


# Estimation of Maximum Scour Depth Downstream of Stilling Basin (Case Study: Masonry Check Dam of Ziarat Basin)

Mohammad Ali Solbi<sup>1</sup>, Amir Ahmad Dehghani<sup>2\*</sup>, Mehdi Meftah Halaghi<sup>2</sup>, Abdolreza Zahiri<sup>2</sup>

1- PhD student, Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

2- Associate professor, Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

\* [a.dehghani@gau.ac.ir](mailto:a.dehghani@gau.ac.ir)

Received: 27 November 2020, Accepted: 30 March 2021  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Masonry check dams are one of the common structures which are used to regulate slope and control erosion in the fluvial channels. Due to the hydraulic head difference of water flows upstream and downstream of these structures, the flow has a lot of kinetic energy after passing through the structure that should be dissipated in the settling basin and before entering the river in downstream. Experience has shown that this phenomenon can make continuously erode the sediment in downstream of structure and can be lead to structure's fail. One of the methods to control scour of downstream of the structures is using the stilling basin. The stilling basin is usually designed in such a way that the hydraulic jump is completely formed inside the stilling basin. However, due to the high energy of jet passing over the crest of check dam, scouring may still occur downstream. There are two rows of pipes which can be used during low flow condition in order of connectivity of upstream and downstream flow in rivers. During high flow condition the flow passes from the series of pipes and over the crest of check dam structures. Due to the fact that flow over the crest can interact with flow through pipes during high flow condition, the flow pattern is complex and causes the scouring downstream of stilling basin.

**Methodology:** A physical hydraulic model of Tul Beneh with scale of 1:20 was used for simulating of scouring during different hydraulic conditions. The check dam height in prototype is 6 m and the check dam width is 20m. There are two rows of pipes with diameter of 0.6 m inside the body of checkdam structure. The experiments were conducted in a recirculating channel flume 9 m length, 1m width and 1m height. The sediment samples were taken from surface and subsurface of the river bed and size distribution of sediment was obtained with sieve analysis. The experiments were design in such condition that the flow can passes the series of pipes installed in two rows and over the weir structure. The water surface profile and scouring pattern were measured by 3D bed profiler instrument. The experimental results were also compare with different empirical formulas such as Borman and Julien (1991), Scurlock et al. et al. (2012), Fahlbusch(1994), Catakli et al et al. (1973), Novak(1961), Farhoudi and Smith (1982, 1985) and Dargahi (2003).

**Results and discussion:** For assessing the time of experiments, a test was conducted for 48 hours and the temporal evolution was measured. The results showed that 75 and 94 percent

of maximum scour depth was occurred during 1 and 8 hours from the starting of experiments, respectively. Comparison of results with available empirical formulas showed that the Farhoudi and Smith (1985,1982) and Dargahi (2003) give reasonable results. The results also showed that the maximum scour depth occurred when the flow pass over the check dam structure. The comparison of results showed that when the flow pass only through the pipes, the hydraulic jump formed in stilling basin. The sedimentation upstream of check dam causes the pipes filled with sediment, so the flow passes over the check dam and cause major scouring downstream of stilling basin. The results showed that there is sedimentation bar downstream of scouring region which can extend more when the flow passes both through the pipes and over the crest of check dam structure.

**Conclusion:** Complex flow pattern was observed when the flow passes through the pipes and over the crest of check dam structure. The scouring pattern showed that the scouring expanded both vertically and laterally when the flow pass over the crest of check dam. The ratio of maximum scour depth to downstream flow depth is 2.2 when the flow passes through the pipes and crest of check dam. This ratio is 0.66 when the flow only passed through the pipes. The maximum scour depth in prototype was 0.86 m which is 66 percent of downstream flow depth in river and shows that the flow passes through the pipes during the operation of check dam structure due to sand mining upstream of check dam structure.

**Keywords:** Scouring, River bed material, Masonry check dam, Ziarat river, Physical Model.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the  
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# برآورد بیشینه عمق آبستگي در پایاب حوضچه آرامش (مطالعه موردی: بند سنگی - ملاتی حوزه آبخیز زیارت گرگان)

محمدعلی صلبی<sup>۱</sup>، امیر احمد دهقانی<sup>۲\*</sup>، مهدی مفتاح هلقی<sup>۳</sup>، عبدالرضا ظهیری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۲- دانشیار مهندسی عمران آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۳- دانشیار سازه های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

\* a.dehghani@gau.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۰، وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** بندهای سنگی ملاتی سازه‌هایی هستند که برای تنظیم شیب و مهار فرسایش آبراه‌ها به کار گرفته می‌شوند. جریان آب پس از عبور از روی این سازه‌ها، دارای انرژی جنبشی زیادی است که بایستی در پایین دست حوضچه آرامش آن مستهلک شود. با این وجود ممکن است باز هم آبستگي در پایین دست سازه ایجاد شود. در این تحقیق برای برآورد بیشینه عمق آبستگي در پایین دست سازه سنگی ملاتی زیارت با وجود ۲ ردیف لوله در بدنه بند برای عبور آب بالادست به پایین دست، مدل فیزیکی سازه در مقیاس ۱:۲۰ ساخته شد. به منظور شبیه سازی جریان در طول مدت عمر مفید این سازه‌ها، آزمایش‌ها برای حالتی که لوله‌ها به تنهایی جریان را به پایین دست منتقل کنند و حالتی که پس از تله‌اندازی رسوب‌ها و پر شدن لوله‌ها، جریان از روی سرریز عبور می‌کند، مورد شبیه سازی قرار گرفت. نتایج آزمایش زمان تعادلی ۴۸ ساعته نشان داد که ۹۴ درصد بیشینه عمق آبستگي در ۸ ساعت اولیه آزمایش (معادل سی و پنج ساعت و سی و هفت دقیقه در مقیاس واقعی) رخ داده است. همچنین بیشینه عمق آبستگي به اندازه ۱۳۰ میلی‌متر (معادل دو متر و شصت سانتی‌متر در مقیاس واقعی) در حالت انسداد لوله‌ها رخ می‌دهد. در این شرایط پرش هیدرولیکی به پایین دست حوضچه آرامش منتقل شده، عمق آبستگي افزایش یافته و در عرض کانال نیز گسترش می‌یابد. کم‌ترین عمق آبستگي نیز در حالتی که جریان آب از ردیف لوله‌های پایین عبور می‌کنند، رخ می‌دهد که در این شرایط، پرش هیدرولیکی درون حوضچه قرار می‌گیرد. همچنین نسبت عمق بیشینه آبستگي به عمق آب در پایاب سازه برای حالتی که جریان از روی سرریز و لوله‌ها همزمان عبور کند، حدود ۲/۲ و برای زمانی که تنها جریان از درون لوله‌ها به پایین دست منتقل شود، حدود ۰/۶۲ است.

**کلید واژگان:** آبستگي، مصالح رودخانه‌ای، بندسنگي ملاتی، رودخانه زیارت، مدل فیزیکی.

## ۱- مقدمه

طراحی و اجرا می‌شوند. در مورد نقش این سازه‌ها در مدیریت و کنترل فرسایش تحقیقاتی تا کنون صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. Sheng and Liao (1997) تأثیر احداث بندهای اصلاحی به همراه ایجاد پوشش گیاهی درختی در مهار فرسایش آبراه‌های پر شیب در جنوب چین را بررسی کردند. Zhou et al. (2004) با بررسی‌های صحرائی دریافتند که احداث مجموعه‌ای از بندهای اصلاحی در درون خندق‌ها یکی از مؤثرترین روش‌ها برای مهار فرسایش آن و کاهش رسوب حمل شده به پایین دست می‌باشد. (Piri Ardakani (2000) روی

بند سنگی و ملاتی با سنگ و ملات سیمان ساخته می‌شوند و جزء بندهای وزنی کوتاه بوده که عامل پایداری آن در برابر نیروهای محرک، وزن و شکل آن می‌باشد. البته وجود لوله در بدنه سرریز سد وجه تمایز این سازه با دیگر سدهای کوتاه است. این سازه با تغییر پذیری الگوی فرسایش و رسوبگذاری، اثرگذاری زیادی بر هندسه و ویژگی‌های ریخت شناسی رودخانه برجای می‌گذارد. تصویر شماره ۱ بند سنگی ملاتی تول بنه در حوزه آبخیز زیارت استان گلستان را نشان می‌دهد. این سازه‌ها اغلب در سرشاخه‌های بالادست حوزه‌های آبخیزداری

اغلب در بدنه سرریز بندهای سنگی ملاتی لوله‌هایی برای عبور جریان طراحی و اجرا می‌شوند که این لوله‌ها پیوستگی جریان بالادست و پایین دست را حتی در هنگام کم آبی حفظ می‌کنند. این لوله‌ها در آغاز دوران بهره‌برداری جریان آب بالادست را از خود عبور داده و به‌صورت جت، جریان آب را به درون حوضچه هدایت می‌کنند. با زیاد شدن جریان بالادست، غیر از لوله‌ها سرریز این سازه‌ها نیز عمل کرده و یک جریان پیچیده شامل جت ناشی از لوله‌ها و جت عبوری از روی سرریز درون حوضچه ایجاد می‌شود که الگوی آبشستگی پایین دست این سازه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. مشاهده‌ها نشان داده است که با گذشت زمان و رسوبگذاری بالادست این سازه‌ها، لوله‌ها پر از رسوب شده و تنها سرریز، جریان بالادست را به پایین دست منتقل می‌کند. لذا در این تحقیق سعی می‌شود تا با مدلسازی فیزیکی سازه سنگی ملاتی تول بنه بر روی سرشاخه رودخانه زیارت الگوی آبشستگی در حالت‌های مختلف شامل عبور جریان تنها از درون لوله‌ها، عبور جریان از لوله‌ها و سرریز و عبور جریان تنها از روی سرریز الگوی آبشستگی پایین دست این سازه بررسی شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

رودخانه تول بنه از شاخه‌های رودخانه زیارت است که از کوه‌های بالاچال، تل انبار و سرلپه واقع در ۲۴ کیلومتری جنوب شهر گرگان سرچشمه می‌گیرد و در جنوب غربی روستای زیارت با رودخانه آبشار به هم پیوسته و به رودخانه زیارت می‌ریزد. رودخانه زیارت، از سرشاخه‌های رودخانه قره سو به شمار آمده و در جنوب شهرستان گرگان قرار دارد.

بند سنگی ملاتی تول بنه با مختصات جغرافیایی،  $x=272090$  و  $y=4062967$  در سه کیلومتری جنوب غربی روستای زیارت به طول ۲۰ متر، ارتفاع ۶ متر و طول حوضچه آرامش ۱۰/۵ متر قرار دارد. موقعیت بند سنگی ملاتی تول بنه در شکل ۲ نشان داده شده است. برای شناسایی شرایط آبشستگی پایین دست این سازه مدل فیزیکی این سازه در آزمایشگاه ساخته شده است. برای بررسی و شناخت عوارض یا ناهمواری رودخانه در پایین دست سازه سنگی ملاتی نقشه برداری از بستر پایین دست سازه انجام گرفته و آنگاه نمونه گیری لازم از رسوب‌های رودخانه انجام گرفت. عکس شماره ۳ نقشه برداری در پایین دست بند سنگی ملاتی تول بنه را نشان می‌دهد.



Fig. 1 Masonry check dam (Tul Bene)  
شکل ۱ تصویر بندسنگی ملاتی تول بنه

بهینه‌سازی فاصله و ابعاد بندهای اصلاحی تحقیق کرده و رابطه‌هایی را برای محاسبه شیب حد بر مبنای ویژگی‌های مصالح بستر و شیب آبراهه معرفی کرده است. (Sanei et al., 2005) مزایا و معایب سدهای تأخیری و رسوبگیر و علل آن را بررسی کرده‌اند. (Nazemi et al., 2015) تاثیر احداث سازه‌های سنگی ملاتی بر روی رودخانه رامیان را بر تشدید یا کاهش سیل بررسی کردند.

با توجه به اینکه به طور معمول جریان آب پس از عبور از روی این سازه‌ها دارای انرژی زیادی می‌باشد، در پایین دست حوضچه آرامش این سازه‌ها آبشستگی زیادی رخ می‌دهد و در بسیاری از موارد منجر به تخریب کل سازه می‌شود. از این رو بررسی آبشستگی پایین دست این سازه‌ها دارای اهمیت زیادی است.

(Farhodi et al., 1985) بررسی‌هایی روی آبشستگی ناشی از جریان خروجی از یک حوضچه آرامش پایین دست یک سرریز انجام دادند و رابطه‌هایی برای برآورد عمق آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش ارائه کردند. (Scurlock et al., 2012) آبشستگی پایین دست سازه‌های کنترل تراز بستر را بررسی و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌هایی را برای برآورد بیشینه عمق آبشستگی ارائه کردند.

(Shafaei Bajestan and Omid, 2015) در تحقیقی میزان آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش در شرایط تشکیل پرش هیدرولیکی نوع B را بررسی کردند.

(Novak, 1955, 1965) در نتایج بررسی خود بیان کرد که با استفاده از یک حوضچه آرامش با طول کافی که پرش هیدرولیکی را در برگیرد، عمق آبشستگی نسبت به حالت بدون استفاده از حوضچه آرامش حدود ۴۵ تا ۶۵ درصد کاهش می‌یابد.

که در آن ها  $\lambda_D, u_*', v$  به ترتیب، مقیاس قائم، سرعت برشی و لزوجت سینماتیکی هستند. همچنین برای برقراری قسمت دوم شرط متلاطم بودن جریان رابطه شماره (۲) ارائه شده است.

$$\lambda_L = \lambda_D > \left( 175 \frac{v'}{q'} X'_3 \ln 11 * (X'_3) \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

در آن ها  $\lambda_D, \lambda_L, X'_3$  به ترتیب مقیاس قائم، افقی و نسبت عمق آب به قطر ذره هستند. بنابراین با توجه به انجام مرحله های انجام شده بالا مقیاسی که انتخاب می شود باید بزرگتر از 28/7 باشد. با توجه به شرایط آزمایشگاه مقیاس انتخاب شده 1/20 است که بزرگتر از این مقیاس است و نشان می دهد که شرط بالا برقرار است. همچنین با توجه به امکانات آزمایشگاه میزان دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه انتخاب شد که نزدیک به دبی با دور بازگشت ۲۵ ساله (۴۵ متر مکعب در ثانیه) در سازه اصلی بوده است.

برای این منظور یک آبراهه بتنی به طول ۹ متر، عرض و ارتفاع یک متر ساخته شد. همچنین در جداره آبراهه برای مشاهده آبشستگی از یک شیشه سکوریت به قطر ۱۰ میلی متر استفاده شد. مصالح کف بستر کانال نیز مانند شرایط مدل با مقیاس انتخاب شده است.

در کنار آبراهه اصلی از یک مخزن فرعی برای ذخیره و انتقال آب استفاده شد. آب توسط پمپ از مخزن ذخیره به مخزن آرام کننده ابتدای آبراهه وارد می شد. پیش از ورود آب به مخزن آرام کننده، برای اندازه گیری جریان از یک کنتور حجمی استفاده شده

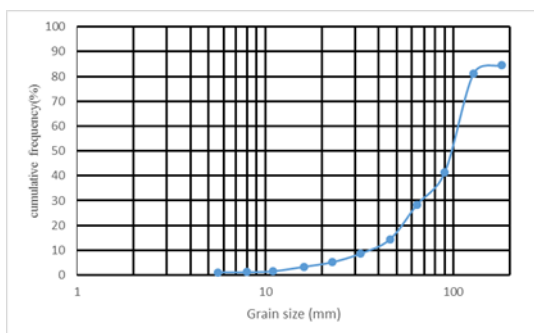


Fig.4 Size distribution of bed material (Downstream of check dam)

شکل ۴ نمودار دانه بندی مصالح موجود در پایین دست سازه

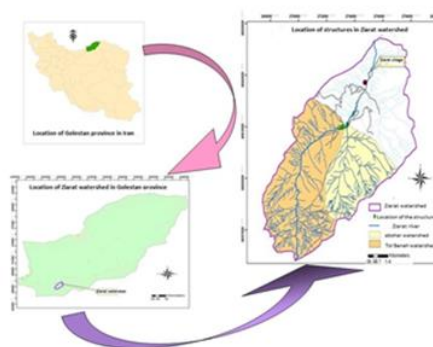


Fig. 2 Location of masonry check dam (Tule Bene)

شکل ۲ موقعیت بندسنگی ملاتی تول بنه



Fig. 3 Mapping downstream of Masonry check dam

شکل ۳ نقشه برداری در پایین دست بند سنگی ملاتی تول بنه

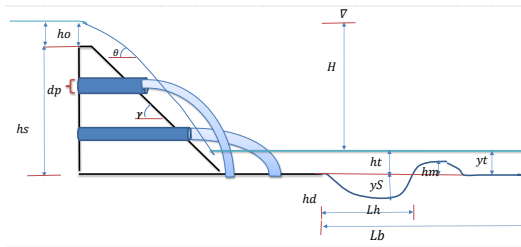
رسوب های سطح بستر به روش شمارشی<sup>۱</sup> نمونه گیری شده و رسوب های زیر سطحی با روش حجمی برداشت شده است. پس از برداشت مصالح، دانه بندی مصالح بستر توسط روش دانه بندی الک انجام گرفت. برای این که در مدل سازی بستر ارتباط بیشتری بین مدل و نمونه اصلی برقرار باشد، پس از رسم نمودار دانه بندی، ضریب یکنواختی و ضریب خمیدگی نیز محاسبه شد. نمودار دانه بندی مصالح موجود در پایین دست و بالادست در شکل نمودار شماره ۴ و ۵ آمده است.

سپس مبانی شبیه سازی فیزیکی بستر متحرک انجام شد. Yalin (1971) برای شبیه سازی آبشستگی اطراف سازه ها رابطه شماره ۱ را پیشنهاد داده است. در این رابطه جریان باید آشفته و زبر بوده و مصالح نیز شن یا ماسه باشند. شرط جریان زبر آشفته در رابطه (۱) ارایه شده است:

$$\lambda_D > \left( \frac{70}{\frac{u_*' D_{50}}{v}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

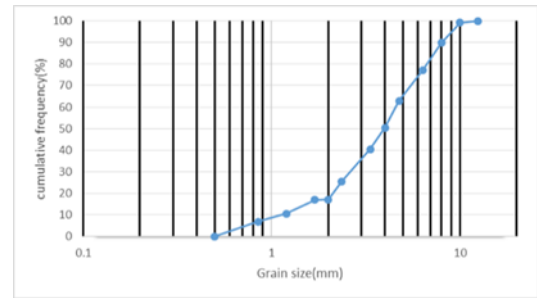
<sup>1</sup> Pebble Count





**Fig. 6** Geometric characteristics of flow and scour pattern

شکل ۶ ویژگی‌های هندسی جریان آب و الگوی آبشستگی



**Fig. 5** Size distribution of bed material in the model

شکل ۵ نمودار دانه بندی مصالح بستر در مدل

جدول ۱ ابعاد سازه اصلی و سازه مدل

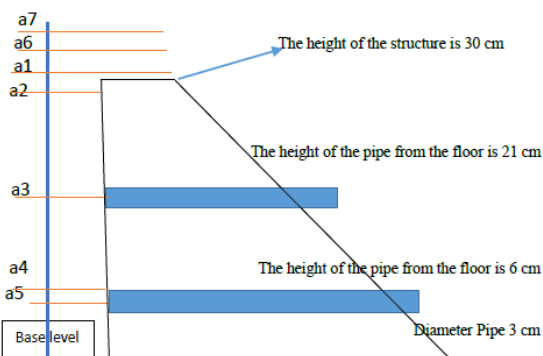
**Table 1** Dimensions of the prototype and model structure

DIMENSIONS OF MODEL (CM)	DIMENSIONS OF PROTOTYPE (M)	STRUCTURAL PART	Row
100	20	Check dam weir length	1
52.5	10.5	Stiling basin length	2
30	6	Check dam height	3
3	0.6	DIAMETER OF PIPES	4



**Fig. 7** Installed model in channel

شکل ۷ مدل سازه نصب شده در آبراهه



**Fig. 8** Schematic of cross section of check dam structure

شکل ۸ نمایی از مقطع عرضی بند سنگی ملاتی

است. جدول شماره ۱ ابعاد سازه اصلی و مدل را نشان می‌دهد. همچنین شکل شماره ۷ مدل سازه ساخته شده در آبراهه را نشان می‌دهد.

در جدول شماره ۲ مراحل مختلف فرآیند انجام آزمایش‌ها در هفت مرحله به وسیله مدل شبیه سازی شده را نشان می‌دهد. این آزمایش‌ها به ترتیب در مرحله اول شناسایی آبشستگی در دراز مدت و به دست آوردن بستر تعادلی آبشستگی در طول ۴۸ ساعت با دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه انجام گرفته است. با توجه به این که پس از ۸ ساعت نزدیک به ۹۴ درصد آبشستگی انجام شده، دیگر آزمایش‌ها با مدت زمان ۸ ساعت انجام شد. لازم به یادآوری است ضخامت رسوب در پایین دست سازه ۰/۲ متر بوده و آزمایش‌ها برای جریان آب صاف انجام شده است.

### ۳-۱- تحلیل ابعادی

پارامترهای متعددی بر روی آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش موثر می‌باشند. هندسه حفره آبشستگی را می‌توان تابع عامل‌های زیر دانست:

$$F(q, H, y_t, \rho, s_g, g, \rho_s, \mu, v, D_s, y_s, h_d, d_p, n_p) = 0 \quad (3)$$

که در آن  $D_s$  اندازه ذرات رسوبی بستر بر حسب متر،  $g$  شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه،  $\rho_s$  چگالی ویژه ذرات بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $\rho$  چگالی ویژه سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $\mu$  لزوجت دینامیکی سیال بر حسب پاسکال ثانیه،  $y_t$  عمق جریان در پایاب حوضچه آرامش بر حسب متر،  $v$  سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه،  $q$  دبی جریان در واحد عرض،  $H$  اختلاف تراز آب بالادست و پایین دست،  $h_d$  بار آبی بالادست،  $S_g$  چگالی ویژه مواد،  $y_s$  عمق آبشویی از کف بستر اولیه،  $d_p$  قطر لوله و  $n_p$  شمار لوله است.

رابطه‌های موجود در جدول شماره ۳ با توجه به شرایط کاربرد آن‌ها و پارامترهای موثر بر آن ارایه شده است.

جدول ۲ مشخصات آزمایش‌ها

Table 2 Experiments characteristics

Upstream water level (cm)	Flow conditions	legend
347	Flow passes through all pipes and over the weir	a1
295	Flow passes through all pipes (No flow over weir)	a2
225	The bottom series of pipe pressurised and the upper pipes pass the flow with half capacity	a3
90	The bottom series of pipe pressurised	a4
75	The bottom series of pipes pass the flow with half capacity	a5
353	The lower pipes closed and flow pass through the upper pipes and weir	a6
360	The bottom and top pipes are closed and water only passes over the weir	a7

#### ۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی تغییرات زمانی بیشینه عمق آبشستگی برای به‌دست آوردن زمان تعادل آبشستگی، در آغاز یک آزمایش به مدت ۴۸ ساعت انجام گرفت. تغییرات زمانی بیشینه عمق آبشستگی در نمودار شماره ۹ نشان داده شده است. این نمودار مقدار آبشستگی در هشت ساعت اول را که نزدیک به عدد ۹۴ درصد آبشستگی بیشینه رسیده است را نشان می‌دهد که در آن سرعت فرآیند فرسایش پذیری و تشکیل حفره در ابتدای آغاز آزمایش‌ها بسیار زیاد بوده است. به طوری که در ۱۰ دقیقه نخست، ۵۶ درصد عمق آبشستگی بیشینه و در یک ساعت اول این عدد به ۷۵ درصد می‌رسید که با گذشت زمان از میزان آن کاسته می‌شود. اگرچه بیشینه عمق آبشستگی در شانزده ساعت رخ می‌دهد، اما با توجه به میزان بالای آبشستگی (۹۴ درصد) در هشت ساعت اول، مدت زمان آزمایش‌های بعدی در هفت مرحله (a1) الی (a7) هشت ساعت در نظر گرفته شد. لازم به یادآوری است شرایط آزمایش ۴۸ ساعته تعادلی همانند آزمایش (a1) بوده و تفاوت آن تنها در مدت زمان می‌باشد.

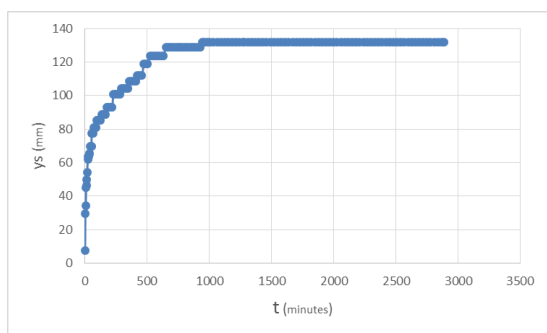


Fig. 9 Temporal evolution of scour (48 hours)

شکل ۹ تغییرات زمانی عمق آبشستگی (۴۸ ساعته)

آزمایش انجام شده در این تحقیق با روابط Shocklitz (1932)، Borman and Julien (1991)، Scurlock et al. (1991)، Fahlbusch (1994)، Catakli et al. (1973)، Novak (1961، 1955)، Farhodi and Smith (1982، 1985) و Dargahi (2003) مقایسه شدند. از بین رابطه‌ها، رابطه Dargahi (2003) و Farhodi and Smith (1985، 1982) و

با توجه به روش تحلیل ابعادی پی باکینگهام با توجه به این که تعداد پارامترها ۱۴ عدد هستند، پس ۱۱ عدد بی بعد به صورت رابطه شماره (۴) ارایه می‌شود. این رابطه‌ها با در نظر گرفتن مجموعه پارامترهای موثر بر پدیده آبشستگی در پایین دست حوضچه آرامش بوده است.

$$f\left(n_p, \frac{\rho_s}{\rho}, R_e, fr^2, \frac{h_d}{Y_t}, \frac{y_s}{Y_t}, \frac{d_p}{Y_t}, S_g, \frac{D_s}{Y_t}, \frac{H}{Y_t}, \frac{Q}{V_{y/2}}\right) = 0 \quad (4)$$

به دلیل آشفته بودن جریان از عدد رینولدز صرف نظر می‌شود و به علت ثابت بودن نوع مواد بستر  $S_g$  و  $\frac{\rho_s}{\rho}$  از معادله حذف می‌شود. همچنین با توجه به تاثیر مشابه سرعت و دبی یکی از آنها انتخاب می‌شود. با توجه به ثابت بودن قطر لوله  $dp$  نیز از معادله حذف می‌شود و با توجه به تاثیر مشابه  $h_d$  و  $H$  یکی از این دو انتخاب می‌شود. بنابراین رابطه (۴) را می‌توان به صورت رابطه شماره (۵) نوشت:

$$\frac{y_s}{Y_t} = f\left(fr^2, n_p, \frac{D_s}{Y_t}, \frac{H}{Y_t}\right) = 0 \quad (5)$$

#### ۳-۲- رابطه‌های تجربی در رابطه با آبشستگی پایاب

##### حوضچه‌های آرامش

بررسی‌ها نشان می‌دهد روابط تجربی مختلفی در رابطه با محاسبه آبشستگی پایاب حوضچه‌های آرامش وجود دارد.

بسته باشند و آب از سرریز عبور می کند و یا هنگامی که یکی از لوله ها بسته است و جریان آب از سرریز به همراه لوله پایین خارج می شود، بیشترین تغییرات نسبت بیشینه عمق آبستگي به عمق آب رخ می دهد و در شرایطی که سرریز بدون آب بوده و آب از لوله های بالایی به صورت نیمه پر خارج می شود، این تغییرات به کمترین حد خود می رسد. نتایج نمودار نشان می دهد میانگین نسبت بیشینه عمق آبستگي به عمق آب در صورتی که جریان آب از روی سرریز عبور نکند، ۰/۶۲ می شود و در صورتی که جریان آب از روی سرریز عبور کند ۲/۲ خواهد بود. لازم به یادآوری است در بازدید های متوالی انجام شده از بند سنگی ملاتی مشاهده شده است که به علت برداشت مصالح دائمی از پشت بند و همچنین بیشینه دبی سیلاب به رخداد پیوسته (در حد دبی ۲۵ ساله) تاکنون آب از روی سرریز عبور نکرده است. اندازه گیری میزان بیشینه عمق آبستگي پایین دست سازه (۸۶ سانتی متر) نشان می دهد که نسبت بیشینه عمق آبستگي به عمق جریان در پایاب ۰/۶۲ می باشد

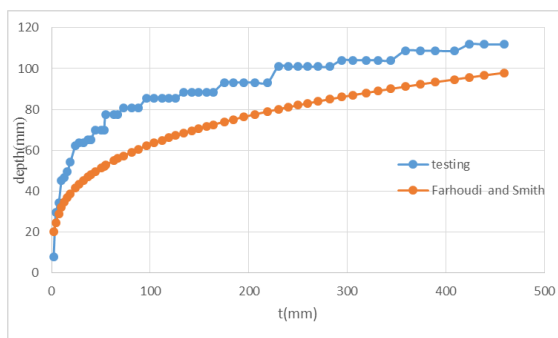


Fig. 10 Temporal evolution of scour depth (experimental results and Farhoudi and Smith (1985,1982) formula)

شکل ۱۰ مقایسه آزمایش انجام شده با روش فرهودی و اسمیت (۱۹۸۲ و ۱۹۸۵)

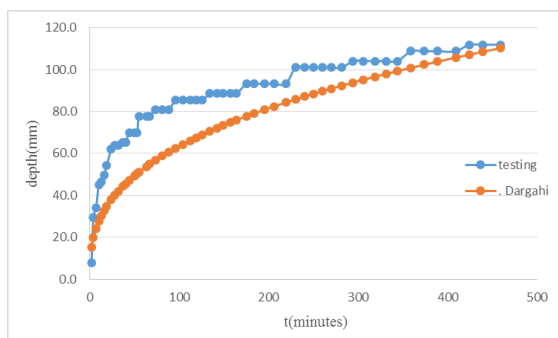


Fig. 11 Temporal evolution of scour depth (experimental results and Dargahi(2003) formula)

شکل ۱۱ مقایسه آزمایش انجام شده با روش درگاهی (۲۰۰۳)

بیشترین نزدیکی را به نتایج آزمایش های این تحقیق داشتند. جدول شماره ۳ مقایسه آزمایش های انجام شده در شرایط (a1) را در مقایسه با رابطه های تجربی موجود را نشان می دهد. در نمودارهای شماره ۱۰ و ۱۱ مقایسه نتایج به دست آمده در آزمایشگاه با نتایج به دست آمده از رابطه های Farhoudi and Smith (1982, 1985) و Dargahi (2003) نشان داده شده است. همان طور که این نتایج نشان می دهند، بین تغییرات زمانی عمق آبستگي و نتایج به دست آمده از رابطه (Dargahi (2003 همخوانی بیشتری دیده می شود.

جدول ۳ مقایسه میزان بیشینه آبستگي در آزمایش حاضر با رابطه های تجربی

Table 3 Comparison of maximum scour depth from empirical formulas and experimental results.

scour depth difference (mm)	Maximum scour in the experiment (mm)	Maximum scour for empirical formula (mm)	empirical formula	Row
-48	112	160	Borman and Julien. (1991)	1
54	112	58	Scurlock et al. (1991)	2
-68	112	180	Fahlbusch (1994)	3
62	112	50	Catakli et al. (1973)	4
69	112	43	Novak (1955, 1961)	5
-18	112	130	Farhoudi and Smith (1982, 1985)	6
2	112	110	Dargahi (2003)	7

#### ۴-۲- بررسی بیشینه عمق آبستگي در شرایط مختلف آزمایش

در نمودار شکل ۱۲ تغییرات نسبت بیشینه عمق آبستگي  $Y_s$  به عمق آب پایاب  $Y_t$  در شرایط مختلف آزمایش نشان داده شده است. همان طور که نتایج نشان می دهد، با افزایش دبی و ارتفاع آب پشت سازه، بیشینه عمق آبستگي نیز بیشتر می شود. آزمایشات همچنین نشان می دهد هنگامی که لوله ها به کلی



جدول ۴ رابطه‌های محاسبه آبخستگی پایاب حوضچه آرامش

Table. 4 Relationships for calculating the scour of the stilling basin

محقق	رابطه	پارامترها	شرایط یا محدوده کار برد
Shocklitz (1932)	$y_s + h_t = C_s q^{0.57} H^{0.2} / d_{90}^{0.32}$	$C_s, d_{90}, h_t, q, H, y_s$	آزمایش‌ها در یک آبراهه آزمایشگاهی بزرگ با عرض ۴/۸۸ متر، دبی جریان ۱/۱۳۳-۰/۱۸۴ مترمکعب بر ثانیه، عمق جریان ۰/۱۳۸-۰/۳۹۰ متر، قطر میانه ( $d_{50}$ ) ذرات رسوب بستر برابر ۵، ۹/۸ و ۱۵ میلی متر، شیب طولی ۰/۰۰۲۱، ۰/۰۰۳۳ و ۰/۰۰۴۷، بیشینه عمق آبخستگی ۰/۱۰-۰/۵۴ متر انجام شده است.
Novak (1955, 1961)	$y_s = 0.55 \left[ 6H^{0.25} q^{0.5} \left( \frac{y_t}{d_{90}} \right)^c - y_t \right]$	$d_{90}, y_t, q, H, y_s$	آزمایش‌های آبخستگی در پایین‌دست سرریز، همراه با عبور بار بستر بوده است.
Catakli et al. (1973)	$y_s = 1.6H_1^{0.2} q^{0.6} d_{90}^{-0.1} - y_t$	$d_{90}, y_t, q, H, y_s$	آزمایش‌ها در شرایط وجود حوضچه آرامش در پایین-دست سرریز، محدود به پرش‌های هیدرولیکی در درون حوضچه آرامش هستند.
Farhodi and Smith (1982, 1985)	$\frac{y_s}{d_o} = \left( \frac{t}{t_1} \right)^{\gamma}$	$\gamma, t_1, t, d_o, y_s$	آزمایش‌ها در یک آبراهه آزمایشگاهی با عرض ۱۵ و ۵۰ سانتی‌متر، دبی در واحد عرض ۱۳۲-۲۳ لیتر بر ثانیه بر متر، عمق جریان ۳/۵ متر، ارتفاع سرریز برابر ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر، بار آبی موثر ۱۰، ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر، قطر میانه ( $d_{50}$ ) ذرات رسوب بستر ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۵۲ و ۰/۸۵ میلی‌متر و در هر دو حالت پرش آزاد و مستغرق انجام شده است.
Borman and Julien (1991)	$y_s + D_p = \frac{K_b q^{0.6} u_1 \sin \theta}{(2\Delta g)^{0.8} d_{90}^{0.4}}$	$\theta, \Delta, k_b, y_s, u_1, g, D_p$	آزمایش‌ها در یک آبراهه آزمایشگاهی بزرگ با دبی در واحد عرض ۰/۳-۲/۵ مترمربع بر ثانیه، بیشینه دبی ۲/۷ مترمکعب بر ثانیه، عمق جریان ۳/۵ متر، عرض ۰/۹۱ متر، قطر میانه ( $d_{50}$ ) ذرات رسوب بستر ۰/۳ و ۰/۴۵ میلی‌متر، $d_{90}$ برابر ۱/۵۸ و ۱/۷۴ میلی‌متر انجام شده است.
Fahlbusch (1994)	$y_s + h_t = C_{2V} \sqrt{q u_1 \sin \theta} / g$	$C_{2V}, \lambda, \theta, u_1, g, q, h_t, y_s$	از داده‌های آزمایشگاهی و واقعی در هر دو حالت پرش آزاد و مستغرق استفاده شده است.
Dargahi (2003)	$\frac{y_{st}}{y_s} = A \left[ \frac{t}{t_s} \right]^n$	$t_s, t, y_s, y_{st}$	که در آن $t_s, t, y_s, y_{st}$ به ترتیب عمق آبخستگی در زمان، عمق آبخستگی، زمان و زمان مربوط به بیشینه عمق آبخستگی هستند.

طول آبستگي بیشتری می‌شود. با مقایسه نيمرخ ها همچنين مشخص شد که هر چه دبي کمتر باشد، عمق حفره ( $y_s$ ) طول حفره ( $L_h$ ) کاهش یافته و ارتفاع پشته ( $h_m$ ) افزایش می‌یابد. الگوی جریان آب نشان می‌دهد در صورتی که آب به تنهایی از لوله ها عبور کند و سرریز بدون جریان آب باشد پرش هیدروليکی داخل حوضچه قرار می‌گیرد و ناهمواری و عوارض بستر نیز از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند و تنها در ساحل چپ و راست میزان جزئی فرسایش دیده می‌شود. در صورتی که اگر آب هم از لوله ها و هم از سرریز عبور کند افزون بر این که عمق آبستگي افزایش می‌یابد آبستگي در عرض آبراهه نیز گسترش می‌یابد. همچنین رسوبگذاری ایجاد شده تا نزدیکی انتهای آبراهه گسترش می‌یابد.

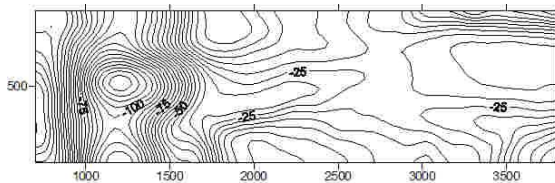


Fig. 14 Scour pattern downstream of stilling basin ( $a_1$  test)

شکل ۱۴ الگوی آبستگي پایین دست حوضچه برای آزمایش  $a_1$  (جریان از چپ به راست)

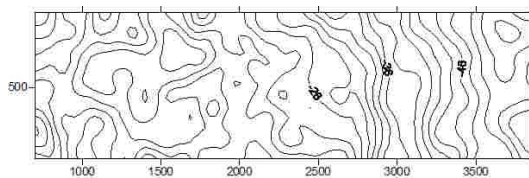


Fig. 15 Scour pattern downstream of stilling basin ( $a_2$  test)

شکل ۱۵ الگوی آبستگي پایین دست حوضچه برای آزمایش  $a_2$  (جریان از چپ به راست)

## ۵- نتیجه‌گیری

نتایج بررسی بیشینه عمق آبستگي ایجاد شده در پایاب بند سنگی ملاتی زیارت در هفت حالت نشان می‌دهد بیشترین آبستگي هنگامی رخ می‌دهد که همه لوله ها بسته بوده و آب تنها از طریق سرریز خارج می‌شود. همچنین در شرایطی که خروجی آب تنها از طریق لوله‌های پایین صورت می‌گیرد فرسایش کمتر می‌باشد.

بررسی میزان آبستگي در طول زمان نیز نشان می‌دهد سرعت فرآیند فرسایش پذیری و تشکیل حفره در آغاز آزمایش‌ها بسیار

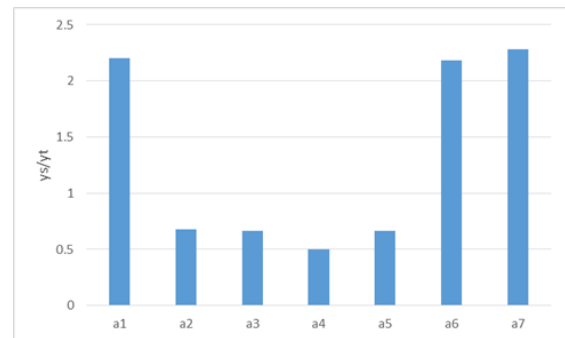


Fig. 12 Variation of ( $y_s/y_t$ ) for various experiments

شکل ۱۲ تغییرات نسبت ( $y_s/y_t$ ) در آزمایش‌های مختلف.

که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد.

## ۴-۳- بررسی تاثیر عدد فرود جریان پایین دست بر

### میزان آبستگي در پایاب سازه

شکل ۱۳، تغییرات  $y_s/y_t$  بر حسب عدد فرود پایین دست را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد، هرچه عدد فرود جریان بیشتر باشد میزان  $y_s/y_t$  نیز بیشتر است. بنابراین با افزایش عدد فرود که اغلب با کاهش عمق آب روی حفره آبستگي نیز همراه است، بیشینه عمق آبستگي نیز افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد افزایش سرعت آب و همچنین جت‌های خروجی از سازه در این پدیده موثر است.

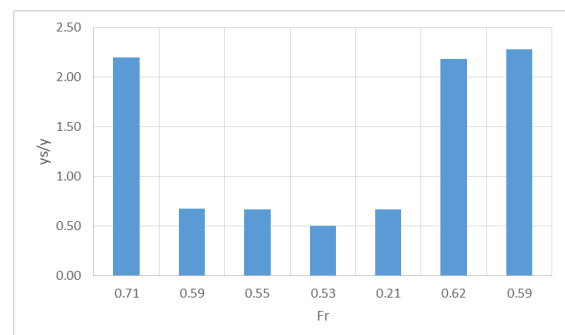


Fig. 12 Variation of ( $y_s/y_t$ ) for different Fr number

شکل ۱۳ تغییرات نسبت ( $y_s/y_t$ ) در مقایسه با عدد Fr در آزمایش‌های مختلف.

## ۴-۴- تغییرات ناهمواری و عوارض بستر در پایاب

### سازه

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ الگوی آبستگي در دو آزمایش  $a_1$  و  $a_2$  را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، افزایش دبي و ارتفاع آب پشت سازه باعث ایجاد بیشینه عمق و

$d_o$	طول مشخصه (m) ( $0.5 h_s$ )	زیاد بوده و با گذشت زمان از میزان آن کاسته می‌شود و حفره
$L_h$	طول حفره آبشستگی (m)	آبشستگی به حالت پایدار می‌رسد.
$L_b$	طول کل آبشستگی (m)	بررسی نوع آبشستگی انجام شده در این آزمایش و مقایسه آن
$t_s$	بیشینه عمق آبشستگی در زمان (s)	با رابطه های مختلف نشان می‌دهد که میزان بیشینه عمق
$n$	تابعی لگاریتمی	آبشستگی به نتایج تحقیق (Farhoudi and Smith (1985, 1982) و
$d_p$	قطر لوله	Dargahi (2003) (در شرایط آزمایش $a_1$ ) نزدیک است و
$n_p$	شمار لوله	تفاوت‌هایی اگر وجود دارد در نتیجه وجود لوله در روی سرریز
$k_b$	ضریب	این سازه می‌باشد که افزون بر تقسیم جریان آب وجود لوله
$\Delta$	چگالی نسبی ( $kg/m^3$ )	موجب تغییر در روند آبشستگی جریان می‌شود.
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )	نتایج همچنین نشان می‌دهد میانگین نسبت بیشینه عمق
$\mu$	لزوجت پویایی ( $kg/ms$ )	آبشستگی به عمق آب در صورتی که جریان آب از روی سرریز
$\nu$	لزوجت جنبشی ( $kg/ms$ )	عبور نکند، $0.62$ می‌شود و در صورتی که جریان آب از روی
$\lambda$	زاویه شیب ( $^\circ$ )	سرریز عبور کند $2/2$ است.
$\theta$	زاویه جت ( $^\circ$ )	مقایسه نسب بی بعد $y_s / y_t$ در مقابل نسبت بی بعد عدد فرود
$\lambda_L$	مقیاس افقی	نشان می‌دهد، با افزایش عدد فرود عمق آبشستگی نیز افزایش
$\lambda_D$	مقیاس قائم	می‌یابد. به طور مثال در عدد فرود $0.71$ در آزمایش اول ( $a_1$ ) این
		نسبت به $2/2$ و در عدد فرود $0.21$ مربوط به آزمایش پنجم ( $a_5$ )
		این نسبت به $0.67$ می‌رسد.

#### ۷- منبع‌ها

Bormann, N.E. and Julien, P.Y. (1991). Scour down stream of gradecontrol structures. J.Hydraulic. Eng., 117(5), 579- 594.

Catakli, O., Ozal, K. and Tandogan, A. (1973). A study of Scour at the end of stilling basin and use of horizontal sills as energy dissipators. 11th Congress of Large Dams, Madrid.

Chakherloo, M., Tavakoli, A., Hosseini Mobra, S.A. and Rezaei, H. (2012). Three-dimensional study of the effect of different discharges on the sedimentation of downstream sediments of the sharp edge, 11th Iranian Hydraulic Conference, Urmia. (in Persian).

Dargahi, B. (2003). Scour development downstream of a spillway, J. Hydraulic Research, 41(4), 417-426.

Fahlbusch, F.E. (1994). Scour in Rock Riverbeds Downstream of Large Dams. J. Hydropower and Dams, 1(4), 30-32.

Farhoudi, J. and Smith, K. (1985). Local scour profiles downstream of hydraulic jump. J. Hydraulic Research, 23(4), 343-359.

Farhoudi, J. and Smith, K.V.H. (1982). Time scale for scour downstream of hydraulic jump. J. Hydraulic Eng., 108(10), 1147-1161.

#### ۶- فهرست نشانه‌ها

$q$	دبی در واحد عرض ( $m^2/s$ )
Fr	عدد فرود
$v$	سرعت میانگین (m/s)
$u$	سرعت جت (m/s)
$u'_*$	سرعت برشی
$S_g$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$g$	شتاب ثقل (m/s)
$H$	اختلاف آب در بالادست و پایین دست (m)
$y_s$	عمق آبشستگی (m)
$h_t$	ارتفاع آب بالای حفره آبشستگی (m)
$y_t$	عمق پایاب (m)
$y_{s,t}$	عمق آبشستگی در زمان (m)
$h_o$	عمق آب روی سرریز (m)
$h_s$	ارتفاع سرریز (m)
$h_m$	ارتفاع تلماسه (m)
$D_s$	قطر مصالح (m)
$d_{90}$	قطری است که $90\%$ ذرات از آن ریزتر است (m)
$d_{50}$	قطری است که $50\%$ ذرات از آن ریزتر است (m)

Iranian Management and Planning Organization. (2006). Guide to Field Operations Sample on Sedimentation of Rivers and Reservoirs of Dams. No. 349, 67 p.

Haffmans, G.J.C.M. and Pilarczyk, K.W. (1995). Local scour downstream of hydraulic structures. *J. Hydraulic Eng.* 121(4), 326-340.

Hoffmans, G.J.C.M. and Verheij, H.J. (1997) Scour manual. CRC Press, 224 p.

Hosseini, M. and Abrisamchi, J. (1994). Open Channel Hydraulics. Astan Quds Razavi. Mashhad, 665p. (in Persian).

Nazari, A. and Heidari, M. (2011). Threshold of uniform sediment movement, 8th Iran Hydraulic Conference, Tehran. (in Persian).

Novak, P. (1955). Study of stilling basins with special regard to their end sill. Proc. 6th IAHR Conference, The Hague.

Novak, P. (1961). Influence of bed load passage on scour and turbulence downstream of stilling basin, Proc. 19th IAHR Conference. Dubrovink.

Scurlock, S.M., Cristopher, L.T. and Steven, R.A. (2012). Equilibrium scour downstream of three-dimensional grade control structures. *J. Hydraul. Eng.*, 138(2), 167-176

Shafaei Bajestan, M. and Omid, P. (2015). Investigation of scour depth downstream of stilling basin for the case of B-Jump, *J. Irrigation Science and Engineering*, 38(4), 136-125. (in Persian).

Sheng, J-A. and Liao, A.-Z. (1997). Erosion control in south China, *J Catena*, 29(2), 211-221.

Yalin, M.S. (1971). *Theory of Hydraulic Models*. MacMillan, New York, 266 p.

Zhou, X.X., Hong-Wu, Z. and Ouyang, Z. (2004). Development of check-dam systems in gullies on the Loess Plateau, China. *Environmental Science & Policy*, 7(2), 79-86.