

تأثیر شکل آبیایه انتهایی بر عمق و شاخص آبخستگی پایین دست حوضچه آرامش نوع USBR VI

شکوفه خیره دست^۱ و مسعود قدسیان^{۲*}

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۲- استاد هیدرولیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

*ghods@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۱/۱۲/۱۰]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۸/۱۷]

چکیده

حوضچه‌های آرامش برای استهلاک انرژی جریان خروجی از کانال‌ها، شوت‌ها و کالورت‌ها در انتهای این سازه‌ها تعبیه می‌شوند. یکی از انواع حوضچه‌های آرامشی که در آن استهلاک انرژی جریان خروجی توسط ضربه صورت می‌گیرد، حوضچه آرامش استاندارد نوع USBR VI است. برخلاف دیگر حوضچه‌های آرامش، مطالعات صورت گرفته اطراف این نوع حوضچه محدود بوده و هنوز ویژگی‌های بسیاری از این نوع حوضچه باقی است که در مطالعات پیشین مورد توجه قرار نگرفته است. در این مقاله تأثیر شکل آبیایه انتهایی بر عمق حفره آبخستگی پایین دست این حوضچه آرامش مورد مطالعه قرار گرفت. در طراحی آزمایش‌ها پارامترهای عدد فرود جریان ورودی به حوضچه، قطر لوله ورودی (سه قطر ۵، ۸ و ۱۲ سانتی - متری) و سه شکل آبیایه انتهایی (مثلثی، پله‌ای و ربع دایره‌ای) در قالب ۲۷ آزمایش جهت مطالعه عمق آبخستگی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در محدوده عدد فرود ۲ تا ۶، آبیایه ربع دایره‌ای کمترین عمق آبخستگی و کمترین مقدار شاخص آبخستگی را دارد. در محدوده عدد فرود ۹ تا ۱۴، آبیایه مثلثی کمترین شاخص آبخستگی را ایجاد می‌کند. در نسبت عرض حوضچه به قطر معادل جت ورودی به حوضچه برابر ۱۰/۱۶ و برای اعداد فرود ۹/۲۷ و ۱۳/۹۱، کمترین شاخص آبخستگی متعلق به آبیایه مثلثی شکل است. همچنین در هر سه آبیایه انتهایی، کاهش قطر جت منجر به کاهش عمق بیشترین آبخستگی می‌شود. نکته مهم دیگر آن بود که پشته رسوبی تنها در آزمایش‌ها با نسبت عرض حوضچه به قطر معادل جریان ورودی به حوضچه برابر ۱۰/۱۶ و برای عدد فرود روی منحنی بیجلی ایجاد شد. با کاهش نسبت عرض حوضچه به قطر معادل جریان ورودی به حوضچه، تغییرات توپوگرافی بستر بیشتر و افزایش عمق و گستردگی حفره آبخستگی نیز بیشتر می‌شود. ارتفاع پشته رسوبی و عمق بیشترین آبخستگی در آبیایه پله‌ای از همه بیشتر و در آبیایه ربع دایره‌ای از همه کمتر بدست آمد. در نهایت روابط بدون بعدی برای تخمین عمق آبخستگی بر حسب پارامترهای عدد فرود جریان ورودی به حوضچه و نسبت عرض حوضچه به قطر معادل جت ورودی به حوضچه برای هر سه شکل آبیایه ارائه شد.

واژگان کلیدی: حوضچه آرامش نوع USBR VI، آبیایه انتهایی، آبخستگی.

۱- مقدمه

نسبت به حوضچه استاندارد به اندازه ۲۵ درصد کوتاهتر می‌شود.

$$\text{scour index} = S_i = \frac{2d_s}{L_u} \quad (1)$$

ورما و گوئل در سال ۲۰۰۱ با قرار دادن دو ردیف بلوک میانی گوه‌ای شکل، یک بلوک جدا کننده گوه‌ای شکل و آبپایه انتهایی مثلثی، عملکرد این حوضچه را بهبود بخشیدند [2]. ورما و گوئل در سال ۲۰۰۳ به مطالعه عملکرد این نوع حوضچه آرامش، که کف آن هم‌تراز با کف لوله ورودی بود، پرداختند [3]. ایشان علاوه بر تغییر تراز کف حوضچه، استفاده از بلوک‌های جدا کننده گوه‌ای شکل با اندازه‌های متفاوت، دیوار قائم ضربه‌گیر با فاصله از کف متغیر و آبپایه انتهایی با شکل‌های مختلف (مستطیلی، گرد شده و مثلثی با شیب متغیر) را مورد آزمایش قرار دادند. پیشنهاد ایشان در نهایت حوضچه با آبپایه انتهایی شیب‌دار با شیب عمودی ۱ و افقی ۲، با دو ردیف بلوک میانی و فاصله دیوار قائم از کف برابر 0.75D بود.

ورما و همکاران در سال ۲۰۰۳ طی آزمایش‌هایی با متعلقات متفاوت بدین نتیجه رسیدند که حوضچه‌ای با یک بلوک جداکننده و یک ردیف بلوک میانی و با آبپایه انتهایی شیب‌دار، بهترین عملکرد را دارد [4].

در سال ۲۰۰۶ ورما و گوئل تأثیر تغییر در ساختار حوضچه را با مقایسه شاخص‌های آبستنگی بررسی کرده و در نهایت حوضچه‌ای با بلوک جدا کننده گوه‌ای شکل، دیوار قائم توری و آبپایه انتهایی ربع دایره‌ای را پیشنهاد کردند [5].

گوئل در سال ۲۰۰۷ نشان داد که حوضچه با دیواره‌های کناری بازشونده و استفاده از بلوک جداکننده مثلثی شکل با زاویه رأس ۹۰ درجه، دیوار ضربه‌گیر، یک ردیف بلوک میانی گوه‌ای شکل و آبپایه انتهایی شیب‌دار، بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد [6].

تیواری و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی تأثیر شکل آبپایه انتهایی بر آبستنگی پایین دست حوضچه آرامش نوع USBR VI در پایین دست خروجی مستطیلی شکل پرداختند [7].

حوضچه‌های آرامش بیشتر برای مستهلک‌سازی انرژی آب جریان‌یافته از سرریزها، دریچه‌ها، و یا انواع خروجی‌ها، به منظور جلوگیری از آبستنگی پایین دست سازه‌های مذکور، احداث می‌شود. این سازه‌ها در سازوکار متفاوتی انرژی جریان را مستهلک می‌کنند که یکی از این سازوکارها، استهلاک انرژی جریان با استفاده از برخورد به یک مانع یا موانع می‌باشد. یکی از انواع حوضچه‌های آرامشی که در آن استهلاک انرژی توسط ضربه صورت می‌گیرد، حوضچه آرامش نوع USBR VI است. این حوضچه سازه‌ای جعبه مانند بوده که برای عملکرد مناسب، به پایاب نیاز ندارد. این سازه متشکل از یک دیوار میانی و یک آبپایه انتهایی است. ایجاد آبستنگی در اطراف سازه‌هایی که در مجاورت بسترهای فرسایش‌پذیر قرار دارند، همچون حوضچه‌های آرامش، همواره از جمله مهم‌ترین مشکلات مربوط به این سازه‌ها بوده است.

در تحقیقاتی آزمایشگاهی در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ توسط تیواری و همکاران، و گوئل و همکاران، آبستنگی در پایین دست حوضچه آرامش نوع USBR VI بررسی شده است. هدف ایشان اصلاح این حوضچه به منظور کاهش آبستنگی در پایین دست آن بود. بسیاری از مطالعات ایشان بر روی خروجی‌های غیر دایره‌ای و یا خروجی‌هایی که تراز کف آن هم‌تراز با کف حوضچه است، می‌باشد.

ورما و گوئل در سال ۲۰۰۰ با ایجاد تغییراتی در حوضچه آرامش نوع USBR VI به بررسی آبستنگی در پایین دست این حوضچه پرداختند [1]. ایشان برای مقایسه نتایج خود از شاخصی به عنوان شاخص آبستنگی استفاده کردند. رابطه (۱) بیانگر شاخص مذکور است که در آن d_s عمق آبستنگی حداکثر و L_{II} فاصله طولی محل عمق آبستنگی حداکثر از آبپایه انتهایی است. از دیدگاه ایشان هرچه قدر میزان شاخص کمتر باشد، شرایط بهتری رخ داده است. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که با نصب جداکننده گوه‌ای شکل با زاویه رأس ۱۵۰ درجه در جلو جریان ورودی و بالادست دیوار قائم و همچنین آبپایه انتهایی ربع دایره‌ای، طول حوضچه

۲- آنالیز ابعادی

آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش به پارامترهای سرعت متوسط جریان ورودی به حوضچه (خروجی از لوله ورودی) (u_0)، قطر معادل جریان ورودی به حوضچه (De)، عرض حوضچه (W)، شکل آبیایه انتهایی و شتاب ثقل (g) وابسته می‌باشد. آنالیز ابعادی پارامترهای مذکور نشان داد که بیشترین عمق بدون بعد آبشستگی (d_s/D_e) به صورت زیر است:

$$\frac{d_s}{D_e} = f(Fr_0, \frac{W}{D_e}, \text{شکل آبیایه انتهایی}) \quad (2)$$

۳- روش انجام تحقیق

۳-۱- مدل آزمایشگاهی

کلیه آزمایش‌ها و ساخت مدل حوضچه آرامش استاندارد نوع USBR VI، در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفته است. برای انجام آزمایش‌ها از کانالی به عرض ۸۰ و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر استفاده شد. پمپ استفاده شده در آزمایش‌ها دارای دبی اسمی ۴۰۰ متر مکعب بر ساعت (حدود ۱۲۰ لیتر بر ثانیه)، هد ارتفاعی ۱۱/۷ متر، توان ۲۲ اسب بخار و دور موتور ۱۴۵۰ دور بر دقیقه بود. لوله ورودی به حوضچه دارای قطرهای ۵، ۸ و ۱۲ سانتی‌متر و طول آن‌ها برای ایجاد جریان کاملاً توسعه یافته، برابر ۲، ۳/۵ و ۵ متر در نظر گرفته شد.

برای محاسبه عدد فرود جریان ورودی به حوضچه در ابتدا بایستی عمق جریان ورودی مشخص شود. عمق معادل جریان ورودی برابر با مجذور سطح مقطع جریان ($De = (A)^{0.5}$) $(Q_0/u_0)^{0.5}$ است که در آن De عمق معادل جریان ورودی به حوضچه، A سطح مقطع جریان ورودی به حوضچه، Q_0 دبی جریان و u_0 سرعت متوسط جریان ورودی به حوضچه است. عدد فرود جریان ورودی به حوضچه با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد:

$$Fr_0 = \frac{u_0}{(gDe)^{0.5}} = \frac{u_0}{(g(A)^{0.5})^{0.5}} \quad (3)$$

شکل‌های آبیایه انتهایی مورد آزمایش توسط ایشان، مستطیلی، مربعی و شیب‌دار (با شیب 1H:1V) بود که در دو حالت با و بدون دیواره ضربه‌گیر مورد آزمایش قرار گرفت. مقایسه شاخص‌های آبشستگی نشان داد که آبیایه انتهایی شیب‌دار بهترین عملکرد را، چه در حالت با وجود دیواره و چه بدون حضور آن، در استهلاك انرژی از خود نشان می‌دهد.

در سال ۲۰۱۳ تیواری و همکاران به مطالعه تأثیر شکل آبیایه انتهایی بر آبشستگی پایین دست حوضچه نوع USBR VI در پایین دست خروجی مربعی پرداختند [8]. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که آبیایه انتهایی شیب‌دار (با شیب 1H:1V) بهترین عملکرد را در استهلاك انرژی از خود نشان می‌دهد.

بهنام‌طلب در سال ۱۳۹۵ به بررسی آزمایشگاهی تأثیر قطر مصالح پایین دست، قطر لوله، عمق پایاب و عدد فرود جریان ورودی به حوضچه، بر آبشستگی پایین دست آن، برای اصلاح حوضچه در شرایط بحرانی آبشستگی پرداخت [9]. راه حل وی اصلاح شکل حوضچه و یا استفاده از پوشش سنگ‌چین بود.

صابر (۱۳۹۸) تأثیر عدد فرود جریان، قطر لوله ورودی و چهار مدل آبیایه انتهایی دوپله‌ای، سه پله‌ای، چهارپله‌ای و پنج پله‌ای را روی حوضچه آرامش نوع USBR VI بررسی کرد. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که افزایش عدد فرود باعث کاهش شاخص آبشستگی و عملکرد مؤثرتر آبیایه می‌شود [10].

در تحقیقات پیشین، تأثیر شکل آبیایه انتهایی بر آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش نوع USBR VI به طور کامل بررسی نشده است. مطالعات انجام شده عمدتاً با هدف اضافه کردن متعلقاتی به حوضچه از جمله بلوک‌های جدا کننده و میانی بوده و حوضچه در پایین دست خروجی‌های غیر دایره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله تأثیر شکل آبیایه انتهایی بر آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش استاندارد نوع USBR VI بررسی می‌شود.

جدول (۲) ابعاد حوضچه آرامش نوع ۶ (ابعاد بر حسب سانتی متر هستند)

	$L = \frac{4W}{3}$	$H = \frac{3W}{4}$	$a = \frac{W}{2}$	$b = \frac{3W}{8}$	$c = \frac{W}{2}$	$d = \frac{W}{6}$	$e = \frac{W}{12}$	$t = \frac{W}{12}$
W	45	60	33.8	22.5	16.9	22.5	7.5	3.8

Table 2. Dimensions of USBR type VI stilling basin (cm)

در این تحقیق، سه آبیایه انتهایی با شکل های مثلثی با شیب 1V:1H، دو پله ای با ارتفاع های یکسان هر یک از پله ها، و ربع دایره ای ساخته و استفاده شد. ارتفاع هر سه آبیایه مطابق ارتفاع تعریف شده توسط بیچلی و برابر ۷/۵ سانتی متر بود. عرض کف آبیایه ربع دایره ای و پله ای نیز همچون آبیایه مثلثی، برابر ۷/۵ سانتی متر انتخاب شد. شکل (۲) تصاویر هر سه آبیایه استفاده شده را نمایش می دهد.

شکل (۲) تصویر آبیایه های انتهایی

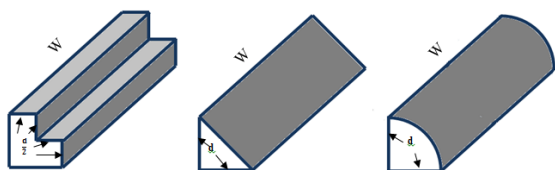


Fig. 2. End sill shapes

کف کانال پایین دست حوضچه، به عمق ۴۵ سانتی متر با رسوب پوشانیده شد. تراز بستر رسوبی برابر تراز آبیایه انتهایی بود. مصالح استفاده شده برای بستر پایین دست حوضچه، از نوع ماسه سیلیسی یکنواخت فیروزکوه با وزن مخصوص ۲/۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب، انحراف معیار ذرات $\sigma_g = (d_{84}/d_{16}) = 1/28$ ، و قطر متوسط ۰/۹۹ میلی متر بود. در اینجا d_{84} و d_{16} به ترتیب اندازه ذراتی از بستر هست که به ترتیب ۱۶ و ۸۴ درصد ذرات از آن ریزتر هست.

۳-۲- طراحی آزمایش ها

در این تحقیق برای هر لوله ورودی یا به عبارتی برای هر نسبت عرض حوضچه به قطر معادل جت ورودی به حوضچه W/D_e ، سه آزمایش در سه عدد فرود جداگانه در نظر گرفته شد. چگونگی تعیین این سه عدد فرود بدین صورت است که اولین عدد فرود روی منحنی بیچلی قرار گرفته و دو عدد

پس از محاسبه عدد فرود جریان ورودی، می توان به کمک رابطه برازش داده شده به نمودار بیچلی [11] (رابطه (۴)) مقدار عرض حوضچه W را محاسبه نمود.

$$\frac{W}{D_e} = 2.86Fr_0^{0.575} \quad (4)$$

نسبت W/D_e برای هر یک از قطرهای ۵، ۸ و ۱۲ سانتی متر به ترتیب برابر ۱۰/۱۶، ۶/۳۵ و ۴/۲۳ بدست آمد. مقادیر اعداد فرود و قطرهای معادل لوله ورودی در آزمایش های انجام شده، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) قطر معادل لوله ورودی به حوضچه و عدد فرود معادل آن ها

D (cm)	D_e (cm)	W/D	W/ D_e	Fr_0
5	4.43	9.00	10.16	9.27
8	7.09	5.63	6.35	4.06
12	10.63	3.75	4.23	1.99

Table 1. Equivalent depth of inlet pipes and Froude numbers

مدل حوضچه آرامش نوع USBR VI از جنس پلکسی گلاس ساخته شده و در فاصله حدود ۲ متری از ابتدای کانال نصب شد. شکل (۱-الف) شماتیکی از حوضچه و شکل (۱-ب) تصویری از بالادست حوضچه و لوله ورودی تعبیه شده در آزمایشگاه را نشان می دهد. ابعاد بخش های مختلف حوضچه بر اساس طرح بیچلی [11] در جدول (۲) آمده است.

شکل ۱ الف) شکل شماتیک از حوضچه و ب) نمایی از حوضچه آرامش و لوله ورودی آن در آزمایشگاه

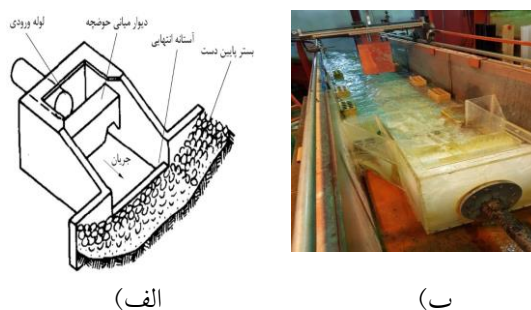


Fig. 1. a) Schematics of Stilling basin, b) Upstream view of stilling basin

S1-8-B-Qu	25	4.98	5.97	
S1-8-C-Qu	34	6.77	8.11	
S1-5-A-Tr	12	6.11	9.27	
S1-5-B-Tr	18	9.17	13.91	
S1-5-A-St	5	4.43	9 10.16	12 6.11 9.27 0.22
S1-5-A-Qu	12	6.11	9.27	
S1-5-B-Qu	18	9.17	13.91	

Table 3. Details of experiments

مجموعاً تعداد ۲۳ آزمایش صورت گرفت. مشخصات و نام‌گذاری آزمایش‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. به عنوان نمونه 12-A-St مربوط به آزمایش انجام شده با استفاده از لوله ۱۲ سانتی‌متری، برای عدد فرود روی منحنی بیچلی و آبپایه انتهایی شکل است.

۳-۳- روش انجام آزمایش

انجام آزمایش بدین صورت بود که در ابتدا و پیش از شروع آزمایش، سطح رسوب پایین‌دست حوضچه کاملاً صاف شده و سپس ورقه‌ای از جنس گالوانیزه روی این سطح قرار داده می‌شد تا پیش از تنظیم دبی، سطح رسوب دستخوش تغییر نشود. برای جلوگیری از حرکت این صفحه و یا نفوذ جریان آب به زیر آن، وزنه‌هایی روی آن قرار داده می‌شد. پس از تنظیم دبی جریان، وزنه‌ها و ورقه برداشته شده و شروع آزمایش از این زمان در نظر گرفته می‌شد. در طول آزمایش نیز به صورت دوره‌ای دبی کنترل شد. بر اساس زمان تعادل اعلام شده توسط بهنام‌طلب (۱۳۹۵)، پس از اتمام ۵ ساعت پمپ خاموش شده و آزمایش به اتمام می‌رسید [9]. برداشت پروفیل بستر آبشستگی با استفاده از متر لیزری انجام گرفت. این عمق‌سنج روی یک ارابه با قابلیت حرکت در راستای عرضی و طولی کانال نصب شد. ارابه با حرکت طولی و عرضی خود قادر بود عمق‌سنج را در هر نقطه از کانال قرار داده تا پروفیل آبشستگی برداشت شود.

فواصل نقاط برداشت پروفیل بستر در طول کانال متفاوت بود. در محدوده نزدیک به حفره، فواصل نقاط کمتر بود. برای هر پروفیل طولی بین ۱۵ تا ۲۰ نقطه برداشت شد. علاوه بر این، مقادیر عمق بیشترین آبشستگی، طول بالادست حفره

فرود دیگر، به ترتیب ۱/۵ و ۲ برابر عدد فرود روی منحنی بیچلی می‌باشند. نام هر آزمایش شامل سه قسمت است که از سمت چپ به ترتیب قطر لوله ورودی بر حسب سانتی‌متر، عدد فرود نسبت به منحنی بیچلی و شکل آبپایه انتهایی، هستند:

- ❖ قطر لوله ورودی با اعداد ۵، ۸ و ۱۲ (بر حسب سانتی‌متر) نمایش داده می‌شود.
- ❖ برای اعداد فرود روی منحنی بیچلی، ۱/۵ برابر و ۲ برابر آن به ترتیب از حروف "A"، "B" و "C" استفاده می‌شود.
- ❖ برای آبپایه‌های مثلثی، ربع دایره‌ای و پله‌ای شکل از حروف Tr، Qu و St استفاده می‌شود.

جدول ۳. مشخصات آزمایش‌ها

Name of experiment	D (cm)	D _e (cm)	W/D	W/D _e	Q ₀ (l/s)	u ₀ (m/s)	Fr ₀	d ₅₀ /D _e
S1-12-A-Tr					23	2.03	1.99	
S1-12-B-Tr					35	3.1	3.03	
S1-12-C-Tr					47	4.16	4.07	
S1-12-A-St					23	2.03	1.99	
S1-12-B-St	12	10.63	3.75	4.23	35	3.1	3.03	0.09
S1-12-C-St					47	4.16	4.07	
S1-12-A-Qu					23	2.03	1.99	
S1-12-B-Qu					35	3.1	3.03	
S1-12-C-Qu					47	4.16	4.07	
S1-8-A-Tr					17	3.38	4.06	
S1-8-B-Tr					25	4.98	5.97	
S1-8-C-Tr					34	6.77	8.11	
S1-8-A-St	8	7.09	5.63	6.35	17	3.38	4.06	0.14
S1-8-B-St					25	4.98	5.97	
S1-8-C-St					34	6.77	8.11	
S1-8-A-Qu					17	3.38	4.06	

شکل ۳ نمایی از آبستگي پایین دست حوضچه



Fig. 3 Downstream view of scouring

شکل ۴ نمایی از توپوگرافي بستر در پایین دست حوضچه برای

آزمایش های مختلف با آستانه انتهایی پله ای

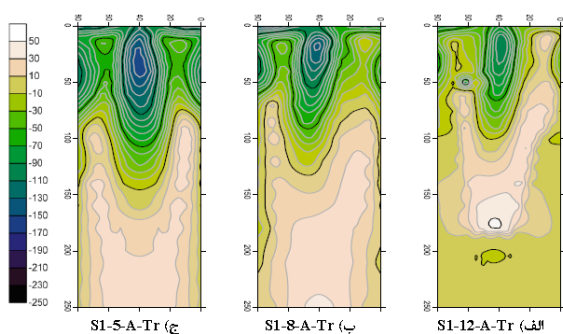


Fig. 4 Downstream topography for different Fr with stepped end sill

۴-۲- تحلیل نتایج

مقادیر عمق آبستگي نسبی حداکثر برای $W/D_e = 4.23$ در حالت آبپایه پله ای و مثلی که در شکل (۵) نشان داده شده است بسیار نزدیک به هم بوده و بیشتر از آبپایه ربع دایره ای است. در هر یک از نسبت های W/D_e ، آبپایه ربع دایره ای شکل، عمق بیشترین آبستگي کمتری را نسبت به دو آبپایه دیگر ایجاد می کند. این کاهش در اعداد فرود پایین تر (اعداد فرود ۱/۹۹، ۳/۰۳ و ۴/۰۷) با اختلاف بالایی نسبت به دیگر آبپایه ها رخ می دهد. به عبارت دیگر در اعداد فرود پایین تر، تأثیر گذاری شکل آبپایه انتهایی بر عمق آبستگي بیشتر است. آب پس از برخورد به حوضچه پرتاب شده و به بستر پایین دست برخورد می کند. برخورد آب به بستر پایین دست باعث ایجاد گردابه هایی همراه است. سطح ربع دایره ای آبپایه باعث می گردد که آب پس از برخورد به آن، ارتفاع کمتری به خود گرفته و در نتیجه پس از برخورد به بستر پایین دست، عمق آبستگي کمتری را ایجاد کند.

آبستگي برای هر یک از آزمایش ها برداشت و مقادیر شاخص آبستگي با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

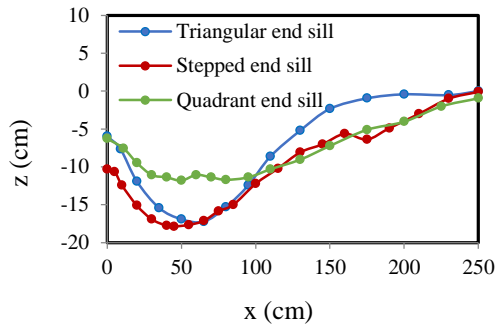
۴- نتایج و بحث

۴-۱- مشاهدات

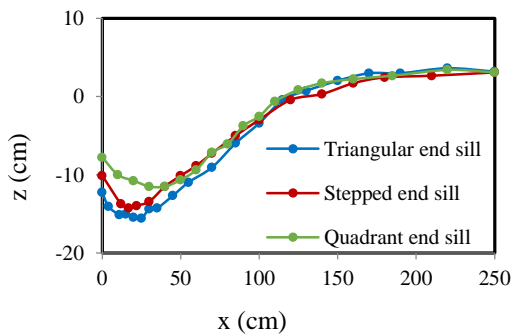
در انجام آزمایش ها دیده شد که طول حفره آبستگي به مرور زمان افزایش یافته و محل وقوع عمق حداکثر، از آبپایه انتهایی فاصله می گیرد. در آزمایش ها با عدد فرود بیشتر، جریان پس از برخورد به آبپایه پرتاب شده و از آبپایه انتهایی دور شد. در حالی که در آزمایش ها با اعداد فرود کمتر، جریان به صورت چسبیده به آبپایه از حوضچه خارج شده و در فاصله ای از آبپایه انتهایی به بستر رسوبی پایین دست برخورد می کرد. این رو در تمامی آزمایش ها با اعداد فرود دو برابر منحنی بیچلی، فاصله محل آبستگي حداکثر از آبپایه انتهایی بیشتر از آزمایش ها با عدد فرود روی منحنی بیچلی بدست آمد. در برخی از آزمایش ها، با وجود وجود تقارن کامل در تمام بخش های آزمایشگاهی، حفره آبستگي بدست آمده دارای عدم تقارن بود. این عدم تقارن در محور طولی عمق بیشترین آبستگي نسبت به محور مرکزی کانال، و در توپوگرافي حفره آبستگي دیده شد.

توپوگرافي بستر در انتهای آزمایش نشان داد علاوه بر حفره آبستگي در قسمت میانی کانال، حفره هایی با عرض و عمق متفاوت چسبیده به دیواره های کانال و به موازات آن ها تشکیل شده است. همچنین در برخی از آزمایش ها، بین دو حفره ایجاد شده در کناره های کانال نیز عدم تقارن مشاهده شد. علت تشکیل این حفره ها، گردابه های عرضی ایجاد شده پس از برخورد جریان به بستر پایین دست می باشد. نمونه ای از آبستگي در پایین دست حوضچه آرامش در شکل (۳) نشان داده شده است. شکل (۴) توپوگرافي بستر برای اعداد فرود روی منحنی بیچلی و آستانه پله ای را در نسبت های مختلف W/D_e نشان می دهد. با توجه با این شکل می توان گفت با کاهش W/D_e تغییرات توپوگرافي بستر بیشتر و افزایش عمق و گستردگی حفره آبستگي نیز بیشتر می شود.

شکل ۷. پروفیل طولی حفره آبستگي



a) $Fr_0 = 4.07$, $W/D_e = 4.23$



b) $Fr_0 = 4.06$, $W/D_e = 6.35$

Fig. 7. Longitudinal profiles of scour

با مشاهده نتایج برای نسبت $W/D_e = 6.35$ مشخص شد که شکل آبپایه انتهایی بر عمق آبستگي حداکثر تأثیرگذار است. این مقادیر عموماً در آبپایه مثلی شکل از همه بیشتر است (شکل ۸).

شکل ۸. تغییرات عمق نسبی آبستگي حداکثر $W/D_e = 6.35$

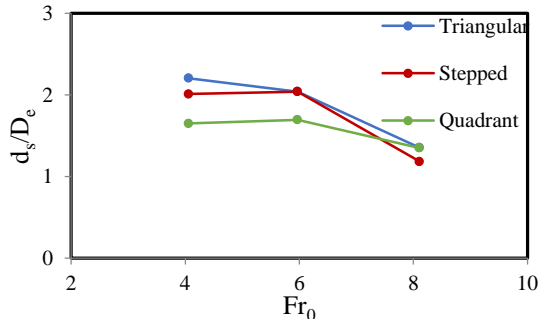


Fig. 8. Variations of maximum dimensionless depth of scour versus Froude number for $W/D_e = 6.35$

شکل (۹) شاخص آبستگي را برحسب عدد فرود جریان ورودی، برای هر سه آبپایه و $W/D_e = 6.35$ نشان می‌دهد.

شکل ۵. تغییرات عمق نسبی آبستگي حداکثر برای $W/D_e = 4.23$

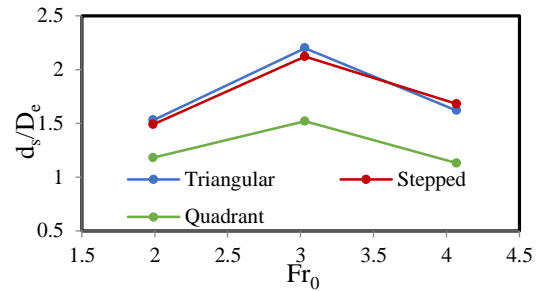


Fig. 5. Variations of maximum dimensionless scour depth versus Fr for $W/D_e = 4.23$

مقادیر شاخص آبستگي با استفاده از رابطه (۱) محاسبه و برای $W/D_e = 4.23$ در شکل (۶) نشان داده شده است.

این شکل نشان می‌دهد برای اعداد فرود $۳/۰۳$ و $۴/۰۷$ ، آبپایه ربع دایره‌ای شکل، دارای مقدار کمتری از این شاخص است. با توجه به اینکه در بیشتر موارد، عمق آبستگي ایجاد شده در این آبپایه کمتر از سایر آبپایه‌ها بود، در نتیجه می‌توان گفت در حالت کلی آب پس از برخورد به آبپایه ربع دایره‌ای شکل، ارتفاع کمتری گرفته و با فاصله بیشتری نسبت به حوضچه به بستر برخورد می‌کند. پروفیل‌های طولی حفره آبستگي برای دو نسبت $W/D_e = 4.23$ و $W/D_e = 6.35$ و در شکل (۷) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است، آبپایه ربع دایره‌ای شکل، عمق آبستگي کمتری از دیگر آبپایه‌ها دارد و اختلاف بین آبستگي ناشی از آبپایه ربع دایره‌ای و دیگر آبپایه‌ها زیاد است. در حالی که مقادیر آبستگي ناشی از آبپایه‌های مثلی و پله‌ای تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارند.

شکل ۶. مقایسه شاخص آبستگي برای $W/D_e = 4.23$

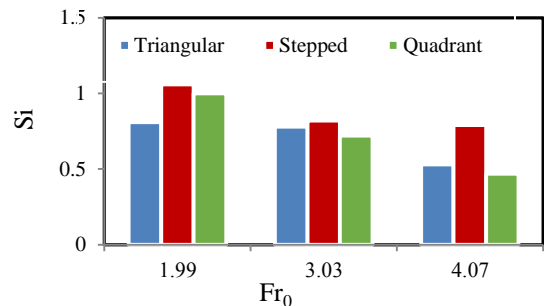


Fig. 6. Values of scour index for $W/D_e = 4.23$

شکل (۱۰) تغییرات عمق نسبی حداکثر آبشستگی و طول نسبی بالادست حفره، بر حسب عدد فرود جریان ورودی، را در حالت $W/D_e = 10.16$ برای هر سه آبپایه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، طول بالادست حفره در عدد فرود ورودی $Fr_0 = 9.27$ برای دو آبپایه پله‌ای و ربع دایره‌ای و در عدد فرود $Fr_0 = 13.91$ برای دو آبپایه مثلثی و ربع آبشستگی حداکثر بی‌بعد، متعلق به آبپایه پله‌ای است که نسبت به دیگر آبپایه‌ها اختلاف زیادی دارد. همچنین این عمق نسبت به دیگر آبپایه‌ها، در کمترین فاصله از آبپایه انتهایی رخ داده است. این بدین معنی است که استفاده از آبپایه پله‌ای در شرایط مذکور، بحرانی‌ترین حالت را از لحاظ محل رخداد حداکثر عمق آبشستگی نسبت به آبپایه انتهایی، ایجاد می‌کند.

شکل (۱۱) مقادیر شاخص آبشستگی برای $W/D_e = 10.16$ را نسبت به عدد فرود جریان ورودی برای هر سه آبپایه نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر شاخص آبشستگی در این حالت نشان می‌دهد که برای هر دو عدد فرود $9/27$ و $13/91$ ، آبپایه پله‌ای بیشترین شاخص آبشستگی را دارد. در $Fr_0 = 13.91$ ، مقادیر شاخص آبشستگی هر دو آبپایه ربع دایره‌ای و مثلثی تقریباً با هم برابر است. به طور کلی می‌توان گفت در این حالت آبپایه مثلثی شکل شاخص آبشستگی کمتری در مقایسه با حالت $Fr_0 = 9.5$ را بدست می‌دهد. از این رو استفاده از آبپایه مثلثی در اعداد فرود بالاتر از ۹، شرایط ایده‌آل‌تری را برای آبشستگی ایجاد می‌کند.

شکل ۱۱. مقایسه شاخص آبشستگی برای $W/D_e = 10.16$

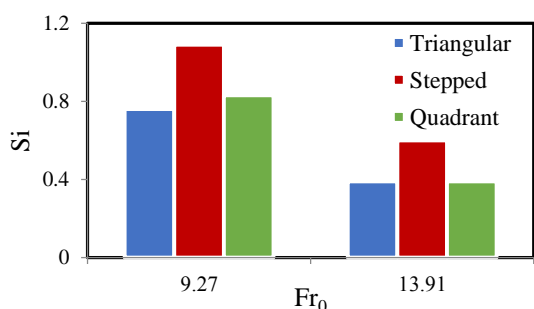


Fig. 11. Values of scour index for $W/D_e = 10.16$

برای اعداد فرود $4/06$ و $5/97$ ، آبپایه ربع دایره‌ای شکل کمترین مقدار شاخص آبشستگی را ایجاد می‌کند. نکته قابل توجه این است که به هنگام استفاده از این نوع آبپایه، شاخص آبشستگی با تغییر در مقدار عدد فرود، تغییر چندانی نشان نمی‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که انرژی آب تا عدد فرود برابر ۸، پس از برخورد به آبپایه ربع دایره‌ای شکل، بدون تأثیر از مقدار عدد فرود، مستهلک می‌شود.

شکل ۹. مقایسه شاخص آبشستگی برای $W/D_e = 6.35$

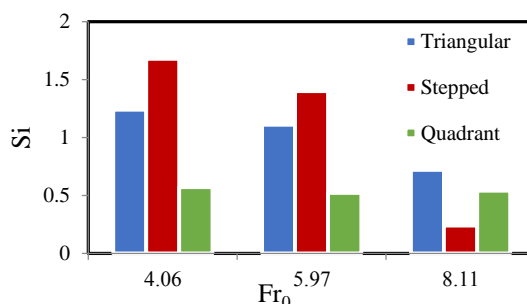
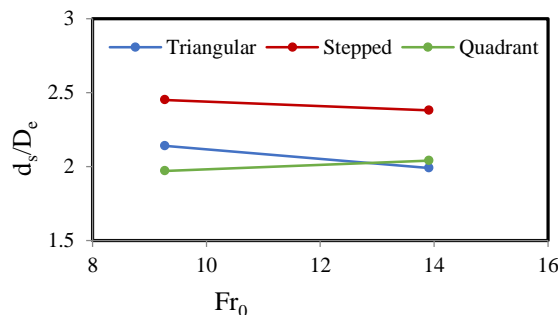


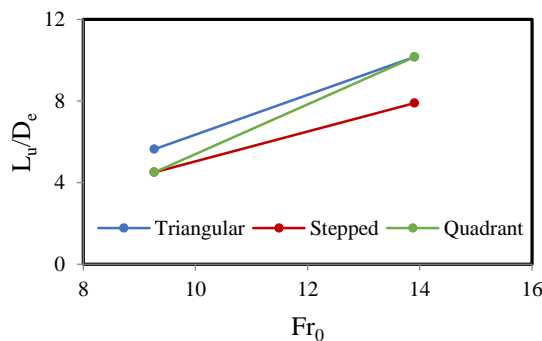
Fig. 9. Values of scour index for $W/D_e = 6.35$

شکل ۱۰ تغییرات عمق و طول نسبی آبشستگی حداکثر

برای $W/D_e = 10.16$



a) Maximum dimensionless scour depth



b) Dimensionless upstream length of scour hole

Fig. 10. Variations of maximum dimensionless scour depth and dimensionless upstream length of scour hole for $W/D_e = 10.16$

$$\frac{d_s}{D_e} = 0.528Fr^{-0.134} \left(\frac{W}{D_e}\right)^{0.715}, R^2 = 0.821 \quad (5)$$

$$\frac{d_s}{D_e} = 0.354Fr^{-0.404} \left(\frac{W}{D_e}\right)^{1.247}, R^2 = 0.74 \quad (6)$$

$$\frac{d_s}{D_e} = 0.797Fr^{-0.51} \left(\frac{W}{D_e}\right)^{0.94}, R^2 = 0.719 \quad (7)$$

در شکل (۱۳)، مقادیر عمق حداکثر آبستگي تخمین زده شده برای هر سه آبپایه به کمک روابط بالا با مقادیر مشاهداتی آن، مقایسه شده‌اند. مطابق شکل (۱۰)، پراکندگی داده‌ها در اطراف خط بهترین برازش نشان می‌دهد که روابط فوق عمق حداکثر آبستگي را برای هر سه آبپایه با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند.

شکل ۱۳. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی عمق حداکثر آبستگي

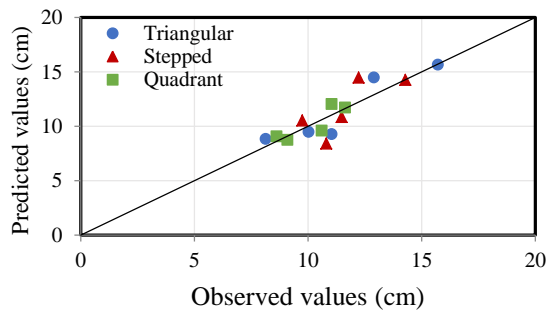


Fig. 13. Comparison of predicted and observed values of maximum depth of scour

۵- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر شکل آبپایه انتهایی بر عمق حداکثر آبستگي پایین دست حوضچه آرامش نوع USBR VI استاندارد بررسی شده است. نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشند:

۱. عموماً برای هر یک از نسبت‌های W/D_e ، آبپایه ربع-دایره‌ای شکل، عمق حداکثر آبستگي کمتری را نسبت به دو آبپایه دیگر ایجاد می‌کند. این مورد در اعداد فرود پایین (بین ۲ تا ۶) با اختلاف بالاتری نسبت به دیگر آبپایه‌ها رخ می‌دهد.

مشاهدات نشان داد که پشته رسوبی در آزمایش‌ها در نسبت $W/D_e \geq 10.16$ ایجاد می‌شود. مطابق شکل (۱۲)، ارتفاع پشته و عمق حداکثر آبستگي در آبپایه پله‌ای بیشتر از آبپایه مثلثی و آن نیز بیشتر از آبپایه ربع دایره‌ای شکل می‌باشد.

مقایسه شاخص آبستگي در شکل‌های (۶، ۹ و ۱۱) نشان می‌دهد در هر سه آبپایه، افزایش عدد فرود باعث کاهش شاخص آبستگي می‌شود. این نتیجه با یافته‌های Saber (2020) همسو است. با افزایش عدد فرود، آب پس از برخورد به آبپایه در فاصله دورتری نسبت به آبپایه و زاویه کمتری نسبت به افق، به بستر برخورد کرده، در نتیجه عمق آبستگي کمتری را ایجاد می‌کند. از این رو با کاهش عمق و افزایش فاصله محل آن نسبت به آبپایه، شاخص آبستگي کاهش می‌یابد.

شکل ۱۲. پروفیل طولی حفره آبستگي برای $W/D_e = 10.16$ و $Fr_0 = 9.27$

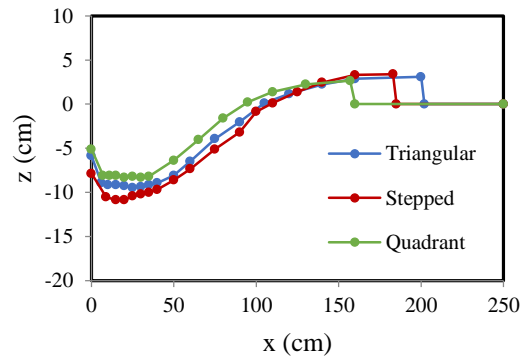


Fig. 12. Longitudinal profiles of scour for $W/D_e = 10.16$ and $Fr_0 = 9.27$

با توجه به مقادیر بدست آمده از عمق حداکثر آبستگي در محور میانی کانال و با استفاده از نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 25.0، روابطی برای عمق حداکثر بی‌بعد آبستگي برای هر سه آبپایه به دست آمد. مطابق تحلیل ابعادی ارائه شده، پارامترهای عدد فرود جریان ورودی به حوضچه (Fr_0) و نسبت عرض به قطر معادل (W/D_e)، برای پیش‌بینی عمق بدون‌بعد حداکثر آبستگي (d_s/D_e) بکار گرفته شدند. روابط (۵ تا ۷) عمق حداکثر آبستگي برای آبپایه‌های ربع‌دایره‌ای شکل، پله‌ای شکل و مثلثی شکل، را پیش‌بینی می‌کنند.

- [3] Verma, D.V.S. and Goel, A., 2003. Development of efficient stilling basins for pipe outlets. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129(3), pp.194-200.
- [4] Verma, D.V.S., Goel, A. and Rai, V., 2003. NEW STILLING BASINS DESIGNS FOR DEEP RECTANGULAR OUTLETS. *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics*, 17(1), p.1.
- [5] Goel, A. and Verma, D.V.S., 2006. Alternate designs of stilling basins for pipe outlets. *Irrigation and drainage systems*, 20(1), pp.139-150.
- [6] Goel, A., 2007, December. Experimental study on stilling basins for square outlets. In *Proceeding 3rd International Conference on Applied and Theoretical Mechanics, Spain* (pp. 14-16).
- [7] Tiwari, H.L., Goel, A. and Gahlot, V.K., 2011. Experimental Study of effect of end sill on stilling basin performance. *International Journal of Engg. Sci. and Technology*, 3(4), pp.3134-3140.
- [8] Tiwari, H.L., Gahlot, V.K. and Tiwari, S., 2013. Reduction of scour depth downstream of pipe outlet stilling basin using end sill. *International Journal of Engineering Sciences*, 2(7), pp.20-25.
- [9] Behnamtalab, E. (2016). Experimental and numerical investigation of flow field and scouring at USBRVI stilling basin, PhD Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University 155 p. (in Persian)
- [10] Saber, M. (2020). Experimental investigation on scour downstream of USBR VI stilling basins, *Journal of Hydraulics*, 14(4), pp.137-148. (in Persian)
- [11] Beichley, G., 1978. *Hydraulic Design of Stilling Basin for Pipe or Channel Outlets*, Denver: USBR.

۲. برای نسبت‌های $W/D_e = 4.23$ و $W/D_e = 6.35$ و عدد فرود جریان ورودی ۳ تا ۶، آبپایه ربع‌دایره‌ای شکل، کمترین مقدار شاخص آبستگي را دارد در نسبت $W/D_e = 10.16$ و برای اعداد فرود ۹/۲۷ و ۱۳/۹۱، کمترین شاخص آبستگي متعلق به آبپایه مثلثی شکل است.

۳. در هر سه آبپایه، افزایش عدد فرود منجر به کاهش شاخص آبستگي شده است.

۴. پشته رسوبي تنها در آزمایش‌ها با لوله ۵ سانتی‌متری و برای عدد فرود روی منحنی بیچلی ایجاد شد. ارتفاع پشته و عمق حداکثر آبستگي در آبپایه پله‌ای از همه بیشتر و در آبپایه ربع‌دایره‌ای از همه کمتر بدست آمد.

۵. روابط بدون بعد برای تخمین عمق آبستگي برحسب عدد فرود جریان ورودی به حوضچه (Fr_0) و نسبت عرض حوضچه به قطر معادل جت ورودی به حوضچه (W/D_e) برای هر سه شکل آبپایه ارائه شد.

۶- مراجع

- [1] Verma, D.V.S. and Goel, A., 2000. Stilling basins for pipe outlets using wedge-shaped splitter block. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 126(3), pp.179-184.
- [2] Goel, A. and Verma, D.V.S., 2001. Model studies on stilling basins for pipe outlets. *Irrigation and Drainage Systems*, 15(1), pp.81-91.

Effect of end sill shape on scour depth and scour index downstream of USBR VI stilling basin

Shokoufeh Kheirehdast¹, Masoud Ghodsian^{*2}

1- Graduated MSc of Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering and Environment, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Professor, Faculty of Civil Engineering and Environment and Water Engineering Research Institute, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*ghods@modares.ac.ir

Abstract

Stilling basins are used in the outlet of channels, chutes, and culverts to dissipate the excess kinetic energy of incoming flow. One of the basins in which the energy of the incoming flow is dissipated by the impact is the USBR VI stilling basin. The USBR VI stilling basin was first introduced by Bradley and Peterka in 1995 and then modified by Beichley in 1978. This structure consists of a middle wall and an end sill. Scouring around the structures that are located in the vicinity of erodible beds, such as stilling basins, has always been one of the most important problems related to these structures. Unlike other types of stilling basins, the studies carried out around this type of basin are limited, and there are still many hydraulics features of this type that have not been considered in previous research.

In this article, the effect of the shape of the end sill on scour depth downstream of the stilling basin is evaluated. Based on the Beichley graph (Standard Design), the physical model of the stilling basin was designed, constructed, and installed in the hydraulic laboratory of Tarbiat Modares University. Experiments were conducted in a 0.8 m wide and 0.9 m height rectangular channel. The pump used in the experiments had a nominal flow rate of 400 cubic meters per hour (about 120 liters per hour), a head of 11.7 meters, a power of 22 horsepower, and an engine speed of 1450 rpm. In the design of experiments, the parameters including approach Froude number (i.e. 1, 1.5, and 2 times the standard Froude number on the Beichley graph), the diameter of inlet pipe (i.e. $De = 5, 8, \text{ and } 12$ centimeters), and end sill shapes (triangular, stepped and circular quadrant), in the form of 27 tests were assessed to study the dimensions of the scour depth.

The observations revealed that in all three end sill shapes, the increase in the Froude number has led to a decrease in the scour index. The circular quadrant end sill had the lowest scour depth in the front of the end sill and the least scour index, in the range of the Froude number of 2 to 6. In the range of the Froude numbers of 9 to 14, the triangular end sill causes the lowest scour index. For the relative diameter of the inlet pipe equals to 10.16, and for Froude numbers equal to 9.27 and 13.91, the triangular-shaped end sill has the least scour index. In every end sill, decreasing the pipe's diameter results in the maximum depth of the scour. Another important finding is that the sediment bar is only formed in experiments conducted with an inlet pipe's diameter equal to 5cm for the Froude number equal to the Froude number on the Beichley graph. The biggest amounts of the height of the sediment bar and maximum scour depth are found for the stepped end sill and the smallest amounts of the height of the sediment bar and maximum scour depth are found for the circular quadrant end sill. Subsequently, the non-dimensional equations according to the Froude number of incoming flow and the relative diameter of the inlet pipe, were presented to estimate the maximum depth of the scour hole.

Keywords: Stilling Basin USBR VI, End sill, Scour.