

بررسی استهلاک انرژی در تندآب با موانع مستغرق با استفاده از مدل فیزیکی

سعید سرکمریان^{۱*} و مهدی قمشی^۲

^۱ دانشجوی دکتری عمران مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز و ^۲ استاد، گروه آموزشی سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۰۳

چکیده

از جمله روش‌های کاهش ابعاد و یا حذف سازه مستهلک‌کننده انرژی پایین دست تند آب‌ها، استفاده از موانعی است که بر روی تندآب‌ها قرار می‌گیرند. در این تحقیق، با استفاده از مدل آزمایشگاهی به قابلیت استهلاک انرژی تندآب با استفاده از موانع مستغرق مکعب مستطیلی پرداخته شد. برای این منظور، آزمایش‌های مختلفی در تندآب با چهار شیب مختلف با و بدون وجود موانع در یک فلوم آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. نتایج حاصل از مدل‌های بدون مانع نشان داد که میزان استهلاک انرژی نسبت به انرژی بالادست در محدوده دبی‌های این تحقیق بین ۱۰ درصد برای مدل با شیب یک به چهار تا ۶۳ درصد برای مدل با شیب یک به پنج متغیر است. با مقایسه افت انرژی در شیب‌های مختلف، می‌توان به نتیجه رسید که با کاهش شیب بستر تندآب، افت انرژی نسبی افزایش می‌یابد. همچنین، این نتیجه را نیز می‌توان عنوان کرد که با کاهش شیب بستر تندآب، روند کاهش افت انرژی با شیب کمتری اتفاق می‌افتد. با بررسی نتایج مدل‌های با مانع و مقایسه آن‌ها نسبت به مدل‌های بدون مانع، میزان استهلاک انرژی، افزایش ۱۷ تا ۴۴ درصدی را نشان داد. در مدل‌های با مانع نیز با مقایسه افت انرژی در شیب‌های مختلف، می‌توان به این نتیجه رسید که با کاهش شیب بستر تندآب، میزان افت انرژی نسبی افزایش و روند کاهش افت انرژی با شیب کمتری اتفاق می‌افتد. در بخش نهایی با استفاده از رگرسیون چند متغیره روابطی برای پیش‌بینی استهلاک انرژی در این نوع تندآب در حالت بستر بدون مانع و با وجود موانع استخراج شد.

واژه‌های کلیدی: استهلاک انرژی، تندآب، مدل با مانع، مدل فیزیکی، موانع مستغرق

مقدمه

مستهلک‌کننده‌های انرژی در مواردی که انرژی جنبشی زیاد جریان منجر به خرابی‌هایی از قبیل فرسایش کانال پایاب، سایش سازه‌های هیدرولیکی، تولید امواج مخرب در پایاب و یا پدیده آبستگي شود، به کار می‌روند. تندآب‌ها از جمله متداول‌ترین ساختمان‌های انتقال آب در سدها، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، آبراهه‌های آبرفتی و سامانه‌های جمع‌آوری، تصفیه و دفع فاضلاب می‌باشند. یکی از راه‌هایی که با

در مهندسی هیدرولیک، از سازه‌هایی همچون حوضچه‌های آرامش، کف‌های مانع‌دار و شفت‌های گردابه‌ای، به عنوان مستهلک‌کننده‌های انرژی بهره‌برداری می‌کنند. وظیفه اصلی این نوع سازه‌ها، مستهلک کردن انرژی جنبشی اضافی جریان است.

* مسئول مکاتبات: saeid.sarkamaryan@gmail.com

با افق و ضرایب A ، B_1 و C ضرایب وابسته به اندازه زبری می‌باشند.

Chiavaccini و Pagliara (۲۰۰۶ b) با استفاده از کره‌های فلزی که با پوشش آلومینیومی احاطه شده بودند، به بررسی اثر قلوه‌سنگ‌های برآمده بر مقاومت جریان پرداختند. در آزمایش‌های آن‌ها، نحوه قرارگیری این کره‌ها به دو صورت ردیفی و تصادفی بود. بر اساس نتایج این تحقیق، این کره‌ها سبب پایداری بیشتر شیب سنگی شدند، زیرا این کره‌ها به آشفتگی جریان دامن زده، تنش برشی وارد شده بر مواد بستر را کاهش دادند. آن‌ها نشان دادند که با وجود کره‌های فلزی پوشیده شده با آلومینیم، عمق جریان نسبت به سطح صاف بیشتر می‌شود. این آزمایش‌ها همچنین نشان داد که تأثیر شیب بر افزایش مقاومت جریان تا حد $0/32$ بی تأثیر است، ولی در شیب‌های بالاتر مقاومت جریان افزایش سریعی پیدا می‌کند. از دیگر نتایج این تحقیق این بود که علاوه بر شیب بستر کانال و اندازه مصالح بستر، عمق پایاب بر مقدار استهلاک انرژی مؤثر بوده و غیر قابل چشم‌پوشی می‌باشد. همچنین مقایسه مقدار استهلاک انرژی در حالت بستر متحرک حوضچه و بستر ثابت آن نشان داد که مقدار افت انرژی در بستر متحرک بیشتر است.

Pagliara و همکاران (۲۰۰۹) با انجام تحقیقاتی به بررسی اثر انتقال رسوب بر روی ساختار بستر و تغییرات انرژی جنبشی شیب‌های سنگی پرداختند. در این مطالعات به صورت تجربی ثابت شد که هر دو پارامتر قطر ذرات مواد پرکننده و بلوک‌های سازنده شیب، شیب بستر و دبی جریان از پارامترهای مربوطه مهم حاکم در پدیده پرکردن فضای بین بلوک‌های روی شیب‌های سنگی می‌باشند. ولی به‌طور کلی اثرات مواد پرکننده بر تغییرات انرژی جنبشی قابل چشم‌پوشی است.

Zulfeqar و همکاران (۲۰۰۹) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر نیم‌کره‌های برآمده بر استهلاک انرژی بر روی شیب‌های سنگی با آرایش‌های مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار استهلاک انرژی در بستر زبر بیشتر از بستر صاف می‌باشد. همچنین مقدار استهلاک انرژی با افزایش تراکم

استفاده از آن می‌توان از تخریب احتمالی خود سازه، سازه‌های پایین‌دست و در عین حال از صرف هزینه‌های مازادی که به خاطر ایجاد سازه‌های حفاظتی مستحکم، بر سازندگان سازه‌های هیدرولیکی تحمیل می‌شود، جلوگیری به عمل آورد، کاهش انرژی جنبشی بر روی تندآب‌ها قبل از رسیدن جریان به پایین‌دست می‌باشد.

از جمله این روش‌هایی که تا کنون استفاده شده، ایجاد پله در طول سرریز است. روش دیگری که می‌تواند استفاده شود، کاربرد مانع و یا زبری در بستر سرریز است. تا کنون مطالعات زیادی برای تعیین رابطه بین مقدار استهلاک انرژی و مشخصات تندآب‌ها با بستر با هندسه‌های مختلف انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به Platzter (۱۹۸۳)، Diez و همکاران (۱۹۹۱)، Stephenson (۱۹۹۱)، Peyras و همکاران (۱۹۹۲)، Christodoulou (۱۹۹۳)، Chamani و Rajaratnam (۱۹۹۹ a,b) اشاره کرد. Pagliara و Chiavaccini (۲۰۰۶a) با ساخت مدل‌هایی در شیب‌های مختلف (۱:۴ تا ۱:۱۲) و استفاده از مصالح سنگی با اندازه‌های متفاوت به صورت خشکه‌چین به بررسی استهلاک انرژی بر روی شیب‌های سنگی با شیب نسبتاً کم پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که با افزایش اندازه زبری، مقاومت جریان زیاد شده، متعاقباً استهلاک انرژی افزایش می‌یابد. این محققین در پژوهش خود شیب را نیز متغیر در نظر گرفتند که نتیجه این امر نشان داد که با افزایش شیب مقدار استهلاک انرژی کاهش می‌یابد. از دیگر بررسی‌های این پژوهشگران، بررسی اثر مقیاس و همچنین عدد رینولدز بود که در نهایت مشخص شد تأثیر این دو عامل بر روی نتایج قابل صرف نظر کردن می‌باشد. آن‌ها همچنین در پایان رابطه (۱) را برای پیش‌بینی مقدار استهلاک انرژی ارائه کردند.

$$\Delta E_r = \Delta E/E_0 = (E_0 - E_1)/E_0 = A + (1 - A) \cdot \exp(B_1 + C \cdot S)y_c/H_{dam} \quad (1)$$

که در آن، ΔE_r افت انرژی نسبی، E_0 انرژی کل در بالادست جریان، E_1 انرژی کل در انتهای تندآب، y_c عمق بحرانی، H_{dam} ارتفاع تندآب، S شیب بستر

جواب این پرسش دانست که آیا موانع مکعب مستطیلی مستغرق می‌توانند انرژی جنبشی را به‌طور مؤثری کاهش دهند یا خیر. از مزیت‌های این روش بر روش‌های قبلی همچون سرریز پلکانی، خطر کاویتاسیون کمتر که وجود آن موجب تخریب سازه می‌شود (Rahmanshahi و Shafai ۲۰۱۲) و اقتصادی‌تر بودن آن می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تحلیل ابعادی: به‌منظور دستیابی به اهداف این تحقیق، ابتدا به شناخت پارامترهای متعددی که در استهلاك انرژی این مدل مؤثر می‌باشند، اقدام شد. برای انتخاب پارامترهای مؤثر در این نوع تندآب از مطالعات صورت گرفته به‌وسیله سایر محققین در این زمینه استفاده شد. پس از آن با تجزیه و تحلیل و تحلیل ابعادی، رابطه کلی (۲) شامل پارامترهای بدون بعد استخراج شد.

$$\Delta E_r = f\left(\frac{y_c}{h}, \frac{y_c}{H_{dam}}, Re, We, \theta\right) \quad (2)$$

که در آن، ΔE_r افت انرژی نسبی، $Re = \frac{\rho V \lambda}{\mu}$ عدد رینولدز در بالادست تندآب، $We = \frac{\rho V^2 \lambda}{\sigma}$ عدد وبر، H_{dam} ارتفاع تندآب، h ، ارتفاع مانع ها و θ زاویه بستر تندآب با افق می‌باشد. با توجه به این‌که عدد رینولدز در محدوده انجام این آزمایش‌ها بیشتر از ۲۰۰۰ است، بنابراین، جریان در محدوده آشفته بوده، می‌توان از عدد رینولدز صرف‌نظر کرد (Chow، ۱۹۷۵). همچنین، با توجه به این‌که در این آزمایش‌ها کمینه ارتفاع آب روی سرریز ۵/۸ سانتی‌متر می‌باشد، می‌توان از اثرات عدد وبر نیز صرف‌نظر کرد (Cabelka و Novak، ۱۹۸۱). در نتیجه رابطه نهایی به‌صورت رابطه (۳) ساده می‌شود.

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = f\left(\frac{y_c}{h}, \frac{y_c}{H_{dam}}, \theta\right) \quad (3)$$

مدل آزمایشگاهی: کلیه مراحل انجام این آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده است. آزمایش‌ها در فلومی آزمایشگاهی به طول ۷/۵ متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر انجام گرفت. ارتفاع فلوم در قسمت ۲/۱ متر ابتدایی برابر با ۰/۸ متر و در ۵/۴ متر

تخته‌سنگ‌های نیم‌کره‌ای برآمده و افزایش اندازه آن‌ها افزایش و با افزایش دبی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که مقدار استهلاك انرژی در آرایش ردیفی نیم‌کره‌ها بیشتر از آرایش تصادفی آن‌ها می‌باشد.

Oertel (۲۰۱۱) سراسی‌های با تخت سنگ‌های ردیفی عرضی را مورد مطالعه قرار داد. در نتایج بدست آمده رژیم جریان بر روی تخت سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی شکل‌گیری جریان بر روی شیب و تخت سنگ‌ها و مقایسه ارتفاع آب به ارتفاع تخت سنگ‌ها رژیم جریان عبوری به سه نوع رژیم جریان حوضچه‌ای، موج و کانالی تقسیم‌بندی شد. همچنین، با مدل‌سازی عددی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی برای محاسبه نیروی درگ روابطی ارائه شد.

Rahmanshahi و Shafai (۲۰۱۲) تأثیر اندازه زبری بستر تندآب را بر میزان افت انرژی جنبشی آب، بررسی کردند. در کار پژوهشی آن‌ها آزمایش‌ها بر روی مدل فیزیکی در چندین شیب مختلف و با قرار دادن زبری‌های متفاوت با هدف افزایش میزان استهلاك انرژی انجام شد. میزان افت انرژی در نتایج بدست آمده در حدود ۱۲ تا ۴۸ درصد بیشتر نسبت به مدل با بستر صاف بود. در نهایت در این تحقیق، پس از شناسایی پارامترهای مؤثر (ارتفاع تندآب، قطر ذرات زبری و شیب تندآب)، یک رابطه عمومی بدون بعد برای پیش‌بینی میزان استهلاك انرژی در تندآب ارائه شد.

Das و همکاران (۲۰۱۴) آزمایش‌هایی با شیب‌های مختلف و میزان زاویه انقباض متفاوت به منظور بررسی میزان افت انرژی و بدست آوردن رابطه‌ای میان پارامترهای شیب و زاویه انقباض انجام دادند. نتایج حاصل کار آن‌ها نشان داد که با افزایش شیب، میزان استهلاك انرژی افزایش و با افزایش زاویه انقباض میزان استهلاك انرژی کاهش می‌یابد.

با توجه به کارهای تحقیقاتی انجام شده هدف تحقیق حاضر بررسی تأثیر موانع مکعب مستطیلی مستغرق بستر تندآب بر میزان استهلاك انرژی سازه می‌باشد. استفاده از موانع غیر مستغرق علاوه بر پراکندگی جریان می‌تواند دارای خطر کاویتاسیون نیز باشد. هدف اصلی این تحقیق را می‌توان رسیدن به

مورد بررسی قرار گرفت. میزان طول تندآب در تمامی آزمایش‌ها ۱۸۰ سانتی‌متر قرار داده شد. شکل ۱ تصاویری از مدل‌های آزمایشگاهی تندآب با بستر با مانع ساخته شده برای این تحقیق را نمایش می‌دهد. اندازه موانع مکعب مستطیلی استفاده شده $۱/۶ \times ۱/۶ \times ۲/۲۶$ است که ضلع جهت جریان آن $۲/۲۶$ می‌باشد. جنس این مصالح از پی‌وی‌سی بوده، با استفاده از برش لیزری ساخته شدند. تعداد ردیف‌های بلوک مورد استفاده در طول تندآب برابر با ۲۷ عدد می‌باشد. در شکل ۲، نحوه چیدمان موانع شامل آرایش قرارگیری و فواصل آن‌ها مشخص شده است. همچنین، شکل شماتیک مدل آزمایشگاهی تندآب و پارامترهای مربوط به آن، در شکل ۳ نشان داده شده است.

انتهایی $۰/۴$ متر می‌باشد. اندازه‌گیری دبی جریان به وسیله فلومتری که بر روی لوله خروجی پمپ قرار داشت، انجام گرفت. در ورودی لوله تغذیه کننده فلوم، شیر فلکه کنترل دبی جریان وجود داشت و برای آرام کردن جریان آب در ابتدای فلوم، از صفحات مشبک فلزی به همراه پوشال کولر استفاده شد. در این تحقیق، با هدف بررسی تأثیر اندازه موانع مستغرق بستر تندآب بر میزان استهلاک انرژی جنبشی جریان، با توجه به امکانات و محدودیت‌های آزمایشگاهی موجود، محدوده متغیرها مشخص شد. بنابراین، با ساخت مدل‌های آزمایشگاهی در چهار شیب مختلف یک به چهار، یک به پنج، یک به شش و یک به هشت و قرار دادن موانع در بستر میزان استهلاک انرژی سازه در این نوع تندآب، در مدل بدون مانع و مدل با مانع

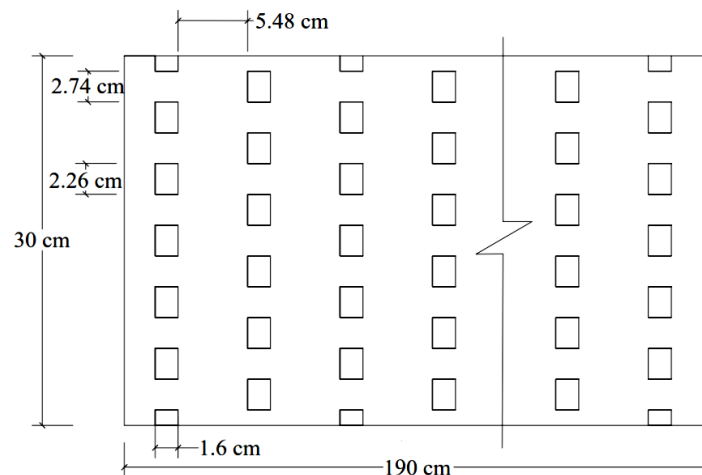


(ب)

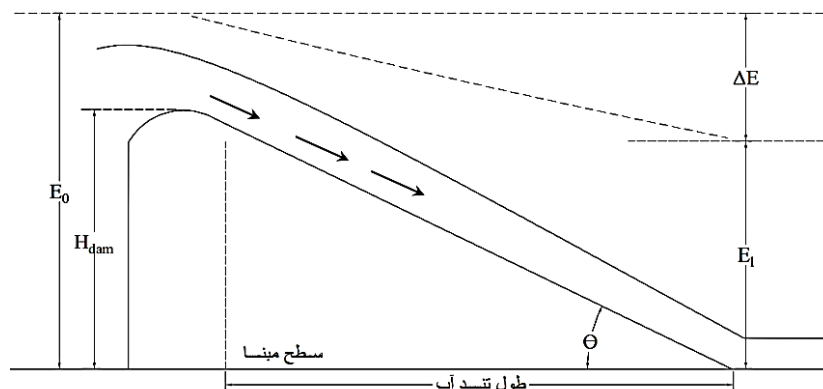


(الف)

شکل ۱- مدل آزمایشگاهی تندآب با بستر با مانع، (الف) نمای جانبی و (ب) نمای از پایین دست تندآب



شکل ۲- نحوه چیدمان و فاصله‌های بلوک‌های قرار داده شده در تندآب



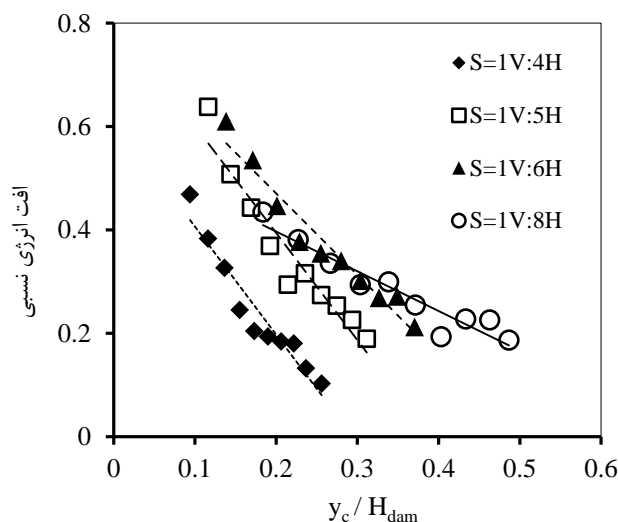
شکل ۳- معرفی تندآب و اجزا آن

نتایج و بحث

بررسی استهلاک انرژی در مدل بدون مانع:

مطابق شکل ۴، بررسی استهلاک انرژی در همه مدل‌های بدون مانع نشان می‌دهد، مقدار استهلاک انرژی در همه شیب‌ها با افزایش نسبت $\frac{y_c}{H_{dam}}$ دارای روند نزولی می‌باشد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که با کاهش شیب بستر روند کاهش استهلاک انرژی با نرخ کمتری اتفاق می‌افتد. به‌طور کلی میزان

استهلاک انرژی در این مدل‌ها نسبت به انرژی بالادست در محدوده دبی‌های این تحقیق، از ۱۰ تا ۶۳ درصد انرژی نسبی بالادست می‌باشد. همچنین، با مقایسه شیب‌های مختلف از لحاظ $\frac{y_c}{H_{dam}}$ یکسان، می‌توان عنوان کرد که شیب یک به شش دارای بیشترین میزان افت انرژی نسبی و شیب یک به چهار دارای کمترین میزان افت انرژی نسبی است.



شکل ۴- مقایسه استهلاک انرژی در مدل‌های بدون مانع با شیب مختلف

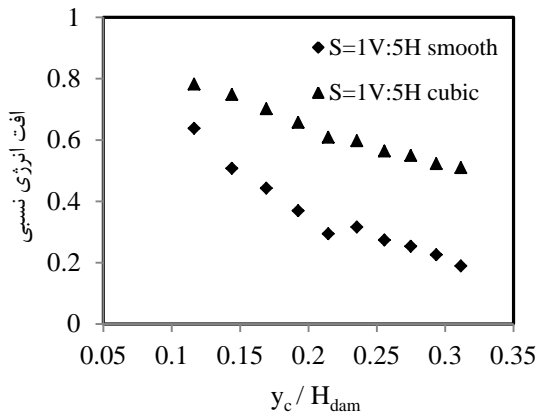
بررسی استهلاک انرژی در مدل‌های با مانع:

شکل ۵، مقدار استهلاک انرژی در مقابل نسبت $\frac{y_c}{H_{dam}}$ برای مدل‌های بدون مانع و مدل‌های با مانع ترسیم شده است. مطابق نتایج در تمام قسمت‌های مربوط به شکل ۵ استهلاک انرژی در مدل‌های با مانع نسبت به مدل‌های بدون مانع قابل توجه می‌باشد. این میزان

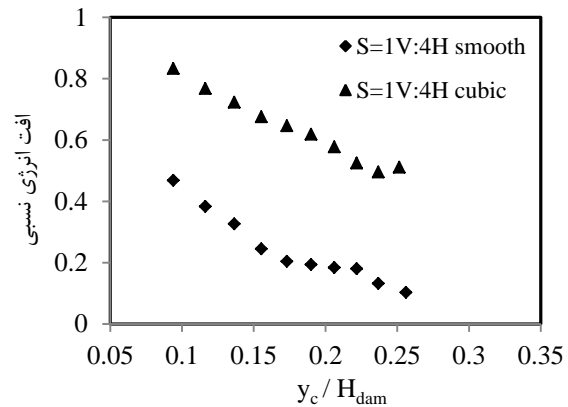
اختلاف استهلاک انرژی بین ۱۷ تا ۴۴ درصد انرژی نسبی بالادست است. از دیگر نتایج به‌دست آمده می‌توان مشخص کرد که در همه شیب‌ها روند استهلاک انرژی به صورت نزولی و تقریباً خطی می‌باشد. همچنین، می‌توان عنوان کرد که با افزایش y_c که $y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}$ (افزایش $\frac{y_c}{H_{dam}}$ در یک شیب خاص

به طور کلی می‌توان چنین برداشت کرد که با در نظر گرفتن $\frac{y_c}{H_{dam}}$ یکسان، در مجموع شیب یک به هشت دارای بیشترین استهلاک انرژی نسبی و شیب یک به چهار دارای کمترین میزان استهلاک انرژی نسبی می‌باشد. علاوه بر این، نرخ کاهش استهلاک انرژی با کاهش شیب بستر نیز کاهش می‌یابد.

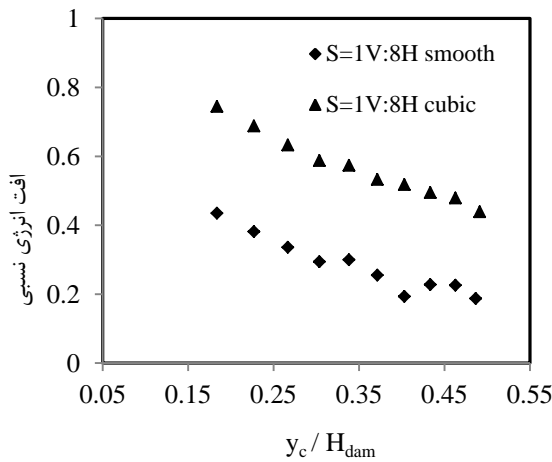
در واقع نشان‌دهنده افزایش دبی است)، نیروی درگ کل (عامل مقاوم جریان برای کاهش انرژی) کم شده، در نتیجه استهلاک انرژی کمتری اتفاق می‌افتد. در شکل ۶، استهلاک انرژی در مدل‌های با موانع مکعب مستطیلی در شیب‌های چهارگانه یک به چهار تا یک به هشت با هم مقایسه شده‌اند. مطابق شکل ۶،



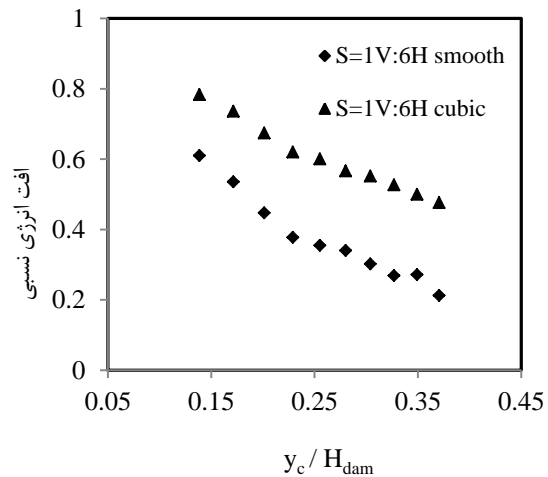
(ب) شیب ۱ به ۵



(الف) شیب ۱ به ۴



(د) شیب ۱ به ۸

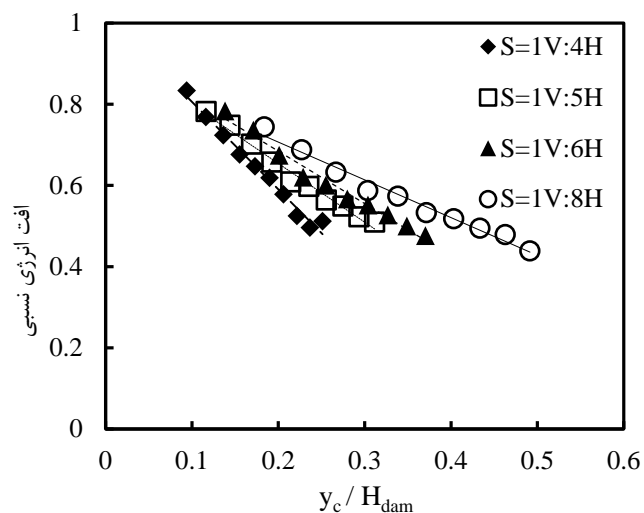


(ج) شیب ۱ به ۶

شکل ۵- مقایسه استهلاک انرژی در مدل‌های با بستر مانع‌دار و مدل بدون مانع با شیب‌های مختلف

ادامه نیز جدول ۳، دامنه تغییرات پارامترهای مورد استفاده و اندازه‌گیری شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۱، خلاصه نتایج استهلاک انرژی نسبی انرژی و جدول ۲، درصد افزایش استهلاک انرژی نسبی مدل‌های با مانع را نسبت به مدل‌های بدون مانع برای شیب و دبی‌های مختلف نشان می‌دهند. در



شکل ۶- مقایسه استهلاك انرژی در مدل‌های با بستر مانع‌دار در شیب‌های مختلف

جدول ۱- نتایج محاسبات مقدار استهلاك انرژی نسبی (درصد) در شیب‌ها مختلف و دبی‌های مختلف

میزان دبی ($lit\ s^{-1}$)										نوع بستر	شیب
۳۶	۳۲	۲۹	۲۶	۲۳	۲۰	۱۷	۱۴	۱۱	۸		
۱۰/۲۸	۱۳/۲۳	۱۸/۰۶	۱۸/۴	۱۹/۳۷	۲۰/۴۴	۲۴/۵۱	۳۲/۶۶	۳۸/۳۲	۴۶/۸۷	بدون مانع	۴ به ۱
۵۱/۱۵	۴۹/۵۷	۵۲/۴۶	۵۷/۷۷	۶۱/۸۶	۶۴/۶۷	۶۷/۵۹	۷۲/۳۴	۷۶/۸۳	۸۳/۳۵	بامانع	۴ به ۱
۱۸/۹۴	۲۲/۵۹	۲۵/۳۶	۲۷/۳۸	۲۷/۶۲	۲۹/۴	۳۶/۹۱	۴۴/۳۱	۵۰/۷۷	۶۳/۷۹	بدون مانع	۵ به ۱
۵۰/۹۷	۵۲/۲۸	۵۴/۹۲	۵۶/۴۱	۵۹/۷۶	۶۰/۸۷	۶۵/۷۵	۷۰/۱۸	۷۴/۸۱	۷۸/۲۲	بامانع	۵ به ۱
۲۱/۲۳	۲۷/۱۴	۲۶/۸۶	۳۰/۱۷	۳۴/۰۲	۳۵/۴۷	۳۷/۷۵	۴۴/۶۸	۵۳/۵۲	۶۱/۰۱	بدون مانع	۶ به ۱
۴۷/۶۲	۴۹/۸۶	۵۲/۶۸	۵۵/۱۶	۵۶/۶۴	۶۰/۰۴	۶۲	۶۷/۳۹	۷۳/۶	۷۸/۳۳	بامانع	۶ به ۱
۱۸/۷	۲۲/۵۹	۲۲/۷۷	۱۹/۳۳	۲۵/۴۹	۲۹/۹۵	۲۹/۴۱	۳۳/۵۶	۳۸/۱۵	۴۳/۴۵	بدون مانع	۸ به ۱
۴۳/۸۷	۴۷/۸۸	۴۹/۴۸	۵۱/۷۸	۵۳/۲۸	۵۷/۳۴	۵۸/۷۴	۶۳/۲۷	۶۸/۷۸	۷۴/۴۳	بامانع	۸ به ۱

جدول ۲- افزایش استهلاك انرژی (درصد) در مدل‌های با مانع نسبت به مدل‌های بدون مانع شیب‌های مختلف

میزان دبی ($l\ s^{-1}$)										شیب
۳۶	۳۲	۲۹	۲۶	۲۳	۲۰	۱۷	۱۴	۱۱	۸	
۴۰/۸۷	۳۶/۳۴	۳۴/۴	۳۹/۳۷	۴۲/۴۹	۴۴/۲۳	۴۳/۰۸	۳۹/۶۸	۳۸/۵۱	۳۶/۴۸	۴ به ۱
۳۲/۰۳	۲۹/۶۹	۲۹/۵۶	۲۹/۰۳	۳۲/۱۴	۳۱/۴۷	۲۸/۸۴	۲۵/۸۷	۲۴/۰۴	۴۳/۱۴	۵ به ۱
۲۶/۳۹	۲۲/۸۲	۲۵/۸۲	۲۴/۹۹	۲۲/۶۲	۲۴/۵۷	۲۴/۲۵	۲۲/۷۱	۲۰/۰۸	۱۷/۳۲	۶ به ۱
۲۵/۱۷	۲۵/۲۹	۲۶/۷۱	۳۲/۴۵	۲۷/۷۹	۲۷/۳۹	۲۹/۳۳	۲۹/۷۱	۳۰/۶۳	۳۰/۹۸	۸ به ۱

جدول ۳- دامنه تغییرات پارامترهای مورد استفاده و اندازه‌گیری شده

S	$\frac{y_c}{H_{dam}}$	$\frac{y_c}{h}$	Fr پنجه سرریز	Re بالادست	Q ($lit.\ s^{-1}$)	محدوده
						تغییرات
۰/۱۲۵	۰/۰۹	۲/۶	۲/۰۶	۲۲۰۰۰	۸	حداقل
۰/۲۵	۰/۴۹	۷/۱	۶/۷۵	۹۴۰۰۰	۳۵	حداکثر

که در آن‌ها ΔE_r مقدار افت نسبی انرژی، $\frac{y_c}{H_{dam}}$ نسبت عمق بحرانی به ارتفاع شوت و θ زاویه بستر تندآب با افق می‌باشد.

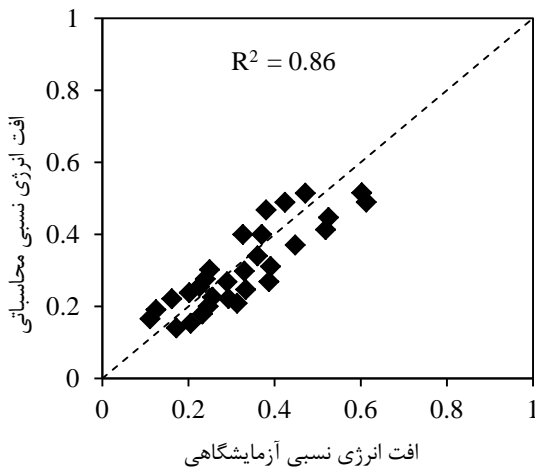
به منظور تعیین اعتبار روابط استخراجی می‌بایست نتایج حاصل از روابط استخراج شده و نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار بگیرند. در ابتدا نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی مربوط به مدل‌های بدون مانع و رابطه (۴) در شکل ۷-الف مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در این شکل، مقدار استهلاک انرژی محاسبه شده، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بر روی محور افقی و مقدار استهلاک انرژی محاسبه شده، از رابطه (۴) بر روی محور قائم مشخص شده‌اند. پراکندگی نقاط نسبت به خط ۴۵ درجه نشان می‌دهد که مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی دارای همبستگی نسبتاً خوبی هستند. مقدار ضریب تبیین (R^2) با استفاده از روش‌های آماری برابر با ۹۵ درصد و سطح معنی‌داری برابر با ۰/۰۱ به دست آمد.

استخراج رابطه‌ای برای پیش‌بینی استهلاک

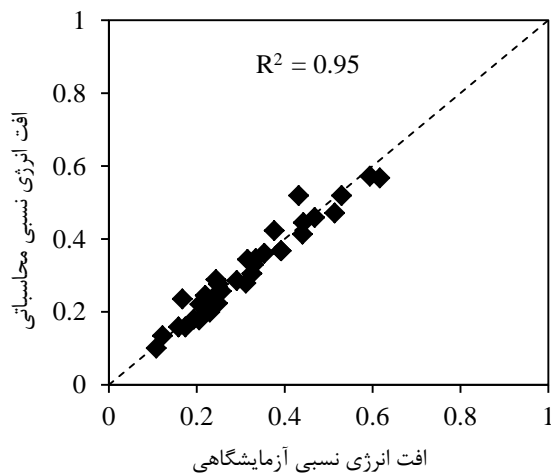
انرژی: در ادامه با توجه به تحلیل ابعادی صورت گرفته، به منظور بررسی اثر متقابل پارامترهای بدون بعد مؤثر استخراج شده بر روی مقدار افت انرژی نسبی و ارائه یک رابطه ریاضی برای پیش‌بینی این مقادیر، از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شده است. در نتیجه این کار، روابط (۴) و (۵) به ترتیب برای تندآب بدون مانع و با مانع پس از تحلیل‌های متعدد استخراج شد.

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = 175.48 - 175.56 \times \left(\frac{y_c}{H_{dam}}\right)^{0.002} - 219.33 \times (\tan(\theta))^{4.78} \Rightarrow R^2 = 0.95 \quad (۴)$$

$$\Delta E_r = \frac{\Delta E}{E_0} = -0.115 + \exp(-12.225 \times \frac{y_c}{H_{dam}} + 0.854 \times \tan(\theta)) \Rightarrow R^2 = 0.95 \quad (۵)$$



(ب)



(الف)

شکل ۷- مقایسه بین استهلاک انرژی نسبی آزمایشگاهی و محاسبه شده برای مدل بدون مانع (الف) رابطه (۴)، (ب) رابطه مربوط به Pagliara و همکاران (۲۰۰۹)

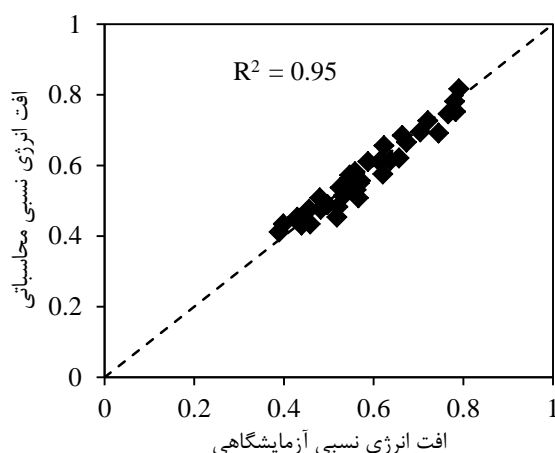
انرژی نسبی محاسباتی حاصل از رابطه (۱) قرار گرفته است. مقدار ضریب تبیین مربوط به رابطه (۴) برابر با ۹۵ درصد و ضریب تبیین مربوط به رابطه (۱) برابر با ۸۶ درصد به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان دهنده برتری دقت رابطه (۴) نسبت به رابطه (۱) می‌باشد.

در شکل ۸، نتایج محاسباتی از آزمایشگاه و نتایج محاسباتی از رابطه (۵) برای مدل‌های تندآب با بستر

در شکل ۷، رابطه ارائه شده (۴) با رابطه (۱) (رابطه مربوط به Pagliara و همکاران (۲۰۰۹)) مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این منظور، در شکل ۷ قسمت الف، مقادیر افت انرژی نسبی آزمایشگاهی مربوط به مدل‌های بدون مانع در مقابل مقادیر افت انرژی نسبی محاسباتی حاصل از رابطه (۴) و در شکل ۷ قسمت ب نیز مقادیر افت انرژی نسبی آزمایشگاهی مربوط به مدل‌های بدون مانع در مقابل مقادیر افت

می‌باشد. مقدار ضریب تبیین با استفاده از روش‌های آماری برابر با ۹۵ درصد و سطح معنی‌داری برابر با ۰/۰۱ به‌دست آمد.

با موانع نسبت به خط ۴۵ درجه مقایسه شده‌اند. مطابق شکل، این رابطه نیز دارای دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی استهلاک انرژی در این نوع تندآب



شکل ۸- مقایسه استهلاک انرژی نسبی آزمایشگاهی و محاسباتی از رابطه (۵) برای مدل با موانع

نتایج مدل‌های با موانع و مقایسه آن‌ها نسبت به مدل‌های بدون مانع، میزان استهلاک انرژی افزایش ۱۷ تا ۴۴ درصدی را نشان داد. در مدل‌های با موانع نیز با مقایسه افت انرژی در شیب‌های مختلف، می‌توان به این نتیجه رسید که با کاهش شیب بستر تندآب، میزان افت انرژی نسبی افزایش و روند کاهش افت انرژی با شیب کمتری اتفاق می‌افتد. در پایان، با استفاده از رگرسیون‌گیری غیرخطی چند متغیره، روابطی در تندآب با بستر با و بدون مانع برای محاسبه میزان افت نسبی انرژی استخراج شد. میزان ضریب تبیین برای هر دو رابطه ارائه شده در مدل‌های بدون مانع و با مانع برابر ۹۵ درصد به‌دست آمد که نشان‌دهنده هم‌پوشانی خوب روابط استخراجی با نتایج آزمایشگاهی است.

نتیجه‌گیری

هدف تحقیق حاضر بررسی اثر موانع مستغرق بستر تندآب بر استهلاک انرژی در شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف می‌باشد. برای این منظور، آزمایش‌های مختلفی در تندآب با چهار شیب مختلف با و بدون وجود موانع انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که در بین نمونه‌های آزمایش شده در مدل‌های بدون مانع کمترین میزان استهلاک انرژی نسبت به انرژی بالادست مربوط به شیب یک به چهار با ۱۰ درصد و بیشترین مربوط به شیب یک به پنج با ۶۳ درصد است. با مقایسه افت انرژی در شیب‌های مختلف، می‌توان به نتیجه رسید که با کاهش شیب بستر تندآب، افت انرژی نسبی افزایش و روند کاهش افت انرژی با شیب کمتری اتفاق می‌افتد. با ایجاد موانع در تندآب میزان استهلاک انرژی افزایش یافت. با بررسی

منابع مورد استفاده

1. Chamani, M.R. and N. Rajaratnam. 1999a. Onset of skimming flow on stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125: 969-971.
2. Chamani, M.R. and N. Rajaratnam. 1999b. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125: 361-368.
3. Chow, V.T. 1975. Open channel hydraulics. McGraw-Hill Book Company, 1:1-680.
4. Christodoulou, G.C. 1993. Energy dissipation on stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119: 644-649.

5. Das, R., D. Pal, S. Das and A. Mazumdar. 2014. Study of energy dissipation on inclined rectangular contracted chute. *Arabian Journal for Science and Engineering (Springer Science and Business Media BV)*, 39: 6995–7002.
6. Diez, C.J., J.L. Blanco, J. Revilla and R. Garcia. 1991. Studies on the hydraulic behavior of stepped spillways. *Water Power Dam Construction*, 43: 22-26.
7. Oertel, M. 2011. Strömungsvisualisierung auf Blocksteinrampen in Riegelbauweise. *Wasserwirtschaft*, 101: 34-44.
8. Pagliara, S and P. Chiavaccini. 2006a. Energy dissipation on block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132: 41-48.
9. Pagliara, S and P. Chiavaccini. 2006b. Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 128: 545-553.
10. Pagliara, S., N. Carnacina and M. Palerm. 2009. Energy dissipation in presence of block ramps with enlarged stilling basins. *Water Engineering for a Sustainable Environment*, 33: 4-9.
11. Peyras, L., P. Royet and G. Degoutte. 1992. Flow and energy dissipation over stepped gabion weirs. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 118: 707-717.
12. Platzer, G. 1983. Die Hydraulik der breiten Blochsteinramp, rampenbeigung 1:10. *Bundesanstalt*, 10: 55-65.
13. Rahmanshahi, M. and M. Shafai. 2012. Experimental investigation of the effect of chute bed roughness height on energy dissipation. *Journal of Water and Soil Science*, 22: 95-106. (in Persian).
14. Stephenson, D. 1991. Energy dissipation down stepped spillways. *International Water Power and Dam Construction*, 43: 27–30.
15. Zulfeqar, A., M.P. Nadimetla and W. Bernhard. 2009. Energy dissipation on block ramps with staggered boulders. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 135: 522-526.