مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۳/ شماره ۲/ پیاپی ۳۳/ تابستان ۱۳۹۸ (۱۳۹-۱۴۹)

بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب سرریز پلکانی بر رژیم جریان و پارامترهای هیدرولیکی میدان (مطالعه موردی سرریز سدهای سیاه‌بیشه)

امین حسنعلی‌پور شهرآبادی[۱*]، مهدی اژدری مقدم[۲] و محمدرضا کاویانپور[۳]

چکیده

سرریزهای پلکانی از لحاظ اقتصادی در پایین‌دست سدهای وزنی بتن غلتکی قابل توجیه هستند و مزیت آن‌ها بر سرریزهای شوت، نرخ بالای استهلاک انرژی در طول سرریز و کاهش ابعاد حوضچه آرامش است. جریان‌های عبوری از این سرریزها به سه دسته جریان ریزشی، انتقالی و رویه‌ای تقسیم می‌شوند. در این پژوهش، چهار مدل آزمایشگاهی ساخته‌شده از سرریز سدهای بالا و پایین سیاه‌بیشه با مقیاس به‌ترتیب ۱:۱۵ و ۱:۲۰ با شیب‌های ۱۸/۴۴، ۲۶/۵۶، ۲۹/۷۴ و ۳۸/۸۱ درجه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. هدف پژوهش، بررسی تشکیل رژیم‌های مختلف جریان و مقایسه پروفیل جریان عبوری و فشار وارد بر کف پله‌ها است. نتایج این پژوهش نشان داد که تبدیل رژیم‌های جریان به یکدیگر با افزایش شیب، سریع‌تر به وقوع می‌پیوندد. روابطی برای تخمین شروع تشکیل رژیم‌های جریان ارائه شد. تمرکز بر پروفیل جریان و فشار در کف پله‌ها، نشان داد که رژیم‌های مختلف جریان با پروفیل جریان متفاوت، نوسانات فشار متفاوتی را بر کف پله‌ها وارد می‌کنند. بنابراین، تفاوت در فشارهای وارد شده بر کف پله‌ها بیانگر تفاوت در نیروهای وارد شده به سازه کف پله‌ها در رژیم‌های مختلف جریان است. نمودارهای ضریب نوسانات فشار در رژیم‌های مختلف نیز بیانگر این موضوع است که تغییر رژیم جریان عبوری تأثیر بسزایی در نوسانات فشار ندارد.

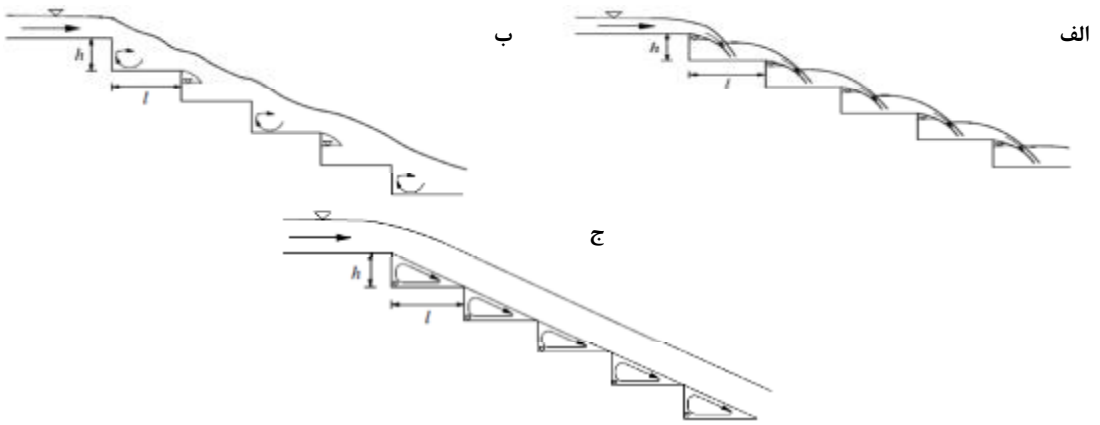
واژه‌های کلیدی: پروفیل جریان، رژیم جریان، سرریز پلکانی، شیب‌سرریز، فشار.

ارجاع: حسنعلی‌پور شهرآبادی ا. اژدری مقدم م. و کاویانپور م. ۱۳۹۸. بررسی آزمایشگاهی تأثیر شیب سرریز پلکانی بر رژیم جریان و پارامترهای هیدرولیکی میدان (مطالعه موردی سرریز سدهای سیاه‌بیشه). مجله پژوهش آب ایران. ۳۳: ۱۳۹-۱۴۹.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
*** نویسنده مسئول**: **Amin.h.Shahrabadi@gmail.com**
تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۰۶

مقدمه

سرریز پلکانی، یکی از گزینه‌های مناسب از لحاظ فنی و اقتصادی برای استهلاک انرژی جریان عبوری از سرریز سدهاست. قسمت عمدهٔ انرژی جریان در اثر مقاومت هیدرولیکی عناصر زبر یا همان پله‌ها مستهلک می‌شود و در نتیجه، نیاز به احداث سیستم استهلاک انرژی را در انتهای پایین‌دست از بین می‌برد و یا تا حد زیادی ابعاد آن را کاهش می‌دهد (حسنعلی‌پور شهرآبادی، ۱۳۹۱). با توجه به این نکته، شایسته است که عملکرد هیدرولیکی و جریان‌های عبوری از روی آن به‌درستی شناخته شود. بخش عمده‌ای از مطالعات انجام‌شده بر روی سرریزهای پلکانی به‌صورت مستقیم و سیستماتیک، در حالت جریان به‌صورت ریزشی (Nappe) و رویه‌ای (Skimming) انجام شده و مشخصات جریان در ناحیه انتقالی (Transition) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، طراحی‌های انجام‌شده روی سرریزهای پلکانی در شرایط ریزشی و رویه‌ای بوده است. بنابراین، در پژوهش حاضر از روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی شکل‌گیری جریان در حالت انتقالی استفاده می‌شود تا حدود بالایی و پایینی رژیم جریان انتقالی مشخص و فضای مورد مطالعه بیشتر برای مشخصات این ناحیه فراهم شود. شکل ۱، رژیم جریان‌های عبوری از روی سرریز پلکانی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- انواع جریان بر روی سرریزهای پلکانی: الف) جریان ریزشی؛ ب) جریان انتقالی؛ ج) جریان رویه‌ای

پیش‌بینی انواع رژیم جریان

نوع رژیم جریان بر روی این سرریزها، تابعی از دبی و شکل هندسی پله است (روشنگر و همکاران، ۲۰۱۴). به‌دلیل تفاوت در عمق جریان، سرعت جریان، وجود تمرکز هوا و استهلاک انرژی در ۳ رژیم مختلف، ارزیابی جریان در رژیم‌های مختلف برای طراحان نکته‌ای مهم است و به همین دلیل، آغاز رژیم‌های جریان موضوع مطالعات آزمایشگاهی متعددی بوده است. آزمایش‌ها و مطالعات انجام‌شده، نشانگر این مهم است که شروع جریان ریزشی تابعی از ارتفاع پله، طول پله و عمق بحرانی است. چانسون و تامبز (۲۰۰۴) در این زمینه، پژوهش‌های فراوانی انجام دادند و نتایج را برای دستیابی به حد بالا و پایین جریان انتقالی به‌ترتیب به‌صورت معادلات بی‌بعد (۱) و (۲) ارائه دادند:

$$\frac{y_c}{h} > 0.917 - 0.381\,\frac{h}{l} \qquad 0.05 < \frac{h}{l} < 1.7 \qquad (۱)$$

$$\frac{y_c}{h} < \frac{0.928}{(\frac{h}{l}+0.388)^{0.384}} \qquad (۲)$$

در این معادلات: y_c، عمق بحرانی در کانال مستطیلی (m)؛ h، ارتفاع پله (m)؛ و l، طول پله (m) است. اوهاتسو و یاسودا (۲۰۰۰) نیز معادلهٔ (۳) را برای توصیف حد بالای رژیم جریان ریزشی و معادلهٔ (۴) را برای توصیف حد پایین رژیم جریان رویه‌ای به‌صورت زیر ارائه کردند:

$$\frac{y_c}{h} > \frac{(1.4\,\frac{h}{l})^{0.26}}{1.4} \qquad (۳)$$

$$\frac{y_c}{h} = 0.862\,(\frac{h}{l})^{-0.165} \qquad (۴)$$

چمنی و راجاراتنام (۱۹۹۹) حد بالای جریان ریزشی و حد پایین جریان غیرریزشی را با معادلات (۵) و (۶) بیان کردند:

$$\frac{h}{l} = 0.45\,(\frac{y_c}{h})^{-0.62} \qquad (۵)$$

$$\frac{h}{l} = \sqrt{0.89[\,(\frac{y_c}{h})^{-1} - (\frac{y_c}{h})^{-0.34} + 1.5] - 1} \qquad (۶)$$

حیدری ارجلو و همکاران (۱۳۸۸)، محدودهٔ پایین شروع جریان غیرریزشی را با معادلهٔ زیر تعیین نمودند:

$$\frac{y_c}{h} = 1.204 - 0.463\,\frac{h}{l} \qquad (۷)$$

کیسی و همکاران (۲۰۰۸) نتایج پژوهش دیگری از اوهاتسو و یاسودا را که در شیب‌های (α) ۵/۷ تا ۵۵ درجه صادق است، به‌صورت زیر ارائه کردند:

$$\frac{y_c}{h} = \frac{1}{0.57\,(tan\alpha)^3+1.3} \qquad (۸)$$

$$\frac{y_c}{h} = \frac{1}{1.16\,(tan\alpha)^{0.165}} \qquad (۹)$$

که در آن، حد پایین جریان رویه‌ای نسبت به پژوهش قبلی آن‌ها تغییری نکرده است. معادلات دیگری نیز توسط چیناراسری (۲۰۰۲) به شکل زیر پیشنهاد شده است:

$$\frac{y_c}{h} = 0.98\,(0.55)^{\frac{h}{l}} \qquad (۱۰)$$

$$\frac{y_c}{h} = 0.8\,(\frac{h}{l})^{-0.22} \qquad (۱۱)$$

فشار در کف پله‌ها

پژوهش‌هایی در گذشته در خصوص میدان فشار در سرریزهای پلکانی برای تعیین میزان نوسانات فشار وارد بر وجه افقی پله‌ها صورت پذیرفت. آمادور و همکاران (۲۰۰۴)، پژوهشی بر روی سرریزهای پلکانی با شیب تند ۵۳/۱ درجه انجام دادند و توزیع فشار هیدرودینامیک در وجوه قائم و افقی پله‌ها را در شرایط جریان یکنواخت بررسی کردند. این پژوهش در رژیم جریان رویه‌ای انجام گرفت. نتایج نشان داد که حداقل فشار دینامیکی در وجه افقی پله در $0.6 < \frac{y}{l} < 0.8$ و حداکثر آن در لبه خارجی پله رخ می‌دهد. $\frac{y}{l}$، نسبت فاصله از لبه پله به طول پله است. سانچز و همکاران (۲۰۰۰) برای تعیین میدان فشار در سرریزهای پلکانی در رژیم جریان رویه‌ای بررسی‌های آزمایشگاهی انجام دادند. پله‌های سرریز مورد پژوهش به ارتفاع ۱۰، طول ۸ و عرض ۶۰ سانتی‌متر بود. نتایج نشان داد که در دبی ثابت، حداکثر فشار در کف پله‌ها، در لبه پله و با اختلاف زیادی نسبت به نقاط دیگر روی پله، اتفاق می‌افتد. همچنین، حداقل فشار در میانهٔ پله روی می‌دهد. کاویانپور و محبی (۱۳۹۰) نیز با پژوهش آزمایشگاهی رژیم جریان رویه‌ای به این نتیجه رسیدند که پتانسیل وقوع مقادیر منفی فشار با فاصله‌گرفتن از لبهٔ خارجی پله افزایش می‌یابد. بنابراین، در پژوهش حاضر با مطالعهٔ آزمایشگاهی، حدود شکل‌گیری رژیم جریان انتقالی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بتوان پارامترهای هیدرولیکی در این رژیم جریان که کمتر مورد بررسی پژوهشگران بوده است، مورد مطالعه قرار گیرد و شرایط کلی عبور جریان در رژیم‌های مختلف بررسی و مقایسه شود.

مواد و روش‌ها

پروژه تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه در ۱۰ کیلومتری شمال کندوان در جاده چالوس بر روی رودخانه چالوس اجرا شده است. این پروژه، شامل ۲ سد خاکی بالا و پایین با اختلاف ارتفاع ۵۰۰ متر است که انتقال جریان از سد بالا به سد پایین توسط تونل انتقال آب انجام می‌شود (گروه سازه‌های هیدرولیکی مؤسسه آب وزارت نیرو، ۱۳۸۴). این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، برای رسیدن به حدود بالا و پایین رژیم جریان انتقالی و نیز پارامترهای هیدرولیکی رژیم‌های مختلف جریان، شامل فشار دینامیکی در کف پله‌ها و همچنین عمق جریان آب عبوری از روی پله‌ها به‌صورت پروفیل جریان، بر روی مدل‌های ساخته‌شده از سرریزهای سد سیاه‌بیشه با جنس پلکسی‌گلاس انجام شد. مدل‌های هیدرولیکی در طول بازهٔ زمانی طراحی، برای بهینه‌سازی سرریزهای پلکانی استفاده می‌شوند. در این مدل‌ها، شرایط جریان باید براساس تشابه عدد فرود، شبیه به نمونه واقعی باشد (ژانگ و چانسون، ۲۰۱۶). به همین منظور، این مدل‌های آزمایشگاهی، یعنی سرریز سد سیاه‌بیشه بالا، شامل ۲ سرریز و همچنین سرریز سد سیاه‌بیشه پایین به‌ترتیب با مقیاس ۱:۱۵ و ۱:۲۰ با درنظر گرفتن تشابه عدد فرود ساخته شده‌اند. این مدل‌ها در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده‌اند. برای تفکیک رژیم جریان‌های عبوری از روی سرریز پلکانی باید به جریان فرصت شکل‌گرفتن داده شود؛ یعنی جریان پس از عبور از تاج سرریز و نقطه آغاز هواگیری، حالت کاملاً توسعه‌یافته خواهد داشت و در این حالت است که انواع جریان‌ها شکل می‌گیرند. با گذردهی دبی‌های مختلف از روی سرریزهای بالا و پایین سیاه‌بیشه، حد بالا و حد پایین رژیم جریان انتقالی تعیین شد. برای تشخیص ورود جریان ریزشی به انتقالی و یا همان حد پایین رژیم جریان انتقالی، می‌توان به شروع پاشش کاملاً چشمگیر آب استناد کرد. پاشش آب در سرریزهای با شیب تند بیشتر خواهد بود.

شکل ۲- سرریز سد بالادست- قسمت اول

شکل ۳- سرریز سد بالادست- قسمت دوم

شکل ۴- سرریز سد پایین دست

همچنین، در رژیم جریان انتقالی استخر آب در زیر جت، جریان نوسان بیشتری دارد و یا به‌عبارتی، حالت غوطه‌وری خواهد داشت؛ همچنین، آثاری از چرخش جریان را می‌توان مشاهده کرد. جدول ۱، مشخصات هندسی سرریزها، شامل پروفیل تاج، عرض آستانه، تعداد پله و شیب را نشان می‌دهد. ملاک تشخیص آستانهٔ شروع جریان رویه‌ای که همان حد بالای جریان انتقالی است، سرخوردن جریان از لبه پله به لبه پله بعدی است؛ وجود و عدم وجود حفره‌های هوا در اثبات این قضیه نقشی را ایفا نمی‌کند. این امر، برخلاف نظریه چانسون و موافق نظریهٔ چمنی و راجاراتنام است. همچنین، برای تشخیص، شروع چرخش جریان در استخر زیر پله ملاک عمل قرار گرفته است؛ این چرخش‌ها هنوز توانایی کامل‌شدن و ورود به ناحیه جریان رویه‌ای را ندارند. پس از تعیین حدود رژیم‌های جریان، به برداشت فشار دینامیکی و پروفیل جریان عبوری در رژیم‌های جریان اقدام شد. برای برداشت فشار وارد شده بر کف پله‌ها، ۳ پیزومتر در موقعیت ($\frac{y}{l}$) معادل ۰/۱۴، ۰/۴۵ و ۰/۷۱، برای هر ۴ سرریز، نصب شد. برای اندازه‌گیری فشارهای دینامیکی لحظه‌ای لوله‌های پیزومتر به گیرنده‌های حساس فشار متصل و توسط سیم‌های رابط به دستگاه مبدل (Transducer) و از آنجا به سیستم رایانه‌ای و نرم‌افزار پردازش اطلاعات مرتبط شدند. سنسورهای فشار مورد استفاده به قدرت ۰/۱۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (۱۵۰ میلی‌بار) است. نوسانات فشار در هر پیزومتر، در مدت ۳۰ ثانیه و با فرکانس ۱۰۰ هرتز ثبت شد. مطابق دستورالعمل دستگاه مذکور و کالیبراسیون به عمل آمده حداکثر خطای اندازه‌گیری فشار دینامیکی معادل ۱± میلی‌متر ستون آب است. برای برداشت پروفیل جریان از کف‌پله‌ها، بدون احتساب پاشش آب، از اشل میله‌ای استفاده شد.

برای پیداکردن رابطه‌ای بین کمیت‌های مؤثر در یک پدیده از روش آنالیز ابعادی استفاده می‌شود. پارامترهای مؤثر در بررسی جریان بر روی سرریز پلکانی و فشار وارد شده بر کف‌پله‌ها به ۳ دسته خصوصیات سیال، شامل جرم مخصوص ρ، لزجت دینامیکی μ و شتاب ثقل g؛ و خصوصیات جریان، شامل عمق جریان Y، سرعت جریان V، فشار وارد شده بر کف پله‌ها p و دبی جریان Q؛ و خصوصیات هندسی سرریز، شامل ارتفاع پله h، طول پله l، فاصله تاج سرریز تا پله روی شیب L، عرض سرریز b و شیب سرریز α تقسیم می‌شوند. پارامترهای ذکرشده را می‌توان در معادلهٔ (۱۲) خلاصه کرد:

جدول ۱- مشخصات هندسی سرریزهای مورد آزمایش

	شرح	سرریز سد بالا	سرریز سد پایین
	معادلهٔ سرریز	$Y = ۰/۲۲۸X^{۱/۵۸}$	$Y = ۰/۱۳۸X^{۱/۵۸}$
قسمت اول سرریز	ارتفاع پله h(cm)	۴/۶۷	۶
	کف پله l(cm)	۱۴	۷/۲
	شیب (درجه)α	۱۸/۴۴	۳۹/۸۱
	عرض سرریز b(m)	۱/۳۳	۱/۵
	تعداد پله	۵۹	۶۱
قسمت دوم سرریز	ارتفاع پله h(cm)	۶/۶۷	۶
	کف پله l(cm)	۱۱/۶۷	۱۲
	شیب (درجه)α	۲۹/۷۴	۲۶/۵۶
	عرض سرریز b(m)	۱/۳۳	۱/۵
	تعداد پله	۱۲	۲۳

$$f(\rho, \mu, g, Y, V, p, Q, h, l, L, b, \alpha) = 0 \qquad (۱۲)$$

متغیرهای معادلهٔ (۱۲) به پارامترهای بی‌بعد تبدیل شدند تا نهایتاً پس از حذف مغادلات کم‌تأثیر در رژیم جریان، معادلهٔ (۱۳) حاصل شود.

$$\frac{p}{\gamma h} = f_1\left(\frac{y_c}{h}, \frac{L}{k_s = h.\cos\alpha}, \frac{y}{l}\right) \qquad (۱۳)$$

نتایج و بحث

این قسمت در سه بخش انواع رژیم‌جریان، فشار و پروفیل جریان‌های عبوری و ضریب نوسانات فشار ارائه می‌شود.

رژیم‌جریان‌های عبوری

شکل‌های ۵ تا ۷ انواع رژیم‌جریان‌های عبوری از سرریز سیاه‌بیشه بالا را نشان می‌دهند.

شکل ۵- جریان ریزشی در سرریز سد بالا قسمت اول

شکل ۶- جریان انتقالی در سرریز سد بالا قسمت اول

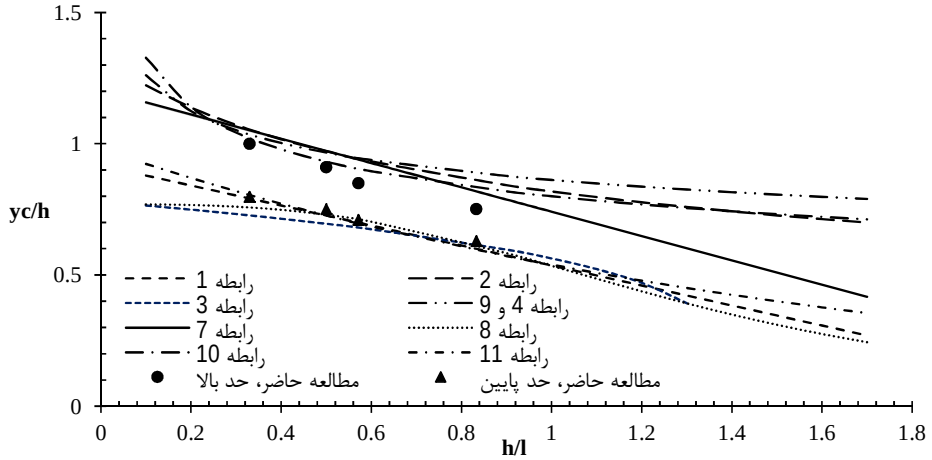
شکل ۷- جریان رویه‌ای در سرریز سد بالا قسمت اول

با توجه به برداشت دبی‌های حدود بالا و پایین این رژیم جریان و مقایسه آنها با نتایج دیگر محققان، که در شکل ۸ به‌صورت تابعی از $\frac{y_c}{h}$ و $\frac{h}{l}$ ترسیم شده است، استنباط می‌شود که با افزایش نسبت $\frac{h}{l}$ نسبت $\frac{y_c}{h}$ کم خواهد شد؛ یعنی با افزایش شیب سرریز جریان غیرریزشی زودتر شروع خواهد شد. تفکیک رژیم‌های جریان که در ناحیه جریان کاملاً توسعه‌یافته صورت گرفته است، نشان داد که در شیب‌های تند تعیین رژیم‌جریان انتقالی غیرممکن و روابط ارائه‌شده یک پیش‌بینی خواهد بود که به واقعیت نخواهد پیوست. در عمل، با توجه به سرعت شدید شکل‌گیری جریان رویه‌ای در شیب‌های تند ($\frac{h}{l} > 1$)، این رژیم شکل نخواهد گرفت.

همچنین، در سرریزهای با شیب کم ($\frac{h}{l} < 0.15$) ارتفاع پله در مقابل طول کوچک است و از این رو، رژیم‌های ریزشی و رویه‌ای شکل گرفته و رژیم انتقالی قابل مشاهده نیست. در نتیجه، هرچه شیب سرریز افزایش یابد، حدود بالا و پایین رژیم جریان انتقالی کمتر خواهد شد. با توجه به شکل ۸، برای تعیین حدود بالا و پایین رژیم جریان انتقالی معادلات زیر، با حدود کاربرد $0.33 < \frac{h}{l} < 0.85$ پیشنهاد می‌شود.

$$\frac{y_c}{h} = 0.716\,(\frac{h}{l})^{-0.31} \qquad R^2 = 0.981 \qquad (۱۴)$$

$$\frac{y_c}{h} = 0.61\,(\frac{h}{l})^{-0.25} \qquad R^2 = 0.952 \qquad (۱۵)$$



شکل ۸- مقایسه حدود بالا و پایین انتقالی با سایر محققان

وقوع رژیم جریان انتقالی بر روی مدل‌های آزمایشگاهی حاضر با نتایج ارائه‌شده توسط محققان قبلی انطباق خوبی دارد و اختلافات موجود را می‌توان ناشی از چند مورد دانست: ۱- تعداد کم پله‌ها در بعضی موارد که به جریان اجازهٔ تشکیل رژیم جریان را نمی‌دهد. ۲- اختلاف در مبنای تعیین حد بالای رژیم جریان انتقالی. اکثر محققان قبلی (بر خلاف نظریه چمنی و راجاراتنام)، زمان وقوع این امر را هنگامی می‌دانند که حفره‌های هوای محبوس در زیر جت جریان عبوری از روی پله‌ها کاملاً پر باشد که این امر با تعریف وقوع رژیم جریان رویه‌ای مغایرت دارد؛ زیرا مشاهده می‌شود که قبل از پرشدن حفره‌های هوا، به‌خصوص در شیب‌های تند، جت جریان به‌طور کامل از روی لبه پله‌ها به سمت پایین‌دست سر می‌خورد. ۳- در سرریزهای با شیب تند ($\frac{h}{l} > 1$)، با توجه به فیزیک پله‌ها و مکان برخورد جت جریان بر روی پله، رژیم جریان رویه‌ای به سرعت رخ می‌دهد و نمی‌توان رژیم جریان انتقالی را از رژیم جریان ریزشی و رویه‌ای تفکیک کرد. ۴- در سرریزهای با شیب کم، با توجه به فیزیک پله و محل برخورد جت جریان به کف پله، با افزایش مقدار دبی، حفره‌های هوای محبوس در زیر جت جریان پر شده و چرخش کامل جریان رخ خواهد داد، که رژیم جریان رویه‌ای را اعلام می‌کند.

فشار و پروفیل جریان عبوری

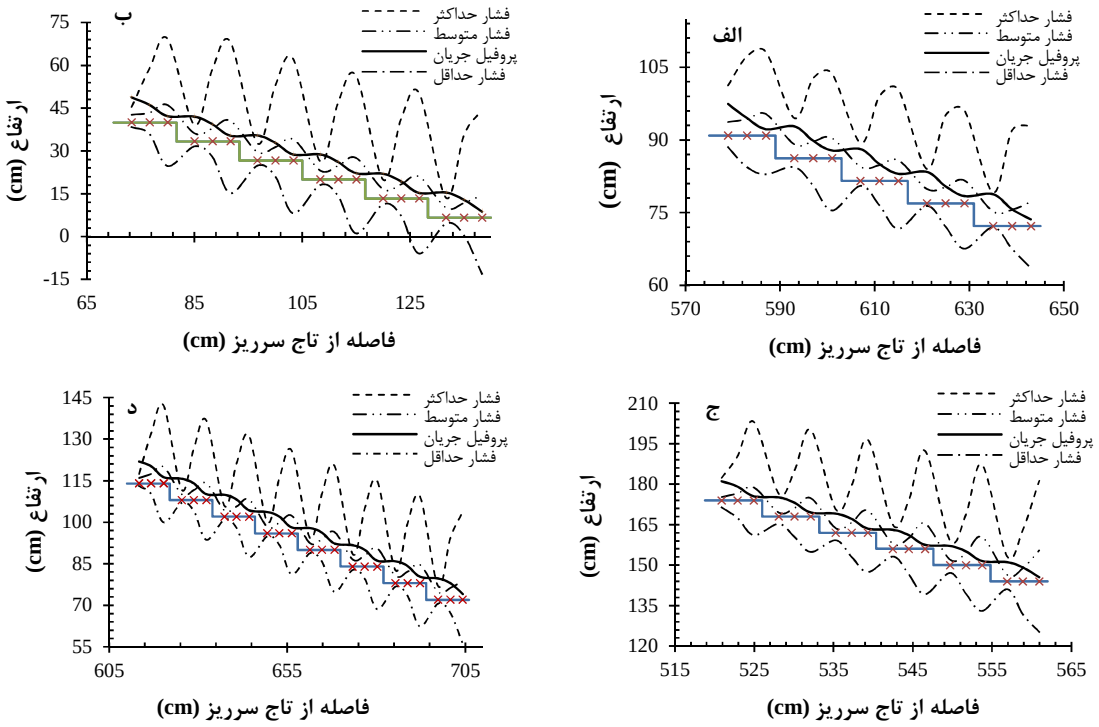
برای انجام مقایسه میان رفتار هیدرولیکی جریان در رژیم‌های مختلف، پارامترهای فشار و پروفیل جریان بر روی کف پله‌ها در ۲۸ دبی در رژیم‌های مختلف برداشت و مورد ارزیابی قرار گرفت که در شکل‌های ۹ تا ۱۱ آمده است.

رژیم جریان ریزشی

با توجه به شکل ۹، مربوط به پروفیل جریان آب در قیاس با فشار وارد شده به کف پله‌ها، روی ۴ مدل آزمایشگاهی از سرریزهای پلکانی در پله‌های مختلف در رژیم جریان ریزشی، قابل درک است که فشار در کف‌پله‌ها با پیشروی از پاشنه به سمت لبه، به‌صورت افزایشی خواهد بود. همچنین، در لبه پله و نزدیکی آن مقدار فشار میانگین وارد شده از عمق آب به مراتب بیشتر است؛ در عوض، به سمت پاشنه پله عمق آب بیشتر از فشار میانگین خواهد بود. در ارتباط با محدودهٔ لبه پله نیز فشار میانگین وارد شده با توجه به ضربهٔ وارد شده ناشی از جت جریان، منطقی است که فشار میانگین بیشتر از مقدار عمق آب باشد.

رژیم جریان انتقالی

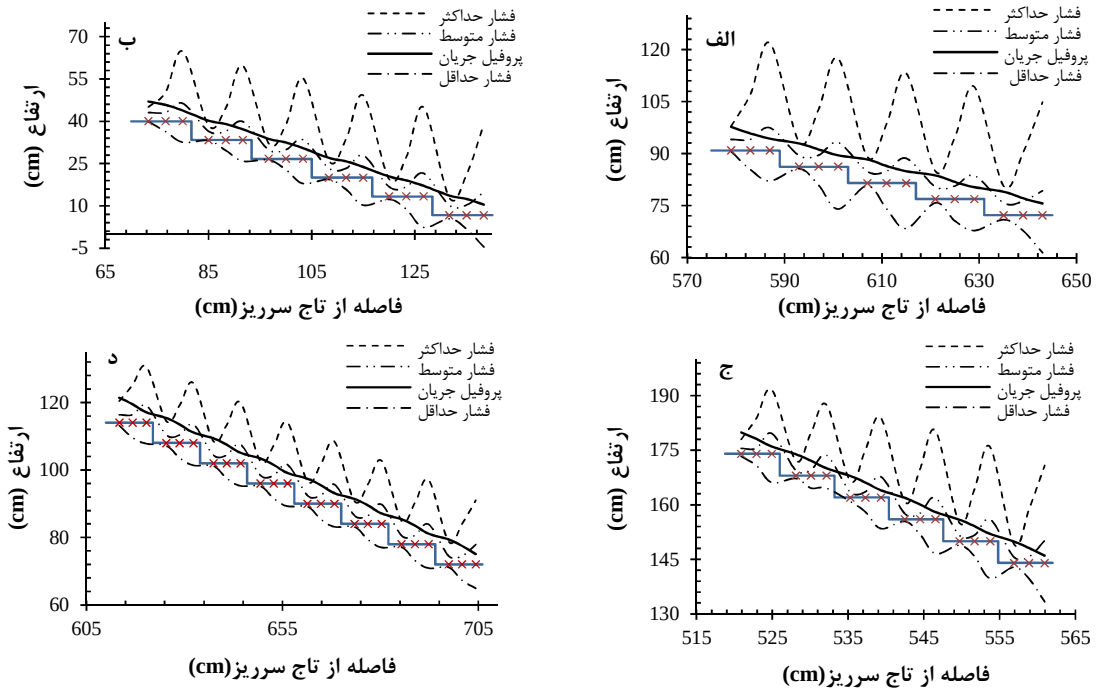
با توجه به شکل ۱۰، در رژیم جریان انتقالی، فشار از پاشنه پله تا $\frac{y}{l} = 0.4$ به‌طور تقریبی یکسان است و مشاهده می‌شود که عمق آب تا این محدوده، از مقادیر فشار میانگین بیشتر است و پس از آن، فشار میانگین از عمق آب بیشتر خواهد بود. این موضوع را می‌توان به ضربه ناشی از برخورد جت جریان و چرخش‌های ناکامل تشکیل‌شده در لبه پله نسبت داد.



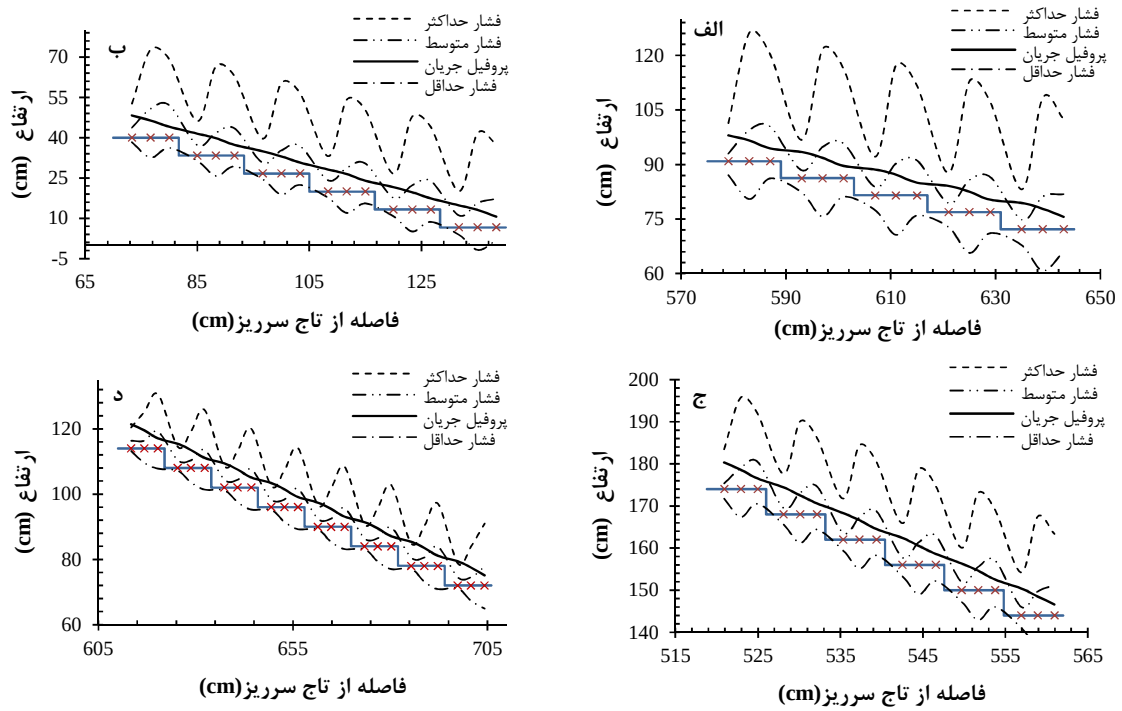
شکل ۹- نوسانات فشار و پروفیل جریان: الف) در قسمت اول سرریز سیاه‌بیشه بالا، دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه؛ ب) قسمت دوم سرریز سیاه‌بیشه بالا، دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه؛ ج) قسمت اول سرریز سیاه‌بیشه پایین، دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه؛ د) قسمت دوم سرریز سیاه‌بیشه پایین، دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه

رژیم جریان رویه‌ای

با توجه به شکل ۱۱، در رژیم جریان رویه‌ای در مدل با شیب سرریز ۱۸/۴۴ درجه می‌توان مشاهده کرد که عمق آب در نزدیکی پاشنه پله $\frac{y}{l} > 0.6$ از فشار میانگین وارد شده بیشتر است. با افزایش شیب ملاحظه می‌شود که در $\frac{y}{l} > 0.4$ مقدار عمق جریان از فشار وارد شده بیشتر است. در نتیجه، در رژیم جریان رویه‌ای افزایش شیب، با توجه به فیزیک پله‌ها، خط آب را تقریباً به‌صورت یک خط موازی با شیب سرریز نگه می‌دارد. در شیب‌های کندتر با توجه به تشکیل چرخش کامل جریان در زیر جت، در نزدیکی لبه پله برای تشکیل چرخش، یک شکست در پروفیل جریان آب تشکیل می‌شود.



شکل ۱۰- نوسانات فشار و پروفیل جریان: (الف) در قسمت اول سرریز سیاه‌بیشه بالا، دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه؛ (ب) قسمت دوم سرریز سیاه‌بیشه بالا، دبی ۵۰ لیتر بر ثانیه؛ (ج) قسمت اول سرریز سیاه‌بیشه پایین، دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه؛ (د) قسمت دوم سرریز سیاه‌بیشه پایین، دبی ۵۵ لیتر بر ثانیه



شکل ۱۱- نوسانات فشار و پروفیل جریان: الف) در قسمت اول سرریز سیاه‌بیشه بالا، دبی ۹۰ لیتر بر ثانیه؛ ب) قسمت دوم سرریز سیاه‌بیشه بالا، دبی ۹۰ لیتر بر ثانیه؛ ج) قسمت اول سرریز سیاه‌بیشه پایین، دبی ۸۰ لیتر بر ثانیه؛ د) قسمت دوم سرریز سیاه‌بیشه پایین، دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه

معادلات توصیف میدان

با توجه به این رابطه، فشارهای لحظه‌ای ثبت‌شده از مدل‌های آزمایشگاهی براساس پارامترهای بی‌بعد و به کمک رگرسیون غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفتند. روابط ۱۶ تا ۲۴ برای تخمین حداکثر، حداقل و میانگین فشارهای دینامیک وارد شده به کف پله در رژیم‌های مختلف از این مطالعه حاصل شد.

معادلات بالا نشان می‌دهند که پیچیدگی جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی، دست‌یابی به مشخصات جریان را تحت یک رابطه خاص، با مشکل روبه‌رو می‌کند. این پیچیدگی جریان در رژیم جریان رویه‌ای به مراتب بیشتر است که با ضریب رگرسیون نسبتاً کمتری همراه است.

رژیم جریان ریزشی

$$\left(\frac{P}{\gamma h}\right)_{max} = 0.86\left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.3}\left(\frac{y}{l}\right)^{-0.85}\left(\frac{L}{k_s}\right)^{0.04} \quad R^2 = 0.5882 \qquad (۱۶)$$

$$\left(\frac{P}{\gamma h}\right)_{min} = -0.23\left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.01}\left(\frac{y}{l}\right)^{-1.24}\left(\frac{L}{k_s}\right)^{-0.02} \quad R^2 = 0.6636 \qquad (۱۷)$$

با توجه به داده‌های آزمایشگاهی برداشت‌شده، برای پیدا کردن ضرایب نوسانات حداکثر و حداقل فشار در پله‌های مختلف متناظر با دبی‌های متفاوت، مطابق معادلات (۲۵) و (۲۶) اقدام شد.

$$C_{P\,max} = \frac{P_{max} - P_{mean}}{H_T} \qquad (۲۵)$$

$$C_{P\,min} = \frac{P_{min} - P_{mean}}{H_T} \qquad (۲۶)$$

$$\left(\frac{P}{\gamma h}\right)_{mean} = 0.54\left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.4}\left(\frac{y}{l}\right)^{-0.53}\left(\frac{L}{k_s}\right)^{-0.01} \quad R^2 = 0.6076 \qquad (۱۸)$$

- رژیم جریان انتقالی

$$\left(\frac{P}{\gamma h}\right)_{max} = 0.83\left(\frac{y_c}{h}\right)^{1.52}\left(\frac{y}{l}\right)^{-0.86}\left(\frac{L}{k_s}\right)^{0.07} \quad R^2 = 0.735 \qquad (۱۹)$$

$$\left(\frac{P}{\gamma h}\right)_{min} = -0.1\left(\frac{y_c}{h}\right)^{1.18}\left(\frac{y}{l}\right)^{-1.31}\left(\frac{L}{k_s}\right)^{0.13} \quad R^2 = 0.629 \qquad (۲۰)$$

$$\left(\frac{P}{\gamma h}\right)_{mean} = 0.54\left(\frac{y_c}{h}\right)^{2.4}\left(\frac{y}{l}\right)^{-0.5}\left(\frac{L}{k_s}\right)^{-0.03} \quad R^2 = 0.554 \qquad (۲۱)$$

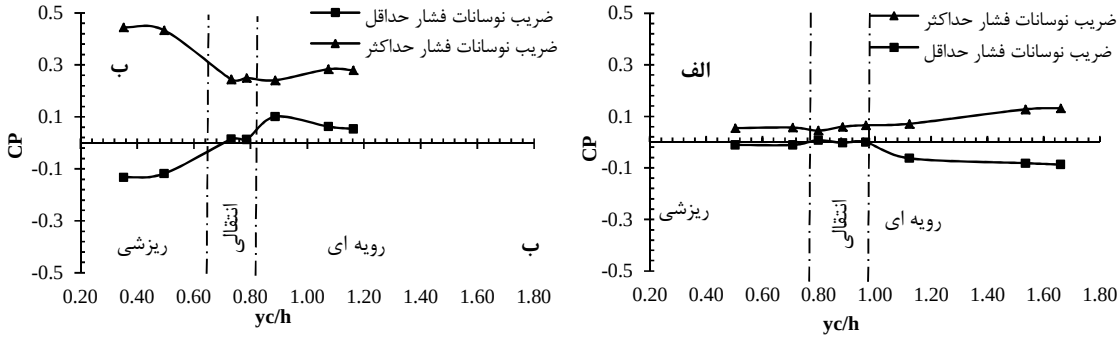
- رژیم جریان رویه‌ای

$$\left(\frac{P}{\gamma h}\right)_{max} = 2.14\left(\frac{y_c}{h}\right)^{0.63}\left(\frac{y}{l}\right)^{-0.43}\left(\frac{L}{k_s}\right)^{-0.48} \quad R^2 = 0.254 \qquad (۲۲)$$

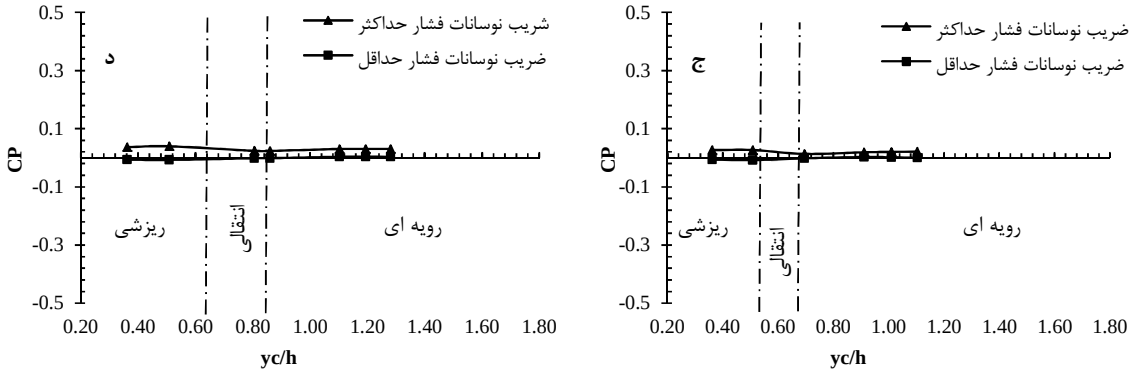
$$\left(\frac{P}{\gamma h}\right)_{min} = -0.38\left(\frac{y_c}{h}\right)^{1.49}\left(\frac{y}{l}\right)^{-0.13}\left(\frac{L}{k_s}\right)^{0.07} \quad R^2 = 0.300 \qquad (۲۳)$$

$$\left(\frac{P}{\gamma h}\right)_{mean} = 0.85\left(\frac{y_c}{h}\right)^{1.02}\left(\frac{y}{l}\right)^{-0.55}\left(\frac{L}{k_s}\right)^{-0.1} \quad R^2 = 0.535 \qquad (۲۴)$$

در این معادلات: P_{max}، P_{mean}، P_{min} و H_T به‌ترتیب ارتفاع معادل فشار حداکثر، فشار میانگین، فشار حداقل و هد کل (فاصله قائم آب بر روی تاج سرریز تا پله) بر حسب متر هستند. نمودارهای نوسانات فشار در برابر دبی‌های مختلف برداشتی (ترسیم‌شده در شکل ۱۲) نشان‌دهندهٔ این موضوع هستند که رژیم جریان عبوری تأثیری در نوسانات فشار وارد شده به پله‌ها ندارد.



شکل ۱۲- ضریب نوسانات فشار در: الف) قسمت اول سرریز سیاه‌بیشه بالا، ب) قسمت دوم سرریز سیاه‌بیشه بالا



ادامه شکل ۱۲- ضریب نوسانات فشار در: ج) قسمت اول سرریز سیاه‌بیشه پایین، د) قسمت دوم سرریز سیاه‌بیشه پایین

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش شیب سرریز باعث کمترشدن محدودهٔ رخداد رژیم جریان انتقالی می‌شود. همچنین، با افزایش نسبت $\frac{h}{l}$، نسبت $\frac{y_c}{h}$ کاهش می‌یابد که نشان‌دهندهٔ تشکیل سریع جریان رویه‌ای است. در رژیم جریان ریزشی، روند افزایشی فشار از پاشنه پله به سمت لبه پله قابل مشاهده است، که تا میانه پله با شیب کم و پس از آن با شیب تندی ادامه می‌یابد. در رژیم جریان ریزشی با افزایش شیب سرریز، فشار از پاشنه پله به سمت لبه پله بیشتر خواهد شد. همچنین، حداکثر و حداقل فشار در نزدیک لبه پله به‌وقوع می‌پیوندد. در رژیم جریان انتقالی فشار از پاشنه پله تا حدود $\frac{y}{l} = 0.4$ تقریباً ثابت و پس از آن با شیب تندی تا لبه پله ادامه خواهد یافت. در رژیم جریان انتقالی نیز حداکثر و حداقل فشار در لبه پله اتفاق می‌افتد.

در رژیم جریان رویه‌ای، مقدار میانگین فشار از پاشنه پله به سمت لبه پله رشد صعودی دارد، که این افزایش با شیب سرریز رابطهٔ مستقیم دارد. حداکثر فشار در میانه پله رخ می‌دهد و پس از آن با شیب ملایمی کاهش می‌یابد. حداقل فشار نیز در میانه پله اتفاق می‌افتد و پس از آن تا لبه پله افزایش می‌یابد. همچنین، در رژیم جریان رویه‌ای با افزایش شیب سرریز مقدار حداکثر فشارهای ثبت‌شده کمتر می‌شوند.

سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از گروه سازه‌های هیدرولیکی مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو به‌ویژه جناب آقای مهندس رضا روشن و جناب آقای مهندس علی خراسانی‌زاده به‌دلیل حمایت‌های بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزشمندشان تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

۱. حسنعلی‌پور شهرآبادی ا. ۱۳۹۱. ارزیابی میدان جریان روی سرریزهای پلکانی در شرایط انتقالی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه سیستان و بلوچستان. ۱۲۶ ص.

۲. حیدری ارجلو س. موسوی جهرمی س. ح. و فرازمند س. ۱۳۸۸. بررسی شروع جریان غیرریزشی (Skimming Flow) در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل‌های فیزیکی. مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ اردیبهشت، دانشگاه شیراز. ۷ ص.

۳. کاویانپور م. ر. و محبی م. ۱۳۹۰. بررسی تغییرات نوسانات فشار وارد بر کف پله سرریزهای پلکانی مطالعه موردی: سرریز سد سیاه بیشه ایران، دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۷ تا ۱۹ آبان، دانشگاه گیلان. ۶ ص.

۴. گروه سازه‌های هیدرولیکی مؤسسه آب وزارت نیرو. ۱۳۸۴. گزارش نهایی مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب تلمبه ذخیره‌ای سدهای سیاه بیشه بالا و پایین، جلد اول. ۹۲ ص.

5. Amador A. Sanchez-Juny M. Dolz J. Sanchez-Tembleque M. and Puertas J. 2004. Velocity and Pressure Field in Skimming Flow in Stepped Spillways, Hydraulics of Dams and River Structures, 179-285. DOI: 10.1201/b16994-39.

6. Chamani M. R. and Rajaratnam N. 1999. Onset of Skimming Flow on Stepped Spillways. Journal of Hydraulic Engineering. 125: 969-971.
7. Chanson H. And Toombes L. 2004. Hydraulics of Stepped Chutes: the Transition Flow, Journal of Hydraulic Research. 42: 43-54.
8. Chinnarasri C. 2002. Assessing the Flow Resistance of Skimming Flow on the Stepped Spillways, Journal of Dam Engineering. 7(4): 303-321.
9. Kisi O. Emiroglu M. E. and Baylar A. 2008. Flow Regime Prediction in Stepped Channels Using Neural Computing Technique, International Journal of Science & Technology. 3(1): 109-121.
10. Ohtsu I. and Yasuda Y. 2000. Characteristics of Skimming Flow Over Stepped Spillways. Journal of Hydraulic Engineering. 126: 860-873.
11. Roushangar K. Akhgar S. Salmasi F. and Shiri J. 2014. Modeling Energy Dissipation over Stepped Spillways Using Machine Learning Approaches. Journal of Hydrology. 508: 254-265.
12. Sanchez-Juny M. Pomares J, Dol J. 2000. Pressure Field in Skimming Flow Over a Stepped Spillway. International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Zurich. 137-146.
13. Zhang G. and Chanson H. 2016. Hydraulics of the Developing Flow Region of Stepped Spillways. I: Physical Modeling and Boundary Layer Development. Journal of Hydraulic Engineering. 142(7): 8 p. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001138.