

## نقش هندسه‌ی بلوک‌های شوت در اتلاف توان فرسایشی جریان\*

سبحان مرادی<sup>(۱)</sup> حامد شهنسوازی<sup>(۲)</sup> کاظم اسماعیلی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** انرژی زیاد نهفته در جریان خروجی از روی سرریزها، با طراحی سازه‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی در شوت و یا حوضچه‌ی آرامش پایین‌دست کنترل می‌شود. باین‌حال رخ‌داد آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست، یکی از بزرگ‌ترین خطراتی است که پایداری سرریزها را تهدید می‌کند. در پژوهش آزمایشگاهی حاضر؛ ابتدا با انجام آزمایش‌های شاهد (شوت بدون مانع) در اعداد فرود مختلف، به بررسی هندسه‌ی گودال آب‌شستگی پرداخته شد، آن‌گاه با ارائه‌ی روش حفاظتی پایه‌ی بلوک با ارتفاع ثابت در سه شکل هندسی (مستطیل، نیم‌دایره، مثلث)، چهار موقعیت نصب به‌صورت نسبتی از طول کل شوت  $L_b/L_f$  برابر  $(0/2, 0/4, 0/6, 0/8)$  و همچنین، جهت تقعر-تحدب نصب بلوک‌ها، پارامترهای ابعادی گودال آب‌شستگی اندازه‌گیری شد و با انجام تحلیل ابعادی به‌روش پای-باکینگهام مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از پایه‌ی بلوک روی شیب شوت در همه‌ی مدل‌های مورد آزمایش، بر مقادیر ابعادی آب‌شستگی تأثیرگذار بوده و همواره سبب کاهش ابعاد گودال آب‌شستگی شده‌است. به‌طور خلاصه، ۱. عمق و طول نهایی آب‌شستگی با افزایش عدد فرود بالادست سرریز، افزایش می‌یابد. ۲. در سری آزمایش‌های تقعر در برابر جریان بلوک‌ها، همواره پارامترهای ابعادی آب‌شستگی دارای مقادیر کمتری نسبت به تحدب در برابر جریان بوده‌اند. ۳. با کاهش فاصله‌ی نصب بلوک‌ها نسبت به پنجه‌ی سرریز، کاهش آب‌شستگی در عمق و طول افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در موقعیت  $(L_b/L_f=0.8)$  بیشترین استهلاک انرژی نسبت به سایر موقعیت‌ها رخ داده‌است و در شرایط مختلف جریان بین ۱۵ تا ۶۱/۲ درصد کاهش عمق گودال آب‌شستگی را به‌همراه دارد. ۴. در موقعیت  $(L_b/L_f=0.6)$ ، بلوک‌های مستطیلی و نیم‌دایره‌ای با تحدب در برابر جریان و همچنین، در موقعیت  $(L_b/L_f=0.8)$  بلوک مثلثی با تقعر در برابر جریان، با عملکرد متوسط ۲۸/۱ تا ۷۳/۴ درصد، بیشترین کاهش را در طول آب‌شستگی نسبت به سایر حالت‌ها دارا می‌باشند. ۵. با افزایش عدد فرود جریان در بالادست تاج سرریز، انرژی نسبی مستهلک‌شده‌ی جریان در پنجه شوت، کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی** هندسه‌ی بلوک، گودال آب‌شستگی، الگوی نصب موانع، استهلاک انرژی.

## The Role of chute Blocks Geometry in Current Erosion Power Loss

S. Moradi H. Shahsavari K. Esmaili

**Abstract** The high energy impinging on the outflow through the overflows is controlled by the design of the energy absorber structures in the downstream or downstream relaxation pool. However, the occurrence of downstream local scour is one of the major threats to the stability of the overflows. In the present laboratory research, first, by conducting control experiments (unimpeded shot) at different landing numbers, the geometry of the scour pit was investigated, then by providing a basic block-height protection method in three geometric shapes (Rectangular, Semicircular, Triangle), four mounting positions proportional to the total  $L_b/L_f$  shot length (0.2, 0.4, 0.6, 0.8) and also, to concave the installation of blocks, the dimensions of the scour pit are measured and Dimensional analysis was performed using Pie-Buckingham method. The results showed; The use of block base on the slope of the shot in all the models tested has an effect on the dimensionality of the scour and has always reduced the dimensions of the scour pit. In summary: 1. The depth and final length of the scour increases with the increase in the number of upstream landing overflows. 2. In the series of upward concave tests, blocks always have lower values of scour dimension than low facing concave. 3. By decreasing the installation distance of the blocks from the overflow claw, the scour depth and length decrease. So that at position  $(L_b/L_f = 0.8)$  the highest energy damping occurred at other positions. And under different conditions the flow decreases between 15 to 61.2% of the depth of the scour pit. 4. In position  $(L_b/L_f = 0.6)$ , semicircular and rectangular blocks with low upward concavity and also in position  $(L_b/L_f = 0.8)$  triangular block with high upward concavity, with average yield 38/1 to 73/4% had the highest decrease during scour compared to other states. 5. By increasing the number of downstream currents, the relative damping energy of the current in the shoot paw decreases.

**Key Word** Block Geometry, Scour hole, Barrier Pattern, Energy Depreciation.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۹/۴/۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۷/۲۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکترا، سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) دانشجوی دکترا، سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۳) دانشیار، سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

### مقدمه

هنگامی که تراز آب از ظرفیت ذخیره‌ی مخزن فراتر رود، جریان خروجی از روی سرریزها با انرژی بالایی عبور می‌کند و به دلیل سرعت زیاد جریان در پنجه، می‌تواند سبب ایجاد فرسایش قابل توجهی در اطراف پی سازه شود و پایداری آن را با خطرات جدی روبه‌رو کند. از این رو آب شستگی در پایین دست سرریزها یکی از موضوعات مهم و کاربردی است که توسط محققان زیادی به منظور شناسایی متغیرهای حاکم بر این پدیده به منظور ارائه راه‌حل‌های مناسب، مورد بررسی قرار می‌گیرد. تاکنون، برای افزایش اتلاف انرژی و جلوگیری از آب شستگی بستر فرسایش پذیر در پایین دست سرریزها، از برخی سازه‌های مستهلک کننده‌ی انرژی هم‌چون حوضچه‌ی آرامش و یا شوت‌ها استفاده شده است، اما ساخت حوضچه‌های آرامش هزینه‌های زیادی را به طرح تحمیل می‌کند. از این رو، همواره ارائه و بررسی راه‌حل‌های جایگزین با هزینه‌ی کمتر، مورد توجه است. در چند دهه‌ی اخیر محققان زیادی با استفاده از انواع تیپ حوضچه‌های آرامش USBR و ارائه‌ی طرح‌های جدید در این سازه به بررسی استهلاک انرژی جنبشی پرش هیدرولیکی در پایین دست سرریز پرداخته‌اند؛ از آن جمله تحقیق درگاهی است که در سال ۲۰۰۳ با بررسی توسعه‌ی آب شستگی در پایین دست سرریز بیان نمود که با افزایش زبری حوضچه‌ی آرامش باوجود این که تغییر به خصوص در الگوی معمولی جریان شکل نمی‌گیرد، اما باعث کاهش شدید انتقال رسوب می‌گردد و گودال آب شستگی نسبت به حالت بدون زبری ۱۷ الی ۵۷ درصد کوچک تر می‌شود [1].

به منظور کاهش آب شستگی پایین دست سرریز، با به کارگیری یک ردیف بلوک نیم دایره‌ی بافلی در حوضچه‌ی آرامش نشان داده شد که اجرای بافل روی مشخصه‌های گودال آب شستگی مؤثر است و مقدار کاهش عمق آب شستگی نهایی از ۵۱/۸۶ درصد به ۶۳/۸۱ درصد افزایش یافته است [2].

در مطالعه‌ی آزمایشگاهی با استفاده از الگوهای متنوع کفبند سنگ‌چین (بدون سنگ‌چین، سنگ‌چین یک‌ردیفه و سنگ‌چین کامل با ارتفاعات مختلف) میزان کاهش آب شستگی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که الگوی اجرایی کفبند کامل، مقادیر کمتری از آب شستگی را نشان می‌دهد [3].

هلال [4] در سال ۲۰۱۴ با ارائه‌ی ایده‌ی جدید، سیستمی از جت‌های آب خروجی از کفبند حوضچه‌ی آرامش ساده در پایین دست یک سازه را برای کنترل پرش هیدرولیکی طراحی کرد و گزارش داد که حداکثر عمق آب شستگی در مقایسه با مدل کفبند بدون جت‌های آب از ۵۰ درصد به ۹۰ درصد کاهش یافته است. نتایج حاصل از آب شستگی پایین دست شوت‌ها متأثر از پارامترهایی هم‌چون استغراق پای آب، نوع سرریز جریان و طول کفبند سنگ‌چین گزارش شده است. سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و تحلیل انرژی جنبشی آشفته و توزیع سرعت در نزدیکی بستر فرسایشی، دو رابطه‌ی تجربی برای پیش‌بینی عمق و طول آب شستگی پایین دست سرریز اوجی ارائه شد [5]. طراحی فنی بلوک‌های بافل در حوضچه‌های آرامش، نشان داد که به دلیل لزوم وجود فاصله‌ی مناسب بین بلوک‌ها و عبور جریان از میان آنها می‌توان به طور حداکثر ۴۰ تا ۵۵ درصد از عرض کف را اشغال نمود [6].

از لحاظ فنی و اقتصادی، رویکرد غالب برخی محققان به حذف حوضچه‌های آرامش پرهزینه و جایگزینی روش‌های اتلاف انرژی در طول مسیر شوت است. از این رو تکنیک‌های مختلفی برای افزایش اتلاف انرژی در شوت سرریزها که سبب کاهش آب شستگی موضعی در پایین دست می‌شود، ارائه شده است. اجرای شیب پلکانی و یا نصب بلوک‌های بافل روی شیب شوت و یا کف حوضچه، از جمله روش‌های مؤثر بر افزایش اتلاف انرژی و کاهش طول پرش هیدرولیکی

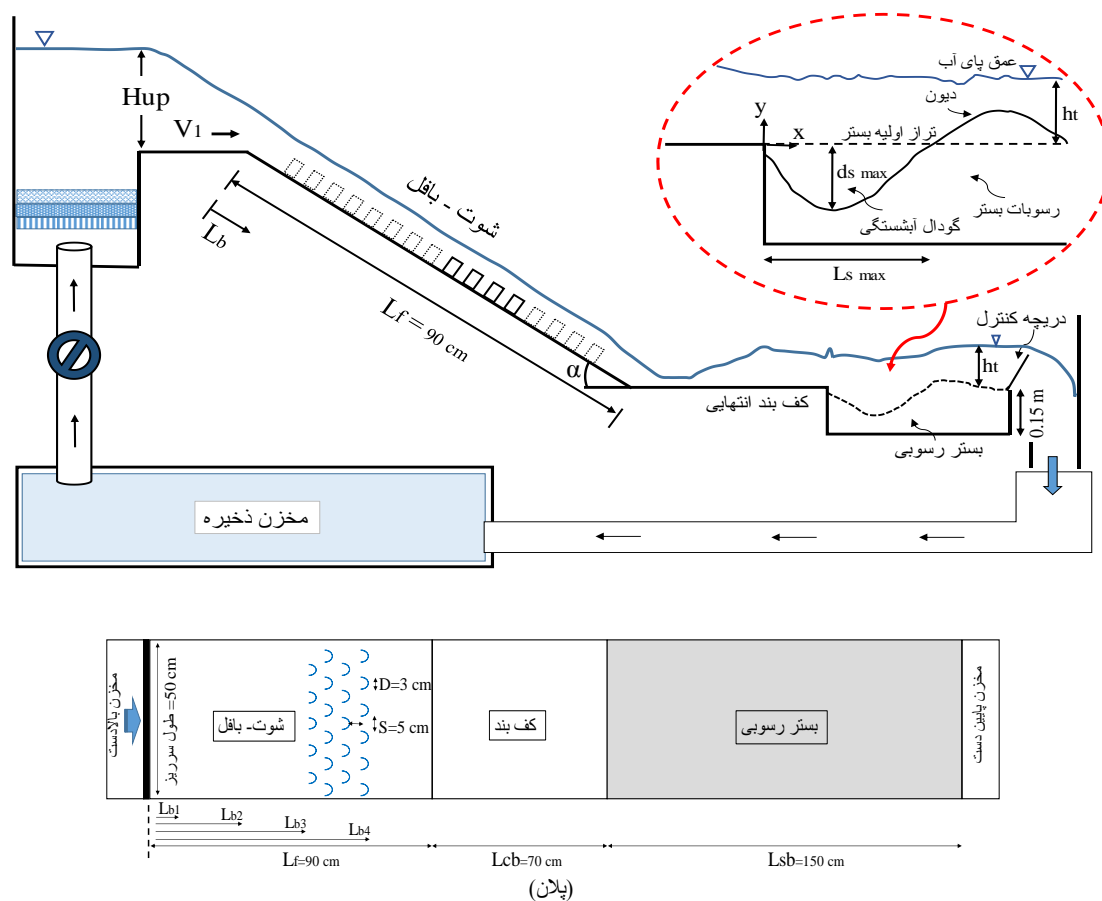
نسبت به رژیم جریان صاف رخ می‌دهد [13]. زارع [14] و دورینگ در سال ۲۰۱۲ تأثیر نصب بافل‌ها و کف‌بندهای سنگ‌چین بر اتلاف انرژی جریان روی سرریزهای مانع‌دار با لبه‌های تیز یا گرد و یک ورودی اوجی را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که نرخ اتلاف انرژی بالاتری را می‌توان در شرایط نصب بافل در مقایسه با سنگ‌چین روی شیب شوت‌ها به دست آورد. تاکنون مطالعات انجام‌شده بر روی شوت‌های مانع‌دار در شرایط استفاده از بلوک‌های مستطیلی USBR بوده است. طرح‌های پژوهشی محدودی در زمینه تأثیر شکل‌های متفاوت از هندسه‌ی بلوک‌ها بر افزایش اتلاف انرژی و کاهش ابعاد گودال آب شستگی در پایین‌دست سازه‌های کنترل جریان مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های آزمایشگاهی روی تأثیر پایه‌های بلوک T شکل، دوزنقه‌ای و پلکانی در دو شیب متفاوت بر شوت بر اتلاف انرژی جریان عبوری از روی این سازه، نشان دادند که بلوک T شکل از نظر افزایش اتلاف انرژی و میزان اکسیژن ورودی به جریان از هندسه‌های دیگر عملکرد بهتری داشته است [15]. کریمی [16] و همکاران در سال ۲۰۱۹ تأثیر واگرایی دیوار شوت با سه هندسه‌ی مختلف (بلوک بافل مستطیلی، سه‌ضلعی و بلوک‌های نیم‌دایره‌ای) را با ساخت مدل فیزیکی در آزمایشگاه بر روی عمق و ابعاد گودال آب‌شستگی در پایین‌دست شوت، مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور ۹ مدل شوت بافل‌دار با نسبت‌های واگرایی (۱، ۱/۴۵، ۱/۷۵ و ۲/۴۵) ساخته شد. با مقایسه‌ی نتایج مربوط به اثر هندسه‌ی بلوک در نسبت‌های مختلف واگرایی، مشخص شد که استفاده از بلوک‌های پیشنهاد شده در این تحقیق به جای بلوک‌های استاندارد USBR، به‌طور متوسط، تا حداکثر ۵۰ درصد عمق گودال آب‌شستگی را کاهش می‌دهد. برای یک هندسه‌ی مشخص از بلوک، میانگین و حداکثر عمق و طول گودال آب‌شستگی به ترتیب ۷۵، ۵۸ و ۵۰ درصد کاهش یافته است.

در طول مسیر عبور جریان به سمت پایین‌دست است که امروزه مورد توجه محققان قرار گرفته است. در راستای ارائه‌ی ضوابط فنی در طراحی شوت، تونا [7] در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر زاویه‌ی شیب سرریزهای پلکانی نسبت به افق بر روی مشخصه‌های گودال آب شستگی پرداخت و در نهایت در گزارش‌های خود، زاویه‌ی ۳۰ درجه را بهترین موقعیت برای طراحی و اجرای این نوع سرریزها معرفی کرد. پترکا [8] در سال ۱۹۶۴ سازه‌ی شوت با بلوک‌های بافل را نوعی اتلاف‌کننده‌ی ضربه‌ای انرژی جریان معرفی کرد. او معتقد بود که بلوک‌های بافل در شوت سبب کاهش سرعت جریان نمی‌شود، بلکه با کاهش شتاب جریان، انرژی جنبشی در پایین‌دست را کم می‌کند. پس شرایط مطلوب‌تر زمانی خواهد بود که بلوک‌ها عمود بر جریان ورودی قرار می‌گیرند. هیدرولیک جریان در سرریزهای اوجی پلکانی نشان می‌دهد که افزایش اتلاف انرژی جنبشی در پایین‌دست و همچنین کاهش طول پرش هیدرولیکی در درجه‌ی اول به نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله و تعداد پله وابسته است [9]. اضافه شدن پله‌ی سرریزهای پلکانی، سبب تضعیف قدرت جت آب می‌شود و انرژی در پایین‌دست را ۷۵ درصد کاهش می‌دهد [10]. با مدل‌سازی آزمایشگاهی تأثیر انحنای پایین‌دست و زاویه‌ی آستانه‌ی انتهایی سرریز بر آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست، مشاهده می‌شود که وقتی زاویه‌ی آستانه‌ی انتهایی سرریز از ۱۰ به ۶۰ درجه تغییر یابد، عمق آب‌شستگی پایین‌دست، کاهش ۱۵ درصدی را نشان می‌دهد [11]. پلکان عمق جریان در پنجه‌ی سرریز را حدود ۲۰ برابر شوت‌های صاف معمولی بالا می‌برد و در نتیجه انرژی باقی‌مانده در پنجه حدود ۶ تا ۷ برابر نسبت به شوت صاف کاهش می‌یابد [12]. سرریز با پروفیل پلکانی دارای اتلاف انرژی بیشتری نسبت به پروفیل صاف است. اتلاف انرژی به‌طور معکوس با تخلیه‌ی جریان متناسب است و همچنین در رژیم جریان ریزشی اتلاف انرژی بیشتری

### مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. مدل آزمایشی در کانالی مجهز به سیستم چرخش آب به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۶، ۰/۵ و ۰/۵ متر ساخته شد. کانال از شیشه ساخته شد تا امکان بازرسی بصری از آزمون در دست بررسی، فراهم شود. دریچه‌ای در پایین دست برای تنظیم عمق پای آب تعبیه شد. سرریز به همراه شوت مطابق با دستورالعمل USBR با عرض و ارتفاع به ترتیب ۰/۵ و ۰/۳ متر و مطابق توصیه‌ی تونا در سال ۲۰۱۲، در شیب با زاویه‌ی بهینه‌ی ۳۰ درجه انتخاب و طراحی شد [7] (شکل ۱).

مطابق پیشینه‌ی پژوهش انجام‌شده و اهمیت موضوع آب‌شستگی در پای سرریزها، پژوهش حاضر با بررسی تأثیر نصب پایه‌ی بلوک‌های مستطیلی، مثلثی و دایره‌ای روی شوت با هدف کنترل توان فرسایشی جریان در پنجه‌ی سرریزها (کاهش عمق و طول آب‌شستگی)، می‌تواند با هزینه‌ای کمتر جایگزینی برای بلوک‌های روی تنداب USBR و یا حوضچه‌های آرامش پیچیده و پرهزینه باشد. آزمایش‌ها در شرایط تنوع عدد فرود ورودی به بررسی تأثیر الگوی نصب و شکل هندسی بلوک‌ها بر افت انرژی در طول مسیر حرکت از روی سرریز تا پای شوت پرداخته‌است.



شکل ۱ شماتیکی از کانال و پلان مدل‌سازی آزمایشگاهی

در آزمایش‌های شاهد (شوت بدون پایه) مناسب طول پرش هیدرولیکی در بالاترین عدد فرود بوده است. طبق نظریه‌ی رادکیوی و اتما در سال ۱۹۸۳ برای جلوگیری از تشکیل ریبیل در طول آزمایش باید قطر متوسط ذرات بیش از ۰/۷ میلی‌متر باشد. هم‌چنین زمانی که انحراف معیار هندسی ذرات کمتر از ۱/۳ است می‌توان از تأثیر غیریکنواختی ذرات بر عمق آب شستگی صرف‌نظر کرد [17]. بنابراین طبق معیارهای فوق از رسوبات غیرچسبنده با قطر متوسط ۰/۷۲ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و انحراف معیار هندسی ۱/۱۲ استفاده شد.

آزمایش‌ها در دبی‌های ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴ و ۲۸ لیتر بر ثانیه در واحد عرض انجام شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به‌ازای هر دبی، یک عدد فرود در بالادست سرریز به‌وجود آمده است. سرعت نزدیک شونده به تاج سرریز به‌اندازه‌ی کافی از سرعت بحرانی کمتر است. گفتنی است که برای اندازه‌گیری تراز سطح آب و پروفیل بستر در جهت طولی و مقطع عرضی کانال (با دقت ۰/۱ میلی‌متر) از خط‌کش داده‌بردار نقطه‌ای استفاده شد.

روابط مربوط به پرش کلاسیک از جمله عدد فرود اولیه و عمق ثانویه‌ی پرش ارائه شده است:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (1)$$

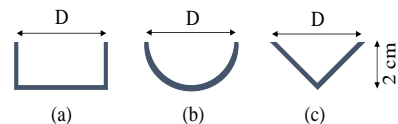
$$Fr_1 = \frac{q}{\sqrt{gy_1^3}} \quad (2)$$

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

در اینجا؛  $y_1$  و  $y_2$  به ترتیب عمق اولیه و ثانویه‌ی پرش هیدرولیکی (متر)،  $Fr_1$  عدد فرود اولیه (بی‌بعد)،  $q$  دبی در واحد عرض (مترمربع بر ثانیه)، می‌باشند. هم‌چنین رابطه‌ی اتلاف انرژی نسبی به‌صورت  $(\Delta E/E_{up})$  ارائه شد که در آن  $E_{up} \Delta E = E_{up} - E_2$  انرژی بالادست و  $E_2$  انرژی در عمق ثانویه‌ی پرش است.

طراحی فنی بلوک‌های بافل در شوت مورد بررسی قرار گرفت. تعداد بلوک‌های موجود در هر ردیف از مدل مورد آزمایش، مطابق با توصیه‌ی بلايسدل در سال ۱۹۴۸ در محدوده‌ی ۴۰-۵۰ درصدی از عرض کف شوت انتخاب شد [6]. در هر ردیف ۶ عدد بلوک به‌عرض دهانه‌ی ثابت (D) برابر ۳ سانتی‌متر نصب شد. مطابق دستورالعمل USBR عمق جریان بر روی شوت بدون پایه‌ی بلوک در شرایط دبی طراحی، یک مرجع تجربی برای انتخاب ارتفاع مناسب بافل است. از این‌رو، ارتفاع هر بلوک ۱/۵ سانتی‌متر و فاصله‌ی بلوک‌ها از هم در ردیف عرضی و طولی، برابر ۵ سانتی‌متر انتخاب شد. چهار جانمایی برای ردیف‌های پایه‌ی بلوک روی شیب شوت در نظر گرفته شد تا بهترین عملکرد آرایش چهارردیفه‌ی پایه‌ها از نظر موقعیت نصب مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین موقعیت نصب پایه‌ها به‌صورت نسبتی از کل طول شیب شوت (۰/۸، ۰/۶ و ۰/۴، ۰/۲) انتخاب شد (شکل ۱ و ۲).

به‌منظور بررسی تأثیر فرم هندسی پایه‌های بلوک با مشخصات هندسی ارائه شده، سه حالت مطابق شکل (۲) در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که تمام مشخصه‌های ابعادی پایه‌ی بلوک‌ها به‌جز شکل هندسی در تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد.



شکل ۲ اشکال هندسی بلوک‌های بافل: (a) بلوک مستطیلی (REB)، (b) بلوک نیم‌دایره‌ای (SCB)، (c) بلوک مثلثی (TRB)

ضخامت و طول بستر رسوبی ( $L_{sb}$ ) بعد از کف‌بندی ثابت سرریز بر مبنای آزمایش‌های مقدماتی، در حالت شوت صاف (بدون پایه)، به ترتیب ۰/۱۵ و ۱/۵ متر تعیین شد تا جوابگوی عمق و طول حداکثری گودال آب‌شستگی در تمام آزمایش‌ها باشد. هم‌چنین طول کف‌بند ثابت ( $L_{cb}$ ) بعد از پنجه‌ی سرریز ۷۰ سانتی‌متر انتخاب گردید. در اینجا نیز طول انتخاب شده

جدول ۱ ویژگی آزمایش‌ها

پارامتر	Q(lit/s)	H <sub>up</sub> (cm)	Fr <sub>up</sub>	Re <sub>up</sub>
مقدار	۶ - ۱۴	۲/۵ - ۴/۵	۰/۹۳۶ - ۰/۹۶۹	۱۱۹۶۴ - ۲۷۹۱۶

### آنالیز ابعادی

مطابق رابطه‌ی (۴) آب شستگی موضعی پایین دست یک سرریز به تعداد زیادی از متغیرهای بعددار و بدون بعد وابسته است، اما بررسی تأثیر مجزای هر پارامتر بر نتایج آزمایش‌ها کاری بس دشوار است، لذا، برای سهولت در تحلیل نتایج، در این مقاله با انجام تحلیل ابعادی بر روی متغیرهای تأثیرگذار و به دست آوردن نسبت‌های بدون بعد، تأثیر هم‌زمان چند پارامتر بر نتایج آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر از روش پای-باکینگهام برای انجام تحلیل ابعادی استفاده شد.

$$d_s = f(B, D, H_u, V_{up}, h, SF, L_b, L_f, L_s, L_{cb}, g, \gamma_1, \gamma_2, \rho_w, \rho_s, \mu, S, S_0, d_{50}, h_t) \quad (4)$$

که در اینجا،  $d_s$  حداکثر عمق آب شستگی (متر)،  $B$  عرض شوت (متر)،  $D$  عرض دهانه‌ی بلوک (متر)،  $H_{up}$  هد آب در بالادست سرریز،  $V_{up}$  سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)،  $h$  ارتفاع بلوک (متر)،  $SF$  پارامتر شکل بلوک،  $L_b$  فاصله اولین ردیف بلوک تا تاج سرریز (متر)،  $L_f$  طول شوت (متر)،  $L_s$  طول آب شستگی نهایی (متر)،  $L_{cb}$  طول کف‌بند،  $g$  شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)،  $\gamma_1$  عمق اولیه‌ی پرش هیدرولیکی (متر)،  $\gamma_2$  عمق ثانویه‌ی پرش هیدرولیکی (متر)،  $\rho_w$  و  $\rho_s$  به ترتیب چگالی آب و رسوبات (چگالی نسبی  $S_g = \frac{\rho_s}{\rho_w}$ ) (گیلوگرم بر متر مکعب)،  $\mu$  لزجت دینامیکی آب (گیلوگرم بر متر در ثانیه)،  $S_0$  شیب کف کانال (بدون بعد)،  $S$  فاصله‌ی بلوک-ها از هم در یک ردیف (متر)،  $d_{50}$  قطر متوسط ذرات رسوبی بستر (میلی‌متر)،  $h_t$  عمق پای آب (متر)، می‌باشند.

برخی از پارامترهای ارائه شده در رابطه‌ی (۴) به دلیل ثابت بودن در تمامی آزمایش‌ها، حذف شدند. هم‌چنین در تعیین پارامترهای آب شستگی، تأثیر ویسکوزیته اهمیت کمتری دارد و به دلیل این که اساساً جریان ثقلی است، از اثر عدد رینولدز جریان نیز چشم‌پوشی شده است. در نهایت با رسم گراف‌هایی از تقابل نسبت-های بدون بعد (رابطه ۵) تأثیر تمامی متغیرهای مستقل مؤثر بر آزمایش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت:

$$f(Fr_{up}, SF, \frac{d_s}{H_{up}}, \frac{L_b}{L_f}, \frac{L_s}{H_{up}}) = 0 \quad (5)$$

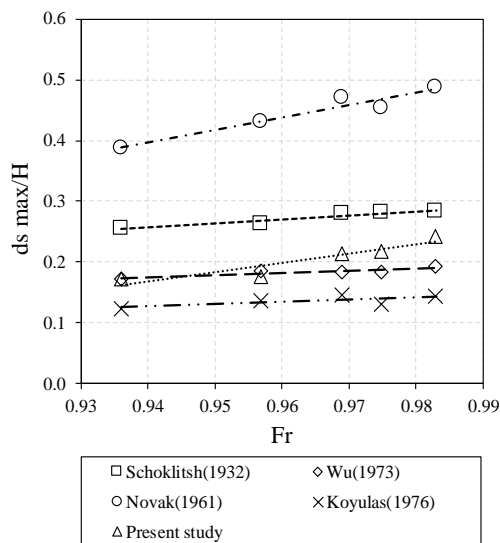
در اینجا،  $Fr_{up} = \frac{V_{up}}{\sqrt{gH_{up}}}$  عدد فرود (بی‌بعد) است. مراحل انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که پس از عبور دبی تخلیه‌ی مجاز از روی سرریز، دریچه‌ی پای آب برای تشکیل پرش هیدرولیکی در پنجه‌ی سرریز تنظیم شد و پس از دست‌یابی به شرایط پرش پایدار، سرعت جریان، طول پرش، عمق آب در بالادست و پایین دست سرریز، عمق متناوب پرش و عمق پای آب ثبت گردید. کومار و همکاران در سال ۱۹۹۹ زمانی را به عنوان زمان تعادل آب شستگی در نظر گرفتند که ۳ ساعت پس از آن، عمق آب شستگی کمتر از ۱ میلی‌متر تغییر کند. از آنجا که هدف این تحقیق مقایسه‌ی عمق گودال آب شستگی بوده است، لذا معیار فوق برای زمان تعادل انتخاب گردید [18].

بعد از انجام آزمایش‌های شاهد، مطابق شکل (۳) مشاهده شد که با گذر ۲۴۰ دقیقه از لحظه‌ی شروع، روند اثربخشی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان بر ابعاد گودال آب شستگی متوقف گردید. بنابراین، تمام آزمایش‌ها در مدت زمان ۲۴۰ دقیقه انجام شدند که با

$$d_s = 0.78 \left( \frac{h_t^{0.35} q^{0.7}}{d_{90}^{0.4}} \right) \quad (8)$$

$$d_s = 2.11 H_{up} \left( \frac{q}{(gH_{up}^3)^{1/2}} \right)^{0.51} \quad (9)$$

در این روابط؛  $d_s$  عمق نهایی آب شستگی،  $h_t$  عمق پای آب،  $H_{up}$  اختلاف تراز آب بالادست سرریز و پای آب،  $q$  دبی در واحد عرض و  $d_{90}$  معرف اندازه‌ای است که ۹۰٪ از ذرات رسوبی از آن کوچک‌تر هستند.

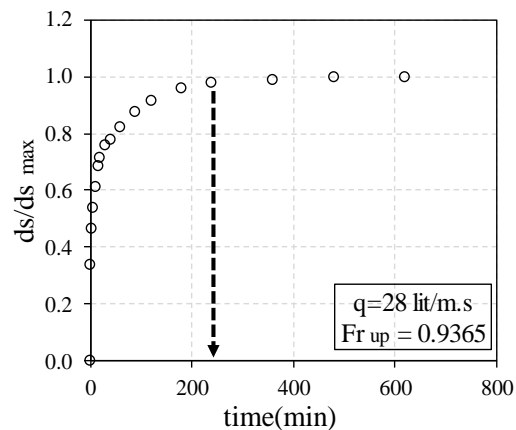


شکل ۴ مقایسه‌ی نسبی بین نتایج تجربی مطالعه‌ی حاضر (مدل شاهد) با محققان دیگر

شکل (۴) مقایسه‌ی نسبی بین نتایج تجربی برای مدل شاهد را با معادلات ارائه شده‌ی (۶) تا (۹) نشان می‌دهد. مشاهده شد که معادلات تجربی ارائه شده مقادیر بسیار نزدیکی با عمق آب شستگی به دست آمده از مطالعه‌ی حاضر را نشان می‌دهند. از طرف دیگر، مطابق داده‌های برازش داده شده، معادله‌ی Novak مقادیر بیشتری از  $\frac{d_s}{H_{up}}$  را نسبت به دیگر معادلات نشان می‌دهد. از بین این معادلات، معادله‌ی Wu تخمین خوبی از عمق آب شستگی اندازه‌گیری شده، نشان داده است؛ بنابراین می‌توان گفت که صحت داده‌های تجربی مدل شوت با پایه‌ی بافل در مقایسه با معادلات جمع‌آوری شده در

نتایج مطالعات قبلی در مورد آب شستگی هم‌خوانی دارد [19].

سپس پروفیل فرسایشی (حداکثر عمق و طول آب شستگی) در محدوده‌ی گودال، متناسب با بستر رسوبی اولیه که به واسطه‌ی مختصات دهی (x,y) مش بندی شده بود، اندازه‌گیری شد. در نهایت داده‌های جمع‌آوری شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

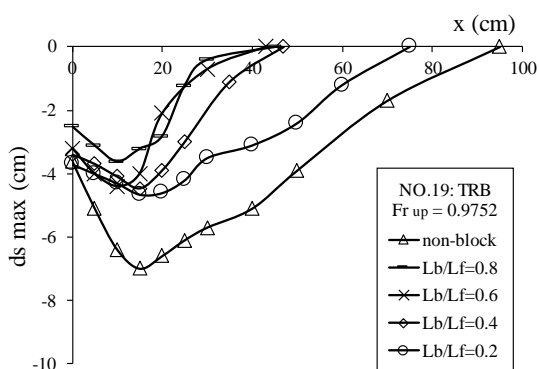


شکل ۳ بررسی توسعه‌ی زمانی آب شستگی در شرایط شوت بدون بلوک

روابط (۶) تا (۹) برخی از معادلات ارائه شده توسط محققان دیگر برای محاسبه‌ی حداکثر عمق آب شستگی پایین دست سرریز صاف را نشان می‌دهند. برای اطمینان از صحت داده‌های به دست آمده در مدل آزمایشگاهی، داده‌های اندازه‌گیری شده در مدل شوت بدون مانع (آزمون شاهد)، با حداکثر عمق آب شستگی محاسبه شده از این روابط کالیبره شد [16]. روابط زیر به ترتیب توسط اسچوکلیش (۱۹۳۲)، نوک (۱۹۶۱)، کوتلاس (۱۹۷۶) و تو در سال ۱۹۷۳ گزارش شده‌اند.

$$d_s = \left( \frac{0.521q^{0.57} H_{up}^{0.2}}{d_{90}^{0.32}} \right) - h_t \quad (6)$$

$$d_s = 0.55(6H_{up}^{0.25} q^{0.5} \left( \frac{h_t}{d_{90}} \right)^{1/3} - h_t) \quad (7)$$



شکل ۵ پروفیل آب‌شستگی بستر در شرایط متفاوت هندسی و موقعیت نسبی نصب بلوک‌ها

مشاهده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که طول جریان روی شوت با فل‌دار به دو محدوده از طول هواده‌ی شده و غیر هواده‌ی شده تقسیم می‌شود. به نظر می‌رسد طول محدوده‌ی غیر هواده‌ی برای بهبود راندمان هواده‌ی به جریان بسیار حائز اهمیت است و این محدوده با افزایش عمق جریان بحرانی روی تاج، افزایش می‌یابد.

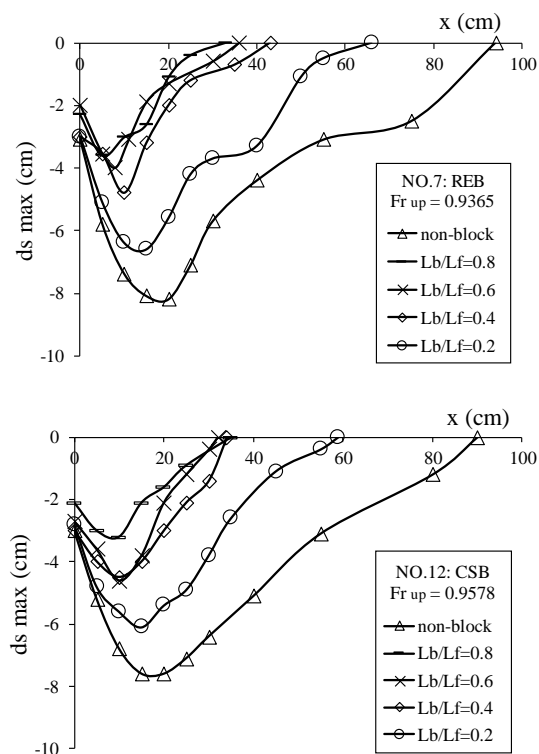
هم‌چنین جریان اطراف بلوک‌ها در دبی‌های مختلف موجب تمایز رژیم جریان روی شوت می‌شود. اول جریانی است که از روی بلوک به صورت جهشی عبور می‌کند، که در شرایط نصب تعذر در برابر جریان بلوک‌ها با انرژی جنبشی بیشتری نسبت به الگوی نصب تحذب در برابر جریان، رخ داده‌است. دوم جریان هم‌گرایی که از بین بلوک‌ها برقرار است و سوم جریانی که به صورت گردابی و کف‌آلود در جلو و داخل بلوک‌ها شکل گرفته و موجب افزایش روگذری جریان از روی بلوک‌ها می‌شود. از این رو، وجود بلوک سبب افزایش تلاطم و کاهش انرژی جریان در انتهای شوت می‌شود و در نهایت با تضعیف پرش هیدرولیکی در پنجه‌ی سرریز، موجب کاهش انتقال رسوب به پایین دست می‌شود.

آنچه مشخص است، پارامترهای ابعادی گودال آب‌شستگی در میانه‌ی عرضی بستر فرسایشی، کاهش یافته‌است و الگوی آب‌شستگی برای همه مدل‌های مورد

شکل (۴) قابل قبول است. اختلافات اندک موجود می‌تواند به دلیل شرایط متفاوت آزمایشگاهی باشد.

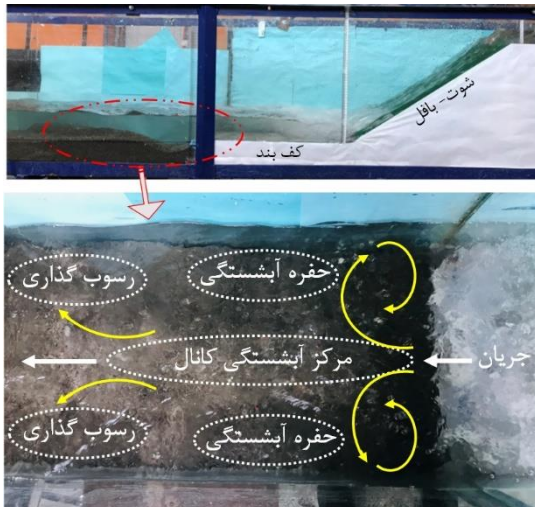
## نتایج و بحث توپوگرافی بستر

با استفاده از داده‌های مربوط به آب‌شستگی و رسوب‌گذاری در پایین دست مدل‌های آزمایشگاهی، پروفیل عمقی و طولی سطح بستر فرسایشی در دبی‌های مختلف و مشخصه‌های مختلف پایه‌ی بلوک ترسیم شده‌است. کاملاً واضح است که در همه‌ی موارد نصب بلوک‌ها سبب کاهش عمق و طول آب‌شستگی نهایی شده‌است. آن‌چه که مشخص است بلوک‌های مستطیلی حداقل مقدار عمق آب‌شستگی را در امتداد خط شعاعی نشان می‌دهند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از شکل‌های متفاوت بلوک‌های پیشنهادی بر نتایج آزمایش اثرگذار است و حداکثر عمق آب‌شستگی را کاهش می‌دهد (شکل ۵).





داده است.



شکل ۶ پلان محدوده‌ی آبشستگی با نمایش جهت جریان‌های ثانویه



(a)



(b)

شکل ۷ تغییرات الگوی جریان روی شوت با تفاوت در تقعر بلوک‌های نیم‌دایره‌ای

### تأثیر پایه‌ی بلوک بر عمق گودال آبشستگی

شکل (۹) ارتباط بین عدد فرود ( $Fr_{up}$ ) و پارامتر بدون بعد عمق آبشستگی ( $\frac{d_s}{H_{up}}$ ) را برای اشکال متفاوت

بررسی تقریباً متقارن است. هم‌چنین، حداکثر مقدار آبشستگی به دلیل جریان‌های ثانویه و گردابه‌های شکل گرفته، در دو طرف خط مرکز طولی بستر رسوبی نمایان شده است. محل حداکثر عمق آبشستگی نیز همیشه در نزدیکی بستر ثابت رخ داده است. شایان ذکر است، در شرایط نصب بلوک‌های حفاظتی، موقعیت رخداد عمق حداکثر گودال آبشستگی به بستر ثابت کف‌بند، نزدیک‌تر شده است (شکل ۶).

از نگاه هیدرودینامیکی مشخص است که در صورتی که بتوان نیروی رانشی بزرگ‌تری در برابر جریان ایجاد کرد، به مقدار بیشتری از شتاب جریان کاسته می‌شود، که این خود موجب کاهش عمق و طول آبشستگی می‌گردد. از این رو، در پژوهش حاضر با انجام دو سری آزمایش، با تفاوت در تقعر - تحذب نصب بلوک‌ها، نشان داده شد که در شرایط نصب تحذب در برابر جریان، مطابق مشاهده‌های آزمایشگاهی در شکل (۷-۷a) با تضعیف جریان‌های جهشی، علی‌رغم تسهیل عبور جریان از حدفصل بین بلوک‌ها و افزایش طول مسیر پیمایش جریان در طول شوت، با مقدار اتلاف انرژی کمتر نسبت به حالت تقعر در برابر جریان، احتمال رخداد کاویتاسیون متأثر از تشکیل گردابه‌های چرخشی و ایجاد ناحیه‌ی کم‌فشار در قسمت پشت هر بلوک (ایجاد فشار منفی) افزایش می‌یابد. هم‌چنین شکل (۷-۷b) نشان‌دهنده‌ی تقعر در برابر جریان بلوک‌ها می‌باشد که مطابق اصول مومنتوم جریان سبب کاهش آنی شتاب حجم زیادی از جریان در قسمت جلوی بلوک‌ها می‌شود و با ایجاد گردابه‌های چرخشی - برگشتی روبه‌بالا، سبب افزایش تلاطم و انسداد بیشتر در مسیر عبور جریان از حدفصل بین بلوک‌ها می‌شود. در این الگوی نصب، پرش هیدرولیکی به صورت جریان کم‌انرژی، کف‌آلود و مملو از حباب‌های هوا خود را در پنجه‌ی سرریز نمایان می‌سازد، که این خود با کاهش توان فرسایشی و روبه‌جلوی جریان، علت اصلی کاهش رسوبات حمل‌شده به پایین دست است. در نهایت، کاهش ۲۰-۱۰ درصدی در مقادیر عمق نهایی آبشستگی نسبت به الگوی نصب تحذب در برابر جریان بلوک‌ها رخ

ابتدا تا میانه‌ی طول شوت (برای مثال در  $L_b/L_f=0.2$ ), مطابق مشاهده‌های عینی نشان داده شده در شکل (۸)، جریان جهشی (آبشار) قوی‌تری از روی بلوک‌ها به پایین دست پرتاب می‌شود و علی‌رغم افزایش استهلاک انرژی و انتقال اکسیژن به جریان، سبب کاهش دبی تخلیه می‌شود. از طرفی دیگر افزایش نامتعارف ۵ تا ۹ برابری عمق جریان روی شوت، هزینه‌های اجرایی دیوارهای جانبی سرریز را با رشد قابل توجهی همراه خواهد ساخت و منطقی نیست که در طراحی بلوک‌ها تقعر نصب در نیمه‌ی بالایی طول شوت در برابر جریان انتخاب شود. لازم به ذکر است که مدل‌سازی نرم‌افزاری جریان روی شوت و رسیدن به درک بهتر از این موضوع می‌تواند کمک قابل توجهی به طراحی قبل از اجرا در این رابطه کند.



شکل ۸ جریان جهشی در موقعیت نصب  $L_b/L_f=0.2, 0.4$  و تقعر در برابر جریان بلوک‌های مثلی

لازم به ذکر است، در تمامی آزمایش‌ها با افزایش دبی و به تبع آن عدد فرود جریان بر روی تاج سرریز، جریان روگذر کمتر حضور بلوک‌ها را حس می‌کند و با پروفیل سطح آب مشابه رژیم جریان صاف در مدل شاهد (بدون پایه‌ی بلوک) خود را به پنجه‌ی شوت می‌رساند.

شکل (۱۰) با ارائه‌ی خلاصه‌ای از کارآمدترین الگوهای نصب در هر یک از اشکال هندسی متفاوت بلوک‌ها به تسهیل مقایسه‌ی پارامتر نسبی عمق آب‌شستگی در اعداد فرود متفاوت جریان پرداخته‌است. به راحتی می‌توان فهمید که برای شرایط یکسان

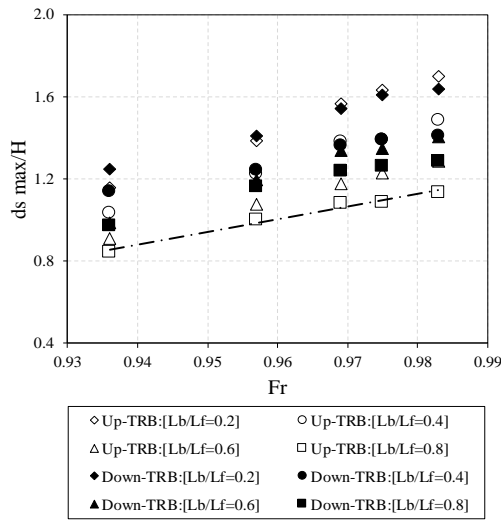
بلوک (مستطیل، نیم‌دایره و مثلث)، با توجه به موقعیت نسبی نصب در ( $L_b/L_f=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ) و همچنین تفاوت در جهت تقعر - تحذب نصب بلوک‌ها را نشان می‌دهد.

باتوجه به صعودی بودن نمودار برای همه‌ی مدل‌ها، مشخص است که با افزایش عدد فرود جریان ( $Fr_{up}$ ) و در واقع پایدار شدن پرش هیدرولیکی (باتوجه به گروه پرش‌های ایجاد شده در این تحقیق)، همواره پارامتر عمق آب‌شستگی نسبی ( $\frac{d_s}{H_{up}}$ ) افزایش بیشتری را از خود نشان می‌دهد. همچنین، نتایج نشان داد که همه‌ی الگوهای نصب پایه‌ی بلوک، بر ابعاد گودال آب‌شستگی مؤثر است و همواره مقادیر  $\frac{d_s}{H_{up}}$  به دست آمده کوچک‌تر از حالت شوت صاف (بدون بلوک) است.

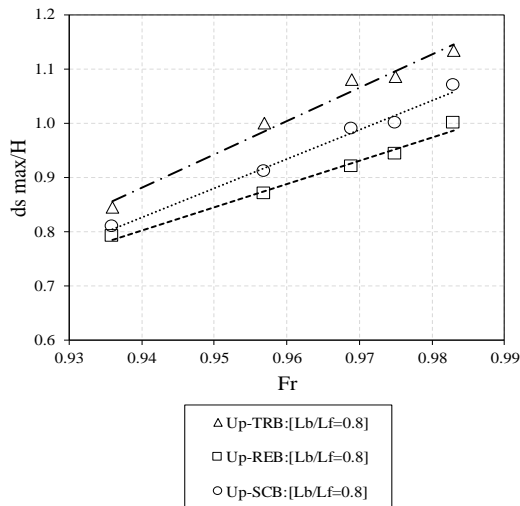
همان‌طور که توضیح داده شد؛ علاوه بر موقعیت نسبی نصب، جهت تقعر - تحذب در نصب بلوک‌ها نیز بر مقادیر نهایی ابعاد گودال آب‌شستگی مؤثر است. از این رو، لزوم بررسی تأثیر توأم آن دو متغیر بر پارامترهای ابعادی گودال آب‌شستگی مورد توجه این تحقیق قرار گرفته‌است.

مطابق الگوی نصب ارائه شده در شکل (۱) و باتوجه به جهت نصب تقعر بلوک‌ها، گفتنی است که با افزایش فاصله‌ی نسبی نصب الگوی چهار ردیفی بلوک‌ها تا لبه‌ی تاج سرریز، کاهش عمق آب‌شستگی بیشتری در مدل‌های تقعر در برابر جریان نسبت به حالت متناظر تحذب در برابر جریان بلوک‌ها مشاهده شده‌است. برای هر سه شکل هندسی، همواره شرایط تقعر در برابر جریان در دورترین فاصله‌ی نصب تا تاج سرریز ( $L_b/L_f=0.8$ ) بیشترین اثربخشی بلوک‌ها بر عمق نهایی گودال آب‌شستگی نسبت به سایر مدل‌ها رخ داده‌است. در این شرایط، عمق نهایی آب‌شستگی به طور متوسط به مقدار تقریبی  $38/4$  درصد نسبت به حالت شاهد کاهش یافته‌است.

نکته‌ی دیگری که می‌توان بیان کرد، آن است که در حالت تقعر نصب روبه‌بالای بلوک‌ها، در موقعیت‌های



شکل ۹ تغییرات عمق آب شستگی نسبی در برابر اعداد فرود و موقعیت نصب متفاوت بلوک‌ها: (a) بلوک مستطیلی، (b) بلوک نیم-دایره‌ای، (c) بلوک مثلثی

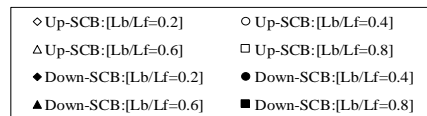
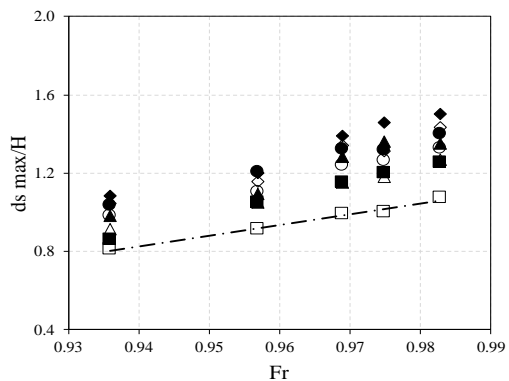
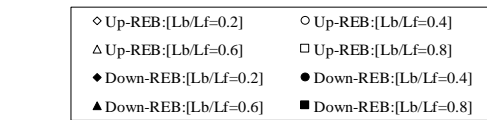
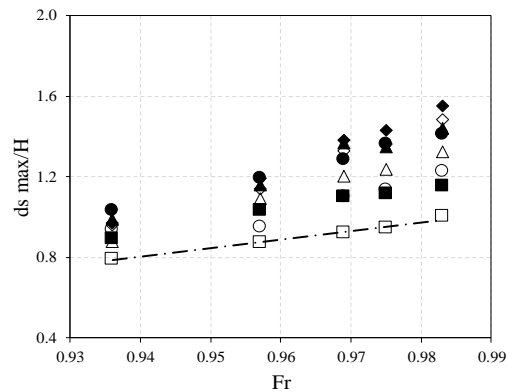


شکل ۱۰ مقایسه‌ی اثربخشی سه شکل هندسی بلوک بر مقدار عمق آب شستگی نهایی در بهترین موقعیت نصب

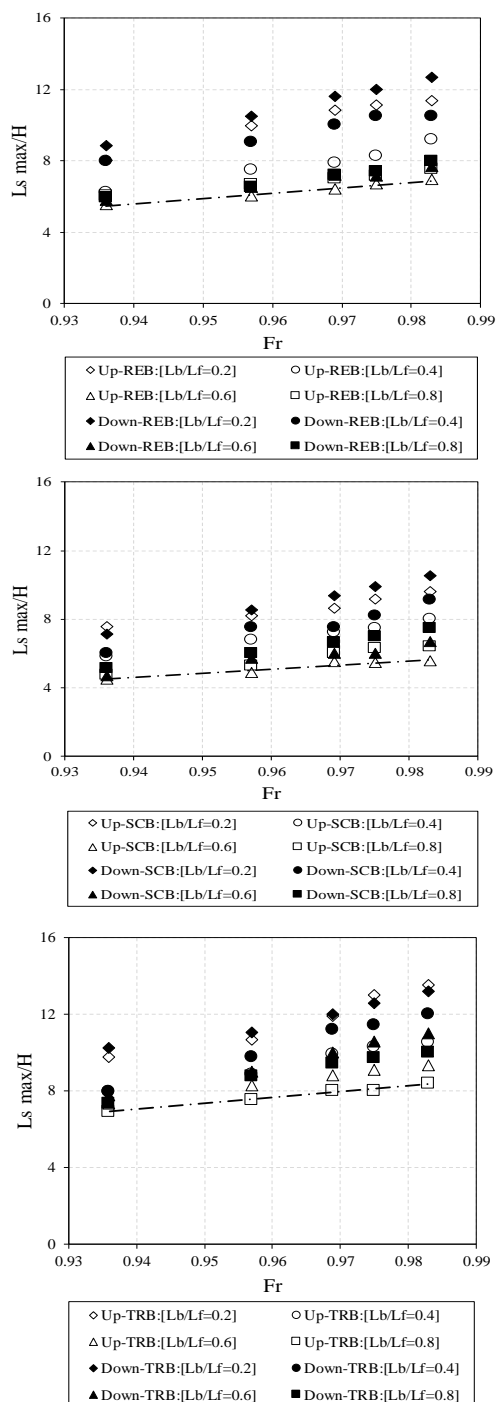
### تأثیر پایه‌ی بلوک بر طول گودال آب شستگی

شکل (۱۱) نیز ارتباط بین عدد فرود ( $Fr_{up}$ ) و پارامتر بدون بعد طول آب شستگی ( $\frac{L_s}{H_{up}}$ ) را برای اشکال متفاوت از بلوک‌ها (USBR، نیم‌دایره‌ای، مثلثی) و فاصله‌ی نسبی نصب در ( $L_b/L_f = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ) و همچنین تفاوت در جهت‌گیری نصب تقعر-تحدب بلوک‌ها را نشان داده است.

در نظر گرفته شده، جهت نصب تقعر همه‌ی شکل‌های هندسی بلوک‌ها در برابر جریان و موقعیت نصب  $L_b/L_f=0.8$  در کاهش عمق نهایی گودال آب شستگی موثرتر برآورد شده است، اما آنچه که در شکل (۱۰) به وضوح مشخص است، علاوه بر جهت تقعر و موقعیت نسبی نصب در طول شوت، تأثیر تفاوت در شکل هندسی بلوک‌ها، نقش پررنگ‌تری بر پارامترهای ابعادی گودال آب شستگی دارد. در شرایط اعداد فرود متفاوت جریان، هندسه‌ی مستطیلی بلوک با تقعر در برابر جریان، سبب رخداد حداقل عمق نسبی آب شستگی نسبت به سایر مدل‌ها شده و مقدار نسبی  $\frac{ds}{H_{up}}$  را در مقایسه با حالت شاهد (بدون بلوک)، بین ۲۵ تا ۶۱/۲ درصد کاهش داده است.



شکل (۱۲) نیز برای جمع‌بندی و مقایسه‌ی پارامتر نسبی طول آب‌شستگی به‌صورت خلاصه‌ای از کارآمدترین الگوهای نصب برای اشکال هندسی متفاوت بلوک‌ها در اعداد فرود متفاوت جریان آورده شده‌است.



شکل ۱۱ تغییرات طول آب‌شستگی نسبی در برابر اعداد فرود و موقعیت‌های نصب متفاوت بلوک‌ها: (a) بلوک مستطیلی، (b) بلوک نیم‌دایره‌ای، (c) بلوک مثلثی

در اینجا نیز همانند نمودارهای مربوط به عمق آب‌شستگی، نشان داده شد که در همه‌ی الگوهای نصب پایه‌ی بلوک، مقادیر  $\frac{L_s}{H_{up}}$  کوچک‌تر از حالت شوت صاف (بدون بلوک) رخ داده‌است. شایان ذکر است که افزایش عدد فرود جریان ( $Fr_{up}$ ) سبب ایجاد نموداری صعودی برای همه‌ی مدل‌ها شده و همواره پارامتر طول آب‌شستگی نسبی ( $\frac{L_s}{H_{up}}$ ) افزایش یافته‌است. به نظر می‌رسد که افزایش دبی و عدد فرود جریان در بالادست سرریز، سبب ایجاد جریان‌های گردابه‌ای و ناحیه‌ی کم‌فشار در پشت پایه‌ی بلوک‌ها شده که این خود با افزایش انسداد جریان بین بلوک‌ها منجر به تقویت جریان‌های روگذر و سرکوب جریان‌های جهشی از روی بلوک‌ها، شده‌است. در نتیجه با پایدار شدن پرش و افزایش اتلاف انرژی متأثر از حضور بلوک‌ها در مسیر جریان، طول گودال آب‌شستگی کمتری رخ داده‌است.

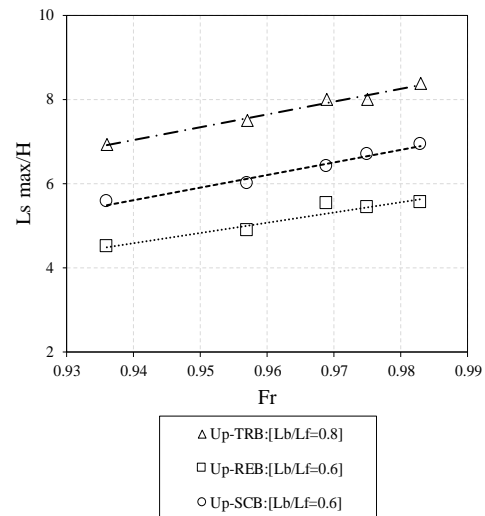
نکته‌ی قابل تذکر دیگر این است که تأثیرگذاری متغیرهای موقعیت نسبی نصب و جهت تععر-تحدب نصب بلوک‌ها بر مقادیر نهایی طول آب‌شستگی مؤثرتر از مقادیر عمق گودال آب‌شستگی متناظر است. با افزایش موقعیت نسبی نصب بلوک‌ها تا لبه‌ی تاج سرریز، به دلیل راندمان اتلاف انرژی بیشتر در انتهای شوت، سبب افزایش اعماق مزدوج پرش در پنجه می‌شود و از توان فرسایشی و روبه‌جلوی جریان می‌کاهد. برای هر سه شکل هندسی، نصب بلوک‌ها در موقعیت نسبی ( $L_b/L_f=0.8$ ) با تععر در برابر جریان، کاهش چشم‌گیری را در طول نهایی گودال آب‌شستگی نسبت به سایر مدل‌ها نشان داده‌است. در این شرایط، طول نهایی آب‌شستگی به‌طور متوسط به مقدار تقریبی ۶۳٪ درصد نسبت به حالت شاهد کاهش یافته‌است.

به نظر می‌رسد که افزایش سطح اشغال‌شده‌ی بلوک‌ها به‌خصوص در هندسه‌ی مستطیلی، دلیل انسداد بیشتر جریان در حدفاصل بین این بلوک‌ها بوده‌است و تععر در برابر جریان بلوک‌ها نیز مطابق آنچه بیان شد، دلیل افزایش انسداد و گردابه‌های چرخشی-برگشتی روبه‌بالای جریان و در نهایت کاهش طول آب‌شستگی در پایین‌دست است.

نسبی نصب  $L_b/L_f=0.6$  سبب رخداد حداقل طول نسبی آب شستگی نسبت به سایر مدل‌ها شده و مقدار نسبی را در مقایسه با حالت شاهد (بدون بلوک)، بین  $\frac{L_s}{H_{up}}$  تا  $38/1$  تا  $73/4$  درصد کاهش داده است.

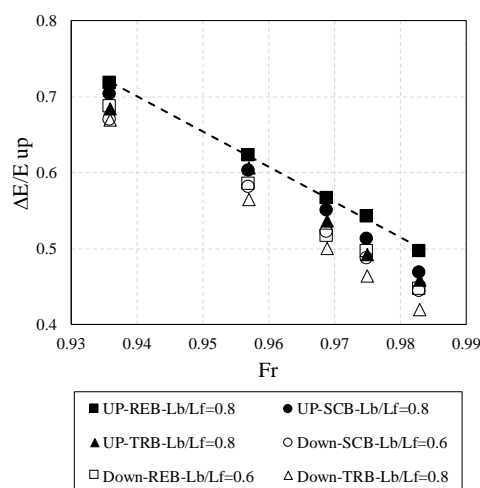
بر اساس نتایج به دست آمده در شکل (۹) و (۱۲) به بررسی میزان اتلاف انرژی نسبی در پنجه‌ی شوت به همراه پایه‌ی بلوک در مقابل عدد فرود بالادست سرریز پرداخته شد.

مطابق شکل (۱۳) گفتنی است که با افزایش عدد فرود جریان در بالادست، انرژی نسبی مستهلک شده، کاهش می‌یابد. همان‌طور که در تشریح دلایل تغییرات ابعاد هندسی گودال آب شستگی بیان شد، می‌توان این امر را این‌گونه بیان کرد که افزایش عدد فرود جریان بالادست (افزایش دبی) احتمالاً سبب کاهش تأثیرگذاری پایه‌های بلوک بر الگوی جریان روی شوت شده است. همچنین، مطابق نتایج ارائه شده برای هندسه‌ی گودال آب شستگی و حجم رسوبات انتقال یافته در پایین دست کف بند انتهایی، بلوک‌های مستطیلی با تفرع در برابر جریان و در موقعیت نسبی نصب  $L_b/L_f=0.8$  علاوه بر عملکرد بهینه با رویکرد حفاظتی در کاهش انتقال رسوب، در راستای استهلاک انرژی در پایین دست سرریزها نیز بهینه‌ترین الگو گزارش می‌شود.



شکل ۱۲ مقایسه‌ی اثربخشی سه شکل هندسی بلوک بر مقدار طول آب شستگی نهایی در بهترین موقعیت نصب

مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که کاهش طول آب شستگی نیز در شرایط تفرع در برابر جریان برای همه‌ی شکل‌های هندسی بلوک‌ها عملکردی مؤثرتر داشته است، اما آنچه که در شکل (۱۲) به وضوح مشخص است، علاوه بر جهت تفرع، شکل هندسی و هم‌چنین موقعیت نسبی نصب بلوک‌ها در طول شوت، نقش پررنگ تری بر پارامترهای ابعادی گودال آب شستگی دارد. در شرایط اعداد فرود متفاوت جریان، هندسه‌ی مستطیلی با تفرع در برابر جریان و موقعیت



شکل ۱۳ مقایسه‌ی اثربخشی سه شکل هندسی بلوک بر مقدار اتلاف انرژی در موقعیت‌های نصب بهینه

جدول ۲ مقایسه‌ی عملکرد بلوک در این تحقیق با سایر محققان

محققان و سال	شرایط آزمایش	روش حفاظتی	نتایج و میزان کاهش آب‌شستگی
تحقیق حاضر	استفاده از شوت با زاویه‌ی ۳۰ درجه، محدوده‌ی دبی ورودی بین ۶/۵ تا ۱۴/۴ لیتر بر ثانیه	نصب الگوی چهاررديفیهی بلوک‌های بافل با شکل‌های متفاوت	عملکرد بهتر بلوک مستطیلی در کاهش متوسط ۴۳/۱ و ۵۶/۷ درصدی به ترتیب برای عمق و طول نهایی گودال آب‌شستگی در موقعیت نصب $L_b/L_f=0.8, 0.6$ و تقعر در برابر جریان
Dargahi (2003)	استفاده از سرریز اوجی شکل، با محدوده‌ی دبی ۲۰ تا ۱۰۰ لیتر بر ثانیه	به‌کارگیری صفحه‌ی محافظتی با زبری‌های متفاوت	افزایش زبری صفحه‌ی حفاظتی، سبب کاهش شدید انتقال رسوب و گودال آب‌شستگی به میزان ۱۷ الی ۵۷ درصد نسبت به حالت بدون زبری
Mohammed (2004)	استفاده از باکت در آستانه‌ی انتهایی سرریز	به‌کارگیری زوایای مختلف در انحنای باکت	کاهش ۱۵ درصدی عمق آب‌شستگی پایین-دست با تغییر زاویه‌ی آستانه‌ی انتهایی سرریز از ۱۰ به ۶۰ درجه
Dermawan and Legono (2011)	استفاده از سرریز پلکانی	به‌کارگیری پلکان در سرریز	بالا بردن پلکان عمق جریان در پنجه‌ی سرریز حدود ۲۰ برابر شوت‌های صاف معمولی و در نتیجه کاهش انرژی باقی‌مانده در پنجه حدود ۶ تا ۷ برابر نسبت به شوت صاف
Zare and Doering (2012)	استفاده از شوت در سرریز اوجی در اعداد فرود مختلف	به‌کارگیری روش‌هایی هم‌چون بافل و سنگ‌چین روی شوت	نرخ اتلاف انرژی بالاتری را می‌توان در شرایط نصب بافل در مقایسه با سنگ‌چین روی شیب شوت‌ها بدست آورد.
Chahardahcheriki gholi zاده & Shafai-Bajestan (2016), [20]	استفاده از سطح شیب‌دار، محدوده‌ی عدد فرود بین ۵/۷۶ تا ۹/۱۳	به‌کارگیری المان‌های شش‌پایه	کاهش ۶۱ درصدی عمق آب‌شستگی نهایی نسبت به حالت ساده با اعمال المان‌های شش‌پایه، و کاهش ۵۶ درصدی عمق آب‌شستگی با افزایش اندازه‌ی ذرات رسوبی
Aydin & Ulu (2018), [21]	شبیه‌سازی با نرم‌افزار flow-3D	به‌کارگیری پنج شکل متفاوت بلوک در حوضچه‌ی آرامش	(همه‌ی مدل‌ها، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش اتلاف انرژی و کاهش آب‌شستگی پایین‌دست سازه تأثیرگذارند) کاهش مقدار آب‌شستگی نهایی در حدود ۸۰٪ تا ۹۰٪ با استفاده از بلوک مثلثی - بالادست پلکانی
Elnikhely (2018), [22]	استفاده از شوت مانع‌دار با پنج دبی متفاوت	به‌کارگیری بلوک استوانه‌ای با ابعاد هندسی متفاوت	کاهش مقادیر عمق و طول نسبی آب‌شستگی نسبت به حالت صاف به ترتیب حدود ۲۵٪ و ۲۷٪ (بهترین ابعاد بلوک‌ها $L/B=0.133$ ، $D/B=0.1$ است)
Karimi Chahartaghi et al. (2019)	استفاده از شوت مانع‌دار	به‌کارگیری هندسه‌ی متفاوت بافل و هم‌چنین واگرایی مختلف دیواره‌ی جانبی شوت	به‌طور متوسط، کاهش حداکثر تا ۵۸ درصد عمق و طول نهایی گودال آب‌شستگی با استفاده از بلوک‌های پیشنهادشده در این تحقیق به‌جای بلوک‌های استاندارد USBR

نسبی نصب بلوک‌ها به‌طور دقیق می‌توان پی برد که با افزایش  $L_b/L_f$  بلوک‌ها، کاهش عمق آب‌شستگی افزایش یافته‌است، به‌طوری‌که در موقعیت  $(L_b/L_f=0.8)$  اثر بخشی بهتری نسبت به سایر موقعیت‌ها رخ داده‌است. در شرایط مختلف جریان بین ۲۵ تا ۶۱/۲ درصد کاهش عمق گودال آب‌شستگی را به‌همراه دارد.

۵. در موقعیت  $(L_b/L_f=0.6)$ ، بلوک‌های مستطیلی و نیم-دایره‌ای با تحدب در برابر جریان و هم‌چنین، در موقعیت  $(L_b/L_f=0.8)$  بلوک مثلثی با تقعر در برابر جریان، با عملکرد متوسط ۳۸/۱ تا ۷۳/۴ درصد، بیشترین کاهش را در طول آب‌شستگی نسبت به سایر حالت‌ها دارا بودند.

۶. جهت تقعر نصب بلوک‌ها بر مقادیر پارامترهای آب‌شستگی مؤثر است. در سری آزمایش‌های تقعر در برابر جریان همواره پارامترهای ابعدی آب‌شستگی دارای مقادیر کمتری نسبت به تحدب در برابر جریان بوده‌اند.

۷. با افزایش عدد فرود جریان در بالادست، انرژی نسبی مستهلک‌شده، کاهش می‌یابد. مطابق انتظار، بلوک‌های مستطیلی با تقعر در برابر جریان و در موقعیت نسبی نصب  $L_b/L_f=0.8$  در راستای استهلاک انرژی در پایین‌دست سرریزها به‌عنوان بهینه‌ترین الگو گزارش می‌شوند.

### پیشنهادات

مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر، با تأکید بر اهمیت ویژه‌ی مدل‌سازی نرم‌افزاری طرح قبل از اجرا و دست‌یابی به بهینه‌ترین شکل هندسی، راستای تقعر - تحدب نصب بلوک در هر موقعیت نسبی را حائز اهمیت می‌داند. هم‌چنین باتوجه به تأثیر متقابل الگوی جریان در اطراف پایه‌ی بلوک‌ها، لزوم بررسی الگوی مرکب در آرایش نصب کامل بلوک‌ها با اشکال هندسی متفاوت پیشنهاد می‌گردد.

در نهایت با ارائه‌ی خلاصه‌ای (جدول ۲) از شرایط آزمایش و روش‌های حفاظتی برای بررسی میزان تأثیرگذاری روش‌های به‌کاررفته بر کاهش ابعاد گودال آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزها در تحقیق حاضر و دیگر محققان آورده شده‌است. آنچه که به‌وضوح مشخص است، استفاده از بلوک در حوضچه‌ی آرامش یا روی شیب شوت‌ها به‌عنوان یک روش مؤثر موجب کاهش در ابعاد نهایی گودال آب‌شستگی می‌شود.

### نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر به‌منظور بررسی روش حفاظتی پایه‌ی بلوک در یک شوت ساده بر روی مشخصه‌های ابعدی گودال آب‌شستگی انجام شد. بحث و تحلیل نتایج عبارتند از:

۱. جریان اطراف بلوک‌های شوت در دبی‌های مختلف موجب تمایز رژیم جریان روی شوت می‌شود. نخست جریانی است که از روی بلوک به صورت ریزشی عبور می‌کند. این نوع جریان در شرایط نصب رو به جریان تقعر بلوک‌ها با انرژی جنبشی بیشتری همراه است. دوم جریانی هم‌گرایی که از بین بلوک‌ها برقرار است و سوم جریانی که به‌صورت گردابی و کف‌آلود در جلو و داخل بلوک‌ها شکل گرفته‌است و موجب افزایش روگذری جریان از روی بلوک‌ها می‌شود.
۲. تأثیر موقعیت نصب بلوک درست بعد از تاج سرریز  $(L_b/L_f=0.2)$  بر اتلاف انرژی تقریباً ناچیز است، زیرا جریان هنوز در عمق بالا است و سرعت نسبتاً کمی دارد.
۳. عمق و طول نهایی آب‌شستگی با افزایش عدد فرود بالادست سرریز، افزایش یافته‌است. هم‌چنین برای یک عدد فرود ثابت، عمق و طول آب‌شستگی برای هندسه‌ی مستطیلی بلوک با تقعر در برابر جریان به‌مراتب کمتر از دو هندسه‌ی دیگر بوده‌است.
۴. با بررسی داده‌های مربوط به هر کدام از موقعیت‌های

## مراجع

1. Dargahi, B., "Scour Development Downstream of a Spillway", *Journal of hydraulic research*, Vol. 41, No. 4, Pp. 417-426, (2003).
2. Abdelhaleem, F. S. F., "Effect of Semi-circular Baffle Blocks on Local Scour Downstream Clear-overfall Weirs", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 4, No. 4, Pp. 675-684, (2013).
3. Helal, E. Y., Nassralla, T. H., and Abdelaziz, A. A., "Minimizing of Scour Downstream Hydraulic Structures Using Sills", *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol. 3, No. 3, Pp. 591, (2013).
4. Helal, E. Y., "Minimizing Scour Downstream of Hydraulic Structures Using Single Line of Floor water jets", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 5, No. 5, Pp. 17-28, (2013).
5. Hong, S., Biering, C., Sturm, T. W., Yoon, K. S., and Gonzalez-Castro, J. A., "Effect of Submergence and Apron Length on Spillway Scour: Case Study", *Water*, Vol. 7, No. 10, Pp. 5378-5395, (2015).
6. Blaisdell, F. W., "Development and Hydraulic Design, Saint Anthony Falls stilling Basin", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 113, No. 1, Pp. 483-520, (1948).
7. Tuna, M. C., "Effect of Offtake Channel Base Angle of Stepped Spillway on Scour Hole", Pp. 239-251, (2012).
8. Peterka, E. S., and Karon. I. M., "Congenital Pseudoainhum of the Fingers: Report of a Case", *Archives of dermatology*, Vol. 90, No. 1, Pp. 12-14, (1964).
9. Chatila, J. G., and Bassam R. J., "Stepped spillway as an energy dissipater", *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, Vol. 29, No. 3, pp. 147-158, (2004).
10. Young, M. F., "Feasibility Study of a Stepped Spillway", *In Applying research to hydraulic practice*, Pp. 96-105. ASCE, (1982).
11. Mohammed, T. A., Noor, M. M. M., Huat, B. K., Ghazali, A. H., and Yunis, T. S., "Effect of Curvature and End Sill Angle on Local Scouring at Downstream of a Spillway." *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 1, No. 1, Pp. 96-101, (2004).
12. Dwemawan, V., and Legono, D., "Residual Energy and Relative Energy Loss on Stepped Spillway", *Journal of Applied Technology in Environmental Sanitation*, Vol. 1, No. 4, (2011).
13. Chafi, C., Hazzab, A., and Seddini, A., "Study of Flow and Energy Dissipation in Stepped Spillways", *Jordan Journal of civil engineering*, Vol. 4, No. 1, Pp. 1-11, (2010).
14. Zare, H. K., and Doering, J. C., "Energy Dissipation and Flow Characteristics of Baffles and Sills on Stepped Spillways", *Journal of hydraulic research*, Vol. 50, No. 2, Pp. 192-199, (2012).
15. Kaya, N., and Emiroglu, M. E., "Study of Oxygen Transfer Efficiency at Baffled Chutes." *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, Vol. 163, No. 9, Pp. 447-456. Thomas Telford Ltd, (2010).



16. karimi Chahartaghi, M., and Solimani B. M., "Effect of Block Geometry and Divergence of Baffled Chute on Downstream Scour Pattern", (2019).
17. Raudkivi, A. J., and Ettema, R., "Clear-water Scour at Cylindrical Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 3, Pp. 338-350, (1983).
18. Kummar, V., Ranga Raju, K. G., and Vittal, N., "Reduction of Local Scour Around Bridge Piers Using Slot and Collar", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 12, pp. 1302-1305, (1999).
19. Zolghadr, M., "Effect of Six-Legged Elements Installation Arrangement on Bed Topography Around Wing-Wall Abutments", Pp. 47-57, (2018).
20. Chahardahcheriki, gholi zadeh. P., and Shafai-Bajestan, M., "Scour Dimensions of the Downstream Hydraulic Jump Stilling Basin with Bed Covered with Six-Legs Elements", *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, Vol. 17, No. 66, Pp. 105-118, (2016). (In Persian)
21. Aydin, M. C., and Ulu, A. E., "Effects of Different Shaped Baffle Blocks on the Energy Dissipation and the Downstream Scour of a Regulator", *Journal of Science and Technolog*, Vol. 8, No. 2, Pp. 69-74, (2018).
22. Elnikhely, E. A., "Investigation and Analysis of Scour Downstream of a Spillway", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 9, No. 4, Pp. 2275-2282, (2018).

