

تحلیل آبگذری و شرایط جریان در سرریزهای دریاچه‌دار کشویی

ابوالفضل برقی خضرو^۱ و علیرضا وطن‌خواه^{۲*}

۱ و ۲- به‌ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، کرج، ایران
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۶

چکیده

دریاچه‌های کشویی در تاج سرریزهای اوجی با ارتفاع زیاد (سدهای تنظیمی) یا با ارتفاع کم (به‌عنوان آستانه) به‌منظور کنترل بهتر جریان طراحی و استفاده می‌شوند. در حالت دوم، متناسب با ترکیب‌های مختلف هندسه سرریز، بازشدگی دریاچه، عمق بالادست و عمق پایین‌دست، چهار شرط مختلف جریان قابل تشخیص است: الف) جریان کنترل نشده آزاد، ب) جریان کنترل نشده مستغرق، ج) جریان کنترل شده آزاد و د) جریان کنترل شده مستغرق. تعیین حد تبدیل هر یک از این شرایط جریان به یکدیگر در کاربرد معادلات دبی در هر وضعیت سودمند خواهد بود. در این تحقیق، با استفاده از برداشت‌های آزمایشگاهی روی دو سرریز اوجی با ارتفاع مختلف و نیز از داده‌های آزمایشگاهی مدل سرریز دریاچه‌دار پروژه کنترل آب فلوریدای جنوبی و مرکزی، روابطی برای تعیین حدود تبدیل و تعیین آبگذری در شرایط چهارگانه ارائه شده است. در شرایط جریان کنترل نشده آزاد، میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تعیین دبی از روابط پیشنهادی ۱/۹۵ درصد، در شرایط جریان کنترل شده آزاد و مستغرق به‌ترتیب معادل ۲ و ۵ درصد است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد حد تبدیل جریان کنترل نشده به کنترل شده هنگامی است که عمق بالادست از حدود ۱/۴۶ برابر بازشدگی دریاچه افزایش یابد. با افزایش ارتفاع پایین‌دست و کاهش ارتفاع بالادست سرریز نیز آستانه استغراق نسبی سرریز و میزان آبگذری افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

آستانه استغراق، اندازه‌گیری، سازه هیدرولیکی، کنترل جریان

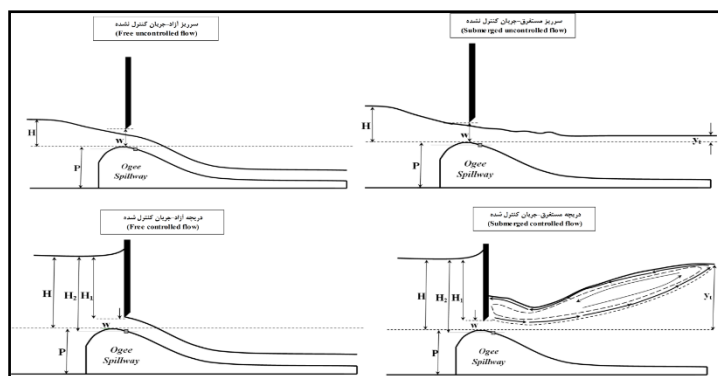
مقدمه

دریاچه‌دار، مجموعه‌ای از امتیازات هیدرولیکی را با تاکید بر خصوصیات جریان توأم از روی سرریز و جریان روزه از محل بازشدگی دریاچه در اختیار قرار خواهد داد. سرریزهای اوجی گاهی می‌توانند با ارتفاع کم در کانال‌های آبیاری به‌عنوان یک آستانه برای استقرار دریاچه عمل کنند. از سوی دیگر این سرریزها با ارتفاع بیشتر و در ترکیب با دریاچه‌های کشویی روی تاج آنها می‌توانند به‌عنوان یک سازه به‌منظور انتقال کنترل‌شده جریان به پایین‌دست در رودخانه‌ها به‌کار روند. در حالت کلی، دریاچه‌دار کردن سرریزهای اوجی برای دستیابی به این هدف‌هاست: ۱- کنترل تدریجی سیلاب به

مجموعه سازه‌های هیدرولیکی برای کنترل و اندازه‌گیری جریان از یک دیدگاه به دو بخش جریان روگذر (سرریز) و جریان زیرگذر (دریاچه) قابل تقسیم است. این سازه‌ها، بسته به اهداف مورد نظر، با ویژگی‌های خاص خود در کانال‌های اصلی (تنظیم سطح آب) و آبگیرها به‌کار می‌روند. از پرکاربردترین نوع سرریزها می‌توان به سرریز اوجی اشاره کرد. از یک‌سو دریاچه‌های کشویی از ساده‌ترین سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شوند که در سطح کانال‌های آبیاری به‌طور گسترده به‌کار می‌روند. ترکیب عملکرد این دو سازه تحت عنوان سرریزهای

پایین‌دست، ۲- افزایش میزان سطح آب در نتیجه افزایش تراز ذخیره آب در مخزن بالادست و ۳- کاهش ارتفاع دریچه‌ها و در نتیجه نیاز به نیروی کمتر برای مانور دریچه‌ها. دریچه‌های کشویی در ترکیب با سرریزهای اوجی می‌توانند به شکل‌های مختلف به کار روند. در سدهای تنظیمی، به دلیل اختلاف ارتفاع قابل توجه سطح پایاب و تاج سرریز، امکان استغراق تاج سرریز عملاً وجود ندارد و تغییر در شرایط جریان در مقطع پایین‌دست نیز تأثیر قابل توجهی بر میزان بده عبوری از مقطع سازه نخواهد داشت. در کانال‌های آبیاری، سرریزهای اوجی با ارتفاع کم مانند آستانه عمل می‌کنند و محلی برای نصب دریچه کشویی روی تاج خود فراهم می‌آورند. در این حالت، به دلیل اختلاف ارتفاع محل نصب دریچه و تراز کف کانال بالادست و پایین‌دست، در عمل امکان استغراق تاج سرریز و افزایش عمق پایاب تا لبه بازشدگی دریچه وجود دارد. در چنین وضعیتی، علاوه بر تأثیر عوامل تشریح شده فوق بر خصوصیات هیدرولیکی جریان عبوری از سازه سرریز دریچه‌دار، تأثیر استغراق و افزایش میزان عمق پایاب نیز بر پیچیدگی موضوع خواهد افزود. تأثیر استغراق و عمق پایاب بر مقدار دبی و مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از سرریزهای

اوجی دریچه‌دار با ارتفاع کم از چند دیدگاه قابل بررسی است. حضور سرریز اوجی کم‌ارتفاع مانند یک برآمدگی نسبت به کف کانال، مشخصات جریان عبوری از محل بازشدگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. رژیم جریان عبوری از محل دریچه وابسته به میزان بازشدگی و بده جریان می‌تواند از نوع زیربحرانی یا فوق‌بحرانی باشد. علاوه بر این وجود برآمدگی و هندسه آن در مقاطع بالادست و پایین‌دست الگوی توزیع سرعت عمقی جریان در مقطع بالادست و به‌ویژه در محدوده جت فوق‌بحرانی خروجی از محل بازشدگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر این اساس و به دلیل تغییر در مشخصات جریان در مقطع تنگ‌شدگی پس از دریچه، پیش‌بینی می‌شود حضور یک سرریز اوجی کم‌ارتفاع تفاوت زیادی در مقدار بده و الگوی توزیع سرعت نسبت به شرایط مانور دریچه کشویی در اتصال مستقیم با کف کانال ایجاد کند. در حالت کلی چهار رژیم جریان مختلف برای جریان عبوری از سرریز دریچه‌دار برحسب عمق بالادست، بازشدگی دریچه، ارتفاع سرریز و عمق پایاب قابل تفکیک است (Ansar & Chen, 2009). شکل ۱، طرحی شماتیک از انواع الگوی جریان در سرریز دریچه‌دار کشویی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- چهار حالت مختلف در عملکرد دریچه‌های کشویی واقع روی تاج سرریزهای اوجی با ارتفاع کم

Fig. 1- Four different operation cases of sluice gates located on low height ogee spillway

عبوری از سازه سرریز دریچه بررسی کردند. در این تحقیق جریان به سه حالت زیربحرانی، بحرانی و فوق بحرانی تقسیم و با رسم نمودار ضریب بده در برابر پارامترهای مورد مطالعه، معادله‌ای برای تخمین ضریب بده ارائه شد. برای جریان فوق بحرانی شیب وجه ۵:۱ و برای جریان زیربحرانی شیب قائم به عنوان شیب بهینه انتخاب گردید. با افزایش استغراق، ضریب بده کاهش می‌یابد.

انصار و چن (Ansar & Chen, 2009) داده‌های صحرایی حاصل از ۹۰ سازه سرریز-دریچه، شامل دو نوع سرریز اوجی و سرریز تخت را مطالعه کردند. در این مطالعه، جریان از زیر سازه سرریز دریچه به ۴ نوع طبقه‌بندی شده است: ۱- سرریز آزاد، ۲- سرریز مستغرق، ۳- روزنه آزاد و ۴- روزنه مستغرق.

با داشتن شرایط و زمان وقوع هر یک از انواع جریان و با بهره‌گیری از روش تحلیل ابعادی، برای هر یک از حالت‌های فوق معادلاتی ارائه و ضرایب این معادلات با استفاده از داده‌های صحرایی واسنجی شدند. این محققان رابطه ۲ را به منظور تعیین دبی سرریز اوجی دریچه‌دار در تمام شرایط جریان ارائه داده‌اند.

$$\frac{y_c}{D^{2/3} h_u^{1/3}} = \left(c_1 + c_2 \frac{D}{H_2} \right) \left(1 - \frac{h_d}{h_u} \right)^{c_3} \quad (2)$$

که در آن،

$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}}$ (b عرض سرریز و g شتاب ثقل)، h_u و h_d به ترتیب عمق‌های بالادست و پایین‌دست نسبت به تاج سرریز؛ و D حداقل مقدار بین مقادیر بازشدگی دریچه (w) و h_u ، c_1 ، c_2 و c_3 نیز ضرایبی تجربی هستند. مقدار این ضرایب را انصار و چن (Ansar & Chen, 2009) بر اساس مجموعه داده‌های برداشت شده صحرایی از عملکرد ۹۰ سازه

با وجود مطالعات کافی در زمینه خصوصیات جریان عبوری از دریچه‌های کشویی در کانال‌های آبیاری بدون حضور آستانه، مطالعات در خصوص ارزیابی مشخصات جریان عبوری از سرریزهای اوجی کم ارتفاع در حضور دریچه‌های کشویی در تاج آنها به‌ویژه تحت شرایط جریان مستغرق محدود است. در شرایط جریان مستغرق، حضور آستانه توزیع عمقی سرعت در مقطع بعد از دریچه را تغییر می‌دهد که بر میزان آبگذری سازه موثر است. مهندسان ارتش امریکا رابطه ۱ را برای تعیین دبی عبوری از سرریزهای اوجی دریچه‌دار ارائه داده‌اند (Multer, 1963).

$$\frac{Q_G}{Q} = \frac{\left(H_2^{\frac{3}{2}} - H_1^{\frac{3}{2}} \right)}{H^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

که در آن،

Q_G = بده سرریز دریچه‌دار؛ Q = بده سرریز برای هد طراحی متناظر بدون حضور دریچه؛ H_2 = عمق جریان نسبت به نشیمنگاه دریچه روی سرریز؛ H_1 = عمق جریان نسبت به لبه دریچه و H = عمق جریان نسبت به تاج سرریز در شرایط نبود عملکرد در دریچه (عملکرد سرریز). هگر و برمن (Hager & Bremen, 1988) با بهره‌گیری از معادلات ارائه شده برای جریان عبوری از سازه سرریز-دریچه (Anon, 1972) و با معرفی ضرایب نیمه تجربی، نسبت بده عبوری از دریچه به بده عبوری از سرریز را در شرایط بار آبی طراحی، تابعی از بار آبی موجود به بار آبی طراحی و بازشدگی نسبی ارائه کردند. این محققان سرانجام نموداری برای به‌دست آوردن بده جریان بر حسب پارامترهای فوق ارائه کردند. نجم (Negm, 1995) تأثیر شیب وجه بالادست، شیب وجه پایین‌دست، زاویه واگرایی حوضچه آرامش، عمق پایاب و عمق بالادست جریان را بر ضریب بده

دریچه‌دار کشویی بررسی کردند. این محققان پس از واسنجی مدل عددی پیشنهادی بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی سرریز دریچه‌دار کشویی در شرایط جریان سرریز و روزنه، بر اساس مجموعه برداشت‌های صحرایی از عملکرد سرریز اوجی دریچه‌دار در فلوریدای جنوبی، کاربرد این مدل را جایگزینی مطلوب از ساخت مدل‌های فیزیکی یا اندازه‌گیری‌های صحرایی برای توسعه روابط ریتینگ به‌منظور پایش برخط جریان در سازه‌های کنترل آب دانسته‌اند.

چن و انصار (Chen & Ansar, 2017) کاربرد روابط عمومی پیش ارائه شده توسط انصار و چن (Ansar & Chen, 2009) به‌منظور تعیین آبگذری سرریز اوجی دریچه‌دار کشویی را بر مبنای ۶۱ سری داده آزمایشگاهی و ۹۴ سری برداشت صحرایی از عملکرد ۴ سازه سرریز اوجی دریچه‌دار کشویی در فلوریدای جنوبی بررسی کردند. بر مبنای کاربرد رابطه عمومی ارائه شده و استفاده از همان ضرایب تجربی پیشنهادی انصار و چن (Ansar & Chen, 2009)، خطای نسبی تعیین دبی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی ۲/۲ درصد به‌دست آمد. در این تحقیق و بر اساس داده‌های صحرایی چهار سازه سرریز دریچه‌دار، میانگین خطای نسبی تعیین دبی در حدود ۵ درصد به‌دست آمده است. جالب توجه است که این خطا به‌واسطه تعیین ضرایب تجربی C_1 ، C_2 و C_3 برای هر سازه به تفکیک روی داده است و این مسئله ارائه رابطه‌ای عمومی با ضرایب عمومی را برای تعیین دبی سرریزهای اوجی دریچه‌دار در شرایط چهارگانه با چالش مواجه می‌کند.

به‌رغم مطالعات محدود در زمینه آبگذری سرریزهای دریچه‌دار در شرایط جریان روزنه، در خصوص آبگذری سرریزهای اوجی در شرایط جریان

سرریز دریچه‌دار در فلوریدای جنوبی به‌ترتیب معادل ۰/۲۸، ۰/۳۰ و ۰/۹۱ تعیین کردند. خطای حاصل از این واسنجی در حدود ۶/۱ درصد برای جریان آزاد و ۷ درصد برای جریان مستغرق گزارش شد.

تعیین حد تبدیل جریان روزنه و جریان بی‌روزنه چالشی مهم در تعیین آبگذری دریچه‌های کشویی است. تاکنون معیار متقنی در تعیین حد تبدیل جریان بی‌روزنه به روزنه برای جریان عبوری از دریچه‌های کشویی در شرایط نصب روی آستانه یا سرریز اوجی، ارائه نشده است. در شرایط نبود آستانه و نصب دریچه بر کف کانال، آلمیناگورتا و مرکلی (Alminagorta & Merkley, 2009)، گفته‌اند جریان روزنه هنگامی برقرار است که عمق بازشدگی دریچه از ۰/۸۳ برابر عمق بالادست کمتر باشد. همچنین جریان بی‌روزنه هنگامی برقرار خواهد بود که نسبت بازشدگی به عمق بالادست دریچه از ۱ بیشتر باشد. نسبت‌های بازشدگی به عمق بالادست در محدوده ۰/۸۳ تا ۱ به شرایط جریان انتقالی بین جریان‌های روزنه و بی‌روزنه مربوط می‌شود.

حسین و همکاران (Hussain et al., 2014) ضمن معرفی پارامترهای موثر بر آبگذری سرریزهای روزنه‌ای، معادله تحلیل آبگذری این سازه را در شرایط طراحی به عنوان سامانه تخلیه سیلاب در سدهای بلند و تحت تأثیر انحنای خطوط جریان نزدیک‌شونده بررسی کرده‌اند. این محققان اضافه می‌کنند که انتقال از جریان بی‌روزنه به جریان روزنه هنگامی رخ می‌دهد که ارتفاع سطح آب مخزن بالادست نسبت به رقوم تاج سرریز حداقل ۱/۷-۱/۵ برابر میزان بازشدگی دریچه باشد.

زنگ و همکاران (Zeng et al., 2017a; b) کاربرد مدل‌های تلاطمی و روش‌های VOF را به‌منظور توسعه روابط دبی-اشل سرریزهای

در شرایط جریان مستغرق و محدوده استغراق‌های قابل توجه مطالعات بیشتر شود.

مروری بر مطالعات پیشین، نیاز به بررسی بیشتر در خصوص تحلیل آبگذری سرریزهای دریاچه‌دار را نشان می‌دهد به‌خصوص آن‌که در مطالعات پیشین، آستانه تبدیل جریان سرریز آزاد به سرریز مستغرق، جریان سرریز به روزنه و جریان روزنه آزاد به روزنه مستغرق، به‌صورت مدون ارائه نشده است. روابطی که محققان پیشین برای تعیین آبگذری در شرایط جریان روزنه مستغرق، ارائه داده‌اند، فاقد کاربرد عمومی هستند و ضرایب تجربی پیشنهادی برای هر سازه سرریز دریاچه‌دار با ابعاد خاص ارائه شده است. با توجه به امکان ایجاد شرایط چهارگانه جریان در سرریزهای دریاچه‌دار کشویی، به‌منظور تعیین آبگذری نیاز خواهد بود تا معیارهای شناسایی شرایط تبدیل هر یک از وضعیت‌های جریان به یکدیگر ارائه شود. معیارهای ارائه شده باید مستقل از پارامتر مجهول (دبی) باشد. پس از شناسایی شرایط جریان، لازم است معادلات تعیین دبی در هر وضعیت جریان ارائه شود.

در این تحقیق بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده روی دو نوع سرریز اوجی دریاچه‌دار با دو ارتفاع مختلف، شرایط حدی تبدیل وضعیت جریان و معادلات آبگذری در حالات چهارگانه، ارائه شده است. علاوه بر آن، به‌واسطه استفاده از مدل آزمایشگاهی سرریز دریاچه‌دار پروژه کنترل آب فلوریدای مرکزی و جنوبی، ضمن تأثیر ارتفاع بالادست و پایین‌دست سرریز بر آبگذری و تحلیل شرایط حدی، معادلات تعیین بده و آستانه استغراق در شرایط تفاوت ارتفاع بالادست و پایین‌دست سرریز ارائه شده است.

کنترل نشده مطالعات بیشتری شده است. تولیس و نیلسون (Tullis & Neilson, 2008)، با برداشت داده‌های آزمایشگاهی از یک سرریز اوجی با وجه قائم بالادست و در ۹ ترکیب مختلف از اختلاف ارتفاع کانال بالادست و کانال پایین‌دست با تاج سرریز، کارایی معادلات و روش‌های پیشنهادی مختلف را در تخمین دبی سرریزهای اوجی در شرایط جریان آزاد و مستغرق بررسی و با معرفی پارامتر $S = h_d/H$ عمق پایاب و H بار آبی بالادست نسبت به تاج سرریز) به‌عنوان نسبت استغراق سرریز، اعلام کردند که تحت استغراق نسبی $S < 0.7$ ، رابطه دبی-اشل سرریز عمدتاً مستقل از تراز پایاب سرریز نسبت به تاج است. گفتنی است که در محدوده $S < 0.8$ ، روش پیشنهادی USBR (Anon, 1987) برای شرایط جریان آزاد، حتی نسبت به روش‌های پیشنهادی تخمین دبی خاص شرایط جریان مستغرق، نتایج دقیق‌تری در محاسبه آبگذری سرریز به‌دست می‌دهد. در محدوده $S > 0.8$ ، هیچ‌یک از روش‌های پیشنهادی تخمین مناسبی جهت تخمین دبی سرریز اوجی به‌دست نداده است و به مطالعات بیشتری در این محدوده نیاز خواهد بود. تولیس (Tullis, 2011) با بهره‌گیری از برداشت مجموعه داده‌های آزمایشگاهی گفته شده، کارایی روش ترسیمی پیشنهادی USBR را برای تخمین دبی سرریزهای اوجی در شرایط جریان مستغرق بررسی کرد و ضمن بررسی تأثیر اختلاف ارتفاع بالادست و پایین‌دست سرریز نشان داد این روش خاص شرایط جریان مستغرق ارائه شده است، اما خطای نسبی تخمین دبی از این روش در محدوده ۵۰-۷۰ درصد قرار دارد. در نتیجه لازم است در خصوص افزایش دقت تعیین دبی سرریزهای اوجی

مواد و روش‌ها

تشریح داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده

برای واسنجی رویکردهای پیشنهادی این تحقیق در تحلیل آبگذری و ارائه شرایط حادی تبدیل جریان در وضعیت‌های چهارگانه، نتایج حاصل از برداشت‌ها روی دو سری داده آزمایشگاهی به کار گرفته شد.

سری نخست مربوط است به ۳۰۸ آزمایش روی دو نوع سرریز اوجی دریچه‌دار کشویی روی یک فلوم آزمایشگاهی به عرض ۹۷/۲ سانتی‌متر و طول ۱۸ متر واقع در آزمایشگاه تحقیقات آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (شکل ۲-الف). برای این منظور دو سرریز اوجی به ترتیب با ارتفاع معادل ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر، هد طراحی معادل ۹/۳۸ و ۱۱/۳۶ سانتی‌متر و دبی طراحی به ترتیب معادل ۶۰ و ۸۰ لیتر بر ثانیه ساخته و در هر مرحله علاوه بر آزمایش‌های مربوط به جریان کنترل نشده (سرریز) آزاد و مستغرق، با نصب دريچه کشویی روی تاج سرریزهای اوجی، آزمایش‌های مربوط به جریان کنترل شده، به‌ازای سه بازشدگی دريچه معادل ۳، ۴ و ۵ سانتی‌متر برداشت گردید. در شرایط نصب سرریز اوجی با ارتفاع بالاتر، آزمایش‌های کنترل شده تنها در شرایط جریان آزاد و در شرایط نصب سرریز با ارتفاع کوتاه‌تر، علاوه بر جریان کنترل شده آزاد، برداشت‌های مربوط به جریان کنترل شده مستغرق نیز صورت گرفت.

آزمایش‌های سری نخست مربوط به شرایطی است که ارتفاع بالادست با ارتفاع پایین‌دست سرریز برابر است. با این حال در شرایط طراحی مواردی رخ می‌دهد که ارتفاع بالادست و پایین‌دست سرریز متفاوت از یکدیگر است. به‌منظور بررسی تأثیر نسبت

ارتفاع بالادست به پایین‌دست سرریز بر خصوصیات آبگذری و آستانه استغراق، از ۸۳۳ سری داده برداشت شده توسط مهندسان ارتش آمریکا (Anon, 1963) روی سرریز دريچه‌دار پروژه کنترل آب فلوریدای جنوبی و مرکزی واقع بر رودخانه آرکانزاس استفاده شد. این آزمایش‌ها روی سرریز اوجی استاندارد با ارتفاع طراحی معادل ۹ فوت، دبی طراحی معادل ۶۴۸۰ فوت مکعب در ثانیه و عرض خالص ۷۵ فوت به کار گرفته شد. در این آزمایش‌ها بازشدگی دريچه کشویی از ۱ تا ۱۰ فوت متغیر بود و جریان‌های کنترل شده و جریان‌های کنترل نشده در شرایط آزاد و مستغرق اندازه‌گیری شدند (شکل ۲-ب). در این آزمایش‌ها نسبت ارتفاع بالادست به ارتفاع پایین‌دست سرریز (P_u/P_d) از ۰/۰۵ تا ۰/۷۵ متغیر است.

جدول ۱، محدوده پارامترهای موثر در دو سری داده آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این جدول، P_u = ارتفاع بالادست سرریز نسبت به کف کانال؛ P_d = ارتفاع پایین‌دست سرریز نسبت به کف کانال؛ H_d = بار آبی طراحی سرریز؛ $Q^* = Q / (b\sqrt{gP_u^3})$ ؛ b = عرض سرریز و g = شتاب ثقل؛ C_F = ضریب دبی جریان کنترل شده آزاد؛ C_S = ضریب دبی جریان کنترل شده مستغرق؛ w = بازشدگی؛ h_u و h_d = به ترتیب عمق‌های بالادست و پایین‌دست نسبت به تاج. همچنین این جدول نشان می‌دهد که برداشت‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر متمرکز بر حدود کمتر پارامتر Q^* است. از سوی دیگر، بخشی از برداشت‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر متمرکز است بر محدوده تبدیل شرایط جریان سرریز به روزنه و امکان استنتاج حد تبدیل دو نوع جریان را به یکدیگر فراهم کرده است.

جدول ۱- محدوده تغییرات پارامترهای موثر در مجموعه برداشت‌های آزمایشگاهی

Table 1- Variation range of effective parameters in experimental data set

h_d/w	h_u/w	C_s	C_F	Q^*	P_u/H_d	P_u/P_d	منبع داده‌ها Reference of data
1.06-8.64	1.46-16.65	0.080-0.870	0.600-0.790	0.004-0.123	3.2-5.3	1	پژوهش حاضر This study
0.838-13.620	1.50-19.63	0.060-1.136	0.698-0.845	0.020-24.402	0.12-1.67	0.055-0.750	پروژه کنترل فلوریدای جنوبی و مرکزی (Anon, 1963) Central and southern Florida water-control project USACE (Anon, 1963)



شکل ۲- حالت‌های مختلف جریان. الف) مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر و ب) مدل سرریز دریچه‌دار آرکانزاس

Fig. 2- Different flow states a) laboratory model of this study and b) Arkansas sluice-gated spillway model

نتایج و بحث

تعیین شرایط حدی تبدیل جریان کنترل نشده به جریان کنترل شده

تعیین حد تبدیل جریان کنترل نشده (سرریز) به جریان کنترل شده (روزنه)، در افزایش دقت محاسبه دبی سرریز دریچه‌دار در ناحیه انتقالی تبدیل دو جریان سودمند است. تا کنون معیار متقنی در خصوص حد تبدیل این دو جریان ارائه نشده است. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، تا وقتی که سطح آب تا تراز لبه بازشدگی دریچه افزایش نیابد،

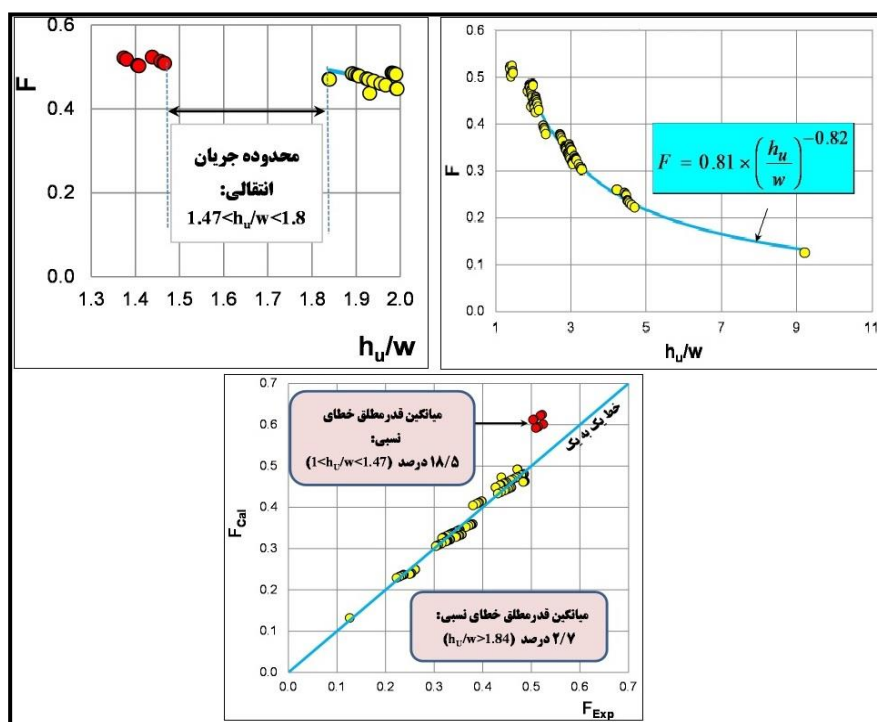
جریان تحت تأثیر سازه سرریز و به صورت کنترل نشده عمل خواهد کرد. جالب توجه است که محدوده‌ای نیز وجود دارد که به رغم افزایش عمق آب بالادست نسبت به میزان بازشدگی دریچه، جریان همچنان تحت تأثیر دریچه، قرار ندارد. در این محدوده خطوط جریان در تماس با سطح دریچه قرار دارد اما همچنان جریان به صورت کاملاً روزنه شکل نگرفته است.

شکل‌های ۳ و ۴، تغییرات عدد فرود جریان نزدیک‌شونده بالادست، $F = Q / (b\sqrt{gh_u^3})$ ، در مقابل

۱۸/۵ و ۲۰/۸ درصد است که به ترتیب به مقدار ۲/۷ و ۵ درصد در محدوده $h_u/w > 1.46$ کاهش یافته است. گفتنی است که بر اساس مطالعات چن و انصار (Chen & Ansar, 2017)، ناحیه انتقالی بین جریان روزنه و بی روزنه به محدوده $1 < h_u/w < 1.46$ نسبت داده شده است. حد تبدیل جریان سرریز به روزنه ($h_u/w = 1.46$) از دیدگاه عمق بحرانی نیز قابل توجیه است. مادام که بازشدگی دریچه از حدود عمق بحرانی متناظر دبی عبوری کمتر نشود، جریان عبوری از مقطع سازه کنترل نشده خواهد بود. به سخی دیگر، به ازای $w > y_c$ جریان کنترل نشده و به ازای $w < y_c$ جریان کنترل شده خواهد بود. در نتیجه با در نظر گرفتن $y_c \approx 2h_u/3$ ، در محدوده $h_u/w < 1.5$ جریان کنترل نشده و در محدوده $h_u/w > 1.5$ جریان کنترل شده است. این نتیجه گیری نزدیک است به آنچه از شکل‌های ۳ و ۴ استنتاج می‌شود.

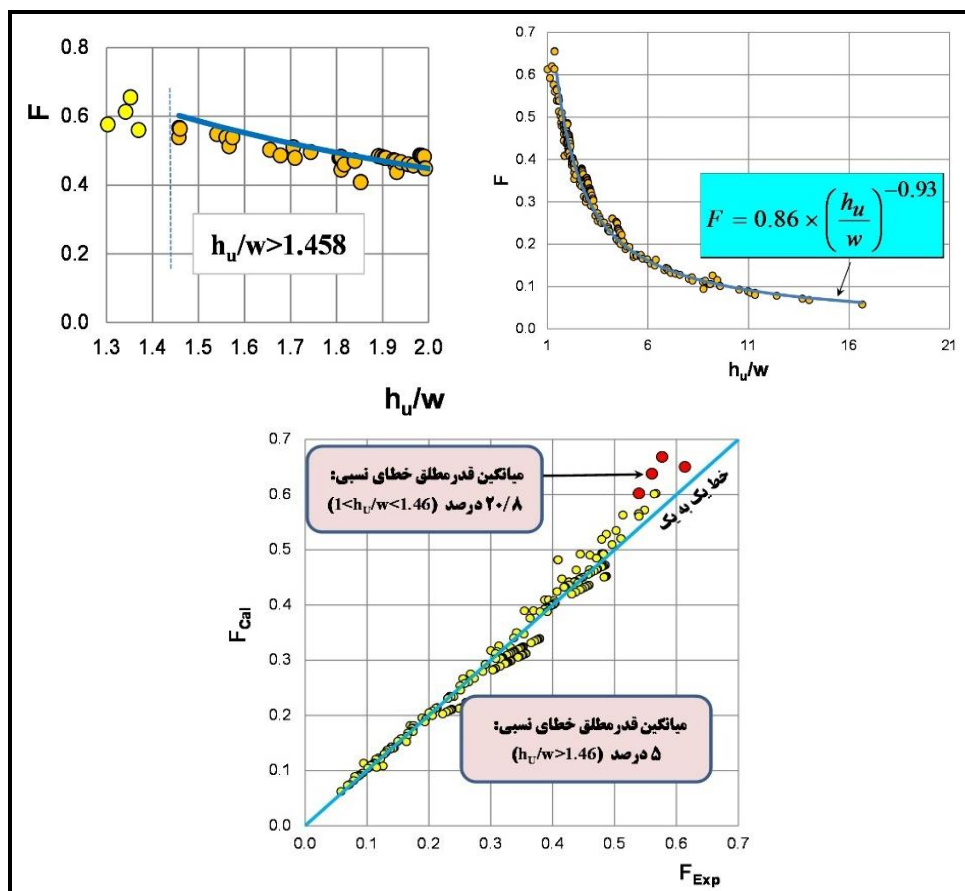
نسبت عمق بالادست به بازشدگی دریچه، h_u/w را به ترتیب از داده‌های مدل سرریز دریچه‌دار آرکانزاس و داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر نشان می‌دهند. در محدوده $h_u/w < 1.458$ ، تغییرات پارامتر F مستقل از بازشدگی و نسبت h_u/w خواهد بود ($F = Q / (b \sqrt{gh_u^3}) = c$) در نتیجه $Q \propto h_u^{1.5}$. ایمن تغییرات بیانگر پیروی تغییرات آبگذری از جریان کنترل نشده (سرریز) در محدوده $1 < h_u/w < 1.458$ است. با افزایش عمق بالادست نسبی از این محدوده، رفتار جریان به اصول روزنه (جریان کنترل شده)، نزدیک می‌شود و تغییرات پارامتر F با عمق بالادست نسبی از رابطه توانی به فرم $F = a(h_u/w)^b$ پیروی می‌کند.

در شکل‌های ۳ و ۴ همچنین مشاهده می‌شود که میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تعیین دبی از این رابطه در محدوده $1 < h_u/w < 1.458$ بر اساس داده‌های آرکانزاس و تحقیق حاضر به ترتیب معادل



شکل ۳- تعیین حد تبدیل جریان کنترل نشده به کنترل شده بر اساس داده‌های مدل سرریز دریچه‌دار آرکانزاس

Fig. 3- Determination of uncontrolled to controlled flow change threshold based on Arkansas sluice-gated spillway model data



شکل ۴- تعیین حد تبدیل جریان کنترل نشده به کنترل شده بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر
Fig. 4- Determination of uncontrolled flow to controlled flow change threshold based on current study data

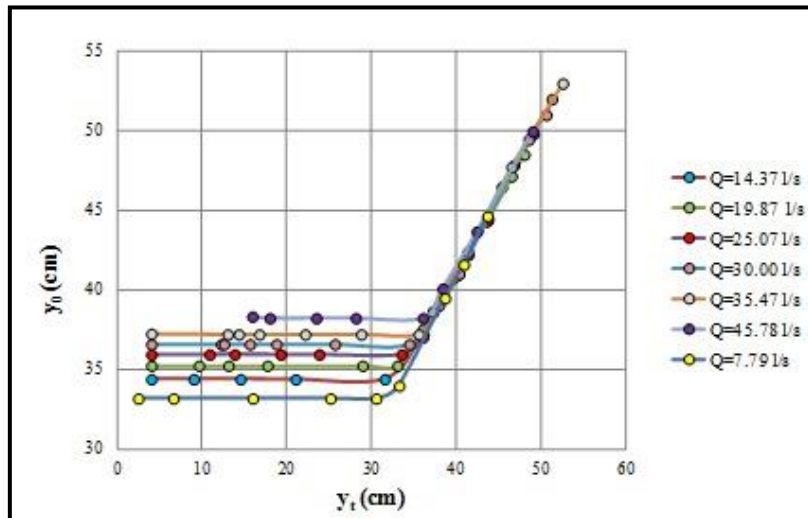
شکل ۶، زوج مرتب‌های $(h_{d(L)}/P, h_u/P)$ استخراج شده در شرایط آستانه استغراق را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر، سرریز با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر، نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن $h_{d(L)}$ برابر عمق پایاب متناظر آستانه استغراق سرریز (جریان کنترل نشده)، رابطه ۳ از شکل ۶ برای تعیین $h_{d(L)}$ قابل حصول است.

$$\frac{h_{d(L)}}{P} = 0.427 \times 0.510 \frac{P}{h_u} \times \left(\frac{h_u}{P} \right)^{-1.325} \quad (3)$$

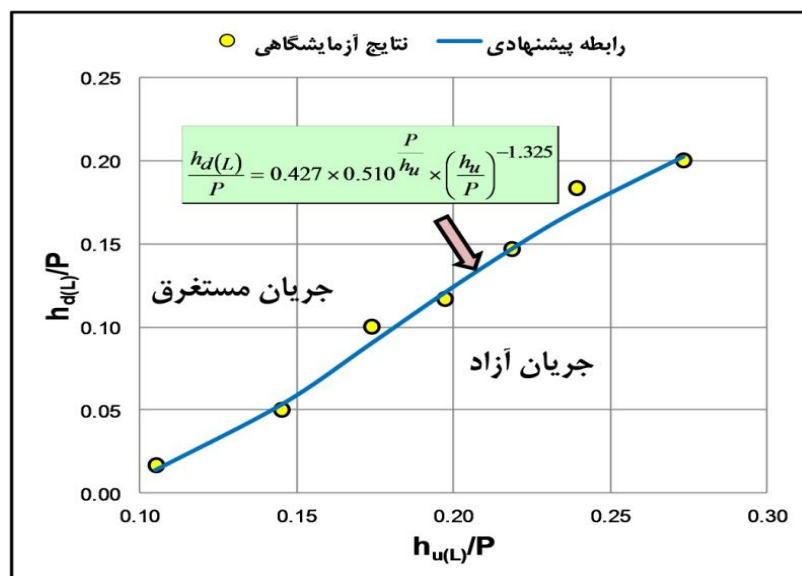
این رابطه، آستانه استغراق سرریز را در شرایطی ارائه می‌دهد که ارتفاع بالادست و پایین-دست سرریز برابر باشند $(P_u = P_d = P)$.

تعیین شرایط حدی تبدیل جریان کنترل نشده آزاد به جریان کنترل نشده مستغرق

شکل ۵ تغییرات عمق بالادست نسبت به کف کانال (y_0) در مقابل عمق پایین‌دست نسبت به کف کانال (y_i) را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده تحقیق حاضر (سرریز اوجی به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر) نشان می‌دهد. به‌ازای هر دبی ثابت، با افزایش عمق پایین‌دست، عمق بالادست ابتدا ثابت می‌ماند و پس از رسیدن عمق پایاب به شرایط آستانه استغراق افزایش می‌یابد. در این وضعیت سطح آب بالادست برای نخستین بار تحت تأثیر عمق پایین‌دست قرار می‌گیرد. در هر دبی مقادیر عمق بالادست و عمق پایین‌دست در شرایط آستانه استغراق استخراج گردید.



شکل ۵- تغییرات عمق بالادست در مقابل عمق پایین‌دست به منظور استنتاج آستانه استغراق (سرریز با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر)
Fig. 5- Upstream flow depth variations versus downstream flow depth for determination of submergence threshold (spillway of 30 cm height)



شکل ۶- شرایط آستانه سرریز اوجی (جریان کنترل نشده) در شرایط برابری ارتفاع بالادست و پایین‌دست سرریز
Fig. 6- Submergence threshold conditions of ogee spillway (uncontrolled flow) for the same upstream and downstream heights

داده‌های مدل آرکانزاس نشان می‌دهد. به‌طور مشابه، زوج نقاط مربوط به آستانه استغراق (آستانه افزایش عمق بالادست) در هر حالت استخراج گردید. از این زوج نقاط، رابطه ۴ برای تعیین آستانه استغراق سرریز اوجی و در شرایط تفاوت ارتفاع بالادست و پایین‌دست سرریز به‌دست آمد.

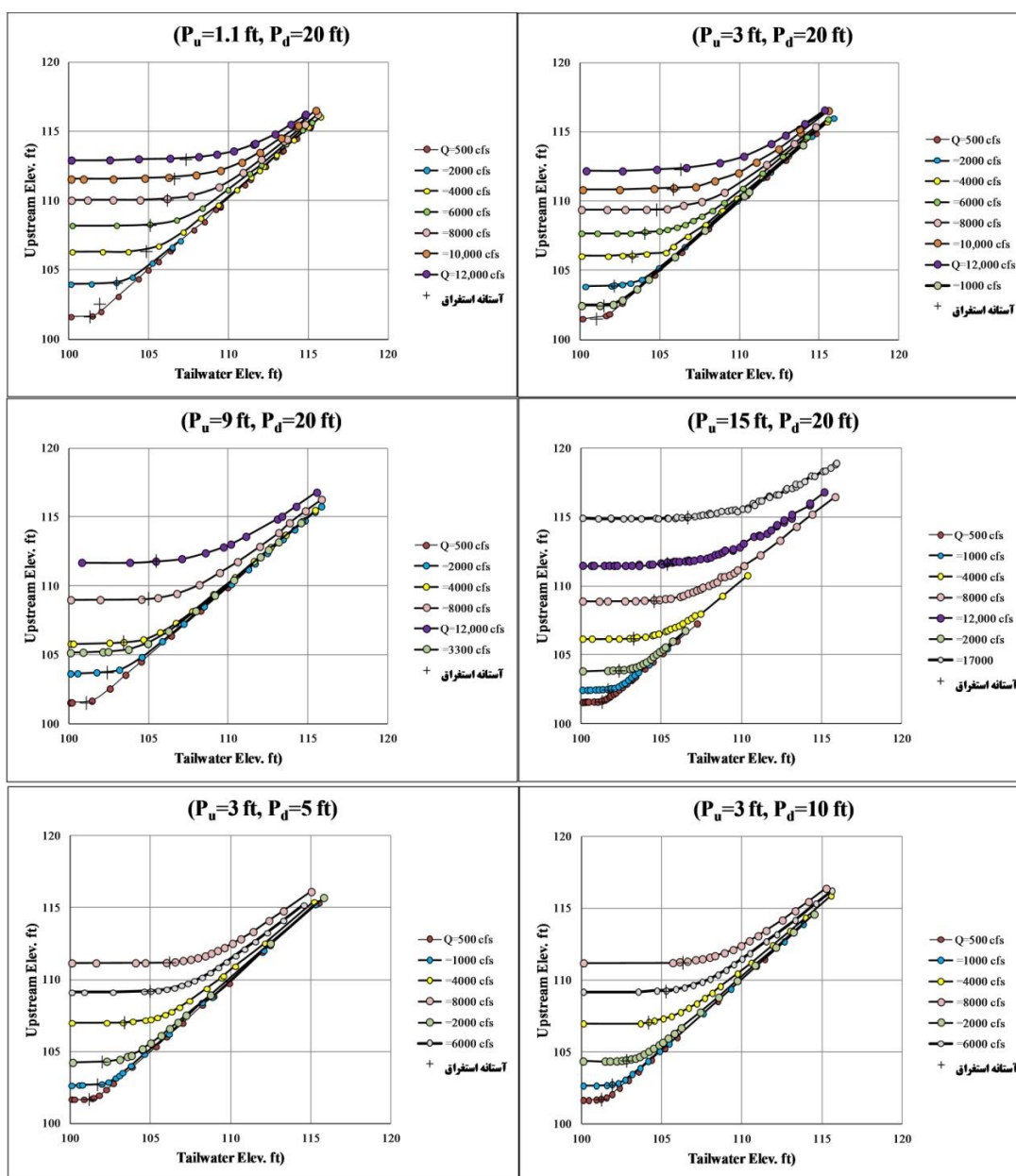
به‌منظور تعیین آستانه استغراق سرریز اوجی در شرایط تفاوت ارتفاع وجه بالادست و پایین‌دست سرریز، از مجموعه داده‌های مدل آرکانزاس استفاده شد. شکل ۷، تغییرات تراز سطح آب بالادست را در مقابل تراز سطح آب پایین‌دست در ترکیب‌های مختلف دبی و ارتفاع وجوه بالادست و پایین‌دست سرریز را بر اساس

تحلیل آبگذری و شرایط جریان در...

مشخص است. دیده می‌شود که با کاهش نسبت P_u/P_d ، آستانه استغراق افزایش می‌یابد. به سخی دیگر، با افزایش ارتفاع وجه پایین دست سرریز و کاهش ارتفاع وجه بالادست، سرریز در محدوده وسیع تری تحت شرایط جریان آزاد عمل می‌کند.

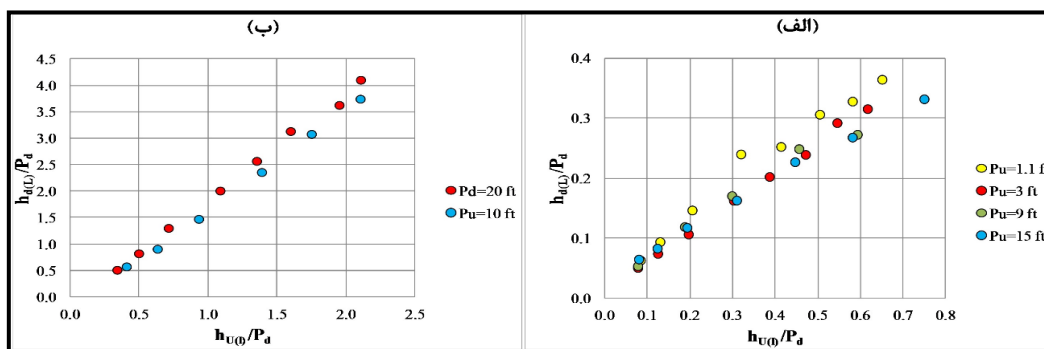
$$\frac{h_{d(L)}}{P_d} = \frac{0.036 + \frac{h_u}{P_d}}{1.88 + 0.414 \times \left(\frac{P_u}{P_d} \right)^2} \quad (4)$$

از شکل ۸ و رابطه ۴، تأثیر ارتفاع وجه بالادست و پایین دست بر آستانه استغراق سرریز اوجی



شکل ۷- استنتاج آستانه استغراق سرریز (جریان کنترل نشده) با استفاده از داده‌های مدل آرکانزاس

Fig. 7- Determination of submergence threshold of spillway (uncontrolled flow) using Arkansas sluice-gated spillway model data



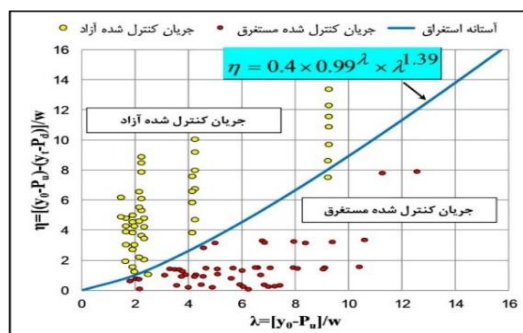
شکل ۸- الف) تأثیر ارتفاع بالادست بر آستانه استغراق ($P_d=20$ ft) و ب) تأثیر ارتفاع پایین دست بر آستانه استغراق ($P_u=3$ ft)

Fig. 8-a) Effect of upstream height on submergence threshold ($P_d=20$ ft) and b) Effect of downstream height on submergence threshold ($P_u=3$ ft)

که در آن،
 w = بازشدگی دریاچه کشویی؛ y_0 = عمق بالادست
نسبت به کف کانال؛ و y_t = عمق پایین دست نسبت به
کف کانال. شکل ۹، استنتاج آستانه استغراق را بر
مبنای رابطه ۵ نشان می‌دهد. در این شکل، محدوده
وقوع جریان کنترل شده مستغرق و جریان کنترل
شده آزاد مشخص شده است. از این شکل، پیش‌بینی
شرایط جریان کنترل شده مستقل از میزان دبی به
سهولت ممکن است. از شکل ۹ همچنین کارایی
رابطه ۵ در پیش‌بینی درست وضعیت جریان در
شرایط جریان کنترل شده، بر اساس داده‌های
آزمایشگاهی تحقیق حاضر، نشان داده شده است.
رابطه ۵ تقریباً در تمامی شرایط، جریان را اعم از
کنترل شده آزاد یا کنترل شده مستغرق به درستی
پیش‌بینی کرده است.

تعیین شرایط حدی تبدیل جریان کنترل شده
آزاد به جریان کنترل شده مستغرق
در شرایط جریان کنترل شده، آستانه
تبدیل جریان کنترل شده آزاد به کنترل شده
مستغرق، علاوه بر عمق بالادست و ارتفاع وجوه
بالادست و پایین دست سرریز، تابعی از میزان
بازشدگی دریاچه کشویی نیز هست. با استفاده از
داده‌های مدل سرریز دریاچه دار آرکانزاس در شرایط
جریان کنترل شده و تعریف پارامترهای بی بعد به
شکل $\lambda = [y_0 - P_u]/w$ و $\eta = [(y_0 - P_u) - (y_t - P_d)]/w$
رابطه ۵ به منظور تعیین آستانه استغراق نسبی در
شرایط جریان کنترل شده به دست آمد.

$$\eta = 0.4 \times 0.99^\lambda \times \lambda^{1.39} \quad (5)$$



شکل ۹- ارزیابی کارایی معیار آستانه تبدیل جریان کنترل شده آزاد به مستغرق (مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر)

Fig. 9- Performance evaluation of threshold criteria for converting free-controlled flow to submerged flow (experimental model of this study)

به ترتیب با ارتفاع ۳۰ و ۶۰ سانتی متر متناظر با دو بار آبی طراحی معادل ۹/۳۸ و ۱۱/۳۶ سانتی متر و دبی طراحی، به ترتیب معادل ۶۰ و ۸۰ لیتر بر ثانیه، ساخته شد. شکل ۱۰-الف، تغییرات نسبت Q/Q_d در مقابل نسبت h_u/H_d از داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده تحقیق حاضر روی دو سرریز اوجی در شرایط جریان کنترل نشده آزاد را نشان می‌دهد. از این شکل، رابطه ۶ به منظور تعیین دبی سرریزهای اوجی، در شرایط جریان کنترل نشده آزاد، به دست آمد:

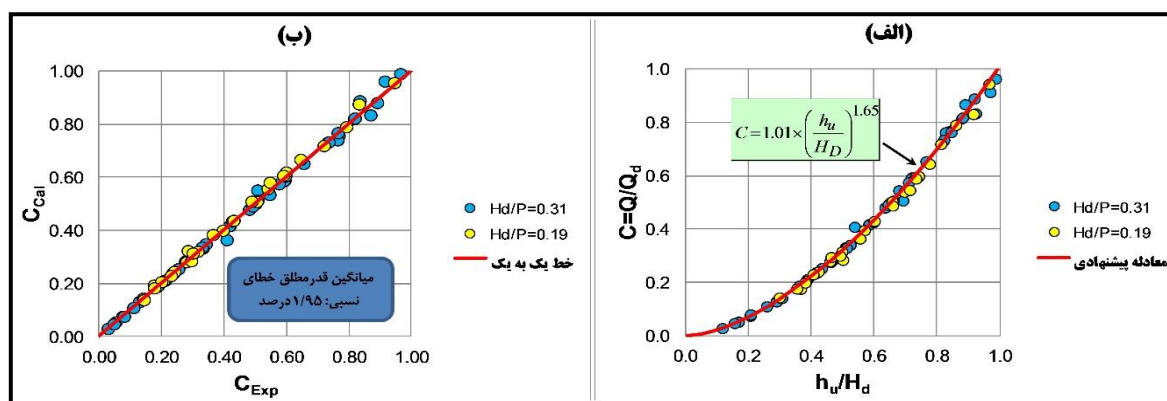
$$C = \frac{Q}{Q_d} = 1.01 \times \left(\frac{h_u}{H_d} \right)^{1.65} \quad (۶)$$

در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است که میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تعیین دبی از رابطه پیشنهادی در شرایط جریان کنترل نشده آزاد، معادل ۱/۹۵ درصد است. مشاهده می‌شود که نسبت Q/Q_d ، مستقل از نسبت P/H_d است.

مزیت مهم معیارهای پیشنهادی بالا وابسته نبودن حدود تبدیل شرایط جریان به دبی است. در هر حالت با اطلاع از هندسه سرریز، بازشدگی دریاچه و عمق‌های بالادست و پایین دست می‌توان شرایط جریان را پیش‌بینی و پس از آن از روابط پیشنهادی برای تعیین دبی عبوری از مقطع سازه سرریز دریاچه‌دار کشویی در هر حالت استفاده کرد.

تحلیل آبگذری در شرایط جریان کنترل نشده (سرریز) آزاد

در شرایط جریان کنترل نشده (سرریز) آزاد، آبگذری تابعی از ارتفاع سرریز (P)، بار آبی طراحی سرریز (H_d) و بار آبی نسبت به تاج سرریز (h_u) است. از طرف دیگر، دبی طراحی سرریز (Q_d) تابعی از نسبت بار آبی طراحی به ارتفاع سرریز (P/H_d) است. در آزمایش‌های تحقیق حاضر، دو سرریز اوجی



شکل ۱۰-الف) تغییرات نسبت Q/Q_d در مقابل نسبت h_u/H_d بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و ب) تغییرات ضریب C از معادله ۴ در مقابل مقادیر متناظر آزمایشگاهی

Figure 10-a- Variations of Q/Q_d ratio versus h_u/H_d ratio based on the laboratory data of this study, b) Variations of the coefficient C computed by Equation 4 versus the corresponding laboratory values

برداشت شده تحقیق حاضر و مدل آرکانزاس، رابطه ۷ برای تعیین دبی سرریزهای اوجی در شرایط جریان کنترل نشده آزاد به دست آمد.

$$C = \frac{Q}{Q_d} = 1.125 \times \left(0.861 \times \frac{P_u}{P_d} \right) \times \left(\frac{h_u}{H_d} \right)^{1.575} \quad (۷)$$

رابطه ۶، برای تعیین دبی سرریزهای اوجی در شرایط جریان کنترل نشده آزاد مختص حالت‌هایی است که ارتفاع وجوه بالادست و پایین دست سرریز با یکدیگر برابرند. در شرایط تفاوت وجوه بالادست و پایین دست سرریز و به واسطه ترکیب داده‌های

میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تعیین دبی سرریز اوجی در شرایط جریان کنترل نشده آزاد در محدوده $0.055 \leq P_u/P_d \leq 1$ ، حدود ۳/۳ درصد است. تحلیل آبگذری در شرایط جریان کنترل نشده

(سرریز) مستغرق در شرایط جریان کنترل شده مستغرق، دبی سرریز علاوه بر عمق بالادست و ابعاد سرریز، متأثر از عمق پایین دست نیز هست. با در نظر گرفتن پارامتر $\eta = Q/Q_F$ ، شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب تغییرات این پارامتر را مطابق رابطه ۸ در مقابل نسبت y_t/y_0 به ترتیب از داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و داده‌های مدل آرکانزاس نشان می‌دهند (y_t و y_0) به ترتیب عبارت‌اند از عمق‌های بالادست و

پایین دست نسبت به تاج سرریز).

$$\eta = \frac{Q}{Q_F} = \left(1 - \left[\frac{y_t}{y_0} \right]^a \right) \quad (8)$$

که در آن،
 Q_F = مقدار دبی متناظر سرریز در شرایط جریان کنترل نشده آزاد و به‌ازای بار آبی متناظر بالادست از رابطه ۶ تعیین می‌شود.

در شکل ۱۱-الف می‌بینیم که به‌ازای عمق‌های پایاب نسبی کمتر از ۰/۸۲ ($y_t/y_0 < 0.82$)، سرریز تحت شرایط جریان آزاد عمل می‌کند. در شرایط برابر بودن ارتفاع وجوه بالادست و پایین دست سرریز بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر، $(P_u = P_d = P)$ ، مقدار بهینه پارامتر a برابر ۹/۷۴۷ به دست آمد. در مجموعه داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر، مجموعه برداشت‌های سرریز در شرایط جریان مستغرق، منحصر به استغراق‌های نسبی قابل توجه

استغراق‌های نسبی بالاتر از ۰/۹۵ در نظر گرفته شود. در شرایط تفاوت ارتفاع وجوه بالادست و پایین دست سرریز و بر اساس داده‌های مدل آرکانزاس، مقدار بهینه پارامتر a برابر ۱۴/۹۷۶ به دست آمد. میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تعیین دبی از رابطه ۸ و ثابت پیشنهادی بر اساس داده‌های مدل آرکانزاس در محدوده $0.055 \leq P_u/P_d \leq 0.75$ معادل ۴/۹۵ درصد به دست آمد.

تحلیل آبگذری در شرایط جریان کنترل شده آزاد

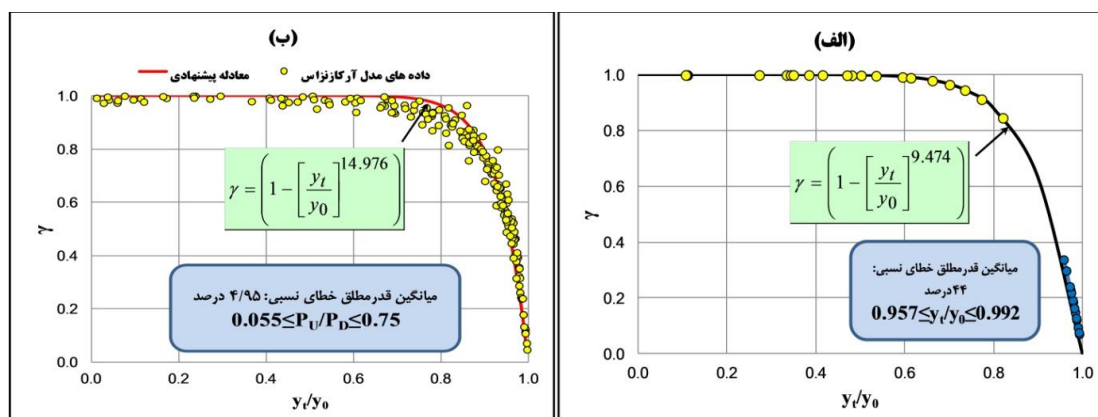
با افزایش بار آبی بالادست سرریز از حدود ۱/۴۵۸ برابر بازشدگی دریچه، جریان عبوری از سرریز دریچه‌دار تحت تأثیر دریچه قرار می‌گیرد و به اصطلاح جریان از نوع کنترل شده خواهد بود. در شرایط جریان کنترل شده (روزنه) آزاد با در نظر گرفتن فرضیات جریان روزنه و با استفاده از معادله انرژی برای یک المان بازشدگی دریچه در ارتباط با عمق بالادست و سپس انتگرال‌گیری روی کل مقطع بازشدگی، رابطه ۹ برای تعیین دبی عبوری از سرریز دریچه‌دار به دست می‌آید.

$$Q = \frac{2}{3} \times \sqrt{2g} \times C_F \times b \times \left[h_u^{\frac{3}{2}} - (h_u - w)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (9)$$

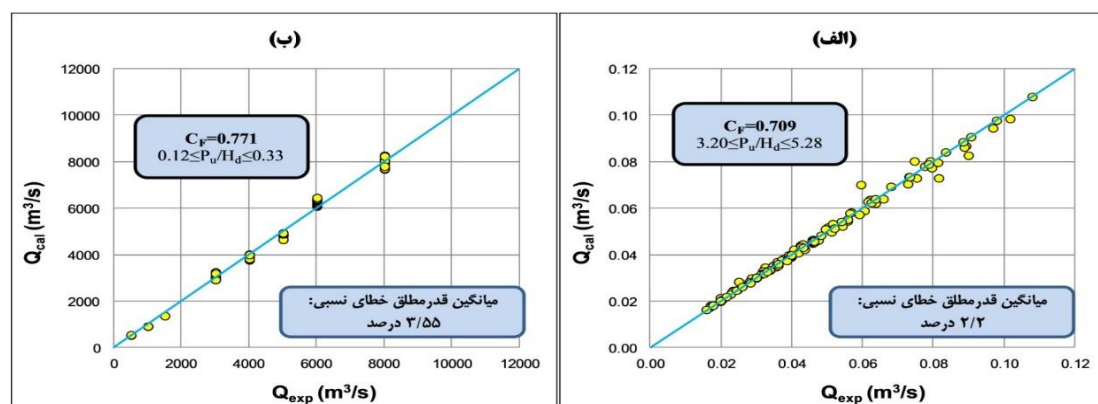
معادل $C_F=0.709$ است. در شکل‌های ۱۲-الف و ۱۲-ب می‌بینیم میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تعیین دبی از معادله ۹ و ضرایب پیشنهادی در شرایط جریان کنترل شده آزاد در محدوده داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و مدل آرکانزاس، به ترتیب معادل ۲/۲ و ۳/۵۵ درصد است. مشاهده می‌گردد که آزمایش‌های مدل آرکانزاس روی سرریز با ارتفاع نسبی کمتر و آزمایش‌های تحقیق حاضر روی سرریز با ارتفاع نسبی بالاتر اجرا شده‌اند. با این حال، به منظور تعیین آگذری سرریز در پیچه‌دار در محدوده $0.33 < P_u/H_d < 3.20$ به آزمایش‌های تکمیلی نیاز خواهد بود.

که در آن،
 C_F = ضریب آگذری سرریز در پیچه‌دار در شرایط جریان کنترل شده آزاد.

در شکل‌های ۱۲-الف و ۱۲-ب، تغییرات مقادیر دبی محاسباتی از رابطه ۹ در مقابل مقادیر متناظر مشاهداتی به ترتیب از داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و داده‌های مدل آرکانزاس نشان داده شده است. گفتنی است که مقدار ضریب آگذری وابستگی قابل توجهی دارد به محدوده نسبت ارتفاع بالادست به بار آبی طراحی سرریز (P_u/H_d) ؛ به طوری که مقدار ضریب آگذری در محدوده $0.12 \leq P_u/H_d \leq 0.33$ معادل $C_F=0.771$ و در محدوده $3.20 \leq P_u/H_d \leq 5.28$



شکل ۱۱- تغییرات پارامتر γ در مقابل نسبت y_t/y_0 از (الف) داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و (ب) داده‌های مدل آرکانزاس
 Fig. 11- Variations of parameter γ versus y_t/y_0 ratio a) laboratory data of this study and b) Arkansas model data



شکل ۱۲- تغییرات مقادیر دبی محاسباتی از رابطه ۹، (Q_{cal}) ، در مقابل دبی مشاهداتی (Q_{exp}) از:

(الف) داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و (ب) داده‌های مدل آرکانزاس در شرایط جریان کنترل شده آزاد

Fig. 12. Variations of the calculated discharge values from Equation 9, (Q_{cal}) versus observed discharge (Q_{exp})
 a) experimental data of this study, and b) Arkansas model data under free-controlled flow conditions

حاضر و مدل آرکانزاس نشان می‌دهند. از شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که ضریب C_s عمدتاً متأثر از عمق پایاب نسبی (h_d/w) است و وابستگی ناچیزی خواهد داشت به نسبت ارتفاع وجه پایین‌دست به ارتفاع وجه بالادست (P_d/P_u). بر این اساس، ضریب C_s از رابطه ۱۱ تعیین می‌شود.

$$C_s = \left(\alpha \times \frac{h_d}{w} - \beta \right)^{-1} \quad (11)$$

که در آن،

α و β ثابت‌هایی هستند قابل تعیین بر اساس داده‌های آزمایشگاهی. مقدار این ضرایب بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و در محدوده $3.20 \leq P_u/H_d \leq 5.28$ به ترتیب معادل ۱/۴۶۰ و ۰/۳۶۶ و بر اساس داده‌های مدل آرکانزاس و در محدوده $0.12 \leq P_u/H_d \leq 0.33$ به ترتیب معادل ۱/۰۶۴ و ۰/۰۲۱ هستند. میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تعیین دبی از معادله ۹ و ضرایب پیشنهادی در شرایط جریان کنترل‌شده مستغرق بر اساس داده‌های مدل آرکانزاس، در حدود ۵ درصد است.

دیده می‌شود که با افزایش ارتفاع وجه بالادست سرریز، میزان آبگذری سرریز دریچه‌دار در شرایط جریان کنترل شده آزاد کاهش می‌یابد. این امر را می‌توان این‌گونه توضیح داد که با افزایش ارتفاع سرریز، مانع عبوری در برابر جریان افزایش می‌یابد و افت بیشتری در مقطع قبل سرریز اتفاق می‌افتد و در نتیجه میزان ضریب آبگذری در داده‌های تحقیق حاضر کمتر از میزان آبگذری داده‌های آرکانزاس است.

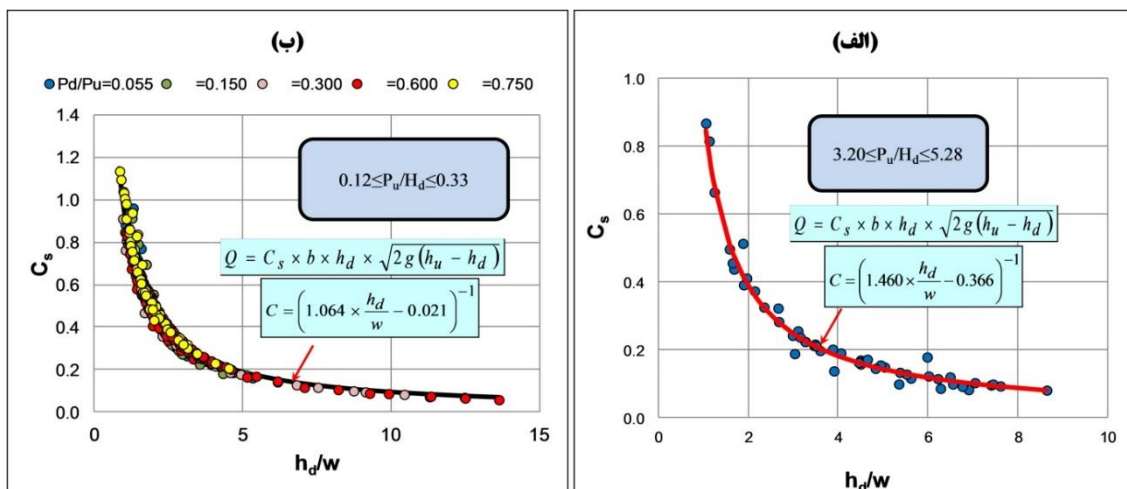
تحلیل آبگذری در شرایط جریان کنترل شده مستغرق

در شرایط جریان کنترل‌شده مستغرق، به واسطه کاربرد اصول روزنه و تأثیر تفاضل عمق قبل و بعد از دریچه بر میزان آبگذری، رابطه ۱۰ برای تخمین دبی سرریز دریچه‌دار، قابل استخراج است.

$$Q = C_s \times b \times h_d \times \sqrt{2g(h_u - h_d)} \quad (10)$$

که در آن،

C_s = ضریب دبی جریان کنترل شده مستغرق. شکل‌های ۱۳-الف و ۱۳-ب تعیین ضریب دبی C_s را به ترتیب بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق

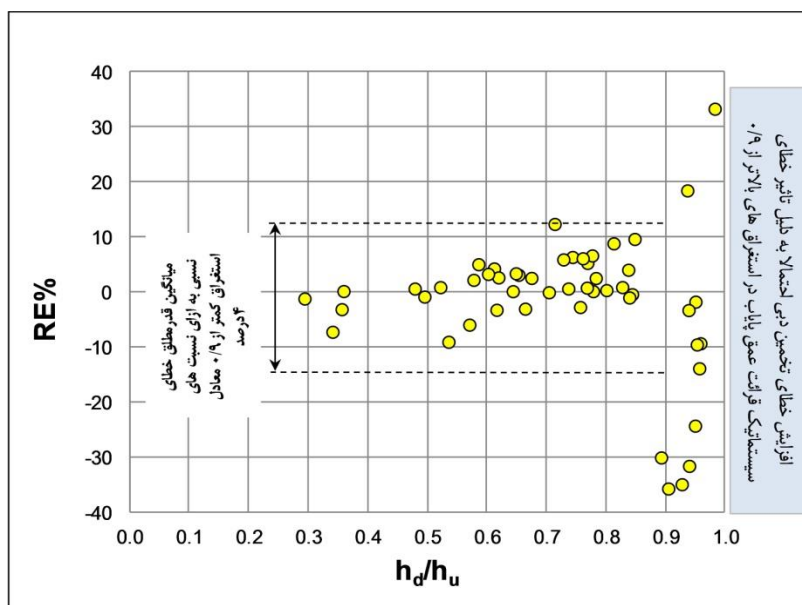


شکل ۱۳-تعیین ضریب دبی جریان کنترل شده مستغرق (C_s) از (الف) داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و (ب) داده‌های مدل آرکانزاس

Fig. 13. Determination of discharge coefficient of submerged controlled flow (C_s)
a) Laboratory data of this study and b) Arkansas model data

خطای نسبی در حدود ۴ درصد است. با این حال، با افزایش استغراق نسبی از حدود ۰/۹، خطای نسبی در تعیین دبی به صورت قابل توجه افزایش می یابد که این امر احتمالاً متاثر از خطاهای سیستماتیک در قرائت عمق های بالادست و پایین دست است.

شکل ۱۴، تغییرات درصد خطای نسبی در تعیین دبی از رابطه ۱۱ و ضرایب پیشنهادی در مقابل استغراق نسبی (h_d/h_u) را بر اساس داده های آزمایشگاهی تحقیق حاضر نشان می دهد. از این شکل مشاهده می شود که در محدوده استغراق های نسبی کمتر از ۰/۹ ($h_d/h_u < 0.9$)، میانگین قدرمطلق



شکل ۱۴- توزیع خطای محاسبه دبی در شرایط جریان کنترل شده مستغرق در نسبت های مختلف استغراق بر اساس داده های آزمایشگاهی تحقیق حاضر

Fig. 14. Distribution of discharge calculation error in submerged controlled flow conditions at different submergence ratios based on laboratory data of this study

ساخته شده در ترکیب با مدل سرریز اوجی دریچه دار پروژه کنترل آب فلوریدای جنوبی و مرکزی روی رودخانه آرکانزاس، خصوصیات آبگذری سرریزهای دریچه دار کشویی بررسی شده است. جریان عبوری از مقطع سرریز دریچه دار وابسته به میزان بازشدگی دریچه و عمق بالادست، می تواند کنترل شده یا کنترل نشده و در هر حالت وابسته به میزان عمق ها بالادست و پایین دست، می تواند آزاد یا مستغرق عمل کند. نتایج بررسی ها نشان می دهد وقتی عمق بالادست از حدود ۱/۴۶ برابر بازشدگی دریچه افزایش یابد، شرایط جریان از بی روزنه (کنترل نشده)

جدول ۲، خلاصه مجموعه معادلات جدید پیشنهادی را در تحقیق حاضر به منظور تعیین آبگذری و نیز شناخت شرایط جریان را از سرریزهای دریچه دار کشویی نشان می دهد. استفاده از این روابط توسط بهره بردار سازه، برای مدیریت بهتر سازه، به خصوص با اهداف تحویل حجمی و اندازه گیری جریان، سودمند خواهد بود.

نتیجه گیری

در این تحقیق، بر مبنای مجموعه داده های آزمایشگاهی حاصل از دو سرریز اوجی دریچه دار

به روزنه (کنترل شده) تبدیل می‌شود. دیده می‌شود با افزایش ارتفاع وجه پایین دست سرریز و کاهش ارتفاع وجه بالادست، دامنه عملکرد سرریز در شرایط آزاد افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر علاوه بر ارائه حدود تبدیل شرایط چهارگانه جریان در سرریزهای دریچه‌دار کشویی، معادلات تعیین دبی در هر وضعیت جریان به تفکیک ارائه شده است.

جدول ۲- معادلات کاربردی پیشنهادی در تحقیق حاضر برای تعیین آبگذری و شناخت شرایط جریان در سرریزهای دریچه‌دار کشویی

Table 2. Proposed practical equations in this study to determine the discharge and to identify the flow conditions in sluice-gated spillways

شماره رابطه Equation number	شکل رابطه Equation expression	میانگین خطای مطلق نسبی (درصد) Mean absolute relative error (%)	دامنه کاربرد Application range
3	$\frac{h_d(L)}{P} = 0.427 \times 0.510 \frac{P}{h_u} \times \left(\frac{h_u}{P}\right)^{-1.325}$	Correct prediction of flow conditions in all cases	Threshold of changing free flow to submerged flow in case of equal upstream and downstream heights
4	$\frac{h_{d(L)}}{P_d} = \frac{0.036 + \frac{h_u}{P_d}}{1.88 + 0.414 \times \left(\frac{P_u}{P_d}\right)^2}$	Correct prediction of flow conditions in all cases	Threshold of changing free flow to submerged flow in case of different upstream and downstream heights
5	$\eta = 0.4 \times 0.99^\lambda \times \lambda^{1.39}$	Correct prediction of flow conditions in all cases	Threshold of changing free controlled flow into submerged controlled flow
6	$C = \frac{Q}{Q_d} = 1.01 \times \left(\frac{h_u}{H_d}\right)^{1.65}$	1.95%	Discharge determination under free flow regime in case of equal upstream and downstream heights
7	$C = \frac{Q}{Q_d} = 1.125 \times \left(0.861 \times \frac{P_u}{P_d}\right) \times \left(\frac{h_u}{H_d}\right)^{1.575}$	3.3%	Discharge determination under free flow regime in case of different upstream and downstream heights
8	$\gamma = \frac{Q}{Q_F} = \left(1 - \left[\frac{y_t}{y_0}\right]^a\right)$	44% in the range of tailwater relative depths greater than 0.96	Discharge determination under submerged flow regime
9	$Q = \frac{2}{3} \times \sqrt{2g} \times C_F \times b \times \left[h_u^{\frac{3}{2}} - (h_u - w)^{\frac{3}{2}}\right]$ $C_F = 0.709$	2.2%	Discharge determination under free controlled flow regime
10 and 11	$Q = C_s \times b \times h_d \times \sqrt{2g(h_u - h_d)}$ $C_s = \left(\alpha \times \frac{h_d}{w} - \beta\right)^{-1}$	4%	Discharge determination under submerged controlled flow regime

قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های معاونت پژوهشی دانشگاه تهران در انجام این تحقیق، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

- Alminagorta, O. and Merkley, P. 2009. Transitional flow between orifice and nonorifice regimes at a rectangular sluice gate. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135(3): 382-387.
- Anon. 1963. Typical spillway structure for central and southern Florida water-control project. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi.
- Anon. 1972. Overflow spillways, stage-discharge relation for uncontrolled flow. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Hydraulic Design Chart 111-3/3, Vicksburg, Mississippi.
- Anon. 1987. Design of Small Dams. U.S. Bureau of Reclamation (USBR). U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Ansar, M. and Chen, Z. 2009. Generalized flow rating equations at prototype gated spillways. *J. Hydraul. Eng.* 135(7): 602-608.
- Chen, Z. and Ansar, M. 2017. Application of the generalized flow equation to all flow conditions at spillways. World Environmental and Water Resources Congress. May 21–25. Sacramento, California, USA.
- Hager, W. and Bremen, R. 1988. Plane gate on standard spillway. *J. Hydraul. Eng.* 114(11): 1390-1397.
- Hussain, S., Hussain, A. and Ahmad, Z. 2014. Discharge characteristics of orifice spillway under oblique approach flow. *Flow Meas. Instrum.* 39(1): 9-18.
- Multer, R. H. 1963. Discharge rating curves for vertical lift gates on spillway crests. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Paper No. 2-606. Vicksburg, Mississippi.
- Negm, A. M. 1995. Free and submerged flow below sluice gate with sill. *Adv. Hydrosoci. Eng. Part A*: 283-300.
- Tullis, B. 2011. Behavior of submerged ogee crest weir discharge coefficients. *J. Irrig. Drain. Eng.* 137(10): 677-681.
- Tullis, B. and Neilson, J. 2008. Performance of submerged ogee-crest weir head-discharge relationships. *J. Hydraul. Eng.* 134(4): 486–491.
- Zeng, J., Zhang, L., Ansar, M. and Damisse, E. 2017a. Applications of computational fluid dynamics to flow ratings at prototype spillways and weirs. I: Data generation and validation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 143(1): 04016072 (1-13).
- Zeng, J., Zhang, L., Ansar, M. and Damisse, E. 2017b. Applications of computational fluid dynamics to flow ratings at prototype spillways and weirs. II: Framework for planning, data assessment, and flow rating. *J. Irrig. Drain. Eng.* 143(1): 04016073 (1-13).

Analysis of the Discharge and Flow Conditions in Sluice-Gated Spillways

A. Barghi-Khezerloo and A. Vatankhah*

*Corresponding Author: Ph. D. Student in Water Structures, Irrigation and Reclamation Department, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: a_barghi2009@ut.ac.ir

Received: 30 May 2018, Accepted: 27 November 2018

Abstract

Sluice gates are designed and used in ogee spillways with high height (regulator dams) or low height (as sill) for better controlling the flow. In latter case, according to different combinations of weir geometry, gate opening, upstream and downstream flow depths, four different flow conditions are recognizable: (a) free uncontrolled flow, (b) submerged uncontrolled flow, (c) free controlled flow, and (d) submerged controlled flow. Determination of change threshold of these flow condition is useful for choosing the proposed discharge equations in any situation. In current research, using the experimental data gathered from two ogee spillways with different height in this program and using the data gathered from typical spillway structures in central and southern Florida water-control project, different equations for determining the change threshold and flow discharge in four different flow conditions are developed. In free uncontrolled flow condition, the proposed discharge equation has an average relative error of 1.95% while in free and submerged controlled flow condition, the proposed discharge equations have the average relative errors of 2% and 5%, respectively. Results showed that the change threshold of uncontrolled flow into controlled flow occurs when upstream flow depth increases about 1.46 times the gate opening. Furthermore, the relative submergence threshold and flow discharge increase by increasing the downstream flow depth and decreasing the upstream flow depth.

Keywords: Flow Control, Hydraulic Structure, Measurement, Submergence Threshold