

بررسی آزمایشگاهی محل شروع هواگیری جریان روی سرریزهای پلکانی

غلامرضا عزیزیان^۱، مهدی اژدری مقدم^۲، امین حسنعلی پور شهرآبادی^{۳*} و محمدطاهر کاکویی شورکایی^۴

چکیده

سرریزهای پلکانی، از لحاظ اقتصادی، در پایین دست سدهای وزنی RCC توجیه پذیر هستند و مزیت آنها نسبت به سرریزهای هموار میزان بالای استهلاک انرژی در طول سرریز و کاهش ابعاد حوضچه آرامش است. در این پژوهش سه مدل آزمایشگاهی ساخته شده از جنس پلکسی گلاس با شیبهای ۱۸/۴۴، ۳۸/۸۱ و ۵۰/۲ درجه، تعداد پله‌های ۵۹، ۶۱ و ۶۵ و همچنین عرض ۱/۳۳، ۱/۵ و ۲/۱۲ متر، در مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو آزمایش مورد قرار شد. هدف از این پژوهش، بررسی فاصله تاج سرریز تا محل شروع هواگیری طبیعی جریان عبوری در جهت شیب سرریز بود. نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش شیب سرریز باعث کاهش طول بدون هوای جریان (l_i) روی سرریز و همچنین هدایت افزایش دبی محل شروع هواگیری طبیعی جریان به سمت پائین دست است. با استفاده از نتایج مطالعه، برای تعیین طول بدون هوای جریان یک رابطه کلی ارائه شده است. مقایسه نتایج، رابطه مناسب‌تری را برای محل شروع هواگیری طبیعی جریان در این مطالعه نسبت به مطالعات گذشته نشان داد. نتایج این پژوهش بیانگر کاهش طول بدون هوای جریان روی سرریزهای پلکانی در مقایسه با سرریزهای اوجی بود.

واژه‌های کلیدی: سرریز پلکانی، مدل آزمایشگاهی، شیب سرریز، محل شروع هواگیری.

ارجاع: عزیزیان غ. اژدری مقدم م. حسنعلی پور شهرآبادی ا. و کاکویی شورکایی م. ط. ۱۳۹۶. بررسی آزمایشگاهی محل شروع هواگیری جریان روی سرریزهای پلکانی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۵: ۹۱-۹۸.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

۴- فارغ‌التحصیل کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان.

* نویسنده مسئول: Amin.h.Shahrabadi@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱۹

مقدمه

برای سرریز سدهای بدون پله، ضخامت لایه مرزی را پژوهش‌گران مختلف تخمین زده‌اند؛ ولی این نقطه هنوز به درستی در شیب‌های پلکانی تعیین نشده و علت آن، پیچیده بودن شرایط جریان در این نوع سرریزهاست. در واقع یکی از تأثیرات مثبت پله‌ها، انتقال محل شروع هواگیری به سمت بالادست و کاهش ناحیه خطر در مقابل کاویتاسیون است (چانسون، ۲۰۰۲). تعیین محل شروع ورود هوا به جریان معمولاً به صورت مشاهده انجام می‌شود؛ بنابراین مشخصات و مختصات ارائه شده برای این نقطه توسط پژوهش‌گران مختلف، متفاوت است. به صورت کلاسیک، این نقطه با سطح مقطعی از پله که جریان آب به رنگ سفید یا شیری رنگ در می‌آید، مطابقت دارد؛ یعنی جایی که حباب‌های هوا به صورت ثابت در داخل جریان باقی خواهند ماند (فالوی، ۱۹۸۰). چانسون محل نقطه شروع هواگیری طبیعی را تابعی از دبی و ضریب زبری معرفی کرد (چانسون، ۲۰۰۲):

$$l_i = 9.719 (h_s \cos \theta) (\sin \theta)^{0.0796} F_*^{0.713} \quad (1)$$

$$26 < \theta < 55$$

$$F_* = \frac{q}{\sqrt{g \cdot \sin \theta \cdot (h_s \cdot \cos \theta)^3}} \quad (2)$$

که در آن l_i فاصله طولی محل شروع هواگیری از تاج سرریز برحسب متر، θ شیب سرریز، q دبی در واحد عرض برحسب $\frac{m^2}{s}$ ، ارتفاع پله برحسب متر و F_* عدد فرود در لبه پله و برحسب ارتفاع زبری بیان می‌شود.

کریستودلو (۱۹۹۳) بر مبنای اطلاعات وود و همکاران (۱۹۸۳) رابطه زیر را ارائه کرد:

$$l_i = 26.19 f^{0.267} (h_s \cos \theta)^{1.0995} (\sin \theta)^{0.0995} F_*^{0.33} \quad (3)$$

نتایج رابطه (۳) در صورتی که f یا ضریب اصطکاک کمتر از ۰/۱ باشد، با نتایج رابطه (۱) برابر خواهد بود.

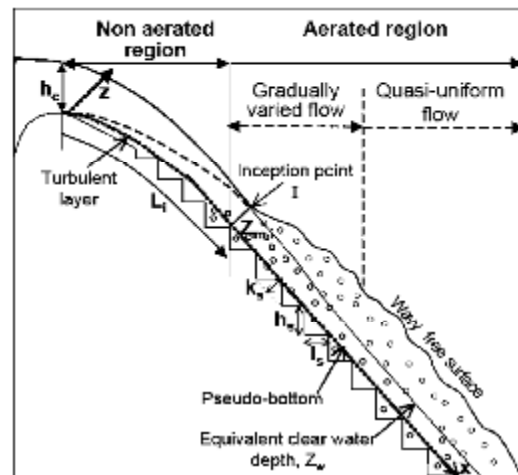
چمنی (۲۰۰۰) که از مدل‌های با دامنه تغییرات $\frac{h_s}{l_s}$ از ۱/۲۵ تا ۱/۶۷ استفاده کرد، رابطه زیر را استخراج کرد. l_s عرض پله برحسب متر است:

$$l_i = 8.29 (h_s \cos \theta) (\cos \theta)^{0.425} F_*^{0.85} \quad (4)$$

باوس و هگر (۲۰۰۳) نیز با انجام آزمایش‌هایی روی مدل سرریز پلکانی با دامنه تغییرات شیب ۳۰ تا ۵۰ درجه رابطه جدیدی ارائه کرد که این رابطه، شباهت نسبی با رابطه (۴) دارد:

$$l_i = 9.72 (h_s \cos \theta) (\cos \theta)^{1.29} F_*^{0.86} \quad (5)$$

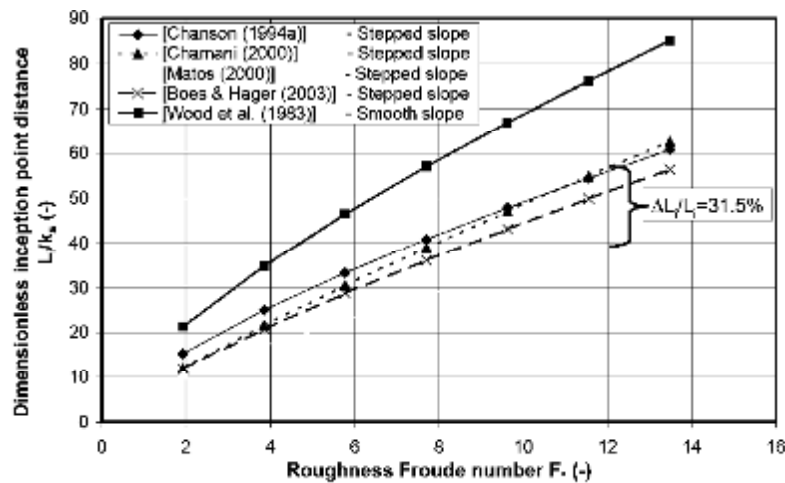
از جمله خطراتی که همواره سرریز سدها را تهدید می‌کند، کاویتاسیون است که ناشی از آثار هیدرودینامیکی سرعت زیاد جریان بر سازه است. وجود هوا در میان جریان‌هایی که سرعت زیاد دارند، می‌تواند از خطرهای خلاءزایی جلوگیری کند و یا آن را کاهش دهد. چانسون (۱۹۹۶) نشان داد که ۴ تا ۸ درصد غلظت هوا در مجاورت کف سرریز می‌تواند از صدمات خلاءزایی روی سطح بتن ممانعت کند. مهم‌ترین شاخصه جریان عبوری از روی سرریزهای پلکانی سطح بالای آشفته‌گی و حبس یا ورود هوا به جریان است. حباب‌های هوا در اثر نوسانات آشفته‌گی نزدیک به سطح آزاد جریان دوفازی آب و هوا به وجود می‌آیند. مطابق شکل ۱، لایه مرزی از تاج شروع، به طرف پائین‌دست توسعه می‌یابد و سطح آب را قطع می‌کند. وقتی لبه خارجی لایه مرزی به سطح آزاد می‌رسد، آشفته‌گی ایجاد شده، باعث هوادهی طبیعی جریان می‌شود. محل شروع ورود هوا، نقطه شروع^۱ نامیده می‌شود.



شکل ۱- نواحی جریان روی سرریز پلکانی (آندره، ۲۰۰۴)

در پایین‌دست، جریان کاملاً توسعه یافته است و هوادهی سریع سطح آزاد مشاهده می‌شود. با فاصله‌ای طولانی از این نقطه، جریان به تعادل یکنواخت می‌رسد؛ به این مفهوم که برای یک دبی مفروض عمق جریان، غلظت هوا و توزیع سرعت در طول شوت تغییر نخواهد کرد، این ناحیه به جریان متعادل یکنواخت موسوم است.

در شکل ۲ روابط ارائه شده بالا را برای سرریزهای پلکانی و غیرپلکانی با همدیگر مقایسه می‌شود. برای دبی واحد عرض $\frac{m^2}{s}$ ، اختلاف نسبی مقادیر ارائه شده توسط چمنی و ماتئوس به ۳۱/۵ درصد می‌رسد؛ بنابراین با توجه به اختلاف قابل توجه فوق، به نظر می‌رسد هنوز معیار دقیقی برای تعیین نقطه شروع ورود هوا به جریان ارائه نشده است. در نتیجه هدف از پژوهش حاضر، معرفی رابطه‌ای برای تعیین طول نقطه شروع هواگیری طبیعی l_i از محل تاج سرریز پلکانی است.



شکل ۲- مقایسه روابط پیشنهادی برای تعیین نقطه شروع ورود هوا (آندره، ۲۰۰۴)

پارامترهای فوق، σ به علت رعایت حداقل عمق آب روی سرریز و ε_f به دلیل ثابت بودن در تمام آزمایش‌ها، قابل صرف نظر هستند. $\tan \theta$ خود یک عامل بدون بعد است. پس از انجام آنالیز ابعادی به روش باکینگهام با انتخاب ρ_w ، μ_w و k_s به عنوان پارامترهای تکرار شونده، می‌توان تابعی به صورت زیر شامل عوامل بدون بعد تعریف کرد:

$$f_2 = \left(\tan \theta, \frac{L_i}{k_s}, \frac{P}{k_s}, \frac{h_0}{k_s}, \frac{l_s}{k_s}, \frac{h_s}{k_s}, \frac{b}{k_s}, \frac{k_s \cdot g}{v_w^2}, \frac{\mu_w}{\rho_w \cdot v_w \cdot k_s} \right) = 0 \quad (9)$$

پس از حذف نسبت‌های ثابت در طول سرریز و در مراحل آزمایش، رابطه (۱۰) از طریق آنالیز ابعادی به کمک پارامترهای مؤثر مربوط به نقطه شروع هواگیری طبیعی استخراج شد.

$$\frac{L_i}{k_s} = f(\tan \theta, F_*) \quad (10)$$

سیس با استفاده از برازش مدل‌های چند متغیره بین پارامترهای مؤثر رابطه‌ای تعریف شد.

ماتئوس (۲۰۰۰) در فلوم آزمایشگاهی پلکانی و شیب ۵۳ درجه، به نتیجه زیر دست یافت:

$$l_i = 6.289 (h_s \cos \theta) F_*^{0.734} \quad (6)$$

وود (۱۹۹۱) برای سرریز غیرپلکانی (اوجی) نتایج زیر را به دست آورد:

$$l_i = 13.6 (h_s \cos \theta) (\sin \theta)^{0.0796} F_*^{0.713} \quad (7)$$

که در این حالت $h_s \cos \theta$ معادل زبری کف در نظر شده است.

مواد و روش‌ها

در درجه اول و به جهت این‌که تأثیر مقیاس مدل در نتیجه‌گیری‌ها و تفسیرها از بین برود و همچنین ارتباط بین کمیت‌های مختلف آسان می‌شود، با استفاده از کمیت‌های بررسی شده باید مجموعه‌ای از پارامترهای بدون بعد مؤثر بر موقعیت نقطه شروع هواگیری به دست آید.

$$f_1 = (\rho_w, \mu_w, \varepsilon_f, \sigma, g, v_w, \tan \theta, b, h_s, k_s, l_s, L_i, h_0, P) = 0 \quad (8)$$

که در آن ρ_w چگالی آب، μ_w ویسکوزیته دینامیکی آب، ε_f زبری سطحی، σ کشش سطحی، g شتاب ثقل، v_w سرعت آب در راستای شیب، θ شیب سرریز، b عرض سرریز، h_s ارتفاع پله، k_s ارتفاع پله در جهت عمود بر جریان که معادل $h_s \cos \theta$ است، l_s عرض پله، l_i فاصله نقطه شروع هواگیری طبیعی تا تاج سرریز، h_0 ارتفاع آب در بالادست سرریز و P ارتفاع سرریز است. از بین مجموعه

(شکل‌های ۳، ۴ و ۵ (حسنعلی پور شهرآبادی، ۱۳۹۱)) با مشخصات فیزیکی جدول ۱ مورد آزمایش واقع شدند.

در این پژوهش که در مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو انجام شد، مدل‌های ساخته شده از جنس پلکسی‌گلاس

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل سرریزهای مورد آزمایش

مدل ۳	مدل ۲	مدل ۱	شرح
$Y = -0.1504x^{1/84}$	$Y = 0.138x^{1/58}$	$Y = 0.228x^{1/58}$	معادله سرریز
۴/۸	۶	۴/۶۷	ارتفاع پله h(cm)
۴	۷/۲	۱۴	کف پله l (cm)
۵۰/۲	۳۹/۸۱	۱۸/۴۴	شیب α (درجه)
۲/۱۲	۱/۵	۱/۳۳	عرض آستانه سرریز b(m)
۶۵	۶۱	۵۹	تعداد پله N

دبی‌ها ابتدا از دبی کم به زیاد و دیگر بار از زیاد به کم از روی مدل‌ها عبور داده شدند. قابل ذکر است که حداقل و حداکثر دبی مورد آزمایش برای ثبت نقطه شروع هواگیری جریان، در سه مدل آزمایشگاهی به جهت شیب و عرض متفاوت مدل‌ها، یکسان نیست؛ زیرا با افزایش شیب و عرض سرریز، مقدار دبی برای تشکیل جریان پیوسته بیشتر است. باید توجه کرد که برای جلوگیری از اثر دیواره کانال سرریز، این نقطه در محور مرکزی برداشت شده است. در شکل‌های ۶ تا ۱۳ (کاکویی، ۱۳۹۲) می‌توان ناحیه بدون هوا تا نقطه شروع هواگیری طبیعی را در دبی‌های مختلف روی سه سرریز مورد مطالعه، مشاهده کرد.



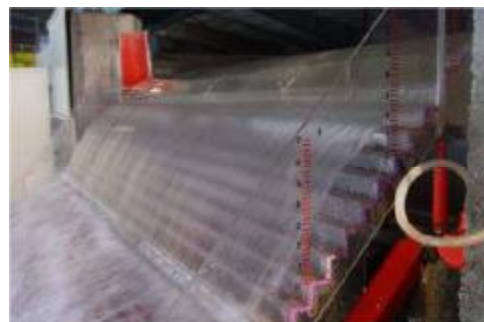
شکل ۳- مدل ۱



شکل ۴- مدل ۲



شکل ۶- دبی کل $0.200 \frac{m^3}{s}$ (سرریز مدل ۱)

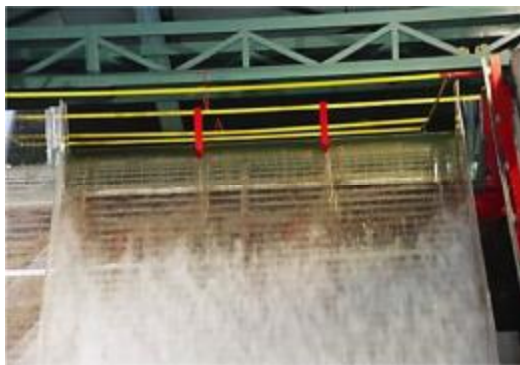
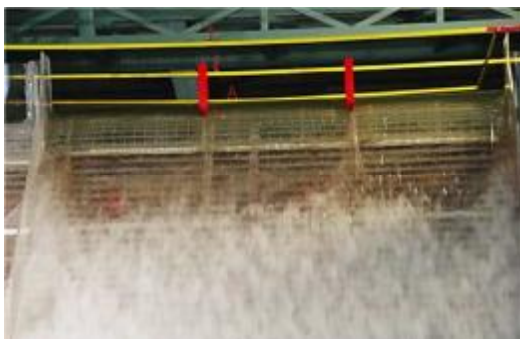


شکل ۵- مدل ۳



شکل ۷- دبی کل $0.90 \frac{m^3}{s}$ (سرریز مدل ۱)

در این پژوهش با گذردهی دبی‌های مختلف از روی مدل‌های آزمایشگاهی، اقدام به تعیین محل شروع هواگیری طبیعی شد. به گونه‌ای که جهت ثبت این نقطه

شکل ۱۲- دبی کل $\frac{m^3}{s}$ ۰/۱۶ (سرریز مدل ۳)شکل ۸- دبی کل $\frac{m^3}{s}$ ۰/۳۳۵ (سرریز مدل ۲)شکل ۱۳- دبی کل $\frac{m^3}{s}$ ۰/۲۵۶ (سرریز مدل ۳)شکل ۹- دبی کل $\frac{m^3}{s}$ ۰/۴۶ (سرریز مدل ۲)

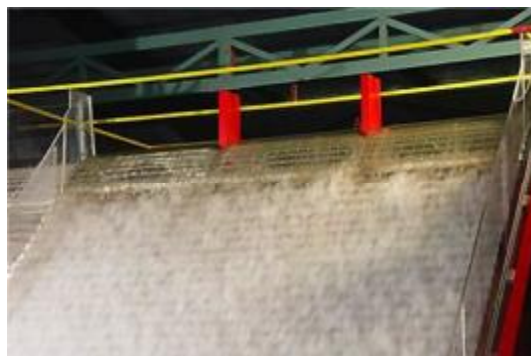
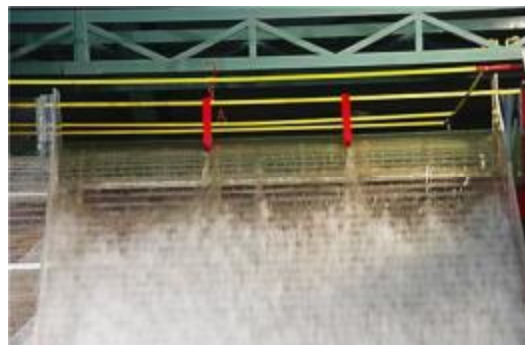
نتایج و بحث

مشاهدات به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، در جدول ۲ آمده است.

باتوجه به جدول ۲، با در نظر گرفتن اختلاف دبی واحد عرض عبوری معادل $0/05$ مترمربع بر ثانیه (تفاضل ردیف‌های مشخص شده)، مقدار l_i روی مدل‌های شماره ۱ تا ۳ به ترتیب برابر با $0/54$ ، $0/31$ و $0/26$ متر است. این امر بیان‌کننده کاهش طول l_i با افزایش شیب سرریز است. این مهم با مقدار l_i متناسب با دبی واحد عرض $0/076$ مترمربع بر ثانیه، عبوری از مدل‌های شماره ۱ و ۳ (به ترتیب برابر است با $1/6$ و $0/63$ متر) بهتر مشخص می‌شود. می‌توان ادعا کرد که افزایش شیب سرریز، محل شروع هواگیری طبیعی، جریان عبوری از آن‌را به تاج سرریز نزدیک‌تر می‌کند و به عبارت دیگر هواگیری جریان را به تأخیر می‌اندازد. حال، با در نظر گرفتن عدد فرود F_* و شیب سرریز به عنوان متغیر، نتیجه زیر حاصل شده است:

$$\frac{L_i}{k_s} = 11.08 F_*^{0.675} (\tan \theta)^{-0.2114} \quad (11)$$

$$R^2 = 0.87$$

شکل ۱۰- دبی کل $\frac{m^3}{s}$ ۰/۶۴ (سرریز مدل ۳)شکل ۱۱- دبی کل $\frac{m^3}{s}$ ۰/۱۲۸ (سرریز مدل ۳)

مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که طول بدون هوای جریان در سرریزهای پلکانی نسبت به سرریزهای اوجی کمتر و در نتیجه نقطه شروع هواگیری جریان با تاج سرریز نزدیک‌تر است.

این رابطه برای محدوده شیب $18^\circ \leq \theta \leq 52^\circ$ صادق است.

رابطه فوق در جدول ۳ با رابطه وود برای سرریزهای اوجی، با دبی‌های آزمایش مربوط به سرریز مدل شماره ۲،

جدول ۲- نتایج آزمایش روی مدل‌های آزمایشگاهی

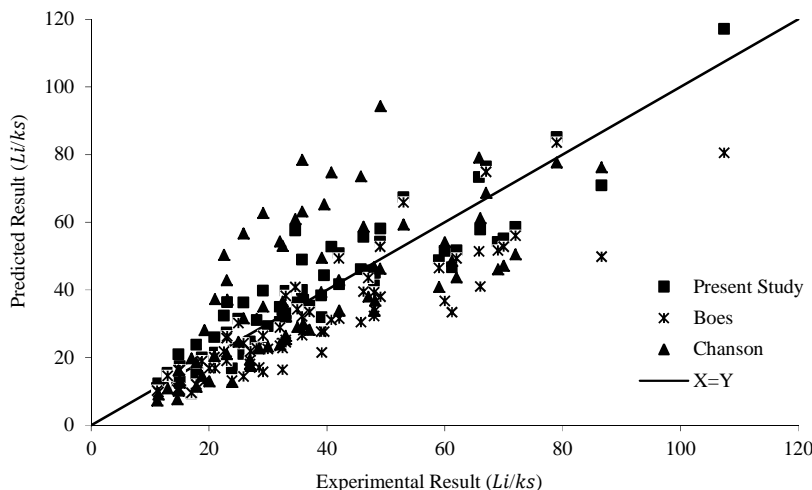
مدل ۳			مدل ۲			مدل ۱		
l_i	F^*	q	l_i	F^*	q	l_i	F^*	q
۰/۳۶	۲/۰۴	۰/۰۳۰	۰/۸۸	۱/۲۳	۰/۰۳۱	۰/۵۰	۱/۰۵	۰/۰۱۷
۰/۴۷	۴/۰۹	۰/۰۶۰	۱/۰۴	۱/۶۹	۰/۰۴۲	۰/۶۶	۱/۲۲	۰/۰۲۰
۰/۶۳	۵/۱۱	۰/۰۷۶	۱/۱۹	۱/۹۶	۰/۰۴۹	۰/۷۷	۱/۴۰	۰/۰۲۳
۰/۸۹	۸/۱۷	۰/۱۲۱	۱/۲۴	۲/۳۵	۰/۰۵۸	۱/۰۶	۱/۶۰	۰/۰۲۶
۱/۲۵	۹/۹۱	۰/۱۴۷	۱/۳۰	۲/۶۲	۰/۰۶۵	۱/۱۰	۲/۱۶	۰/۰۳۵
۱/۹۸	۱۵/۳۶	۰/۲۲۷	۱/۳۴	۳/۵۰	۰/۰۸۷	۱/۱۹	۲/۴۸	۰/۰۴۱
۲/۵۵	۲۰/۴۴	۰/۳۰۲	۱/۴۰	۳/۷۴	۰/۰۹۳	۱/۲۴	۲/۷۱	۰/۰۴۵
			۱/۵۰	۴/۰۶	۰/۱۰۱	۱/۲۵	۲/۹۲	۰/۰۴۸
			۱/۶۰	۴/۶۱	۰/۱۱۴	۱/۳۳	۳/۱۰	۰/۰۵۱
			۱/۶۵	۵/۰۴	۰/۱۲۵	۱/۴۳	۳/۳۹	۰/۰۵۶
			۲/۱۱	۵/۶۳	۰/۱۴۰	۱/۵۵	۳/۹۸	۰/۰۶۵
			۲/۱۲	۶/۰۹	۰/۱۵۱	۱/۶۰	۴/۶۵	۰/۰۷۶
			۲/۲۶	۷/۶۸	۰/۱۹۰	۱/۸۶	۵/۴۳	۰/۰۸۹
						۲/۱۳	۶/۰۴	۰/۰۹۹

برای مقایسه بین رابطه پیشنهادی با روابطی که پژوهش‌گران دیگر ارائه کرده‌اند، می‌توان از شکل ۱۴ استفاده کرد. محور افقی نشان‌دهنده نتایج آزمایشگاهی و محور قائم بیانگر نتایج به‌دست آمده از روابط است. نتایج به دست آمده از رابطه پیشنهادی با روابط چانسون و باوس مقایسه می‌شوند. علت انتخاب این دو رابطه از بین روابط پیشنهادی دیگر این است که این دو رابطه برای محدوده وسیع‌تری از شیب سرریز ارائه شده‌اند.

باتوجه به شکل ۱۴، ملاحظه می‌شود که پراکندگی نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه در مقایسه با نقاط مربوط به روابط پیشنهادی دو محقق دیگر کمتر است. علت این مسئله می‌تواند به کاربردن حجم بیشتری از داده‌ها برای گسترش این رابطه نسبت به سایر روابط باشد. رابطه ارائه شده دارای خطای استاندارد ۸/۵۱ و رابطه چانسون و باوس به ترتیب دارای خطای استاندارد ۱۰/۲۸ و ۱۲/۸۹ هستند.

جدول ۳- مقایسه رابطه به دست آمده در این پژوهش و رابطه وود برای سرریزهای اوجی

ردیف	رابطه		q
	مطالعه حاضر	وود	
	$\frac{l_i}{k_s}$		
۱	۱۲/۷۱	۱۴/۲۸	۰/۰۱۷
۲	۱۴/۲۷	۱۵/۹۴	۰/۰۲
۳	۱۵/۷۷	۱۷/۵۲	۰/۰۲۳
۴	۱۷/۲۱	۱۹/۰۳	۰/۰۲۶
۵	۲۱/۲۷	۲۳/۲۵	۰/۰۳۵
۶	۲۳/۴۰	۲۵/۴۵	۰/۰۴
۷	۲۵/۴۴	۲۷/۵۵	۰/۰۴۵
۸	۲۶/۴۴	۲۸/۷۸	۰/۰۴۸
۹	۲۷/۸۲	۲۹/۹۸	۰/۰۵۱
۱۰	۲۹/۷۴	۳۱/۹۴	۰/۰۵۶
۱۱	۳۶/۹۷	۳۹/۲۵	۰/۰۷۶
۱۲	۴۱/۳۸	۴۳/۶۶	۰/۰۸۹
۱۳	۴۴/۶۴	۴۶/۹۲	۰/۰۹۹



شکل ۱۴- مقایسه روابط پیشنهادی

سپاس‌گزاری

از گروه سازه‌های هیدرولیکی مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو به ویژه جناب آقای مهندس رضا روشن و جناب آقای مهندس علی خراسانی‌زاده تشکر و قدردانی می‌گردد.

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. کاکویی شورکایی م. ط. ۱۳۹۲. بررسی نحوه اتصال سرریزهای اوجی آزاد به تندآب پلکانی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه سیستان و بلوچستان. ۲۰۴ ص.
3. Andre S. 2004. High Velocity Aerated Flows on Stepped Chutes With Macro-Roughness Elements. Switzerland. Lausanne. 298 p.
4. Boes R. and Hager W. 2003. Two-Phase Flow Characteristics Stepped Spillways. J of Hydraulic Engineering. 129(9): 661-670.
5. Chamani M. R. 2000. Air Inception in Skimming Flow Regime Over Stepped Spillways. Proc., Int. Workshope on Hydraulics of Stepped Spillways Balkema, Zurich, Switzerland. pp. 61-67.
6. Chanson H. 2002. The Hydraulics of Stepped Chutes and Spill ways. Swets & Zeitlinger B V. Lisse. 384 p.

نتیجه‌گیری

مطالعه انجام شده روی سه مدل آزمایشگاهی ساخته شده در مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو با مشخصات جدول ۱ نشان داد که سرریز پلکانی نسبت به سرریزهای اوجی و بدون پله مکان شروع هواگیری جریان را به تاج سرریز نزدیک‌تر می‌کند؛ به عبارت دیگر l_i کوچک‌تر خواهد شد. از مقایسه کمی رابطه وود و رابطه به دست آمده در این پژوهش با نتایج استخراجی از مدل شماره ۱، مطابق جدول ۳، ملاحظه می‌شود که l_i با توجه به مقدار دبی می‌تواند از ۵ الی ۱۰ درصد کاهش پیدا کند. افزایش دبی عبوری از این نوع سرریزها که باعث افزایش F_* می‌شود، طول هواگیری سرریز را افزایش می‌دهد و باعث تأخیر در فرآیند هواگیری جریان می‌شود؛ یعنی رابطه مسقیم با l_i دارد.

نتایج نشان می‌دهد که افزایش شیب سرریز l_i را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود که مکان شروع هواگیری به تاج سرریز نزدیک‌تر می‌شود. با این تفاسیر، رابطه (۱۱) که مؤید نتایج فوق است، با ضریب همبستگی قابل قبول، استخراج شد. این رابطه با توجه به اطلاعات به دست آمده از مدل آزمایشگاهی می‌تواند بازه گسترده‌تری از شیب سرریز را نسبت به روابط گذشته، پوشش دهد. با توجه به گراف ترسیم شده در شکل ۱۳، می‌توان ادعا کرد که رابطه (۱۱) نسبت به نتایج قبلی، جواب‌های معتبرتری را ارائه می‌کند.

7. Chanson H. 1996. Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent shear flows. London. Academic Press. 339 p.
8. Chanson H. 1994. Hydraulic of Skimming Flow Over Stepped Channels. J of Hydraulic Research. 32(3): 445-460.
9. Christodoulou G. C. 1993. Energy Dissipation on Stepped Spillways. J of Hydraulic Engineering. ASCE. 119(5): 644-649.
10. Falvey H. T. 1980. Air Water Flow in Hydraulic Structures, Engineering Monograph, Bureau of Reclamation. U.S. Department of the Interior, Denver. Colorado, USA. 160 p.
11. Matos J. 2000. Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways Discussion. J of Hydraulic Engineering, ASCE. 126(11): 865-868.
12. Wood I. R. 1991. Free-Surface Air Entrainment on Spillways. Hyd. Structures Design Manual. Balkema. No. 4. pp. 55-84.