


Experimental Investigation on Scour Downstream of USBR VI Stilling Basins

Milad Saber¹, 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

Received: 15 October 2019, Accepted: 2 March 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Energy dissipaters are usually installed at the outlets of canals, chutes, culverts and other hydraulic structures. They are used to dissipate the excess energy of the outlet flow from the hydraulic structures. For dissipation of excess energy at the outlets, usually stilling basins are used. There are different types of stilling basins introduced and used in different parts of world. The USBR type VI stilling basin was first introduced by Bradely and Peterka (1995) and later on modified by Biechley (1978). In this paper results of experiments on the scour at the downstream of the USBR type VI stilling basin are reported.

Methodology: Experiments were conducted in a 0.8 m wide, 0.6 m height, and 0.58 m length rectangular channel. The bed and sides of the channel were made of still and glass respectively, and supported by metal frames. Uniform sediment with mean diameter of 1.64 mm were used as the bed material. The sediment layer with thickness of 0.4 m and length of 2.75 m were prepared at the downstream of stilling basin.

Experiments were conducted after six hours when almost equilibrium scour was reached. The bed topography and depth of scour were measured by a digital point gauge with the accuracy of ± 0.01 mm. The dimensions of different parts of stilling basing was selected following the method introduced by Biechley (1978). Total of 32 experiments were conducted for different Froude number (1.99, 3.03, 4.06, 4.07, 5.97, 8.11, 9.27 and 13.91) and four different stepped end sills (with one step, with two steps, with three steps, with four steps and with five steps). The width, height and length of all the end sills were kept equal in all the experiments.

Results: It was found that the Froude number increase the length of scour hole for all the experiments. Increasing the Froude number from 2 to 4, the relative depth of scour initially increases and reaches to a maximum value at Froude number equal to about 3 and then decreases. The variations of the relative depth of scour for the range of Froude number from 4 to 6 is marginal. However, the amount of the relative depth of scour for Froude number greater than 6 significantly decreases.

By increasing the Froude number (from 1.99 to 3.03), the scouring potential of the outflow from the stilling basin increases. As a result, the relative depth of scour increases. For higher values of the Froude number, the weep out of the flow from the stilling basin occurs. In this case dissipating potential of the out flow jet from the stilling basin reduces and as a result the relative

depth of scour reduces. This decremental trend is more significant at Froude number greater than 6.

By increasing the Froude number, scour index ($2d_s/L_t$ where d_s is maximum depth of scour and L_t is distance of location of maximum scour depth from the stilling basin) increases and enhances the performance of the stilling basin. The performance of the end sill with four steps was better for the Froude number in the range of 1.99 to 4.07. The amount of scour depth at the downstream of the end sill with four steps was minimum for the Froude numbers in the ranges of 9.27 to 13.91. The volume of scour hole at the downstream of the end sill with four steps was less than that due to other end sills. An asymmetry index was defined to see the symmetry/asymmetry of the bed topography after the experiments. The values of asymmetry indices for the end sills with five steps under Froude number in the range of 1 to 4, and for the end sills with four steps under Froude number in the range of 4 to 13.9 were minimum. Time variations of the scour showed that about 65 to 70 percent of the scour occurs during 60 minutes from onset of experiments. An equation was obtained for the dimensionless longitudinal profile of scour profile.

Keywords: USBRVI Stilling basin, End sill, Scour, Scour index, Scour asymmetry.

بررسی آزمایشگاهی آبستگي پایین دست حوضچه آرامش USBRVI با آبپایه پلکانی

میلاذ صابر^۱، مسعود قدسیان^{۲*}

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، 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

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲ † † † وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: حوضچه آرامش نوع ۶ به طور معمول در خروجی لوله‌ها و مجراها تحت فشار، برای استهلاک انرژی جریان تعبیه می‌شود. آزمایش‌هایی بر روی آبستگي در مدلی از این حوضچه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. فراسنجه‌های متغیر در آزمایش‌های شامل عدد فرود جریان، قطر لوله ورودی و چهار مدل آبپایه انتهایی (دوپله‌ای، سه‌پله‌ای، چهارپله‌ای و پنج‌پله‌ای) بودند، که مجموعاً در قالب ۳۲ آزمایش طراحی و انجام شد. نتایج نشان داد افزایش عدد فرود باعث کاهش شاخص آبستگي و عملکرد موثرتر آبپایه می‌شود. در محدوده عدد فرود ۱/۹۹ تا ۴/۰۷، آبپایه ۴ پله‌ای عملکرد مناسب‌تری را نسبت به دیگر آبپایه‌ها دارد. در محدوده عدد فرود ۹/۲۷ تا ۱۳/۹۱، آبپایه ۴ پله‌ای عمق آبستگي کمتری ایجاد می‌کند. حجم رسوب خارج شده از حفره آبستگي در آبپایه ۴ پله‌ای نیز کمتر از آبپایه‌های دیگر است. به منظور بررسی تقارن عوارض بستر، شاخص تقارن تعریف شد. عوارض بستر در پایین دست آبپایه پنج پله‌ای در محدود عدد فرود ۱ تا ۴، و در پایین دست آبپایه چهارپله‌ای در محدوده عدد فرود ۴ تا ۱۳/۹، شاخص تقارن کمتری دارد. تغییر پذیری‌های زمانی عمق آبستگي نشان داد حدود ۶۵ تا ۷۰ درصد عمق آبستگي در یک ساعت اولیه رخ می‌دهد. همچنین معادله‌ای برای نیمرخ‌های طولی حفره آبستگي ارائه شد.

کلید واژگان: حوضچه آرامش نوع ۶، آبپایه انتهایی، آبستگي، شاخص آبستگي و شاخص تقارن.

۱- مقدمه

مشاهده شده، ابعاد بهینه شده آن را مطابق شکل ۱ ارائه نمود.

بررسی و ارزیابی‌های گسترده‌ای در زمینه آبستگي در پایین‌دست انواع مختلف حوضچه‌های آرامش در گذشته انجام شده است. در ادامه به مهم‌ترین تحقیقات انجام شده روی حوضچه آرامش نوع ۶ اشاره می‌شود.

عمده تحقیقات صورت گرفته روی آبستگي و استهلاک انرژی در پایین‌دست حوضچه آرامش نوع ۶، در سال‌های (1999-2016) صورت گرفته است. هدف اصلی این تحقیقات کاهش آبستگي یا استهلاک انرژی در پایین‌دست این نوع از حوضچه آرامش بوده است. برای مثال Verma and Goel (1999) در مدل آزمایشگاهی خود

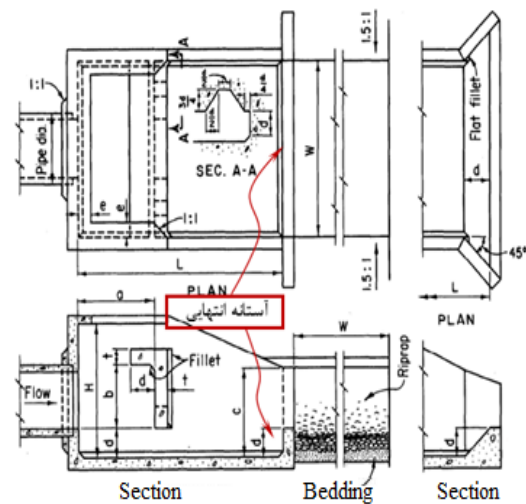
حوضچه‌ی آرامش عبارت است از قسمت کوتاهی از یک آبراهه کف‌سازی شده، که در انتهای سرریز، کالورت، لوله و یا هر سازه‌ای دیگر ساخته می‌شود. هدف از ساختن آن استهلاک انرژی از طریق برخورد جریان به مانع‌ها یا از طریق تشکیل پرش هیدرولیکی^۱ می‌باشد. با این تدبیر جریان فوق بحرانی پیش از رسیدن به بخش‌های غیرکف‌سازی شده‌ی رودخانه یا آبراهه، به جریان زیر بحرانی تبدیل شود و از انرژی آن کاسته می‌شود. مشخصات حوضچه آرامش نوع ۶ نخستین بار توسط Peterka and Bradley (1957) ارائه شد و Beichley (1978) با بررسی مشکلات

¹ Hydraulic jump

عملکرد این نوع حوضچه آرامش را با نصب یک چند ابزار، مانند آبپایه و جداکننده^۱ بهبود بخشیدند. آنان برای مقایسه عملکرد حوضچه آرامش از شاخص آبشستگی^۲ برابر رابطه‌ی (۱) استفاده کردند.

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

در اینجا d_s بیشینه عمق آبشستگی و L_u فاصله محل عمق بیشینه آبشستگی از انتهای حوضچه آرامش است. در ادامه Goel and Verm (2000)، ۳۹ مدل مختلف با آرایش‌های گوناگونی از جداکننده‌ها و آبپایه‌ها را بررسی و در نهایت



$$\begin{aligned} H &= 3W/4 & c &= W/2 & L &= 4W/3 & d &= W/6 \\ a &= W/2 & e &= W/12 & b &= 3W/8 & t &= W/12 \end{aligned}$$

Fig. 1 Characteristics of USBRVI stilling basin
شکل ۱ مشخصات حوضچه آرامش نوع ۶ (Beichley, 1978)

یکی از آرایش‌ها را به عنوان آرایش بهینه معرفی کردند. در این آرایش افزون بر جداکننده‌ی جریان، از یک آبپایه‌میانی نیز استفاده شده است. آبپایه انتهایی مورد استفاده آنان بصورت لبه‌گرد بود و باعث کاهش ۲۵ درصد طول حوضچه شد. (Verma and Goel (2001) با بررسی تأثیر بلوک‌های میانی بر استهلاک انرژی در این حوضچه به این نتیجه رسیدند که یک ردیف بلوک میانی گوه‌ای شکل در حوضچه، عملکرد مناسبی دارد. همچنین افزایش شمار بلوک‌های میانی به دو ردیف، باعث بهبود عملکرد این حوضچه می‌شود.

نتیجه آزمایش‌هایی نشان داد که آبپایه انتهایی گردشده، منجر به بهبود عملکرد حوضچه نسبت به مدل پیشنهادی (Verma and Goel (2003) شد. Goel (2007) به بررسی تأثیر دیواره کناری باز شونده حوضچه آرامش نوع ۶، شکل و اندازه بلوک جداکننده، آبپایه میانی، بلوک میانی و شکل آبپایه انتهایی در پایین دست خروجی مربعی شکل پرداخت. نتیجه آزمایش‌هایی نشان داد حوضچه با دیواره‌های کناری باز شونده باعث هدررفت بیشتر بار و استفاده از بلوک جداکننده مثلثی شکل با زاویه رأس ۹۰ درجه باعث پخش جت آب در عرض حوضچه می‌شود. (Goel (2008) در ادامه کار خود به بررسی آزمایشگاهی تأثیر شکل، اندازه و موقعیت اجزای حوضچه آرامش نوع ۶ پرداخت. نتیجه کار وی معرفی مدلی جدید با یک بلوک جداکننده گوه‌ای شکل، دیوار ضربه‌گیر، دو ردیف بلوک میانی گوه‌ای شکل و آبپایه انتهایی شیب‌دار، با اندازه‌ها و مکان‌های قرارگیری خاص بود. (Tiwari et al. (2011) با بررسی تأثیر شکل آبپایه انتهایی بر آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش نوع ۶ و مقایسه شاخص آبشستگی نشان داد که آبپایه انتهایی شیب‌دار بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد.

Tiwari (2013b) به بررسی تأثیر ابعاد و محل دیوار میانی بر آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش با خروجی مستطیلی، پرداخت. نتایج نشان داد که ابعاد و محل دیوار میانی حوضچه، به طور قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد حوضچه تأثیر گذار است. (Tiwari (2013a) در نتایج بررسی مشخص کرد اگر فاصله زیر دیوار میانی تا کف حوضچه برابر قطر لوله ورودی به حوضچه باشد، حوضچه بهترین عملکرد را دارد. (Tiwari and Goel (2014) به بررسی تأثیر فاصله زیر دیواره میانی تا کف حوضچه بر آبشستگی حوضچه با خروجی

² Scour index

¹ Splitter

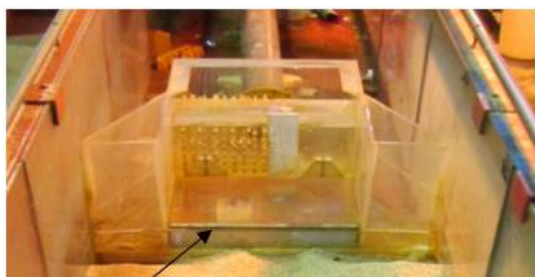
ارائه شده است.

بر مبنای روش طراحی ارائه شده توسط بیچلی^۱ همه‌ی ابعاد حوضچه آرامش نوع ۶ وابسته به عرض آن است. از این رو به منظور انجام مطالعه مورد نظر در یک حوضچه استاندارد، در آغاز عرض حوضچه، با در نظر گرفتن عرض آبراهه پایین دست آن انتخاب شد. با توجه به اینکه عرض آبراهه پایین دست حوضچه ۸۰ سانتی متر است، برای فراهم کردن بازشدگی مناسب پس از حوضچه آرامش، برای برقراری هماهنگی بیشتر با شرایط واقعی، عرض حوضچه برابر ۴۵ سانتی متر ($W = 45 \text{ cm}$) در نظر گرفته شد. با مشخص شدن عرض حوضچه، ابعاد اجزای دیگر حوضچه آرامش که در شکل ۱ مشخص شده، قابل محاسبه است. این ابعاد در جدول ۱ نشان داده شده است. حوضچه آرامش مورد نظر با استفاده از پلکسی گلس ساخته و در فاصله حدود ۲ متری از ابتدای آبراهه نصب شد (شکل ۳).

جدول ۱ ابعاد حوضچه آرامش ساخته شده (cm)

Table 1 Dimensions of stilling basin (cm)

W	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 = $\frac{W}{12}$
45	60	33.8	22.5	16.9	52.5	7.5	3.8	3.8



end sill

Fig. 2 Stilling basin

شکل ۲ حوضچه آرامش به همراه آبراهه پایین دست آن

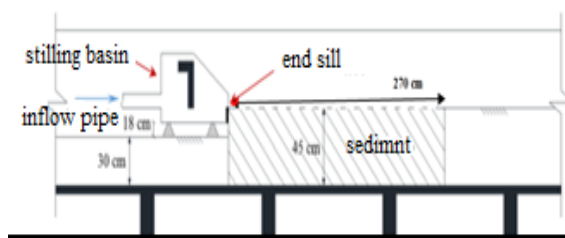


Fig. 3 Experimental set up

شکل ۳ مدل ساخته شده حوضچه آرامش

مربعی پرداختند. (Tiwari and Goel (2016) به بررسی تأثیر دیواره میانی بر استهلاک انرژی در حوضچه نوع ۶ پرداختند. Behnamtalab (2016) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر قطر مصالح پایین دست، قطر لوله، عمق پایاب و عدد فرود جریان ورودی، بر آبستتگی در پایین دست حوضچه نوع ۶ پرداخت. ایشان به منظور کاهش آبستتگی، حوضچه آرامش با دیوارهای جانبی واگرا را پیشنهاد داد. همچنین توصیه‌هایی برای طراحی ریپ رپ در پایین دست این حوضچه ارائه داد. (Khairhdast (2017) با بررسی تأثیر شکل آبپایه بر آبستتگی پایین دست حوضچه نوع ۶ نشان داد که در محدوده عدد فرود ۲ تا ۶، آبپایه ربع دایره‌ای کمترین عمق آبستتگی جلوی آبپایه و کمترین مقدار شاخص آبستتگی را دارد. با مرور نتایج تحقیقات صورت گرفته روی حوضچه آرامش نوع ۶ مشخص شد که تأثیر آبپایه پلکانی و شمار پله‌های آن در این حوضچه نیازمند تحقیق و بررسی بیشتر است. آنچه که در این تحقیق مد نظر است بررسی آزمایشگاهی تأثیر آبپایه‌های پلکانی به عنوان عضوی تأثیرگذار بر روی آبستتگی پایین دست حوضچه آرامش نوع ۶ می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آبراهه‌ای با عرض ۸۰ سانتیمتر و طول مفید ۵۸۰ سانتیمتر انجام شد. پمپ استفاده شده در آزمایش‌های دارای دبی اسمی ۴۰۰ متر مکعب بر ساعت (حدود ۱۲۰ لیتر بر ثانیه)، توان ۲۲ اسب بخار و دور موتور ۱۴۵۰ دور بر دقیقه بود. برداشت نیمرخ بستر با استفاده از متر لیزری انجام گرفت. این عمق سنج روی یک ارابه با قابلیت حرکت در راستای عرضی و طولی آبراهه نصب شد. ارابه با حرکت طولی و عرضی خود می‌تواند عمق سنج را در هر نقطه از آبراهه قرار داده تا نیمرخ بستر و عمق آبستتگی برداشت شود. کف آبراهه پایین دست حوضچه آرامش، پس از آبپایه انتهایی به طول ۲۷۰ سانتی‌متر، به اندازه ۴۵ سانتی‌متر پایین تر از آبپایه انتهایی قرار دارد. این محدوده برای ریختن رسوب در نظر گرفته شد. پس از این طول، کف آبراهه هم‌تراز با سطح آبپایه انتهایی حوضچه آرامش ادامه دارد. حوضچه آرامش و آبراهه پایین دست آن در شکل ۲

¹ Biechley



Fig. 4. End sills

شکل ۴ آبیپه‌های آزمایش شده

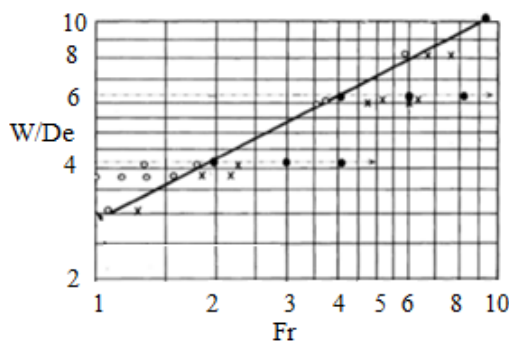


Fig. 5 Selected Froude number

شکل ۵ اعداد فرود انتخاب شده روی منحنی بیچلی

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- مشاهدات

در فرایند انجام آزمایش‌ها مشاهده شد که طول حفره آبشستگی به مرور زمان افزایش یافته و محل رخداد عمق بیشینه آبشستگی از آبیپه انتهایی فاصله می‌گیرد. مشاهده‌ها نشان داد در برخی از آزمایش‌ها که به طور کلی آزمایش‌ها با عدد فرود بیشتر بودند، جریان پس از برخورد به آبیپه پرتاب شده و از آبیپه انتهایی دور می‌شد. در حالی که در آزمایش‌هایی با اعداد فرود کمتر، جریان در تماس با آبیپه از حوضچه خارج شده و در فاصله کمتری نسبت به آبیپه انتهایی به بستر رسوبی پایین دست برخورد می‌کرد. پرتاب شدن جریان از محل آبیپه انتهایی به سمت پایین دست، باعث می‌شود محل برخورد جریان به بستر در فاصله بیشتری از آبیپه باشد و در نتیجه حفره آبشستگی در فاصله بیشتری از آبیپه تشکیل شود. شکل ۶ دور شدن جریان خروجی از حوضچه آرامش برای عدد فرود $3/03$ در مقایسه با عدد فرود $1/99$ را نشان می‌دهد. برای جریان در این شکل، از راست به چپ است. در همگی آزمایش‌های با اعداد

۳- آزمایش‌ها

در این بررسی ۳۲ آزمایش در نظر گرفته شد که ترکیبی از ۲ متغیر آبیپه انتهایی و عدد فرود جریان خروجی از لوله به درون حوضچه آرامش بود. شکل ۴ آبیپه‌های استفاده شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. که شامل چهار آبیپه مختلف (دو پله‌ای، سه پله‌ای، چهار پله‌ای و پنج پله‌ای) با ابعاد درج شده در جدول ۲ می‌باشد.

چگونگی تعیین اعداد فرود بدین صورت بود که سه نقطه ابتدا، انتها و میانی در روی منحنی بیچلی (شکل ۵) انتخاب شد تا کل محدوده عدد فرود این منحنی را پوشش دهد. آنگاه هر یک از این اعداد $1/5$ و 2 برابر شد (به جز نقطه انتهایی که تنها $1/5$ برابر شد) و در نهایت ۸ عدد فرود ($1/99$ تا $13/91$) برای آزمایش تعیین شد. این اعداد فرود با سه قطر لوله ۵، ۸ و ۱۲ سانتی‌متر تامین شد. شکل ۵ موقعیت اعداد فرود انتخابی را روی منحنی بیچلی نشان می‌دهد. رسوب یکنواخت با قطر میانگین $1/64$ میلی‌متر به عنوان مصالح بستر استفاده شد.

انجام آزمایش‌ها بدین صورت بود که در آغاز و پیش از اجرای آزمایش، سطح رسوب پایین دست حوضچه به طور کامل صاف شده و ورقه‌ای گالوانیزه روی آن قرار داده می‌شد تا پیش از تنظیم دبی، سطح رسوب دستخوش تغییر نشود. همچنین برای جلوگیری از حرکت این صفحه و یا نفوذ جریان آب به زیر آن، وزنه‌هایی روی آن قرار داده می‌شد. پس از تنظیم دبی و ثابت شدن جریان، وزنه‌ها و ورقه برداشته شده و آغاز آزمایش از این زمان در نظر گرفته می‌شد. در طول آزمایش نیز به صورت دوره‌ای دبی کنترل می‌شد. در انتها و پس از گذشت ۵ ساعت از آغاز آزمایش، پمپ خاموش شده و برداشت نیم‌رخ کامل بستر در پایین دست حوضچه با استفاده از عمق‌سنج لیزری انجام می‌شد. تغییرپذیری های عمق آبشستگی در مدت زمان انجام آزمایش نیز با استفاده از عمق‌سنج نقطه‌ای برداشت می‌شد.

جدول ۲ ابعاد آبیپه‌های انتهایی (سانتی متر)

Table 2 Dimensions of end sills (cm)				
N. of steps	2	3	4	5
Width	3.75	2.5	1.87	1.5
Height	3.75	2.5	1.87	1.5



Fig. 7 Asymmetry of bed topography

شکل ۷ عدم تقارن در حفره آبستگي

۴-۲- تغییرپذیری های زمانی آبستگي

شکل ۸ نمونه‌ای از تغییرات زمانی عمق آبستگي برای آبپایه‌های مختلف در حالت $Fr=3.03$ و $W/D_e=4.23$ را نشان می‌دهد. در اینجا 2s، 3s، 4s، و 5s به ترتیب معرف آبپایه انتهایی با ۲، ۳، ۴ و ۵ پله است. این شکل نشان می‌دهد که در این حالت، آبپایه سه پله‌ای بیشترین عمق آبستگي و آبپایه چهار پله‌ای کمترین عمق آبستگي در طول آزمایش را داشته است. در حالی که آبستگي ناشی از آبپایه دو پله‌ای، از آبپایه چهارپله‌ای بیشتر و از آبپایه سه و پنج پله‌ای کمتر است. همچنین نتایج نشان داد حدود ۶۵ تا ۷۰ درصد آبستگي در یک ساعت اول رخ می‌دهد.

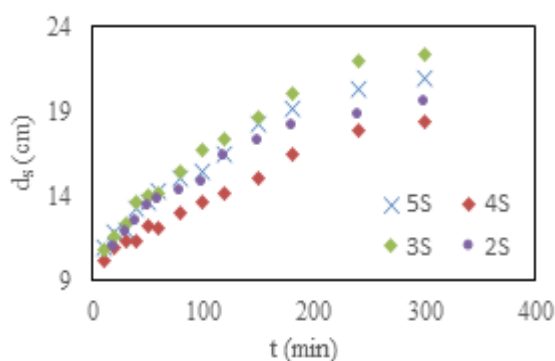


Fig. 8 Time variations of scour depth

شکل ۸ تغییرپذیری های زمانی عمق آبستگي $Fr=3.03$ و $W/D_e=4.23$

۴-۳- تأثیر شکل آبپایه انتهایی

شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب طول نسبی حفره آبستگي (L/D_e) و عمق نسبی آبستگي (d_s/D_e) بر حسب عدد فرود جریان ورودی به حوضچه برای نسبت عرض حوضچه به قطر لوله $W/D_e = 4.23$ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که

فرود دو برابر منحنی بیچلی، فاصله محل آبستگي بیشینه از آبپایه انتهایی، بیشتر از آزمایش‌های با عدد فرود روی منحنی بیچلی به دست آمد.

در انتهای برخی از آزمایش‌ها مشاهده شد، به رغم وجود تقارن کامل در حوضچه و آبراهه پایین‌دست، حفره آبستگي و بستر پایین دست دارای عدم تقارن است. این عدم تقارن هم در محور طولی عمق بیشینه آبستگي نسبت به محور مرکزی آبراهه، و هم در عوارض حفره آبستگي نهایی دیده می‌شد. مشاهده عوارض بستر نشان می‌داد که افزون بر حفره آبستگي تشکیل یافته در قسمت میانی آبراهه، چسبیده به دیواره‌های آبراهه و به موازات آن‌ها نیز حفره‌هایی تشکیل شده که عرض و عمق این حفره‌ها در آزمایش‌های مختلف متفاوت بود. همچنین در برخی از آزمایش‌ها، بین دو حفره ایجاد شده در کناره‌های آبراهه نیز عدم تقارن مشاهده می‌شد. شکل ۷ نمونه‌ای از این عدم تقارن در حفره آبستگي را نشان می‌دهد.

با توجه به عرض حوضچه (۴۵ سانتی‌متر) و عرض آبراهه پایین دست (۸۰ سانتی‌متر)، جریان پس از حوضچه نوع ۶ استفاده شده، دارای بازشدگی/تبدیل ناگهانی می‌باشد. بنا بر نتایج بررسی های پیشین (Dufrense et al., 2010; Kantoush, 2008) جریان در تبدیل ناگهانی، در شرایط متقارن و در شرایط دیگر نامتقارن است. با آنکه شرایط جریان خروجی از حوضچه آرامش ۶، با جریان در تبدیل ناگهانی معمولی یکسان نیست ولی رخداد جریان نامتقارن قابل پیش‌بینی بود که در آزمایش‌های انجام شده نیز هر دو نوع جریان متقارن و نامتقارن مشاهده شد. لذا علت عدم تقارن در حفره آبستگي را می‌توان به وجود جریان نامتقارن پس از حوضچه، نسبت داد.

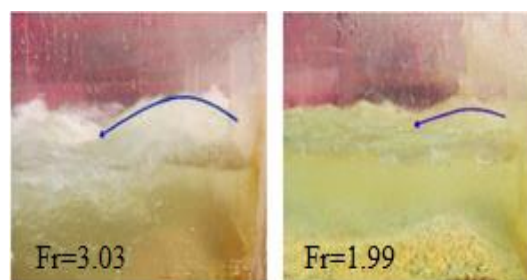


Fig. 6 Sweep up of flow at higher Froude number

شکل ۶ پرتابی شدن جریان با افزایش عدد فرود

مسیر بیشتری را طی کرده، انرژی آن کاهش یافته و بیشتر صرف جابه جایی مصالح در سطح بستر می شود، لذا در این حالت با افزایش عدد فرود، عمق آبستنگی کاهش می یابد. روند افزایشی و کاهشی عمق نسبی آبستنگی نشان داده شده در شکل ۱۰، مربوط به آبپایه انتهایی پله ای در محدوده عدد فرود ۱/۹۹ تا ۴/۰۷ و در شرایط پایاب آزاد است که با نتایج آزمایش های (Khairahdast (2018) نیز همخوانی دارد.

روند افزایشی طول نسبی حفره آبستنگی با افزایش عدد فرود برای نسبت $W/D_e=6.35$ نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تأثیر بیشتر آبپایه های استفاده شده روی طول حفره آبستنگی، برای اعداد فرود بزرگتر از ۶ در این شکل مشخص است. شکل ۱۱ همچنین نشان می دهد در محدوده عدد فرود بین ۴ تا ۶، نوع آبپایه های استفاده شده (شمار پله ها) تغییر زیادی در طول حفره آبستنگی ایجاد نمی کند. البته در این محدوده از عدد فرود، دامنه تغییر پذیری های طول نسبی حفره آبستنگی با آنچه در شکل ۹ نشان داده شده نیز تفاوت زیادی ندارد. اما با افزایش عدد فرود، تأثیر نوع آبپایه بیشتر می شود. در این حالت نیز آبپایه چهار پله ای بیشترین طول حفره آبستنگی را ایجاد کرده است. روند کاهشی عمق نسبی آبستنگی با افزایش عدد فرود از ۴ تا ۸، برای $W/D_e=6.35$ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. نرخ کاهشی عمق نسبی آبستنگی با افزایش عدد فرود به ویژه برای عدد فرود بزرگتر از ۶ در این شکل مشهود است. در این حالت بیشترین عمق نسبی آبستنگی مربوط به آبپایه ۳ پله ای و کمترین آن در بیشتر شرایط جریان مربوط به آبپایه دو و چهار پله ای است. هر چند که تفاوت زیادی بین آبستنگی ناشی از آبپایه دو پله ای و چهار پله ای وجود ندارد. اما با توجه به شکل های ۱۰ و ۱۲ می توان گفت آبپایه چهار پله ای کمترین عمق آبستنگی را دارد.

۴-۴- بررسی شاخص آبستنگی

با محاسبه میزان های شاخص آبستنگی با استفاده از رابطه (۱)، که نتایج آن در شکل های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است، مشاهده می شود با افزایش عدد فرود جریان ورودی به حوضچه، میانگین شاخص آبستنگی در آبپایه های استفاده

در شکل ۹ مشخص است برای اعداد فرود ۲ تا ۴، طول نسبی حفره آبستنگی برای آبپایه انتهایی چهار پله ای، بیشتر از سه آبپایه دیگر است. با توجه به این شکل میتوان گفت آبپایه دو و سه پله ای کمترین طول نسبی حفره آبستنگی را برای محدوده عدد فرود بین ۳ تا ۴ دارد. با افزایش عدد فرود، جریان خروجی از حوضچه در فاصله ی دورتری از حوضچه فرود می آید و افزایش طول حفره آبستنگی را در این حالت به همراه خواهد داشت. با مقایسه میزان عمق نسبی آبستنگی بیشینه (d_s/D_e) بر حسب عدد فرود که در شکل ۱۰ نشان داده شده، مشخص است که آبپایه چهار پله ای، کمترین عمق آبستنگی را در این حالت $(W/D_e=4.23)$ ایجاد کرده است. با افزایش عدد فرود از ۱/۹۹ تا ۳/۰۳ قابلیت فرسایشی جریان خروجی از حوضچه افزایشی است که منجر به افزایش بیشینه عمق آبستنگی می شود. با توجه به اینکه با افزایش بیشتر عدد فرود، جریان پس از آبپایه انتهایی به پایین دست پرتاب شده،

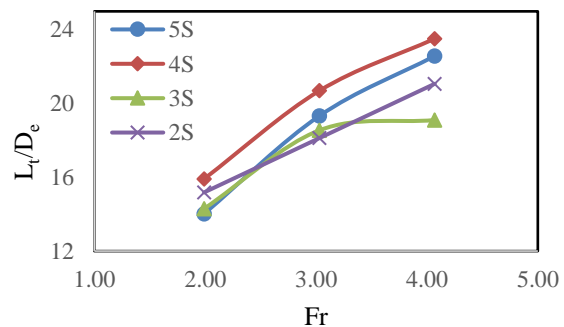


Fig. 9 Relative length of scour hole for $W/D_e=4.23$

شکل ۹ طول نسبی حفره آبستنگی بر حسب عدد فرود برای $W/D_e=4.23$

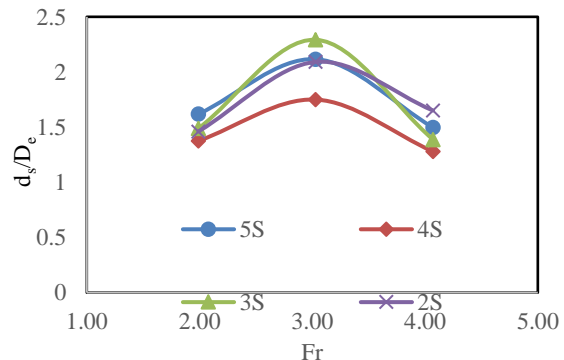


Fig. 10 Relative depth of scour for $W/D_e=4.23$

شکل ۱۰ عمق نسبی بیشینه آبستنگی بر حسب عدد فرود برای $W/D_e=4.23$

در این حالت، یعنی ۱۳/۹۱، آبپایه چهار پله‌ای عملکرد بهتری (شاخص آبشستگی کمتر) را ارائه می‌دهد.

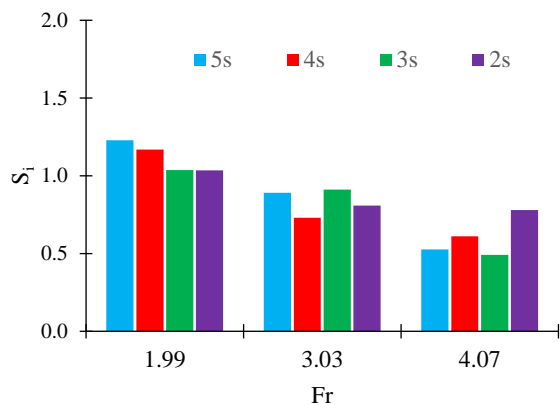


Fig. 13 Scour index for $W/D_e=4.23$
 شکل ۱۳ شاخص آبشستگی برای $W/D_e=4.23$

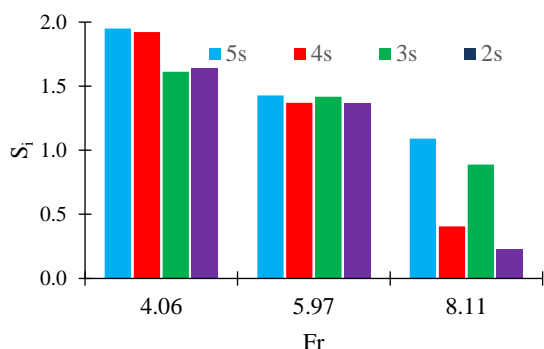


Fig. 14 Scour index for $W/D_e=6.35$
 شکل ۱۴ شاخص آبشستگی آبپایه‌ها برای $W/D_e=6.35$

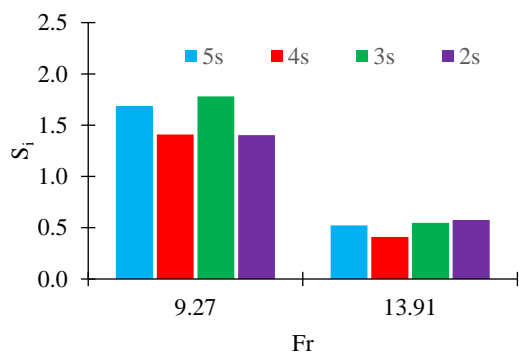


Fig. 15 Scour index for $W/D_e=10.16$
 شکل ۱۵ شاخص آبشستگی آبپایه‌ها برای $W/D_e=10.16$

۴-۵- بررسی حجم رسوب شسته شده

شکل ۱۶ حجم رسوب خارج شده از حفره آبشستگی (V) برای آبپایه‌های مختلف در آزمایش‌های انجام شده را نشان

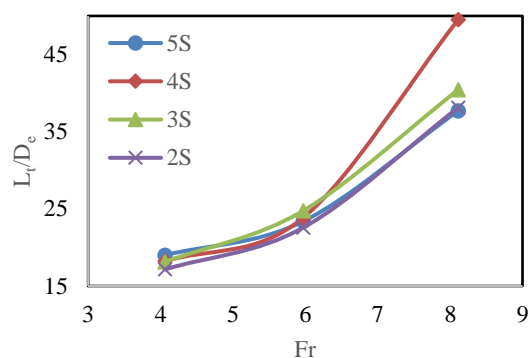


Fig. 11 Relative length of scour hole for $W/D_e=4.23$
 شکل ۱۱ طول نسبی حفره آبشستگی بر حسب عدد فرود برای $W/D_e=6.35$

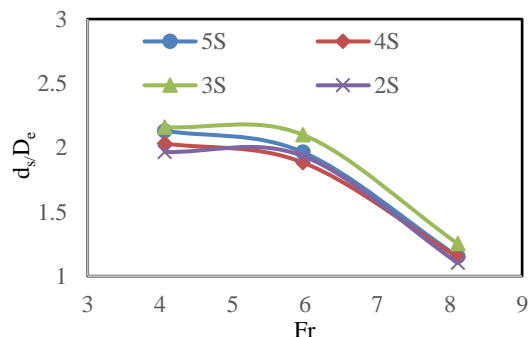


Fig. 12 Relative depth of scour for $W/D_e=6.35$
 شکل ۱۲ عمق نسبی بیشینه آبشستگی بر حسب عدد فرود برای $W/D_e=6.35$

شده روند کاهشی دارد. بدین ترتیب می‌توان گفت با افزایش عدد فرود، آبپایه‌ها به طور عموم عملکرد بهتری را ایفاء می‌کنند و شاخص آبشستگی با افزایش عدد فرود، سیر کاهشی می‌گیرد. شاخص آبشستگی در حالت $W/D_e=4.23$ برای عدد فرود ۴/۰۷، کمترین میزان و در حالت $W/D_e=6.35$ برای عدد فرود ۸/۱۱، کمترین میزان است. لازم به یادآوری است که در حالت بیشترین عدد فرود استفاده شده در این حالت ($Fr=8.11$)، آبپایه‌های دو و چهار پله‌ای بیشترین کاهش شاخص آبشستگی را داشته است. همچنین در عدد فرود ۵/۹۷، آبپایه‌های استفاده شده به تقریب شاخص آبشستگی یکسانی را دارند.

شکل ۱۵ نسبت شاخص آبشستگی را بر حسب عدد فرود، برای $W/D_e=10.16$ نشان می‌دهد. در این حالت نیز با افزایش عدد فرود از ۹/۲۷ به ۱۳/۹۱، همانند حالت‌های پیشین این شاخص کاهش می‌یابد و برای عدد فرود ۱۳/۹۱ کمترین میزان را دارد. در بیشترین عدد فرود مورد آزمایش

نتایج نشان داد که محدوده مقادیر به دست آمده برای شاخص تقارن در آزمایش‌های انجام شده در محدوده ۰/۲ تا ۲/۸ متغیر است. هرچه عوارض بستر نامتقارن تر باشد مقدار شاخص تقارن آن بیشتر است. شکل ۱۸ شاخص تقارن را برای آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد بیشترین شاخص تقارن (برابر ۲/۷۶) مربوط به عدد فرود ۵/۹۷ و کمترین شاخص تقارن (با دست کم ۰/۳۳) مربوط به عدد فرود ۳/۰۳ است. با توجه به شکل ۱۸، عملکرد آبپایه‌های استفاده شده این گونه است که در محدوده عدد فرود ۱ تا ۴ آبپایه پنج پله‌ای کمترین شاخص تقارن (با حداقل ۰/۳۳) و در محدوده عدد فرود ۵ تا ۱۳/۹، آبپایه چهارپله‌ای دارای کمترین شاخص تقارن (با حداقل ۰/۷۸) یا کمترین نامتقارنی می‌باشد. در این محدوده از عدد فرود، کمترین و بیشترین شاخص تقارن مربوط به آبپایه‌های چهار پله‌ای و دو پله‌ای است.

با توجه به ساختار پیچیده جریان خروجی از حوضچه آرامش نوع ۶، با برداشت میدان جریان می‌توان به تحلیل کامل تری از چگونگی تأثیرگذاری نوع آبپایه‌های استفاده شده بر آبشستگی، تقارن بستر و شاخص آبشستگی دست یافت.

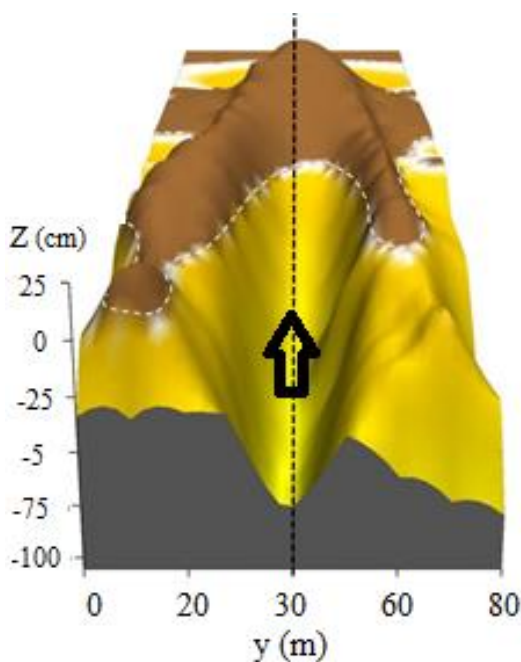


Fig. 17 Typical bed topography

شکل ۱۷ نمونه ای از عوارض بستر در پایان آزمایش

می‌دهد. با آنکه تفاوت زیادی بین حجم رسوبات شسته شده از حفره آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش با آبپایه‌های مختلف مشاهده نمی‌شود، اما روشن است که حجم رسوب خروجی برای آبپایه چهارپله‌ای از دیگر آبپایه‌ها کمتر است.

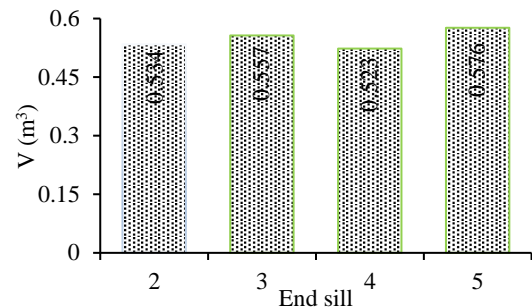


Fig. 16 Scour volume for different end sills

شکل ۱۶ حجم رسوب شسته شده برای آبپایه‌های مختلف

۴-۶- بررسی تقارن حفره آبشستگی

نیمرخ بستر در هر یک از آزمایش‌های از لحاظ میزان تقارن نیز بررسی شدند. شکل ۱۷ عوارض سه بعدی یکی از آزمایش‌ها را به عنوان نمونه نشان می‌دهد. برای بررسی تقارن، عوارض بستر از محور مرکزی آبراهه و در راستای محور طولی به دو نیمه سمت چپ و نیمه سمت راست تقسیم و فراسنجه‌های لازم در دو نیمه برداشت شد. در ادامه به بررسی و تحلیل فراسنجه‌های تأثیرگذار بر تقارن حفره، از قبیل شکل آبپایه و عدد فرود جریان ورودی به حوضچه پرداخته شده است. برای بررسی تقارن در عوارض بستر، فراسنجه‌ی تحت عنوان شاخص تقارن S_t به صورت زیر معرفی شد:

$$S_t = \Delta V_{out} + \Delta d_s + \Delta A \quad (2)$$

در این رابطه ΔV_{out} اختلاف حجم رسوب شسته شده در دو نیمه چپ و راست بستر در پایین دست حوضچه، Δd_s فاصله محل عمق آبشستگی بیشینه تا کناره آبراهه در امتداد طول آبراهه و ΔA اختلاف گستره ناهمواری‌های ایجاد شده بین دو نیمه راست و چپ بستر در پایین دست حوضچه است. با تفهیم مقادیر اجزای معادله فوق به مقدار بیشینه آن، رابطه بالا به صورت بدون بعد زیر نوشته می‌شود.

$$\bar{S}_t = \Delta \bar{V}_{out} + \Delta \bar{d}_s + \Delta \bar{A} \quad (3)$$

۶- نتیجه گیری

آبپایه پنج پله‌ای و چهار پله‌ای به ترتیب بیشترین و کمترین حجم رسوب شسته شده را ایجاد کرده‌اند. همچنین در یک ساعت آغازین آزمایش حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد آبشستگی شکل می‌گیرد. فراسنجه ای به عنوان شاخص تقارن معرفی شد. آبپایه پنج و چهار پله‌ای به ترتیب در محدوده عدد فرود ۱ تا ۴ و ۵ تا ۱۳/۹ بیشترین تقارن در عوارض بستر را ایجاد می‌کند. افزایش عدد فرود باعث کاهش شاخص آبشستگی و عملکرد موثرتر آبپایه‌ها می‌شود. بیشترین شاخص تقارن در عدد فرود ۵/۹۷، برابر ۲/۷۶ و کمترین شاخص تقارن در عدد فرود ۳/۰۳، برابر ۰/۳۳ به دست آمد. در نسبت $W/D_e = 4.23$ و محدوده عدد فرود ۱/۹۹ تا ۴/۰۷ آبپایه چهار پله‌ای عملکرد مناسب‌تری را نسبت به دیگر آبپایه‌ها دارد. بیشترین و کمترین شاخص تقارن در این حالت به ترتیب برابر ۱/۹۹ و ۰/۳۳ به دست آمد. در نسبت $W/D_e = 6.35$ و عدد فرود ۴/۰۷، شاخص آبشستگی بزرگتری، نسبت به تمامی آزمایش‌های انجام شده، به دست آمد. کمترین شاخص آبشستگی در نسبت $W/D_e = 10.16$ ، برابر ۰/۴۱ و در آبپایه چهار پله‌ای به دست آمد.

۷- فهرست نشانه‌ها

D_e	قطر لوله ورودی به حوضچه
d_s	عمق آبشستگی
Fr	عدد فرود
L	طول حوضچه
L_s	طول حفره آبشستگی
S_i	شاخص آبشستگی
S_t	شاخص تقارن
t	مدت زمان آبشستگی
V	حجم حفره آبشستگی
W	عرض حوضچه
x	فاصله طولی
Z	تراز بستر
ΔA	اختلاف سطح ناهمواری بستر
Δd_s	فاصله محل بیشینه عمق آبشستگی از کناره‌ها
	اختلاف حجم رسوب شسته شده در دو نیمه طولی
Δ_{vou}	آبراه

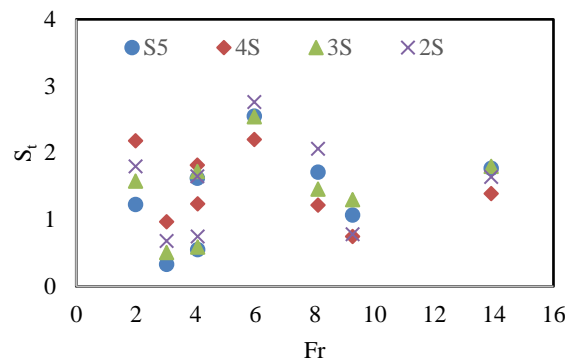


Fig. 18 Symmetry index

شکل ۱۸ شاخص تقارن در تمامی آزمایش‌ها

۵- رابطه نیمرخ آبشستگی

به منظور پیش‌بینی مقطع طولی حفره آبشستگی، مقادیر طولی نیمرخ بستر در محل بیشینه آبشستگی، بی‌بعد شد. برای بی‌بعد سازی، نقطه‌های طولی حفره با مقدار طول بیشینه حفره آبشستگی L_T و نقاط عمقی حفره با بیشینه عمق آبشستگی d_s در هر آزمایش بی‌بعد شد. نتایج نیمرخ طولی بدون بعد شده برای آزمایش‌های مختلف در شکل ۱۹ نشان داده شده است. رابطه زیر بهترین برازش بر نیمرخ‌های ترسیم شده بستر در این شکل است.

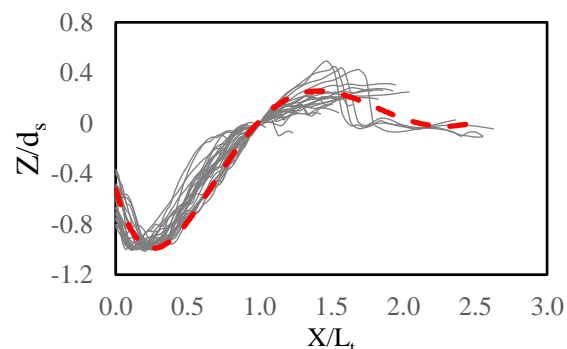


Fig. 19 Dimensionless longitudinal bed profile

شکل ۱۹ نیمرخ طولی بدون بعد بستر

$$\frac{Z}{d_s} = -\frac{0}{05\left(\frac{X}{L_t}\right)^6} + \frac{0}{008\left(\frac{X}{L_t}\right)^5} + \frac{2}{06\left(\frac{X}{L_t}\right)^4} - \frac{7}{58\left(\frac{X}{L_t}\right)^3} + \frac{9}{80\left(\frac{X}{L_t}\right)^2} - \frac{3}{67\left(\frac{X}{L_t}\right)} - \frac{0}{59} \quad (4)$$

۸- منابع

- Kantoush, S.A. (2008). Experimental study on the influence of the geometry of shallow reservoirs on flow patterns and sedimentation by suspended sediments. PhD Thesis, 4048, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Khairehdast, S. (2018). Experimental investigation on the effects of shape of ends sill on scouring downstream of USBRVI stilling basin, Msc. Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University. (in Persian)
- Tiwari, H. (2013a). Analysis of baffle wall gap in the design of stilling basin model. *Int. J. Civil Eng*, 4(4), 66-71.
- Tiwari, H.L. (2013b). Design of stilling basin with impact wall and end sill. *International Research Journal of Resent Sciences*, 2(3), 59-63.
- Tiwari, H. and Goel, A. (2014). Effect of end sill in the performance of stilling basin models. *Am. J. Civil Eng. Archit*, 2(2), 60-63.
- Tiwari, H.L. and Goel, A. (2016). Effect of impact wall on energy dissipation in stilling basin. *KSCE, Journal of Civil Engineering*, 20(1), 463-467.
- 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), 3134-3140.
- Verma, D. V. S. and Goel, A. (2000). Stilling basins for pipe outlets using wedge-shaped splitter block. *J. of irrigation and drainage*, 126(3). 178-184.
- Verma, D. V. S. and Goel, A. (2003). Development of efficient stilling basins for pipe outlets. *J. of irrigation and drainage engineering*, 129(3), 194-200.
- 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)
- Beichley, G. (1978). Hydraulic Design of Stilling Basins, *Journal of Hydraulic Eng. ASCE*, 83(5), 1401-1406.
- Bradley, J. N. and Peterka, A.J. (1955). Research study on stilling basins, energy dissipators and associated appurtenances. *US Bur. Reclam. Lab. Rpt. Hyd-399*.
- Dufresne, M., Dewals, B.J., Erpicum, S., Archambeau, P. and Pirotton, M. (2010). Classification of flow patterns in rectangular shallow reservoirs. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 48(2), 197-204
- Goel, A. (2007). Experimental study on stilling basins for square outlets. In *Proceeding 3rd International Conference on Applied and Theoretical Mechanics, Spain*, pp. 14-16.
- Goel, A. (2008). Design of stilling basin for circular pipe outlets. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(12), 1365-1374.
- Goel, A. and Verma, D. V. S. (2001). Model studies on stilling basins for pipe outlets. *Irrigation and Drainage Systems, Kluwer Academic Publisher, The Netherlands*, 15(1), 81-91.
- Goel, A and Verma, D. V. S. (2003). Development of efficient stilling basins for pipe outlets. *J. Irrigation and Drainage Eng, ASCE*, 194-200.
- Goel, A. and Verma, D. V. S. (2006). Alternate designs of stilling basins for pipe outlets. *Irrigation and drainage systems*, 20(1), 139-150.