

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع زبری بستر تنداب بر استهلاك انرژی

فرشته بیرانوند*^۱، فرزین سلماسی^۲، داود فرسادی زاده^۳

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۲۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: f.beiranvand92@gmail.com

چکیده

در این تحقیق تأثیر اندازه زبری بستر تنداب بر میزان استهلاك انرژی بررسی گردید. ابتدا پس از شناسایی پارامترهای مؤثر، رابطه عمومی بدون بعد توسعه داده شد. آزمایش‌ها بر روی مدل‌های فیزیکی در شیب‌های ۲۵ و ۳۵ درجه با قرار دادن ۴ نوع زبری با اندازه‌های متفاوت (۳/۳۸، ۷، ۱۲/۷ و ۳۸/۱ میلی‌متر) و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت بر روی بستر آن‌ها انجام شدند. میزان استهلاك انرژی سازه در این نوع تنداب با انجام ۸۰ آزمایش مختلف با ۱۰ دبی بین ۴ تا ۴۰ لیتر بر ثانیه و عدد فرود ۴/۵ تا ۹ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین رابطه کلی جهت پیش‌بینی میزان استهلاك انرژی در این نوع تنداب ارائه و با نتایج کارهای قبلی مقایسه گردید. استهلاك انرژی در واحد طول تنداب زیر شده حدود ۷ تا ۳۸ درصد نسبت به تنداب صاف (بدون زبری) افزایش نشان داد.

واژه‌های کلیدی: استهلاك انرژی، تنداب، زبری بستر، شیب

Experimental Study of Chute Bed Roughness Height Effect on Energy Dissipation

F Beiranvand^{*1}, F Salmasi², D Farsadizadeh³

Received:

Accepted:

¹M.Sc. Student, Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

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

³Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: f. beiranvand92@ gmail.com

Abstract

In this study the effect of chute bed roughness height on energy dissipation has been investigated. First effective parameters were identified and then a general dimensionless relationship was developed. A series of tests were conducted by a physical model using the bed slopes of 25 and 35 degrees and four different uniform roughness heights (3.38, 7, 12.7 and 38.1 mm) having uniform particle sizes on the bed. Total of 80 tests were conducted with flow discharges range between 4 and 40 L s⁻¹ and Froude number between 4.5 and 9. A relationship was developed for prediction of energy slope on this type roughened bed chutes and the results obtained were compared with the results of previous works. Energy dissipation per unit length of the roughened chute was 7 to 38% greater than that of the smooth chute (without roughness).

Keyword: Bed roughness, Chute, Energy dissipation, Slope

مقدمه

تنداب از سازه مستهلک کننده انرژی استفاده می‌شود. از جمله روش‌های کاهش ابعاد و یا حذف سازه مستهلک کننده انرژی پایین دست به کار بردن روش‌هایی برای کاهش انرژی جریان بر روی تنداب‌ها است. یکی از این روش‌ها که تاکنون استفاده شده، ایجاد پله روی سرریز است؛ که با گسترش سدهای بتنی غلطکی و تشکیل پله در طول سرریز این‌گونه سدها در حین اجرا، مورد استفاده قرار گرفته است. در این زمینه نیز مطالعات گسترده‌ای انجام شده است. از جمله می‌توان به مطالعات، هورنر و اسری (۱۹۶۹)، راجاراتنام (۱۹۹۰)، پیراس و همکاران (۱۹۹۲)، چانسون (۱۹۹۴a)، پگرام و همکاران (۱۹۹۹)، پالیارا و پروگینالی (۲۰۰۰) اشاره نمود.

کریستودولو (۱۹۹۳) نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی خود و همچنین سورنسن (۱۹۸۵) در رابطه با سرریزهای پلکانی را به این صورت ارائه نمود؛ که تأثیر تعداد پلکان‌ها بر روی استهلاک انرژی مشهود است. مقدار افت انرژی با افزایش تعداد پلکان افزایش می‌یابد؛ و

نخیره آب، کنترل سیلاب و تهیه برق از انرژی آب معمولاً مستلزم ساخت سدها و سازه‌های وابسته به آن است. یکی از سازه‌های مهم جهت تخلیه سیلاب در سدها سرریزها می‌باشند. سرریز انواع مختلفی دارد. یکی از انواع سرریز تنداب است. تنداب‌ها از جمله متداول‌ترین سازه‌های انتقال آب در سدها، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، آبراه‌های آبرفتی و سیستم‌های جمع‌آوری، تصفیه و دفع فاضلاب بوده و برای انتقال آب از سطحی به سطح پایین‌تر در فاصله‌ی نسبتاً زیاد بکار می‌روند. سرریز تنداب، بر روی انواع مختلف فونداسیون از سنگ سخت تا زمین نرم با موفقیت اجرا و بهره‌برداری شده است. این سرریزها به سادگی قابل طرح و اجرا هستند. تقریباً در کلیه‌ی شرایط فونداسیون می‌توان از آن‌ها استفاده کرد؛ و حجم وسیع خاک برداری حاصله را می‌توان در بدنه سد خاکی مورد استفاده قرار داد؛ و از این طریق از هزینه‌ها کاست. در پایانه باید انرژی جنبشی مخرب آب به نحو شایسته گرفته شود. در پایین دست

استخر را بدهد، آبشستگی بستر نیز کاهش می‌یابد. در واقع ردیف‌های ضربدری بلوک‌های مانع‌دار روی تنداب، فارغ از ارتفاع تنداب از شتاب‌گیری بیش‌ازحد جریان جلوگیری کرده و یک سرعت نهایی قابل قبول را فراهم می‌آورد. مشکلی که در استفاده از بلوک وجود دارد، هزینه بسیار زیاد ساخت و ریسک بالای کاویتاسیون است. از این‌رو این روش با محدودیت زیادی همراه است (رحمانشاهی زهابی و شفافی بجستان ۱۳۹۱).

اخیراً مطالعاتی راجع به پایداری ذرات و استهلاک انرژی در بستر زبر انجام گرفته است. از جمله افرادی که در سال‌های اخیر موضوع پایداری ذرات و استهلاک انرژی را مطالعه نموده‌اند، می‌توان به مطالعات پالیارا و چیاواسینی (۲۰۰۶a) و پالیارا و همکاران (۲۰۰۹) اشاره کرد. در این مطالعات آن‌ها با ساخت مدل‌هایی در شیب‌های مختلف (۴:۱ تا ۱۲:۱) و استفاده از مصالح سنگی با اندازه‌های متفاوت به‌صورت خشکه‌چین به بررسی افت انرژی بر روی شیب‌های سنگی با شیب نسبتاً کم پرداختند. با توجه به اینکه اندازه زبری عامل تأثیرگذار بر مقاومت جریان است آزمایش‌های آن‌ها در سه بازه (ریزدانه، دانه‌بندی متوسط و درشت‌دانه) انجام گرفت. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که با افزایش اندازه زبری مقدار افت انرژی افزایش می‌یابد.

پالیارا و چیاواسینی (۲۰۰۶b) با استفاده از کره‌های فلزی که با پوشش آلومینیمی احاطه شده بودند، به بررسی اثر تخته سنگ‌های برآمده بر مقاومت جریان در بستر شیب‌های سنگی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که این کره‌ها سبب پایداری بیشتر شیب‌های سنگی می‌شوند، زیرا با قرار گرفتن سنگ‌ها روی مواد بستر تلاطم جریان بیشتر می‌شود؛ و به آشفتگی جریان کمک کرده و از تنش برشی وارد شده بر مواد بستر می‌کاهد. زبری‌های نواری که به‌صورت عمود بر مسیر جریان قرار می‌گیرند، می‌توانند هنگامی که سرعت جریان زیاد

تأثیر تعداد پلکان در دبی‌های بالا بیشتر می‌گردد. همچنین با تبدیل جریان ریزشی به جریان غیر ریزشی افت انرژی کاهش می‌یابد. در یک سرریز تنداب پله‌ها استهلاک

انرژی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند؛ و باعث کاهش عمق و ابعاد مورد نیاز برای حوضچه آرامش می‌شوند.

چین نراسی و وانگوازیس (۲۰۰۶) 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.

سورنسون (۱۹۸۵) و چانسون (۱۹۹۴b) نشان دادند؛ که تعداد پله‌های سرریز در جریان غیر ریزشی اثری در مقدار استهلاک انرژی ندارند. فقط کریستودولو (۱۹۹۳) نشان داد؛ که تعداد پله‌های سرریز بر استهلاک انرژی اثر دارند؛ که به‌نظر می‌رسد این نتایج در هیچ تحقیق دیگری تأیید نشده باشند. اسکریونر و همکاران (۱۹۸۶) نیز نشان دادند؛ که مقدار استهلاک انرژی در حدود ۶۳ درصد تغییر می‌کند. این مقدار از نتایج آزمایشگاهی کریستودولو که مساوی ۵۰ درصد ذکر شده بود، بیشتر است.

روش دیگری که می‌تواند استفاده شود کاربرد مانع و یا بلوک در بستر سرریز است. در خصوص کاربرد مانع و یا بلوک، آزمایش‌ها و نتایج سازمان احیای اراضی آمریکا نشان داده است؛ که به کار بردن بلوک‌هایی با ابعاد زیاد که باعث جدا شدگی جت عبوری جریان از روی تنداب و در نتیجه تلاطم گردد، می‌تواند به‌طور مؤثری انرژی جنبشی جریان را مستهلک نماید. از خصوصیات اصلی این نوع شیب‌شکن آن است؛ که به پایاب نیاز نداشته و در صورتی که پایاب تشکیل یک

است جایگزین خوبی برای بلوک‌های داخل و انتهایی در حوضچه آرامش باشند (تجلی ۱۳۹۲).

رحمانشاهی زهابی و شفاعی بجزستان (۱۳۹۱) نیز آزمایش‌هایی بر روی مدل‌های فیزیکی تنداب با ۳ شیب مختلف (۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ درجه) و با قرار دادن ۳ نوع زبری با اندازه‌های متفاوت (۱/۱، ۱/۴۳، ۲/۱ سانتی‌متر) و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت انجام دادند. نتایج

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی

به منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که در استهلاك انرژی مؤثر می‌باشند، اقدام نموده و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای مؤثر در این آزمایش‌ها در رابطه ۱ ارائه شده‌اند:

$$f(p, \mu, g, q, p, d_{50}, \Delta E, L, R, y_c, S, \sigma, y_0, y_1) = 0 \quad [1]$$

که در آن p جرم حجمی آب، μ ویسکوزیته دینامیکی آب، g شتاب ثقل، q دبی در واحد عرض، p ارتفاع تنداب، d_{50} قطر متوسط ذرات است؛ که از آن‌ها به عنوان زبری استفاده می‌شود، ΔE استهلاك انرژی، L طول سرریز، R شعاع هیدرولیکی، $y_c = (q^2/g)^{1/3}$ عمق بحرانی، y_0 و y_1 نیز به ترتیب عمق شیب تنداب، σ کشش سطحی، و پایین دست می‌باشند.

از آنجایی که در این تحقیق از ذرات با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شد، بنابراین تنها قطر متوسط آن‌ها در این رابطه $\frac{\Delta E}{L}$ افت انرژی در واحد طول تنداب، E_0 انرژی کل جریان در بالادست و E_1 انرژی کل پای تنداب است.

آزمایش‌های انجام شده نشان داد؛ که با افزایش اندازه زبری، استهلاك انرژی نسبی بیشتر می‌شود.

با توجه به مطالعات فوق هدف این تحقیق بررسی تأثیر اندازه زبری‌های طبیعی بستر تنداب بر میزان استهلاك انرژی است؛ بدین منظور تعداد متنوعی زبری شامل ۴ نوع زبری مختلف مدنظر قرار گرفت؛ و با دو شیب متفاوت برای مدل‌های فیزیکی، سرریز تنداب مورد آزمایش قرار گرفت.

مورد توجه قرار گرفته است. با تحلیل ابعادی و با استفاده از روش Π باکینگهام رابطه کلی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\Delta E}{L} = f\left(\frac{y_c}{d_{50}}, \frac{y_c}{p}, W_e, R_e, F_r, S\right) \quad [2]$$

در این رابطه $\frac{\Delta E}{L}$ استهلاك انرژی نسبی در واحد طول تنداب، F_r عدد فرود $\left(F_r = \frac{V}{\sqrt{gy_0}}\right)$ ، $R_e = \frac{pVR}{\mu}$ 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 (چاو ۱۹۵۹). با توجه به اینکه کمینه ارتفاع آب روی سرریز ۵ سانتی‌متر است، می‌توان از اثرات عدد وبر $\left(W_e = \frac{pLV^2}{\sigma}\right)$ نیز صرف‌نظر کرد. در نتیجه رابطه نهایی به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{\Delta E}{L} = f\left(\frac{y_c}{d_{50}}, \frac{y_c}{p}, S\right) \quad [3]$$

میزان افت انرژی در واحد طول تنداب از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{\Delta E}{L} = \frac{E_0 - E_1}{L} \quad [4]$$

$$E_0 = P + y_0 + \frac{V_0^2}{2g} = P + y_0 + \frac{q^2}{2g(P+y_0)^2} \quad [5]$$

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad [6]$$

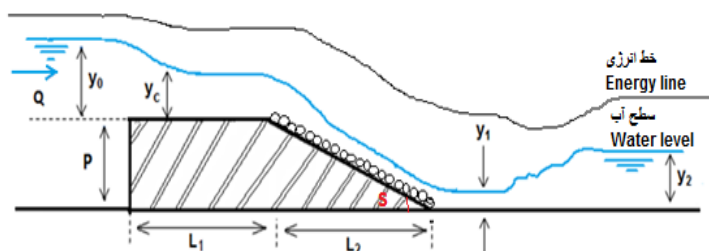
تنداب و قسمت دوم، تنداب‌ها با دو شیب (۲۵ درجه با طول ۷۱ سانتی‌متر) و (۳۵ درجه با طول ۵۲ سانتی‌متر) بودند. جهت اندازه‌گیری عمق آب در بالادست و پایین‌دست تنداب از حسگرهای آلتراسونیک استفاده شد. حسگرها در بالادست و پایین‌دست تنداب در فاصله‌ی مناسب نصب شدند. این‌ها قابلیت اندازه‌گیری ۵ عمق در هر ثانیه را دارند؛ که در این آزمایش در هر دقیقه ۳۰۰ عمق اندازه‌گیری گردید؛ سپس از آن‌ها متوسط گرفته شد؛ و به‌عنوان عمق متوسط آب مورد استفاده قرار گرفت. نیمرخ طولی تنداب و اجزای آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

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؛ و برای استفاده از هرکدام از زبری‌ها رویه مورد نظر بر روی تنداب نصب می‌شد. در این تحقیق با هدف بررسی تأثیر اندازه زبری بستر تنداب بر استهلاك انرژی سازه، پس از شناخت پارامترهای مؤثر، با ساخت مدل‌های فیزیکی با شیب‌های ۲۵ و ۳۵ درجه و قرار دادن ۴ نوع زبری با اندازه‌های متفاوت (۳/۲۸، ۷، ۱۲/۷ و ۳۸/۱ میلی‌متر) و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت (شکل ۲) بر روی بستر آن‌ها و سپس انجام ۸۰ آزمایش مختلف با ۱۰ دبی بین ۴ تا ۴۰ لیتر بر ثانیه، میزان استهلاك انرژی سازه در این نوع تنداب مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱ دامنه تغییرات پارامترهای تحقیق را نشان می‌دهد.

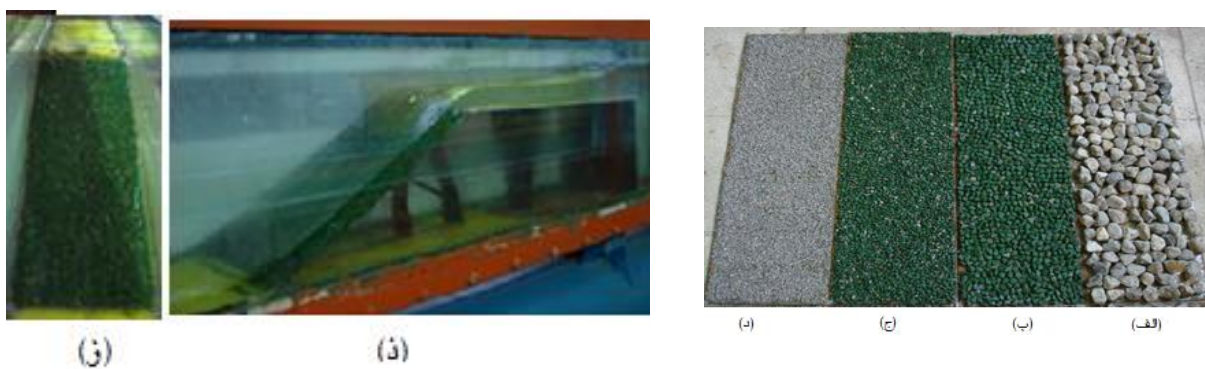
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای اندازه‌گیری عمق جریان از حسگر استفاده گردید. همچنین برای تعیین سرعت از رابطه‌ی پیوستگی استفاده می‌شود. $(V_0 = \frac{Q}{By_0})$ و $(V_1 = \frac{Q}{By_1})$ که V_1 و V_0 به ترتیب سرعت آب در بالادست و پایین‌دست بوده و B هم عرض فلوم و برابر ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. y_1 و y_0 نیز به ترتیب عمق متوسط آب در بالادست و پایین‌دست می‌باشند.

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. شیب فلوم ثابت و برابر با ۰/۰۰۲۲ است. این فلوم در بالادست مجهز به آرام کننده جریان ورودی و در پایین‌دست مجهز به یک دریچه با قابلیت کنترل عمق پایاب است. بیشینه 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. جریان خروجی از فلوم ابتدا وارد یک مخزن جمع‌آوری کننده جریان شده و سپس از طریق یک مخروطی شکل ناقص مشبک وارد مخزن آرام‌کننده شده و در نهایت جریان از روی یک سرریز لبه‌تیز مثلثی واسنجی شده با زاویه رأس ۵۳ درجه عبور می‌کند؛ که اندازه‌گیری دبی جریان با استفاده از این سرریز صورت می‌گیرد. تنداب از جنس فلز با ضخامت ۰/۷ میلی‌متر ساخته شد.

مدل از دو قسمت تشکیل شد: یک قسمت شبیه به سرریز لبه‌پهن به طول ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر برای یکنواخت شدن جریان قبل از رسیدن به تاج



شکل ۱- نیمرخ طولی تنداب و اجزای آن.



شکل ۲- اندازه‌های مختلف زبری‌ها: (الف) ۳۸/۱ میلی‌متر (ب) ۱۲/۷ میلی‌متر (ج) ۷ میلی‌متر (د) ۳/۳۸ میلی‌متر، مدل آزمایشگاهی تنداب با بستر زبر: (ذ) نمای جانبی (ز) نمای روبرو. جدول ۱- دامنه تغییرات پارامترهای این تحقیق.

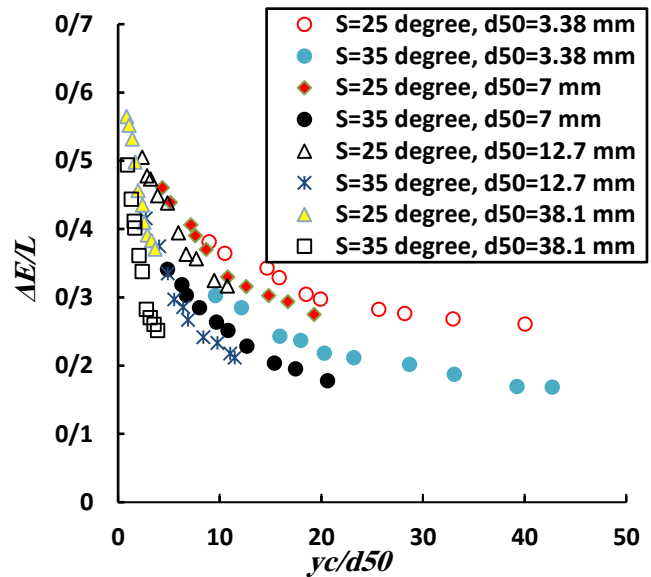
محدوده تغییرات	Q ($L s^{-1}$)	d_{50} (mm)	S (degrees)	y_c/d_{50}	y_c/P	عمق آب روی تاج (cm)	F_r	R_e
کمینه	۴	۳/۳۸	۲۵	۰/۹	۰/۱	۵	۴/۵	۴۱۶۱
بیشینه	۴۰	۳۸/۱	۳۵	۴۲/۷	۰/۴۸	۱۹	۹	۳۱۰۲۴/۵

نتایج و بحث

در شکل ۳ روند استهلاک انرژی در مدل‌های با بستر زبر در ۴ نوع زبری، برای شیب‌های ۲۵ و ۳۵ درجه نمایش داده شده است. شکل ۳ نشان می‌دهد؛ که با کاهش اندازه زبری (افزایش y_c/d_{50}) از مقدار استهلاک انرژی جریان کاسته می‌شود. این روند کاهش خطی نیست.

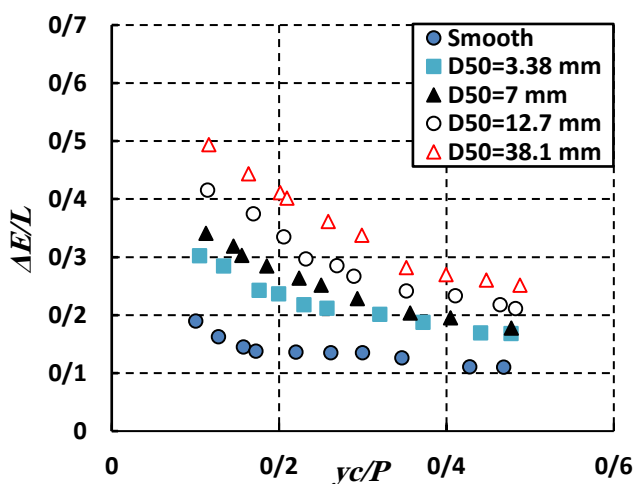
همچنین افزایش دبی جریان موجب کاهش استهلاک انرژی در واحد طول تنداب می‌شود. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌گردد؛ که در زبری‌های با اندازه یکسان مقدار استهلاک انرژی در واحد طول در شیب ۲۵ درجه بیشتر از شیب ۳۵ درجه است. هرچه شیب کمتر باشد، جریان مدت زمان بیشتری با زبری‌ها در تماس است؛ و انرژی آن بیشتر مستهلک می‌شود.

دبی می‌باشد) در شیب‌های مختلف مقدار افت انرژی در واحد طول تنداب کاهش می‌یابد. با افزایش اندازه زبری در شیب‌های یکسان مقدار نسبی افت 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. بیشترین میزان استهلاک انرژی در واحد طول تنداب، در زبری با قطر متوسط ۳۸/۱ میلی‌متر و کمترین میزان استهلاک انرژی در واحد طول تنداب، در زبری با قطر متوسط ۳/۳۸ میلی‌متر است. به دلیل اینکه زبری در مقابل جریان مقاومت کرده و مانند یک مانع در مسیر جریان عمل می‌کند به همین دلیل با بزرگ‌تر شدن اندازه این مانع مقاومت در مقابل جریان افزایش یافته و سبب استهلاک انرژی بیشتر می‌شود.

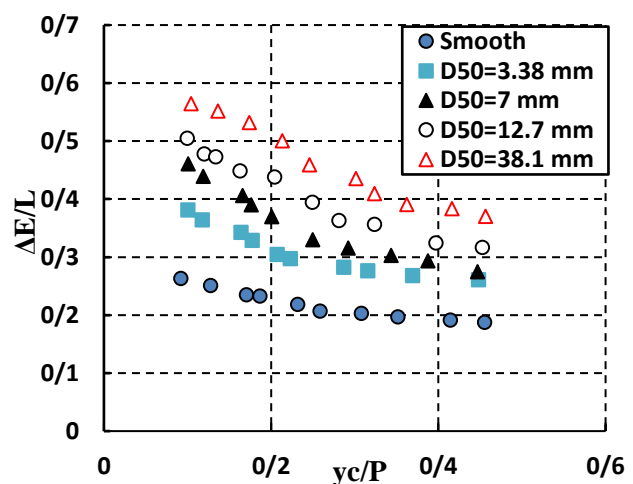


شکل ۳- بررسی تأثیر نسبت y_c/d_{50} بر استهلاک انرژی در زبری‌های مختلف در دو شیب (۲۵ و ۳۵ درجه).

شکل ۴ تأثیر نسبت y_c/P بر استهلاک انرژی در شیب‌های ۲۵ و ۳۵ درجه را در زبری‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ در هر دو شیب افت انرژی در مدل‌های با بستر زبر، بیشتر از مدل با بستر صاف می‌باشد. با افزایش نسبت y_c/P یعنی افزایش دبی، (چون در هر شیب ارتفاع تنداب ثابت است؛ بنابراین افزایش y_c/P یعنی افزایش y_c که در واقع همان افزایش



(الف)



(ب)

شکل ۴- بررسی تأثیر نسبت y_c/P بر استهلاک انرژی در شیب‌های (الف) ۲۵ درجه (ب) ۳۵ درجه، در زبری‌های مختلف،

$$.(4/5 < F_r < 9)$$

با افزایش دبی جریان در یک شیب خاص استهلاک انرژی کم می‌شود؛ زیرا از اثرات لایه مرزی بر پروفیل سرعت کاسته شده و متعاقباً 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 افت انرژی کمتری اتفاق می‌افتد (رحمانشاهی زهابی و شفاعی بجستان ۱۳۹۱). همچنین با افزایش دبی در شیب‌های مختلف مقادیر نسبی افت انرژی

به هم نزدیک می‌شوند. در ادامه برای بررسی اثر پارامترهای بی‌بعد بر استهلاک انرژی در واحد طول تنداب و ارائه روابط ریاضی، از رگرسیون چند متغیره استفاده شد. مطابق جدول ۲، $\Delta E/L$ استهلاک انرژی در واحد طول تنداب، y_c/d_{50} 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 ۲ استخراج شد.

جدول ۲- برآزش روابط ریاضی برای تعیین استهلاک انرژی از روی تنداب.

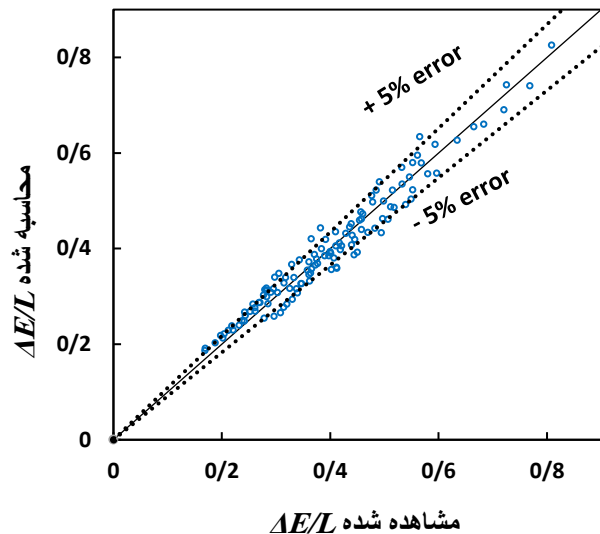
R ²	رابطه رگرسیون	وضعیت سطح بستر	
		تنداب	رگرسیون
۰/۸۷	$\frac{\Delta E}{L} = 0.154 \left(\frac{y_c}{P}\right) - 0.348(\tan S) + 0.42$	صاف	۱
۰/۷۸	$\frac{\Delta E}{L} = -0.005 \left(\frac{y_c}{d_{50}}\right) - 0.196 \left(\frac{y_c}{P}\right) - 0.694 (\tan S) + 0.86$	زبر	
۰/۸۹	$\frac{\Delta E}{L} = \exp(-0.785 \left(\frac{y_c}{P}\right) - 1.756(\tan S) - 0.523$	صاف	۲
۰/۸۸	$\frac{\Delta E}{L} = \exp(-0.022 \left(\frac{y_c}{d_{50}}\right) - 0.851 \left(\frac{y_c}{P}\right) - 1.098(\tan S) - 0.047$	زبر	
۰/۹۸	$\frac{\Delta E}{L} = 0.066 \left(\frac{y_c}{P}\right)^{-0.0246} (\tan S)^{-1.071}$	صاف	
۰/۹۵	$\frac{\Delta E}{L} = 0.217 \left(\frac{y_c}{d_{50}}\right)^{-0.153} \left(\frac{y_c}{P}\right)^{-0.18} (\tan S)^{-0.821}$	زبر	۳

مطابق جدول ۲، رابطه ۱، حالت رگرسیون چند متغیره خطی است. رابطه ۲، رگرسیون چند متغیره غیرخطی (exp) و رابطه ۳، رگرسیون چند متغیره غیرخطی توان‌دار است. با توجه به اینکه رابطه رگرسیون شماره ۳، R² بیشتری می‌دهد؛ پس به‌عنوان رابطه نهایی انتخاب می‌شود. در شکل ۵ داده‌های آزمایشگاهی (محور افقی) و مقدار محاسبه شده از رابطه رگرسیون شماره ۳

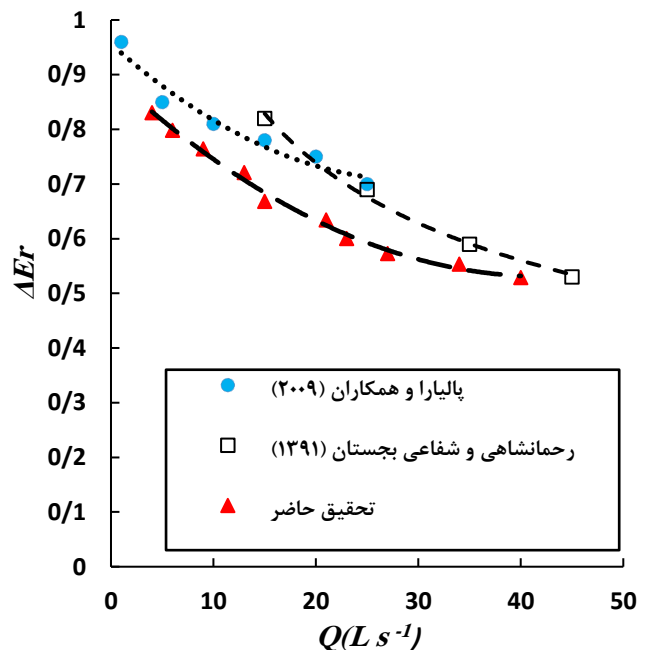
(محور قائم) با هم مقایسه شدند. وضعیت نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی دارای همبستگی نسبتاً خوبی می‌باشند. لازم به ذکر است؛ که روابط در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بودند. در شکل ۶ خطوط باند اطمینان رگرسیون نیز با نقطه چین رسم شده‌اند.

شکل ۶ مقایسه بین نتایج این تحقیق و نتایج تحقیقات پالیارا و همکاران (۲۰۰۹) بر روی شیبهای سنگی و رحمانشاهی و شفافی بجمستان (۱۳۹۱) 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 ۶ از داده‌های افت انرژی نسبی مربوط به تحقیق حاضر استفاده شد. لازم به یادآوری است که منظور از ΔE_r تفاضل انرژی بالادست و پایین- دست تنداب تقسیم بر انرژی بالادست آن می‌باشد.

مدلی که در تحقیق حاضر برای مقایسه در نظر گرفته شد، مدل با شیب 0.46 (زاویه 25 درجه) و زبری با قطر متوسط $12/7$ میلی‌متر بود؛ چون به مقادیر پارامترهای سایر محققان نزدیک‌تر بود. در تحقیق حاضر استهلاك انرژی در واحد طول و استهلاك انرژی نسبی مربوط به تنداب با شیب 25 درجه و زبری $12/7$ میلی‌متر، به ترتیب حدود 60 و 78 درصد نسبت به انرژی بالادست افزایش یافت. همچنین در این آزمایش‌ها استهلاك انرژی در واحد طول تنداب، در مدل‌های با بستر زبر نسبت به بستر صاف حدود 7 تا 38 درصد افزایش یافت. جدول ۳ محدوده متغیرهای این تحقیق و تحقیقات سایر دانشمندان در این زمینه را نشان می‌دهد. طبق شکل ۶ نتایج این تحقیق در دبی‌های کم با نقاط آزمایشی پالیارا و همکاران (۲۰۰۹) و در دبی‌های زیاد با نقاط آزمایشی رحمانشاهی و شفافی بجمستان (۱۳۹۱) تطابق دارد. به‌طور کلی علی‌رغم اینکه آزمایش‌ها در شرایط مختلف و مقادیر مختلف پارامترها انجام شدند؛ اما با مقایسه روش‌ها می‌توان دریافت که روش زبر کردن کامل بستر تنداب می‌تواند روش مؤثری برای مستهلک کردن انرژی باشد.



شکل ۵- مقایسه بین استهلاك انرژی در واحد طول تنداب، مشاهده شده و محاسبه شده از رابطه رگرسیون شماره ۳.



شکل ۶- مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیقات سایر محققان در این زمینه.

جدول ۳- محدودهی متغیرهای این تحقیق و تحقیقات سایر دانشمندان در این زمینه.

عرض فلوم (cm)	شیب	اندازه زبری (mm)	دبی ($L s^{-1}$)	نوع مدل	نوع تحقیق
۲۵	۰/۴۶	۱۲/۷	۴-۴۰	تنداب با بستر زبر	تحقیق حاضر
۳۰	۰/۴۱	۲۰	۱۵-۴۵	تنداب با بستر زبر	تحقیق رحمانشاهی و شفاعی بجنستان (۱۳۹۱)
۲۵	۰/۰۸	۲۰	۱-۲۵	شیب سنگی	تحقیق پالیارا و همکاران (۲۰۰۹)

نتیجه‌گیری کلی

هدف این تحقیق بررسی تأثیر اندازه زبری‌های طبیعی بستر تنداب بر میزان استهلاک انرژی است؛ بدین منظور از تنداب‌هایی با دو شیب مختلف (۲۵ و ۳۵ درجه) استفاده شد. ۴ نوع زبری با اندازه‌های متفاوت (۷، ۳/۳۸، ۳۸/۱ و ۱۲/۷ میلی‌متر) و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت بر روی بستر تنداب‌ها قرار گرفت.

در تمام مدل‌ها با افزایش دبی جریان، از میزان استهلاک انرژی در واحد طول سرریز کاسته می‌شود. زیرا از اثرات لایه مرزی بر پروفیل سرعت کاسته شده و متعاقباً تنش برشی وارد به جریان، اثر عامل مقاوم جریان برای کاهش انرژی کم می‌شود، در نتیجه از اثرات زبری‌ها بر مقاومت جریان کاسته شده و استهلاک انرژی کم‌تری اتفاق می‌افتد.

منابع مورد استفاده

- Chanson H, 1994a. Hydraulic design of stepped channels and spillways. The University of Queensland, Report CH43/94.
- Chanson H, 1994b. Comparison of energy dissipation nappe and skimming flow regime on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research* 32 (2): 213-218.
- Chinnarasri C and Wongwiset S, 2006. Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. *Journal of Hydraulic Engineering* 116(4): 587-691.
- Chow VT, 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Co, New York, NY.
- Christodoulou GC, 1993. Energy dissipation on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 19 (5): 644-650.

در شیب ثابت با افزایش قطر متوسط ذرات میزان استهلاک انرژی در واحد طول سرریز زیاد می‌شود. زبری‌ها باعث افزایش مقاومت جریان، کم شدن سرعت و به دنبال آن افزایش استهلاک انرژی می‌شوند.

در مدل‌ها با ثابت بودن اندازه‌ی قطر متوسط ذرات، با افزایش شیب میزان استهلاک انرژی در واحد طول سرریز کم‌تر می‌شود؛ چون هرچه شیب بیشتر باشد جریان با سرعت بیشتری از روی تنداب می‌گذرد؛ که با افزایش سرعت عمق آب روی تنداب کم می‌شود.

در مدل‌هایی که سنگ‌ها روی زبری پایه قرار گرفتند؛ استهلاک انرژی نسبت به حالتی که روی بستر فقط زبری پایه وجود داشت، بیشتر می‌شود. چون سنگ-های قرار گرفته بر روی زبری پایه مقاومت اضافی در برابر جریان ایجاد می‌کنند.

- Horner MW and Esry S, 1969. An analysis of flow on cascades spillway. *Journal of Hydraulic Engineering* 119(5): 644- 649.
- Pagliara S and Peruginelli A, 2000. Energy dissipation comparison among stepped channel, drop And ramp structures. Pp. 111-118. *Proc. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.
- Pagliara S, Carnacina L and Palermo M, 2009. Energy dissipation in presence of block ramps with Enlarged stilling basins. Pp.5042-5050. 33rd IAHR Congress, *Water Engineering for a Sustainable Environment*. 4-9 Aug. Vancouver, Canada.
- Pagliara S and Chiavaccini P, 2006a. Energy dissipation on block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(1): 41-48.
- Pagliara S and Chiavaccini P, 2006b. Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. *Journal of Hydraulic Engineering* 128(4): 545-553.
- Pegram GGS, Officer AK and Mottram SA, 1999. Hydraulic of skimming flow on modeled stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(5): 500-509.
- Peyras L, Royet P and Degoutte G, 1992. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 118(5): 707-717.
- Rahmanshahi Zahabi M and Shafai Bejestan M, 2012. Experimental investigation of the effect of chute bed roughness height on energy dissipation. *Journal of Water and Soil science*. University of Tabriz. 22 (2): 96-101 (In Persian).
- Rajaratnam N, 1990. Skimming Flow in Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 16 (4): 587-591.
- Scrivener O, Reitzer H, Hazzab A, and Idrissi A. 1986. Optical and ultrasonic instruments for mixture flow investigation. Pp 275-285, hydro transport 10th international conference transport of solid in pipes, Paper H2, Oct., 29-31, Innsbruck, Austria, Ed. AB Burns.
- Sorensen RM, 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of hydraulic Engineering* 113 (12): 1461-1472.
- Tajali MA, 2012. Experimental investigation of the effect of bed roughness with circular cross section on hydraulic jump characteristics. M. Sc. Thesis, Hydraulic structures, Faculty of agriculture, University of Tabriz (In Persian).