

## کنترل آب‌شستگی تکیه‌گاه پل در قوس رودخانه با استفاده از سنگ‌چین

مهوش منصوری هفشجانی<sup>۱\*</sup> و محمود شفاعی بجستان<sup>۲</sup>

### چکیده

از جمله روش‌های ساده و در بسیاری مواقع به صرفه برای حفاظت تکیه‌گاه پل در مقابل آب‌شستگی، استفاده از پوشش سنگ‌چین است. مرور منابع نشان داد که تا کنون تحقیقی که در آن طراحی قطر سنگ‌چین در قوس رودخانه‌ها به طور اصولی مورد مطالعه قرار گرفته باشد، صورت نگرفته است. در تحقیق حاضر با استفاده از مدل فیزیکی، سه نوع سنگ‌چین با چگالی ۱/۵۱، ۲/۰۵، ۲/۶۵ و با قطرهای ۴/۷۵، ۹/۵۲، ۱۲/۷ و ۱۹/۰۵ میلی‌متر در محل تکیه‌گاه پل و در موقعیت ۷۵ درجه از قوس ۹۰ درجه و با چهار دبی ۱۷، ۲۰، ۲۳ و ۲۸ لیتر بر ثانیه (متناسب با دامنه عدد فرود ۰/۱۹ تا ۰/۵۸) آزمایش شد. بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از این تحقیق، فرمول مناسب با درصد خطای ۵/۸۰ درصد و ضریب همبستگی ۰/۹۷ به منظور تخمین اندازه‌ی مناسب قطر سنگ‌چین در محل تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه استخراج شد. همچنین فرمول ارایه شده توسط تحقیق حاضر با روابط ارایه شده از مطالعات پیشین بر روی سنگ‌چین اطراف تکیه‌گاه واقع در مسیر مستقیم مقایسه شد و ضریب تصحیح مناسب برای استفاده از این روابط در قوس ارایه شد.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌شستگی، قوس رودخانه، سنگ‌چین و تکیه‌گاه پل.

**ارجاع:** منصوری هفشجانی م. و شفاعی بجستان م. ۱۳۹۰. کنترل آب‌شستگی تکیه‌گاه پل در قوس رودخانه با استفاده از سنگ‌چین. مجله پژوهش آب ایران. ۸۲-۷۳: (۹)۵.

۱- دانشجوی دکتری، گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

\* نویسنده مسئول: [mansoori.m.8@gmail.com](mailto:mansoori.m.8@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۰۷

## مقدمه

به طراحی سنگ‌چین در محل تکیه‌گاه پل واقع در مسیر مستقیم پرداختند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

سایمون و لويس (۱۹۷۱) معادله ۱ را برای طراحی سنگ‌چین در محل تکیه‌گاه پل ارائه کردند:

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{0.67}{(S_s - 1)} Fr^2 \quad (1)$$

پاگان-ارتیز (۱۹۹۱) برای تکیه‌گاه با دیواره عمودی و تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای معادلات ۲ و ۳ را ارائه کرد:

برای تکیه‌گاه با دیواره عمودی

$$D_{50} = \left( \frac{1.064V^2 y^{0.23}}{(S_s - 1)g} \right)^{0.81} \quad (2)$$

برای تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای

$$D_{50} = \frac{0.535V^2}{(S_s - 1)g} \quad (3)$$

سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا (۱۹۹۴) به نقل از ملویل و کولمن (۲۰۰۰)، برای طراحی قطر مناسب سنگ‌چین در محل تکیه‌گاه پل معادله زیر را ارائه کرد:

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{1.026}{(S_s - 1)} Fr^2 \quad (4)$$

ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵) براساس محدوده عدد فرود جریان و در نظر گرفتن فاکتوری به نام فاکتور شکل ( $K_s$ ) که بر مبنای نوع تکیه‌گاه قابل تعریف است (۰/۸۹) برای تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای و ۱/۰۲ برای تکیه‌گاه با دیواره عمودی) معادله زیر را ارائه کردند:

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{K_s}{(S_s - 1)} Fr^2 \quad Fr \leq 0.8 \quad (5)$$

لاگاس و همکاران (۲۰۰۱) علاوه بر تأیید فرمول ارائه شده توسط ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵)، معادله ۶ را برای تکیه‌گاه با دیواره عمودی و محدوده عدد فرود بزرگ‌تر از ۰/۸ استخراج کردند:

جریان یافتن آب در مجاورت تکیه‌گاه پل و کف‌کنی و عمیق‌تر شدن بستر رودخانه در مواقع سیلابی، یکی از عوامل اساسی تخریب و آب‌شستگی پل‌ها است. اختلاف هیدرواستاتیک در بالادست و پایین‌دست دیواره جانبی یکی از عوامل تولید جریان آشفته چرخشی و گردابی در پیرامون تکیه‌گاه خواهد بود (سپهوند و شفافی بجستان، ۱۳۷۴). بر اساس مطالعات سازمان بزرگراه‌های ایالات متحده (USFHA)، در سال ۱۹۷۳ از تعداد ۳۸۳ مورد خرابی در پل‌ها، ۲۵ درصد مربوط به خرابی پایه‌ها و ۷۲ درصد مربوط به خرابی تکیه‌گاه‌ها بوده است. طبق بررسی‌های کانداسمی و ملویل در سال ۱۹۹۸، ۶ تا ۱۰ مورد تخریب پل در نیوزلند، ناشی از آب‌شستگی در تکیه‌گاه آنها بوده است (صانعی، ۱۳۸۵).

در قوس رودخانه، نیروی گریز از مرکز سطح آب را در قوس بیرونی بالا برده و در قوس داخلی باعث کاهش عمق می‌شود. این اختلاف هد فشار موجب جریانی در نزدیکی کف کانال به سمت دیواره داخلی قوس می‌شود. این جریان ثانویه در جهت جانبی بر جریان اصلی در جهت طولی اضافه می‌شود و جریان چرخشی توسط این دو مولفه جریان ایجاد می‌شود (رضانیا و همکاران، ۱۳۸۸). در نتیجه وقتی شرایط خم در محلی ایجاد گردید، باعث تغییر الگوی جریان در محل پل و بخصوص تکیه‌گاه واقع در ساحل خارجی قوس می‌گردد که این امر سبب تفاوت تنش برشی موضعی در بستر، در محل تکیه‌گاه نسبت به بازه مستقیم رودخانه خواهد شد. عمده مطالعات صورت گرفته در خم رودخانه‌ها، بیشتر بر شناسایی مکانیسم آب‌شستگی تأکید کرده است که از جمله می‌توان به یین (۱۹۷۰)، انگلوند (۱۹۷۴)، کیکاوا و همکاران (۱۹۷۶)، ادگارد (۱۹۸۲) و قدسیان و موسوی (۲۰۰۶) اشاره کرد و مطالعات اندکی در مورد حفاظت پل‌های واقع در قوس رودخانه‌ها انجام شده است.

از جمله روش‌های ساده و در بسیاری مواقع به صرفه برای حفاظت تکیه‌گاه پل در مقابل آب‌شستگی، استفاده از پوشش سنگ‌چین می‌باشد. از جمله دانشمندی که

۲۸ لیتر بر ثانیه (متناسب با دامنه عدد فرود ۰/۱۹ تا ۰/۵۸) آزمایش شد.

#### آنالیز ابعادی

با صرف نظر کردن از پارامترهای ثابت در این تحقیق از جمله: شعاع انحنای متوسط قوس (۰/۸ متر)، انحنای نسبی قوس (R/B=2)، عرض فلوم (۰/۴ متر)، موقعیت تکیه‌گاه در طول قوس (قرارگیری در زاویه ۷۵ درجه از ابتدای قوس) و نوع تکیه‌گاه، عوامل مؤثر در پایداری سنگ‌چین را می‌توان با تابع زیر بیان کرد:

$$f_1(V_c, y_t, g, \mu, \rho_w, D_{50}, \rho_s) = 0 \quad (7)$$

که در معادله  $V_c$ ،  $y_t$  و به ترتیب سرعت جریان و عمق آب در مسیر مستقیم پایین دست قوس در لحظه آستانه حرکت سنگ‌چین،  $g$ : شتاب ثقل،  $\mu$ : ویسکوزیته دینامیکی سیال،  $\rho_w$ : جرم حجمی آب،  $D_{50}$ : قطر متوسط ذرات سنگ‌چین و  $\rho_s$ : جرم مخصوص ذرات سنگ‌چین است.

بر اساس روش  $\pi$  باکینگهام، ۴ گروه بدون

$$\pi_3 = \frac{D_{50}}{y_t}, \quad \pi_2 = \frac{g y_t}{V_c^2}, \quad \pi_1 = \frac{\mu}{\rho_w y_t V_c} \quad \text{بعد}$$

و  $\pi_4 = \frac{\rho_s}{\rho_w}$  استخراج می‌شود.

اعداد بی‌بعد اول و دوم به ترتیب به عدد رینولدز (Re) و عدد فرود ( $Fr$ ) در مقطع پایین دست قوس اشاره دارند و از آنجایی که در مدل کانال‌های روباز ابعاد به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که تأثیر لزجت سیال بسیار کم است، بنابراین از تأثیر عدد رینولدز که دامنه تغییرات آن در این تحقیق ۴۲۷۰۰-۲۳۸۰۰ می‌باشد، صرف نظر می‌شود. بنابراین معادله گروه‌های بدون بعد به شکل معادله ۸ ارایه می‌شود:

$$f_2\left(\frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{y_t}{D_{50}}, Fr\right) = 0 \quad (8)$$

از طرفی از ادغام سه گروه بدون بعد  $\left(\frac{\rho_s}{\rho_w}, \frac{y_t}{D_{50}}, Fr\right)$

در معادله ۸، عدد پایداری  $(SN = \frac{V_c}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}})$

$$\frac{D_{50}}{y} = \frac{0.69}{(S_s - 1)} Fr^{0.28} \quad Fr > 0.8 \quad (6)$$

در تمامی معادلات ۱ تا ۶، پارامتر  $D_{50}$ : اندازه متوسط ذرات سنگ‌چین،  $y$ : عمق جریان،  $V$ : سرعت جریان،  $g$ : شتاب جاذبه،  $Fr$ : عدد فرود و  $S_s$ : چگالی مخصوص ذرات سنگ‌چین است.

ملویل و همکاران (۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) با استفاده از یک فلوم به عرض ۱/۵ متر، تکیه‌گاه با دیواره بالدار ۴۵ درجه و چهار اندازه سنگ‌چین با قطرهای متوسط ۲۰، ۲۸، ۴۰ و ۶۱ میلی‌متر، روابط ارایه شده توسط براون و کلاید (۱۹۸۹)، پاگان-ارتیز (۱۹۹۱) و لاگاس و همکاران (۲۰۰۱) را با نتایج تحقیقات خود مورد مقایسه قرار دادند. مقایسه انجام شده توسط ملویل و همکاران نشان داد که نتایج تحقیقات آنها مطابقت زیادی با معادله ارایه شده توسط لاگاس و همکاران (۲۰۰۱) دارد.

نتایج مطالعات کیخائی و همکاران (۱۳۸۸) نشان داد که مساحت محدوده پوشش سنگ‌چین در گروه پایه‌ها برای هر پایه نسبت به تک پایه کاهش یافته است که یکی از امتیازات کاربرد سنگ‌چین برای حفاظت گروه پایه‌هاست. نتایج تحقیق زراتی و همکاران (۲۰۰۶) درباره‌ی کاهش آب‌شستگی در محل احداث گروه پایه‌های پل با استفاده از ترکیب سنگ‌چین و طوق، نشان داد که در دوپایه‌های در یک خط موازی با جهت جریان، استفاده از ترکیب سنگ‌چین و طوق پیوسته باعث کاهش آب‌شستگی در جلو و پشت پایه‌ها به ترتیب به میزان ۵۰ و ۶۰ درصد شده است. همچنین نتایج تحقیقات قربانی و حیدرپور (۱۳۸۴) به منظور کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی با استفاده از چهار اندازه سنگ‌چین و دو اندازه شکاف پایه نشان داد که وجود شکاف باعث مقاوم‌تر شدن و افزایش پایداری سنگ‌چین می‌شود و این افزایش پایداری در شکاف بزرگ‌تر مشهودتر است.

در تحقیق حاضر، سه نوع سنگ‌چین با چگالی ۱/۵۱، ۲/۰۵، ۲/۶۵ و با قطرهای ۹/۵۲، ۴/۷۵، ۱۲/۷ و ۱۹/۰۵ میلی‌متر در محل تکیه‌گاه پل و در موقعیت ۷۵ درجه از قوس ۹۰ درجه و با استفاده از چهار دبی ۱۷، ۲۰، ۲۳ و

دارای قوس ۹۰ درجه با عرض ۴۰ سانتیمتر، ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر، شیب کف صفر و شعاع انحنای متوسط ۰/۸ متر می‌باشد و انحنای نسبی ۲ (R/B=2) قوس را در رده قوس‌های تند قرار می‌دهد. این فلوم شامل مخزن ورودی (مخزن آرام کننده) است. طول مسیر مستقیم ورودی (از انتهای مخزن آرام کننده تا ابتدای قوس) برابر ۴ متر و طول مسیر مستقیم خروجی (از انتهای قوس تا انتهای فلوم) برابر ۲ متر می‌باشد. در انتهای فلوم از یک دریچه کشویی برای کنترل و تنظیم سطح آب و از یک مخزن جهت جمع‌آوری رسوبات فرسایش یافته استفاده شده است. همچنین در فاصله ۲۰۵ سانتی‌متری از ابتدای مخزن از یک سرزیر مثلثی لبه تیز با زاویه ۹۰ درجه برای اندازه‌گیری دبی به کار برده شده است. شکل ۱ نشان‌دهنده پلان فلوم آزمایشگاهی است.

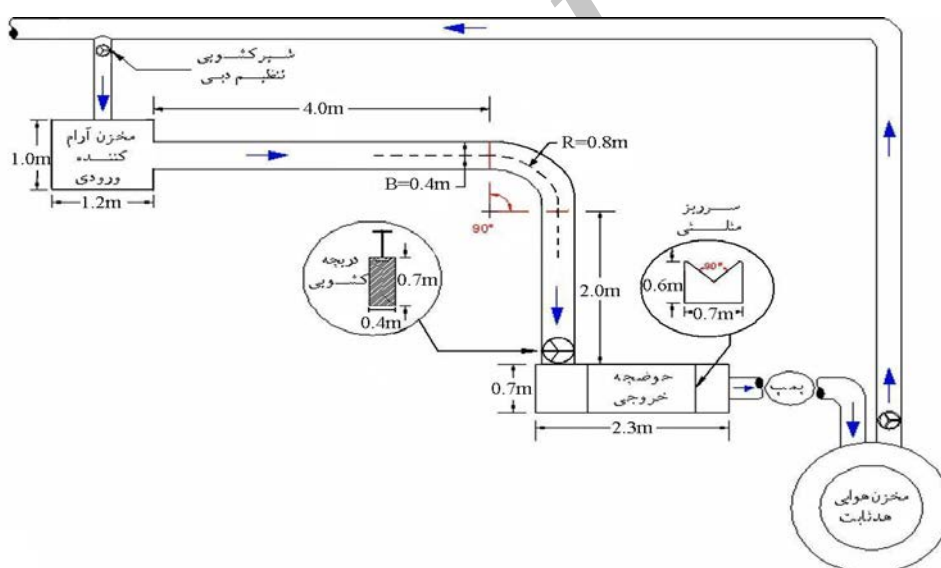
به دست می‌آید که در تعریف عدد پایداری،  $V_c$ : مقدار سرعت جریان در آستانه حرکت ذره،  $g$ : شتاب ثقل،  $G_s$ : چگالی نسبی ذرات و  $D_{50}$ : قطر متوسط ذرات می‌باشد. با توجه به اینکه عدد فرود ( $Fr$ ) و عدد پایداری ( $SN$ ) هر دو تأثیر نیروی ثقل بر هیدرولیک جریان را نشان می‌دهند و نظر به اهمیت ( $SN$ ) در آنالیز پایداری ذرات، در این تحقیق از اثر عدد فرود صرف نظر شده است. بنابراین معادله ۸ به صورت معادله ۹ در می‌آید:

$$f_3\left(\frac{y_t}{D_{50}}, SN\right) = 0 \quad (9)$$

### مواد و روش‌ها

#### فلوم مورد استفاده

فلوم مورد استفاده در آزمایشگاه مدل دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، فلومی مستطیلی



شکل ۱- پلان فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده

هندسی ذرات باید کمتر از ۱/۳ باشد (شفاعی بجزستان، ۱۹۹۱). به منظور برآورده شدن شرایط فوق، رسوبات انتخاب شده برای آزمایش‌ها دارای اندازه متوسط ۱/۶۳ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی  $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.28$  می‌باشند. ضخامت مصالح بستر نیز ۳۶ سانتی‌متر انتخاب شد.

#### رسوبات مورد استفاده

به توصیه رادکیوی و اتما (۱۹۸۳)، برای جلوگیری از تشکیل ریپل، قطر متوسط ذرات باید از ۰/۷ میلی‌متر بیشتر باشد. همچنین بیشتر تحقیقات در مبحث آستانه حرکت با مصالح یکنواخت صورت گرفته است که از جمله آنها دیگرام شیلدز می‌باشد. برای حذف تأثیر غیریکنواختی رسوبات بر آب‌شستگی، انحراف معیار

## وضعیت تکیه‌گاه و سنگ‌چین

با انجام آزمایش‌های مقدماتی مشخص گردید که بیشترین میزان آب‌شستگی در طول قوس، در زاویه ۷۵ درجه حاصل شده است، بنابراین تکیه‌گاه در موقعیت ۷۵ درجه قوس خارجی قرار داده شد و مقدار درصد انسداد ۱۰ درصد برای تکیه‌گاه انتخاب شد. نوع تکیه‌گاه به کار رفته در همگی آزمایشات، تکیه‌گاه با دیواره بالدار ۴۵ درجه، دارای ارتفاع ۶۸ سانتی‌متر و از جنس پلکسی‌گلاس می‌باشد. شکل ۲ نشان‌دهنده شکل تکیه‌گاه و سنگ‌چین اطراف آن است.

دبی حداکثر (۲۸ لیتر بر ثانیه) و عمق جریان ۱۶ سانتی-متر انجام شد. پس از انجام این آزمایش، محدوده سنگ-چین برای انجام آزمایش آستانه حرکت سنگ‌چین مشخص گردید و شکل محدوده سنگ‌چین بر اساس مطالعات ملویل و همکاران (۲۰۰۷) به شکل مستطیلی و تراز آن هم‌تراز با رسوبات بستر در نظر گرفته شد و همچنین ضخامت لایه سنگ‌چین با توجه به معیار ارایه شده توسط ملویل و همکاران (۲۰۰۷)، دو برابر قطر متوسط سنگ‌چین طراحی شد.

## جدول ۱- مشخصات سنگ‌چین‌های به کار رفته در اطراف

## تکیه‌گاه

چگالی مخصوص	اندازه متوسط سنگ‌چین بر حساب میلی‌متر ( $D_{50}$ )
۲/۶۵	۱۹/۰۵ و ۱۲/۷، ۹/۵۲، ۴/۷۵
۲/۰۵	۱۲/۹، ۷/۵۲
۱/۵۱	۱۹/۰۵ و ۱۲/۷



شکل ۲- تکیه‌گاه با دیواره بالدار و سنگ‌چین به کار رفته در اطراف

## نحوه انجام آزمایشات

قبل از هر گونه آزمایشی ابتدا باید رسوبات درون فلوم آزمایشگاهی تسطیح گردد. سپس سنگ‌چین مورد نظر به ضخامت  $2D_{50}$  و هم‌تراز با مصالح بستر در اطراف تکیه‌گاه قرار داده شده و جهت جلوگیری از فرسایش و به وجود آمدن آب‌شستگی‌های ناخواسته مربوط به جریان اولیه، در شروع آزمایش دریچه انتهایی کانال را بسته و با دبی بسیار کم کانال پر می‌شود. پس از تنظیم دبی مورد نظر، عمق جریان توسط دریچه پایین‌دست در پریودهای زمانی پانزده دقیقه به آهستگی کاهش داده شده و پس از هر بار کاهش شرایط جریان برای مدتی ثابت نگه داشته می‌شود تا تأثیر کاهش به بالادست فلوم نیز سرایت کند و عمق آب در طول فلوم و در نقاط مختلف ثابت باشد. پس از اطمینان از ثابت بودن عمق آب در طول فلوم، نحوه حرکت مصالح سنگ‌چین به صورت چشمی بررسی می‌شود. هر نوع حرکت ذرات سنگ‌چین اعم از لرزش، جابجایی کم و یا حرکت ممتد به سمت پایین‌دست ثبت می‌شود. شرایط جریان را که

همچنین سنگ‌چین‌های به کار رفته در این تحقیق، ۳ نوع ماده با چگالی مختلف است و همه آنها تیز گوشه و با دانه‌بندی یکنواخت هستند. مشخصات این سنگ‌چین‌ها در جدول ۱ ارایه شده است.

برای تعیین وسعت سنگ‌چین، آزمایش بدون قرارگیری سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه به منظور بررسی حداکثر ابعاد گودال آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه انجام شد. برای این منظور در طی آزمایشی ۱۲ ساعته، عمق آب-شستگی دماغه تکیه‌گاه و ساحل خارجی در فواصل زمانی معین به وسیله عمق‌سنج اندازه‌گیری گردید. پس از انجام این آزمایش ۱۲ ساعته، مشخص شد که حدود ۸۵ درصد آب‌شستگی در دو ساعت اول آزمایش رخ می‌دهد. بنابراین زمان آزمایش تعیین وسعت سنگ‌چین اطراف تکیه‌گاه، ۲ ساعت در نظر گرفته شد و به ازای

جدیدی تکرار می‌شد. در مجموع ۳۲ آزمایش انجام شد که نتایج آن در جداول ۲، ۳ و ۴ ارایه شده است.

### نتایج و بحث

این تحقیق در نظر دارد تا با استخراج داده‌های آزمایشگاهی معیار لازم برای طراحی اندازه سنگ‌چین به منظور محافظت تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه را ارایه نماید. آزمایش‌های لازم همان‌گونه که در قسمت قبلی بیان شد انجام و در این قسمت داده‌های حاصل از آزمایش‌ها بر مبنای معادله‌ی بی بعد شماره ۹ مورد تحلیل قرار می‌گیرد. مقادیر اندازه‌گیری شده عمق آب در شرایط آستانه حرکت به ازای چگالی و دبی‌های آزمایش شده در جدول‌های ۲، ۳ و ۴ ارایه شده است.

در آن شرایط ذره سنگ‌چین از محل خود کنده شود و به پایین دست منتقل شود "آستانه حرکت" تعریف گردید و در این لحظه عمق جریان در مسیر مستقیم پایین- دست قوس به عنوان عمق آستانه حرکت اندازه‌گیری می‌شد. در انتهای هر آزمایش، جریان ورودی قطع و فلوم زهکشی می‌شد. سپس ذرات سنگ‌چین جدا و بستر فلوم با مصالح مسطح و ذرات سنگ‌چین روی آن قرار می‌گرفتند و آزمایش با دبی دیگری انجام می‌گرفت که مقادیر دبی‌های به کار رفته در این تحقیق ۱۷، ۲۰، ۲۳ و ۲۸ لیتر بر ثانیه (متناسب با دامنه عدد فرود ۰/۱۹ تا ۰/۵۸) می‌باشد که مقادیر آنها پس از انجام آزمون و خطا تعیین گردید. پس از تکمیل این آزمایش‌ها، اندازه و یا نوع مصالح تغییر و همان شرایط با ذره سنگی

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمایشات در آستانه حرکت برای سنگ‌چین با  $(Gs = 2.65)$

شماره آزمایش	عمق آب پایین دست قوس ( $V_p$ ) (cm)	قطر متوسط سنگ-چین ( $D_{50}$ ) (mm)	دبی مورد آزمایش (L/s)
۱	۱۳/۱	۴/۷۵	۱۷
۲	۱۰/۴	۹/۵۲	۱۷
۳	۹/۷	۱۲/۷	۱۷
۴	۸/۲	۱۹/۰۵	۱۷
۵	۱۵	۴/۷۵	۲۰
۶	۱۱/۹	۹/۵۲	۲۰
۷	۱۱/۲	۱۲/۷	۲۰
۸	۹/۵	۱۹/۰۵	۲۰
۹	۱۶/۹	۴/۷۵	۲۳
۱۰	۱۳/۵	۹/۵۲	۲۳
۱۱	۱۲/۵	۱۲/۷	۲۳
۱۲	۱۱	۱۹/۰۵	۲۳
۱۳	۲۰	۴/۷۵	۲۸
۱۴	۱۶/۲	۹/۵۲	۲۸
۱۵	۱۴/۳	۱۲/۷	۲۸
۱۶	۱۲/۸	۱۹/۰۵	۲۸

مقایسه اعماق پایاب جهت آستانه حرکت ذرات سنگ-چین با چگالی‌های مختلف نشان می‌دهد که هرچه چگالی ذرات سنگ‌چین بیشتر باشد، آستانه حرکت ذرات سنگ‌چین در عمق پایاب پایین‌تری رخ می‌دهد

مشاهدات نشان داد که به ازای دبی ثابت  $Q$ ، با کاهش عمق پایاب، اندازه قطر سنگ‌چین که در آستانه حرکت قرار گرفته است افزایش می‌یابد. همچنین به ازای هر اندازه قطر سنگ‌چین ثابت، با افزایش دبی، عمق پایاب جهت آستانه حرکت ذرات سنگ‌چین افزایش می‌یابد.

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایشات در آستانه حرکت برای سنگ چین با  $G_s=2.05$ 

شماره آزمایش	عمق آب پایین دست قوس ( $y_f$ ) (cm)	قطر متوسط سنگ چین ( $D_{50}$ ) (mm)	دبی مورد آزمایش (L/s)
۱۷	۱۳/۲	۹/۵۲	۱۷
۱۸	۱۲	۱۲/۷	۱۷
۱۹	۱۴/۵	۹/۵۲	۲۰
۲۰	۱۲/۸	۱۲/۷	۲۰
۲۱	۱۶/۳	۹/۵۲	۲۳
۲۲	۱۵/۸	۱۲/۷	۲۳
۲۳	۱۹/۵	۹/۵۲	۲۸
۲۴	۱۷/۵	۱۲/۷	۲۸

جدول ۴- نتایج حاصل از آزمایشات در آستانه حرکت برای سنگ چین با  $G_s=1.51$ 

شماره آزمایش	عمق آب در پایین دست قوس ( $y_f$ ) (cm)	قطر متوسط سنگ چین ( $D_{50}$ ) (mm)	دبی مورد آزمایش (L/s)
۲۵	۱۵/۸	۱۲/۷	۱۷
۲۶	۱۳/۵	۱۹/۰۵	۱۷
۲۷	۱۷/۵	۱۲/۷	۲۰
۲۸	۱۵/۳	۱۹/۰۵	۲۰
۲۹	۱۹/۸	۱۲/۷	۲۳
۳۰	۱۷	۱۹/۰۵	۲۳
۳۱	۲۳/۸	۱۲/۷	۲۸
۳۲	۲۰/۱	۱۹/۰۵	۲۸

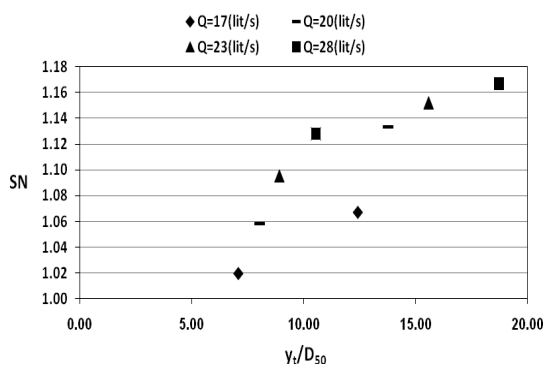
نسبی  $۲/۶۵$  و قطر متوسط  $۴/۷۵$  میلی‌متر و در دبی  $۲۸$  لیتر بر ثانیه و سنگ چین با چگالی نسبی  $۲/۶۵$  و قطر متوسط  $۱۹/۰۵$  میلی‌متر و دبی  $۱۷$  لیتر بر ثانیه می‌باشد. برای محاسبه مقدار خطا و مقایسه نتایج مدل در این تحقیق از شاخص‌های آماری ارایه شده در جدول ۵ استفاده شده است. در این جدول، شاخص‌های آماری به دست آمده از تحقیق حاضر نیز ارایه شده است. مقایسه این نتایج حاکی از ضریب همبستگی بالا و درصد خطای بسیار ناچیز است.

#### نتایج و نمودارهای حاصل از آنالیز ابعادی

تغییرات عدد پایداری ( $SV$ ) در برابر پارامتر بدون بعد  $(\frac{y_f}{D_{50}})$  برای نوع چگالی سنگ چین مورد استفاده در آزمایشات ( $G_s = 1.51, 2.05, 2.65$ ) در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود در هر دبی ثابت، با افزایش نسبت  $(\frac{y_f}{D_{50}})$  مقدار عدد پایداری نیز افزایش می‌یابد. مقایسه نمودارهای شکل ۳ تا ۵ نشان داد که در این تحقیق بیشترین و کمترین عدد پایداری در شرایط آستانه حرکت به ترتیب مربوط به سنگ چین با چگالی

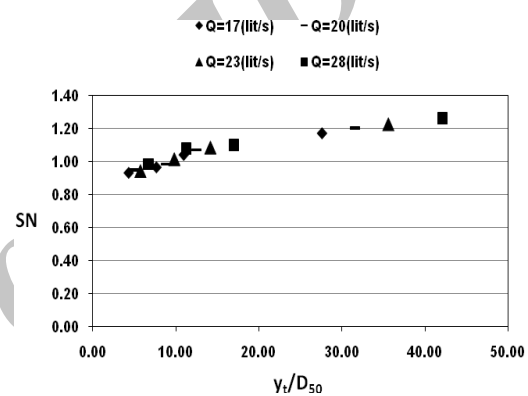
جدول ۵- ارایه نتایج آماری تحقیق حاضر و مقایسه با نتایج محققین پیشین

تحقیق ارایه شده	درصد خطای نسبی	مجموع مربع خطاها	ضریب همبستگی
تحقیق حاضر	۵/۸۰	۰/۰۰۷	۰/۹۷
معادله ۶- لاگاس و همکاران (۲۰۰۱)	۱۶/۰۴	۰/۰۱۶	۰/۹۴
معادله ۴- سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا (۱۹۹۴)	۱۶/۳۸	۰/۰۱۷	۰/۹۴
معادله ۱- سایمون و لويس (۱۹۷۱)	۲۶/۶۲	۰/۰۳۳	۰/۹۴
معادله ۳- پاگان- ارتیز (۱۹۹۱)	۴۱/۲۹	۰/۰۴۶	۰/۹۴
معادله ۲- پاگان- ارتیز (۱۹۹۱)	۷۶/۴۵	۰/۰۷۰	۰/۹۳

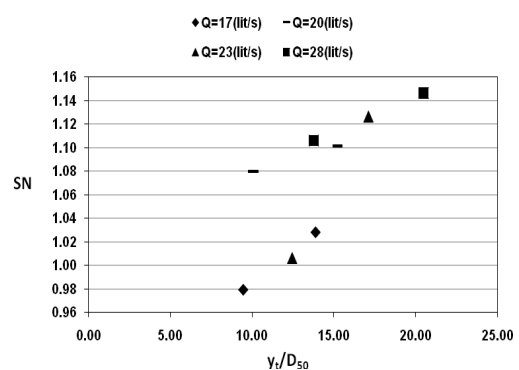


شکل ۵- تغییرات عدد پایداری ( $SN$ ) بر حسب  $(\frac{y_t}{D_{50}})$  در آستانه حرکت ( $G_s = 2.05$ )

مقایسه نتایج به دست آمده از این تحقیق با نتایج ارایه شده در بخش مقدمه که به منظور تخمین اندازه‌ی مناسب قطر سنگ‌چین در محل تکیه‌گاه پل در قوس رودخانه صورت گرفته است، نشان داد که نتایج به دست آمده توسط لاگاس و همکاران (۲۰۰۱) و سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا (۱۹۹۴) به دلیل درصد خطای کمتر، مطابقت بسیار خوبی را با نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد و می‌توان با در نظر گرفتن ضریب تصحیح ۰/۹۳ برای معادله لاگاس و همکاران و ضریب تصحیح ۰/۹۲۶ برای معادله ارایه شده توسط سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا، از این روابط علاوه بر کانال مستقیم برای طراحی سنگ



شکل ۳- تغییرات عدد پایداری ( $SN$ ) بر حسب  $(\frac{y_t}{D_{50}})$  در آستانه حرکت ( $G_s = 2.65$ )



شکل ۴- تغییرات عدد پایداری ( $SN$ ) بر حسب  $(\frac{y_t}{D_{50}})$  در آستانه حرکت ( $G_s = 2.65$ )



گیرد، استفاده از سنگ‌چین می‌باشد و همان‌طور که آنالیز آماری نشان می‌دهد معادله به دست آمده از نتایج این تحقیق با ضریب همبستگی بالا و درصد خطای ناچیز از دقت بسیار زیادی برای پیش‌بینی اندازه قطر ذرات سنگ‌چین در محل تکیه‌گاه پل در قوس رودخانه برخوردار است. همچنین نتایج به دست آمده توسط لاگاس و همکاران (۲۰۰۱) و سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا (۱۹۹۴)، به دلیل درصد خطای کمتر، مطابقت بسیار زیادی با نتایج تحقیق حاضر دارد و می‌توان با در نظر گرفتن ضریب تصحیح ۰/۹۳ برای معادله لاگاس و همکاران و ضریب ۰/۹۲۶ برای معادله ارایه شده توسط سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا، از این روابط علاوه بر کانال مستقیم برای طراحی سنگ‌چین در قوس نیز استفاده نمود که این ضرایب تصحیح، از مقایسه معادله ارایه شده توسط تحقیق حاضر با روابط ارایه شده توسط این محققین به دست آمده است.

### منابع

- ۱- رضائیا ع. شفاعی بجستان م. کاشفی پور س. م. و طالب‌بیدختی ن. ۱۳۸۸. بهینه‌سازی عرض و عمق قرارگیری تیغه افقی به منظور کنترل فرسایش در قوس‌های همگرای ۹۰ درجه. پایان نامه دکتری. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۳۷۰ ص.
- ۲- سپهوند ک. و شفاعی بجستان م. ۱۳۷۴. بررسی میزان عمق آب‌شستگی اطراف دیواره جانبی پل‌ها. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲۴۸ ص.
- ۳- صانعی م. ۱۳۸۵. بررسی آزمایشگاهی اثر درصد انسداد در آب‌شستگی موضعی آب‌شکن‌ها. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۴- قربانی ب. و حیدریور م. ۱۳۸۴. کنترل و کاهش آب‌شستگی موضعی با استفاده هم‌زمان از شکاف و سنگ‌چین. گزارش طرح تحقیقاتی بین دانشگاهی. دانشگاه شهرکرد و صنعتی اصفهان. ۱۱۲ ص.

چین در قوس نیز استفاده نمود که ضرایب تصحیح استخراج شده، از مقایسه روابط ارایه شده توسط این محققین با معادله ارایه شده توسط تحقیق حاضر به دست آمده است.

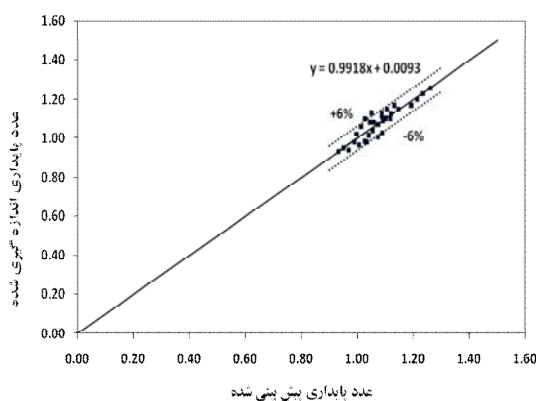
### نتایج

#### آنالیز آماری و استخراج معادله

برای دستیابی به معادله تخمین اندازه قطر ذرات سنگ-چین ( $D_{50}$ ) و با در نظر گرفتن نسبت  $(\frac{y_f}{D_{50}})$ ، از نتایج کلیه آزمایش‌های انجام شده استفاده گردید و پس از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی معادله (۱۰) استخراج شد:

$$\frac{V_c}{\sqrt{g(G_s - 1)D_{50}}} = .77 \left(\frac{y_f}{D_{50}}\right)^{.13} \quad (10)$$

در معادله (۱۰)،  $V_c$  و  $y_f$ : به ترتیب سرعت جریان و عمق آب در مسیر مستقیم پایین دست قوس در لحظه آستانه حرکت سنگ‌چین،  $g$ : شتاب ثقل،  $G_s$ : چگالی نسبی ذرات سنگ‌چین و  $D_{50}$ : قطر متوسط سنگ‌چین است. به منظور بررسی دقت معادله (۱۰)، مقادیر اندازه-گیری شده عدد پایداری (SN) در مقابل مقادیر به دست آمده عدد پایداری از معادله (۱۰) و نسبت به خط ۴۵ درجه در شکل ۶ ارایه شده است.



شکل ۶- معادله بین عدد پایداری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده

### نتیجه‌گیری

از آنجایی که یکی از متداول‌ترین اقداماتی که جهت حفاظت مستقیم سواحل و بستر رودخانه‌ها انجام می-

- at wing-wall abutments .ASCE. J. Hydraul. Eng. 133(11): 1265-1269.
- 14- Odgaard A.J. 1982. Bed characteristics in alluvial channel bends .ASCE. J. Hydraul.Div. 108(11):1268-1281.
- 15- Pagan-Ortiz J.E. 1991. Stability of rock riprap for protection at the toe of abutments located at the flood plain Rep. No. FHWA-RD-91-057. Federal Highway Administration U.S. Dept of Transportation Washington D.C.
- 16- Raudkivi A.J. and Ettema R. 1983. Clear-water scour at cylindrical piers.ASCE. J. Hydraul. Eng. 109(3):338-350.
- 17- Richardson E.V. and Davis S. R. 1995. Evaluating scour at bridges. Hydraulic Engineering Circular No. 18. 3rd Ed. Rep.No.FHWA-IP-90-017. Office of Technology Applications. HTA-22. Federal Highway Administration U.S. Dept. of Transportation. Washington D.C.
- 18- Shafai Bajestan M. 1991. Critical stability number in rock lined channels. J. Iran Agric. Res. 9(2): 121-138.
- 19- Simons D. B. and Lewis G.L. 1971. Flood protection at bridge crossings. C.S.U. Civil Engineering Rep. No. CER71-72DBS-GL10. prepared for the Wyoming State Highway Dept. in conjunction with the U.S. Dept of Transportation Washington D.C.
- 20- Yen C. 1970. Bed topography effect on flow in a meander .ASCE. J. Hydraul. Div. 96(1):57-73.
- 21- Zarrati A.R. Nazariha M. and Mashahir M. B. 2006. Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier groups using collars and riprap.ASCE. J. Hydraul. Eng. 132(2):154-162.
- ۵- کیخانی م. حیدرپور م. و موسوی س. ف. ۱۳۸۸. بررسی الگوی پوشش سنگ‌چین در محل احداث گروه پایه‌های استوانه‌ای در پل‌ها. مجله علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۱۳(۴۹):۱۳-۲۹.
- 6- Brown S. A. and Clyde E. S. 1989. Design of riprap revetment. Hydraulic Engineering Circular No. 11 (HEC-11). FHWA-IP-89-016. Washington D. C.
- 7- Engelund F. 1974. Flow and bed topography in channel bends .ASCE. J. Hydraul.Div. 100(11):1631-1648.
- 8- Ghodsian M. and Mousavi S.K. 2006. Experimental study on bed scour in a 90o channel bend. International Journal of Sediment Research. 21(4):321-328.
- 9- Kikkawa H. Ikeda S. and Kitagawa A. 1976. Flow and bed topography in curved open channels .ASCE. J. Hydraul. Div. 102(9):1342-1372.
- 10- Lagasse P. F. Zevenbergen L. W. Schall J. D. and Clopper P. E. 2001. Bridge scour and stream instability countermeasures Rep. No. FHWA-NHI-01-003. Hydraulic Engineering Circular No. 23. 2nd Ed. Office of Bridge Technology. Federal Highway Administration Washington D.C.
- 11- Melville B. W. and Coleman S. E. 2000. Bridge Scour. Water Resources Publications. Highlands Ranch. Colo.
- 12- Melville B. W. Van Ballegooy S. Coleman S. E. and Barkdoll B. 2006. Scour countermeasures for wing-wall abutments .ASCE. J. Hydraul. Eng. 132(6): 563-574.
- 13- Melville B.W. Van Ballegooy S. Coleman S. E. and Barkdoll B. 2007. Riprap size selection