

## بررسی عددی تأثیر زبری بستر بر استهلاك انرژی و کاویتاسیون در سرریزهای شوت

حسین نوری حسن آبادی<sup>۱</sup>، محمدرضا کاویانپور<sup>۲\*</sup>، امیر خسرو جردی<sup>۱</sup> و حسین بابازاده<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲۳)

### چکیده

استفاده از زبری پیوسته در بستر تنداب در شرایط برابر با روش‌های متداول استهلاك انرژی مانند حوضچه‌های آرامش، سرریزهای پلکانی، پرش اسکی و استقرار موانع در بستر تنداب می‌تواند روشی کارآمد برای افزایش استهلاك انرژی جریان در این سازه‌ها باشد. در این پژوهش تأثیر زبری بستر تنداب بر میزان استهلاك انرژی جنبشی جریان مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، رابطه عمومی بدون بعد توسعه داده شده و پس از واسنجی حل عددی با نتایج آزمایشگاهی، میزان استهلاك انرژی سازه در سه شیب ۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ درجه، با شش زبری ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷۲، ۰/۰۱۱۱، ۰/۰۱۶ و ۰/۰۲۲ متر و بدون زبری (شاهد) و سه دبی ۰/۰۷، ۰/۰۹ و ۰/۱۱ متر مکعب بر ثانیه، بررسی شد. بر اساس نتایج حاضر با ایجاد زبری ممتد در بستر تنداب، استهلاك انرژی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش شیب تنداب، نسبت استهلاك انرژی در طول سرریز زبر به سرریز صاف افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار استهلاك انرژی نسبی در حضور زبری، مربوط به شیب ۲۲/۵ درجه و برای زبری ۲۲/۲ میلی‌متر (۰/۸۵٪) بوده و کمترین استهلاك انرژی نسبی نیز در حالت شاهد (۰/۲۵٪) مشاهده شد. بنابراین، استفاده از بستر تنداب طبیعی بدون پوشش بتنی، از جنبه محیط‌زیست و قابلیت استهلاك انرژی، قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: سرریز شوت، حل عددی، استهلاك انرژی، بستر زبر

۱. گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: kavianpour@kntu.ac.ir

## مقدمه

می‌شود. استقرار موانع و ایجاد زبری در بستر از جمله اقدامات دیگر برای استهلاک انرژی است. از دیرباز سرریزهای خشکه چین و یا گابیونی در بستر رودخانه‌های آبرفتی مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. استفاده از زبری‌های طبیعی در بستر تنداب ممکن است بتواند در شرایطی برابر با دیگر روش‌ها، روشی کارآمد برای افزایش افت انرژی در طول سرریز باشد. از طرف دیگر، با توجه به این نکته که مصالح استفاده شده در بستر تنداب از مصالح طبیعی بستر تأمین می‌شوند، علاوه بر این‌که دوست‌دار محیط‌زیست است، هزینه ساخت سازه را نیز کاهش داده و با داشتن قابلیت خوب افت انرژی، به‌صرفه‌تر خواهد بود. در این پژوهش اثر اندازه زبری بستر بر میزان استهلاک انرژی و وقوع کاویتاسیون روی سرریز با شیب و دبی مختلف بررسی شده است. زبری به‌صورت یکنواخت، ممتد طولی و عرضی در بستر تنداب مدنظر قرار گرفته است.

## پیشینه پژوهش

رفتار هیدرولیکی جریان عبوری از روی سرریز دارای زبری (بستر سنگی) مشابه جریان رویه‌ای بر روی سرریز پلکانی است. در رژیم جریان رویه‌ای، جریان به‌صورت چسبیده به روی لبه پله‌ها است. در این رژیم، لبه پله‌ها به‌صورت کف کاذب با زبری منظم عمل می‌نمایند. قسمت عمده‌ای از استهلاک انرژی سازه در رژیم جریان رویه‌ای در نتیجه انتقال تنش برشی از جریان روی کف کاذب به جریان چرخشی محصور در فضای گوه‌ای بین پله‌ها و حفظ چرخش آن صورت می‌گیرد (۶). سورنسن (۳۴) از اولین پژوهشگرانی بود که بر روی سرریز پلکانی پژوهش کرد. وی با استفاده از مدل آزمایشگاهی، میزان افت انرژی، پروفیل سرعت و عمق آب بر روی سرریز اوجی و پلکانی را مقایسه کرد و نتیجه گرفت که افت انرژی جریان در طول سرریز پلکانی منجر به کوچک‌شدن سازه مستهلک‌کننده انرژی در پایین‌دست می‌شود. چمنی و راجاتنام (۵) آزمایش‌هایی بر روی سرریز پلکانی با شیب وجه پایین‌دست ۵۹ درجه انجام دادند و مقدار افت انرژی را تعیین

سرریزها سازه‌های متداول برای عبور ایمن جریان مازاد ورودی به سدها هستند. تنداب، کانال روباز بتنی با شیب تند است که جریان را با سرعت بالا به پایاب منتقل می‌کند (۴). انرژی جنبشی این جریان‌ها یکی از چالش‌های طراحان است، زیرا می‌تواند باعث خسارات جدی به سطوح سازه‌ها و آبستگي پایین‌دست این سازه‌ها شود. با افزایش سرعت جریان، فشار کاهش می‌یابد و همین موضوع سبب وقوع پدیده کاویتاسیون و خسارات سازه‌ای می‌شود (۱۴، ۱۷ و ۲۹). وقوع این پدیده در نزدیکی یک مرز جامد (مانند سطح بتن در یک سرریز)، سبب ایجاد خستگی، شکست و جداشدن تکه‌های مصالح سطح سازه شده و خسارات جبران‌ناپذیری را به سازه تحمیل می‌نماید (۱۸، ۲۲ و ۲۴). تا مدت‌ها تنها معیار اساسی عین احتمال وقوع کاویتاسیون، سرعت بحرانی بود. آیزنهاور (۱۵) سرعت بحرانی را برای شروع وقوع کاویتاسیون بین ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه پیشنهاد کرد. این معیار تأثیر فشار و خرابی‌های شدید غیرعادی در پایین‌دست قوس‌های قائم را توجیه نمی‌کرد. بنابراین، برای تشخیص حساسیت سازه به فروپاشی حباب‌های ایجادشده، از پارامتر بی‌بعد شاخص کاویتاسیون بهره گرفته شد که از رابطه برنولی به شکل زیر مشتق و تعریف می‌شود:

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $\sigma$  شاخص کاویتاسیون؛  $P_0$ ، فشار مطلق سیال در محل موردنظر؛  $P_v$ ، فشار بخار سیال (آب) و  $V_0$ : سرعت جریان در محل است. فالوی (۱۶) پژوهشی را بر اساس خرابی چند سرریز ارائه داد که امروزه معیاری برای بررسی این شاخص است. بر اساس نتایج وی برای  $\sigma > 0.2$ ، خطری سازه را تهدید نمی‌کند، برای  $0.1 < \sigma < 0.2$  اعمال راهکارهای جلوگیری از خطر و نصب هواده ضروری و در شرایط  $\sigma < 0.1$ ، سرریز باید دوباره طراحی شود.

استهلاک انرژی سرریز سدها به‌طور معمول توسط حوضچه‌های آرامش، سرریزهای پلکانی و پرش اسکی انجام

می‌یابد. مطالعه آنها نشان داد که اثر مقیاس و عدد رینولدز بر نتایج ناچیز است و رابطه زیر را برای پیش‌بینی مقدار افت انرژی نسبی توصیه کردند.

$$\Delta E_{r1} = \frac{\Delta E}{E_0} = A + (1-A) \frac{y_c}{H} e^{(B_1 + C.S)} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $\Delta E_{r1}$ : افت نسبی انرژی نسبی؛  $\Delta E$ : افت انرژی بین ابتدا و انتهای شیب ( $\Delta E = E_0 - E_1$ )؛  $y_c$ : عمق بحرانی؛  $H$ : ارتفاع تنداب؛  $S$ : شیب بستر با افق و ضرایب  $A$ ،  $B_1$  و  $C$ : ضرایب وابسته به اندازه زبری است.

پالیا و واچینی (۲۷) به بررسی مقاومت جریان در بستر شیب‌های سنگی (Ramp Block) با استفاده از گوی‌های فلزی با پوشش آلومینیمی پرداختند. در آزمایش‌های آنها نحوه قرارگیری این گوی‌ها به دو صورت ردیفی و تصادفی بودند. نتایج نشان داد که این گوی‌ها با افزایش مقاومت جریان، کاهش سرعت جریان و به دنبال آن، کاهش تنش برشی وارد شده بر مواد بستر، سبب پایداری بیشتر شیب‌های سنگی می‌شوند. با حضور زبری‌ها، عمق جریان نسبت به بستر صاف بیشتر می‌شود. همچنین، تأثیر شیب بر افزایش مقاومت جریان تا حد ۰/۳۲ ناچیز، ولی در شیب‌های بالاتر مقاومت جریان افزایش سریع می‌یابد. پالیا و همکاران (۲۸) به ارزیابی افت انرژی در حوضچه پایین‌دست یک تنداب سنگی پرداختند. آزمایش‌های آنها در شرایط هندسی و هیدرولیکی و شیب‌های مختلف تنداب و اندازه‌های مختلف مصالح بستر انجام و روند استهلاک انرژی و آبشستگی حوضچه آرامش با بستر متحرک بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش اندازه زبری، مقاومت جریان و به دنبال آن، افت انرژی افزایش می‌یابد و رابطه‌ای نیز جهت پیش‌بینی مقدار افت انرژی ارائه کردند.

احمد و همکاران (۲) با انجام آزمایش‌هایی به بررسی اثر زبری نیمکره‌ای شکل روی بستر بر استهلاک انرژی روی شیب‌های سنگی با آرایش‌های مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که استهلاک انرژی در بستر زبر بیشتر از بستر صاف بوده و با

کردند. نتایج پژوهش‌های آنها نشان داد که میزان افت انرژی نسبی در رژیم جریان رویه‌ای بین ۴۸ تا ۶۳ درصد تغییر می‌نماید. احمدیار و بیات (۳) براساس آزمایش‌ها و تحلیل‌های خود در سرریزهای پلکانی نتیجه گرفتند که میزان قابل توجهی از انرژی در طول سرریز مستهلک، و در نتیجه، ابعاد حوضچه آرامش کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۰۴ تغییر زبری کف کانال توسط خاتسورا مورد مطالعه و شبیه‌سازی قرار گرفت که نتایج آن بیانگر افزایش ضریب مقاومت در پدیده اتلاف انرژی است (۲۳). همچنین بررسی جریان آب عبوری از مقطع یا سطح زبر، تأثیر قابل توجه آن بر پراکنش انرژی را تأیید کرد (۲۰).

مطالعاتی نیز به طور خاص برای تعیین رابطه بین مقدار افت انرژی و مشخصات شیب‌های سنگی نیز صورت گرفته است. علاوه بر استهلاک انرژی، پایداری و آستانه شکست شیب‌های سنگی توسط ودیکر و جاجی (۱۹۸۶)، رابینسون و همکاران (۱۹۹۷) و پالیا و چیاواچینی (۲۰۰۳) در شرایط مختلف آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت (۲۸، ۳۳ و ۳۶). مطالعات گذشته در این سازه‌ها بیشتر بر موضوع پایداری زبری‌ها متمرکز بوده و اندک به استهلاک انرژی به خصوص در شیب‌های با زبری‌های ناپایدار توجه شده است. پترکا (۳۰) به بررسی هیدرولیکی تنداب با موانع غیر مستغرق پرداخت. رون (۳۲) به بررسی تنداب مانع‌دار به عنوان سازه اتلاف انرژی پرداخت و نشان داد که ساختار و هندسه موانع بر جریان مؤثر است. پالیا و واچینی (۲۷) با ساخت مدل‌هایی از مصالح سنگی با اندازه‌های متفاوت به صورت خشکه‌چین در شیب‌های مختلف (۱:۴ تا ۱:۱۲) افت انرژی بر روی شیب‌های سنگی را بررسی کردند. در این مطالعه آرایش چیدمان سنگ‌ها بر پایداری تنداب و استهلاک انرژی بررسی و برای بررسی اثر مقیاس بر افت انرژی، از فلوم‌های با عرض مختلف (۰/۲۵ تا ۰/۸ متر) استفاده کردند. آزمایش‌های آنها در سه اندازه ریزدانه، متوسط و درشت‌دانه انجام گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش اندازه زبری، مقاومت جریان و به دنبال آن افت انرژی افزایش

گراژروی آب؛  $g$ : شتاب ثقل؛  $\theta$ : زاویه بستر سرریز با افق و  $x$ : فاصله افقی از شروع تاج سرریز است. در پژوهش حاضر از ذرات با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شد. بنابراین، قطر متوسط ذرات به‌عنوان پارامتر مؤثر مورد توجه قرار گرفت. شکل ۱ طرح کلی مدل فیزیکی مورد استفاده را نشان می‌دهد. به‌منظور محاسبه اتلاف انرژی، ابتدا انرژی کل جریان در مقطعی در بالادست و پایین‌دست سرریز که به‌ترتیب برابر با  $E_0$  و  $E_1$  و مطابق با روابط ۴ و ۵ است، محاسبه و سپس، اتلاف انرژی نسبی جریان عبوری از سرریز شوت با استفاده از معادله برنولی بین این مقاطع مطابق با رابطه ۶ تعیین می‌شود.

$$E_0 = H_w + y_0 + \frac{V_0^2}{2g} = H_w + y_0 + \frac{q^2}{2g(H_w + y_0)} \quad (4)$$

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{E_0 - E_1}{E_0} = \left(1 - \frac{E_1}{E_0}\right) \times 100 \quad (6)$$

در این روابط  $q$ : دبی در واحد عرض شوت؛  $H_w$ : ارتفاع شوت؛  $y_0$  و  $y_1$ : ارتفاع آب در بالادست و پایین‌دست شوت هستند.

با به‌کارگیری آنالیز ابعادی و با استفاده از روش  $\pi$  باکینگهام، رابطه کلی زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f\left(Fr, Fr_c, Re, \frac{x}{y_c}, \theta\right) \quad (7)$$

$$\rightarrow \phi\left(\frac{\Delta E}{E_0}, Fr, Fr_c, Re, \frac{x}{y_c}, \theta\right) = 0$$

در این رابطه،  $Fr = V/\sqrt{gy}$ : عدد فرود؛  $Fr_c = V/\sqrt{gD_{50}}$ : عددی فرود زبری و  $Re = \rho VR/\mu$ : عدد رینولدز جریان است. عدد رینولدز در محدوده انجام این آزمایشات بیشتر از ۲۰۰۰ است ( $2.69 \times 10^3 \leq Re \leq 2.72 \times 10^4$ ) و بنابراین، از تأثیر عدد رینولدز صرف‌نظر شد (۳۴). جهت انجام پژوهش حاضر از یک مدل با سامانه بسته گردش آب در آزمایشگاه هیدرولیک مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو استفاده شد که طرح و نمای آن در شکل ۲ نمایش داده شده است. این مدل آزمایشگاهی شامل فلوم، سامانه تأمین و سامانه اندازه‌گیری جریان، سرریز لبه

افزایش تراکم و اندازه زبری‌ها افزایش یافته و با افزایش دبی کاهش می‌یابد. رحمانشاهی و شفافی بجستان (۳۱) تأثیر اندازه زبری بستر تنداب بر میزان استهلاك انرژی جنبشی را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های آنها بر روی مدل‌های فیزیکی در سه شیب مختلف با سه نوع زبری با اندازه‌های متفاوت و دانه‌بندی تقریباً یکنواخت روی بستر انجام شد. نتایج نشان داد که در تنداب با بستر زبر، میزان استهلاك انرژی از ۱۲ تا ۴۸ درصد نسبت به مدل با بستر صاف افزایش می‌یابد. احمد و اسریسواستاوا (۱) به‌منظور بررسی نیمرخ سطح آب و اتلاف انرژی بر روی سرریز، یک مطالعه آزمایشگاهی روی سرریز با زبری‌های بزرگ انجام دادند. همچنین دانشفراز و همکاران نیز پژوهش‌های گسترده‌ای در ارتباط با استهلاك انرژی و تأثیر زبری در آن انجام داده‌اند (۷ تا ۱۳).

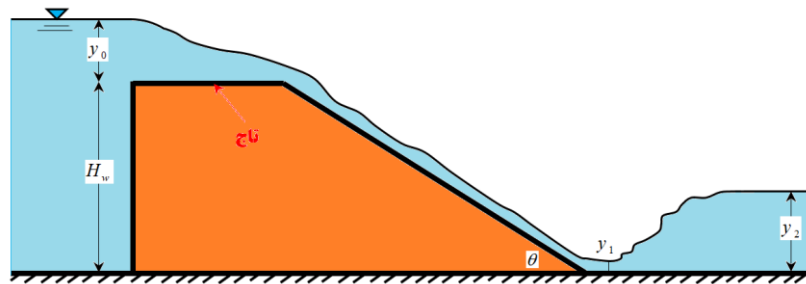
با توجه به جمع‌بندی مطالب، در این پژوهش مطالعه سیستماتیکی عددی با پشتوانه مطالعه آزمایشگاهی، جهت بررسی تأثیر اندازه زبری بستر، دبی و شیب تنداب بر استهلاك انرژی و شاخص کاویتاسیون در ۳ شیب ۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ درجه، ۵ زبری با دانه‌بندی تقریباً یکنواخت ۵/۱، ۷/۲، ۱۱/۱، ۱۶ و ۲۲/۲ میلی‌متر، مدل شاهد (بدون زبری) و ۳ دبی ۰/۰۷، ۰/۰۹ و ۰/۱۱ مترمکعب بر ثانیه انجام شد.

## مواد و روش‌ها

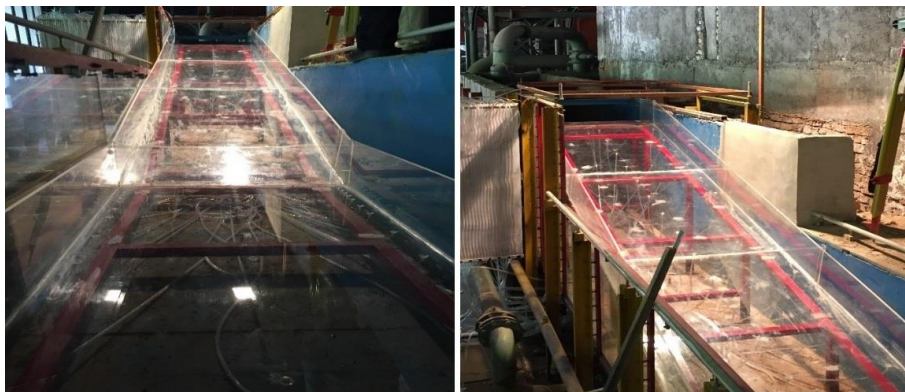
به‌منظور دستیابی به اهداف این پژوهش، پارامترهای متعدد مؤثر در استهلاك انرژی در طول سرریز شناسایی و سپس با تجزیه و تحلیل ابعادی، رابطه کلی شامل پارامترهای بدون بعد مؤثر استخراج شد که در رابطه ۳ بیان شده‌اند:

$$f\left(Q, \frac{\Delta E}{E_0}, D_{50}, y_c, \mu, \rho, g, \theta, x\right) = 0 \quad (3)$$

که در این رابطه،  $Q$ : دبی عبوری از روی سرریز؛  $\Delta E/E_0$ : افت نسبی انرژی؛  $D_{50}$ : قطر متوسط زبری ذرات کف بستر؛  $y_c$ : عمق بحرانی جریان؛  $\mu$ : ویسکوزیته دینامیکی آب؛  $\rho$ :



شکل ۱. شمای کلی سرریز شوت



شکل ۲. نمای کلی از مدل شیب اول ۱۵ درجه مورد استفاده در آزمایشگاه هیدرولیک موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو

فلوم استفاده شد.

دینامیک سیالات محاسباتی شاخه‌ای از مکانیک سیالات است که با استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های عددی برای حل و تجزیه و تحلیل مسائل و پیش‌بینی رفتار سیالات استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی جریانات ورودی به سرریزها، ورود هوا به جریان عبوری از روی سرریز، به‌منظور جلوگیری از رخداد کاویتاسیون و خسارات ناشی از آن، اهمیت بسزایی دارد. تجربه پژوهشگران در زمینه این‌گونه شبیه‌سازی‌ها نشان داده که در بین بسته‌های نرم‌افزاری موجود، Flow 3D قابلیت بهتری در شبیه‌سازی جریان دارا است (۳۵). برای شبیه‌سازی سرریز در پژوهش حاضر، کل بدنه صلب سرریز به‌صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار SolidWorks (Ver. SP2.0, 2021) ساخته شده و به نرم‌افزار Flow 3D معرفی شد. شرایط مرزی و مش‌بندی تأثیر زیادی بر افزایش دقت محاسبات دارد. در شبیه‌سازی، تنها یک بلوک مش برای سرریز و مخزن بالادست تعریف و اندازه هر

پهن ورودی سرریز و تنداب صاف، حوضچه آرامش و دریچه لولایی انتهایی حوضچه آرامش جهت کنترل جهش هیدرولیکی است. این مدل جهت بررسی تأثیر زبری در تنداب با قابلیت استقرار سه شیب مختلف طراحی شد. هر شیب به‌صورت جداگانه، نصب و با ۶ زبری (یک حالت شاهد و بدون زبری نیز در نظر گرفته شد) و ۶ دبی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. فلوم آزمایشگاهی طولی برابر با ۶/۷ متر، عرض ۰/۹ سانتی‌متر و شیب طولی صفر داشته که یک طرف آن از جنس شیشه شفاف به ضخامت ۸ میلی‌متر جهت رؤیت و ثبت مشخصات جریان، و طرف دیگر آن، دیوار بلوکی است. کف سرریز با زبری‌های یکنواخت و پیوسته پوشیده شد. در جدول ۱ مشخصات مدل‌های مختلف قابل مشاهده است. برای اندازه‌گیری جریان از یک سرریز لبه‌تیز مستطیلی به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر در انتهای فلوم و جهت اندازه‌گیری عمق پنجه تنداب نیز از دستگاه عمق‌سنج با دقت  $\pm 0/1$  میلی‌متر مستقر روی ریل

جدول ۱. مشخصات و تعداد نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی

نوع مدل	شیب تنداب	قطر متوسط زبری استفاده‌شده روی مدل (میلی‌متر)	دبی عبوری از روی مدل به‌ازای هر زبری (متر مکعب بر ثانیه)
۱	۱۵		
۲	۲۲/۵	شاهد، ۵/۱، ۷/۲، ۱۱/۱، ۱۶/۰، ۲۲/۲	۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۷، ۰/۰۹، ۰/۱۱
۳	۳۰		

می‌شود و خطای نسبی عمق آب به‌طور میانگین ۷/۴ درصد است. حداکثر میزان خطای نسبی عمق آب نیز ۱۶/۶ درصد برآورد می‌شود. بنابراین، نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و می‌توان از این حل عددی با شرایط ذکرشده برای سایر شیب‌ها، دبی‌ها و زبری‌ها استفاده کرد. در ادامه نتایج مربوط به افت بار آبی در زبری‌ها و دبی‌های مختلف در سه شیب مورد مطالعه تشریح خواهد شد. لازم به ذکر است که با توجه به ناپایداری جریان شبیه‌سازی‌شده در دبی‌های پایین و زبری‌های بالا، فقط نتایج ۳ دبی ۰/۱۱، ۰/۰۹ و ۰/۰۷ متر مکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجاکه به‌طور عمده عملکرد سرریز در دبی‌های بالاتر با مخاطرات هیدرولیکی بیشتری روبه‌رو است، بنابراین، صرف‌نظر کردن از نتایج دبی‌های پایین، منطقی است.

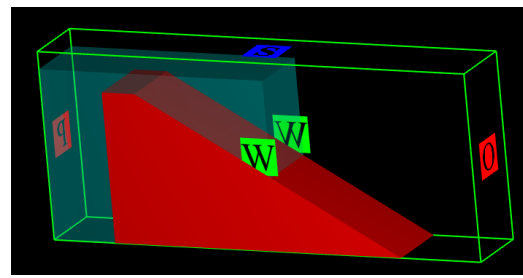
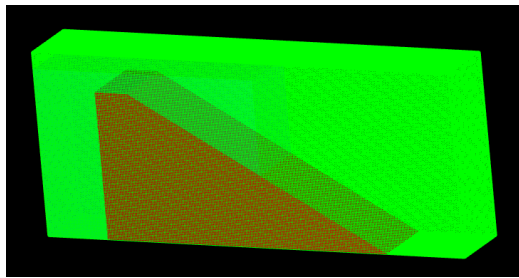
### نتایج و بحث

شکل‌های ۵ و ۶ و ۷ نمودارهای نتایج ارائه شده در سه دبی مذکور به‌ترتیب در شیب‌های ۱۵ و ۲۲/۵ و ۳۰ درجه را نشان می‌دهند. محور قائم معرف افت نسبی انرژی و محور افق فاصله نسبی را نشان می‌دهد. نمودار تغییرات افت انرژی نسبی در ابتدای ورودی به تنداب شدیداً غیرخطی و سریع بوده و با فاصله از ورودی تغییرات به شکل خطی و با شیب یکنواخت ملاحظه می‌شود. مطابق نتایج ارائه‌شده، با افزایش شیب تنداب، افت نسبی انرژی در طول کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت شیب در افت انرژی نسبی دارد. در این شکل‌ها نتایج مدل‌های بدون زبری با کف از جنس شیشه شفاف تحت

مش مربعی، برابر ۰/۰۲ متر با سعی و خطا در نظر گرفته شد. شرایط مرزی برای خروجی جریان و دیواره‌ها به‌ترتیب Outflow و Wall انتخاب و در قسمت  $Z_{max}$  نیز به‌دلیل در تماس بودن آب و هوا، شرط مرزی Symmetry تعریف شد. برای قسمت ورودی نیز از شرط مرزی بار آبی (فشار) استفاده و معادل بار آبی مدل آزمایشگاهی تعیین شد. در شکل‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب مدل به همراه شرایط مرزی و مش‌بندی نشان داده شده است. لازم به ذکر است مدل آشفتگی مورد استفاده در همه شبیه‌سازی‌ها، RNG در نظر گرفته شد.

در پژوهش حاضر، مدل سرریز مورد مطالعه با سه شیب ۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ درجه انجام شد. شبیه‌سازی با شیب‌های مختلف، شرایط گوناگون مرزی و شبکه‌بندی سلول‌های محاسباتی، با شش دبی و پنج زبری مختلف (به همراه حالت شاهد یا بدون زبری) با دانه‌بندی یکنواخت به‌صورت سه بعدی مدل‌سازی شد. جهت واسنجی مدل عددی مورد استفاده و اطمینان از دقت و صحت نتایج شبیه‌سازی‌ها، عمق جریان در طول سرریز (در زبری ۲۲/۲ میلی‌متر، شیب ۳۰ درجه و دبی ۰/۱۱ متر مکعب بر ثانیه) در شرایط عددی و آزمایشگاهی مقایسه شد. جهت انجام مقایسه مذکور، از شاخص خطای نسبی  $(RE(\%) = 100 \times (y_{exp} - y_{cal}) / y_{exp})$  استفاده شد. تغییرات شاخص مورد استفاده در فواصل مختلف سرریز، در قالب جدول ۲ ارائه شده است. شایان ذکر است که مطابق شکل ۱، فاصله x از ابتدای سرریز محاسبه می‌شود.

مطابق جدول ۲ میزان متوسط عمق آب توسط حل عددی به‌طور میانگین ۴/۲ درصد کمتر از میزان واقعی تخمین زده

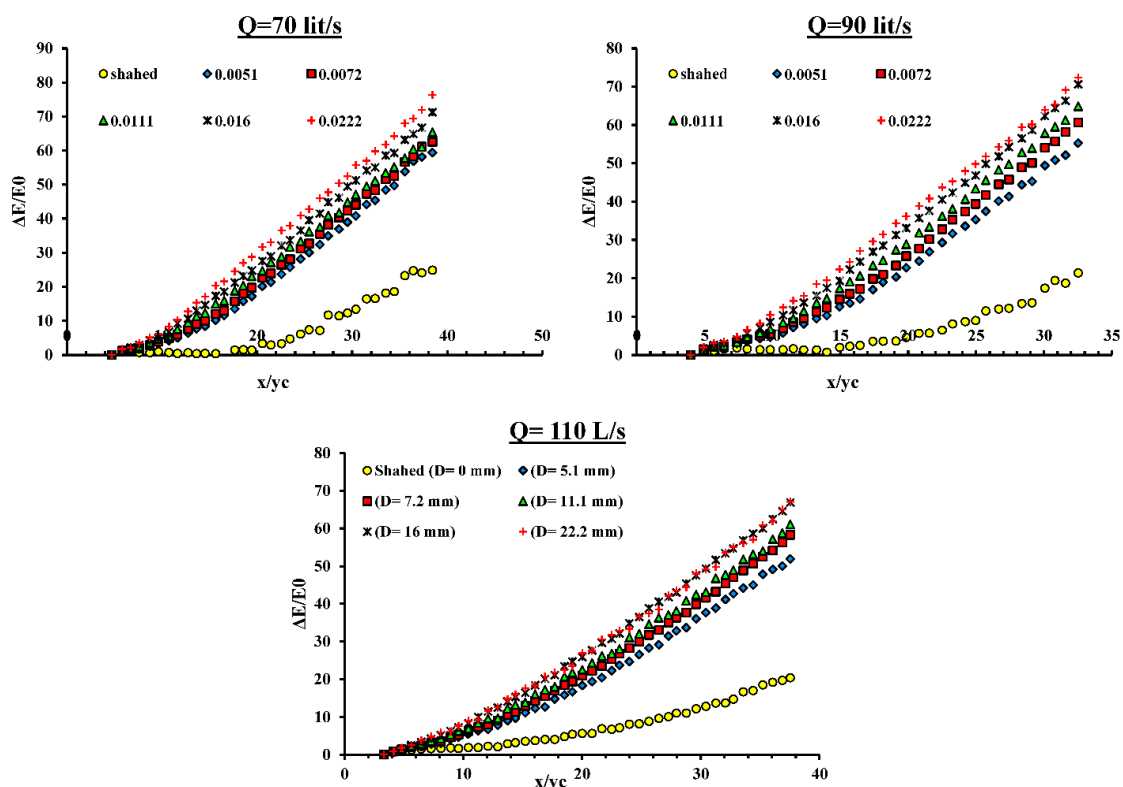


شکل ۴. نمایی از مش بندی مدل هیدرولیکی شبیه سازی شده (رنگی در نسخه الکترونیکی)

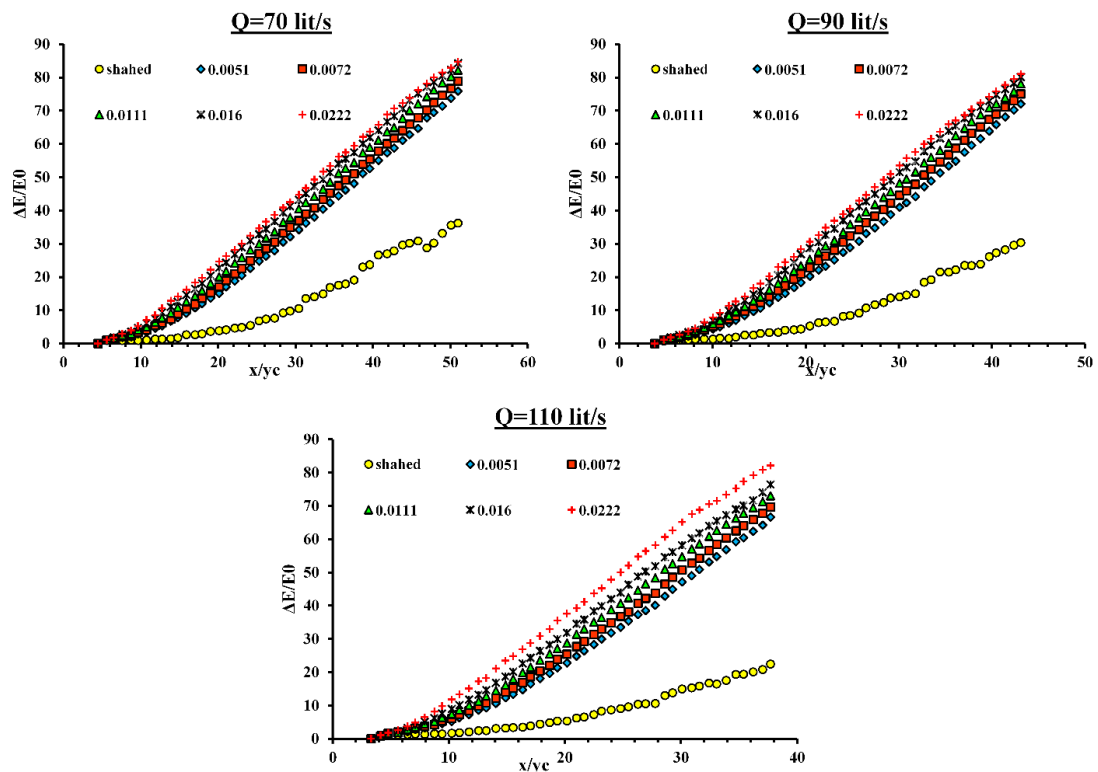
شکل ۳. نمایی از شرایط مرزی مدل هیدرولیکی مورد مطالعه در محیط Flow 3D (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۲. میزان خطای حل عددی در تخمین عمق آب در سرریز با شیب ۳۰ درجه، زبری ۰/۰۲۲۲ متر و دبی ۱۱۰ لیتر بر ثانیه

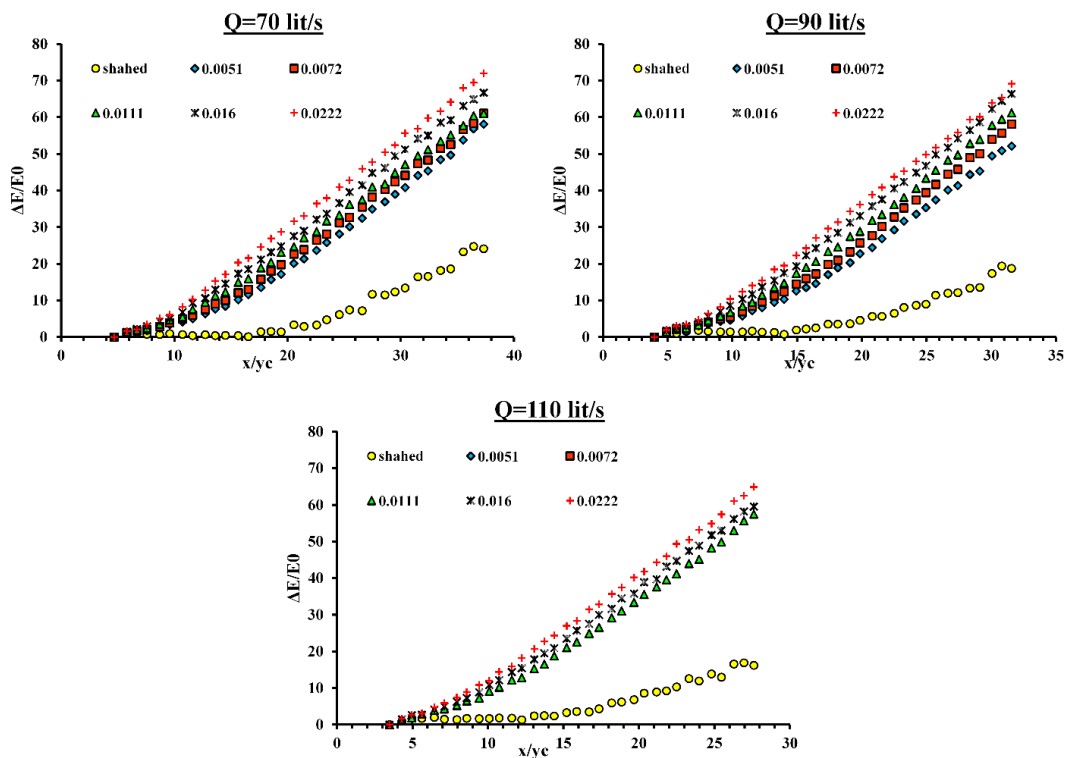
x (m)	y <sub>exp</sub> (m)	RE (%)	x (m)	y <sub>exp</sub> (m)	RE (%)
۰/۴۵	۰/۰۹۵	۹/۵	۲/۲۵	۰/۰۸	-۳/۶
۰/۷۵	۰/۰۷۹	۵/۷	۲/۵۵	۰/۰۸	-۵/۹
۱/۰۵	۰/۰۸۳	-۱/۱	۲/۸۵	۰/۰۸	۲/۸
۱/۳۵	۰/۰۸۳	-۷/۴	۳/۱۵	۰/۰۸	-۱۴/۱
۱/۶۵	۰/۰۸۵	-۱۶/۶	۳/۴۵	۰/۰۸	-۹/۳
۱/۹۵	۰/۰۸۰	-۵/۸			



شکل ۵. میزان اتلاف انرژی نسبی در طول سرریز نسبت به  $x/yc$  در شیب ۱۵ درجه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۶. میزان اتلاف انرژی نسبی در طول سرریز نسبت به  $x/yc$  در شیب  $۲۲/۵$  درجه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۷. میزان اتلاف انرژی نسبی در طول سرریز نسبت به  $x/yc$  در شیب  $۳۰$  درجه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



پلکانی در این پژوهش از رابطه ۶ که توسط باس و هاگر (۴) برای تخمین محل شروع جریان یکنواخت ( $L_u$ ) به عنوان تابعی از عمق بحرانی ( $hc$ ) و شیب سرریز پلکانی پیشنهاد شده، استفاده و با مقادیر قرائت شده از شکل های ۶ تا ۸ مقایسه شد. نتایج حاکی از عملکرد مناسب رابطه ۸ در تخمین شروع جریان یکنواخت در سرریزهای شوت دارای زبری کف است، به نحوی که میانگین خطای نسبی این رابطه در مقایسه با مقادیر قرائت شده در حدود ۱۱٪ است.

$$\frac{L_u}{y_c} = 25.52 \left( 1 - 0.055 \times (\sin\theta)^{\frac{1}{3}} \right) \times (\sin\theta)^{\frac{1}{3}} \quad (۸)$$

از آنجا که در این مطالعه از سه سرریز شوت با شیب های ۱۵، ۲۲/۵ و ۳۰ درجه با طول های به ترتیب ۴/۴، ۴/۶ و ۳/۶ متر استفاده شده است، بنابراین به منظور بررسی صحیح تر تأثیر شیب تنداب و زبری بستر بر کل استهلاك انرژی، نسبت افت انرژی کل سرریز زبر به افت انرژی کل سرریز صاف محاسبه و با تقسیم آن بر طول سرریز، پارامتر افت نسبی نرمال شده تعریف و محاسبه شد. در شکل ۱۰ نتایج افت انرژی نرمال شده جریان عبوری از روی سرریزهای شوت در شیب های مختلف نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود تمامی نمودارها از الگوی مشابه تبعیت می کنند. میزان استهلاك انرژی در طول سرریز با افزایش دبی و اندازه زبری بستر افزایش می یابد.

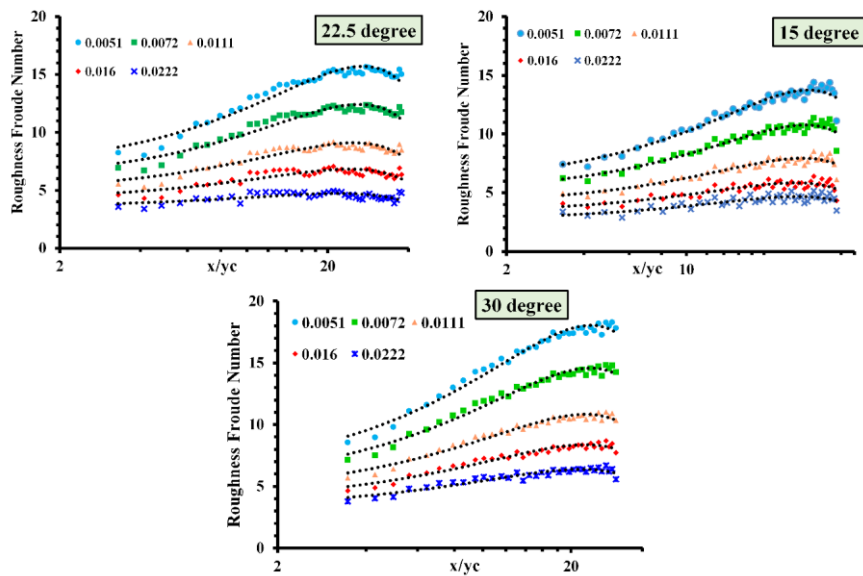
بر اساس نتایج، سرریز زبر با شیب ۳۰ درجه بیشترین استهلاك انرژی را معرفی می کند. استفاده از این نوع سرریزها به سبب استهلاك انرژی بالا در صورت اطمینان از عدم وقوع کاویتاسیون قابل توصیه است. از آنجا که رخدادهای کاویتاسیون در سرعت های بالا (همراه با فشارهای پایین) و مترادف با دبی های بزرگ تر محتمل تر است، بنابراین تغییرات شاخص کاویتاسیون در شیب های مختلف در دبی ۱۱۰ لیتر بر ثانیه بررسی و در شکل ۱۱ ارائه شد. در این شکل نتایج بستر صاف تحت عنوان شاهد ارائه شده است.

بر اساس نتایج شکل ۱۱، با افزایش زاویه سرریز و در نتیجه افزایش سرعت جریان، مقادیر شاخص کاویتاسیون کاهش

عنوان مرجع (Reference) نیز ارائه شد تا تأثیر زبری بر افت انرژی نسبی قابل مشاهده و مقایسه باشد.

همان طور که در شکل های فوق مشاهده می شود، افت نسبی انرژی جنبشی سرریز زبر از افت نسبی انرژی مدل با بستر صاف بیشتر است. مقایسه نتایج نشان می دهد که افت نسبی انرژی با افزایش اندازه زبری بستر و متعاقب آن افزایش تأثیر نیروی درگ بر جریان افزایش یافته است. به منظور بررسی اثر زبری و هیدرولیک جریان بر افت انرژی، پارامتر عدد فرود زبری تعریف شد. تغییرات عدد فرود زبری نسبت به فاصله نسبی ( $x/y_c$ ) فقط در دبی ۱۱۰ لیتر بر ثانیه و در هر سه شیب در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که تأثیر اندازه زبری بستر بر افت انرژی با بزرگ تر شدن اندازه کمتر می شود. به منظور بررسی دقیق تر میزان استهلاك انرژی عبوری از روی سرریز، خلاصه نتایج افت نسبی انرژی برای آزمایش های مختلف در جدول ۳ آورده شده است. نمودارهای شکل ۹ در مختصات نیم لگاریتمی نیز تغییرات افت انرژی نسبی در طول سه شیب سرریز در دبی های مورد آزمایش پژوهش حاضر را نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود، افت انرژی نسبی با افزایش اندازه زبری صعودی، ولی با افزایش دبی سرریز کاهش می یابد. هر سه منحنی ارائه شده به فرم خطی و با شیب تقریباً یکسان به موازات یکدیگر با افزایش زبری روند صعودی را نشان می دهند.

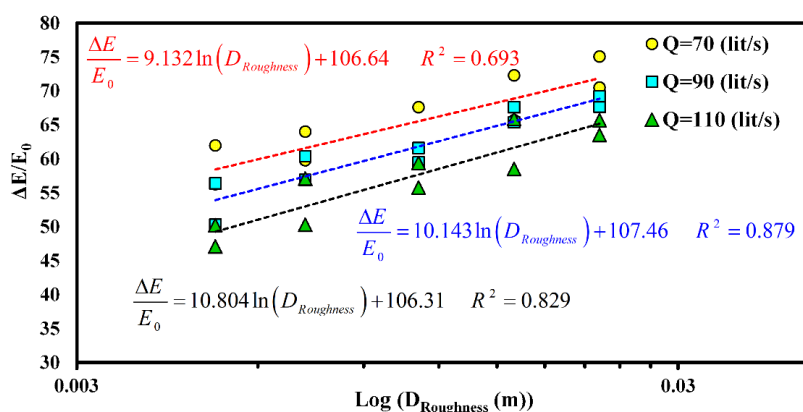
مطابق نتایج حاصله، افت انرژی در طول سرریز از دو الگوی غیرخطی در ابتدای سرریز و بعد با الگوی خطی تا انتهای آن تبعیت می کند. الگوی غیرخطی در منطقه جریان غیریکنواخت رخ داده و با یکنواخت شدن جریان، الگوی افت انرژی نیز خطی می شود. تبدیل جریان غیریکنواخت به یکنواخت در مدل های دارای زبری سریع تر، در طول کوتاه تر و نزدیک تر به ورودی سرریز رخ می دهد. نقطه شروع جریان یکنواخت در شکل های ۶ تا ۸ در محدوده ای تشخیص داده می شود که شیب نمودار خطی و ثابت می شود. با توجه به تشابه عملکرد سرریزهای شوت در زبری های مختلف با سرریزهای



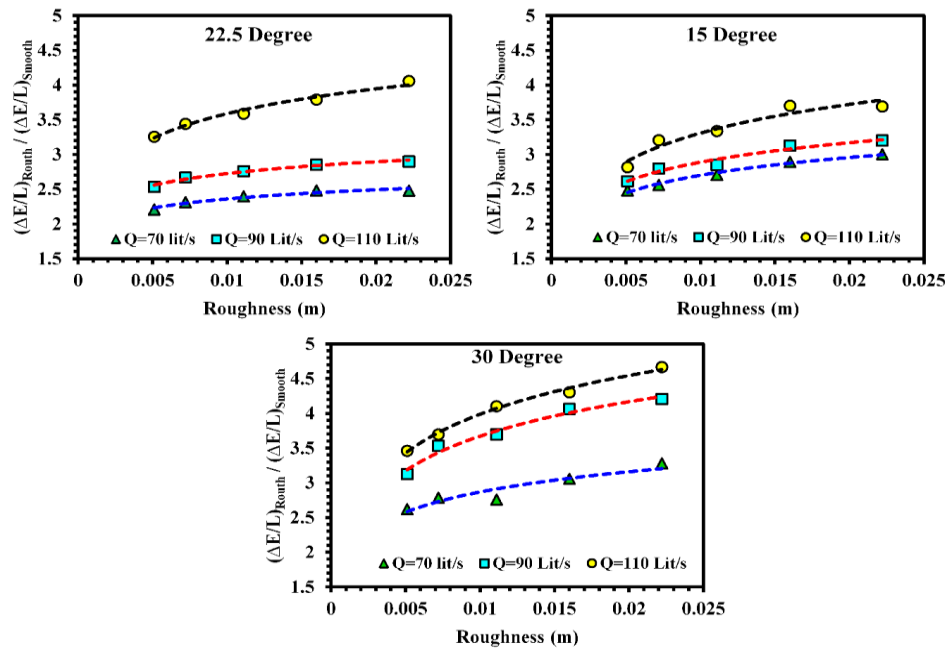
شکل ۸. تغییرات عدد فرود زبری نسبت به x/yc در دبی ۱۱۰ لیتر بر ثانیه (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۳. میزان استهلاك انرژی نسبی در مدل‌های مختلف

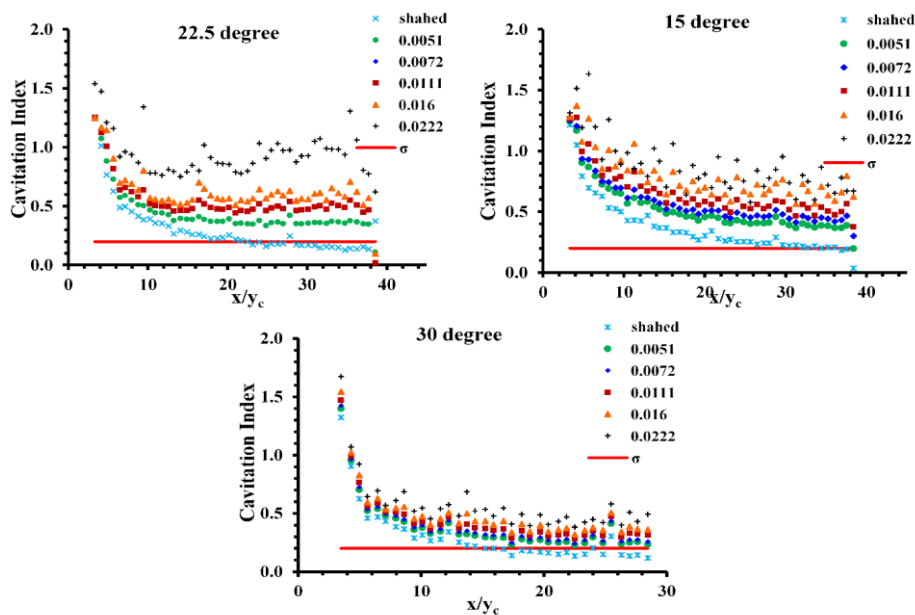
دبی (متر مکعب بر ثانیه)			زاویه شوت (درجه)	دبی (متر مکعب بر ثانیه)			زاویه شوت (درجه)	دبی (متر مکعب بر ثانیه)			
۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۷		۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۷		۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۷	
اندازه زبری (متر)			درصد افت انرژی نسبی	اندازه زبری (متر)			درصد افت انرژی نسبی	اندازه زبری (متر)			
۱۳/۶	۱۶/۱	۲۱/۵		۱۹/۹	۲۷/۷	۳۳/۶		۱۷/۸	۲۱/۶	۲۵/۰	
۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۱	۳۰	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۱	۲۲/۵	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۵۱	
۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۷۲		۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۷۲		۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۷۲
۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱		۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱		۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱
۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶		۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶		۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶
۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۲۲		۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۲۲		۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۲۲
شاهد	شاهد	شاهد		شاهد	شاهد	شاهد		شاهد	شاهد	شاهد	شاهد



شکل ۹. تغییرات افت انرژی نسبی در طول سرریز بر حسب زبری در دبی‌های مختلف پژوهش حاضر (رنگی در نسخه الکترونیکی)



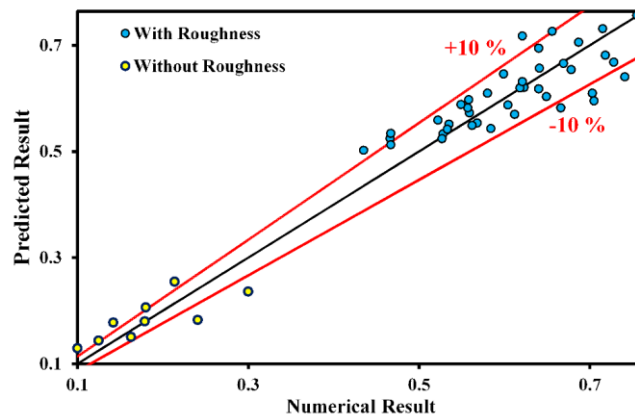
شکل ۱۰. تغییرات شاخص کاویتاسیون نسبت به  $x/y_c$  در دبی  $11^\circ$  لیتر بر ثانیه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۱. تغییرات شاخص کاویتاسیون نسبت به  $x/y_c$  در دبی  $11^\circ$  لیتر بر ثانیه (رنگی در نسخه الکترونیکی)

می‌یابد. در این شکل‌ها مدل شاهد معرف سرریز بدون زبری (صاف) است که در آنها کاویتاسیون در نقاطی از سرریز رخ داده است، ولی در سرریزهای دارای بستر زبر، مقادیر شاخص کاویتاسیون از حد بحرانی  $0.2^\circ$  کمتر نمی‌شوند. همچنین، با افزایش اندازه زبری مقادیر شاخص کاویتاسیون افزایش یافته و احتمال وقوع کاویتاسیون کاهش می‌یابد. بنابراین، استفاده از سرریزهای با بستر زبر علاوه بر استهلاك مناسب انرژی و عدم وقوع پدیده کاویتاسیون گزینه مناسبی جهت اجرا در سدها هستند. در انتها با استفاده از داده‌های استخراج شده از شبیه‌سازی (۹ سری داده سرریزهای صاف و ۴۵ سری داده سرریزهای زبر) و

می‌یابد. در این شکل‌ها مدل شاهد معرف سرریز بدون زبری (صاف) است که در آنها کاویتاسیون در نقاطی از سرریز رخ داده است، ولی در سرریزهای دارای بستر زبر، مقادیر شاخص کاویتاسیون از حد بحرانی  $0.2^\circ$  کمتر نمی‌شوند. همچنین، با افزایش اندازه زبری مقادیر شاخص کاویتاسیون افزایش یافته و احتمال



شکل ۱۲. مقایسه افت نسبی انرژی عددی و محاسباتی از رابطه ۹ برای سرریز شوت (رنگی در نسخه الکترونیکی)

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{21.1} \quad (10)$$

### نتیجه گیری

سرریزها به طور گسترده در پروژه‌های انتقال آب و سدها مورد استفاده قرار می‌گیرند. استهلاك انرژی از جمله مسائل اصلی است که طراحان این سازه‌ها با آن مواجه هستند. اهمیت این موضوع به دلیل تأثیرگذار بودن بر دو آسیب عمده کاویتاسیون و آخشستگی قابل بررسی است. در پژوهش حاضر اثر زبری بستر تنداب بر استهلاك انرژی مورد بررسی قرار گرفت و رابطه‌ای جهت تخمین افت انرژی جریان عبوری از روی سرریزهای شوت صاف و زبر ارائه شد. نتایج نشان داد که جریان بر روی سرریزهای شوت، در ابتدا غیریکنواخت و پس از طی فاصله‌ای به جریان یکنواخت تبدیل می‌شود. با افزودن زبری بستر این تبدیل سریع‌تر اتفاق می‌افتد. در همه شیب‌ها افت انرژی بستر زبر بیشتر از مدل‌های بدون زبری بوده و با افزایش زبری، افت انرژی افزایش و با افزایش دبی میزان افت انرژی کاهش می‌یابد. در نهایت در زبری یکسان، مقدار نسبی افت انرژی در طول سرریز با افزایش شیب افزایش می‌یابد. همچنین، با افزودن زبری بستر شاخص کاویتاسیون افزایش نشان می‌دهد. با توجه به این نکته که بستر زبر معرف بستر طبیعی تکیه گاه سرریز است، نتایج این پژوهش با نگاه محیط‌زیست، هزینه‌های ساخت سازه را کاهش داده و از نظر اقتصادی به سبب قابلیت خوب در استهلاك انرژی، به صرفه است.

تحلیل ابعادی، رابطه ۹ جهت تخمین افت انرژی جریان سرریزهای شوت صاف و زبر استخراج شد. لازم به ذکر است که در مدل‌های صاف با استفاده از رابطه ۱۰ که توسط استریکلر (۳۵) و در نظر گرفتن مقدار  $n = 0.009$  برای ورق شفاف (پلکسی گلاس)، مقادیر تخمینی  $d_{50}$  محاسبه شده و عدد فرود زبری محاسبه شد. نتایج رابطه ۹ برای مدل‌های صاف و زبر در شکل ۱۲ دیده می‌شود. در این نمودار مقدار افت انرژی محاسبه شده با استفاده از داده‌های حل عددی (محور افقی) و رابطه ۹ (محور قائم) با هم مقایسه شده‌اند. میزان خطای نسبی مورد قبول نیز  $\pm 10\%$  فرض و در شکل مشخص شده است. مطابق شکل، مقادیر تخمین افت انرژی جریان توسط رابطه ارائه شده به طور عمده در محدوده قابل پذیرش  $\pm 10\%$  خطا، قرار دارند. بیشینه میزان خطای معادلات مذکور برای تخمین افت انرژی برابر  $21/5\%$  و میانگین قدر مطلق خطای نسبی نیز برابر  $7/1\%$  محاسبه شده است. با توجه به عملکرد مناسب این رابطه در تخمین افت انرژی جریان عبوری از روی سرریز و اطمینان نسبی از عدم وقوع کاویتاسیون در سرریز زبر، می‌توان از این رابطه جهت طراحی اولیه سرریز و محاسبه استهلاك انرژی روی سرریز زبر و حوضچه آرامش پایین دست آن استفاده کرد.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = e^{\left( -1.386 - 0.0068Fr + 0.0197 \frac{x}{y_c} - 0.0049 Fr_c + 0.609 \tan(\theta) \right)} \quad R^2 = 0.94 \quad (9)$$

## منابع مورد استفاده

1. Ahmad, Z. and D. Srisvastava. 2014. Energy dissipation on block ramps with large scale roughness. *In: 11<sup>th</sup> National Conference on Hydraulics in Civil Engineering and 5<sup>th</sup> International Symposium on Hydraulic Structures: Hydraulic Structures and Society-Engineering Challenges and Extremes*, Engineers Australia.
2. Ahmad, Z., N. M. Petappa and B. Westrich. 2009. Energy dissipation on block ramps with staggered boulders. *Journal of Hydraulic Engineering* 135(6): 522-526.
3. Ahmadyar, D. and H. Bayat. 1993. An investigation into the effects of step's bottom slope on stepped spillways. *Amirkabir Journal of Science and Research* 13(2): 146-154.
4. Boes, R. M. and W. H. Hager. 2003. Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(9): 661-670.
5. Chamani, M. R. and N. Rajaratnam. 1999. Onset of skimming flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(9): 969-971.
6. Chanson, H., Y. Yasuda and I. Ohtsu. 2002. Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling. *Canadian Journal of Civil Engineering* 29(6): 809-819.
7. Daneshfaraz, R., E. Aminvash, S. Di Francesco, A. Najibi and J. Abraham. 2021. Three-Dimensional Study of the Effect of Block Roughness Geometry on Inclined Drop. *Journal of Numerical Methods in Civil Engineering* 6 (1): 1-9.
8. Daneshfaraz, R., B. Kaya, S. Sadeghfam and H. Sadeghi. 2016. Simulation of flow over ogee and stepped spillways and comparison of finite element volume and finite element methods. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering* 3(2): 37-47
9. Daneshfaraz, R., A. Ghaderi, A. A. Akhtari and S. Di Francesco. 2020. On the effect of block roughness in ogee spillways with flip buckets. *Fluids* 5(4): 182.
10. Daneshfaraz, R., M. MajediAsl and R. Mirzaeereza. 2019. Experimental study of expanding effect and sand-roughened bed on hydraulic jump characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(4): 885-896.
11. Daneshfaraz, R., M. MajediAsl, R. Mirzaee and A. Ghaderi. 2020. The S-jump's Characteristics in the Rough Sudden Expanding Stilling Basin. *AUT Journal of Civil Engineering* 4(3): 349-356.
12. Daneshfaraz, R. M. MajediAsl, R. Mirzaee and P. Parsamehr. 2020. Laboratory study of the effect of rough bed with non-continuous trapezoidal elements on discrete jump characteristics in the non-prismatic rectangular channel. *Sharif Journal of Civil Engineering* 36: 119-128.
13. Daneshfaraz, R., M. MajediAsl, R. Mirzaee and G. Tayfur. 2020. Hydraulic jump in a rough sudden symmetric expansion channel. *AUT Journal of Civil Engineering* 5(2): 4-4.
14. Dehdar-Behbahani, S. and A. Parsaie. 2016. Numerical modeling of flow pattern in dam spillway's guide wall. Case study: Balaroud dam, Iran. *Alexandria Engineering Journal* 55(1): 467-473.
15. Eisenhauer, N. 1987. Location of Aerators in Spillways. *Concrete International* 9(3): 62-66.
16. Falvey, H. T. 1982. Predicting cavitation in tunnel spillways. *Water Power and Dam Construction* 34(8): 13-15.
17. Falvey, H. T. 1990. Cavitation in Chutes and Spillways. Denver: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
18. Fiedler, W. 2016. Managing Dam Safety Risks Related to Hydraulic Structures. *In: B. Crookston and B. Tullis (Eds.), Hydraulic Structures and Water System Management. 6<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, Portland.
19. French, R. H. and R. H. French. 1985. *Open-Channel Hydraulics*. New York, McGraw-Hill.
20. Gemici, Z., A. Koca and K. Kaya. 2017. Predicting the numerical and experimental open-channel flow resistance of corrugated steep circular drainage pipes. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 8(3): 04017004.
21. Hosseini, S. 2011. Numerical and experimental investigation of the geometry of the spillway and the slope of the rapids on the flow field of the shot spillway. Master's thesis. Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran. (In Farsi).
22. Kells, J. A. and C. D. Smith. 1991. Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment. *Canadian Journal of Civil Engineering* 18(3): 358-377.
23. Khatsuria, R. M. 2004. *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipaters*. CRC Press.
24. Lesleighter, E. J. 1988. Cavitation in hydraulic structures. *In: Proceeding of the International Symposium on Model-Prototype Correlation of Hydraulic Structures*. Colorado Springs, USA.
25. Pagliara, S. and P. Chiavaccini. 2006b. Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(6): 545-552.
26. Pagliara, S. and P. Chiavaccini. 2003. The use of piles to increase block ramp stability. *In: 30<sup>th</sup> IAHR Congress*, Ganoulis, Prinos, 2: 449-456.

27. Pagliara, S. and P. Chiavaccini. 2006a. Energy dissipation on block ramps. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(1): 41-48.
28. Pagliara, S., I. Carnacina and M. Palermo 2009. Energy dissipation in presence of block ramps with enlarged stilling basin. In: 33<sup>rd</sup> IAHR Congress. IAHR. Water Engineering for a Sustainable Environment.
29. Parsaie, A., S. Dehdar-Behbahani and A. H. Haghiabi. 2016. Numerical modeling of cavitation on spillway's flip bucket. *Frontiers of Structural and Civil Engineering* 10(4): 438-444.
30. Peterka, A. J. 1964. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
31. Rahmanshahi Zahabi, M. and M. Shafai Bajestan. 2012. Experimental investigation of the effect of chute bed roughness height on energy dissipation. *Journal of Water and Soil Science (Agricultural Science)* 22(2): 95-106.
32. Rhone, T. J. 1971. Studies to Determine the Feasibility of a Baffled Apron Drop as a Spillway Energy Dissipator: Conconully Dam Spillway, Okanogan Project, Washington. Hydraulics Branch, Division of General Research, Engineering and Research Center, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
33. Robinson, K. M., C. E. Rice and K. C. Kadavy. 1998. Design of rock chutes. *Transactions of the ASAE* 41(3): 621.
34. Sorensen, R. M. 1985. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(12): 1461-1472.
35. Strickler, A. 1923. Contributions to the question of a velocity formula and roughness data for streams. Channels and Closed Pipelines, WM Keck Lab of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA.
36. Whittaker, J. and M. Jaggi. 1986. Blockschwellen. Mitteilungen der Versuchsanstalt fur Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenossischen Technischen Hochschule Zurich, (91).

## Numerical Study of the Rough Bed Impact on Energy Dissipation and Cavitation on Chute Spillways

H. Nouri Hasanabadi<sup>1</sup>, M. R. Kavianpour<sup>2\*</sup>, A. Khosrojerdi<sup>1</sup> and H. Babazadeh<sup>1</sup>

(Received: September 17-2021 ; Accepted: December 14-2021)

### Abstract

Using a rough bed for spillway compare to common dissipation methods such as stilling basins, stepped spillways, ski jumps, and bed elements may be more efficient to boost energy dissipation. In this research, the impact of spillway continuous bed roughness on energy dissipation was investigated. For this purpose, a non-dimensional relationship was developed, and by calibrating the numerical model based on the present experimental study, energy dissipation over the spillway for three slopes of 15, 22.5, and 30 (degree) with six roughness sizes of 0.0, 0.005, 0.0072, 0.0111, 0.016, and 0.022 (m) and three discharges of 170, 110, and 90 (lit/s) was investigated. Based on the present results, using a rough bed spillway will increase energy dissipation. Also, the ratio of energy lost per meter length of rough bed spillway to that of smooth spillway increases by chute slope. The results showed that the highest amount of relative energy consumption in the presence of roughness was related to the slope of 22.5 degrees and 22.2 mm for roughness (85%), and the lowest relative energy consumption was observed in the control state (25%). As a result of the present study, a natural rough bed without concrete coating has befitted in terms of environmental aspects, construction cost, and energy loss.

**Keywords:** Chute spillway, Numerical model, Energy dissipation, Rough bed

---

1. Department of Water Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

\*: Corresponding author, Email: kavianpour@kntu.ac.ir