لبه تیز فشرده (H) بر حسب سانتی‌متر و دبی (Q) بر حسب لیتر بر ثانیه می‌باشد. برای اندازه‌گیری از یک سطح سنج که دارای دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر می‌باشد استفاده شده‌است.

۲-۲- تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام گردید. تجهیزات آزمایشگاهی به کار رفته در این تحقیق شامل موارد روبرو می‌شوند: سیستم تامین آب، کانال آزمایشگاهی، سیستم اندازه‌گیری آب، سیستم اندازه‌گیری عمق آب، مدل فیزیکی دریچه قطاعی و مدل فیزیکی آستانه. سیستم تامین آب شامل مخزنی زیرزمینی است که به یک دستگاه پمپ و یک مخزن هوایی مجهز می‌باشد. مخزن هوایی تامین کننده ۴ متر ارتفاع آب می‌باشد که این کار به وسیله سرریز داخل آن صورت می‌گیرد. این سرریز آب اضافی مخزن هوایی را به مخزن زیرزمینی برمی‌گرداند. جریان پس از فلوم به یک سرریز لبه تیز مستطیلی می‌رسد که اندازه‌گیری دبی جریان توسط این سرریز صورت می‌گیرد. فلوم به کار رفته در این تحقیق دارای طول ۶ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد.

جریان می‌باشند. در مجموع بالغ بر ۷۴۰ آزمایش روی ۴۳ مدل فیزیکی صورت گرفت.

۲-۶- تحلیل ابعادی ضریب دبی دریچه قطاعی

در بیشتر مطالعات انجام شده ضریب دبی دریچه قطاعی را در جریان آزاد تابعی از خصوصیات جریان و خصوصیات هندسی دریچه قطاعی دانسته‌اند. خصوصیات جریان مانند عمق آب بالادست و خصوصیات هندسی شامل شعاع دریچه، ارتفاع محور دریچه تا کف کانال و بازشدگی دریچه قطاعی می‌باشد. برای تعیین ضریب دبی از قضیه باکینگهام استفاده می‌شود. با توجه به این که پارامترهای موثر شامل ۴ پارامتر می‌باشد، طبق قضیه باکینگهام ضریب دبی دریچه قطاعی بدون آستانه در حالت آزاد به ترتیب زیر خواهد بود:

$$C_d = f(H, G, a, R) \quad (4)$$

چون تعداد پارامترها ۴ عدد می‌باشد، پس طبق قضیه باکینگهام ۳ عدد بی‌بعد خواهیم داشت:

$$\Pi_1 = \frac{H}{R}, \Pi_2 = \frac{a}{R}, \Pi_3 = \frac{G}{R} \quad (5)$$

با استفاده از قضیه باکینگهام، تفاضل دو عدد بدون بعد، عددی بی‌بعد می‌باشد. در این قسمت چون تفاضل اعداد بدون بعد ۲ و ۳ یک عدد بدون بعد معنی‌دار است، از آن عدد بدون بعد معنی‌دار استفاده می‌شود:

$$\theta = \Pi_2 - \Pi_3 = \frac{a-G}{R} \quad (6)$$

بنابراین ضریب دبی دریچه قطاعی بدون آستانه در جریان آزاد برابر خواهد بود با:

$$C_d = f\left(\frac{H}{R}, \theta\right) \quad (7)$$

در تحلیل ابعادی ضریب دبی دریچه قطاعی با آستانه علاوه بر عوامل خصوصیات جریان و خصوصیات دریچه، خصوصیات آستانه هم موثر می‌باشند. بنابراین خواهیم داشت:

$$C_d = f\left(\frac{H}{R}, \theta, \psi_1, \psi_2, DSS, USS\right) \quad (8)$$

در رابطه ۸ Ψ_1 و Ψ_2 به ترتیب عبارت اند از ضریب شکل آستانه و ارتفاع بی‌بعد آستانه. لازم به ذکر است که C_d در دریچه با آستانه برای محاسبه در آزمایشگاه به صورت تجربی از رابطه ۹ به دست می‌آید. در این مطالعه، عرض فلوم است که مقدار آن ۸۰ سانتی‌متر می‌باشد.

اندازه‌گیری عمق آب نیز در فلوم با یک سطح سنج متحرک که توسط ریلی حرکت می‌کند با دقت ± 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. نمایی از فلوم و دریچه قطاعی مورد استفاده در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.



الف



ب

شکل ۷. امکانات آزمایشگاهی، فلوم آزمایشگاهی (الف) و دریچه قطاعی با آستانه ذوذنقه‌ای (ب)

Fig. 7. Experimental equipment, (a): experimental flume and (b): trapezoidal sill under the gate

۲-۴- مدل فیزیکی دریچه قطاعی

مدل فیزیکی دریچه قطاعی از جنس ورق آهنی است که دارای شعاع ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. ارتفاع نصب محور دریچه نسبت به کف کانال ۳۰ سانتی‌متر است. ارتفاع قوس دریچه یا ارتفاع حداکثر آبی که در پشت دریچه می‌تواند قرار بگیرد ۴۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده‌است.

۲-۵- روش انجام آزمایش

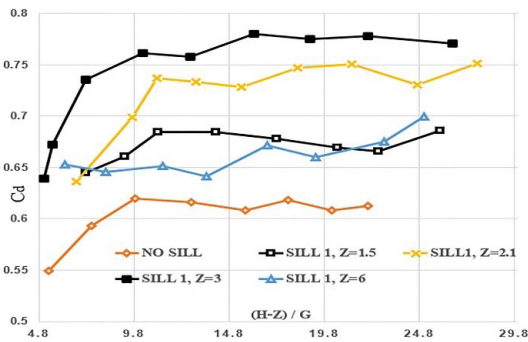
۴۳ مدل فیزیکی برای انجام آزمایش طراحی شد که برای هر مدل ۱۰ دبی مختلف مورد آزمایش قرار گرفت که در حالت جریان آزاد و از دبی حداقل به دبی حداکثر انجام شده‌اند. هر آزمایش شامل اندازه‌گیری عمق آب بالادست، عمق آب پایین‌دست، ارتفاع بازشدگی دریچه و اندازه‌گیری دبی

$$C_d = \frac{Q}{bG\sqrt{2g(H-Z)}} \quad (9) \quad \text{جریان آزاد}$$

۳- نتایج و بحث

در آزمایش‌های انجام شده برای بررسی کامل تاثیر آستانه بر ضریب دبی، آستانه‌ها به صورت‌های متعددی در کف کانال و زیر دریاچه جایگذاری شدند. در حالت اول نحوه قرار گرفتن آستانه‌ها به این صورت می‌باشد که هنگام بسته شدن دریاچه قطاعی، آستانه زیر لبه انتهایی دریاچه قرار می‌گیرد و با باز شدن دریاچه قطاعی، آستانه جلوی دریاچه خواهد بود (شکل ۵). برای این حالت آستانه‌های ۲ تا ۷ زیر دریاچه قرار گرفتند. در این حالت ضریب دبی با آستانه نسبت به ضریب دبی بدون آستانه کاهش می‌یابد. علت کاهش ضریب دبی در صورت استفاده از آستانه را می‌توان اینگونه بیان کرد که آستانه همانند یک مانع عمل می‌کند و مقدار جریان عبوری را کاهش می‌دهد. کاهش در مقدار جریان عبوری موجب افزایش افت خواهد شد که آن هم نوبه خود می‌تواند باعث کاهش ضریب دبی شود. شکل ۸ نتایج آزمایش‌های این حالت را نشان می‌دهد و گویای تفاوت ضریب دبی در مدل با آستانه و بدون آستانه می‌باشد. با توجه به اینکه آستانه در هنگام بسته بودن دریاچه در زیر آن می‌باشد، با باز شدن دریاچه دیگر آستانه زیر دریاچه نخواهد بود و جلوی دریاچه واقع می‌شود (قبل از دریاچه در مسیر جریان آب).

بازشدگی ۱/۵ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌است. همان طوری که اشکال ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند به ازای بازشدگی ثابت با افزایش ارتفاع آستانه، ضریب دبی نیز افزایش می‌یابد ولی از یک ارتفاع آستانه به بعد، ضریب دبی شروع به کاهش می‌کند (مقایسه آستانه‌هایی با ارتفاع ۱/۵، ۳ و ۶). عکس این حالت نیز صادق است. به ازای یک ارتفاع ثابت آستانه، با افزایش باز شدگی دریاچه ابتدا ضریب دبی افزایش می‌یابد تا اینکه به یک ضریب دبی بیشینه برسد و با افزایش بیش‌تر ارتفاع بازشدگی، ضریب دبی کم‌تر از ماکزیمم می‌شود.

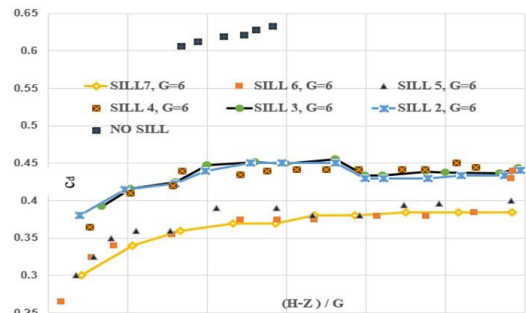


شکل ۹. تغییرات C_d نسبت به $H-Z/G$ برای باز شدگی ۱/۵ سانتی‌متر در آستانه‌های دایره‌ای

Fig. 9. Variation of C_d versus $(H-Z)/G$ in circular sills at gate opening of 1.5 cm

لازم به ذکر است که در این حالت قرارگیری و در آستانه‌های ۱ تا ۹، ضریب دبی همواره از ضریب دبی دریاچه بدون آستانه بیش‌تر است. علت این امر و تفاوت آن با نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۸ را می‌توان موقعیت آستانه و قرارگیری آن درست در زیر دریاچه (نه در جلوی دریاچه) عنوان کرد. هنگامی که دریاچه باز می‌شود، آستانه، دیگر جلوی دریاچه نیست و در زیر دریاچه قرار دارد. این عامل سبب خواهد شد که از نقش آستانه به عنوان مانع کاسته شود و چون در زیر دریاچه قرار می‌گیرد موجب این خواهد شد که همواره مقدار جریانی که زیر دریاچه قرار می‌گیرد افزایش یابد و سبب افزایش ضریب دبی شود.

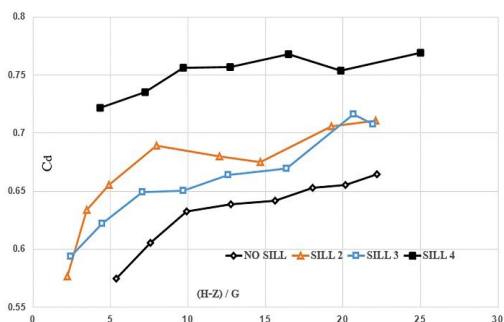
در شکل ۱۱، C_s ضریب دبی دریاچه با آستانه به ضریب دبی دریاچه بدون آستانه می‌باشد. همانطور که شکل ۱۱ نشان می‌دهد مقدار بهینه ارتفاع آستانه در هر بازشدگی G/Z تقریباً برابر با ۰/۵۵ می‌باشد. به عبارت دیگر با ازای یک ارتفاع آستانه در صورتی که بازشدگی دریاچه تقریباً برابر ۰/۵۵ ارتفاع آستانه شود، آستانه بیش‌ترین تاثیر را بر ضریب دبی دارد.



شکل ۸. تغییرات C_d نسبت به $H-Z/G$ در حالت قرارگیری آستانه به صورت نشان داده شده در شکل ۵

Fig. 8. Variation of C_d versus $(H-Z)/G$ for sill position corresponding to Fig. 5

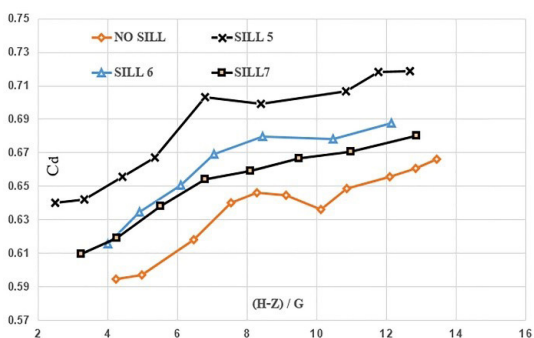
در حالت بعدی آزمایش، آستانه‌های ۱ تا ۹ زیر دریاچه قرار گرفتند. نحوه قرار گرفتن آستانه در این حالت به این صورت است که هم در هنگام باز شدن و هم در هنگام بسته بودن دریاچه، آستانه درست زیر دریاچه قرار می‌گیرد، نه قبل و نه بعد آن (شکل ۴). در این حالت به تاثیر ارتفاع و شکل دریاچه بر روی ضریب دبی پرداخته شد. برای بررسی تاثیر ارتفاع آستانه بر ضریب دبی، چهار آستانه دایره‌ای به ارتفاع ۲/۱، ۳، ۶ و ۹ سانتی‌متری برای بازشدگی ۳ سانتی‌متری و ۴ آستانه دایره‌ای به ارتفاع ۱/۵، ۲/۱، ۳ و ۶ در



شکل ۱۲. تغییرات C_D نسبت به $(H-Z)/G$ برای شیب‌های بالادست متفاوت آستانه مثلثی و در بازشدگی $1/5$ سانتی‌متر

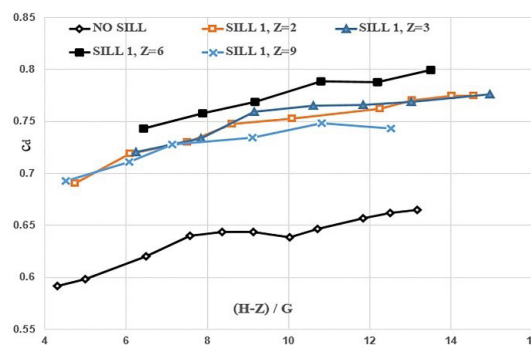
Fig. 12. Variation of C_D versus $(H-Z)/G$ for different upstream slopes of triangular sills for a gate opening of 1.5 cm

برای درک تأثیر شیب پایین‌دست بر ضریب دبی از آستانه دوزنقه ای با شیب بالادست ثابت $1:1$ و شیب‌های پایین‌دست $H:5$ (آستانه شماره ۷)، $H:3$ (آستانه شماره ۶) و $H:10$ (آستانه شماره ۵) برای بازشدگی $1/5$ و 3 سانتی‌متر استفاده شد. نتایج در شکل ۱۳ نشان داده شده‌است. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که شیب پایین‌دست نیز به نوبه خود بر روی ضریب دبی تأثیر دارد. شیب $H:10$ بیش‌ترین تأثیر را بر ضریب دبی دارد (آستانه شماره ۵). دلیل این امر این است که در شیب $H:10$ آب به یکباره از روی آستانه رها می‌شود و باعث ایجاد جریان مکشی در جلوی آستانه می‌گردد. ولی افزایش شیب باعث می‌شود که جریان‌های چرخشی در جلوی آستانه مستهلک شود و ضریب دبی کاهش یابد (مقایسه آستانه ۵، ۶ و ۷). همچنین با توجه به شکل ۱۳ مشاهده می‌شود با کاهش باز شدگی درپچه، شیب افزایش ضریب دبی دچار کاهش خواهد شد که این مقدار کاهش در درپچه بدون آستانه که آب با سرعت کمی نسبت به درپچه با آستانه به ورودی نزدیک می‌شود، قابل ملاحظه می‌باشد.



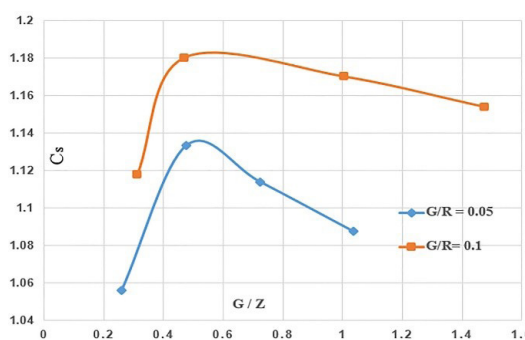
شکل ۱۳. تغییرات C_D نسبت به $(H-Z)/G$ برای آستانه‌های دوزنقه‌ای با شیب پایین‌دست متفاوت در بازشدگی 3 سانتی‌متر

Fig. 13. Variation of C_D versus $(H-Z)/G$ for different downstream slopes of trapezoidal sills at gate opening of 3 cm



شکل ۱۰. تغییرات C_D نسبت به $H-Z/G$ برای بازشدگی ۳ سانتی‌متر در آستانه‌های دایره‌ای

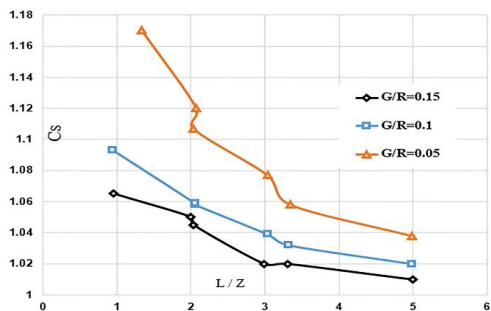
Fig. 10. Variation of C_D versus $(H-Z)/G$ in circular sills at gate opening of 3 cm



شکل ۱۱. تغییرات C_s نسبت به G/Z

Fig. 11. Variation of C_s versus G/Z

برای روشن شدن تأثیر شیب بالادست آستانه بر ضریب دبی، سه آستانه مثلثی با شیب پایین‌دست ثابت $H:5$ و شیب‌های بالادست $H:10$ (آستانه شماره ۲)، $H:1$ (شماره ۳) و $H:2$ (شماره ۴) برای بازشدگی‌های $1/5$ و 3 سانتی‌متر بررسی شدند. نتایج در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است. همانطور که شکل ۱۲ نشان می‌دهد با افزایش شیب بالادست، ضریب دبی کاهش می‌یابد. افزایش شیب بالادست موجب جداشدگی جریان خواهد شد که این عامل باعث کاهش ضریب دبی می‌شود. با کاهش شیب بالادست، ضریب دبی افزایش خواهد یافت که علت این امر، کاهش جداشدگی جریان روی آستانه می‌باشد. بنابراین باید دقت نمود که همواره از آستانه ای با شیب بالادست ملایم‌تر از آستانه با شیب بالادست قائم استفاده شود تا روی آستانه و در شیب بالادست آن کم تر شاهد جداشدن جریان و به دنبال آن کاهش ضریب دبی باشیم (مقایسه آستانه مثلثی شماره ۲، ۳ و ۴).

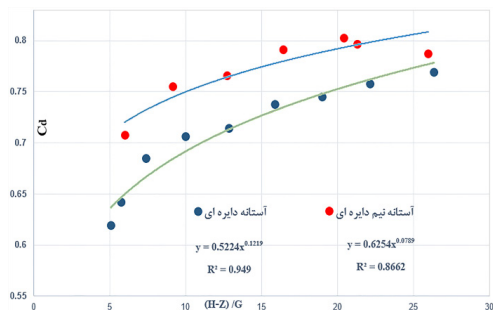


شکل ۱۵. تاثیر L/Z بر ضریب دبی در اشکال مستطیلی و دوزنقه‌ای

Fig. 15. The effect of L/Z on discharge coefficient in rectangular and trapezoidal sills

در شکل ۱۵، C_s ضریب دبی درپچه با آستانه به ضریب دبی درپچه بدون آستانه می‌باشد. با توجه به شکل درهمه حالت‌ها، آستانه شماره ۱۰ باعث افزایش ضریب دبی درپچه با آستانه نسبت به ضریب دبی درپچه بدون آستانه می‌شود. همانطور که شکل ۱۵ نشان می‌دهد، برای L/Z های کم‌تر، افزایش ضریب دبی، بیش‌تر و برای L/Z های بیش‌تر، ضریب دبی کم‌تر خواهد بود. آستانه‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای باعث کاهش افت و توزیع یکنواخت‌تر جریان ورودی به سمت درپچه می‌گردند و این امر باعث افزایش ضریب دبی می‌شود. همچنین دلیل افزایش ضریب دبی در L/Z های کم‌تر به L/Z های بیش‌تر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که به ازای های ثابت با افزایش Z ، چون توزیع جریان ورودی یکنواخت می‌گردد بنابراین باعث افزایش ضریب دبی می‌شود.

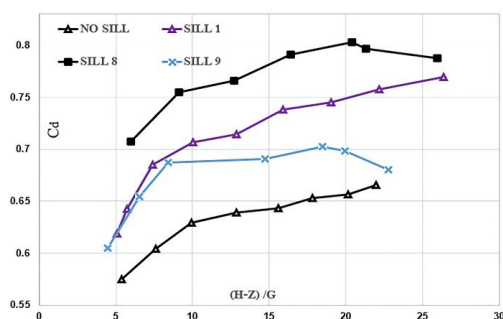
با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته و نتایج حاصل از آن، می‌توان گفت که آستانه‌های دایره‌ای، به خصوص آستانه نیم‌دایره‌ای بیش‌ترین تأثیر را بر ضریب دبی دارند. پس سعی بر این شد که رابطه‌هایی ارائه شود که در صورت استفاده از آستانه‌های دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای بتوان از این رابطه‌ها در طراحی آستانه استفاده کرد. این روابط در شکل ۱۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۶. روابط ارائه شده برای طراحی آستانه دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای

Fig. 16. Presented equations for designing of circular and semi-circular sills

برای بررسی آستانه‌های غیر چند وجهی سه آستانه دایره‌ای (آستانه شماره ۱)، نیم‌دایره‌ای (آستانه شماره ۸) و ربع دایره‌ای دمدار با شیب پایین دست $H:5$ (آستانه شماره ۹) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است. این شکل نشان می‌دهد که آستانه نیم‌دایره‌ای بیش‌ترین تأثیر را بر روی ضریب دبی درپچه دارد و آستانه ربع‌دایره‌ای دمدار کم‌ترین تأثیر را دارد. در آستانه دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای با توجه به شکل آستانه، میزان جداسدگی جریان کم‌تر از آستانه دایره‌ای دمدار خواهد بود پس می‌توان میزان ضریب دبی بیش‌تری از آن انتظار داشت. همچنین به علت دایره‌ای شکل بودن آستانه شماره ۱ و میزان افت زیاد در برخورد با قسمت پایین دایره، ضریب دبی در مقایسه با شکل نیم‌دایره کم‌تر خواهد بود.



شکل ۱۴. تاثیر آستانه‌های غیر چندوجهی بر تغییرات C_d برای باز شدگی $1/5$ سانتی‌متر

Fig. 14. The effect of non-polyhedral sills on C_d for gate opening of 1.5 cm

در حالت بعدی آزمایش، آستانه‌هایی به شکل‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای (آستانه‌های ۱۰ تا ۱۴) در زیر درپچه قطاعی قرار گرفتند. نحوه قرار گرفتن آن‌ها در زیر درپچه قطاعی به این صورت است که لبه درپچه در صورت بسته بودن مماس بر ابتدای آستانه بوده و با باز شدن درپچه آستانه زیر درپچه قرار می‌گیرد (شکل ۵). برای بررسی تأثیر بر ضریب دبی درپچه‌های قطاعی، آستانه شماره ۱۰ با طول‌های ۶، ۹ و ۱۵ سانتی‌متر و های ۳ و ۴/۵ سانتی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج در شکل ۱۵ نشان داده شده‌است.

و ربع دایره‌ای دمدار در صورتی که آستانه همواره زیر دریچه قرار گیرد آستانه نیم‌دایره‌ای بیش‌ترین تاثیر را بر روی ضریب دبی جریان دارد.

- برای بررسی تاثیر شکل آستانه بر روی ضریب دبی، آستانه نیم‌دایره‌ای که در بین آستانه‌های غیر چند وجهی بیش‌ترین تاثیر را داشت و آستانه مثلثی با شیب پایین دست $H:1:0$ و شیب بالادست $H:2:1$ و همچنین آستانه مثلثی با شیب بالادست $H:1:1$ و شیب پایین دست $H:1:0$ در مطالعه مورد استفاده قرار گرفت که نتایج نشان داد آستانه دایره‌ای بیش‌ترین تاثیر را بر افزایش ضریب دبی دارد.

- در آستانه‌های مثلثی به ازای L/Z کم‌تر ضریب دبی بیش‌تر و به ازای L/Z بیش‌تر ضریب دبی کم‌تر خواهد شد. هم‌چنین با افزایش بازشدگی دریچه تاثیر L/Z هم کم‌تر خواهد شد.

- در بین آستانه‌های ذوزنقه‌ای، آستانه با شیب بالادست $H:3:1$ بیش‌ترین تاثیر را بر روی ضریب دبی دارد. در بررسی تاثیر شیب پایین دست آستانه‌های ذوزنقه‌ای این نتیجه حاصل شد که شیب $H:3:1$ بیش‌ترین تاثیر را بر افزایش ضریب دبی دارد.

مراجع

- [1] M.K. Beyrami, Water conveyance structure, Isfahan University Press, 2006.
- [2] A. Negm, A. Alhamid, A. Elsaid, Submerged flow below sluice gate with sill, Egyptian society of engineers, 26(4) (1998) 31-36.
- [3] A. Sarhan, Analysis of submerged flow under a gate with prismatic sill, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 8(10) (2013) 849-856.
- [4] Y. Saad, Effect of circular-crested sill shapes under sluice gate on supercritical free flow characteristics, Ain Shams University, Engineering Bulletin, 42(4) (2007) 161-173.
- [5] A. El-Saiad, E. Abdel-Hafiz, M. Hammad, Effect of sill under gate on the discharge coefficient, Journal of Egyptian Society of Engineers, 30(2) (1991) 13-16.
- [6] S. Neveen, Flow Under a Submerged Gate With a Circular- Crested Sill, Nile Basin Water Science & Engineering Journal, 4(2) (2011) 1-9.
- [7] Y. Aminpour, M. Yasi, J. Farhoodi, A. Khalili Shayan, Experimental and Field Investigation of the Use of Radial gates as Flow Measurement Structures at Free and Submmerged Flow Conditions, Journal of Water and Soil, 28(4) (2014) 596-607.
- [8] E.M. Shahrokhnia, M. Javan, Discharge coefficient estimation for Arched gates, Journal of Hydraulic Engineering, 1(1) (2005) 1-11.

همان طور که شکل ۱۶ نشان می‌دهد با داشتن $(H-Z/L)$ می‌توان ضریب دبی را در آستانه‌های دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای با دقت بالایی محاسبه کرد. ضریب تبیین R^2 نشان‌دهنده دقت بالای روابط ارائه شده می‌باشد.

در مطالعه ارائه شده به منظور بررسی کامل موضوع، مدل‌های مختلفی طرح شد و تاثیر پارامترهای مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. آستانه‌ها و ویژگی‌های مورد مطالعه در این تحقیق عبارتند از: الف) تاثیر قرارگیری آستانه‌ها به صورت موقعیت ارائه شده در شکل ۴ بر روی ضریب دبی (آستانه‌های ۲ تا ۷)، ب) تاثیر ارتفاع آستانه واقع در موقعیت ارائه شده در شکل ۵ بر ضریب دبی (آستانه‌های دایره‌ای با ارتفاع و بازشدگی مختلف)، پ) بررسی شکل آستانه‌ها و تاثیر آن بر روی ضریب دبی که شامل: ۱. در آستانه‌های چند وجهی موارد مورد بررسی عبارت‌اند از: تاثیر شیب بالادست (آستانه‌های ۲، ۳ و ۴ برای بازشدگی‌های مختلف دریچه) و تاثیر شیب پایین دست (آستانه‌های ۵، ۶ و ۷ برای باز شدگی‌های مختلف دریچه)، ۲. در آستانه‌های غیر چند وجهی (آستانه‌های ۱، ۸ و ۹)، ۳. تاثیر شکل آستانه در آستانه‌های ۱، ۴ و ۵ برای بازشدگی‌های مختلف، ت) در این بخش به بررسی آستانه‌های ذوزنقه‌ای و مستطیلی پرداخته شد که موارد مورد بررسی عبارت‌اند از: ۱. بررسی تاثیر نسبت (آستانه ۱۰ با طول و ارتفاع مختلف)، ۲. بررسی شیب بالادست (آستانه‌های ۱۱ و ۱۲ با طول و ارتفاع مختلف)، ۳. بررسی شیب پایین دست (آستانه‌های ۱۳ و ۱۴ با طول و ارتفاع مختلف)، ۴. بررسی شکل آستانه‌ها (آستانه‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۳). برای هر مدل آزمایش‌ها با ۱۰ دبی مختلف صورت گرفت که در حالت جریان آزاد و از دبی حداقل به دبی حداکثر انجام شد. در مطالعه ارائه شده به سبب محدودیت در امر نگارش، امکان بررسی همه حالت‌ها نبوده و تنها طرح‌های مهم ذکر شده‌اند، ولی در بخش نتیجه‌گیری به نتایج بدست آمده از بررسی همه حالت‌ها اشاره شده‌است. حالت‌های ذکر شده در این بخش در جدول ۲ نیز ارائه شده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در زیر بیان می‌شود:

- آستانه‌های مثلثی و دایره‌ای در صورتی که در موقع بسته بودن مماس بر دریچه بوده و با باز شدن دریچه در جلوی دریچه قرار می‌گیرند، نه تنها باعث افزایش ضریب دبی نمی‌گردند بلکه چون به صورت یک مانع عمل می‌کنند ضریب دبی را کاهش می‌دهند. در آستانه‌های مثلثی و دایره‌ای که با باز شدن دریچه در مقابل دریچه قرار می‌گیرند، به ازای یک باز شدگی ثابت با افزایش ارتفاع آستانه، ضریب دبی نیز افزایش خواهد یافت ولی با افزایش ارتفاع آستانه از یک ارتفاع بهینه، از مقدار ضریب دبی کاسته می‌شود. نسبت ارتفاع بهینه باز شدگی دریچه به ارتفاع آستانه (G/Z) برابر $0/55$ می‌باشد.

- آستانه‌های مثلثی در صورتی که آستانه همواره در زیر باز شدگی دریچه قرار گیرد، شیب بالادست $H:2:1$ و شیب پایین دست $H:1:0$ بیش‌ترین تاثیر را بر ضریب دبی دارد.

- در آستانه‌های غیر چندوجهی شامل آستانه‌های دایره‌ای، نیم‌دایره‌ای

- [12] J. Shaker, Submerged Flow Analysis below a Vertical Gate with Stepped Sill, *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 3(5) (2014) 41-52.
- [13] M. Salama, Flow below sluice gate with sill, *Journal of Egyptian Society of Engineers*, 26(4) (1987) 31-36.
- [14] M. EL-Ganainy, M. Abourehim, F. Fitiany, Radial gates with gate sill for irrigation structure, *Alexandria engineering journal*, 35(6) (1996) 303-309.
- [15] US ARMY CORPS OF ENGINEERING, Washington, D.C., United States, 2011.
- [9] M. Negm, M. Abdelaal, M. Salem, Characteristics of submerged flow below gate with sill in non-prismatic channel, in: 6th International Water Technology Conference, Alexandria, Egypt, 2001.
- [10] F. Fahmy Salah, Hydraulics of submerged radial gates with a sill, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, (2017).
- [11] M. Aydin, A. Emre, Numerical modelling of sluice gates with different sill types under submerged flow conditions *Journal of Science and Technology*, 7(1) (2017) 1-6.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Nouri, F. Salmasi, Experimental Investigation of Discharge Coefficient in Tainter (Radial) Gate with Sill in Free Flow Conditions, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(1) (2019) 157-168.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13113.5329

