



دانشگاه گوارا

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و ششم، شماره دوم، ۱۳۹۸

۱۳۷-۱۵۶

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.15687.3085

بررسی افت انرژی در سرریزهای پلکانی با وجود موانع روی پله‌ها

با کمک مدل فیزیکی و مدل ریاضی Flow-3D

حمیدرضا افشون^۱، *امیرعباس کمان‌بدست^۲، علیرضا مسجیدی^۳، محمد حیدر نژاد^۴ و امین بردبار^۲

^۱دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی آب، پردیس علوم و تحقیقات خوزستان، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران و گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، ^۲استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران،

^۳دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۷/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۰

چکیده

سابقه و هدف: عبور آب‌های اضافی و سیلاب‌ها از سراب به پایاب سدها از سازه‌های به‌نام «سرریز» استفاده می‌شود. سرریز باید سازه‌ای قوی، مطمئن و با کارایی بالا انتخاب شود که هر لحظه بتواند برای بهره‌برداری آمادگی داشته باشد. سرریزهای پلکانی به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای اصلاح سرریزهایی که برای عبور دبی حداکثر محتمل با مشکل روبرو هستند مطرح می‌شوند. سرریز پلکانی متشکل از پله‌هایی است که از نزدیکی تاج سرریز شروع شده و تا پاشنه پایین‌دست ادامه دارند. با افزایش زبری، انرژی جریان عبوری از روی سرریز به‌صورت یکنواخت و پیوسته پراکنده می‌شود و دیگر در پنجه سرریز نیازی به ایجاد تأسیسات کاهنده انرژی جریان مانند حوضچه‌های آرامش (که انرژی در آن باید یک‌باره پراکنده شود) نخواهد بود و یا در صورت لزوم ابعاد این‌گونه سازه‌ها کاهش خواهد یافت.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش برای افزایش زبری از موانعی بر روی سرریز پلکانی استفاده شد که برای بیش‌تر کردن استهلاک انرژی آب استفاده می‌گردد. جهت بررسی آزمایشگاهی این پژوهش، از یک فلوم با قوس ۹۰ درجه در دانشگاه آزاد اهواز استفاده شد و با انتخاب مدل‌های مختلف موانع روی سرریز پلکانی در سه شکل با سه طول و عرض متفاوت و همچنین استفاده موانع به‌صورت تکی و ترکیبی با ۵ دبی متفاوت، جمعاً ۱۴۰ آزمایش انجام شد. پس از تحلیل نتایج مشخص گردید که در ترکیب سرریز پلکانی با موانع به ترتیب مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای، باعث کاهش استهلاک و افت انرژی شد.

یافته‌ها: موانع مثلثی به‌طور متوسط باعث افزایش ۱۵/۹ درصدی استهلاک انرژی، موانع مستطیلی به‌طور متوسط باعث افزایش ۱۳/۷ درصدی استهلاک انرژی و موانع دوزنقه‌ای به‌طور متوسط باعث افزایش ۱۱/۲ درصدی استهلاک انرژی نسبت به مدل شاهد شده‌اند. با افزایش طول و عرض موانع باعث افزایش استهلاک و افت انرژی شد. موانع در حالت دو پله بیش‌ترین استهلاک انرژی و افت را داشته. با ترکیب موانع بر دو پله سرریز پلکانی به‌طور متوسط ۱۴/۴ درصد،

* مسئول مکاتبه: ka57_amir@yahoo.com

در موانع به حالت تکی در پله اول به‌طور متوسط ۵/۸ درصد و موانع بر پله دوم ۴/۸ درصد افزایش استهلاک انرژی را نسبت به حالت شاهد دارد. با افزایش عدد فرود از ۰/۳۲ به ۱/۷۱ شاهد کاهش استهلاک و افت انرژی هستیم که به دلیل استغراق پله‌های زیر سطح آب و کاهش زبری پله‌ها و با افزایش شدت پدیده ورود هوا می‌باشد که در استهلاک انرژی تأثیر می‌گذارد. نتایج شبیه‌سازی با مدل ریاضی Flow-3D نزدیک به مدل فیزیکی می‌باشد و به‌طور متوسط تنها ۶/۳ درصد خطا دارد که قابل قبول می‌باشد.

نتیجه‌گیری: پس از تحلیل نتایج مشخص گردید که در ترکیب سرریز پلکانی با موانع به‌ترتیب مثلی، مستطیلی و دوزنه‌ای، شاهد کاهش استهلاک و افت انرژی هستیم. همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مدل فیزیکی نشان می‌دهد با افزایش عدد فرود نتایج شبیه‌سازی با مدل ریاضی Flow-3D انحراف کم‌تر با مدل فیزیکی پیدا می‌کند و به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، سرریز پلکانی، مدل فیزیکی، موانع، Flow-3D

مقدمه

هر سد از تعداد زیادی سازه جانبی تشکیل شده است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها سرریزها می‌باشند. در سدهای بزرگ غالباً از آن‌ها برای تخلیه سیلاب استفاده می‌شود. معمولاً سرریزها باید قادر باشند تا حجم آبی برابر با بزرگ‌ترین سیلاب محتمل در حوضه آبریز سد را در مدت زمان کوتاهی تخلیه کنند. با توجه به موارد فوق می‌توان گفت که طراحی هیدرولیکی سرریز سدها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. سرریزها و تنداب‌ها از جمله سازه‌های هیدرولیکی مهمی می‌باشند که در پایداری سدها نقش اساسی را ایفا می‌نمایند. سرریز پلکانی متشکل از پله‌هایی است که از نزدیکی تاج سرریز شروع شده و تا پاشنه پایین دست ادامه دارند. توجه به این نوع سرریزها به دلیل تأثیر قابل ملاحظه پلکان‌ها بر میزان استهلاک انرژی جریان، بیش‌تر شده است. جانسون (۱۹۹۴) بیان کرد استهلاک انرژی در سرریز پلکانی در طول سرریز بر اثر برخورد جریان آب با پلکان‌ها انجام می‌شود. بنابراین انرژی کم‌تری در انتهای سرریز باید مستهلک شود و در نتیجه، سازه

مستهلک‌کننده انرژی با ابعاد کوچک‌تری مورد نیاز است. استهلاک انرژی جنبشی حاصل از جریان سرریز در سدها یکی از مهم‌ترین موضوعات مطرح شده در سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد. هرچه انرژی جنبشی منتقل شده به پایین دست سرریز بیش‌تر باشد حوضچه آرامش احداث شده ابعاد بزرگ‌تری خواهد داشت و یا تمهیدات بیش‌تری برای استهلاک انرژی در آن باید در نظر گرفت. در نتیجه به همان نسبت هزینه‌های اجرایی و نگهداری و نیز پایداری سد تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با توجه مقدار اصطکاک سطحی، میزان سرعت از عدد فوق کم‌تر خواهد شد و در نهایت نسبت مقدار سرعت واقعی به حداکثر سرعت جریان بستگی به نوع مجرای دارد که سیال از آن عبور می‌کند. این کاهش سرعت خود باعث پراکنش قسمتی از انرژی جریان خواهد شد. بنابراین اگر بتوانیم با افزایش زبری انرژی جریان عبوری از روی سرریز را به‌صورت یکنواخت و پیوسته پراکنده کنیم، دیگر در پنجه سرریز نیازی به ایجاد تأسیسات کاهنده انرژی جریان مانند حوضچه‌های آرام نخواهد بود و یا در صورت لزوم ابعاد این‌گونه سازه‌ها کاهش

برای هر دو رژیم ریزشی و رویه‌ای به دست آورد. سوری و مجتهدی (۲۰۱۵) به ارزیابی اثرات هندسه سرریز پلکانی در میزان استهلاك انرژی جریان عبوری با استفاده از سیستم استنتاج فازی پرداختند، نتایج نشان داد با افزایش تعداد پلکان و شیب معکوس روی هر پله استهلاك انرژی بیش‌تر شود. به طوری که در مدل ۴ پله‌ای و با شیب ثابت ۴ درجه، تغییرات دبی از ۰/۰۳ به ۰/۰۸ مترمکعب بر ثانیه، باعث کاهش میزان استهلاك انرژی به اندازه ۱/۵ درصد گشته در حالی که در دبی ثابت ۰/۰۳ مترمکعب بر ثانیه، تغییر حالت پله از شیب صفر به شیب ۴ درجه موجب افزایش استهلاك انرژی به میزان است ۰/۹ درصد گردیده است. کمان بدست و قلی‌زاده (۲۰۱۲) اثر شیب پایین دست در پرتاب آب بر روی سرریزهای سیفونی را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی کردند. کمان بدست (۲۰۱۲) به کمک شبکه عصبی جریان در سرریزهای نیلوفری را بررسی کردند و نتایج نشان‌دهنده کارایی مثبت شبکه‌های عصبی مصنوعی در شبیه‌سازی هیدرولیکی بودند. بنا به این مهم در این پژوهش به بررسی افت انرژی در سرریزهای پلکانی با وجود موانع روی پله‌ها با کمک مدل فیزیکی پرداخته شد و پس تحلیل نتایج با مدل ریاضی Flow-3D نیز به شبیه‌سازی این پدیده پرداخته شد و خطای و دقت این مدل ریاضی را با نتایج مدل فیزیکی مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم بر جریان: اکثر پژوهشگران به دو نوع رژیم جریان متفاوت (از نظر مکانیسم میزان استهلاك انرژی) به نام‌های ریزشی و غیرریزشی اشاره نموده‌اند. نوع اول در دبی‌های جریان کم و ارتفاع پلکان‌های بزرگ اتفاق می‌افتد و نوع دوم در سرریزهای با دبی زیاد و ارتفاع پلکان‌های کم رخ

خواهد یافت. یکی از راه‌های افزایش زبری ایجاد پله در سرریزها می‌باشد که به این نوع سرریز، سرریز پلکانی اطلاق می‌گردد. تأثیر قابل‌ملاحظه سرریزهای پلکانی بر استهلاك انرژی توجه به این نوع سرریزها را بیش‌تر کرده است چرا که انرژی بیش‌تری را در مقایسه با سرریزهای صاف مستهلک می‌کند. پله‌ها در ایجاد زبری‌های بزرگ و در نتیجه استهلاك انرژی مؤثرند و موجب حذف یا کاهش زیادی در ابعاد سازه مستهلک‌کننده انرژی در پایاب خواهد شد.

مطالعات انجام‌شده بر روی مدل هیدرولیکی سرریزهای پلکانی نشان می‌دهد که اتلاف انرژی در پنجه سرریزهای پلکانی تا ۸۴٪ بوده است. همچنین اتلاف انرژی در این‌گونه سرریزها در حدود ۷۵٪ بیش‌تر از سرریزهای پلکانی غیراوجی بوده است. چمنی و راجاراتام (۱۹۹۴) نیز با پژوهش بر روی جریان تیغه‌ای رابطه‌ای را بر حسب تعداد پله‌های مورد استفاده جهت برآورد استهلاك انرژی در حالت پله‌های افقی ارائه نموده‌اند. چیناراسری و ونگ وایز (۲۰۰۶) نیز رابطه‌ای را جهت تعیین میزان افت انرژی در سرریزهای پلکانی با پله‌های شیب معکوس و یا آستانه‌دار ارائه نمودند. مسأله مورد اهمیت برای پژوهشگران در این زمینه، افزایش اثر پله‌ها در میزان استهلاك انرژی جریان است. منصور و امیرحسین (۲۰۰۸) در پژوهش آزمایشگاهی بر روی سرریز پلکانی لبه‌دار به این نتیجه رسیدند که در رژیم ریزشی ارتفاع، عرض و شیب بالادست لبه بر میزان استهلاك انرژی جریان تأثیرگذار می‌باشند اما در رژیم سطحی تنها ارتفاع لبه‌ها به میزان ناچیزی در میزان استهلاك انرژی مؤثر بوده و عرض و شیب لبه در میزان انرژی مستهلک شده تأثیری ندارند. با بررسی این نتایج و مقایسه و تحلیل آن‌ها با یکدیگر روابطی پیشنهاد می‌شود که بتوان میزان درصد استهلاك انرژی جریان روی سرریزهای پلکانی لبه‌دار را از طریق این روابط

می‌سازد، تشکیل می‌گردد. در زیر این بستر کاذب جریان‌های گردابی تشکیل می‌گردد. پژوهش‌های جانسون (۱۹۹۴) و راجاتنام (۱۹۹۰) نشان داد که قسمت اعظم استهلاك انرژی در این نوع رژیم، بر اثر ایجاد جریان‌های چرخشی زیر بستر کاذب ایجاد می‌گردد. با توجه به شکل ۳ در این نوع رژیم، سه منطقه قابل تمایز وجود دارد: ناحیه با جریان صاف و بدون هوا، ناحیه در حال گسترش و ناحیه کاملاً گسترش یافته. در این نوع رژیم سه منطقه قابل تمایز وجود دارد:

۱- ناحیه با جریان صاف و بدون هوا؛

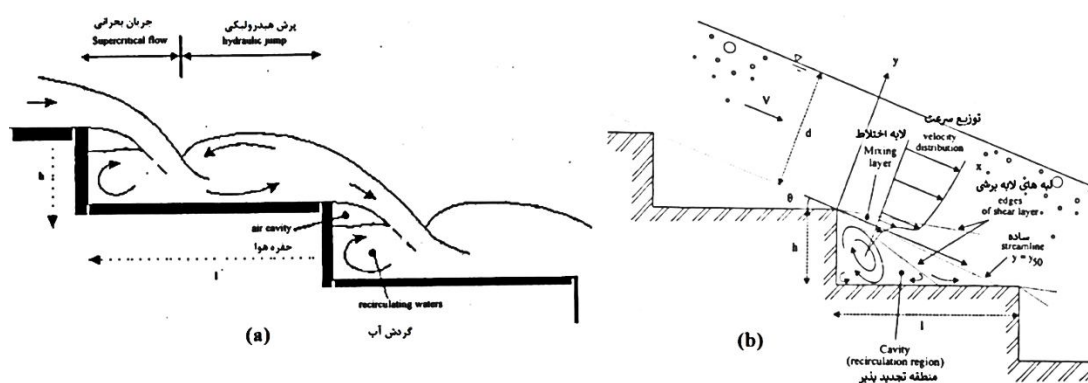
۲- ناحیه در حال گسترش؛

۳- ناحیه کاملاً گسترش یافته

زارسکی و کورچوسکی (۱۹۹۷) بیان کردند که جریان در ابتدا و بالای سرریز صاف و بدون هوا است. با رشد لایه مرزی تلاطم و رسیدن به سطح آب، ورود هوا در پله‌های پایین دست صورت گرفته و میزان تلاطم به حداکثر می‌رسد. در صورت طولانی بودن طول سرریز، جریان در پنجه سرریز به صورت کف‌آلود در آمده و سیال به صورت آب سفید ظاهر می‌گردد. در شکل‌های ۱ و ۲ رژیم‌های جریان روی سرریز پلکانی نشان داده شده است.

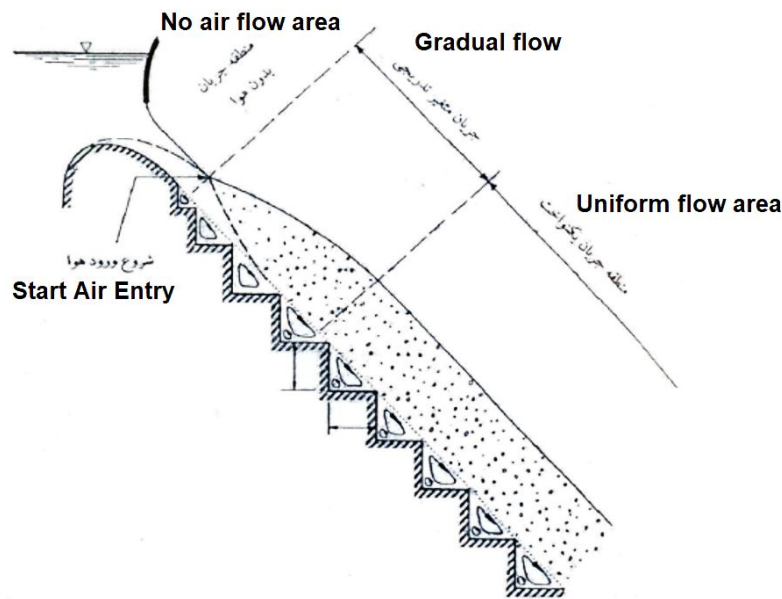
می‌دهد (۱). در شکل ۲ این دو رژیم جریان مشاهده می‌شوند. در این شکل طول افقی هر پلکان به l و ارتفاع عمودی آن به h نشان داده شده است. راجاتنام (۱۹۹۰) نشان دادند که بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سرریزهای پلکانی با محدوده وسیع تغییر در شیب‌ها می‌توان گفت که تبدیل رژیم جریان ریزشی به غیرریزشی تقریباً در $y_c/h = 0.8$ اتفاق می‌افتد. (h ارتفاع پله می‌باشد).

نکاتی در مورد رژیم جریان ریزشی و غیرریزشی:
به‌طورکلی در رژیم جریان ریزشی ارتفاع کل سرریز را می‌توان به تعدادی آبشار قائم تقسیم نمود. بنابراین بسته به طول افقی پله، جریان در برخورد با پلکان‌های متوالی می‌تواند دارای پرش هیدرولیکی کامل و یا ناقص باشد. آزمایش‌های مکرر سلماسی (۲۰۰۸) نشان داد که رژیم جریان ریزشی در دبی‌های کم و ارتفاع پله‌های بزرگ اتفاق می‌افتد. استهلاك انرژی بر اثر تماس جت جریان با هوا، اختلاط جت روی هر پله و بالاخره در اثر تشکیل پرش هیدرولیکی کامل و یا ناقص روی هر پله حاصل می‌شود. در رژیم جریان غیرریزشی پلکان‌ها مانند زبری بزرگ در برابر جریان عمل می‌نمایند. در این نوع رژیم یک بستر کاذب که آستانه انتهایی پلکان‌های متوالی را به یکدیگر متصل



شکل ۱- رژیم‌های جریان از روی سرریز پلکانی: الف) رژیم ریزشی ب) رژیم غیرریزشی (جانسون، ۱۹۹۴).

Figure 1. Flow regimes from stack overflow: a) Lossy diet b) Non-abundant diet (Chanson, 1994).



شکل ۲- جریان از روی سرریز پلکانی با رژیم غیرریزشی و تقسیم‌بندی نواحی جریان (زارسکی و کورچوسکی، ۱۹۹۷).

Figure 2. Flow through a stack overflow with non-slipping mode and segmentation of flow areas (Zaretsky, and Korchevsky, 1997).

$$\Delta H = H_t - H_1 = (1.5y_c + H_{dam}) - \left(y_t - \frac{V_1^2}{2g} \right) \quad (3)$$

همچنین استهلاك انرژی نسبی $\left(\frac{\Delta H}{H_t} \right)$ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\frac{\Delta H}{H_t} = \frac{H_t - H_1}{H_t} = 1 - \frac{H_1}{H_t} = 1 - \frac{\left(y_t - \frac{V_1^2}{2g} \right)}{1.5y_c + H_{dam}} \quad (4)$$

در روابط فوق H_t انرژی کل در بالادست سرریز، H_1 انرژی در پنجه و قبل از پرش هیدرولیکی، H_{dam} ارتفاع کل سرریز، h ارتفاع پله، y_c و y_1 به ترتیب عمق بحرانی و عمق قبل از پرش هیدرولیکی و V_1 سرعت متوسط قبل از پرش هیدرولیکی می‌باشند. در شکل ۳ مقطع عرضی شیب‌شکن قائم و سرریز پلکانی که پارامترهای مختلف هیدرولیکی روی آن‌ها مشخص گردیده، ارائه شده است.

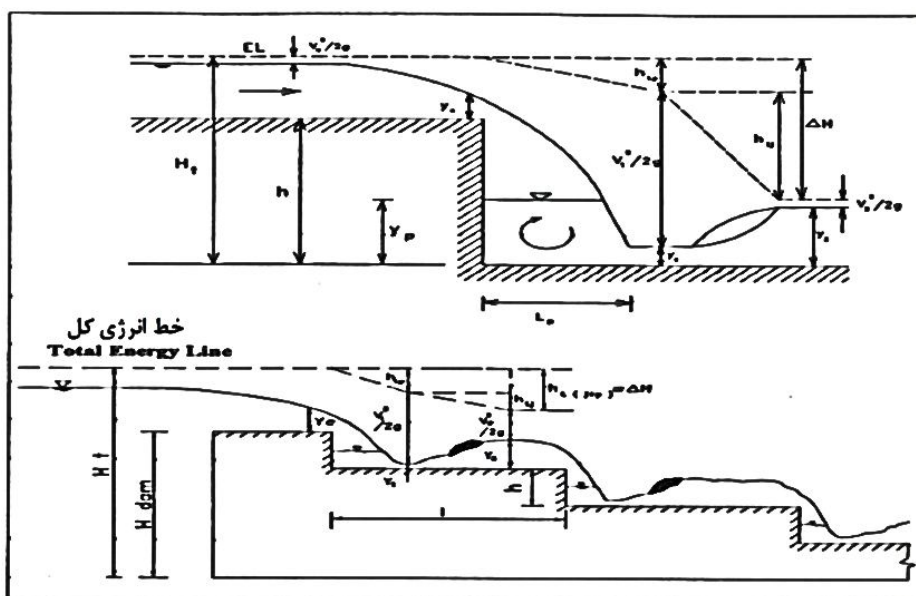
و به‌طور کلی معادله پیوستگی و مؤمتم در جریان سیال تراکم‌ناپذیر به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial p u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

که در آن، t زمان، u_i مؤلفه سرعت، x_i مؤلفه مختصات، ρ چگالی، μ لزجت دینامیک، μ_t لزجت تلاطم.

استهلاك انرژی در سرریزها و شیب‌شکن‌های قائم: منظور از استهلاك انرژی عبارت است از اختلاف بین انرژی در بالادست سرریز با شیب‌شکن قائم و انرژی در پایین‌دست آن (پنجه) در محل تشکیل عمق قبل از پرش هیدرولیکی (عمق اولیه) است که به صورت زیر نشان داده می‌شود:



شکل ۳- مقطع عرضی شیب‌شکن قائم و سرریز پلکانی.

Figure 3. Cross section of vertical slope and stepper overflow.

$$f\left(\frac{\Delta H}{h}, \frac{H_0}{h}, \frac{h}{l}, \frac{\sigma}{\rho_w g h^2}, f_e, \frac{\mu}{\rho_w \sqrt{g h^3}}, N\right) = 0 \quad (6)$$

با نادیده گرفتن اثر لزجت سیال μ و تنش سطحی σ و انجام اندکی عملیات بر روی پارامترهای بیان شده می‌توان پارامترهای بی بعد مؤثر بر تلفات انرژی در سرریز پلکانی را به صورت ذیل بازنویسی کرد:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = f\left(\frac{h'}{h}, \frac{L'}{L}, Fr\right) \quad (7)$$

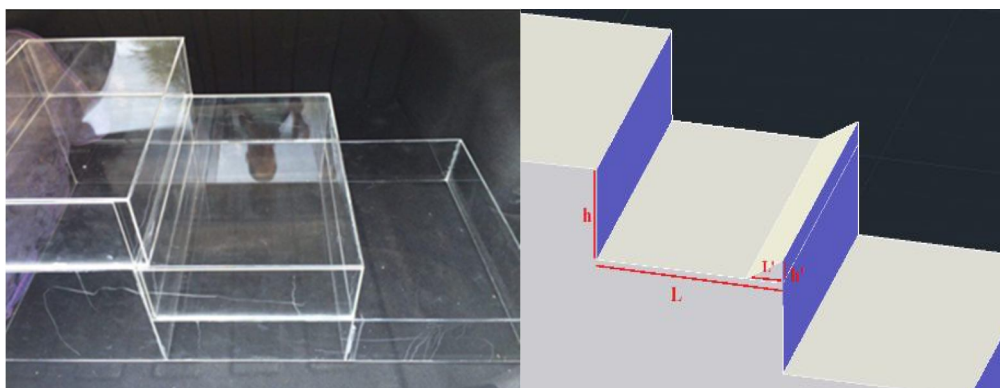
بنا به رابطه ۷ پارامترها شامل h'/h نسبت ارتفاع مانع به ارتفاع پله و L'/L نسبت طول مانع به طول پله می‌باشد.

در شکل ۴ شماتیک ترکیب سرریز پلکانی با مانع نشان داده شده است.

آنالیز ابعادی برای تعیین تلفات انرژی: بدین منظور لازم است تا پارامترهایی که بر میزان استهلاک انرژی تأثیرگذار می‌باشند مشخص گردد. بر طبق مطالعات پیشین جانسون (۱۹۹۴) استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی ΔH به موارد زیر بستگی دارد: که در آن، H_0 انرژی کل بالادست سرریز، q دبی واحد عرض سرریز؛ h ارتفاع پله، l طول پله، ρ_w جرم مخصوص سیال، σ کشش سطحی سیال، f_e ضریب زبری بستر سرریز، N تعداد پله‌ها، μ لزجت دینامیکی سیال و g شتاب ثقل.

بنابراین رابطه بین این کمیات به صورت ذیل می‌باشد:

$$f(\Delta H, H_0, q, h, l, \rho_w, \sigma, N, \mu, g) \quad (8)$$



شکل ۴- شماتیک ترکیب سرریز پلکانی با مانع.

Figure 4. Schematic combination of barrier stack overflow.

۳- تغییر در عرض و طول هر مانع (سه متغیر)
 ۴- استفاده از موانع در سه جایگاه (سه متغیر) که
 مجموع کل آزمایش‌های با آزمایش‌های شاهد در مدل
 فیزیکی ۱۴۰ عدد می‌باشد.
 در جدول ۱ پارامترهای مورد بررسی در پژوهش
 حاضر به همراه دامنه تغییر آن‌ها آورده شده است.

پژوهش شامل ارزیابی عدد فرود، استفاده از موانع
 با شکل مثلثی، ذوزنقه‌ای و مستطیلی، تغییر در طول و
 عرض موانع، استفاده از موانع در پله ۱، پله ۲ و
 به صورت هم‌زمان در دوپله می‌باشد. متغیرها شامل:

۱- آزمایش با پنج دبی متفاوت

(FR=0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06)

۲- استفاده از موانع در سه شکل (سه متغیر)

جدول ۱- پارامترهای مورد بررسی در پژوهش حاضر به همراه دامنه تغییر آن‌ها.

Table 1. The parameters studied in this study, along with their range of change.

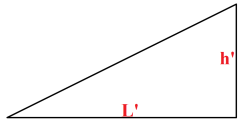


Fr	h'/L'	موقعیت مانع Obstacle position	شکل موانع Shape obstructed
5	3	3	3

۳ میلی‌متر و دیواره‌ها از جنس پلکسی‌گلاس به
 ضخامت ۱۰ میلی‌متر و به طول ۴/۵ متر ساخته شده
 که هم اثر زبری جداره را کاهش می‌دهد و
 هم پدیده‌های هیدرولیکی در محفظه قابل رؤیت
 می‌باشند، مسیر خروجی نیز مستقیم، کف آن از جنس
 ورق فلزی به ضخامت ۳ میلی‌متر و دیواره آن از
 جنس پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر به طول
 ۲/۵ متر می‌باشد، کف فلوم به صورت بستر ثابت و
 بدون شیب و در حد دقت اجرایی به صورت افقی
 ساخته شده است (شکل ۵). در جدول ۲ مشخصات
 و ابعاد موانع آورده شده است.

جهت بررسی آزمایشگاهی این پژوهش، فلومی در
 دانشگاه آزاد واحد اهواز با مشخصات زیر مورد
 استفاده قرار گرفت. کانال‌های ورودی و خروجی
 فلوم ساخته شده، روباز مستطیلی با جداره ورق
 پلکسی‌گلاس می‌باشد، به طوری که که طول کانال‌های
 مستقیم ورودی در ابتدای فلوم و خروجی در انتهای
 فلوم به ترتیب ۴/۵ و ۲/۵ متر است، عرض و ارتفاع
 فلوم نیز به ترتیب ۰/۵ و ۰/۶ متر بوده و بدنه فلوم در
 ارتفاع ۰/۷ متری از سطح زمین قرار دارد. مسیر
 ورودی مستقیم (جهت ایجاد جریان یکنواخت و
 توسعه یافته)، کف آن از جنس ورق فلزی به ضخامت

جدول ۲- مشخصات و ابعاد موانع.

Table 2. Specifications and Dimensions of the Barriers.

شماره مانع Number of obstructed	شماتیک مانع Schematic impediment	شکل مانع Shape obstructed	h	h'	h'/h	L	L'	L'/L	h'/L'
1		مثلث Triangle		2	0.17		2	0.07	1
2				4	0.33		6	0.2	0.67
3				6	0.5		12	0.4	0.5
4		دورزنقه Thimbles		2	0.17		3	0.1	0.67
5			12	4	0.33	30	8	0.27	0.5
6				6	0.5		15	0.5	0.4
7		مستطیل Rectangle		2	0.17		2	0.07	1
8				4	0.33		6	0.2	0.67
9				6	0.5		12	0.4	0.5



شکل ۵- نمایی از فلوم.

Figure 5. A view of the flume.

دبی خروجی از فلوم، از جنس ورق فلزی در نظر گرفته شده است. جهت اندازه‌گیری ارتفاع سطح آب و برآورد افت انرژی، از چندین خط‌کش ثابت در قبل و بعد از سرریز استفاده شد و برای جلوگیری از ورود امواج به کانال از یک توری مشبک، بعد از سرریز ابتدایی استفاده شده است (شکل ۶).

بعد از مخزن فلوم، یک دریچه کشویی جهت تنظیم دبی ورودی به فلوم و یک سرریز مثلثی ۹۰ درجه برای اندازه‌گیری دبی ورودی و یک دریچه کشویی در ابتدای آبگیر جانبی جهت باز و قطع جریان ورودی به آبگیر جانبی و همچنین سرریز مثلثی ۹۰ درجه در انتهای فلوم، جهت اندازه‌گیری



شکل ۶- سرریز ورودی مثلثی با رأس ۹۰ درجه، در ابتدا فلوم.

Figure 6. Triangular inlet overflow with a 90 degree head, initially flume.

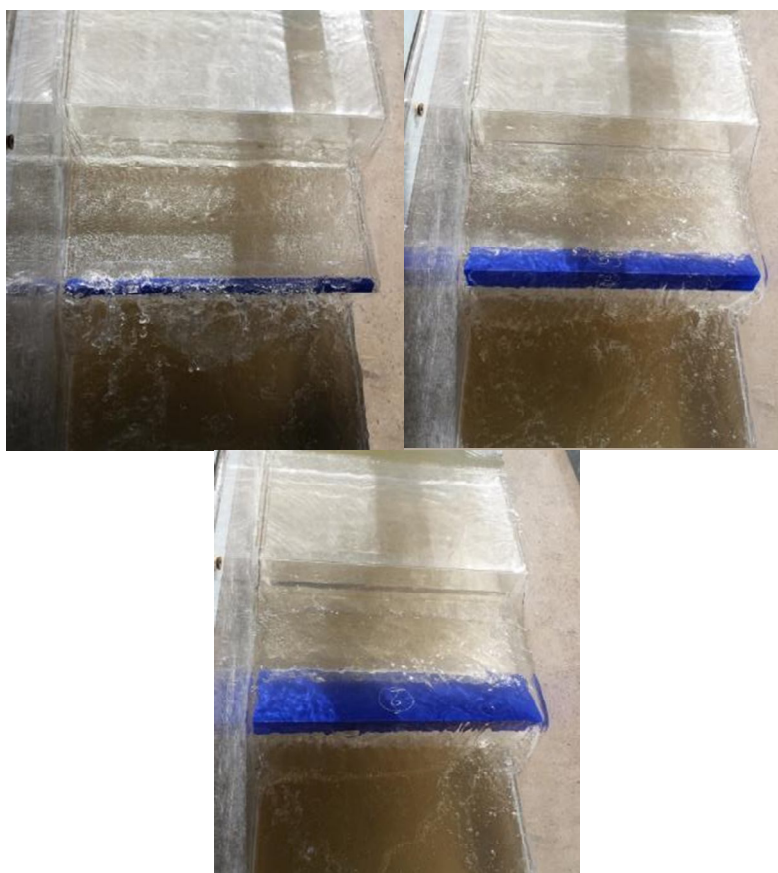
در شکل ۸ نمونه‌های از سرریزهای پلکانی با موانع ساخته شده آمده است.

برای چرخش آب در فلوم آزمایشگاهی با توجه به دبی موردنظر از یک پمپ سانتریفیوژ به قدرت ۱۱ کیلووات، قطر لوله مکش و دهش ۶ اینچ استفاده شد. (شکل ۷).



شکل ۷- پمپ سانتریفیوژ.

Figure 7. Centrifugal Pump.



شکل ۸- نمونه‌های از ترکیب سریزهای پلکانی با مانع.

Figure 8. Examples of stacked barrier combinations.

پرداختیم. پس از مش‌بندی شرایط مرزی به شرح زیر مشخص گردید:

۱. مرز ورودی: Specified Pressure با استفاده از گزینه use fluid elevation در این قسمت.

۲. مرز خروجی: Out Flow

۳. مرز کناره‌ها: wall

۴. مرز کف: wall

۵. مرز بالا: Specified Pressure با استفاده از گزینه use fluid fraction

۶. مرز بین دو بلوک: Symmetry

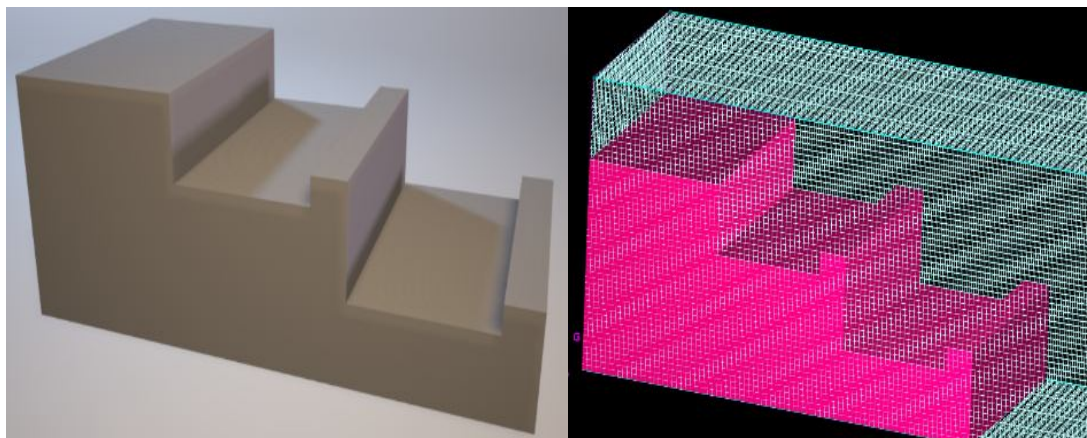
در ابتدا مدل ریاضی Flow-3D با استفاده از مدل‌های آشفتگی تعریف شده در نرم‌افزار کالیبره گردید و سپس با انتخاب بهترین مدل آشفتگی با کم‌ترین خطا به شبیه‌سازی باقی آزمایش‌های پرداخته

همچنین در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D به شبیه‌سازی مدل مذکور پرداخته شد و سپس نتایج آن با مدل فیزیکی مقایسه گردید.

شبیه‌سازی با مدل ریاضی Flow-3D: از مهم‌ترین پرکاربردترین دستورات عمل‌های CFD که برای مدل‌سازی سرریز استفاده می‌شود. Flow-3D می‌باشد. نتایج به دست آمده از مطالعات انجام شده توسط Flow-3D بیش‌ترین تطابق را با نتایج حاصل از مدل‌های فیزیکی را داشته است که البته به خوبی با استانداردهای هیأت مهندسين ارتش آمریکا و دفتر احیاء اراضی آمریکا تطابق داشته است. در این پژوهش پس از انجام تنظیمات اولیه و مش‌بندی و تعیین شرایط مرزی نرم‌افزار ران گردید و بعد از کالیبره کردن نرم‌افزار به انجام ران‌های بعدی

ترسیم سرریز پلکانی در AutoCAD و مش‌بندی آن در مدل ریاضی Flow-3D آورده شده است.

شد. قابل ذکر است با مشاهده نتایج کالیبره، در این شبیه‌سازی از مدل آشفتگی RNG به‌دلیل داشتن کم‌ترین خطا استفاده می‌شود. در شکل ۹ نمونه‌ای از



شکل ۹- نمونه‌ای از ترسیم سرریز پلکانی در AutoCAD و مش‌بندی آن در مدل ریاضی Flow-3D.

Figure 9. An example of a step-by-step series mapping in AutoCAD and its placement in the Flow -3D Mathematical Model.

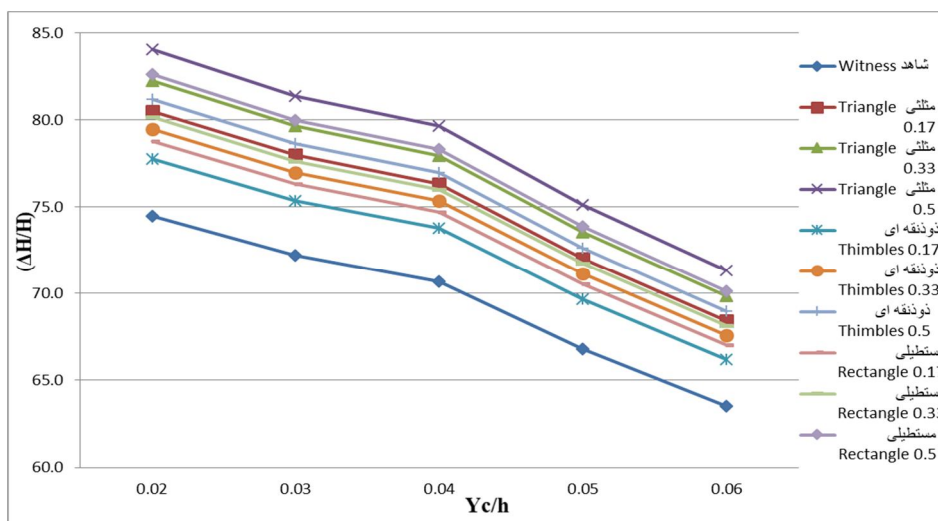
ترکیب سرریز پلکانی با انواع موانع پرداخته شده است.

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در ترکیب سرریز پلکانی با تمامی موانع در پله اول شاهد افزایش افت نسبی انرژی نسبت به شاهد هستیم. با توجه به نتایج می‌توان به‌خوبی دریافت موانع با شکل مثلثی بیش‌ترین استهلاک انرژی را داشته و موانع با شکل دوزنقه کم‌ترین استهلاک انرژی را به‌دلیل کاهش تلاطم داشته است. در ترکیب سرریز پلکانی با موانع در پله اول با کاهش نسبت (h'/L') شاهد افزایش افت نسبی انرژی هستیم. همچنین به‌خوبی می‌توان مشاهده کرد با افزایش (y/h) از 0.02 تا 0.06 افت نسبی کاهش پیدا کرده است که به‌دلیل استغراق پله‌های زیر سطح آب و کاهش زبری پله‌ها و با افزایش شدت پدیده ورود هوا می‌باشد که در استهلاک انرژی تأثیر می‌گذارد.

نتایج

نتایج در این پژوهش شامل ارزیابی عدد فرود، استفاده از موانع با اشکال مختلف تغییر در طول و عرض موانع، تغییر در مکان موانع و تأثیر آن بر روی افت انرژی می‌باشد به این ترتیب نتایج در ۳ بخش تقسیم می‌شوند:

- ۱- اثر تغییر شکل موانع بر استهلاک و افت انرژی
 - ۲- اثر تغییر در طول و عرض موانع بر استهلاک و افت انرژی
 - ۳- اثر تأثیر نصب موانع بر روی پله‌های مختلف بر استهلاک و افت انرژی
 - ۴- اثر عدد فرود بر استهلاک و افت انرژی
- با انجام آزمایش‌های، داده‌های مورد نیاز برای تحلیل نتایج برداشت شد که در قالب نمودارهایی در ادامه نشان داده می‌شود. در ادامه به بررسی نتایج افت نسبی در عدد فرودهای مختلف و نسبت (h'/L') در

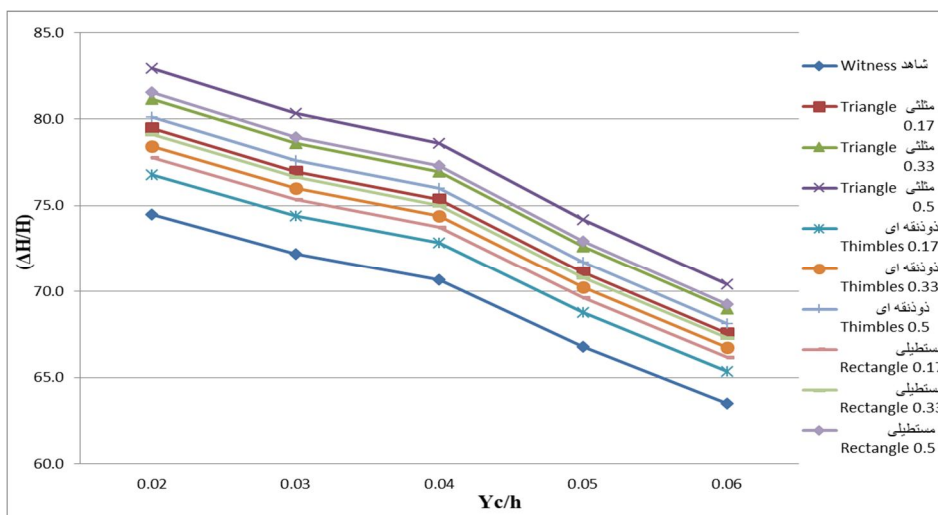


شکل ۱۰- نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با موانع در پله اول.

Figure 10. Comparison diagram of the relative energy loss in the stack overflow combination with obstacles in the first step.

پلکانی با موانع در پله دوم با کاهش نسبت (h'/L') شاهد افزایش افت نسبی انرژی هستیم. همچنین به خوبی می‌توان مشاهده کرد با افزایش (y/h) از 0.02 تا 0.06 افت نسبی کاهش پیدا کرده است که به دلیل استغراق پله‌های زیر سطح آب و کاهش زبری پله‌ها و با افزایش شدت پدیده ورود هوا می‌باشد که در استهلاك انرژی تأثیر می‌گذارد.

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در ترکیب سرریز پلکانی با تمامی موانع در پله دوم شاهد افزایش افت نسبی انرژی نسبت به شاهد هستیم. با توجه به نتایج می‌توان به خوبی دریافت موانع با شکل مثلثی بیش‌ترین استهلاك انرژی را داشته و موانع با شکل دوزنقه کم‌ترین استهلاك انرژی را به دلیل کاهش تلاطم داشته است. در ترکیب سرریز

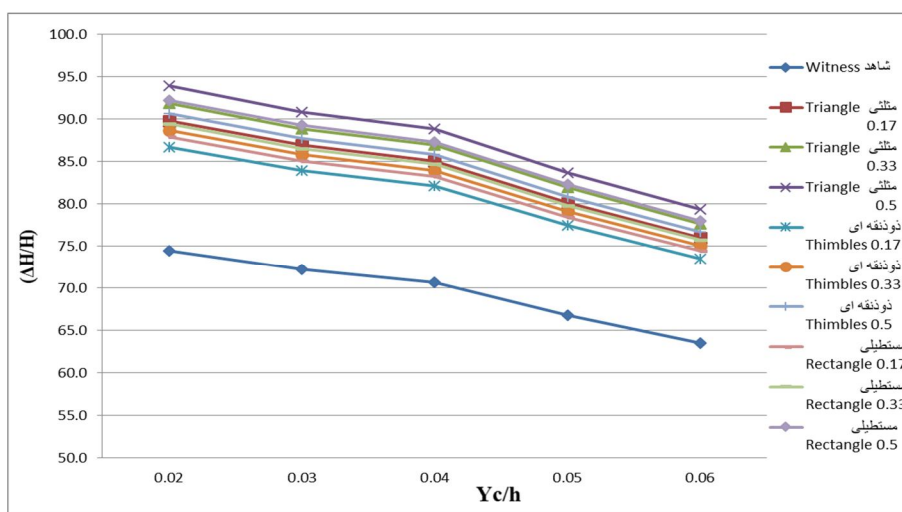


شکل ۱۱- نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با موانع در پله دوم.

Figure 11. Comparison diagram of the relative energy loss in the stack overflow combination with obstacles in the second step.

پلکانی با موانع در دو پله با کاهش نسبت (h/L') شاهد افزایش افت نسبی انرژی هستیم. همچنین به خوبی می توان مشاهده کرد با افزایش (y/h) از 0.02 تا 0.06 افت نسبی کاهش پیدا کرده است که به دلیل استغراق پله های زیر سطح آب و کاهش زبری پله ها و با افزایش شدت پدیده ورود هوا می باشد که در استهلاك انرژی تأثیر می گذارد.

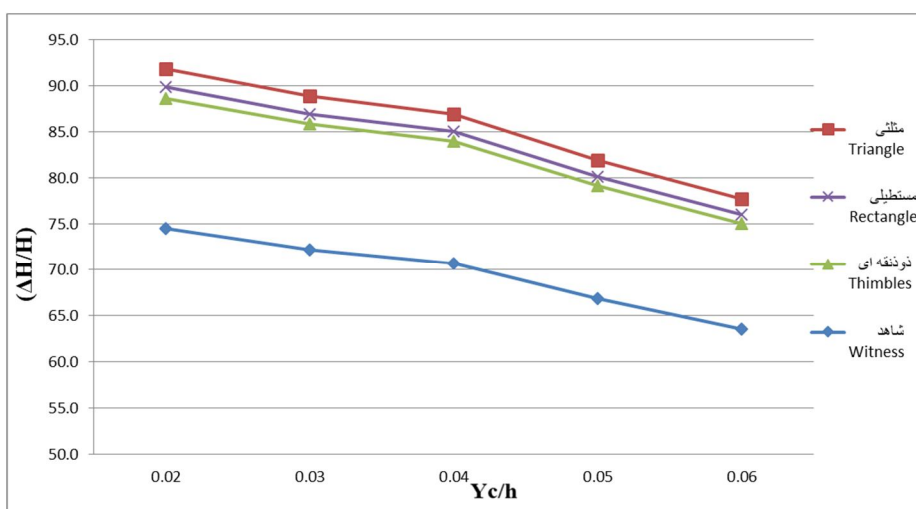
همان طور که در نمودار شکل ۱۲ مشاهده می شود، در ترکیب سرریز پلکانی با تمامی موانع در حالت دو پله شاهد افزایش افت نسبی انرژی نسبت به شاهد هستیم. با توجه به نتایج می توان به خوبی دریافت موانع با شکل مثالی بیشترین استهلاك انرژی را داشته و موانع با شکل ذوزنقه کمترین استهلاك انرژی را به دلیل کاهش تلاطم داشته است. در ترکیب سرریز



شکل ۱۲- نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با موانع در دو پله.

Figure 12. Comparison diagram of the relative energy loss in stack overflow combination with barriers in two steps.

بررسی اثر تغییر در شکل موانع بر استهلاك و افت انرژی



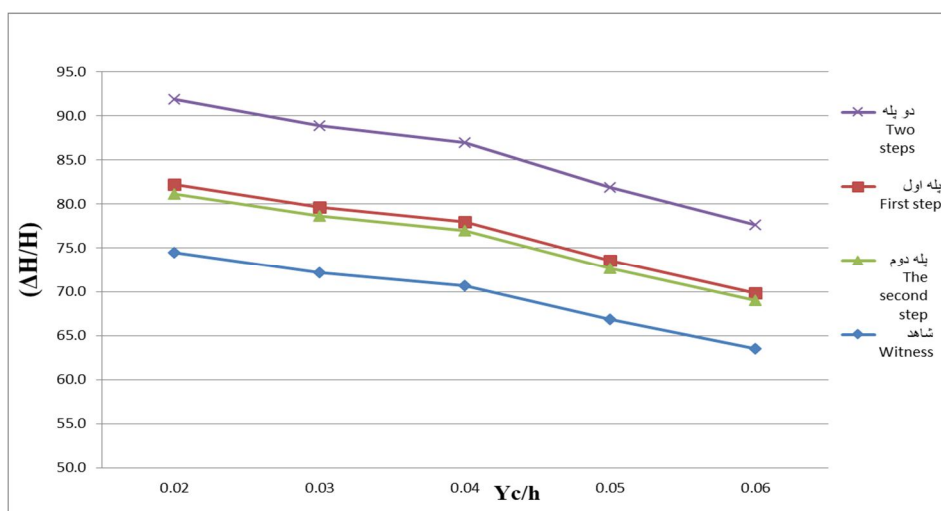
شکل ۱۳- نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با موانع با اشکال متفاوت.

Figure 13. Comparison diagram of the relative energy loss in the stack overflow combination with barriers of different shapes.

استهلاک انرژی و موانع دوزنقه‌ای به‌طور متوسط باعث افزایش ۱۱/۲ درصدی استهلاک انرژی نسبت به مدل شاهد شده‌اند.

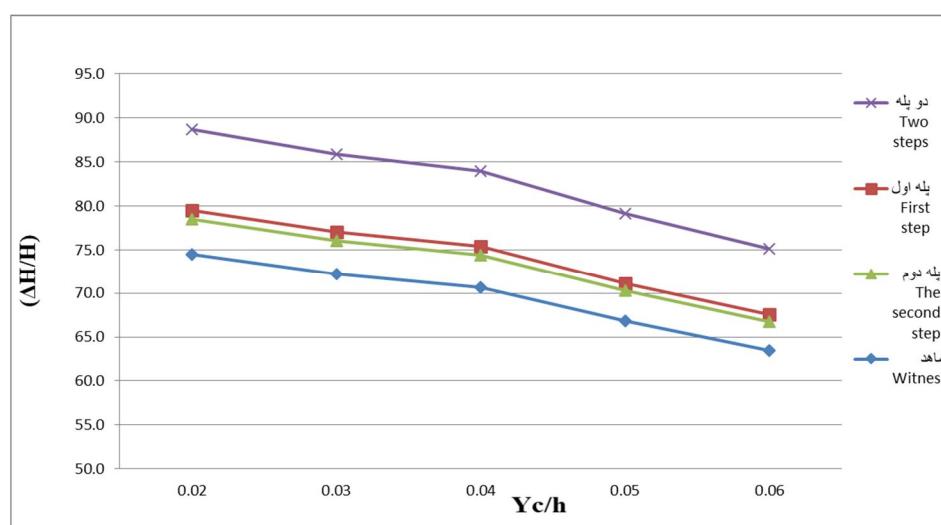
بررسی اثر تغییر در طول و عرض موانع بر استهلاک و افت انرژی: در ادامه در نمودارهای شکل‌های ۱۴ تا ۱۵ به مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با موانع با اشکال مختلف پرداخته خواهد شد.

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در ترکیب سرریز پلکانی با تمامی موانع شاهد افزایش افت نسبی انرژی نسبت به شاهد هستیم. با توجه به نتایج می‌توان به‌خوبی دریافت موانع با شکل مثلثی بیش‌ترین استهلاک انرژی را داشته و موانع با شکل دوزنقه کم‌ترین استهلاک انرژی را به‌دلیل کاهش تلاطم داشته است. موانع مثلثی به‌طور متوسط باعث افزایش ۱۵/۹ درصدی استهلاک انرژی، موانع مستطیلی به‌طور متوسط باعث افزایش ۱۳/۷ درصدی



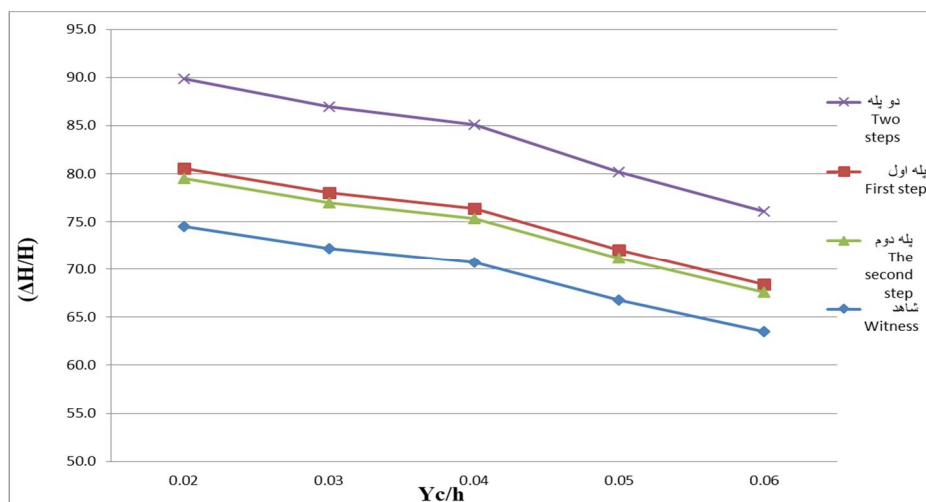
شکل ۱۴- نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با مانع مثلثی.

Figure 14. Comparison diagram of the relative energy loss in a triangular barrier stack overflow composition.



شکل ۱۵- نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با مانع دوزنقه‌ای.

Figure 15. Comparison diagram of the relative energy loss in the stacked overflow combination with balloon barrier.



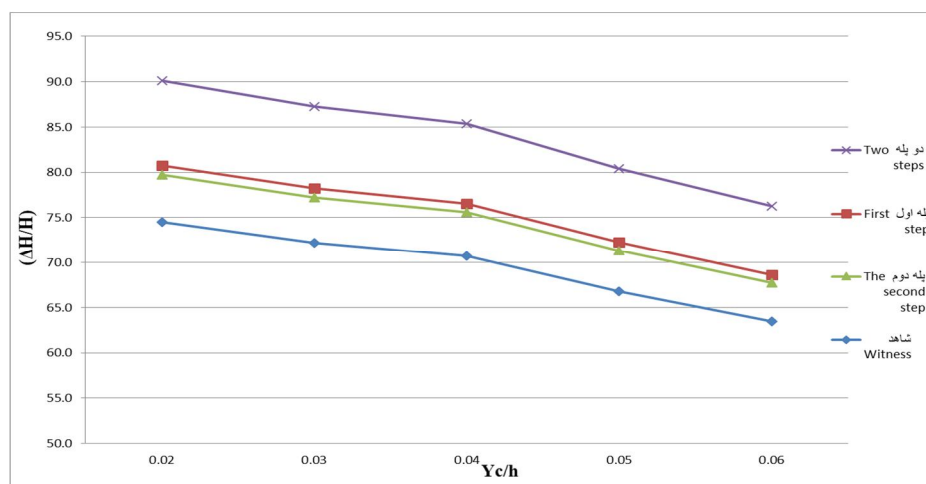
شکل ۱۶- نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در ترکیب سرریز پلکانی با مانع مستطیلی.

Figure 16. Comparison diagram of the relative energy loss in a stacked overflow combination with a rectangular barrier.

افزایش استهلاک و افت انرژی از ۱۹ به ۱۲/۲ درصد شده است.

بررسی اثر تأثیر نصب موانع بر روی پله‌های مختلف بر استهلاک و افت انرژی: در این بخش به بررسی اثر تأثیر نصب موانع بر روی پله‌های مختلف بر استهلاک و افت انرژی پرداخته شده است.

همان‌طور که در نمودار شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ مشاهده می‌شود، در ترکیب سرریز پلکانی با تمامی موانع شاهد افزایش افت نسبی انرژی نسبت به شاهد هستیم. در ترکیب سرریز پلکانی با موانع با کاهش نسبت (h'/L') شاهد افزایش افت نسبی انرژی هستیم. به‌طور متوسط با کاهش (h'/L') از ۱ به ۰/۴ شاهد



شکل ۱۷- نمودار مقایسه افت نسبی انرژی در نصب موانع در پله‌های متفاوت.

Figure 17. Comparison diagram of the relative energy loss in the installation of obstacles in different steps.

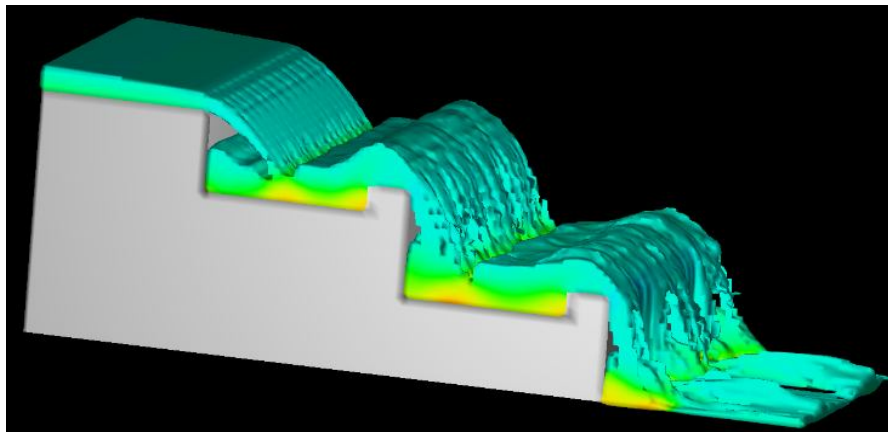
هستیم. با توجه به نتایج می‌توان به‌خوبی دریافت موانع در دو پله بیش‌ترین استهلاک انرژی و افت را داشته. با ترکیب موانع بر دو پله سرریز پلکانی به‌طور

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، در ترکیب سرریز پلکانی با تمامی موانع و در هر پله شاهد افزایش افت نسبی انرژی نسبت به شاهد

نتایج شبیه‌سازی با مدل ریاضی Flow-3D و مقایسه آن با مدل ریاضی پرداخته شده است. پس انجام کالیبره مدل و بهترین حالت مش‌بندی و معادلات آشفتگی و به‌دست آوردن کم‌ترین خطا به انجام آزمایش‌های اصلی پرداخته شد. جهت مقایسه با مدل فیزیکی از متوسط نتایج مدل فیزیکی و مدل ریاضی در نمودار استفاده گردید. در شکل ۱۸ نمای گرافیکی مدل شبیه‌سازی شده با Flow-3D نشان داده شده است.

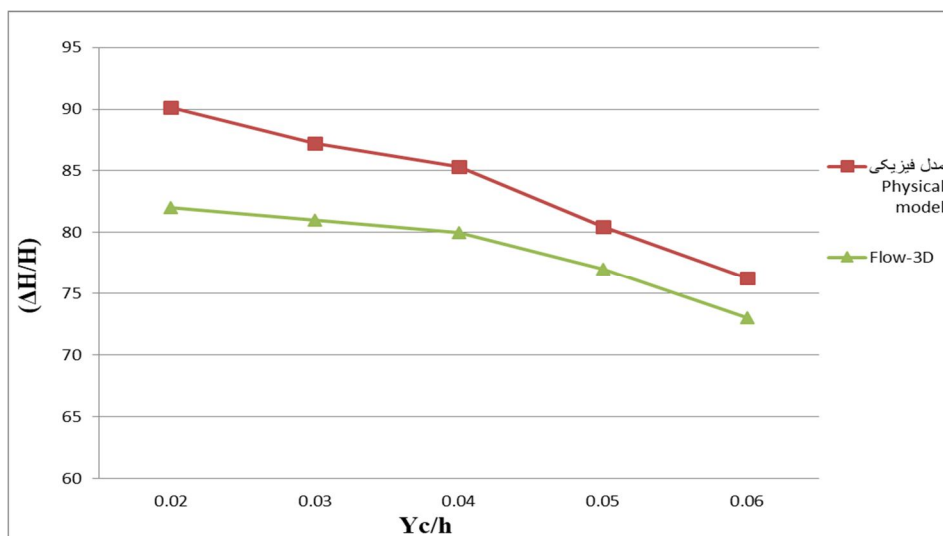
متوسط ۱۴/۴ درصد افزایش استهلاک انرژی را نسبت به حالت شاهد داریم. موانع به حالت تکی در پله اول و دوم استهلاک انرژی نزدیک به یکدیگر دارند که در پله اول به دلیل انرژی بالاتر بالادست، استهلاک بیشتری نیز نسبت به پله دوم دارد. با ترکیب موانع بر پله اول در سرریز پلکانی به‌طور متوسط ۵/۸ درصد و موانع بر پله دوم ۴/۸ درصد افزایش استهلاک انرژی را نسبت به حالت شاهد داریم.

نتایج شبیه‌سازی با مدل ریاضی Flow-3D و مقایسه آن با مدل ریاضی: در این بخش به بررسی



شکل ۱۸- مدل شبیه‌سازی شده با Flow-3D.

Figure 18. The simulated model with Flow-3D.



شکل ۱۹- نمودار مقایسه نتایج شبیه‌سازی Flow-3D با مدل فیزیکی.

Figure 19. Flow 3D model simulation results comparison with physical model.

۲- با افزایش طول و عرض موانع شاهد افزایش استهلاک و افت انرژی هستیم. با کاهش نسبت (h/L') شاهد افزایش افت نسبی انرژی هستیم. به طور متوسط با کاهش (h/L') از ۱ به $0/4$ شاهد افزایش استهلاک و افت انرژی از ۱۹ به $۱۲/۲$ درصد شده است.

۳- موانع در حالت دو پله بیشترین استهلاک انرژی و افت را داشته است. با ترکیب موانع بر دو پله سرریز پلکانی به طور متوسط $۱۴/۴$ درصد افزایش استهلاک انرژی را نسبت به حالت شاهد داریم. موانع به حالت تکی در پله اول و دوم استهلاک انرژی نزدیک به یکدیگر دارند که در پله اول به دلیل انرژی بالاتر بالادست، استهلاک بیشتری نیز نسبت به پله دوم دارد. با ترکیب موانع بر پله اول در سرریز پلکانی به طور متوسط $۵/۸$ درصد و موانع بر پله دوم $۴/۸$ درصد افزایش استهلاک انرژی را نسبت به حالت شاهد داریم.

۴- با افزایش (y_0/h) از $0/۰۲$ تا $0/۰۶$ شاهد کاهش استهلاک و افت انرژی هستیم که به دلیل استغراق پله‌های زیر سطح آب و کاهش زبری پله‌ها و با افزایش شدت پدیده ورود هوا می‌باشد که در استهلاک انرژی تأثیر می‌گذارد.

۵- نتایج شبیه‌سازی با مدل ریاضی Flow-3D نزدیک به مدل فیزیکی می‌باشد و به طور متوسط تنها $۶/۳$ درصد خطا دارد که قابل قبول می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مدل فیزیکی نشان می‌دهد با افزایش عدد فرود نتایج شبیه‌سازی با مدل ریاضی Flow-3D انحراف کم‌تر با مدل فیزیکی پیدا می‌کند به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود.

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۹ نتایج شبیه‌سازی با Flow-3D نشان می‌دهد در ترکیب سرریز پلکانی با تمامی موانع و در هر پله شاهد افزایش افت نسبی انرژی نسبت به شاهد هستیم. همچنین نتایج شبیه‌سازی با مدل ریاضی Flow-3D نزدیک به مدل فیزیکی می‌باشد و به طور متوسط تنها $۶/۳$ درصد خطا دارد که قابل قبول می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مدل فیزیکی نشان می‌دهد با افزایش عدد فرود نتایج شبیه‌سازی با مدل ریاضی Flow-3D انحراف کم‌تر با مدل فیزیکی پیدا می‌کند به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

ترکیب سرریز پلکانی با موانع می‌تواند باعث افزایش استهلاک انرژی شود. بنا به این مهم در این پژوهش به ترکیب سرریز پلکانی با موانعی به شکل مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی با ابعاد مختلف و نصب بر پله‌های مختلف پرداخته شد که در ذیل به خلاصه نتایج پرداخته شده است:

۱- در ترکیب سرریز پلکانی با موانع به ترتیب مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای، شاهد کاهش استهلاک و افت انرژی هستیم. موانع مثلثی به طور متوسط باعث افزایش $۱۵/۹$ درصدی استهلاک انرژی، موانع مستطیلی به طور متوسط باعث افزایش $۱۳/۷$ درصدی استهلاک انرژی و موانع دوزنقه‌ای به طور متوسط باعث افزایش $۱۱/۲$ درصدی استهلاک انرژی نسبت به مدل شاهد شده‌اند.

منابع

1. Abbasi, S., and Kamanbedast, A.A. 2012. Investigation of Effect of Changes in Dimension and Hydraulic of Stepped Spillways for Maximization Energy Dissipation, World Appl. Sci. J. 18: 2. 261-267, 2012, ISSN 1818-4952 © IDOSI Publications.
2. Chamani, M.R., and Rajaratnam, N. 1994. Jet flow on stepped spillway, J. Hydr. Engin. ASCE. 12: 5. 441-448.
3. Chamani, M.R., and Rajaratnam, N. 1999. Characteristics of skimming flow over stepped spillway, J. Hydr. Engin. 125: 4. 361-367.
4. Chanson, H. 1994a. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways, J. Hydr. Res. 32: 3.
5. Chanson, H. 1994b. Comparison of Energy dissipation between nappe and skimming flow Regimes on stepped chutes, J. Hydr. Res. 32: 2. 213-218.
6. Chanson, H. 1994c. Jet flow on stepped spillways, Discussion, J. Hydr. Engin. 120: 2. 443-444.
7. Chanson, H. 1995. Hydraulic Design of stepped Cascades Channels Weirs and Spillway, Pergamon, Oxford, UK.
8. Chanson, H. 2001. The hydraulic of stepped chutes and spillway, TC. 555, C. 4623.
9. Chinnarasi, C., and Wongwisess, S. 2006. Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes, J. Irrig. Drain. Engin. ASCE. 132: 1.
10. Erfanian Azmodeh, M.H., and Kamanbedast, A.A. 2013. Determine the Appropriate Location of Aerator System on Gotvand olia dam's Spillway Using Flow 3D. JAES.
11. Essery, I.T.S., and Horner, M.W. 1971. The hydraulic design of stepped spillway, Report 33, Constr. Industry Res. And Information Assoc. London, England.
12. Kamanbedast, A., and Gholizade, B. 2012. The study of siphon spillway Hydraulic by Modeling (physical a software), J. Appl. Sci. Res.
13. Kamanbedast, A. 2012. The Investigation of Discharge Coefficient for the Morning Glory Spillway Using Artificial Neural Network, World Appl. Sci. J. 17: 7. 913-918.
14. Kamanbedast, A. 2014. Handbook of hydraulic structures engineering. Published in Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. (In Persian)
15. Rajaratnam, N. 1990. Skimming flow in stepped spillway, J. Hydr. Engin. ASCE. 116: 4.
16. Zaretsky, Y., and Korchevsky, V. 1997. Kowsar dam project (Tang-e-Duk), Joint final report, International institute of geo mechanics and hydro structures, Moscow, Russia.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(2), 2019

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.15687.3085

Investigation of energy loss in step-spillway with obstacles on the step using physical and Flow-3D model

**H.R. Afshoon¹, *A.A. Kamanbedast², A.R. Masjedi³,
M. Heidarnejad² and A. Bordbar²**

¹Ph.D. Graduate, Dept. of Water Science and Engineering, Khuzestan Science and Research Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran and Dept. of Water Science and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, ²Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, ³Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Received: 10.03.2018; Accepted: 01.30.2019

Abstract

Background and Objectives: To pass the excess water and floodwaters from upstream to downstream of the dams, a structure called "spillway" is used. This structure is vital and integral as they should be ready for operation at any time. Stepped spillways are introduced as a viable option for improvement of spillways facing problem when flowing the possible maximum flow rate. Stepped spillways consist of stairs which start near the crest and continue to lower heels. Increase of roughness leads to a uniform and continuous distribution energy of the flow over the spillway. This is of great benefit for designers as is no need to create a power reduction plant such as a relaxing pool (where energy should be dispersed at once), or in the case of need the dimensions of these structures will be reduced.

Materials and Methods: In this study, to increase the roughness on the stepped spillway, barriers are used to increase the energy dissipation. For experimental tests, a flume with a 90 degree bend was used in Islamic Azad University of Ahvaz (IAU-A). y selecting different models of barriers on the stepped spillway in three forms with three different lengths and widths and also using barriers individually and in combination with 5 different flow rates, A total of 140 tests were conducted. After analyzing the results, it was found that the stepped spillway combined with respectively, triangular, rectangular and trapezoidal, reduced the depreciation and energy loss.

Results: Triangular barriers, on average, increase the energy consumption by 15.9%, rectangular barriers, on the average, increase the energy consumption by 13.7% and tipping barriers by an average 11.2% increase in energy depreciation compared to the control model. An increase in the length and width of the barriers results in an increase in dissipation and energy loss. The two-step barriers have the highest energy dissipation and loss. By combining barriers on the two-stair stepped spillway, there is an average of 14.4 percent increase in energy dissipation. Based on the observations, rise in the Froude number from 0.32 to 1.71 led to a decrease in dissipation and energy losses that is due to the immersion of the stairs below the water level and the reduction of the roughness of the stairs and with the increase of the intensity of the inflow phenomenon. The simulation results with the Flow-3D math model are close to the physical model and on average only 6.3% of errors are acceptable.

* Corresponding Author; Email: ka57_amir@yahoo.com

Conclusion: After analyzing the results, it was found that in the combination of stepped spillway with triangular, rectangular and trapezoidal obstacles, decrease in energy depreciation and energy loss are noticeable. Also, comparing the simulation results and the physical model shows that the Flow-3D mathematical model find less bias with the physical model and closer to reality.

Keywords: Energy dissipation, Flow-3D, Obstacles, Physical model, Stepped spillway