



Experimental Investigation of the Effect of Chute Slope on Energy Dissipation

Fereshteh Beiranvand^{*1}, Farzin Beiranvand², Davoud Farsadizadeh³

1. MSc, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, East Azerbaijan, Iran.
2. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, East Azerbaijan, Iran.
3. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University, East Azerbaijan, Iran

Received: 09 January 2025/ Revised: 03 February 2025/ Accepted: 18 February 2025

<https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2063398.1044>

Abstract

Shuts are among the most common water transfer structures in dams, irrigation and drainage networks, alluvial waterways, and wastewater collection, treatment, and disposal systems, and are used to transfer water from one level to a lower level over a relatively long distance. Downstream, the rapids become energy-draining structures. Among the methods for reducing the size or eliminating downstream energy-dissipating structures is the use of methods to reduce the flow energy on rapids. In this study the effect of chute slope on energy dissipation has been investigated. Experimental tests were conducted in a physical model using different bed slopes (16.4, 20.6, 22.6, 25, 28.7, 35 degree) and 2 different uniform roughness heights (3.38, 38.1 mm). Total of 120 tests were conducted with flow discharges ranged between 4 and 45 (LS-1). Results show that in comparison with the smooth bed, nearly 7 to 51 percent of the flow energy was dissipated on the roughened bed chute. Maximum energy dissipation occurred for slope 16.4 degree and the minimum energy was dissipated on 35 degree.

Keywords: Bed roughness, Chute, Dam, Physical Model.



بررسی آزمایشگاهی اثر شیب تنداب بر استهلاک انرژی

فرشته بیرانوند^{۱*}، فرزین سلماسی^۲، داود فرسادی‌زاده^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران.
۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران.
۳. گروه مهندس آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، آذربایجان شرقی، ایران

دریافت: ۲۰ دی ماه ۱۴۰۳ / اصلاحات: ۱۵ بهمن ماه ۱۴۰۳ / پذیرش: ۳۰ بهمن ماه ۱۴۰۳

<https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2063398.1044>

چکیده

تنداب‌ها از جمله متداول‌ترین سازه‌های انتقال آب در سدها، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، آبراهه‌های آبرفتی و سیستم‌های جمع‌آوری، تصفیه و دفع فاضلاب بوده و برای انتقال آب از سطحی به سطح پایین‌تر در فاصله‌ی نسبتاً زیاد به کار می‌روند. در پایین دست تنداب از سازه مستهلک کننده انرژی استفاده می‌شود. از جمله روش‌های کاهش ابعاد و یا حذف سازه‌ی مستهلک کننده انرژی پایین دست به کار بردن روش‌هایی برای کاهش انرژی جریان بر روی تنداب‌ها است. در این تحقیق تأثیر اندازه شیب تنداب بر میزان استهلاک انرژی جنبشی آب، بررسی گردید. آزمایش‌ها بر روی مدل‌های فیزیکی در ۶ شیب مختلف (۱۶/۴، ۲۰/۶، ۲۲/۶، ۲۵، ۲۸/۷ و ۳۵ درجه) با قرار دادن ۲ نوع زبری با اندازه‌های متفاوت (۳/۳۸ و ۳۸/۱۰ میلی‌متر) و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت بر روی بستر آن‌ها انجام شدند. میزان استهلاک انرژی سازه در این نوع تنداب با انجام ۱۲۰ آزمایش مختلف با ۱۰ دبی بین ۴ تا ۴۵ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد؛ که با وجود زبری بستر تنداب، میزان استهلاک انرژی در شیب‌های مختلف از ۷ تا ۵۱ درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش یافت. نتایج حاوی این مطلب است که به‌طور کلی شیب ۱۶/۴ درجه حداکثر و شیب ۳۵ درجه حداقل میزان استهلاک را در محدوده‌ی آزمایش‌های این تحقیق نشان دادند.

کلمات کلیدی: تنداب، زبری بستر، سد، مدل فیزیکی.

مقدمه

تنداب‌ها از جمله متداول‌ترین سازه‌های انتقال آب در سدها، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، آبراهه‌های آبرفتی و سیستم‌های جمع‌آوری، تصفیه و دفع فاضلاب بوده و برای انتقال آب از سطحی به سطح پایین‌تر در فاصله‌ی نسبتاً زیاد بکار می‌روند. در پایین‌دست تنداب از سازه مستهلک کننده انرژی استفاده می‌شود. از جمله روش‌های کاهش ابعاد و یا حذف سازه‌ی مستهلک کننده‌ی انرژی پایین‌دست به کار بردن روش‌هایی برای کاهش انرژی جریان بر روی تنداب‌ها است. یکی از این روش‌ها که تاکنون استفاده شده است، ایجاد پله در طول سرریز است. تحقیقات نشان می‌دهند؛ که مقدار استهلاک انرژی در سرریزهای پلکانی بیشتر از سرریزهای صاف (بدون پلکان) با همان ابعاد می‌باشد. سرریزهای پلکانی یکی از انواع ساختمان‌های هیدرولیکی هستند؛ که اغلب به منظور استهلاک انرژی مازاد جریان آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. وجود پله‌های متوالی که از نزدیکی تاج سرریز شروع شده و تا پایین‌دست آن ادامه دارد، موجب اتلاف بخش عظیمی از انرژی جنبشی جریان عبوری و نیز کاهش عمق حفاری حوضچه آرامش پایین‌دست، طول حوضچه آرامش و ارتفاع دیواره‌های جانبی آن در پایین‌دست می‌گردد (Dah-Mardeh et al., 2023; Afaridegan et al., 2024) که این خود موجب کاهش هزینه‌های مربوط و اقتصادی شدن طرح می‌گردد (Chanson, 2002; Chen, 2015). اکثر محققان به دو نوع رژیم جریان متفاوت (ریزشی و غلتشی) اشاره نموده‌اند. چافی و همکاران (Chafi et al., 2010) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی کمی و کیفی جریان در سرریزهای پلکانی پرداختند. ایشان با برقرار کردن دو رژیم جریان ریزشی و غلتشی در آزمایش‌ها نشان دادند که شکل و کیفیت سطح پله‌ها بر تغییر رژیم جریان تأثیر می‌گذارد. فلدر و همکاران (Felder and Chanson, 2011) با انجام آزمایش‌هایی بر روی یک سرریز پلکانی با پله‌های یکنواخت و غیریکنواخت، مقدار افت انرژی را بررسی نمودند. نتایج این بررسی نشان داد که نرخ اتلاف انرژی در حالت یکنواخت و غیریکنواخت تقریباً یکسان است. سلماسی و ازگر (Salmasi and Özger, 2014) با استفاده از سیستم استنتاج فازی به پیش بینی اتلاف انرژی در سرریزهای پلکانی با رژیم جریان غلتشی پرداختند.

در رابطه با سرریزهای پلکانی تأثیر تعداد پلکان‌ها بر روی استهلاک انرژی مشهود است؛ و تأثیر تعداد پلکان در دبی‌های بالا بیشتر می‌گردد. همچنین با تبدیل جریان ریزشی به جریان غیر ریزشی افت انرژی کاهش می‌یابد (Sorensen, 1985). سلماسی (Salmasi, 2009) با تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از تعداد زیادی آزمایش نشان داد؛ که استهلاک انرژی در سرریزهای پله‌ای متأثر از تعداد پله‌ها بوده و به ازای تعداد پله مشخص، می‌توان به حداکثر استهلاک انرژی دست یافت.

چین نراسی و وانگ‌ویزیس (Chinnarasri and Wongwiset, 2006) با انجام مطالعات و مدل کردن انواع مختلف پلکان (افقی، مایل و پلکان با زائده انتهایی) بر روی تنداب با تعداد پلکان مختلف، به بررسی استهلاک انرژی و رابطه آن با عمق بحرانی نسبی پرداختند. نتایج نشان داد که پلکان با زائده انتهایی اثر فراوانی نسبت به دو نوع دیگر پلکان، بر روی استهلاک انرژی دارد.

چمنی و راجاراتنام (Chamani and Rajaratnam, 1999) آزمایش‌هایی بر روی سرریز پلکانی با شیب ۵۹ درجه انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد؛ که میزان افت انرژی نسبی در رژیم جریان غیر ریزشی بین ۴۸ تا ۶۳ درصد تغییر می‌نماید.

راورو همکاران (Ravar et al., 2011) مطالعاتی در زمینه تأثیر به کارگیری زبری‌هایی به شکل دوزنقه قائم الزاویه انجام دادند. ایشان ۱۲۶ آزمایش در بازه اعداد فرود ۳/۹ تا ۱۳/۷ با ۱۲ نوع زبری با ابعاد مختلف انجام دادند و بیان داشتند که متوسط کاهش طول پرش روی این نوع بسترها حدوداً برابر ۴۱ درصد می‌باشد. با افزایش ارتفاع و فاصله بین زبری‌ها، مقدار طول غلطاب حداکثر تا ۳۷ درصد کاهش می‌یابد. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که تأثیر فاصله زبری‌ها بر کاهش طول غلطاب بیش تر است. حداکثر افت انرژی در بستر زبر حدود ۸۴ درصد بوده و افزایش افت انرژی نسبت به بستر صاف حداکثر ۹ درصد بیش تر به دست آمد.

نژندعلی و همکاران (Nejandali et al., 2012) به بررسی اثر فاصله زبری‌های مثلثی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی پرداختند. مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد طول پرش ایجاد شده بعد از درجه کشویی روی بستر زبر نسبت به بستر صاف به طور متوسط ۲۴ درصد کاهش داشته است و افزایش افت انرژی به طور متوسط، ۱۳ درصد می‌باشد. مشاهدات آن‌ها بیانگر آن بود که با افزایش فاصله ی بین زبری‌ها، طول پرش و طول غلطاب کاهش یافته و افت انرژی افزایش می‌یابد.

پالیارا و چیواوینی (Pagliara and Chiavaccini, 2006a) و پالیارا و همکاران (Pagliara et al., 2009) با ساخت مدل‌هایی در شیب‌های مختلف (۱:۴، ۱:۶، ۱:۸، ۱:۱۰ و ۱:۱۲) و استفاده از مصالح سنگی با اندازه‌های متفاوت به صورت خشکه‌چین به بررسی افت

انرژی بر روی شیب‌های سنگی با شیب نسبتاً کم پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که با افزایش شیب، مقدار افت انرژی کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین رابطه‌ای برای پیش‌بینی مقدار افت انرژی ارائه دادند.

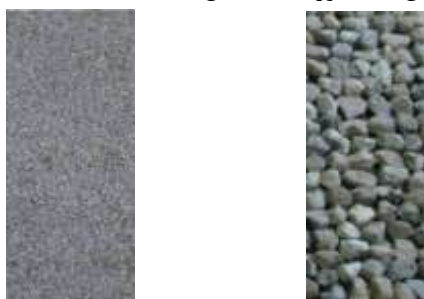
رحمانشاهی زهابی و شفای بجستان (Rahmanshahi Zahabi and Shafai Bejestan, 2012) نیز آزمایش‌هایی بر روی مدل‌های فیزیکی با ۳ شیب مختلف (۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ درجه) و با قرار دادن ۳ نوع زبری با اندازه‌های متفاوت (۱/۱، ۱/۴۳ و ۲/۱ سانتی‌متر) و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت انجام دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد؛ که در یک شیب خاص با افزایش دبی و به دنبال آن افزایش عمق، استهلاک انرژی کم می‌شود. نتایج حاوی این مطلب است که به‌طور کلی شیب ۲۲/۵ درجه حداکثر و شیب ۳۰ درجه حداقل میزان افت انرژی را در محدوده‌ی آزمایش‌های این تحقیق نشان دادند.

سلماسی و ارونقی (Salmasi and Arveneghi, 2013) برای بررسی اثر شیب سرریز روی استهلاک انرژی، ۱۲ مدل فیزیکی از سرریزهای پلکانی با شیب‌های ۱۵، ۲۵ و ۴۵ درجه و تعداد ۵ الی ۵۰ پله (شش حالت) ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد؛ که با افزایش دبی استهلاک انرژی نسبی کاهش می‌یابد. افزایش شیب باعث افزایش استهلاک انرژی می‌گردد؛ که علت آن افزایش اندازه حرکت تبدالی بین جریان چرخشی زیر هر پله و جریان روبه‌ای می‌باشد.

با توجه به مطالعات فوق هدف این تحقیق، بررسی تأثیر شیب تنداب بر میزان استهلاک انرژی است؛ بدین منظور تعداد متنوعی از شیب‌ها، شامل ۶ شیب مختلف مدنظر قرار گرفت؛ و با دو نوع زبری متفاوت روی مدل‌های فیزیکی سرریز تنداب مورد آزمایش قرار گرفت. تنوع نسبتاً زیاد شیب در این تحقیق، قابلیت اطمینان آن در ارائه معادلات استهلاک انرژی را بیشتر می‌سازد؛ که در مطالعات دیگران دیده نمی‌شود.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مربوط به این کار تحقیقاتی در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر از جنس فلز با دیواره‌های شیشه‌ای صورت گرفتند. این فلوم بر روی یک شاسی به ارتفاع ۱۱۰ سانتی‌متر از سطح زمین قرار گرفته است. شیب فلوم ثابت و برابر با ۰/۰۲۲ است. این فلوم در بالادست مجهز به آرام کننده جریان ورودی و در پایین دست مجهز به یک دریچه با قابلیت کنترل عمق پایاب است. حداکثر جریان عبوری در فلوم ۵۰ لیتر بر ثانیه بوده و دبی جریان در این محدوده با دقت خوبی توسط شیرفلکه ابتدای فلوم قابل تنظیم است. در این تحقیق با هدف بررسی تأثیر شیب تنداب بر استهلاک انرژی سازه، پس از شناخت پارامترهای مؤثر، ۶ مدل فیزیکی با شیب‌های (۱۶/۴، ۲۰/۶، ۲۲/۶، ۲۵، ۲۸/۷ و ۳۵ درجه) و دو رویه با زبری به اندازه‌های متفاوت (۳/۳۸ و ۳۸/۱ میلی‌متر) و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت ساخته شدند. برای تهیه زبری‌ها نیز از سنگ‌های مختلف با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شد؛ که بر روی صفحات فلزی با قطر ۰/۲ میلی‌متر با چسب آهن چسبانده شدند. برای استفاده از هر کدام از زبری‌ها رویه‌ی مورد نظر بر روی تنداب نصب می‌شد. لازم به ذکر است که زبری‌ها به‌طور پیوسته بر روی، رویه‌های فلزی چسبانده شدند؛ و هیچ‌گونه فاصله‌ای بین آن‌ها منظور نشد (شکل ۱).



شکل ۱. اندازه‌های مختلف زبری‌ها (الف) ۳/۳۸ میلی‌متر (ب) ۳۸/۱ میلی‌متر

Figure 1. Different sizes of roughness (a) 3.38mm, (b) 38.1mm

برای جلوگیری از قوس برداشتن تنداب بر اثر وزن آب، از پایه‌های فلزی در زیر تنداب استفاده شد. مدل در داخل فلوم قرار گرفته و با چسب آب‌بندی شد. شکل ۲ تصویری از مدل تنداب با بستر زبر ساخته شده برای این تحقیق را نشان می‌دهد.

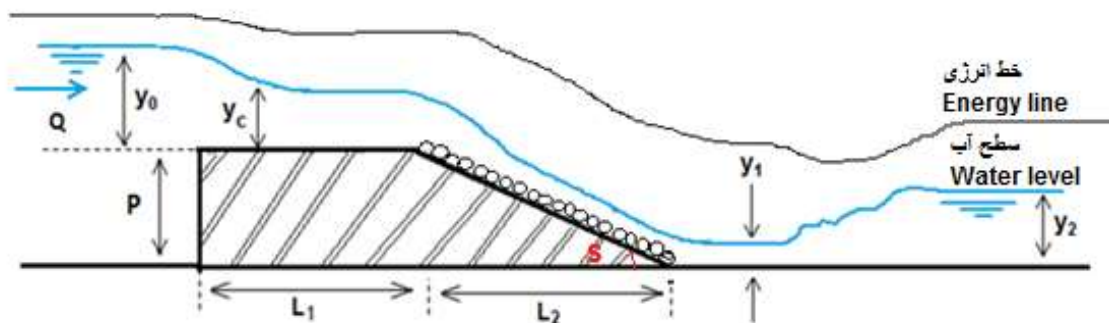


شکل ۲. مدل آزمایشگاهی تنداب با بستر زبر
Figure 2. Experimental physical model of chute with rough bed

جریان خروجی از فلوم ابتدا وارد یک مخزن جمع‌آوری کننده جریان شده و سپس از طریق یک مخروطی شکل ناقص مشبک وارد مخزن آرام کننده شده و در نهایت جریان از روی یک سرریز لبه تیز مثلثی کالیبره شده با زاویه رأس ۵۳ درجه عبور می‌کند؛ که اندازه‌گیری دبی جریان با استفاده از این سرریز صورت می‌گیرد. در کل ۱۲۰ آزمایش مختلف با ۱۰ دبی بین ۴ تا ۴۵ لیتر بر ثانیه، انجام گرفت؛ و میزان استهلاک انرژی سازه در این نوع تنداب به‌دقت مورد بررسی قرار گرفت. رابطه دبی در این سرریز به‌صورت زیر است (Beyrami, 2011):

$$Q=0.6918(H)^{2.5} \quad (1)$$

در این رابطه ارتفاع آب روی تاج سرریز مثلثی (H) برحسب متر و دبی (Q) برحسب متر مکعب بر ثانیه است. برای اندازه‌گیری H با دقت ± 0.1 میلی‌متر) از سطح سنج که در یک چاهک اندازه‌گیری در کنار سرریز مثلثی تعبیه شده استفاده شده است. تنداب از جنس فلز با ضخامت ۰/۷ میلی‌متر ساخته شد. مدل از دو قسمت تشکیل شد: یک قسمت شبیه به سرریز لبه پهن با ارتفاع متغیر و طول ۶۰ سانتی‌متر برای یکنواخت شدن جریان قبل از رسیدن به تاج تنداب و قسمت دوم، تنداب‌ها با شیب‌ها و طول‌های مختلف هستند. شکل ۳ نیمرخ طولی تنداب و اجزای آن را نشان می‌دهد. مشخصات کامل مدل‌های فیزیکی مورد آزمایش در جدول ۱ آمده است. در جدول ۱ منظور از B عرض فلوم است؛ و سایر عوامل روی شکل ۳ وجود دارند. جهت اندازه‌گیری عمق آب در بالادست و پایین‌دست تنداب از حسگرهای آلتراسونیک استفاده شد. این حسگرها این قابلیت را دارند؛ که در هر ثانیه ۵ عمق را اندازه بگیرند. حسگرها در بالادست و پایین‌دست تنداب در فاصله‌ی مناسب قرار گرفتند. در این آزمایش‌ها در هر دقیقه ۳۰۰ عمق اندازه‌گیری گردید؛ سپس از آن‌ها متوسط گرفته شد؛ و عمق به‌دست آمده، به عنوان عمق متوسط آب مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۳. نیمرخ طولی تنداب و اجزای آن
Figure 3. Longitudinal profile of chute and its components

جدول ۱. مشخصات مدل‌های فیزیکی این تحقیق

Table 1. Characteristics of the physical models of this study

1	B (میلی‌متر)	P (میلی‌متر)	L ₁ (میلی‌متر)	L ₂ (میلی‌متر)	شیب (درجه)	مشخصه مدل‌ها
1	250	200	600	680	16.4	S16.4 p.2
2	250	250	600	664	20.6	S20.6 p.25
3	250	200	600	480	22.6	S22.6 p.2
4	250	300	600	640	25	S25 p.3
5	250	250	600	456	28.7	S28.7 p.25
6	250	300	600	420	35	S35 p.3

آنالیز ابعادی

به‌منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای مؤثر در این آزمایش‌ها در رابطه ۲ ارائه شده‌اند:

$$f(\rho, \mu, g, q, P, d_{50}, L, \sigma, \Delta E, R, y_c, y_0, y_1, S) = 0 \quad (2)$$

که در آن ρ جرم حجمی آب، μ ویسکوزیته دینامیکی آب، g شتاب ثقل، q دبی در واحد عرض، P ارتفاع تنداب، d_{50} قطر متوسط ذرات که از آن‌ها به‌عنوان زبری استفاده می‌شود، L طول سرریز، σ کشش سطحی، ΔE استهلاک انرژی، R شعاع هیدرولیکی، y_c عمق بحرانی $y_0 = y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}$ و y_1 نیز به ترتیب عمق متوسط آب در بالادست و پایین‌دست تنداب و S شیب تنداب می‌باشند. از آنجایی که در این تحقیق از ذرات با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شد، بنابراین تنها قطر متوسط آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. با آنالیز ابعادی و با استفاده از روش π باکینگهام رابطه کلی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta E}{L} = f\left(\frac{y_c}{d_{50}}, \frac{y_c}{P}, W_e, Re, Fr, S\right) \quad (3)$$

در این رابطه $\frac{\Delta E}{L}$ استهلاک انرژی نسبی در واحد طول سرریز، $Fr = \frac{V}{\sqrt{gy_0}}$ عدد فرود و $Re = \frac{\rho VR}{\mu}$ عدد رینولدز بالادست است. با توجه به اینکه عدد رینولدز در محدوده انجام این آزمایش‌ها بیشتر از ۲۰۰۰ است؛ بنابراین جریان در محدوده آشفته است؛ و می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر کرد (Hager and Bremen, 1989) و با توجه به اینکه حداقل ارتفاع آب روی سرریز ۵ سانتی‌متر است؛ می‌توان از اثرات عدد وبر $(W_e = \frac{\rho LV^2}{\sigma})$ نیز صرف‌نظر کرد (White, 2016). در نتیجه رابطه نهایی به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{L} = f\left(\frac{y_c}{d_{50}}, \frac{y_c}{P}, S\right) \quad (4)$$

میزان افت انرژی در واحد طول سرریز از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Beyrami, 2011).

$$\frac{\Delta E}{L} = \frac{E_0 - E_1}{L} \quad (5)$$

در این رابطه $\frac{\Delta E}{L}$ افت انرژی در واحد طول سرریز، E_0 انرژی کل جریان در بالادست و E_1 انرژی کل پای تنداب است.

$$E_0 = P + y_0 + \frac{V_0^2}{2g} = P + y_0 + \frac{q^2}{2g(p+y_0)^2} \quad (6)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (7)$$

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای اندازه‌گیری عمق جریان از حسگر آلتراسونیک استفاده گردید. همچنین برای تعیین سرعت از رابطه پیوستگی استفاده شد. $(V_0 = \frac{Q}{B(p+y_0)})$ و $(V_1 = \frac{Q}{By_1})$ که V_0 و V_1 به ترتیب سرعت آب در بالادست و پایین‌دست تنداب بوده

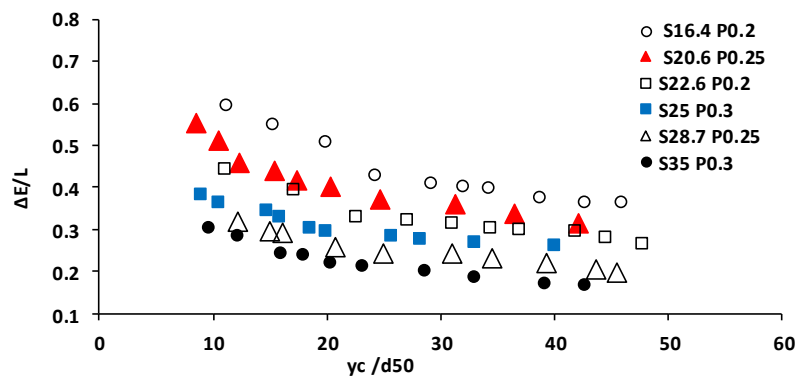
و B هم عرض فلوم و برابر ۲۵ سانتی متر می باشد. y_0 و y_1 نیز به ترتیب عمق متوسط آب در بالادست و پایین دست تنداب می باشند. جدول ۲ دامنه تغییرات پارامترهای این تحقیق را نشان می دهد.

جدول ۲. دامنه تغییرات پارامترهای این تحقیق
Table 2. Range of parameters variations in this study

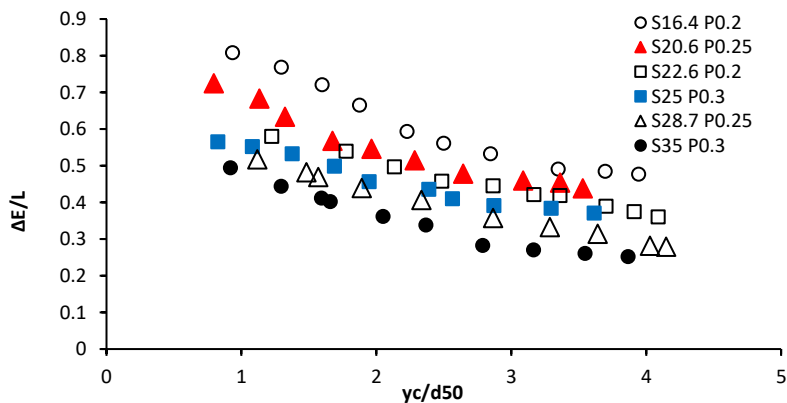
Re	Fr	عمق آب روی تاج (سانتی متر)	y_c/p	y_c/d_{50}	S (درجه)	d_{50} (سانتی متر)	Q (لیتر بر ثانیه)	محدوده تغییرات
3406.3	4.5	5	0.1	2.3	16.4	3.38	4	حداقل
42876.1	9	19	0.82	48.6	35	38.1	45	حداکثر

نتایج و بحث

در شکل ۴ روند استهلاک انرژی در مدل های با بستر زبر برای شیب های (۱۶/۴، ۲۰/۶، ۲۲/۶، ۲۵، ۲۸/۷ و ۳۵ درجه) نمایش داده شده است. در این نمودار محور عمودی استهلاک انرژی در واحد طول سرریز $\frac{\Delta E}{L}$ و محور افقی نسبت بدون بعد $\frac{y_c}{d_{50}}$ است. با توجه به شکل ۴ مشاهده می گردد؛ که در هرکدام از زبری ها با زیاد شدن شیب، استهلاک انرژی کمتر می شود. چون در شیب های ملایم جریان مدت زمان بیشتری با سطح در تماس است؛ و انرژی جریان بیشتر مستهلک می شود. همچنین با افزایش دبی در شیب های مختلف، مقادیر نسبی افت انرژی کم شده و به هم نزدیک می شوند (شکل ۴).



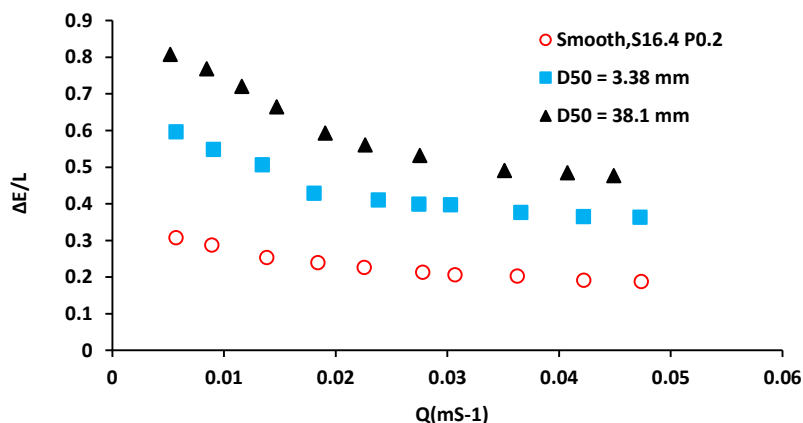
(الف) (a)



(ب) (b)

شکل ۴. بررسی تأثیر y_c/d_{50} بر استهلاک انرژی در زبری های (الف) ۳/۳۸ میلی متر (ب) ۳۸/۱ میلی متر، در شیب های مختلف
Figure 4. Effect of (y_c/d_{50}) on energy dissipation in different roughness (a) 3.38mm, (b) 38.1mm, in different slopes

در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ که با افزایش دبی در زبری‌های با قطر متوسط مختلف، استهلاک انرژی کم می‌شود. شکل ۵ فقط برای شیب ۱۶/۴ درجه ارائه شده است. لازم به ذکر است؛ که جهت رعایت اختصار، سایر شکل‌ها برای بقیه‌ی شیب‌ها ارائه نشده است.



شکل ۵. تغییرات استهلاک انرژی در واحد طول سرریز نسبت به دبی در شیب ۱۶/۴ درجه

Figure 5. Variations of energy dissipation per unit length of spillway against discharge, in slope of 16.4 degree

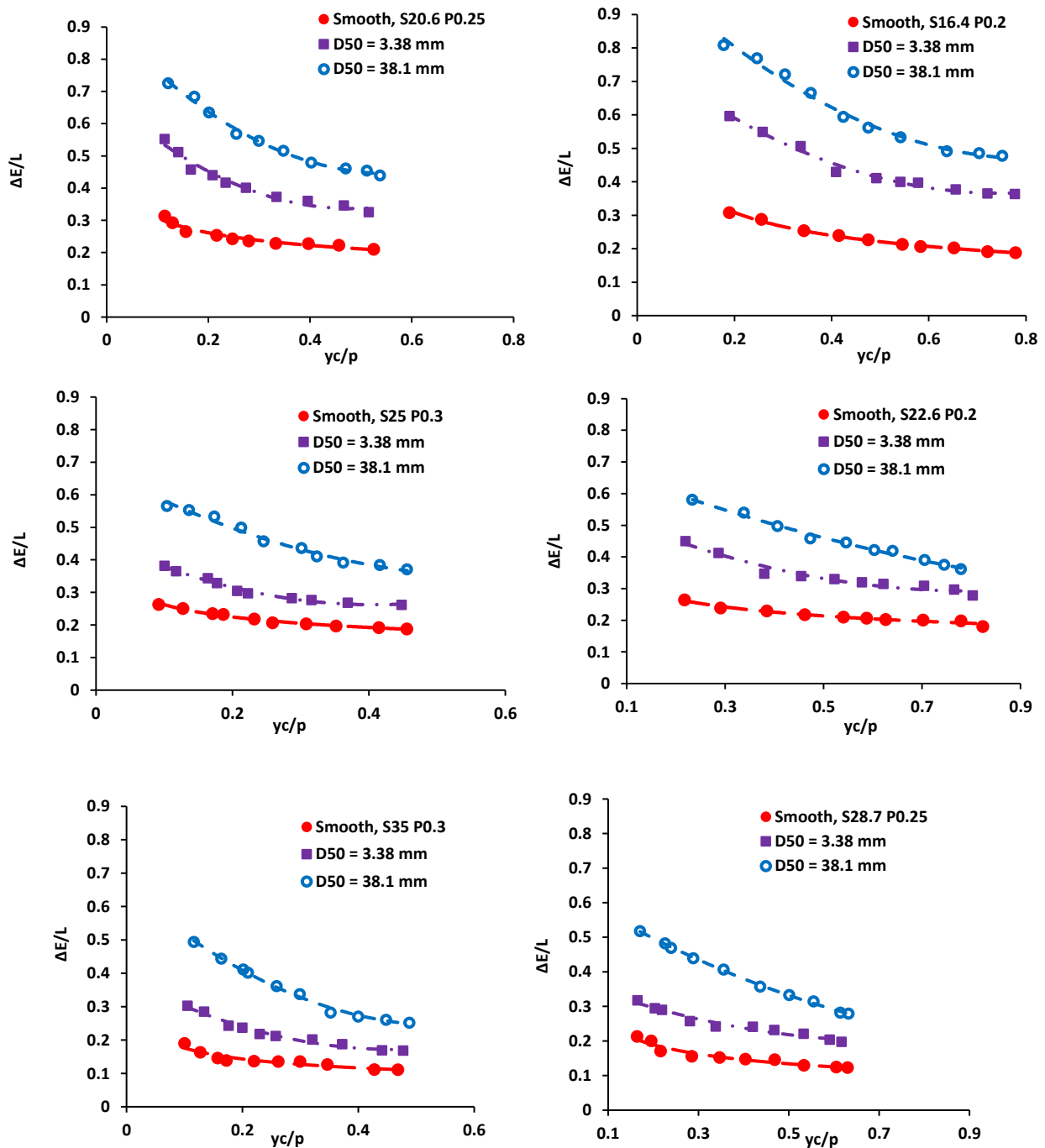
همان‌طور که قبلاً گفته شد؛ هرچه شیب تنداب ملایم‌تر باشد، عمق آب روی آن بیشتر می‌شود که این نتیجه در آزمایش‌های تحقیق حاضر به وضوح دیده می‌شود (شکل ۶-الف). با افزایش شیب تنداب عمق جریان روی آن کم‌تر می‌شود؛ همچنین در شیب‌های تند هوا وارد جریان شده و جریان دو فازی یعنی مخلوط آب و هوا تشکیل می‌شود؛ که اصطلاحاً به آن آب سفید می‌گویند. نمونه‌ای از این جریان دو فازی در شکل (۶-ب) دیده می‌شود.



شکل ۶. پروفیل سطح آب برای تنداب با سطح کاملاً زبر (الف) شیب ۲۸/۷ درجه (ب) شیب ۲۰/۶ درجه

Figure 6. Water surface profile for chute with thoroughly rough surface (a) slope = 28.7 degree (b) slope = 20.6 degree

برای مقایسه تاثیر زبری بر استهلاک انرژی مدل‌های بستر صاف و زبر با هم مقایسه شدند. با توجه به شکل ۷ در همه‌ی شیب‌ها استهلاک انرژی در مدل تنداب با بستر زبر، بیشتر از مدل تنداب با بستر صاف می‌باشد. با توجه به اینکه در هر شیب p مقدار ثابتی می‌باشد، افزایش γ_c در واقع همان افزایش دبی است. بنابراین در یک شیب خاص با افزایش γ_c/p و به دنبال آن افزایش عمق (با توجه به ثابت بودن عرض فلوم) از اثرات زیر لایه ورقه‌ای بر پروفیل سرعت کاسته شده و متعاقباً تنش برشی وارد به جریان، کم می‌شود. با کاهش تنش برشی وارد به جریان، اثر عامل مقاوم جریان برای کاهش انرژی کم می‌شود؛ در نتیجه از اثر زبری‌ها بر مقاومت جریان کاسته شده و استهلاک انرژی کمتری اتفاق می‌افتد. با افزایش اندازه زبری مقدار استهلاک انرژی نیز بیشتر می‌شود. استهلاک در زبری با قطر متوسط ۳۸/۱ میلی‌متر بیشتر از زبری با قطر متوسط ۳/۳۸ میلی‌متر است. علاوه بر این با افزایش اندازه زبری در شیب‌های یکسان مقدار نسبی استهلاک انرژی افزایش می‌یابد؛ زیرا با افزایش اندازه زبری بستر، مقاومت جریان و به دنبال آن عمق جریان افزایش می‌یابد؛ با افزایش عمق جریان سرعت جریان و در نتیجه انرژی جریان کاهش می‌یابد.



شکل ۷. بررسی تأثیر y_c/P بر استهلاک انرژی در شیب‌های (۳۸/۱ و ۱۲/۷، ۷، ۳/۳۸) درجه، در زبری‌های مختلف
 Figure 7. Effect of (y_c/P) on energy dissipation in slopes (3.38, 7, 12.7 and 38.1) degree, in different roughness

در ادامه برای بررسی بهتر و دقیق‌تر اثر پارامترهای بی‌بعد بر استهلاک انرژی در واحد طول سرریز و ارائه روابط ریاضی، از رگرسیون‌گیری چند متغیره استفاده شد. مطابق جدول ۳، $\Delta E/L$ استهلاک انرژی در واحد طول سرریز، نسبت عمق بحرانی به قطر متوسط زبری‌ها و y_c/p نسبت عمق بحرانی به ارتفاع تنداب می‌باشد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار آماری (SPSS) رابطه‌هایی به شرح جدول ۳ استخراج شد. لازم به ذکر است؛ که روابط در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بودند.

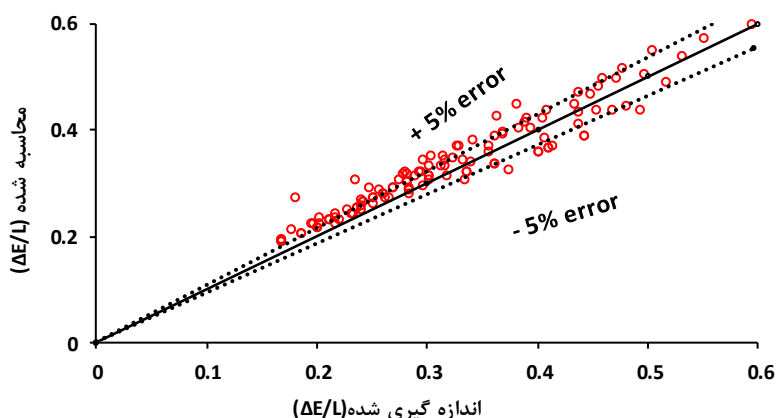
جدول ۳. برازش روابط ریاضی برای تعیین استهلاک انرژی از روی تنداب

Table 3. Mathematical relationships to determine the energy dissipation on the chute

R ²	رابطه رگرسیون	وضعیت سطح بستر تنداب	شماره رابطه رگرسیون
0.87	$\frac{\Delta E}{L} = 0.154 \left(\frac{y_c}{P}\right) - 0.348(\tan S) + 0.42$	Smooth	1
0.78	$\frac{\Delta E}{L} = -0.005 \left(\frac{y_c}{d_{50}}\right) - 0.196 \left(\frac{y_c}{P}\right) - 0.694 (\tan S) + 0.86$	Rough	
0.88	$\frac{\Delta E}{L} = \exp(-1.756 \left(\frac{y_c}{P}\right) - 0.523(\tan S) - 0.785)$	Smooth	2
0.86	$\frac{\Delta E}{L} = \exp(-0.014 \left(\frac{y_c}{d_{50}}\right) - 0.56 \left(\frac{y_c}{P}\right) - 1.89(\tan S) + 0.316)$	Rough	
0.86	$\frac{\Delta E}{L} = 0.078 \left(\frac{y_c}{P}\right)^{-0.268} (\tan S)^{-0.761}$	Smooth	3
0.95	$\frac{\Delta E}{L} = 0.217 \left(\frac{y_c}{d_{50}}\right)^{-0.153} \left(\frac{y_c}{P}\right)^{-0.18} (\tan S)^{-0.821}$	Rough	

مطابق جدول ۳، رابطه ۱، حالت رگرسیون گیری چند متغیره خطی است. رابطه ۲، رگرسیون گیری چند متغیره غیرخطی (exp) و رابطه ۳، رگرسیون گیری چند متغیره غیرخطی توان دار است. با توجه به اینکه رابطه رگرسیون شماره ۳، R² بیشتری می‌دهد؛ پس به‌عنوان رابطه نهایی انتخاب می‌شود. در شکل ۸ داده‌های آزمایشگاهی (محور افقی) و مقدار محاسبه شده از رابطه رگرسیون شماره ۳ (محور قائم) با هم مقایسه شدند. وضعیت نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد؛ که مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی دارای همبستگی نسبتاً خوبی می‌باشند. در شکل ۸ خطوط باند اطمینان رگرسیون نیز با نقطه چین رسم شده‌اند.

شکل ۹ مقایسه بین نتایج این تحقیق و نتایج تحقیقات پالیارا و همکاران (Pagliara et al., 2009) بر روی شیب‌های سنگی و رحمانشاهی زهابی و شفافی بجستان (Rahmanshahi Zahabi and Shafai Bejestan, 2012) بر روی تنداب با بستر زبر را نشان می‌دهد. به دلیل این‌که داده‌های افت انرژی نسبی (ΔE_r) تحقیقات سایر دانشمندان در دسترس بود؛ لذا در شکل ۹ از داده‌های افت انرژی نسبی مربوط به تحقیق حاضر استفاده شد. مدلی که در این تحقیق برای مقایسه انتخاب شد، مدل با شیب ۰/۴۲ (زاویه ۲۲/۶ درجه) و زبری پایه ۳۸/۱ میلی‌متر بود؛ به دلیل اینکه پارامترهای این مدل به پارامترهای مدل دیگر محققان، برای مقایسه نزدیک‌تر بود. در این مدل استهلاک انرژی در واحد طول سرریز و استهلاک انرژی نسبی، نسبت به بالادست به ترتیب ۸۰ و ۹۵ درصد افزایش یافت.

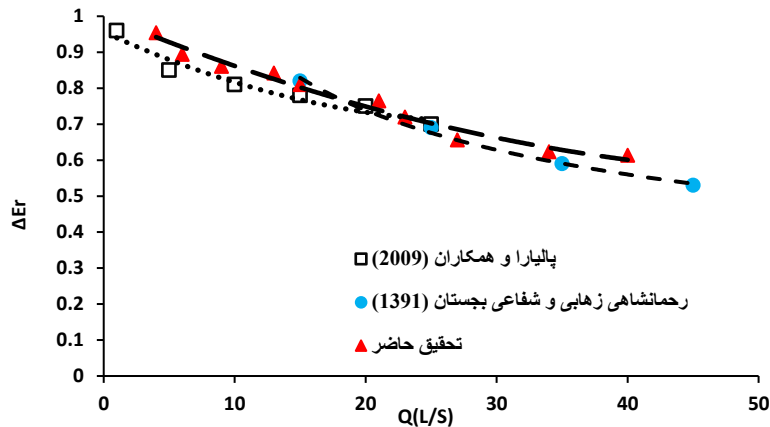


شکل ۸. مقایسه استهلاک انرژی در واحد طول سرریز، بین مقادیر محاسبه شده از رابطه رگرسیون شماره ۳ و اندازه‌گیری شده

Figure 8. Comparison of energy dissipation per unit length of spillway between calculated from the regression relationship [3] and measured

در کل با توجه به اینکه آزمایش‌های پالیارا و همکاران (Pagliara et al., 2009) در دبی‌های کم بوده، اثر زبری‌ها بر استهلاک انرژی بیشتر است. رحمانشاهی زهابی و شفافی بجستان (Rahmanshahi Zahabi and Shafai Bejestan, 2012) نیز چون از مدل با زبری

کوچکتر و شیب بیشتر استفاده کرده‌اند، انرژی کمتر مستهلک شده است. جدول ۴ محدوده‌ی متغیرهای این تحقیق و تحقیقات سایر دانشمندان در این زمینه را نشان می‌دهد.

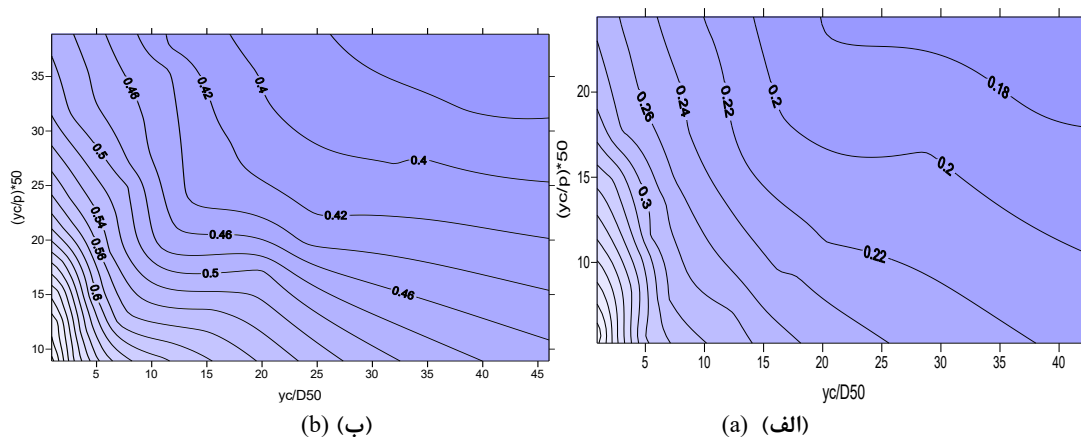


شکل ۹. مقایسه بین استهلاک انرژی نسبی این تحقیق با تحقیقات سایر دانشمندان در این زمینه
Figure 9. Comparison between relative energy dissipation in this study with other researchers in this field

جدول ۴. محدوده‌ی متغیرهای این تحقیق و تحقیقات سایر دانشمندان در این زمینه
Table 4. Range of parameters in this study and other researches in this field

نوع تحقیق	نوع مدل	دبی (لیتر بر ثانیه) اندازه زبری یا پلکان (میلی‌متر)	شیب (درجه)	عرض فلوم (سانتی‌متر)
تحقیق حاضر	تنداب با بستر زبر	4-45	0.42	25
تحقیق رحمانشاهی زهابی و شفاعی بجستان (2012)	تنداب با بستر زبر	15-45	0.41	30
تحقیق پالیارا و همکاران (2009)	شیب سنگی	1-25	0.08	25

با استفاده از نرم‌افزار سورفر^۱ شکل سه بعدی استهلاک انرژی، برای دو شیب ۱۶/۴ درجه و ۳۵ درجه کشیده شد (شکل ۱۰). جهت اختصار از آوردن شکل بقیه‌ی شیب‌ها صرف‌نظر شد. در شکل ۱۰ خطوط داخلی استهلاک انرژی در واحد طول سرریز، محور افقی y_c/d_{50} ، محور قائم ۵۰ برابر y_c/p است. مطابق شکل ۱۰ با افزایش شیب، تراکم خطوط استهلاک انرژی در واحد طول سرریز کم می‌شود؛ و فاصله خطوط استهلاک انرژی از هم بیشتر شده و افت هم کم‌تر می‌شود. در شیب ۱۶/۴ درجه تراکم خطوط داخلی بسیار زیاد است و نشان می‌دهد انرژی در این شیب بیشتر مستهلک می‌شود همچنین در شیب ۳۵ درجه تراکم خطوط در شکل کم‌تر شده است یعنی انرژی کم‌تر مستهلک می‌شود. با افزایش شیب انرژی پتانسیل آب بیشتر می‌شود نسبت انرژی از دست رفته به انرژی کل کم‌تر شده و بنابراین گفته می‌شود انرژی کم‌تر مستهلک می‌شود.



شکل ۱۰. منحنی‌های هم استهلاک انرژی در واحد طول سرریز، با استفاده از نرم‌افزار سورفر برای شیب‌های (الف) ۱۶/۴ درجه (ب) ۳۵ درجه
Figure 10. Contour lines of energy dissipation per unit length of spillway, for slopes (a) 16.4 degree, (b) 35 degree

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر اندازه شیب تنداب بر میزان استهلاک انرژی جنبشی آب، بررسی گردید. آزمایش‌ها بر روی مدل‌های فیزیکی در ۶ شیب مختلف (۱۶/۴، ۲۰/۶، ۲۲/۶، ۲۵، ۲۸/۷ و ۳۵ درجه) با قرار دادن ۲ نوع زبری با اندازه‌های متفاوت (۳۸/۱ و ۳/۳۸ میلی‌متر) و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت بر روی بستر آن‌ها انجام شدند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد؛ در همه‌ی شیب‌ها استهلاک انرژی در مدل تنداب با بستر زبر، بیشتر از مدل تنداب با بستر صاف می‌باشد. و هر چه اندازه‌ی زبری بزرگ‌تر باشد انرژی بیشتر مستهلک می‌شود؛ زیرا با افزایش اندازه زبری بستر، مقاومت جریان و به دنبال آن عمق جریان افزایش می‌یابد؛ با افزایش عمق جریان سرعت جریان و در نتیجه انرژی جریان کاهش می‌یابد. با افزایش شیب استهلاک انرژی کم‌تر می‌شود. بیشترین استهلاک انرژی در شیب ۱۶/۴ درجه و کمترین استهلاک انرژی هم در شیب ۳۵ درجه می‌باشد. همچنین در همه‌ی شیب‌ها با افزایش مقدار دبی استهلاک انرژی کم‌تر می‌شود. چون با افزایش میزان دبی تأثیر زیر لایه ورقه‌ای بر پروفیل سرعت کم شده و در نتیجه میزان استهلاک انرژی کم‌تر می‌شود. در این تحقیق با استفاده از آنالیز رگرسیون چند متغیره غیرخطی تأثیر پارامترهای بی‌بعد موجود، بر استهلاک انرژی نیز با استفاده از نرم‌افزار آماری (SPSS) بررسی شد و رابطه‌هایی با سطح اطمینان ۹۵ درصد ارائه شد. نتایج نشان داد؛ که بین پارامترهای بی‌بعد موجود، شیب تنداب بیشترین تأثیر را بر استهلاک انرژی داشته و در تخمین استهلاک انرژی جریان، مهم‌تر از بقیه‌ی پارامترها می‌باشد. در نهایت نتایج با آزمایشات دیگر محققان مقایسه شد؛ و استهلاک انرژی در این تحقیق با نقاط آزمایشی رحمانشاهی و شفافی بجهستان Rahmanshahi (Zahabi and Shafai Bejestan, 2012) تطابق بیشتری نشان داد. شکل سه بعدی استهلاک انرژی، برای دو شیب ۱۶/۴ درجه و ۳۵ درجه کشیده شد و نشان داد که با افزایش شیب، تراکم خطوط استهلاک انرژی در واحد طول سرریز کم می‌شود؛ و فاصله خطوط استهلاک انرژی از هم بیشتر شده و افت هم کم‌تر می‌شود.

منابع

- Afaridegan, E., Amanian, N., Shانهsazzadeh, A., & Parsaie, A. (2024). Characteristics of flow passing over Hydrofoil Crested Stepped Spillway. *Alexandria Engineering Journal*, 108, 897-910 (In Persian).
- Beyrami, M. K. (2011). Water transmission structures (p. 462). Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, (In Persian).
- Chafi, C., Hazzab, A., & Seddini, A. (2010). Study of flow and energy dissipation in stepped spillways. *Jordan Journal of civil engineering*, 4(1), 1-11.
- Chamani, M.R., & Rajaratnam, N. (1999). Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 361-368.
- Chanson, H. (2002). *Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*, Taylor & Francis.
- Chen, S. H. (2015). *Hydraulic Structures*, Springer Berlin Heidelberg.
- Chinnarasri, C., & Wongwiswes, S. (2006). Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. *Journal of hydraulic engineering*, 116(4), 587-691.

- Dah-Mardeh, A., Azizyan, G., Bejestan, M. S., Parsaie, A., & Rajaei, S. H. (2023). Experimental study of variation sediments and effective hydraulic parameters on scour downstream of stepped spillway. *Water Resources Management*, 37(13), 4969-4984 (In Persian).
- Felder, S., & Chanson, H. (2011). Energy dissipation down a stepped spillway with nonuniform step heights. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11), 1543-1548.
- Hager, W.H., & Bremen, R. (1989). Classical Hydraulic Jump; Sequent Depths. *Journal of Hydraulic Research*, 27(5), 565-585.
- Nejandali, A., Esmaeili, K., & Farhoudi, J. (2012). Effect of triangular bed roughness spacing on hydraulic jump characteristics. *Journal of soil and water*, 26(2), 282-289 (In Persian).
- Pagliara, S., & Chiavaccini, P. (2006a). Energy dissipation on block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(1), 41-48.
- Pagliara, S., Carnacina, L., & Palermo, M. (2009). Energy dissipation in presence of block ramps with Enlarged stilling basins. Proceeding of the 33rd IAHR Congress: *Water engineering for a Sustainable environment*, 5042-5050. Vancouver, Canada.
- Rahmanshahi Zahabi, M., & Shafai Bejestan, M. (2012). Experimental Investigation of the Effect of Chute Bed Roughness Height on Energy Dissipation. *Water and soil science*, 22(2), 95-106 (In Persian).
- Ravar, Z., Farhoudi, J., & Nejandali, A. (2011). Effect of vertical trapezoidal rough bed on hydraulic jump characteristics and energy loss. *Journal of soil and water*, 26(1), 85-94 (In Persian).
- Salmasi F. (2009). Effect of Number of Steps on Energy Dissipation of Stepped Spillways Based on the New Design Approach. *Water and soil science*, 19(1), 27-38 (In Persian).
- Salmasi, F., & Arvanaghi, H. (2013) Effect of Slope on Energy Dissipation in Flow over Stepped Spillway. *Water and Environment Engineering*, 1(1), 47-56 (In Persian).
- Salmasi, F., & Özger, M. (2014). Neuro-fuzzy approach for estimating energy dissipation in skimming flow over stepped spillways. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 6099-6108 (In Persian).
- Sorensen, R. M. (1985). Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of hydraulic Engineering*, 111(12), 1461-1472.
- White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics* (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education.