

تحلیل آبگذری و شرایط جریان در سرریزهای دریچه‌دار کشویی

ابوالفضل برقی خضروا^۱ و علیرضا خواه^{۲*}

۱ و ۲- به ترتیب: 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

دریچه‌های 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، باز شدگی دریچه، عمق بالادست و عمق پایین دست، 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 برداشته‌های آزمایشگاهی روی دو سرریز اوجی با ارتفاع مختلف و نیز از داده‌های آزمایشگاهی مدل سرریز دریچه‌دار 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 به ترتیب 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 باز شدگی دریچه افزایش یابد. با افزایش ارتفاع پایین دست و کاهش ارتفاع بالادست سرریز نیز آستانه استغراق نسبی سرریز و میزان آبگذری افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

آستانه استغراق، اندازه‌گیری، سازه هیدرولیکی، کنترل جریان

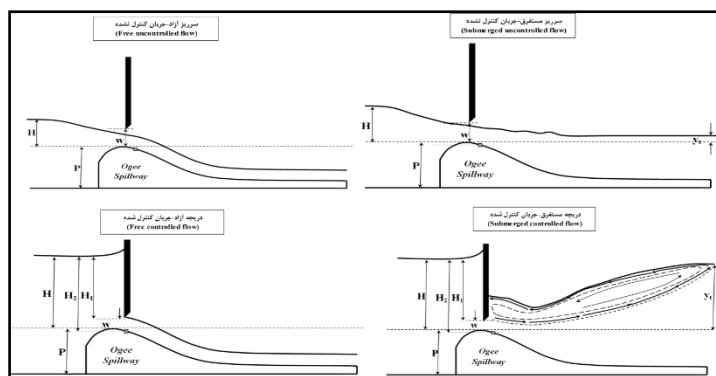
مقدمه

دریچه‌دار، مجموعه‌ای از امتیازات هیدرولیکی را با تاکید بر خصوصیات جریان توأم از روی سرریز و جریان روزنه از محل باز شدگی دریچه در اختیار قرار خواهد داد. سرریزهای اوجی گاهی می‌توانند با ارتفاع کم در کانال‌های آبیاری به‌عنوان یک آستانه برای استقرار دریچه عمل کنند. از سوی دیگر این سرریزها با ارتفاع بیشتر و در ترکیب با دریچه‌های کشویی روی تاج آنها می‌توانند به‌عنوان یک سازه به‌منظور انتقال کنترل‌شده جریان به پایین دست در رودخانه‌ها به‌کار روند. در حالت کلی، دریچه‌دار 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 (دریچه) 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 دریچه‌های 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 پایین دست 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 پایین دست، 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 کم ارتفاع 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 زیر بحرانی یا فوق بحرانی باشد. علاوه بر این وجود برآمدگی و هندسه آن در مقاطع بالادست و پایین دست الگوی توزیع سرعت عمقی جریان در مقطع بالادست و به ویژه در محدوده جت فوق بحرانی 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 کم ارتفاع 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 بر حسب 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

سرریز دریاچه 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 به‌عنوان شیب بهینه انتخاب گردید. با افزایش استغراق، ضریب بده کاهش می‌یابد.

انصار و چن (Ansar & Chen, 2009) داده‌های صحرائی حاصل از ۹۰ سازه سرریز-دریاچه، شامل دو نوع سرریز اوجی و سرریز تخت را مطالعه کردند. در این مطالعه، جریان از زیر سازه سرریز دریاچه 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 صحرائی واسنجی شدند. این محققان رابطه ۲ را به‌منظور تعیین دبی سرریز اوجی دریاچه‌دار 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 دریاچه (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 صحرائی از عملکرد ۹۰ سازه

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

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

که در آن،

Q_G = بده سرریز دریاچه‌دار؛ Q = بده سرریز برای هد طراحی متناظر بدون حضور دریاچه؛ H_2 = عمق جریان نسبت به نشیمنگاه دریاچه روی سرریز؛ H_1 = عمق جریان نسبت به لبه دریاچه و H = عمق جریان نسبت به تاج سرریز در شرایط نبود عملکرد در دریاچه (عملکرد سرریز). هگر و برمن (Hager & Bremen, 1988) با بهره‌گیری از معادلات ارائه شده برای جریان عبوری از سازه سرریز-دریاچه (Anon, 1972) و با معرفی ضرایب نیمه‌تجربی، نسبت بده عبوری از دریاچه 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 عبوری از سازه

دریچه‌دار کشویی بررسی کردند. این محققان پس از واسنجی مدل عددی پیشنهادی بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی سرریز دریچه دار کشویی در شرایط جریان سرریز و روزنه، بر اساس مجموعه برداشت‌های صحرائی از عملکرد سرریز اوجی دریچه‌دار در فلوریدای جنوبی، کاربرد این مدل را جایگزینی مطلوب از ساخت مدل‌های فیزیکی یا اندازه‌گیری‌های صحرائی برای توسعه روابط ریتینگ به منظور 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) به منظور تعیین آبگذری سرریز اوجی دریچه‌دار کشویی را بر مبنای ۶۱ سری داده آزمایشگاهی و ۹۴ سری برداشت صحرائی 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 به دست آمد. در این تحقیق و بر اساس داده‌های صحرائی چهار سازه سرریز دریچه‌دار، میانگین خطای نسبی تعیین دبی در حدود ۵ درصد به دست آمده است. جالب توجه است که این خطا به واسطه 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 به ترتیب معادل ۰/۲۸، ۰/۳۰ و ۰/۳۰ 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 به منظور 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 دریچه‌دار 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 دریچه‌دار با ابعاد خاص ارائه شده است. با توجه به امکان ایجاد شرایط چهارگانه جریان در سرریزهای دریچه‌دار 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 دریچه‌دار 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 دریچه‌دار 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 حدی تبدیل جریان در وضعیت‌های چهارگانه، نتایج حاصل از برداشت‌ها روی دو سری داده آزمایشگاهی به‌کار گرفته شد.

سری نخست مربوط است به ۳۰۸ آزمایش روی دو نوع سرریز اوجی دریچه‌دار کشویی روی یک فلوم آزمایشگاهی به‌عرض ۹۷/۲ سانتی‌متر و طول ۱۸ متر واقع در آزمایشگاه تحقیقات آب پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (شکل ۲-۲ الف). برای این منظور دو سرریز اوجی به‌ترتیب با ارتفاع معادل ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر، هد طراحی معادل ۹/۳۸ و ۱۱/۳۶ سانتی‌متر و دبی طراحی به‌ترتیب 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 دریچه کشویی روی تاج سرریزهای اوجی، آزمایش‌های مربوط به جریان کنترل شده، به‌ازای سه بازشدگی دریچه 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 پایین دست سرریز برابر است. با این حال در شرایط طراحی مواردی رخ می‌دهد که ارتفاع بالادست و پایین دست سرریز متفاوت از یکدیگر است. به‌منظور بررسی تأثیر نسبت

ارتفاع بالادست به پایین دست سرریز بر خصوصیات آبگذری و آستانه استغراق، از ۸۳۳ سری داده برداشت شده توسط مهندسان ارتش آمریکا (Anon, 1963) روی سرریز دریچه‌دار 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 به‌کار گرفته شد. در این آزمایش‌ها بازشدگی دریچه 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 پایین دست 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 پایین دست 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 = به‌ترتیب عمق‌های بالادست و پایین دست 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- حالات‌های مختلف جریان. الف) مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر و ب) مدل سرریز دریاچه‌دار آرکانزاس
Fig. 2- Different flow states a) laboratory model of this study and b) Arkansas sluice-gated spillway model

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 دریاچه، جریان همچنان تحت تأثیر دریاچه، قرار ندارد. در این محدوده خطوط جریان در تماس با سطح دریاچه قرار دارد اما همچنان جریان به صورت کاملاً روزنه شکل نگرفته است.

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

نتایج و بحث

تعیین شرایط حدی تبدیل جریان کنترل نشده به جریان کنترل شده

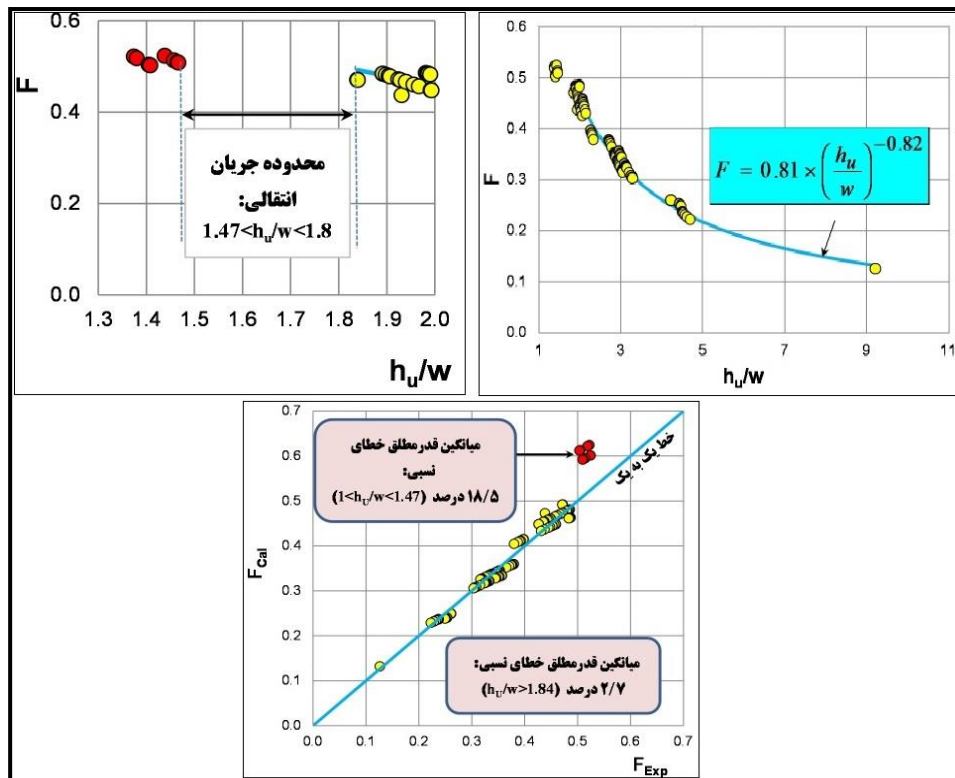
تعیین حد تبدیل جریان کنترل نشده (سرریز) به جریان کنترل شده (روزنه)، در افزایش دقت محاسبه دبی سرریز دریاچه‌دار در ناحیه انتقالی تبدیل دو جریان سودمند است. تا کنون معیار متقنی در خصوص حد تبدیل این دو جریان ارائه نشده است. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، تا وقتی که سطح آب تا تراز لبه بازشدگی دریاچه افزایش نیابد،

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 توجه است. مادام که باز شدگی دریاچه از حدود عمق بحرانی متناظر دبی عبوری کمتر نشود، جریان عبوری از مقطع سازه کنترل نشده خواهد بود. به‌سختی دیگر، به‌ازای $w > y_c$ جریان کنترل نشده و به‌ازای $w < y_c$ 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 نتیجه‌گیری نزدیک است به آنچه از شکل‌های ۳ و ۴ استنتاج می‌شود.

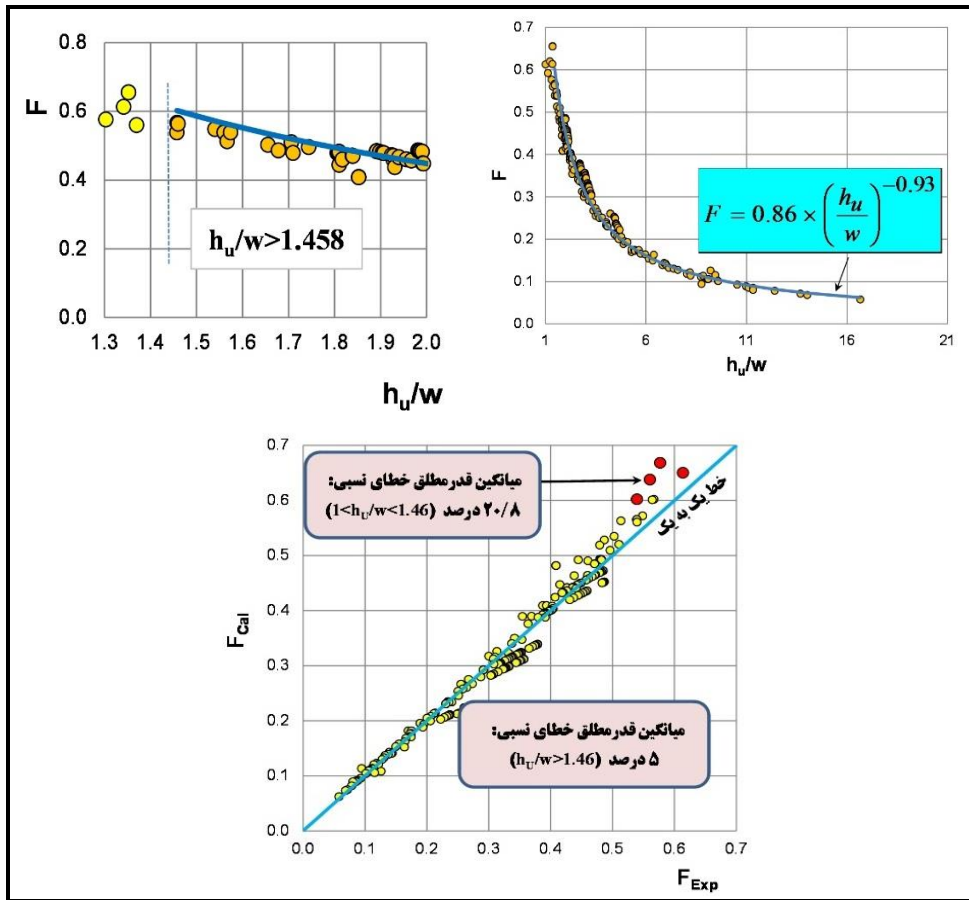
عمق بالادست به بازشدگی دریاچه، h_u/w را به ترتیب از داده‌های مدل سرریز دریاچه‌دار آرکانزاس و داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر نشان می‌دهند. در محدوده $h_u/w < 1.458$ تغییرات پارامتر F مستقل از بازشدگی و نسبت h_u/w خواهد بود $F = Q / (b\sqrt{gh_u^3}) = c$ در نتیجه $(Q \propto h_u^{1.5})$. این تغییرات بیانگر پیروی تغییرات آگذری 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 رابطه‌ی توانی $F = a(h_u/w)^b$ 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 ۱۸/۵ و ۲۰/۸ درصد است



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

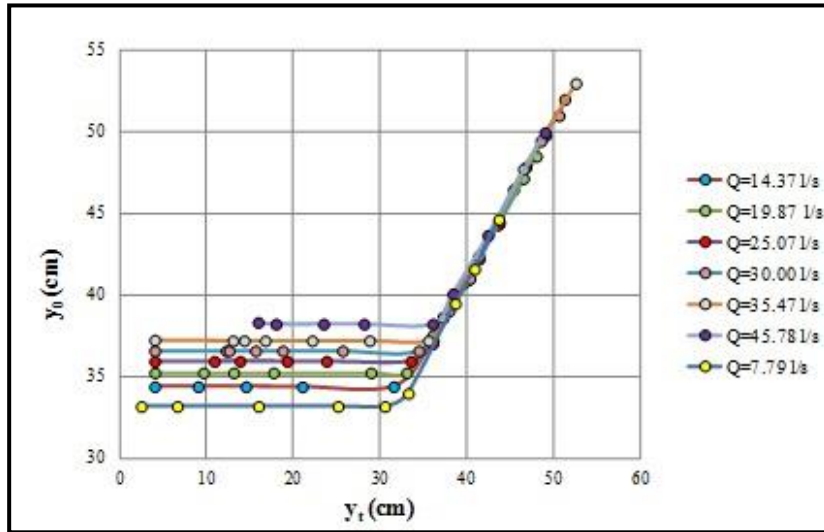
شکل ۶، زوج مرتب‌های $(h_{d(L)}/P, h_u/P)$ استخراج شده در شرایط آستانه استغراق را بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر، سرریز با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر، نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن $h_{d(L)}$ برابر عمق پایاب متناظر آستانه استغراق سرریز (جریان کنترل نشده)، رابطه ۳ از شکل ۶ برای تعیین $h_{d(L)}$ قابل حصول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

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

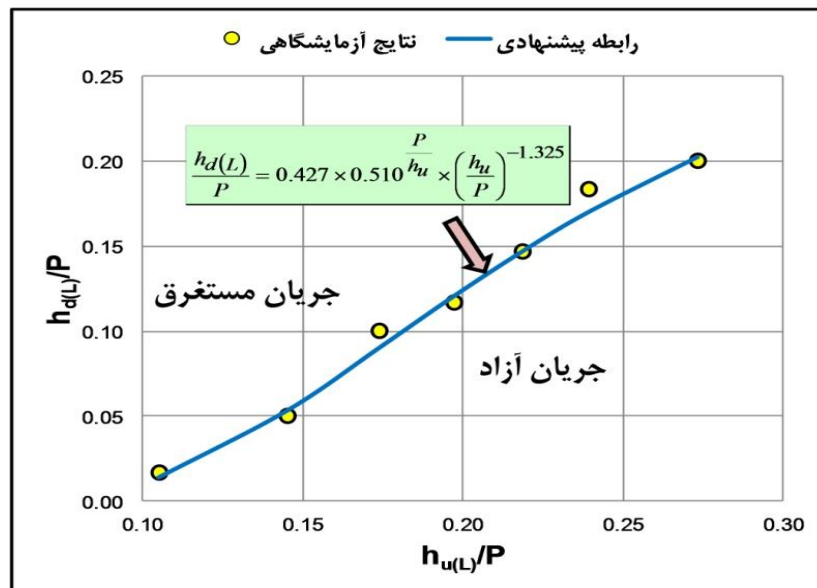
این رابطه، آستانه استغراق سرریز را در شرایطی ارائه می‌دهد که ارتفاع بالادست و پایین‌دست سرریز برابر باشند $(P_u = P_d = P)$.

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_t) 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 به‌منظور 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

بر اساس 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.

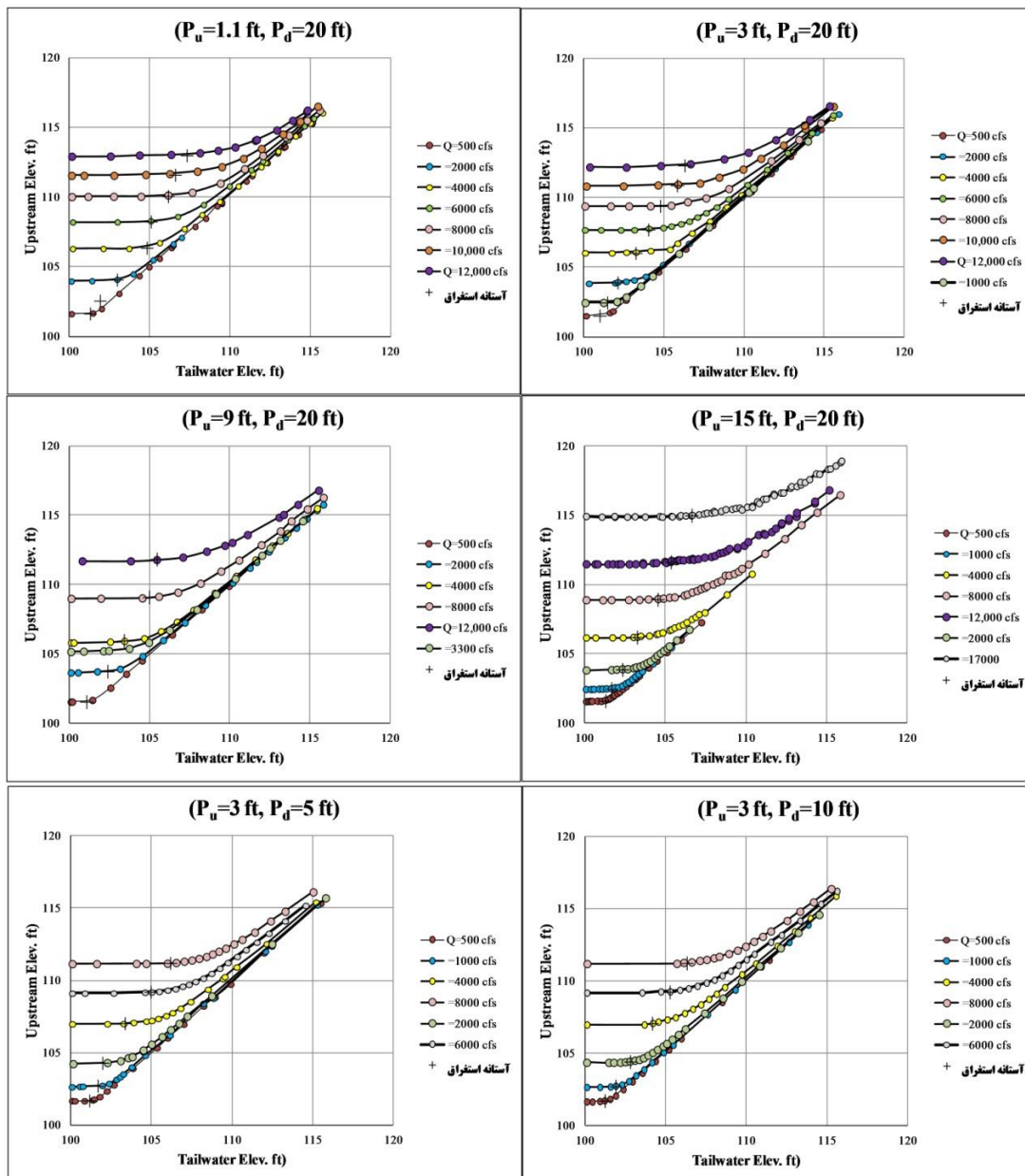
به‌منظور تعیین آستانه استغراق سرریز اوجی در شرایط تفاوت ارتفاع وجه بالادست و پایین‌دست سرریز، از مجموعه داده‌های مدل آرکانزاس استفاده شد. شکل ۷، تغییرات تراز سطح آب بالادست را در مقابل تراز سطح آب پایین‌دست در ترکیب‌های مختلف دبی و ارتفاع وجوه بالادست و پایین‌دست سرریز را

تحلیل آبگذری و شرایط جریان در...

پایین دست بر آستانه استغراق سرریز اوجی مشخص است. دیده می شود که با کاهش نسبت P_u/P_d ، آستانه استغراق افزایش می یابد. 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 می کند.

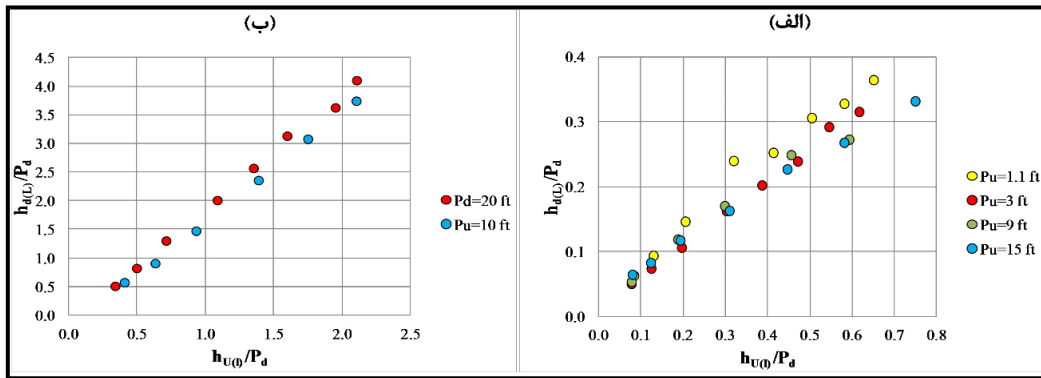
$$\frac{h_{d(L)}}{P_d} = \frac{0.036 + \frac{h_u}{P_d}}{1.88 + 0.414 \times \left(\frac{P_u}{P_d}\right)^2} \quad (4)$$

از شکل ۸ و رابطه ۴، تأثیر ارتفاع وجه بالادست و



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

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

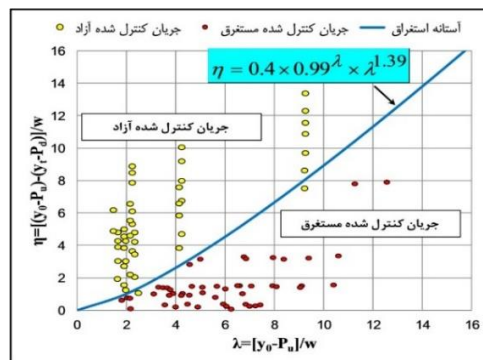


شکل ۸- الف) تأثیر ارتفاع بالادست بر آستانه استغراق ($P_d=20$ ft) و ب) تأثیر ارتفاع پایین دست بر آستانه استغراق ($P_u=3$ ft)
 Fig. 8-a) Effect of upstream height on submergence threshold ($P_d=20$ ft) and
 b) Effect of downstream height on submergence threshold ($P_u=3$ ft)

که در آن، w = بازشدگی دریچه 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 دريچه کشویی نیز هست. با استفاده از داده‌های مدل سرریز دريچه‌دار آرکانزاس در شرایط جریان کنترل شده و تعریف پارامترهای بی بعد به شکل $\lambda = [y_0 - P_u] / w$ و $\eta = [(y_0 - P_u) - (y_t - P_d)] / w$ 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)

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:

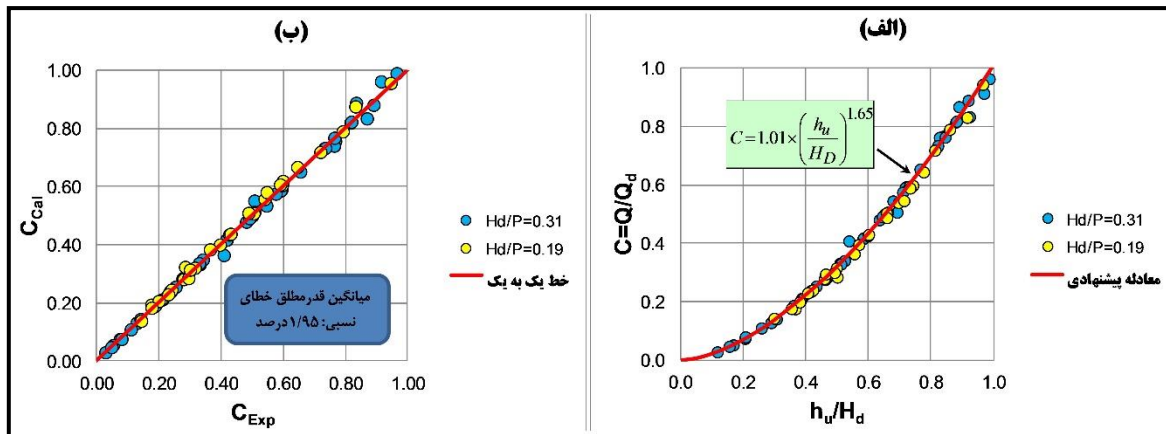
$$C = \frac{Q}{Q_d} = 1.01 \times \left(\frac{h_u}{H_d} \right)^{1.65} \quad (6)$$

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 درجه 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 دریچه‌دار کشویی در هر حالت استفاده کرد.

تحلیل آگذری در شرایط جریان کنترل نشده (سرریز) آزاد

در شرایط جریان کنترل نشده (سرریز) آزاد، آگذری 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 به ترتیب با ارتفاع ۳۰ و ۶۰ سانتی متر متناظر با دو



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

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

$$C = \frac{Q}{Q_d} = 1.125 \times \left(0.861 \times \frac{P_u}{P_d} \right) \times \left(\frac{h_u}{H_d} \right)^{1.575} \quad (7)$$

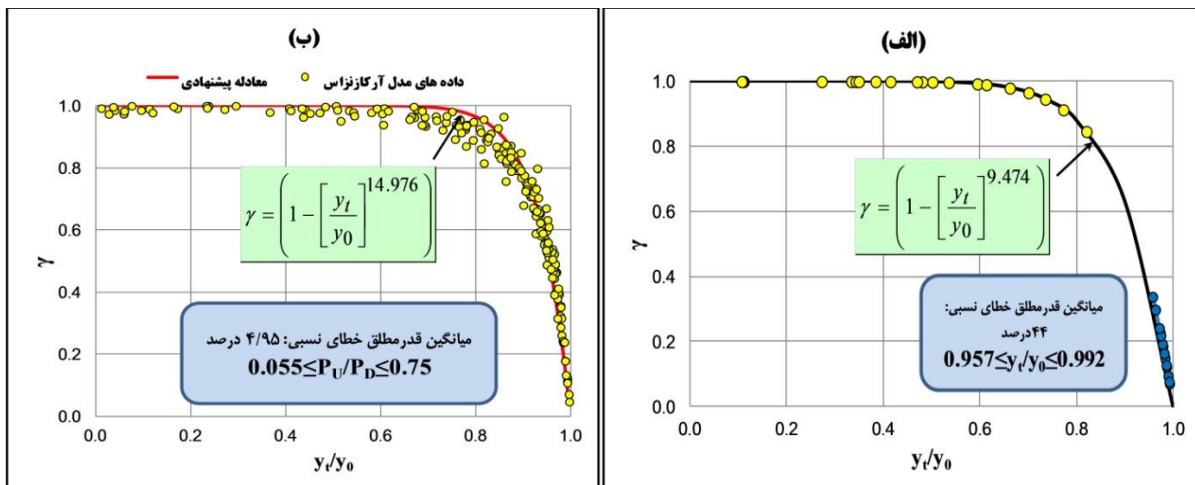
رابطه ۶، برای تعیین دبی سرریزهای اوجی در شرایط جریان کنترل نشده آزاد مختص حالت‌هایی است که ارتفاع وجوه بالادست و پایین دست سرریز با یکدیگر برابرند. در شرایط تفاوت وجوه بالادست و پایین دست سرریز و به واسطه ترکیب داده‌های برداشت

در شکل ۱۱-الف می‌بینیم که به‌ازای عمق‌های پایاب نسبی کمتر از $0.82 (y_t/y_0)$ ، سرریز تحت شرایط جریان آزاد عمل می‌کند. در شرایط برابر بودن ارتفاع وجوه بالادست و پایین‌دست سرریز $(P_u=P_d=P)$ ، بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر، مقدار بهینه پارامتر a برابر $9/747$ به‌دست آمد. در مجموعه داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر، مجموعه برداشت‌های سرریز در شرایط جریان مستغرق، منحصر به استغراق‌های نسبی قابل توجه $(0.957 \leq y_t/y_0 \leq 0.992)$ است. داده‌برداری در این محدوده، به‌دلیل خطای بالای اشاره شده در داده‌های آرکانزاس است. در این محدوده، میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تعیین دبی در حدود ۴۴ درصد است. خطای قابل توجه در تعیین دبی در این حالت به دلیل مقادیر کم دبی عبوری از مقطع سرریز در شرایط برابری تقریبی عمق‌های بالادست و پایین‌دست و نیز احتمالاً به‌دلیل وجود برخی خطاهای سیستماتیک در اندازه‌گیری‌های تراز سطح آب بالادست و پایین‌دست است. در نتیجه، لازم است احتیاط لازم در خصوص کاربرد معادله پیشنهادی و نیز قرائت عمق‌های بالادست و پایین‌دست در استغراق‌های نسبی بالاتر از 0.95 در نظر گرفته شود.

میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تعیین دبی سرریز اوجی در شرایط جریان کنترل نشده آزاد در محدوده $0.055 \leq P_u/P_d \leq 1$ ، در حدود ۳/۳ درصد است. تحلیل آگذری در شرایط جریان کنترل نشده (سرریز مستغرق) در شرایط جریان کنترلی شده مستغرق، دبی سرریز علاوه بر عمق بالادست و ابعاد سرریز، متأثر از عمق پایین‌دست نیز هست. با در نظر گرفتن پارامتر $\gamma = Q/Q_F$ ، شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب تغییرات این پارامتر را مطابق رابطه ۸ در مقابل نسبت y_t/y_0 به‌ترتیب از داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و داده‌های مدل آرکانزاس نشان می‌دهند (y_t و y_0 به‌ترتیب عبارت‌اند از عمق‌های بالادست و پایین‌دست نسبت به تاج سرریز).

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

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.



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

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.

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

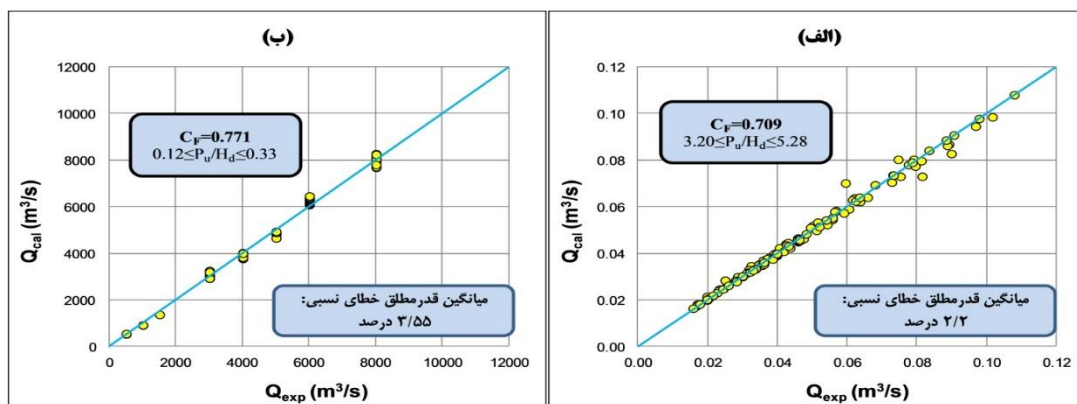
شکل‌های ۱۲-الف و ۱۲-ب می‌بینیم میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تعیین دبی از معادله ۹ و ضرایب پیشنهادی در شرایط جریان کنترل شده آزاد در محدوده داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و مدل آرکانزاس، به ترتیب معادل ۲/۲ و ۳/۵۵ درصد است. مشاهده می‌گردد که آزمایش‌های مدل آرکانزاس روی سرریز با ارتفاع نسبی کمتر و آزمایش‌های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

در شرایط تفاوت ارتفاع وجوه بالادست و پایین‌دست 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 $0.055 \leq P_u/H_d \leq 0.75$ معادل ۴/۹۵ درصد به دست آمد.

تحلیل آگذری در شرایط جریان کنترل شده آزاد با افزایش بار آبی بالادست سرریز از حدود ۱/۴۵۸ برابر

که در آن،

$C_F =$ ضریب آگذری سرریز دریچه‌دار در شرایط جریان کنترل شده آزاد. در شکل‌های ۱۲-الف و ۱۲-ب، تغییرات مقادیر دبی محاسباتی از معادله 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 $3.20 \leq P_u/H_d \leq 5.28$ معادل $C_F=0.709$ است. در



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

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 پایین دست به ارتفاع وجه بالادست (P_d/P_u). بر این اساس، ضریب C_s از رابطه ۱۱ تعیین می‌شود.

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

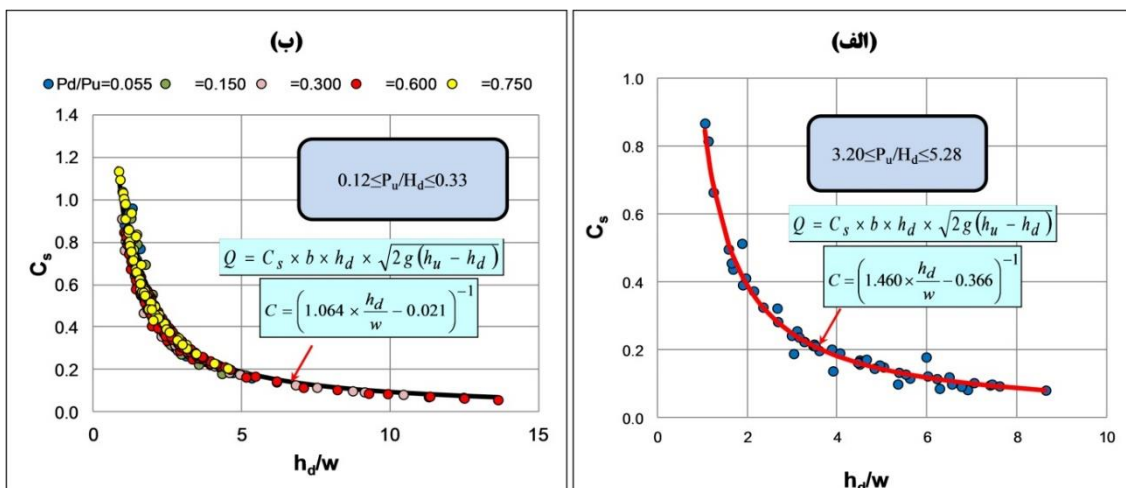
که در آن، α و β ثابت‌هایی هستند قابل تعیین بر اساس داده‌های آزمایشگاهی. مقدار این ضرایب بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و در محدوده $3.20 \leq P_u/H_d \leq 5.28$ به ترتیب معادل $1/460$ و $0/366$ و بر اساس داده‌های مدل آرکانزاس و در محدوده $0.12 \leq P_u/H_d \leq 0.33$ به ترتیب معادل $1/064$ و $0/021$ هستند. میانگین قدرمطلق خطای نسبی در تعیین دبی از معادله ۹ و ضرایب پیشنهادی در شرایط جریان کنترل شده مستغرق بر اساس داده‌های مدل آرکانزاس، در حدود ۵ درصد است.

دیده می‌شود که با افزایش ارتفاع وجه بالادست سرریز، میزان آبگذری سرریز درجه‌دار 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 کنترل شده مستغرق، به واسطه کاربرد اصول روزنه و تأثیر تفاضل عمق قبل و بعد از درجه بر میزان آبگذری، رابطه ۱۰ برای تخمین دبی سرریز درجه‌دار، 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 حاضر و مدل آرکانزاس

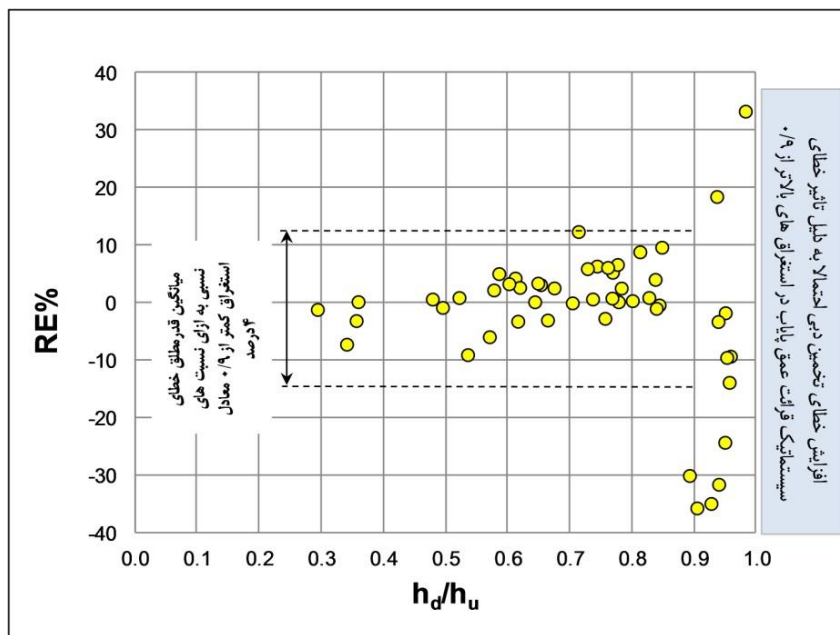


شکل ۱۳- تعیین ضریب دبی جریان کنترل شده مستغرق (C_s) از الف) داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و ب) داده‌های مدل آرکانزاس

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

میانگین قدرمطلق 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 متأثر 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 $0.9 (h_d/h_u)$ ،



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

آب فلور یدای جنوبی و مرکزی روی رود خانه آر کانزاس، خصوصیات آگذری 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 $1/46$ برابر بازشدگی دریچه افزایش یابد، شرایط جریان از بی روزنه (کنترل نشده) به روزنه (کنترل شده) تبدیل می شود. دیده می شود با افزایش ارتفاع وجه پایین دست سرریز و کاهش ارتفاع وجه بالادست، دامنه

جدول ۲، خلاصه مجموعه معادلات جدید پیشنهادی را در تحقیق حاضر به منظور تعیین آگذری 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 ساخته شده در ترکیب با مدل سرریز اوجی دریچه دار پروژه کنترل

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 آگذری 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