

## طراحی قطر سنگچین پایدار در پایاب حوضچه‌های آرامش با استفاده از عدد فرود جریان

جواد فرهودی<sup>۱</sup> و سید مرتضی سادات هلبر<sup>۲\*</sup>

تاریخ پذیرش: 87/6/26

1- گروه آبیاری، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آبیاری، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران

\*مسئول مکاتبه E-mail: [mortezasadat@yahoo.com](mailto:mortezasadat@yahoo.com)

### چکیده

از مهمترین عوامل تخریب حوضچه‌های آرامش، آب‌شستگی پایاب آنها است که سبب بروز مخاطراتی برای پایداری سازه و یا کاهش بهره‌وری سازه می‌شود. هدف از مطالعه حاضر ارائه رابطه‌ای برای تخمین قطر سنگچین پایدار در پایاب حوضچه آرامش در پایین دست دریچه‌هاست. در این تحقیق با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی پایداری هشت قطر مختلف سنگچین تحت شرایط متفاوت جریان مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس آنالیز ابعادی روابطی تجربی برای طراحی سنگچین پایدار در پایاب حوضچه‌های آرامش پایین دست دریچه‌ها ارائه شد. نتایج آزمایشات با روابط ارائه شده توسط سایر محققین از جمله پیترکا (۱۹۶۸)، پیلارزیخ (۱۹۹۰) و اسکارمیا و می (۱۹۹۲) مقایسه شد که نشان داد رابطه ارائه شده در این تحقیق از دقت مناسبی برخوردار است. رابطه ارائه شده در این تحقیق ضمن سادگی، کلیه عوامل موثر در ناپایداری سنگچین را در بر دارد و از اینرو برای طراحی سنگچین در پایاب حوضچه‌های آرامش توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: جهش هیدرولیکی، حوضچه آرامش، سرعت متوسط، عدد فرود، قطر سنگچین

## Design of Stable Riprap Downstream of Stilling Basins Using Froud Number

J Farhodi<sup>1</sup> and SM Sadast Helbar<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Irrigation, Faculty of Water and Soil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup>MSc Student, Dept. of Irrigation, Faculty of Water and Soil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\*Corresponding author: [E-mail: mortezasadat@yahoo.com](mailto:mortezasadat@yahoo.com)

### Abstract

Local Scour downstream of hydraulic structures is one of the most important factors that may either endanger the stability of the structure or decrease its efficiency. Therefore, estimating the geometry of scour hole and its evolution is one of the main questions which engineers are often faced in designing of hydraulic structure. The present paper is aimed to study the criteria for stable riprap downstream of stilling basins behind the sluice gates. An experimental study was therefore,

conducted and the stability of eight different sizes of riprap were studied under varying flow characteristics. The study was based on dimensional analysis whereby some empirical relationships were concluded and recommended as the design criteria for stable riprap downstream of stilling basins behind sluice gates. The experimental results were also assessed using the recommended methods by Peterka (1968), Pilarczyk, K.W, (1990) Scaramia and May (1992) which showed an acceptable agreement with some of these reports. The research was concluded by recommending a simple formula consisting the whole variables affecting the phenomenon of riprap instability.

**Keywords:** Average velocity, Froud number, Hydraulic jump, Stilling basin, Stone size

است.

مقدمه

محققین زیادی از جمله فرهودی و اسمیت (1982 و 1985)، نیک حسن و نارایانان (1985) آب‌شستگی در بستر رسوبی پایاب کف‌بند دریچه‌ها را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در مطالعات مربوط به استفاده از سنگچین برای مهار آب‌شستگی موضعی، روش‌های مختلف طراحی سنگچین (تعیین اندازه متوسط سنگ‌ها، ضخامت لایه سنگچین، عمق ونحوه استقرار آن)، پایداری لایه سنگچین بر روی بستر متحرک و اثر متغیرهای مختلف بر آن در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار می‌گیرد. معمولاً در تعیین معیار سنگچین، عملکرد آن در وضعیت یا شرایط نامناسب منظور می‌گردد تا بتوان نتایج حاصل را با درجه اعتماد بالا توصیه نمود. یکی از دلایل اختلاف نتایج حاصل از روابط و روش‌های گزارش شده توسط محققین مختلف، انتخاب معیارهای متفاوت تخریب سنگچین می‌باشد. برای مثال پوزی (1974) حرکت اولین دانه‌های سنگچین را به عنوان معیار تخریب در نظر گرفتند. پارولا (1993) در آزمایش‌های خود از سنگچین سه لایه‌ای، با لایه میانی رنگین، استفاده کرد. وی آستانه تخریب سنگچین را زمانی می‌داند که لایه رنگ‌آمیزی شده پس از 30 دقیقه بدون حرکت نمایان شود. چپو (1995) در تحقیقات خود با در نظر گرفتن مدت زمان 15 دقیقه برای مشاهده گسیختگی سنگچین در اطراف پایه پل، ناپایداری لایه سنگچین را به شرایط گسیختگی کامل

آب‌شستگی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی از مسائل عمده‌ای است که همواره مورد توجه مهندسين و طراحان بوده است. پیش بینی ابعاد توسعه این فرسایش و روشهای کنترل و کاهش آن یکی از مواردی است که در طراحی سازه‌های هیدرولیکی مورد توجه قرار می‌گیرد. دریچه‌ها یکی از کاربردی ترین سازه های آبی می‌باشند که برای تنظیم سطح آب، تخلیه رسوبات در بندهای انحرافی و تامین سطح مناسب آب در کانال‌های آبرسانی مورد بهره برداری قرار می‌گیرند. تشکیل جهش آبی در پایاب دریچه‌ها از پدیده‌های بارزی است که تلاطم شدید آن سبب افزایش تنش برشی در پایاب دریچه‌ها شده و باعث حمل شدید مواد بستر و آب‌شستگی موضعی در پایاب آنها می‌گردد و گاهی منجر به ایجاد گودال عمیق در پایاب سازه و تخریب حوضچه آرامش می‌گردد. بنابراین، شناخت مشخصات پدیده آب‌شستگی موضعی و لحاظ کردن آن در طراحی حوضچه‌های آرامش دریچه‌ها و به کارگیری روش‌ها و تجهیزات مناسب برای حفاظت بستر پایاب، ضروری است. استفاده از سنگچین با اندازه‌های درشت‌تر از اندازه مصالح بستر در محل آب‌شستگی یکی از روش‌های متداول برای کنترل توسعه چاله آب‌شستگی می‌باشد که از دیرباز مورد توجه مهندسين هیدرولیک بوده

نیم برابر قطر بزرگترین قطعه سنگچین باشد. همچنین، مطالعات مذکور نشان می‌دهد چنانچه 40 درصد از لایه سنگچین دارای دانه‌بندی مناسب و قطعات سنگی کوچکتر از آن باشد، لایه سنگچین پایدار خواهد بود. وی این تو صیه را نتیجه بهم پیوستن قطعات سنگی ریز و درشت و کاهش سرعت جریان در نزدیکی سطح خشن سنگچین می‌داند.

پیلارزینخ (1990) رابطه‌ای برای طراحی سنگچین، بلوک‌های بتنی متصل و گابیون‌های جعبه‌ای توصیه نموده است که مبتنی بر تأثیر تراز آشفته‌گی جریان، زاویه شیروانی، سرعت و عمق جریان، شیب بستر و مشخصات مصالح سنگچین می‌باشد.

مرکز تحقیقات والینگفورد بر اساس مطالعات اسکارامیا و می (1992)، رابطه‌ای را برای طراحی سنگچین و بلوک‌های بتنی پایین دست سازه‌های هیدرولیکی توصیه نموده است. در این رابطه قطر سنگچین به سرعت کف (سرعت در 10 درصد عمق جریان از کف)، ضریب آشفته‌گی و خصوصیات مصالح ارتباط داده شده است که برای تعیین سرعت کف نیز روابطی با سرعت میانگین در ترازهای مختلف آشفته‌گی ارائه شده است.

در روابط ارائه شده توسط محققان مختلف ذکر شده در بالا، در تعیین قطر سنگچین می‌بایست از جداول و گراف‌های متعددی استفاده نمود که برخی از جداول بصورت کیفی بوده و استفاده محاسباتی از آنها امکان نخواهد داشت. از اینرو ارائه فرمول ساده‌ای که از دقت مناسبی برخوردار باشد ضروری به نظر می‌رسد.

#### مواد و روش‌ها

آزمایشات در مرکز تحقیقات آب دانشکده آب و خاک دانشگاه تهران انجام شد. جهت انجام تحقیق از یک فلوم آزمایشگاهی به طول 5/5 متر و عرض 29/7 سانتیمتر استفاده شد که نمای کلی آن در شکل (1) نشان داده شده

آن مرتبط نموده است. در واقع از نظر او حرکت چند سنگ‌دانه از لایه سنگچین برای تخریب آن کافی نمی‌باشد. لوچلان و ملویل (2001) عملکرد لایه سنگچین را قبل از اینکه عمق حفره آب‌شستگی در آن به 20 درصد حداکثر عمق آب‌شستگی، بدون وجود سنگچین، برسد قابل قبول دانستند. یکی دیگر از متغیرهای طراحی سنگچین، تعیین ضخامت آن و مشخصات لایه فیلتر است. تمایل خروج ذرات ریز موجود در حفره‌های بستر زیرین سنگچین منجر به تخریب آن از نوع غربالی می‌شود (چیو 1995). راه‌حل جلوگیری از این نوع تخریب، افزایش ضخامت لایه سنگچین و قرار دادن لایه فیلتر بین بستر ریزدانه و سنگچین است. ورمن (1989) در آزمایش‌های خود نشان داد که اگر ضخامت لایه سنگچین کافی باشد، نیازی به قرار دادن لایه فیلتر زیرین نخواهد بود. ورمن نتیجه گرفت که عملکرد یک سیستم سنگچین چندلایه‌ای با دانه‌بندی‌های مختلف، با یک لایه منفرد همگن با ضخامت لایه‌ای کمتر، یکسان خواهد بود.

تحقیقات متعددی در مورد قطر سنگچین پایدار در پایین دست حوضچه‌های آرامش صورت گرفته و روابط مختلفی برای تعیین قطر سنگچین ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روابط پیترکا (1968)، پیلارزینخ (1990)، اسکارامیا و می (مرکز تحقیقات والینگفورد) (1992)، فرهودی و ولیزادگان (2004) اشاره نمود.

USBR بر اساس تحقیقات پیترکا (1968)، پایداری و فروریزش سنگچین در پایاب تعداد زیادی از حوضچه‌های آرامش را مورد مطالعه آزمایشگاهی و صحرایی قرار داده است که نتیجه آن ارائه نموداری است که در آن قطر سنگچین به سرعت کف ارتباط داده شده است که استفاده از آن نیاز به رعایت احتیاط و دقت زیادی خواهد بود. تجربیات پیترکا (1968) نشان می‌دهد که ضخامت لایه سنگچین بایستی حداقل یک و

است.

در آزمایشات مقدماتی به منظور اطمینان از صحت و سقم آزمایشات و تطبیق مشاهدات با تعاریف آستانه حرکت از دیدگاه سایر محققان، لازم بود که مقادیر سرعت متوسط و عمق جریان در حالت آستانه حرکت و سرعت برشی بحرانی ذرات سنگچین از طریق آزمایش تعیین و با مقادیر بدست آمده از روش های ارائه شده توسط سایر محققان مقایسه شوند. قبل از انجام هر آزمایش مصالح سنگچین به داخل مخزن رسوب ریخته شده و پس از صاف کردن سطح آن، دریچه لولایی انتهایی را کاملاً بسته و شیر فلکه به مقدار کم باز گردید تا بدون آنکه سنگچین کوچکترین حرکتی داشته باشد، کانال از آب پر شود. سپس با تنظیم دبی مورد نظر و با استفاده از دریچه لولایی پایاب کانال، عمق جریان برای ایجاد سرعت های مختلف تنظیم گردید.

در تحقیق حاضر، بررسی ها با پوشش سنگچین که ضخامت آن بقدر کافی بزرگ (حداقل 6 برابر قطر متوسط سنگچین) بوده است صورت گرفته که حرکت اولیه ذرات سنگچین بعنوان معیار تخریب آن منظور گردیده است که بیانگر ضریب اطمینان بیشتر نتایج بدست آمده نسبت به تحقیقات پیشین خواهد بود.

### نتایج و بحث

قبل از انجام برنامه اصلی آزمایشات، ابتدا به ازای هر عمق جریان اندازه گیری شده در حالت آستانه حرکت ذرات سنگچین، سرعت متوسط در آستانه حرکت ذرات ( $V_i$ ) محاسبه شد. در جدول (2) مقادیر سرعت متوسط و عمق جریان اندازه گیری شده در حالت آستانه حرکت ذرات سنگچین به قطر متوسط 8/75 میلیمتر به همراه مقادیر محاسبه شده، از طریق روش های محققین دیگر، ارائه شده است. مشاهده می شود که مقادیر بدست آمده در مطالعه حاضر از دو روش نیل و شفافی بجستان پیروی می نماید.

آزمایشات با در نظر گرفتن مشخصات جریان،

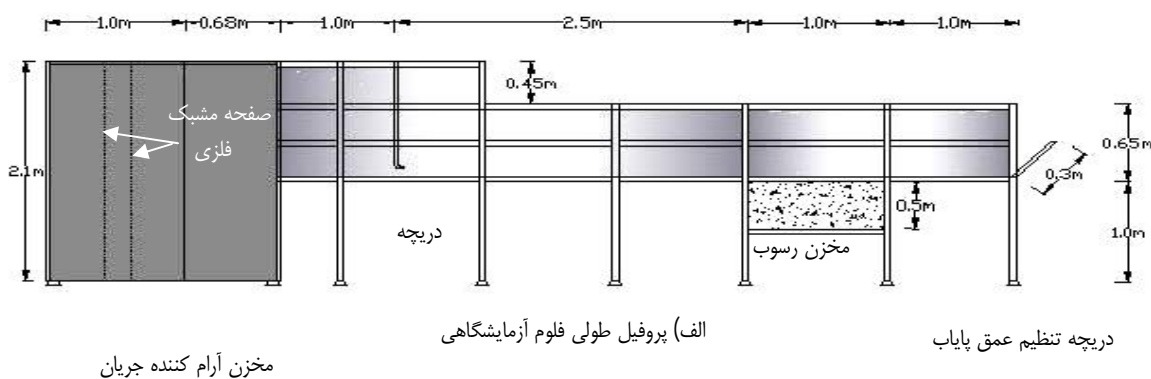
ارتفاع فلوم در طول 1/5 متر اولیه برابر 1/1 متر و انتهای آن مجهز به یک دریچه کشویی بوده است. دریچه به ضخامت 2 سانتیمتر، عرض 29/7 سانتیمتر و ارتفاع 1 متر در نظر گرفته شد. بدنه بخش بالادست دریچه از یک ورقه آلومینیومی به ضخامت 3 میلیمتر پوشانده شد تا برقراری انحنای کامل خطوط جریان خروجی از دریچه را تسهیل نماید. آزمایشات با بازشدگی های متفاوت دریچه کشویی صورت گرفت. در فاصله 2/5 متر از دریچه یک مخزن سنگچین به عمق 50 سانتیمتر در کف فلوم تعبیه و جایگذاری شد. به منظور کنترل رقوم سطح آب در پایین دست (تنظیم محل جهش) در انتهای کانال از یک دریچه لولایی از جنس پلاکسی گلاس به ضخامت 8 میلیمتر، عرض 29/7 سانتیمتر و ارتفاع 30 سانتیمتر استفاده شد. برای اندازه گیری دبی از یک سرریز مستطیلی لبه کوتاه، که قبلاً به دقت واسنجی شده بود، استفاده گردید و سرعت جریان با استفاده از یک دستگاه لوله پیتو (دو جداره) به قطر خارجی 6 میلیمتر اندازه گیری شد. جهت اندازه گیری عمق جریان در طول کانال (پشت دریچه و بازه جهش آبی) از تعدادی پیزومتر مستقر در کف کانال استفاده گردید.

در این تحقیق از سنگدانه های رودخانه ای با 8 اندازه مختلف با قطرهای متغیر به عنوان دانه های سنگچین استفاده شده که مشخصات آن در جدول (1) ارائه گردیده است. مصالح اولیه برای هر اندازه سنگدانه با دو الک متوالی سرند شده و پس از جداکردن دانه های قرار گرفته مناسب بین دو الک، ذرات با آب شستشو داده شد تا کاملاً یکنواخت، تمیز و غیر چسبنده شوند.  $D_{50}$  سنگچین با استفاده از متوسط قطر دو الک تعیین گردید. چگالی نسبی ذرات با استفاده از روش ارشمیدس در یک استوانه مدرج تعیین گردید. برای هر اندازه سنگچین پارامترهای  $SG$ ,  $D_{50}$  و  $\sigma_g$  تعیین شده

مشخصات آبراهه و مشخصات سنگچین و به کارگیری نظریه ابعادی باکینگهام مبتنی بر رابطه:

$$\frac{D_{50}}{T_w} = f\left(\frac{H_0}{T_w}, \frac{V}{V_c}, F_r\right) \quad [1]$$

که در آن،  $H_0$  عمق آب پشت دریاچه،  $T_w$  عمق پایاب جهش،  $V$  سرعت متوسط جریان در پایاب جهش،  $V_c$



شکل 1 - شمای کلی فلوم آزمایشگاهی

جدول 1 - مشخصات مواد سنگچین

ردیف	اندازه الک فوقانی (میلیمتر)	اندازه الک تحتانی (میلیمتر)	$D_{84}$ (میلیمتر)	$D_{50}$ (میلیمتر)	$D_{16}$ (میلیمتر)	$\sigma_g$
1	9.5	8	9.26	8.75	8.24	1.06
2	12.5	9.5	12.02	11	9.98	1.10
3	19	16	18.52	17.5	16.48	1.06
4	25	19	24.04	22	19.96	1.10
5	31.5	25	30.46	28.25	26.04	1.08
6	37.5	31.5	36.54	34.5	32.46	1.06
7	45	37.5	43.8	41.25	38.7	1.06
8	50	45	49.2	47.5	45.8	1.04

دانشت. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که در آستانه حرکت هر اندازه سنگچین، عمق جریان با دبی مربوطه رابطه مستقیم دارد طوریکه با افزایش دبی جریان، آستانه حرکت ذره سنگچین در عمق بیشتری اتفاق خواهد افتاد. برای روشن شدن این مساله، با بررسی دقیق شکل (2) و استفاده از  $D_{50}$  بعنوان مقیاس

در شکل (2)، مقادیر عمق جریان مربوط به دبی‌های ثابت، در آستانه حرکت برای هر سنگچین در پایاب جهش آبی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که به ازای شدت جریان معینی سنگدانه‌های بزرگتر با عمق جریان کمتری ناپایدار می‌شوند. که این امر را می‌توان به افزایش سرعت متوسط جریان و نتیجتاً تنش برشی موثر بر روی سنگچین مرتبط

و عمق پایاب متفاوت، به صورت بی بعد ترسیم گردید که نتیجه در شکل ۳ نشان داده شده است. رابطه بین  $D_{50}/T_w$  و  $D_{50}/y_c$  را می توان بصورت زیر نشان داد.

هندسی منحنی های ارائه شده و همچنین پارامتر بی بعد  $y_c/D_{50}$  و  $T_w/D_{50}$  کلیه نتایج حاصل برای آستانه حرکت سنگچین های مورد استفاده در آزمایشها با دبیهای مختلف

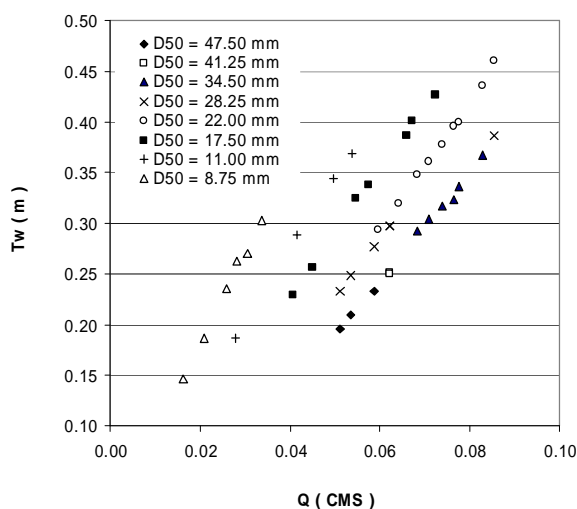
جدول ۲ - مقادیر دبی، عمق و سرعت متوسط در آستانه حرکت سنگچین به قطر 8/75 میلیمتر در جریان بدون جهش

Q (m <sup>3</sup> /s)	Isbach 1935 (cited in Chiew, 1992)		Nill, 1967 (cited in Parola, 1993)		Shafai -Bajestan, 1991		Present research	
	y (m)	Vc (m/s)	y (m)	Vc (m/s)	y (m)	Vc (m/s)	y (m)	Vc (m/s)
0.0588	0.438	0.452	0.239	0.828	0.239	0.828	0.240	0.825
0.0683	0.508	0.452	0.273	0.840	0.278	0.828	0.275	0.836
0.0854	0.636	0.452	0.335	0.857	0.347	0.828	0.339	0.849

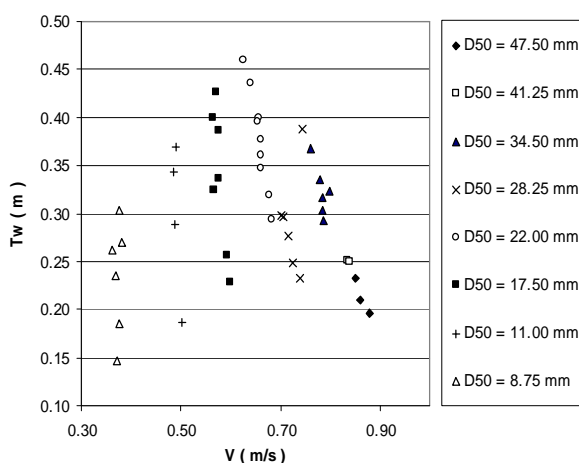
$$\frac{D_{50}}{T_w} = 1.4593 \left( \frac{D_{50}}{y_c} \right)^{1.4493} \quad [2]$$

در شکل ۴، تغییرات قطر سنگچین با سرعت متوسط جریان در بالای سنگچین نشان داده شده است. مشاهده می شود که آستانه حرکت ذرات در شرایط عمق پایاب ثابت با سرعت جریان متوسط موثر رابطه مستقیم دارد. همچنین می توان دریافت که با ثابت نگهداشتن سرعت متوسط جریان در روی سنگچین، آستانه حرکت سنگچین در رابطه مستقیم با عمق موثر جریان (تنش برشی موثر) خواهد بود. درستی نتایج فوق را می توان از ترسیم  $D_{50}/T_w$  بر حسب سرعت متوسط بی بعد  $(V/V_c)$  (شکل ۵) اثبات نمود. رابطه بین این دو متغیر بدون بعد را بصورت زیر در بیاید.

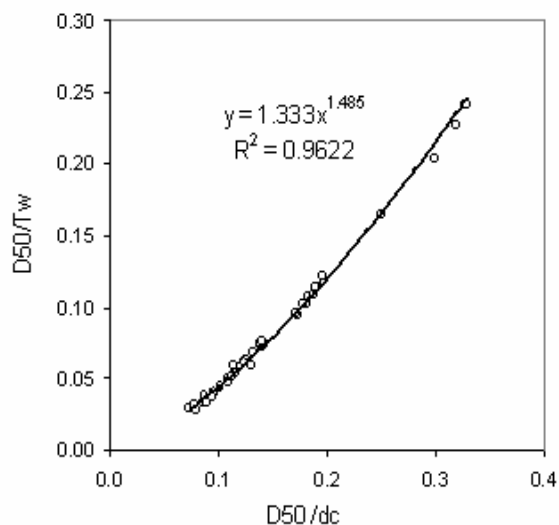
$$\frac{D_{50}}{T_w} = 0.6665 \left( \frac{V}{V_c} \right)^{3.062} \quad [3]$$



شکل ۲ - تغییرات عمق نسبت به دبی جریان در آستانه حرکت ذرات سنگچین در پایاب جهش آبی



شکل ۴ - تغییرات عمق نسبت به سرعت جریان در حالت آستانه حرکت ذرات سنگچین در پایاب جهش آبی



شکل ۳ - تغییرات عمق بی بعد با عمق بحرانی بی بعد جریان در پایاب جهش آبی در آستانه حرکت ذرات سنگچین

های انجام شده بر روی جهش آبی در بسترهای زبر (رجرتنام 1968) نشان می‌دهد که ضریب نیروی برشی موثر ( $\varepsilon$ ) بر این بسترها با رابطه تابعی:

$$e = f(Fr^2) \quad [5]$$

بیان می‌گردد. با توجه به نقش عمده تنش برشی در آغازش حرکت ذرات رسوب می‌توان رابطه (4) را تایید کننده نتایج پژوهشهای قبلی دانست. علیهذا با توجه به سهولت محاسبه  $Fr_2 = V/(gT_w)^{0.5}$  در پایاب حوضچه های آرامش می‌توان رابطه (4) را برای محاسبه قطر سنگچین پایدار در پایاب حوضچه های آرامش درجه ها توصیه نمود.

برای مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج سایر محققین، شرایط آستانه حرکت (عمق، سرعت متوسط پایاب و سرعت کف در روی سنگچین) برای سنگچین های مورد استفاده در آزمایشات تحقیق حاضر، برمبنای روابط پیشنهاد شده توسط پیترکا (1968)، پیلارزیخ (1990) و والینگفورد [اسکارامیا ومی (1992)] محاسبه گردید.

الف - برای بدست آوردن قطر سنگچین پایدار به روش والینگفورد فرضیات زیر پذیرفته شده است:

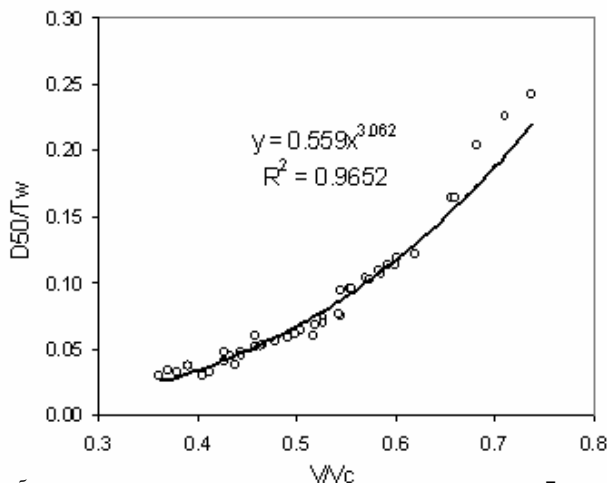
- تراز آشفتگی بالا و نتیجتا ضریب شدت آشفتگی (TI) برابر 0/6 منظور گردید که با توجه به  $TI > 0.5$ ، سرعت کف ( $u_b$ ) بر اساس سرعت متوسط ( $u_d$ ) جریان از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$u_b = (-1.48 TI + 1.36) u_d \quad [6]$$

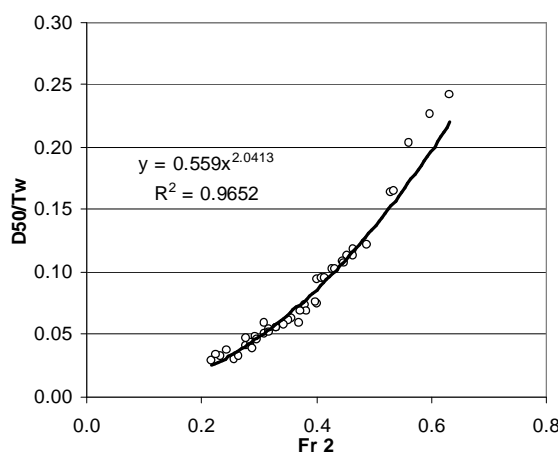
ب - در محاسبه قطر سنگچین پایدار به روش پیلارزیخ فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- تراز آشفتگی بالا و نتیجتا ضریب شدت آشفتگی (Kt) برابر 2،  $y_{cr} = 0.035$ ،  $f = 1.25$  و  $D = 1.65$  است

جریان آشفته شدید با پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته منظور گردید که بنا به توصیه نامبرده



شکل 5 - تغییرات عمق بی بعد جریان در پایاب جهش آبی با سرعت متوسط بی بعد موثر بر آستانه حرکت ذرات سنگچین



شکل 6 - تغییرات  $D_{50}/T_w$  با عدد فرود در انتهای جهش آبی

در شکل 6، تغییرات  $D_{50}/T_w$  با عدد فرود جریان در انتهای جهش آبی ( $Fr_2$ ) نمایش داده شده است. می‌توان ملاحظه نمود که تغییرات  $D_{50}/T_w$  با  $Fr_2$  از روند نمایی مثبت پیروی می‌کند که به صورت زیر قابل ارائه می‌باشد.

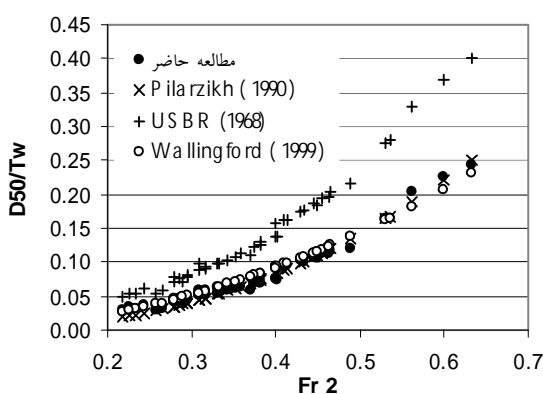
$$\frac{D_{50}}{T_w} = 0.559 Fr_2^{2.04} \quad [4]$$

از آنچه گذشت می‌توان ملاحظه نمود که روابط (2)، (3) و (4) تحلیل یکسانی را برای تعیین معیار آستانه حرکت سنگچین در پایاب کف بند حوضچه‌های آرامش درجه‌ها ارائه می‌نمایند که بر صحت روش تحقیق و یافته آزمایشگاهی تحقیق حاضر دلالت خواهد داشت. پژوهش-

صرفنظر گردیده است.

- رابطه پیترکا حاصل استفاده از نتایج آزمایشات صحرایی پایداری و فروریزش سنگچین در پایاب تعداد زیادی از حوضچه های آرامش می باشد. در مطالعات پیترکا تاکید شده است چنانچه 40 درصد از لایه سنگچین دارای دانه بندی مناسب و قطعات سنگی کوچکتر از آن باشد، لایه سنگچین پایدار خواهد بود. وی این توصیه را نتیجه بهم پیوستن قطعات سنگی ریز و درشت و کاهش سرعت جریان در نزدیکی سطح خشن سنگچین میدانند.

در شکل 7 تغییرات  $D_{50}/Tw$  با  $Fr_2$  برای نتایج تحقیق حاضر به همراه نتیجه محاسبات صورت گرفته از روابط مختلف نشان داده شده است که حاکی از تطابق خوب آن با روشهای پیلازیخ (1990) و والینگفورد [اسکارامیا ومی (1992)] می باشد. همچنین در شکل های 8 و 9 مقایسه داده های آزمایشگاهی مطالعه حاضر با معادلات پیلازیخ و والینگفورد بطور جداگانه صورت گرفته است که نشانگر تطابق بسیار خوبی می باشد.



شکل 7- تغییرات  $D_{50}/Tw$  با عدد فرود انتهای جهش برای روابط مختلف

$$K_h = (D_{50} / T_w)^{0.2} \quad [7]$$

مورد استفاده قرار گرفت. زاویه اصطکاک داخلی مواد،  $\Delta$  چگالی نسبی ذرات سنگچین مستغرق،  $\Psi_{cr}$  ضریب پایداری و  $K_h$  فاکتور عمق است.

- در رابطه والینگفورد  $Dn_{50} = 0.9 D_{50}$  منظور گردیده است که مبتنی بر توصیه رودکیوی (1998) می باشد.

ج- در روش پیترکا نیز توصیه های نامبرده مورد استفاده قرار گرفت.

جدول (3) میانگین خطای نسبی (MRE) نتایج بدست آمده از روابط (5)، اسکارامیا و می، پیلازیخ و پیترکا نسبت به داده های مشاهده شده در تحقیق حاضر را نشان می دهد که در آن خطای نسبی (RE) و میانگین خطای نسبی (MRE) از روابط زیر محاسبه شده اند:

$$RE^i = \frac{|D_{50(ob)}^i - D_{50(pr)}^i|}{D_{50(ob)}^i} 100 \quad [8]$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RE^i \quad [9]$$

جدول 3- مقایسه روابط محاسباتی با داده های مشاهده شده

MRE (%)			
مطالعه حاضر	Peterka (USBR)	Wallingford	Pilarzikh
8.26	73.80	11.24	9.33

نتایج محاسبات نشان می دهد که رابطه (4) کمترین خطا را در برآورد قطر سنگچین پایدار نسبت به داده های آزمایشگاهی نشان می دهد و روابط پیلازیخ و والینگفورد برآورد نزدیکی از داده های آزمایشگاهی را ارائه مینمایند. لازم به یادآوری است که رابطه پیترکا در برآورد قطر سنگچین پایدار از میانگین خطای نسبی بالایی برخوردار خواهد بود. این امر را میتوان به موارد زیر مرتبط دانست.

- در رابطه پیترکا قطر سنگچین در آستانه حرکت بر مبنای سرعت کف می باشد که در آن از تاثیر عمق پایاب



تابعی از سرعت جریان موثر در بالای سنگ چین می‌باشد.

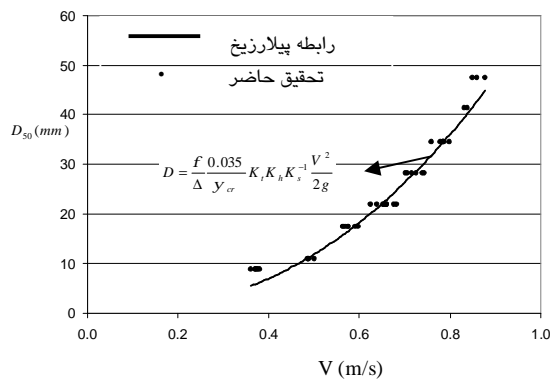
2- در شرایط سرعت ثابت متوسط جریان، افزایش عمق جریان باعث افزایش تنش برشی موثر بر روی سنگچین می‌گردد که حساسیت سنگدانه های بزرگتر نسبت به عمق، بیشتر از سنگدانه های ریزتر است.

3- برای تعیین قطر سنگچین پایدار می‌بایست تاثیر عمق و سرعت جریان بصورت توأم در نظر گرفته شود. و روابطی که تنها بر اساس یکی از پارامترهای فوق باشند قابل توصیه نخواهند بود.

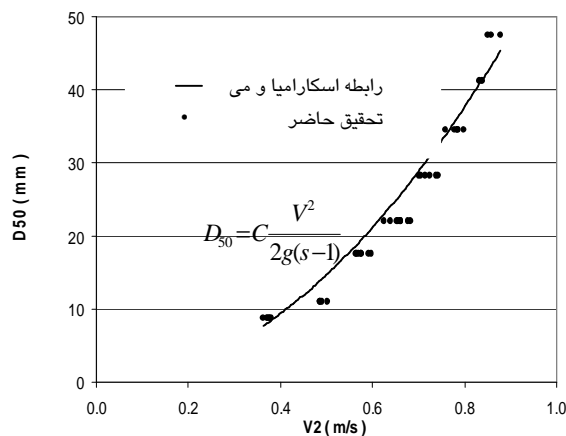
4- با افزایش عدد فرود پایین دست جهش به دلیل افزایش سرعت متوسط و بطور کلی افزایش توان فرسایشی جریان، قطر سنگچین پایدار افزایش می‌یابد.

5- مشاهدات انجام شده و مقایسه آن با تحقیقات محققان پیشین نشان داد که منظور طراحی قطر متوسط ذرات سنگچین پایدار در پایاب حوضچه‌های آرامش، میتوان رابطه ساده ای مبتنی بر عدد فرود جریان و نسبت قطر متوسط سنگچین به عمق جریان ارائه نمود که علاوه بر سهولت استفاده، دارای دقت بالاتری نسبت به روابط موجود می‌باشد.

6- پیشنهاد می‌شود برای اطمینان از کاربرد دقیق نتایج توصیه شده، تحقیقات در کانالهای بزرگتر با سنگچین درشت دانه و غیر یکنواخت انجام پذیرد تا نتایج حاضر را کاملتر نماید.



شکل 8 - مقایسه داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر با رابطه پیلارزیخ



شکل 9- مقایسه داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر با رابطه والینگفورد

### نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی، معیار تعیین آستانه حرکت برای سنگچین محافظ پایاب حوضچه های آرامش پشت دریچه مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج زیر قابل ارائه می باشند:

1- با ثابت نگه داشتن عمق جریان، آستانه قطر سنگچین

### منابع مورد استفاده

Chiew YM, 1995. Mechanics of riprap failure, J Hydr Eng ASCE 121(9), 635-643.

Escarameia M and May RWP, 1992. Channel protection downstream of structures. HR Wallingford Report SR 313.

- Farhoudi J and Smith KVH, 1985. Local scour profiles downstream of hydraulic jump, J Hydr Res 23 (4)17-26.
- Farhoudi J and Smith KVH, 1982. Time scale for local scour downstream of hydraulic jump. ASCE J Hydr Eng 168(10)453-461.
- Farhoudi J and Valizadegan E, 2004. Bed protection criterion downstream of stilling basins. ISRS. Yichang. China.
- Lauchlan CS, Melville BW, 2001. Riprap protection at bridge piers, ASCE J Hydr Eng 127: 5.30-38.
- Nik Hassan NMK and Narayanan R, 1985. Local scour downstream of an apron. ASCE J Hydr Eng 111(11) 430-441.
- Parola AC, 1993. Stability of riprap at bridge piers, J Hydr Eng ASCE 119(10), 1080-1093.
- Peterka AJ, 1968. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators engineering monograph No. 25. USBR. USA.
- Pilarczyk KW, 1990. Stabiuty criterisi for revetments, proc. of 1990 National Conf. on Hydraulics Eng, Am Soc Civ Eng. (eds.) HH Chang and JC Hill, San Diego, USA. 15-26.
- Posey CJ, 1974, Tests of scour protection for bridge piers, J Hydr Div ASCE 100(12), 1773-1783.
- Rajaratnam N, 1968. Hydraulic jumps on rough beds, Trans Eng Inst Canada, 11(A-2), 1-8.
- Raudkivi AJ, 1998. Loose boundary hydraulics. AA Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Shafai-Bajestan M and Albertson ML, 1993. Riprap criterion below pipe outlet, ASCE J Hydr Eng 116(1).
- Worman A, 1989. Riprap protection without filter layers, J Hydr Eng ASCE 115(12), 1615-1630.