

اثر ارتفاع زبری بستر تندآب بر استهلاک انرژی با استفاده از مدل فیزیکی

مصطفی رحمانشاهی زهابی^{1*} و محمود شفاعی بجمستان²

تاریخ دریافت: 90/10/26 تاریخ پذیرش: 91/1/20

1- دانشجوی دکترا، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

2- استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبه E-mail: mostafarahmanshahi@gmail.com

چکیده

در این تحقیق تاثیر اندازه زبری بسترتندآب بر میزان استهلاک انرژی جنبشی آب، بررسی گردید. بدین منظور در ابتدا پس از شناسائی پارامترهای مؤثر، رابطه عمومی بدون بعد توسعه داده شد. آزمایش‌ها بر روی مدل‌های فیزیکی در 3 شیب مختلف (15، 22/5 و 30 درجه) با قرار دادن 3 نوع زبری با اندازه‌های متفاوت (1/1، 1/43 و 2/1 سانتی‌متر) و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت بر روی بستر آنها انجام یافت. میزان استهلاک انرژی سازه در این نوع تندآب با انجام 48 آزمایش مختلف با دبی‌های بین 15 تا 45 لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که با وجود زبری بستر تندآب، میزان استهلاک انرژی از 12 تا 48 درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش یافت. نتایج حاوی این مطلب است که به‌طور کلی شیب 22/5 درجه حداکثر و شیب 30 درجه حداقل میزان افت را در محدوده آزمایشات این تحقیق نشان دادند. همچنین رابطه‌ای کلی جهت پیش بینی میزان افت انرژی در این نوع تندآب ارائه و با نتایج سایر محققین مقایسه گردید.

واژه‌های کلیدی: افت انرژی، تندآب، زبری بستر، سازه‌های هیدرولیکی، مدل فیزیکی

Experimental Investigation of the Effect of Chute Bed Roughness Height on Energy Dissipation

M Rahmanshahi Zahabi^{1*} and M Shafai Bejestan²

Received: January 16, 2012 Accepted: April 8, 2012

¹PhD Student, Dept. of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University, Iran

²Prof., Dept. of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University, Iran

*Corresponding author: E- mail: mostafarahmanshahi@gmail.com

Abstract

In this study the effect of chute bed roughness height on energy dissipation has been investigated. To do so first general non dimensional relationship was developed. Then series of experimental tests were conducted in a physical model using three different bed slopes (15, 22.5 and 30 degrees) and three different uniform roughness heights (1.1, 1.43 and 2.1cm). Total of 48 tests were conducted with flow discharges ranged between 15 and 45 lit/sec. Results show that in comparison with the smooth bed, nearly 12 to 48 percent of the flow energy was dissipated on the roughened bed chute. Maximum energy dissipation occurred for slope of 22.5 degrees and the minimum energy was dissipated on 30 degrees chute. 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.

Keyword: Bed roughness, Chute, Energy dissipation, Hydraulic structures, Physical mode

طول سرریز این گونه 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 (1969)، راجاراتنام (1990)، پیراس و همکاران (1992)، چنسن (1994)، پگرام و همکاران (1999)، پالیارا و پروگینالی (2000)، یاسودا (2004) و شفاهی بجستان و کاظمی (2011) اشاره نمود.

کریستودولو (1993) نتایج آزمایش‌های مدل‌سازی خود و همچنین سورنسن (1985) در رابطه با سرریزهای پلکانی را به این صورت ارائه نمود که تاثیر تعداد پلکان‌ها بر روی استهلاک انرژی مشهود است و به ازای یک مقدار y_c/h (ارتفاع پله ها)، مقدار افت انرژی

مقدمه

تندآب‌ها¹ از جمله متداول‌ترین ساختمان‌های انتقال آب در سدها، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، آبراهه‌های آبرفتی و سیستم‌های جمع‌آوری تصفیه و دفع فاضلاب می‌باشند. در پایین‌دست این سازه از سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی استفاده می‌شود. از جمله روش‌های کاهش ابعاد و یا حذف سازه‌ی مستهلک‌کننده انرژی پایین‌دست به کار بردن روش‌هایی برای کاهش انرژی جریان بر روی تندآب‌ها می‌باشد. از جمله‌ی این روش‌ها که تاکنون استفاده شده است ایجاد پله در طول سرریز است که با گسترش سدهای بتن غلطکی و تشکیل پله در

¹ Chutes

توجه قرار گرفته‌اند. هر چند که مطالعات گذشته در این-گونه سازه‌ها بیشتر بر پایداری زبری‌ها بوده است، مطالعات اندکی در رابطه با استهلاک انرژی به‌خصوص در شیب‌هایی که زبری‌ها پایدار نیستند 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 (2006a) و پالیارا و همکاران (2009) اشاره کرد. در این مطالعات آنها با ساخت مدل‌هایی در شیب‌های مختلف (4:1 تا 12:1) و استفاده از مصالح سنگی با اندازه‌های متفاوت به صورت خشکه‌چین به بررسی افت انرژی بر روی شیب‌های سنگی با شیب نسبتاً کم پرداختند. هدف اصلی این مطالعات بررسی آرایش چیدمان سنگ‌ها بر پایداری تندآب و نیز استهلاک انرژی سازه بوده است. آنها برای بررسی اثر مقیاس بر روی مقدار افت انرژی از فلوم‌های با عرض مختلف 0/25 تا 0/8 متر استفاده کردند. علاوه بر این اثر ارتفاع‌های مختلف سرریز با استفاده از پیستونی که ارتفاع سرریز را تنظیم می‌کرد، مطالعه شد. با توجه به این‌که اندازه زبری عامل تاثیرگذار بر مقاومت جریان است آزمایشات آنها در سه بازه (ریزدانه، دانه-بندی متوسط و درشت‌دانه) انجام گرفت. نتایج آنها حاکی از آن است که با افزایش اندازه زبری مقاومت جریان زیاد شده و متعاقباً افت انرژی افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش شیب در آزمایشات آنها مقدار افت انرژی کاهش یافت. آنها همچنین در پایان رابطه‌ای برای پیش بینی مقدار افت انرژی ارائه نمودند.

پالیارا و چیاواسینی (2006b) با استفاده از کره‌های فلزی که با پوشش آلومینیمی احاطه شده بودند، به بررسی اثر تخته سنگ‌های برآمده بر مقاومت جریان در بستر شیب‌های سنگی³ پرداختند. در آزمایشات آنها نحوه‌ی قرار گیری این کره‌ها به دو صورت ردیفی و تصادفی بودند. بر اساس نتایج پالیارا و واچینی این کره-ها سبب پایداری بیشتر شیب‌های سنگی می‌شوند، زیرا این عمل به آشفتگی جریان دامن‌زده و از تنش برشی وارد شده بر مواد بستر می‌کاهد. نتایج آنها نشان می-

با افزایش تعداد پلکان، افزایش می‌یابد و تاثیر تعداد پلکان در دبی‌های بالا بیشتر می‌گردد. همچنین در آزمایشات آنها با تبدیل جریان ریزشی¹ به جریان غیر ریزشی² افت انرژی کاهش می‌یابد. چین نراسی و وانگوازیس (2006) با انجام مطالعات، و مدل کردن انواع مختلف پلکان (افقی، مایل و پلکان با زائده انتهایی) بر روی تندآب 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 قابل ملاحظه‌ای نسبت به دو نوع دیگر پلکان، بر روی استهلاک انرژی دارد. و در انتها رابطه‌ای بین استهلاک انرژی و عمق بحرانی نسبی ارائه دادند.

روش دیگری که می‌تواند استفاده شود کاربرد مانع و یا زبری در بستر سرریزاست. درخصوص کاربرد مانع و یا بلوک آزمایش‌ها و نتایج سازمان احیای اراضی آمریکا نشان داده است که با به‌کاربردن بلوک‌های با ابعاد زیاد که باعث جداشدگی جت عبوری جریان از روی تندآب 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 استخر را بدهد، آبشستگی بستر نیز کاهش می‌یابد. در واقع ردیف‌های ضربدری بلوک‌های مانع‌دار روی تندآب، فارغ از ارتفاع شیب‌شکن از شتاب‌گیری بیش از حد 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 این رو این روش با محدودیت زیادی همراه است. روش دیگر به‌کاربردن زبری به‌طور پیوسته در بستر تندآب می‌باشد. از دیر باز سرریزهای خشکه‌چین و یا گابیونی در بستر رودخانه‌های آبرفتی مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. امروزه نیز به دلیل ساده بودن از نظر اجرایی و نیز اقتصادی و از همه مهمتر دوست‌دار محیط‌زیست بودن، این‌گونه سازه‌ها مورد

¹ Nappe flow regime

² Skimming flow regime

³ Block ramp

از آنجائیکه 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 II باکینگهام رابطه کلی زیر بدست می‌آید:

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = f\left(\frac{y_c}{D_{50}}, \frac{y_c}{H_{dam}}, Re, W, q\right) \quad [2]$$

در این رابطه $Re = \rho v R / \mu$ عدد رینولدز بالادست (مقطع 1) می‌باشد. با توجه به این‌که عدد رینولدز در محدوده انجام این آزمایشات بیشتر از 2000 می‌باشد بنابراین جریان در محدوده آشفته می‌باشد، و می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر کرد (چاو 1957). قابل ذکر است که با توجه به این‌که در این آزمایشات حداقل ارتفاع آب روی سرریز 5/8 سانتی‌متر می‌باشد، می‌توان از اثرات عدد ویر $W = \rho v^2 l / \sigma$ (نیز صرف‌نظر کرد (جدول 1). در نتیجه رابطه نهایی به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = f\left(\frac{y_c}{D_{50}}, \frac{y_c}{H_{dam}}, q\right) \quad [3]$$

امکانات آزمایشگاه و روش انجام آزمایش

در این تحقیق با هدف بررسی تأثیر اندازه زبری بستر تندآب بر میزان استهلاک انرژی سازه، پس از شناخت پارامترهای مؤثر، با ساخت مدل‌های فیزیکی در 3 شیب مختلف 15، 22/5 و 30 درجه) و قرار دادن 3 نوع زبری با اندازه‌های متفاوت (1/1، 1/43 و 2/1 سانتی‌متر) و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت (شکل 1) بر روی بستر آنها و سپس انجام 48 آزمایش مختلف با دبی‌های 15، 25، 35 و 45 لیتر بر ثانیه، میزان استهلاک انرژی سازه در این نوع تندآب مورد بررسی قرار گرفت.

مراحل عملی و آزمایشگاهی این تحقیق در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز در فلومی به طول 7/5 متر و عرض 0/3 متر انجام گرفت. ارتفاع فلوم در قسمت ابتدایی (2/1 متر) 0/8 متر و در ادامه (5/4 متر) 0/4 متر می‌باشد. شکل 2 و 3 به ترتیب پلان و مقطع فلوم و همچنین شکل 4 تصویری

دهد که در صورت وجود کره‌های فلزی پوشیده شده با آلومینیم، عمق جریان نسبت به سطح صاف بیشتر می‌شود. نتایج پالیارا و واچینی نشان می‌دهد، که تأثیر شیب بر افزایش مقاومت جریان تا حد 0/32 بی‌تأثیر است. ولی در شیب‌های بالاتر مقاومت جریان افزایش سریعی پیدا می‌کند.

با توجه به مطالب فوق هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر اندازه زبری‌های طبیعی بستر تندآب بر میزان استهلاک انرژی سازه می‌باشد. و به‌طور خاص هدف این است که آیا زبری می‌تواند انرژی جنبشی را به‌طور مؤثری کاهش دهد و از ابعاد حوضچه‌ی آرامش پایینین- دست بکاهد و یا خیر، و اگر جواب مثبت است در چه شیب‌هایی و با چه میزانی؟ از مزیت‌های این روش بر روش‌های قبلی مانند سرریز پلکانی می‌توان به نکات زیر اشاره کرد: نداشتن خطر کاویتاسیون که موجب تخریب سازه می‌شود، دوست‌دار طبیعت بودن این روش و از همه مهم‌تر اقتصادی بودن آن، زیرا از مصالح طبیعی برای ساخت آن استفاده می‌شود.

مواد و روش‌ها

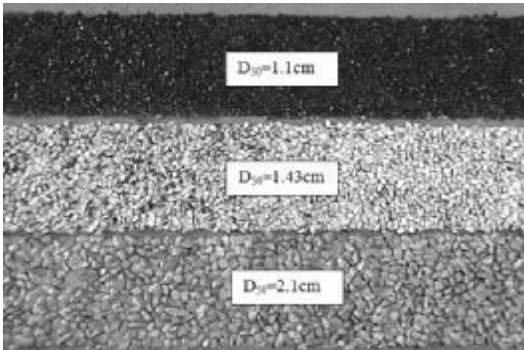
آنالیز ابعادی

به‌منظور دست‌یابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که در استهلاک انرژی مؤثر می‌باشند اقدام نموده و با تجزیه و تحلیل ابعادی رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد استخراج گردید. پارامترهای مؤثر در این آزمایش‌ها در رابطه 1 ارائه شده‌اند:

$$f\left(q, \frac{\Delta E}{E_0}, D_{50}, H_{dam}, m, r, g, q, s\right) = 0 \quad [1]$$

که در آن q دبی در واحد عرض، $\Delta E/E_0$ افت نسبی انرژی، D_{50} قطر متوسط ذرات است که از آنها به عنوان زبری استفاده می‌شود، H_{dam} ارتفاع تندآب، μ ویسکوزیته دینامیکی آب، ρ جرم حجمی آب، g شتاب ثقل، θ زاویه بستر تندآب با افق و σ کشش سطحی می‌باشد.

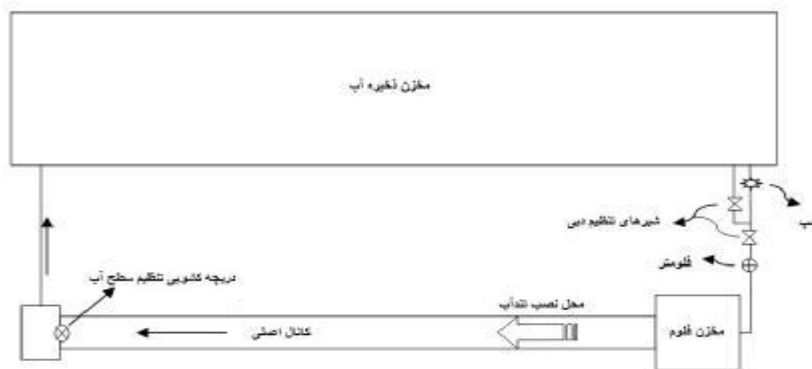
0/1 میلی‌متر که بر روی ریل فلوم نصب شده بود، استفاده شد.



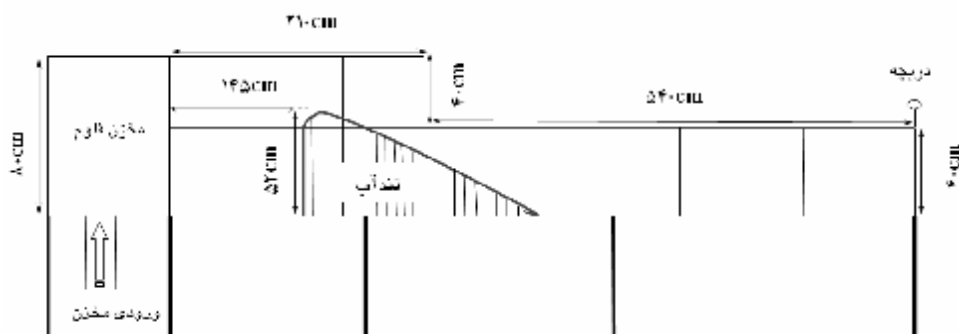
شکل 1- اندازه های مختلف زبری ها

از مدل آزمایشگاهی تندآب با بستر زبر ساخته شده برای این تحقیق را نشان می‌دهند. دبی جریان قبل از ورود به مخزن آرام‌کننده توسط دبی‌سنج دیجیتالی با دقت 0/01 لیتربرثانیه اندازه‌گیری می‌شد. در ابتدای فلوم آزمایش، سرریز از نوع اوجی (با ارتفاع 52 سانتی‌متر) با توجه به استانداردهای USBR طراحی و در فاصله 1/45 متری از ابتدای فلوم نصب گردید. در ابتدای فلوم از دو صفحه توری شکل جهت کنترل و آرام کردن جریان استفاده شد. تندآب‌ها از جنس پلگسی‌گلاس با ضخامت 10 میلی‌متر ساخته شده و در ادامه منحنی اوجی شکل در قسمتی که شیب به مقدار دلخواه می‌رسید به سرریز اوجی متصل می‌شدند. برای جلوگیری از

شکم‌دادن پلگسی‌گلاس در اثر فشار آب این صفحات با نبشی آهنی و چسب آهن مهار می‌شدند. جهت اندازه‌گیری عمق پنجه تندآب از یک دستگاه عمق‌سنج با دقت



شکل 2- پلان فلوم و تجهیزات آزمایشگاهی این مطالعه



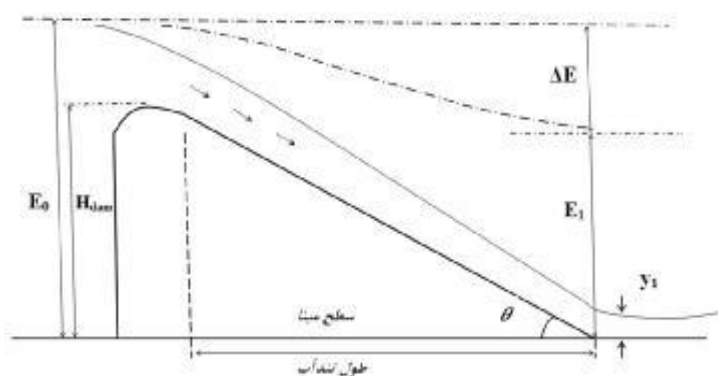
شکل 3- مقطع فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه (پهنای فلوم 30 سانتی‌متر)



شکل 4- مدل آزمایشگاهی تندآب با بستر زبر.

هنگام اندازه‌گیری عمق جریان بر روی بستر زبر برای عمق پنجه سرریز سعی می‌شود اثر گذر جریان از بین زبری‌ها تا حد امکان در نظر گرفته شود. قابل ذکر است که زبری‌ها ابتدا با چسب آهن بر روی یک پوشش مقوایی چسبانده شده، سپس این پوشش با استفاده از چسب آکواریوم بر روی صفحه‌ی پلگسی‌گلاس نصب می‌شود. مطابق شکل 5 و پارامترهای مشخصه روی آن، میزان افت انرژی نسبی جریان از رابطه 4 محاسبه می‌شود.

با توجه به تغییرات مختصر عمق در عرض فلوم و برای اندازه‌گیری دقیق عمق، یک عمق در وسط فلوم و دو عمق به فاصله 5 سانتی‌متر در نزدیک دیواره‌های فلوم اندازه‌گیری و متوسط آن‌ها به عنوان عمق جریان منظور می‌گردید، سپس سرعت جریان با استفاده از معادله پیوستگی محاسبه می‌شد. نکته قابل توجه این‌که برای افزایش دقت کار و جلوگیری از اثرات ابتدایی و انتهای پوشش زبر و اثرات لایه مرزی بر شرایط جریان، زبری بستر تندآب از قبل از سرریز شروع و تا فاصله حدود 5 تا 10 سانتی‌متر پایین‌تر از پنجه ادامه می‌یافت. و



شکل 5- طرح شماتیک تندآب و اجزا آن.

تندآب می‌باشد. جدول 1 دامنه تغییرات پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \left(\frac{E_0 - E_1}{E_0} \right) \quad [4]$$

در این رابطه ΔE_r افت نسبی انرژی نسبی جریان، E_0 انرژی کل جریان در بالادست و E_1 انرژی کل پای

جدول 1 - دامنه تغییرات پارامترهای این تحقیق.

Re (بالادست)	عمق روی تاج (cm)	y_c/H_{dam}	y_c/D_{50}	θ (degree)	D_{50} (cm)	Q (L/s)	محدوده تغییرات
9804	5/8	0/12	3	15	1/1	15	حداقل
27305	14/7	0/25	12	30	2/1	45	حداکثر

نتایج و بحث

متوسط با استفاده از رابطه پیوستگی، میزان افت انرژی محاسبه گردید. جدول 2 خلاصه نتایج افت نسبی انرژی و جدول 3 درصد کاهش استهلاک انرژی نسبی نسبت به مدل شاهد را برای شیبها و دبیهای مختلف نشان می-دهند.

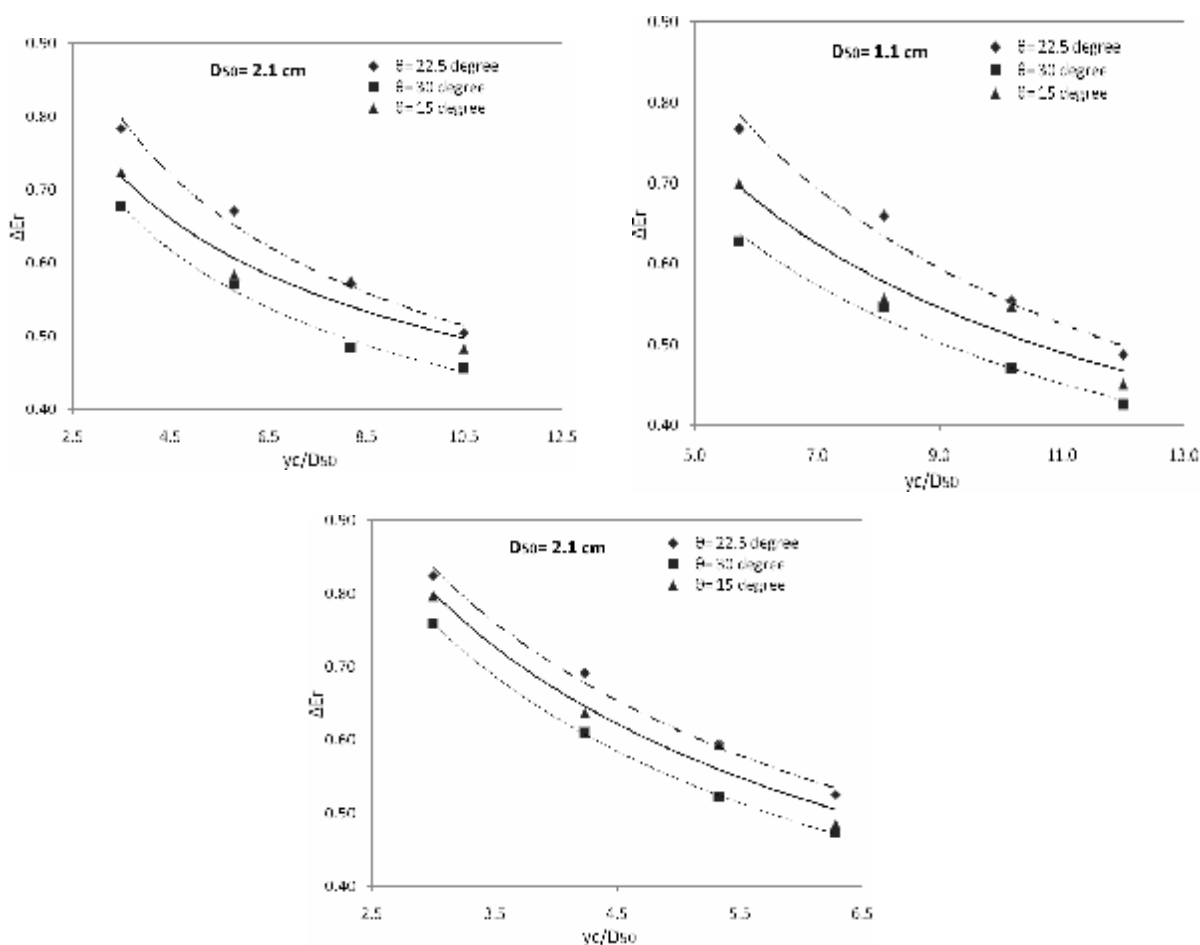
در این تحقیق آزمایشات برای چهار دبی 35، 25، 15 و 45 لیتربرثانیه بر روی مدل‌های ساخته شده انجام گرفت و با اندازه‌گیری عمق بالادست تندآب (از طریق نوار مدرج با فاصله مناسب از سرریز) و عمق پای تندآب (در سه نقطه در عرض 30 سانتی‌متری فلوم برای افزایش دقت و سپس متوسط‌گیری از آنها) و محاسبه سرعت

جدول 2 - نتایج محاسبات مقدار استهلاک انرژی نسبی شیبهای مختلف.

دبی (L/s)				اندازه زبری (cm)	زاویه بستر تندآب (درجه)
45	35	25	15		
0/18	0/20	0/44	0/55	صاف	15
0/45	0/55	0/56	0/70	1/1	
0/48	0/58	0/58	0/72	1/43	
0/49	0/59	0/64	0/80	2/1	
0/16	0/18	0/23	0/34	صاف	22/5
0/49	0/55	0/68	0/77	1/1	
0/50	0/57	0/67	0/78	1/43	
0/53	0/59	0/69	0/82	2/1	
0/19	0/20	0/30	0/48	صاف	30
0/43	0/47	0/55	0/63	1/1	
0/46	0/48	0/57	0/68	1/43	
0/47	0/52	0/61	0/76	2/1	

جدول 3 - درصد کاهش استهلاك انرژی نسبی نسبت به مدل شاهد شیب‌های مختلف.

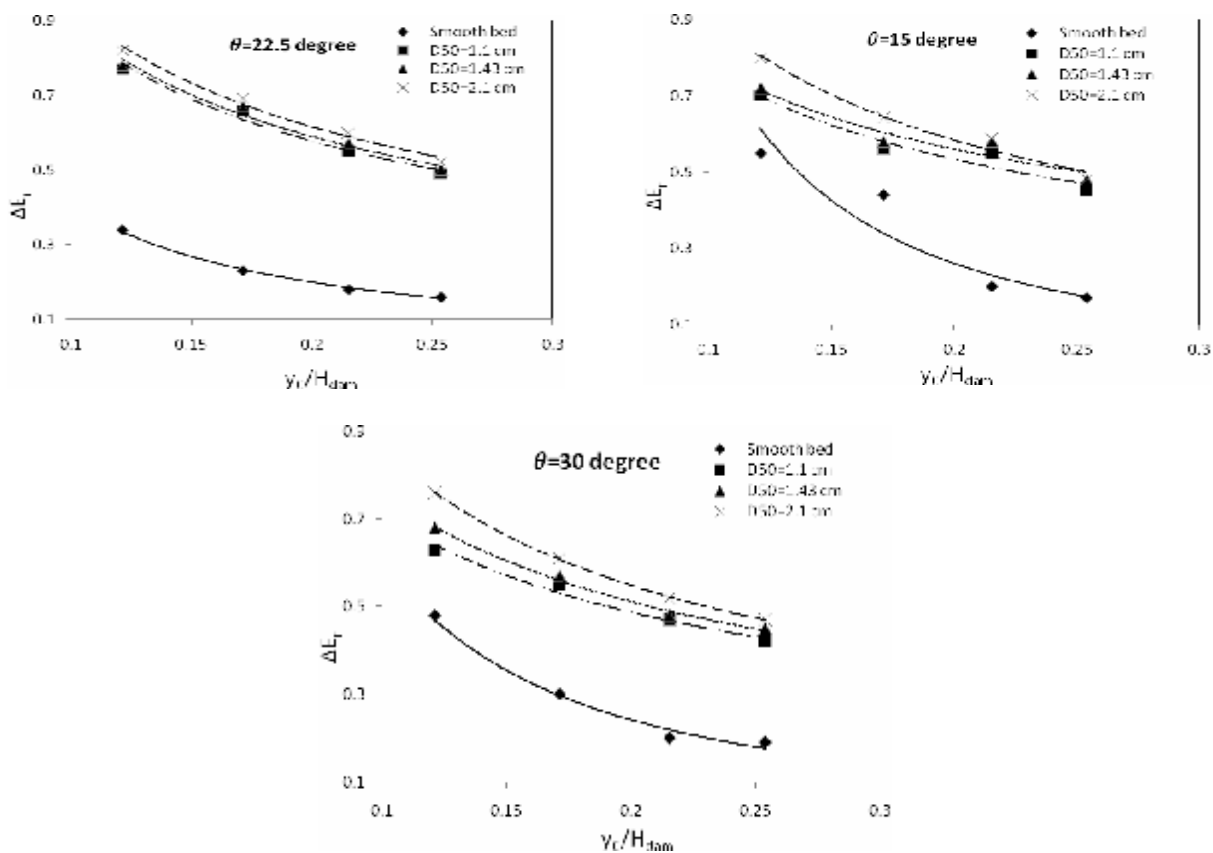
دبی (L/s)				اندازه زبری (cm)	زاویه بستر تندآب (درجه)
45	35	25	15		
0/09	0/15	0/12	0/15	1/1	15
0/30	0/38	0/14	0/17	1/43	
0/31	0/39	0/20	0/25	2/1	
0/33	0/37	0/45	0/43	1/1	22/5
0/34	0/39	0/44	0/44	1/43	
0/37	0/41	0/46	0/48	2/1	
0/24	0/27	0/25	0/15	1/1	30
0/27	0/28	0/27	0/15	1/43	
0/28	0/32	0/31	0/28	2/1	

شکل 6- تغییرات افت انرژی نسبی نسبت به yc/D_{50} در شیب‌های مختلف.

طول بیشتر بستر زبر شیب 15 درجه، بر شیب بیشتر تندآب با شیب 30 درجه در این محدوده آزمایشات غالبتر بوده است.

با توجه به شکل 7 در همه شیبها افت انرژی جنبشی مدل‌های با بستر زبر بیشتر از مدل شاهد می‌باشد و با افزایش نسبت y_c/H_{dam} در شیب‌های مختلف مقدار نسبی افت انرژی کاهش می‌یابد. و این کاهش در زبری 2/1 سانتی‌متر با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد (شیب نمودارهای آن تندتر است)، و دو زبری 1/1 و 1/43 سانتی‌متر تقریباً دارای شیب یکسان و در شیب 22/5 درجه دارای مقادیر نزدیک به هم می‌باشند. با توجه به اینکه H_{dam} دارای مقدار ثابتی می‌باشد، افزایش y_c ($y_c=(q^2/g)^{1/3}$) در واقع همان افزایش دبی می‌باشد، بنابراین در یک شیب خاص با افزایش y_c/H_{dam} (دبی) و به دنبال آن افزایش عمق (با توجه به ثابت بودن عرض فلوم) از اثرات زیر لایه ورقه‌ای بر پروفیل سرعت

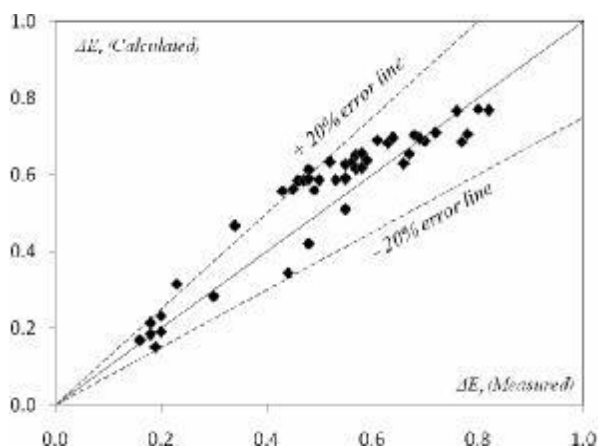
جهت بررسی تأثیر ارتفاع (اندازه) زبری بر میزان افت انرژی صورت گرفته در آزمایشات، با رسم شکل-های زیر نتایج نمایش داده شده و روند نمودارها توصیف می‌شوند. در شکل 6 روند استهلاك انرژی در مدل‌های با بستر زبر برای شیب‌های مختلف نمایش داده شده است. در این نمودارها محور عمودی استهلاك انرژی نسبی ($\Delta E/E_0$) و در محور افقی از نسبت بدون بعد y_c/D_{50} استفاده شده است. با توجه به شکل 6 در زبری‌های با اندازه یکسان مقدار نسبی افت انرژی در شیب 22/5 درجه بیشتر از 2 شیب دیگر می‌باشد. زیرا از یک طرف دارای شیب کافی و در نتیجه تنش برشی بیشتر و از طرف دیگر دارای طول کافی بوده و جریان مسیر بیشتری با سطح زبر در تماس است. شیب‌های 15 و 30 درجه هر کدام دارای یکی از خصوصیات فوق در مقایسه با شیب 22/5 درجه می‌باشند، و با مقایسه این دو شیب می‌توان گفت که اثر



شکل 7- تغییرات افت انرژی نسبی نسبت به y_c/H_{dam} در زبری‌های مختلف.

جدول 4- مقدار پارامترهای رابطه (5)

نوع بستر	A	B	C	D	R ²
صاف	0/00	-7/87	-0/63	0/44	0/87
زبر	-0/02	-2/46	-0/24	0/17	0/8



شکل 8- مقایسه بین افت انرژی نسبی مشاهده شده و محاسبه شده از رابطه 5.

مقایسه نتایج با پژوهش‌های قبلی

همان‌گونه که پیشتر اشاره شد تاکنون مطالعه جامعی روی این نوع تندآب با شرایط موجود انجام نشده است. شکل 9 مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات منابع 4 و 9 را نشان می‌دهد. در این شکل نتایج بهینه‌ترین ترکیب شیب و زبری این تحقیق (شیب 22/5 درجه و زبری 2/1 سانتی‌متر) با نتایج یکی از مدل‌های کریستودولو بر روی سرریزهای پلکانی و همچنین پالیارا بر روی شیب‌های سنگی مقایسه شده است. با توجه به این‌که آزمایشات پالیارا در دبی‌های کوچکتری انجام شده‌اند در نتیجه اثر زبری کف بر روی مقاومت جریان بیشتر بوده و افت انرژی نسبی آن بیشتر است. همچنین در مدل سرریز پلکانی کریستودولو با تشکیل جریان غیرریزشی تأثیر پلکان بر روی مقاومت جریان کم شده و افت انرژی کاهش یافت است. با علم به این‌که این آزمایشات در شرایط مختلف آزمایشگاهی و دامنه‌های مختلف پارامترها انجام شده‌اند، با توجه به روند این شکل می‌توان گفت که استفاده از تندآب با بستر زبر می‌تواند روشی کارآمد برای

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 اثرات زبری‌ها بر مقاومت جریان کاسته شده و افت انرژی کمتری اتفاق می‌افتد. همچنین با افزایش y_c/H_{dam} (دبی) در شیب‌های مختلف مقادیر نسبی افت انرژی به هم نزدیک می‌شوند.

علاوه بر این 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. در ادامه با توجه به آنالیز ابعادی صورت گرفته، به منظور بررسی اثر متقابل پارامترهای بی‌بعد مؤثر استخراج شده بر روی مقدار افت انرژی نسبی و ارائه یک رابطه ریاضی برای پیش‌بینی این مقادیر، از رگرسیون‌گیری چند متغیره غیرخطی نرم افزار که در آن ΔE_r مقدار افت نسبی انرژی، y_c/D_{50} نسبت عمق بحرانی به قطر متوسط زبری‌ها، y_c/H_{dam} نسبت عمق بحرانی به ارتفاع سرریز و زاویه بستر تندآب با افق می‌باشد. جدول زیر مقدار پارامترهای رابطه 5 را نشان می‌دهد.

$$E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = \exp\left(A\left(\frac{y_c}{D_{50}}\right) + B\left(-\frac{y_c}{H_{dam}}\right) + C(\tan \alpha) + D\right) \quad [5]$$

آماري (SPSS 17) استفاده شد و در نهایت رابطه 5 پس از تحلیل‌های متعدد استخراج گردید. در شکل 20 مقدار افت محاسبه شده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (محور افقی) و مقدار افت محاسبه شده از رابطه 5 (محور قائم) با هم مقایسه شده‌اند. پراکندگی نقاط نسبت به خط 45 درجه نشان می‌دهد که مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی دارای همبستگی نسبتاً خوبی می‌باشند. و مقدار همبستگی این دو مقدار (آزمایشگاهی و محاسباتی) با استفاده از روش‌های آماری 88 درصد و در سطح 0/01 معنی‌دار می‌باشد.

استهلاك انرژی از 12 تا 48 درصد نسبت به مدل شاهد افزایش می‌یابد.

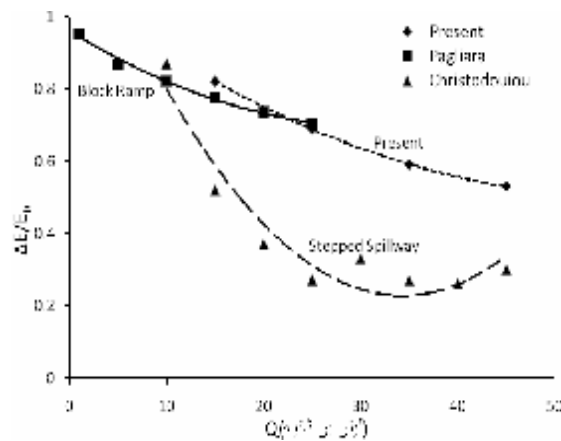
افزایش اندازه زبری در همه شیب‌ها باعث افزایش افت انرژی می‌گردد. و این مقدار در شیب 22/5 درجه محسوس‌تر است. با افزایش شیب تندآب در زبری‌های یکسان مقدار افت انرژی در شیب 22/5 درجه بیشتر از 2 شیب دیگر می‌باشد. و به‌طور کلی مقدار افت انرژی در شیب 22/5 درجه بیشترین مقدار و در شیب 30 درجه کمترین مقدار می‌باشد. با افزایش دبی جریان، تأثیر زیرلایه ورقه‌ای بر پروفیل سرعت کمتر شده، و در نتیجه میزان افت انرژی کمتر بوده و همچنین مقدار آن در شیب‌های مختلف به هم نزدیک می‌شود.

به‌طور کلی افت نسبی انرژی در شیب 15 درجه برخلاف انتظار از شیب 30 درجه بیشتر می‌باشد.

مقایسه نتایج این تحقیق با دیگر روش‌های استهلاك انرژی نشان می‌دهد که این روش می‌تواند روشی کارآمد برای استهلاك انرژی تلقی شود.

علاوه بر نتایج فوق با استفاده از رگرسیون‌گیری غیرخطی چند متغیره رابطه‌ای جهت محاسبه میزان افت انرژی نسبی ارائه گردید. لازم به توضیح است معادله به‌دست آمده با توجه به شرایط و محدوده متغیرهای این تحقیق بدست آمده است. در نتیجه با انجام آزمایش‌های دقیق‌تر و در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مؤثر در افت انرژی و همچنین در محدوده متغیرهایی غیر از محدوده این تحقیق، شاید این معادله دقت کافی نداشته باشد.

استهلاك انرژی، در مقایسه با دیگر روش‌های متداول استهلاك انرژی به حساب آید. جدول 5 محدوده متغیرهای تحقیقات مقایسه شده را نشان می‌دهد.



شکل 9- مقایسه افت انرژی نسبی این تحقیق و تحقیقات پالیارا و کریستودولو

جدول 5- محدوده متغیرهای این تحقیق و تحقیقات پالیارا و کریستودولو.

نوع مدل	دبی (L/s)	اندازه زبری		عرض فلوم (cm)
		یا پلکان (cm)	شیب	
تحقیق حاضر	15 - 45	2	0/41	30
سرریز پلکانی	10 - 45	2/5	1/43	50
شیب سنگی	1 - 25	2	0/08	25

نتیجه گیری

به‌طور کلی می‌توان گفت استهلاك انرژی در این مدل‌ها نسبت به انرژی بالادست تا 82 درصد افزایش می‌یابد و همچنین در مدل‌های با بستر زبر میزان

منابع مورد استفاده

Chanson H, 1994. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. Journal of hydraulic engineering, ASCE 32(2): 213-218.

- Chinnarasri C and Wongwiset S, 2006. Flow patterns and energy dissipation over various stepped chutes. *Journal of hydraulic engineering, ASCE* 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, ASCE* 119(5): 644-649.
- Horner MW and Esry S, 1969. An analysis of flow on cascades spillway. *Journal of hydraulic engineering, ASCE* 119(5): 644- 649.
- Pagliara S and Chiavaccini P, 2006b. Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. *Journal of hydraulic engineering, ASCE* 128(4): 545-553.
- 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, ASCE* 132(1): 41-48.
- Pegram GGS, Officer AK and Mottram SA, 1999. Hydraulic of skimming flow on modeled stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 125(5): 500-509.
- Peyras L, Royet P and Degoutte G, 1992. 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(4):587- 691.
- Shafai-Bajestan M and Kazemi-Nasaban Gh, 2011. Experimental study on Gabion stepped spillway. *Experimental Methods in Hydraulic Research*. Pp. 267-274. Pawel Rowinski, Poland.
- Sorensen RM, 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 111(12):1461-1472.
- Yasuda Y, 2004. Energy Dissipation of Skimming Flows on stepped channel chutes Pp. 67-80. *Fluvial, environmental and coastal developments in hydraulic Engineering*. Mossa M, Yasuda Y and Chanson H Taylor & Francis, The Netherlands.