

تعیین مرزهای هیدرولیکی رژیم‌های جریان ریزشی، غیرریزشی و انتقالی در سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل فیزیکی

محمود بینا¹، فرزین سلماسی^{2*} و سید حبیب موسوی جهرمی¹

تاریخ دریافت: 88/10/26 تاریخ پذیرش: 91/07/02

¹ دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

² دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Salmasi@tabrizu.ac.ir

چکیده

هنگامی که جریان از روی سرریز پلکانی با "رژیم ریزشی" برقرار باشد، با افزایش تدریجی دبی جریان و قبل از رسیدن به رژیم کاملاً "غیر ریزشی"، "رژیم انتقالی" اتفاق می‌افتد. مکانیسم استهلاک انرژی در هر یک از رژیم‌های مذکور متفاوت بوده و لذا دانستن شرایط هیدرولیکی در مرز تفکیکی هر یک از رژیم‌های فوق‌الذکر از اهمیت ویژه برخوردار است. هدف از این تحقیق تعیین مرز دقیق مناطق مختلف رژیم‌های سه‌گانه و شرایط هیدرولیکی آن‌ها و به‌خصوص بررسی شرایط هیدرولیکی حاکم بر رژیم جریان "انتقالی" است که در سایر مطالعات به خوبی روشن نشده است. برای این منظور 18 مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی با شیب‌های 15، 25، 45 درجه و با تعداد پله‌های متفاوت ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. بررسی مرزهای رژیم جریان انتقالی نشان داد که این نوع رژیم بستگی به دبی جریان و شیب عمومی سرریز پلکانی دارد. همچنین نتایج نشان داد که تقریباً محدوده تعریفی برای رژیم انتقالی در این پژوهش با محدوده رژیم انتقالی اشاره شده توسط سایر محققین یکسان بوده، به استثنای اینکه مرزهای بدست آمده رژیم انتقالی برای این پژوهش کمی به سمت راست منتقل شده است. مقایسه باند تعریف شده در این تحقیق با داده‌های سایر محققان برآورد بهتر این تحقیق را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رژیم جریان ریزشی، غیرریزشی و انتقالی، سرریز پلکانی، مدل فیزیکی.

Determination of Hydraulic Boundaries for Nappe, Skimming and Transition Flow Regime in Stepped Spillways by Physical Modeling

M Bina¹, F Salmasi^{2*} and SH Mousavi Jahromi¹

Received: 16 January 2010 Accepted: 23 September 2012

¹Assoc. Prof., Dept. of Hydraulic Structures, Faculty of Water Sci., Univ. of Shahid Chamran (USC), Ahvaz, Iran

²Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding Author Email: Salmasi@tabrizu.ac.ir

Abstract

While flow over stepped spillway is in nappe regime, with gradual increasing of discharge and before changing flow to skimming, transition regime occurs. Different energy dissipation in each flow regime exists and thus understating of hydraulic conditions in the transition boundary of each regime is essential. The purpose of this research is to determine these boundaries among three regimes, their hydraulic conditions and specially governing hydraulic criteria on transition regime which have not been clarified in previous studies. For this purpose, 18 physical models of stepped spillways were built with slope angles of 15, 25 and 45 degrees. Results showed that transition regime depended on discharge and spillway slope. The boundary defined for the transition regime in this study is near the boundary proposed by other researchers, except with some shifting to the right. Comparison of the defined transition boundary in the present study with data of other researchers revealed greater reliability of the present study.

Keywords: Nappe flow regime, Physical model, Skimming, Stepped spillway, Transition.

مصالح بتن غلطکی (RCC¹) توسعه و توجه به این سرریز را بیشتر کرده است. زیرا ساخت سرریزهای پلکانی با این نوع تکنولوژی سازگاری مناسبی داشته و همین امر باعث گردیده است تا ساخت سرریزهای پلکانی از اهمیت بیشتری برخوردار گردد. تحقیقات چانسون (1994a) نشان می‌دهد که مقدار

مقدمه

به عقیده چانسون (1994b) سرریزهای پلکانی از زمان‌های بسیار دور (حدود 3500 سال پیش) مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. ولی تاکنون، برخی از جنبه‌های هیدرولیکی مربوطه ناشناخته باقی مانده است. در دهه‌های اخیر شناخت تکنولوژی جدید ساخت سدها با کاربرد

¹ Roller compacted cement

شود. سلماسی (1388) با تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از تعداد زیادی آزمایش مربوط به دیگران نشان داد که استهلاك انرژی در سرریزهای پله‌ای متأثر از تعداد پله بوده و به ازای تعداد پله مشخصی، می‌توان به حداکثر استهلاك انرژی دست یافت. البته این حداکثر استهلاك انرژی از سرریز سدی به سد دیگر متفاوت بوده و به شیب سرریز، دبی طرح و ارتفاع سرریز بستگی دارد. وی همچنین به روش جدید طراحی گام به گام سرریز پله‌ای اشاره نمود.

بررسی‌ها حاکی از آن است که رژیم جریان انتقالی با هیدرولیک مابین دو جریان ریزشی و غیرریزشی کمتر مورد تحلیل دقیق واقع شده و مرزهای آن به طور دقیق مشخص نشده است، به همین دلیل این جریان تاکنون ناشناخته مانده است. لذا در این تحقیق مرزهای مختلف رژیم جریان مورد آزمایش واقع شده‌اند. در شکل (1) هندسه عمومی رژیم‌های سه‌گانه به نمایش گذاشته شده‌اند. در این شکل طول افقی هر پلکان با l و ارتفاع عمودی آن با h نشان داده شده است.

استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی بیشتر از سرریزهای صاف (بدون پلکان) با همان ابعاد می‌باشد. میزان استهلاك انرژی قابل ملاحظه (به دلیل زبری بزرگ پله‌ها) باعث می‌گردد تا عمق حفاری و طول حوضچه آرامش پایین‌دست کاهش یافته و از این نظر صرفه‌جویی اقتصادی زیادی در اجرای سد ایجاد شود.

اکثر محققان مانند اسری و هورنر (1971)، سورنسن (1985)، چمنی و راجاراتنام (1999) به دو نوع جریان متفاوت به نام‌های رژیم جریان ریزشی و غیر ریزشی اشاره نموده‌اند. نوع اول در دبی‌های کم و ارتفاع پلکان بزرگ اتفاق می‌افتد و نوع دوم در سرریزهای با دبی زیاد و ارتفاع پلکان کم رخ می‌دهد.

فلدر و چانسون (2011) آزمایشاتی روی مدل فیزیکی سرریز پله‌ای به ارتفاع یک متر و شیب $26/6$ درجه انجام دادند. تعداد 5 حالت مختلف برای پله‌ها در نظر گرفته شد و میزان انرژی باقیمانده در پایین‌دست سرریز اندازه‌گیری گردید. گرچه نتایج نشان می‌داد که تعداد پله اثر زیادی در انرژی باقیمانده پایین‌دست سرریز ندارد، لیکن سرریز دارای 10 پله و هر یک به ارتفاع 10 سانتی-متر انرژی باقیمانده کمتری در پایین‌دست داشت و استهلاك انرژی بیشتری را دارا می‌باشد. برای 5 حالت، ضریب زبری داری و سیب‌خ از $0/12$ تا $0/37$ تغییر می‌کرد که با کار قبلی فلدر و چانسون (2009) که در آن ضریب زبری داری و سیب‌خ از $0/1$ تا $0/35$ تغییر داشت، هماهنگ بود. شجاع و همکاران (1389 و 1391) با استفاده از الگوریتم ژنتیک اقدام به تعیین ابعاد بهینه سرریز سد مخزنی ساروق واقع در استان آذربایجان غربی نمودند. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که سرریز پلکانی جایگزین شده به جای سرریز صاف، منجر به افزایش استهلاك انرژی، حذف و یا کاهش ابعاد مستهلك کننده انرژی در پایین‌دست سرریز پلکانی گردیده است. همچنین به ازای شیب‌های ثابت، افزایش دبی جریان منجر به کاهش استهلاك نسبی انرژی و افزایش ارتفاع بهینه پله‌ها می‌-

برای $h/l = 0.2 - 1.25$ (11 تا 51 درجه) بیان گردید. برای وقوع رژیم جریان غیرریزشی، می‌بایست دبی جریان از یک مقدار مشخصه بحرانی بیشتر گردد. این دبی مشخصه برای شروع رژیم غیرریزشی $\{(y_c)_{onset}\}$ به صورت رابطه (2) ارائه گردیده است (چانسون 1994b):

$$\frac{(y_c)_{onset}}{h} = 1.057 - 0.465 * \frac{h}{l} \quad [2]$$

چانسون (1994a) برای بدست آوردن رابطه (2) از نتایج آزمایش‌های اسری و هورنر (1971)، پیراس و همکاران (1991)، بیتز و لاولس (1992) استفاده نمود.

چمنی و راجاراتنام (1999) حد بالایی رژیم جریان ریزشی را به صورت زیر ارائه نمودند:

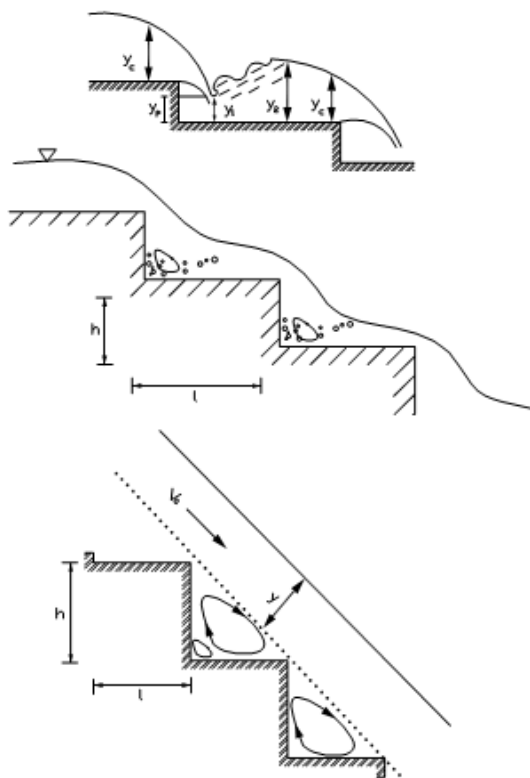
$$\frac{h}{l} = 0.405 \left(\frac{y_c}{h} \right)^{-0.62} \quad [3]$$

همانطورکه مشاهده می‌گردد محققین مختلف مناطق متفاوتی برای رژیم‌های ریزشی و غیرریزشی تعریف نموده‌اند. از طرفی محدوده حدوث جریان انتقالی را بیان نکرده‌اند. در مقاله حاضر وجه تمایز مناطق مختلف سه‌گانه به تفکیک نشان داده شده است. که در بخش‌های بعدی ارائه می‌گردد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در آزمایشگاه گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام پذیرفت. مشخصات فلوم‌های مورد استفاده جهت نصب مدل فیزیکی سرریزهای پلکانی به شرح زیر بود (سلماسی 1382):

الف - فلوم به عرض 50 سانتی‌متر: این فلوم به طول 8 متر بوده و دارای ارتفاع متغیر (1/6 متر در 4 متر ابتدایی فلوم و 0/9 متر در 4 متر انتهایی فلوم) است. مدل فیزیکی سرریزها در 4 متری ابتدای فلوم نصب شدند. دیواره‌های فلوم از جنس شیشه با ضخامت 6 میلی‌متر جهت مشاهده رفتار جریان منظور شد. در شکل (2) مقطع طولی فلوم به عرض 50 سانتی‌متر و مدل سرریز پلکانی نشان داده شده است.



شکل 1- هندسه عمومی رژیم‌های جریان از روی سرریز پلکانی، از بالا به پایین: رژیم ریزشی، رژیم انتقالی و رژیم غیرریزشی.

مرز رژیم‌های مختلف

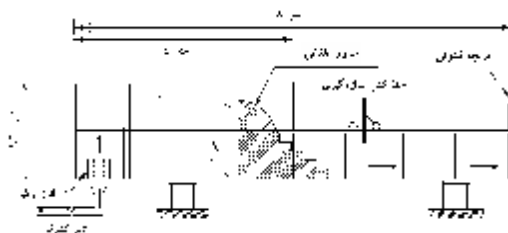
تقریباً یکی از اولین معیارها برای توصیف شروع رژیم غیرریزشی (مرز تبدیل رژیم ریزشی به غیرریزشی) توسط راجاراتنام (1990) ارائه گردید. وی شروع رژیم جریان غیرریزشی را طی رابطه (1) که به آن شاخص راجاراتنام گفته می‌شود بیان نمود:

$$y_c/h \geq 0.8 \quad [1]$$

که در آن y_c عمق بحرانی است. این معیار بر اساس اطلاعات موجود از آزمایش‌های اسری و هورنر (1971) و در محدوده شیب‌های $h/l = 0.4 - 0.9$ (22 تا 42 درجه) اعلام گردید. دومین رابطه توسط چانسون (1994b) برای توصیف شرایط شروع رژیم جریان غیرریزشی ارائه شد. رابطه مذکور توسط وی، بر اساس اطلاعات موجود از آزمایش‌ها برای شیب‌های

سعی گردید تا با هدف مشاهده و شناخت پارامترهای موثر در رژیم جریان انتقالی تدارک لازم جهت آزمایش بر روی مدل فیزیکی سرریز پلکانی مهیا گردد. لذا به بررسی استهلاک انرژی پرداخته نمی‌شود. بحث استهلاک انرژی در رژیم‌های مختلف جریان توسط سلماسی (1382) به تفصیل ارائه شده است و علاقمندان به منبع مذکور ارجاع داده می‌شوند.

برای حصول اهداف تحقیق تعداد 18 مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی با شیب‌های 45 درجه ($h/l=1$)، 25 درجه ($h/l=0.47$) و 15 درجه ($h/l=0.27$) و با تعداد پله‌های 3 الی 50 ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. مشخصات 18 مدل فیزیکی در جداول (1) و (2) ارائه گردیده است. داده‌های بدست آمده از آزمایشات بر اساس رژیم ریزشی، انتقالی و غیرریزشی تفکیک گردید



شکل 2- مقطع طولی فلوم و سرریز پلکانی در فلوم به عرض 50 سانتی‌متر.

ب - فلوم به عرض 25 سانتی‌متر: این فلوم به طول 10 متر بوده و دارای ارتفاع ثابت 40 سانتی‌متر است. مدل فیزیکی سرریزها در 4 متری ابتدای فلوم نصب شدند. دیواره‌های فلوم از جنس شیشه با ضخامت 10 میلی‌متر جهت مشاهده رفتار جریان بود.

به دلیل ناشناخته بودن رژیم انتقالی و از طرفی ارائه روابط متفاوت و گوناگون برای حدود منطقه وقوع رژیم‌های جریان توسط محققین مختلف، در این پژوهش که در ادامه به جزئیات روش کار اشاره شده است.

جدول 1- مدل فیزیکی سرریزهای ساخته شده به ارتفاع متوسط 1 متر برای فلوم 50 سانتی‌متری.

شیب سرریز (درجه)	تعداد پله‌ها	ارتفاع پله‌ها (cm)	طول افقی پله‌ها (cm)
45	5	17/22	17/22
45	10	8/5	8/5
45	15	5/5	5/5
45	20	4/3	4/3
45	35	2/46	2/46
45	50	1/72	1/72

جدول 2- مدل فیزیکی سرریزهای ساخته شده به ارتفاع متوسط 32 سانتی‌متر برای فلوم 25 سانتی‌متری.

شیب سرریز (درجه)	تعداد پله‌ها	ارتفاع پله‌ها (cm)	طول افقی پله‌ها (cm)
45	3	10/5	10/5
45	5	3/9	3/9
45	10	1/96	1/96
45	15	1/3	1/3
45	35	0/8	0/8

12	5/6	5	25
6	2/8	10	25
4/07	1/9	15	25
22/77	6/1	5	15
11/2	3	10	15
7/46	2	15	15
3/73	1	30	15

سرریزهای پلکانی مورد آزمون در فلوم ها ارائه شده است.

جدول 3- تعداد مشاهدات مربوط به رژیم‌های جریان

تعداد مشاهدات	نوع رژیم
77	ریزشی (Nappe flow)
12	انتقالی (Transition flow)
112	غیرریزشی (Skimming flow)
201	تعداد کل آزمایشات

همان طور که در جدول (3) مشاهده می‌شود از جمع 201 نمونه آزمایش، فقط 12 نمونه مربوط به رژیم جریان انتقالی قابل تشخیص بوده است.

منطقه انتقالی و باند مربوطه

مطابق شکل (3) منطقه ریزشی در چپ، منطقه غیرریزشی در راست و منطقه انتقالی به جای یک خط، توسط یک باند در وسط قرار گرفته است. رژیم انتقالی ممکن است هم در منطقه رژیم ریزشی و هم در منطقه رژیم غیرریزشی اتفاق بیافتد و از آن جهت، شکل (3) به صورت مخطط و با هاشور افقی و مایل ترسیم گردیده است.

گردش جریان آب در فلوم: جریان آب توسط پمپ به مخزنی با ارتفاع ثابت 4/5 متری توسط شیر کنترل وارد فلوم‌ها شده و پس از عبور از روی تاج سرریز و برخورد به پلکان‌ها، به پایین‌دست منتقل می‌شد. دبی جریان توسط سرریز مثلثی 53 درجه (کالیبره شده) اندازه‌گیری گردید.

اندازه‌گیری عمق آب توسط عمق سنج با دقت 0/1 میلی‌متر انجام پذیرفت و داده های لازم برای هر مدل فیزیکی به تفکیک یادداشت شد.

نتایج و بحث

در مجموعه آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، ابتدا با دبی‌های کم کار نموده و مشاهدات برای رژیم جریان ریزشی یادداشت شد. سپس با افزایش تدریجی دبی، رژیم جریان به غیرریزشی تبدیل گردید. همچنین در مرز تبدیل رژیم جریان ریزشی به غیرریزشی، خصوصیات جریان به نحوی بود که نه همانند عبور از روی آبشارهای متوالی (رژیم ریزشی) بود و نه همانند رژیم جریان غیرریزشی، کل پله‌ها زیر جریان آب مستغرق بود. طبق تعریف این حالت به عنوان رژیم جریان انتقالی شناخته می‌شود. این موضوع توسط چانسون (1994a) و چمنی و راجاراتنام (1999) گزارش شده است ولی به دقت مورد بررسی قرار نگرفته است.

در جدول (3) تعداد مشاهدات مربوط به رژیم‌های جریان ریزشی، انتقالی و غیرریزشی برای

(4) و (5) را ارائه نمودند که در شکل (3) با مرزهای پیدا شده توسط این تحقیق به مقایسه گذاشته شده و در زیر ارائه می‌شوند.

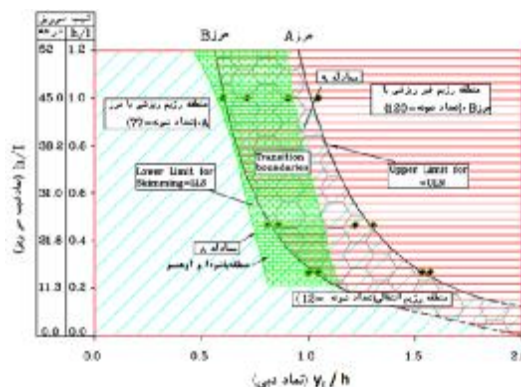
$$\frac{y_c}{h} = \frac{(1.4 - h/l)^{0.26}}{1.4} \quad [4]$$

$$\frac{y_c}{h} = 0.862(h/l)^{-0.165} \quad [5]$$

در جداول (4) و (5) نقاط آزمایشی حد بالایی رژیم جریان ریزشی و غیرریزشی برای ترسیم منحنی A و B ارائه شده است. لازم به ذکر است که تشخیص وقوع رژیم انتقالی مشکل بوده و با خطای انسانی همراه است. چرا که هنگامی که رژیم ریزشی برقرار است با کوچکترین افزایش دبی ممکن است رژیم به غیرریزشی تبدیل گردد و رژیم انتقالی مشاهده نشود. به همین دلیل در این تحقیق از تعداد کل نقاط آزمایشی فقط 12 مورد مربوط به رژیم جریان انتقالی تشخیص داده شد که آنهم احتمالاً با خطای تشخیص چشمی همراه بوده باشد. نتیجتاً برای بدست آوردن معادله منحنی‌های مزبور (مرز A و B) با توجه به خطای تشخیص احتمالی از یک طرف و نیز در نظر گرفتن مرزهای ارائه شده از سوی سایر محققین از طرف دیگر، از داده‌های جدول (4) و (5) در انتهای حد پایینی و حد بالایی منحنی‌ها استفاده گردید (10 داده) و از 2 نقطه آزمایشی دیگر صرف‌نظر شد.

جدول 4- نقاط آزمایشی حد بالایی رژیم جریان ریزشی برای ترسیم منحنی مرز A.

h/l	y_c/h
1	1/05
0/48	1/23
0/49	1/3
0/28	1/53
0/28	1/56



شکل 3- نمایش مرز منطقه انتقالی پژوهش حاضر و مقایسه آن با مرز منطقه یاشودا و اوهتسو (1997).

در شکل (3) منحنی سمت چپ (مرز B) نمایانگر حد پایینی رژیم جریان غیرریزشی است. بدین معنی که منطقه سمت راست آن تماماً شامل رژیم جریان غیرریزشی می‌باشد (منطقه با هاشور افقی). منحنی سمت راست نمایانگر حد بالایی رژیم جریان ریزشی است. بدین معنی که منطقه سمت چپ آن (منطقه هاشور مایل) شامل رژیم جریان ریزشی است. ضمناً مشاهده می‌شود که رژیم ریزشی در منطقه چپ و رژیم غیرریزشی در منطقه راست منحنی با (y_c/h) بالا قرار دارد. از نمونه‌های آزمایشی مشاهده می‌گردد که مرز A حد بیشینه (y_c/h) منطقه ریزشی و مرز B حد کمینه (y_c/h) منطقه غیرریزشی می‌باشد. همچنین کلیه نمونه‌های رژیم انتقالی در محدوده دو مرز A و B قرار دارند.

شکل (3) نشان می‌دهد که از تعداد کل 12 نقطه آزمایشی مربوط به این تحقیق، تعداد 7 نقطه در محدوده رژیم انتقالی اشاره شده توسط یاشودا و اوهتسو (1997) قرار داشته و لذا تطابق بسیار مناسبی بین پژوهش حاضر و محققین اخیر وجود دارد. به استثنای اینکه مرزهای تعریفی توسط این پژوهش اندکی به سمت راست منتقل شده است. توضیح این که دانشمندان یاد شده برای توصیف حد بالای رژیم ریزشی و حد پایین رژیم جریان غیرریزشی دو معادله

مرز تعریف شده توسط چانسون (1994a) در معادله 2 با مرز پایینی رژیم جریان غیرریزشی تعریفی در این پژوهش تا حدودی منطبق است. مرز سمت راست برای حد بالایی رژیم جریان ریزشی که در این پژوهش به آن اشاره شده، از اعتماد بیشتری برخوردار است. زیرا محدوده ای تحت عنوان باند رژیم انتقالی را توصیف نموده است که سمت چپ آن رژیم جریان ریزشی و سمت راست آن رژیم جریان غیرریزشی است. ضمناً منحنی تعریف شده توسط چمنی و راجاراتنام (1994) به صورت معادله 3 در شکل (4) در مقایسه با تحقیق حاضر و تحقیق یاشودا و اوهتسو (1997) نشان می‌دهد که برای رژیم جریان غیرریزشی دامنه بیشتری اختصاص داده شده که با پژوهش حاضر، تحقیق یاشودا و اوهتسو (1997) و همچنین تحقیق چانسون (1994a) اختلاف دارد. همچنین ملاحظه می‌گردد که باند تعریفی در این تحقیق برای رژیم جریان انتقالی، تقریباً تمامی نقاط آزمایشی سایر محققان (به جز 2 نقطه آزمایشی پیراس و همکاران، 1991) را پوشش داده است. به عبارت دیگر باند تعریفی در این تحقیق برای رژیم جریان انتقالی، نقاط آزمایشی ارائه شده توسط اسری و هورنر (1971) و بیتس و لاولس (1992) را بهتر از منحنی‌های ارائه شده توسط یاشودا و اوهتسو (1997) و چانسون (1994a) شبیه‌سازی نموده است.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق برای تعیین مرزهای هیدرولیکی جهت تعریف وقوع سه نوع رژیم جریان ریزشی، غیرریزشی و انتقالی، اقدام به ساخت و آزمایش بر روی 18 مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی با شیب‌های 15، 25، 45 درجه و با تعداد پله‌های متفاوت گردید. بررسی مرزهای رژیم جریان انتقالی نشان داد که این نوع رژیم بستگی به دبی جریان و شیب عمومی سرریز

جدول 5- نقاط آزمایشی حد پایینی رژیم جریان غیر ریزشی برای ترسیم منحنی مرز B.

h/l	y_c/h
1	0/62
0/48	0/81
0/49	0/87
0/27	1
0/28	1/05

معادله بدست آمده برای منحنی حد پایینی رژیم

جریان غیرریزشی به صورت زیر می‌باشد:

$$h/l = 0.301(y_c/h)^{-2.51} \quad [6]$$

$$r^2 = 0.967$$

در ضمن معادله بدست آمده برای منحنی حد

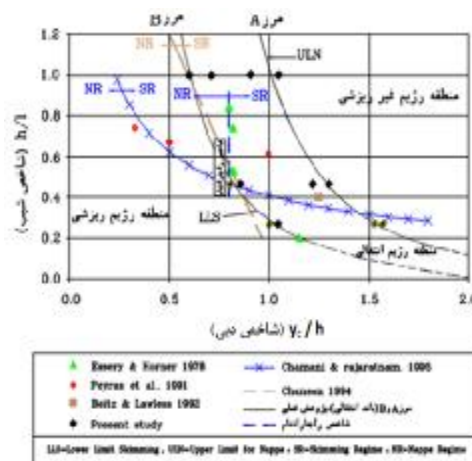
بالایی رژیم جریان ریزشی در زیر ارائه می‌گردد:

$$h/l = 1.078(y_c/h)^{-3.14} \quad [7]$$

$$r^2 = 0.968$$

مقایسه این پژوهش با تحقیقات انجام گرفته

توسط سایر محققین در شکل (4) نشان می‌دهد که انطباق قابل قبولی بین مرزهای رژیم جریان انتقالی با یکدیگر برقرار است که در زیر توضیحات لازم ارایه گردیده است:



شکل 4- محدوده رژیم جریان ریزشی، انتقالی و

غیرریزشی ارائه شده توسط سایر محققین در مقایسه با تحقیقات حاضر.

شده توسط یاشودا و اوهتسو (1997) و چانسون (1994a) شبیه‌سازی نموده‌است. مقایسه نتایج این تحقیق با نقاط آزمایشی سایر محققین، اعتماد پذیری کاربرد باند تعریفی برای رژیم جریان انتقالی پژوهش حاضر را آشکار می‌سازد.

پلکانی دارد. رژیم انتقالی را توسط یک باند می‌توان تعریف نمود که در آن منطقه رژیم‌های ریزشی و غیرریزشی روی هم پوشش شده‌اند. به عبارت دیگر باند تعریفی در این تحقیق برای رژیم جریان انتقالی، نقاط آزمایشی ارائه شده توسط اسری و هورنر (1971) و بیتس و لاولس (1992) را بهتر از منحنی‌های ارائه

منابع مورد استفاده

- سلماسی ف، 1382. ارزیابی هیدرولیکی سرریزهای پلکانی با استفاده از مدل فیزیکی. پایان‌نامه دکتری، رشته علوم و مهندسی آبیاری، گرایش تاسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- سلماسی، ف، 1388. اثر تعداد پله‌ها بر استهلاك انرژی در سرریزهای پله‌ای بر اساس روش جدید طراحی، دانش آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، شماره 1 جلد 19، صفحات 27 تا 38.
- شجاع، ف، سلماسی، ف، فرسادی‌زاده، د، ناظمی، اح و نیک‌پور، مر، 1389. تعیین پارامترهای بهینه در افزایش استهلاك انرژی در سرریزهای پلکانی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- شجاع، ف، سلماسی، ف، فرسادی‌زاده، د، ناظمی، اح و صدرالدینی، ع، 1391. تعیین ابعاد بهینه سرریزهای پله‌ای جهت حداکثرسازی استهلاك انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، دانش آب و خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، شماره 4 جلد 22، صفحات 69 تا 83.
- Beitz E and Lawless M, 1992. Hydraulic Model Study for Dam on Isaac River at Burton Gorge. Water Resources Commission Report. Ref. No. REP/24.1 Brisbane, Australia.
- Chamani MR and Rajaratnam N, 1994. Jet flow on stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 120(2): 254-259.
- Chamani MR and Rajaratnam N, 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 125 (4): 361-368.
- Chanson H, 1994a. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. Journal of Hydraulic Research 32(2): 213-218.
- Chanson H, 1994b. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. Journal of Hydraulic Research 32(3): 445-460.
- Essery ITS and Horner MW, 1971. The Hydraulic Design of Stepped Spillways. Report 33, Construction. Industry Res and Information Assoc, London.
- Felder S and Chonson H 2009. Energy dissipation down a stepped spillway with nonuniform step heights. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 137 (11): 1543-1548.
- Felder S and Chonson H, 2011. Energy dissipation, flow resistance and gas-liquid interfacial area in skimming flows on moderate-slope stepped spillways. Environ Fluid Mech 9 (4): 427-441.
- Peyras L, Royet P and Degoutte G, 1991. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 118(5): 707-717.
- Rajaratnam N, 1990. Skimming flow in stepped spillway. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 116(5): 587-591.
- Sorensen RM, 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 111 (12): 1461-1472.
- Yasuda Y and Ohtsu I, 1997. Flow resistance of skimming flow in stepped channels. Pp. 809-919. Proc 28th IAHR Congress, October, Brisbane, Australia.