

طراحی قطر سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه

مهوش منصوری هفشجانی

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری

محمود شفاعی بجمستان

استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

ایمیل نویسنده مسئول: ocpuqqtk00 B i o ckt00qo

تاریخ پذیرش: ۹۰/۳/۲۹

تاریخ دریافت: ۹۰/۱/۸

چکیده

فرسایش در قوس رودخانه به دلیل وجود جریان ثانویه نسبت به مسیر مستقیم تشدید می‌گردد، لذا توجه به موضوع فرسایش و کنترل و کاهش آن در این بخش از رودخانه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر ارائه رابطه برای تخمین قطر سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس رودخانه‌هاست. در این تحقیق ابتدا معادله بی‌بعد بر مبنای آنالیز ابعادی برای آستانه حرکت و آستانه شکست استخراج شد و سپس آزمایش‌ها با استفاده از سه نوع سنگ‌چین با چگالی‌های ۱/۵۱، ۲/۰۵، ۲/۶۵ و با قطرهای ۴/۷۵، ۹/۵۲، ۱۲/۷ و ۱۹/۰۵ میلی‌متر انجام شد. هر سنگ‌چین با استفاده از چهار دبی ۰/۰۱۷، ۰/۰۲۰، ۰/۰۲۳ و ۰/۰۲۸ مترمکعب بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت. هر آزمایش از عمق جریان بالا شروع شد و به تدریج عمق کاهش داده می‌شد تا زمانی که اولین حرکت در سنگ‌دانه‌ها مشاهده شود و در این لحظه مشخصات جریان به عنوان مشخصات آستانه حرکت اندازه‌گیری می‌گردید. شرایطی از جریان که در آن سنگ‌دانه‌ها به صورت گروهی شروع به حرکت می‌کردند آستانه شکست تعریف گردید و مشخصات جریان در این لحظه به عنوان مشخصات آستانه شکست اندازه‌گیری می‌شد. با استفاده از داده‌های به دست آمده، فرمول‌های طراحی قطر سنگ‌چین برای کنترل آب‌شستگی تکیه‌گاه پل در قوس رودخانه ارائه گردید. همچنین فرمول‌های ارائه شده توسط تحقیق حاضر با روابط ارائه 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 ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌چین، تکیه‌گاه پل، قوس رودخانه، آب‌شستگی، جریان ثانویه.

مقدمه

سمت پایین دست حمل می‌شوند که این عمل باعث توسعه حفره آب‌شستگی در محل استقرار تکیه‌گاه خواهد شد (غزل و همکاران ۱۳۸۸). بر اساس مطالعات سازمان بزرگراه‌های ایالات متحده در سال ۱۹۷۳، از تعداد ۳۸۳ مورد خرابی در پل‌ها، ۲۵٪ مربوط به خرابی پایه‌ها و ۷۲٪ مربوط به خرابی تکیه‌گاه‌ها بوده است. طبق بررسی‌های کانداسمی و ملویل در سال ۱۹۹۸، ۶ تا ۱۰ مورد تخریب پل در نیوزلند، ناشی از آب/شستگی در تکیه‌گاه آنها بوده است (صانعی ۱۳۸۵). قوس رودخانه به خاطر داشتن الگوی خاص جریان به نام جریان حلزونی، همواره مورد توجه مهندسين هیدرولیک

به فرسایش بستر و کناری آبراهه در اثر عبور جریان آب، به فرسایش بستر در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به علت شدت جریان زیاد و یا به فرسایش بستر در اثر به وجود آمدن جریان‌های متلاطم موضعی، آب‌شستگی گویند (شفاعی بجمستان ۱۳۸۷). پس از احداث پل به دلیل قرارگرفتن پایه‌های و تکیه‌گاه پل در مسیر جریان رودخانه تغییراتی در الگوی جریان در این محدوده به وجود می‌آید که منجر به تشکیل و توسعه جریان‌های گردابی می‌شود. این گرداب‌ها مواد اطراف تکیه‌گاه را از جای خود کنده و این مواد توسط جریان اصلی رودخانه به

$$\frac{D_{72}}{y} = \frac{2089}{(G_s - 3)} Fr^4 \quad * 1 +$$

پاگان- ارتیز (۱۹۹۱) روابط ۲ و ۳ را برای تکیه گاه با دیواره عمودی و تکیه گاه با دیواره نوک دایره ای ارائه داد: رابطه (۲): تکیه گاه با دیواره عمودی

$$\frac{D_{72}}{y} = \frac{3027}{(G_s - 3)^{20/3}} Fr^{3084}$$

رابطه (۳): تکیه گاه با دیواره نوک دایره ای "

$$\frac{D_{72}}{y} = \frac{20757}{(G_s - 3)} Fr^4$$

سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا^۱ (۱۹۹۴) به نقل از ملویل و کولمن (۲۰۰۰)، به منظور طراحی قطر مناسب سنگ چین در محل تکیه گاه پل رابطه ۴ را ارائه نمود:

$$\frac{D_{72}}{y} = \frac{30248}{(G_s - 3)} Fr^4$$

ریچاردسون و دیویس (۱۹۹۵)، بر اساس محدوده عدد فرود و با در نظر گرفتن فاکتوری به نام فاکتور شکل (K_s) که بر مبنای نوع تکیه گاه قابل تعریف است (۰/۸۹) برای تکیه / گاه با دیواره نوک دایره ای و ۱/۰۲ برای تکیه گاه با دیواره عمودی) رابطه ۵ را ارائه نمودند:

" (۵)

$$\frac{D_{72}}{y} = \frac{K_s}{(G_s - 3)} Fr^4 \quad Fr \leq 20$$

در تمامی معادلات شماره ۱ تا ۵، پارامتر D_{72} اندازه متوسط سنگ چین، y : عمق جریان، Fr : عدد فرود و G_s : چگالی مخصوص سنگ چین می باشد.

از تحقیقات انجام شده در ایران به منظور حفاظت پل در مقابل آب شستگی با استفاده از سنگ چین، می توان به تحقیق کیخانی و همکاران (۱۳۸۸) در رابطه با بررسی الگوی سنگ چین در محل احداث گروه پایه های پل ها

بوده است. با ورود جریان به قوس، نیروی گریز از مرکز به آن اثر می کند که این نیرو در راستای شعاع قوس و نیز در جهت عمق به خاطر تغییرات سرعت، متغیر می باشد. نیروی گریز از مرکز موجود در قوس باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می شود که سطح آب را در قوس بیرونی بالا برده و در قوس داخلی باعث کاهش عمق می شود. این پدیده باعث ایجاد گرادیان فشار جانبی در داخل مقطع خواهد شد. هرگاه گرادیان فشار مزبور بر نیروی گریز از مرکز غلبه کند، جریانی در جهت عرضی، داخل مقطع شکل می گیرد که به جریان ثانویه موسوم است. در اثر این جریان، ذرات موجود در سطح آب به طرف دیواره بیرونی حرکت کرده و ذرات موجود در کف به طرف دیواره داخلی جابه جا می شوند (غلامزاده محمودی و شفافی بجستان ۱۳۸۸). چیرای (۱۹۶۷) نشان داد که قدرت جریان ثانویه در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد قدرت جریان طولی است. وی همچنین نشان داد که در اثر اندرکنش جریان ثانویه با پروفیل غیریکنواخت سرعت طولی و شکل گرفتن جریان حلزونی، تغییرات زیادی در الگوی جریان در قوس نسبت به مسیر مستقیم ایجاد می گردد (رضانیا و همکاران ۱۳۸۸). در نتیجه وقتی شرایط خم در محلی ایجاد گردید، تغییر الگوی جریان در محل پل و بخصوص تکیه گاه واقع در ساحل خارجی قوس و همچنین وجود جریان حلزونی در قوس ممکن است باعث گردد تا تنش برشی موضعی در بستر در محل تکیه گاه نسبت به بازه مستقیم رودخانه متفاوت باشد. عمده مطالعات انجام شده در خم رودخانه ها، بیشتر بر شناسایی مکانیسم آب شستگی تأکید شده است که از جمله می توان به بین (۱۹۷۰)، انگلوند (۱۹۷۴)، کیکاوا و همکاران (۱۹۷۶)، ادگارد (۱۹۸۲) و قدسیان و موسوی (۲۰۰۶) اشاره کرد و مطالعات اندکی در مورد حفاظت سازه های واقع در قوس رودخانه ها انجام شده است. از جمله روش های ساده و در بسیاری مواقع اقتصادی برای حفاظت تکیه گاه پل در مقابل آب شستگی، استفاده از پوشش سنگ چین می باشد. از جمله دانشمندی که به طراحی قطر سنگ چین در محل تکیه گاه پل واقع در مسیر مستقیم پرداختند، می توان به موارد زیر اشاره نمود: سایمون و لویس (۱۹۷۱)، رابطه ۱ را به منظور طراحی قطر سنگ چین در محل تکیه گاه پل ارائه نمودند:

"

"OCwxtqcf u

"در رابطه ۶، V : سرعت جریان در پایین دست قوس، y_f : عمق آب در پایین دست قوس، g : شتاب ثقل، ρ_w : جرم حجمی آب، D_{72} : قطر متوسط سنگ چین و ρ_s : جرم مخصوص ذرات سنگ چین می باشد. بر اساس روش π باکینگهام، ۳ گروه بدون بعد $\pi_3 = \frac{gy_f}{V^4}$ ، $\pi_4 = \frac{D_{72}}{y_f}$ و $\pi_5 = \frac{\rho_s}{\rho_w}$ استخراج می گردد که عدد بی بعد π_3 به عدد فرود Fr اشاره دارد. بنابراین رابطه گروه های بدون بعد، به صورت معادله ۷ ارائه می گردد:

$$(V)f_4 * G_s \cdot \frac{D_{72}}{y_f} \cdot Fr = 2$$

در رابطه ۷ G_s : چگالی سنگ چین، D_{72} : قطر متوسط سنگ چین، y_f : عمق پایاب و Fr : عدد فرود می باشد.

مواد و روش ها

الف) فلوم: آزمایش ها در آزمایشگاه مدل دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، در فلومی با قوس ۹۰ درجه، عرض ۰/۴ متر، ارتفاع ۰/۷ متر، شیب کف صفر و شعاع انحنای متوسط ۰/۸ متر انجام پذیرفت. با توجه به این که انحنای نسبی (4) TID^* قوس ۲ می باشد این قوس در رده قوس های تند قرار می گیرد. فلوم شامل مخزن آرام کننده ورودی می باشد. طول مسیر مستقیم ورودی (از انتهای مخزن تا ابتدای قوس) برابر ۴ متر و مسیر مستقیم خروجی (از انتهای قوس تا انتهای فلوم) برابر ۲ متر می باشد، در انتهای فلوم از دریچه کشویی برای تنظیم سطح آب و از یک حوضچه جهت جمع آوری رسوبات فرسایش یافته و از یک سرزیر مثلثی لبه تیز با زاویه ۹۰ درجه برای اندازه گیری دبی استفاده شده است. شکل ۱ نشان دهنده پلان فلوم آزمایشگاهی می باشد.

اشاره کرد، نتایج تحقیق کیخائی و همکاران نشان داد که مساحت محدوده پوشش سنگ چین در گروه پایه ها برای هر پایه نسبت به تک پایه کاهش یافته است که یکی از امتیازات کاربرد سنگ چین برای حفاظت گروه پایه ها است. نتایج تحقیق زرانی و همکاران (۲۰۰۶) در محل گروه پایه های پل با استفاده از ترکیب سنگ چین و طوق، نشان داد که در دوپایه های در یک خط موازی با جهت جریان، استفاده از ترکیب سنگ چین و طوق پیوسته باعث کاهش آب شستگی در جلو و پشت پایه ها به ترتیب به میزان ۵۰ و ۶۰ درصد شده است.

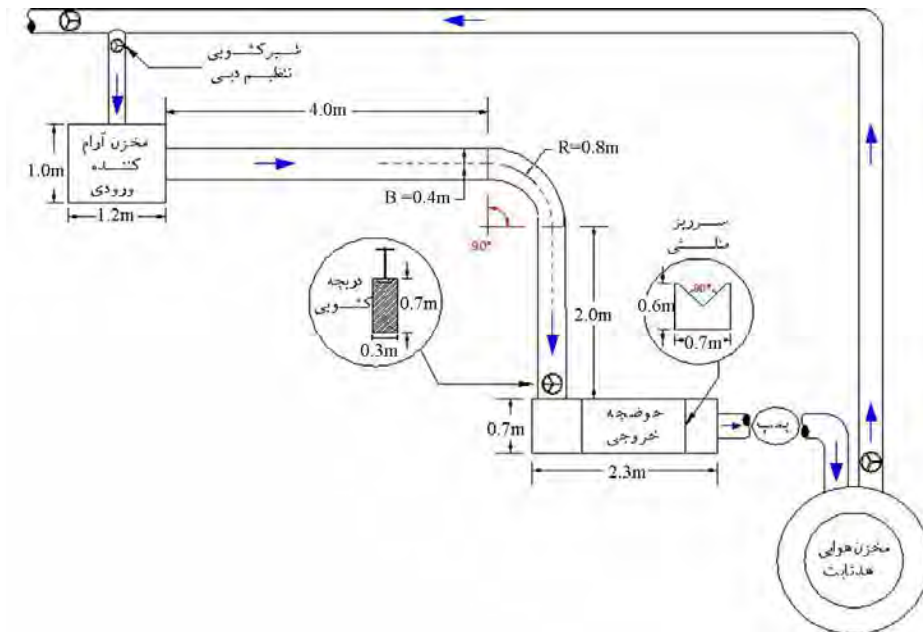
همچنین نتایج تحقیقات قربانی و همکاران (۱۳۸۴) به منظور کنترل و کاهش آب شستگی موضعی با استفاده از چهار اندازه سنگ چین و دو اندازه شکاف پایه نشان داد که وجود شکاف باعث مقاوم تر شدن و افزایش پایداری سنگ چین می گردد و این افزایش پایداری در شکاف بزرگ تر مشهودتر است.

در این تحقیق ابتدا معادله بی بعد بر مبنای آنالیز ابعادی برای آستانه حرکت و آستانه شکست استخراج شد و سپس آزمایش ها با استفاده از سه نوع سنگ چین با چگالی های ۱/۵۱، ۲/۰۵، ۲/۶۵ و با قطرهای ۴/۷۵، ۹/۵۲، ۱۲/۷ و ۱۹/۰۵ میلی متر انجام شد. هر سنگ چین با استفاده از چهار دبی ۰/۰۱۷، ۰/۰۲۰، ۰/۰۲۳ و ۰/۰۲۸ مترمکعب بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت.

آنالیز ابعادی

با صرف نظر کردن از پارامترهای ثابت در این تحقیق از جمله: شعاع انحنای متوسط قوس (۰/۸ متر)، انحنای نسبی قوس (4) TID^* ، عرض فلوم (۰/۴ متر)، موقعیت تکیه گاه در طول قوس (قرارگیری در زاویه ۷۵ درجه از ابتدای قوس) و نوع تکیه گاه، عوامل مؤثر بر پایداری سنگ چین را می توان با تابع زیر بیان کرد:

$$f_3 * V \cdot y_f \cdot g \cdot \rho_w \cdot D_{72} \cdot \rho_s = 2 \quad (6)$$



شکل ۱- پلان فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده "

ج) تکیه‌گاه و سنگ‌چین: با انجام آزمایش‌های مقدماتی مشخص گردید که بیشترین میزان آب‌شستگی در طول قوس، در زاویه ۷۵ درجه رخ داده است، بنابراین تکیه‌گاه در موقعیت ۷۵ درجه قوس خارجی قرار داده شد و با انجام آزمون و خطا مقدار درصد انسداد ۱۰٪ برای تکیه‌گاه انتخاب گردید. نوع تکیه‌گاه به کار رفته، تکیه‌گاه با دیواره بالدار ۴۵ درجه (67° Y lpi / Y cm' C dwo gpv) با ارتفاع ۰/۶۸ متر و از جنس پلکسی گلاس می‌باشد. همچنین سنگ‌چین‌های به کار رفته در این تحقیق، ۳ نوع ماده با چگالی‌های مختلف بوده که همه آنها تیز گوشه و با دانه‌بندی یکنواخت می‌باشند. مشخصات این سنگ‌چین‌ها در جدول ۱ ارائه گردیده است.

ب) رسوبات: به توصیه رادکیوی و اتما (۱۹۸۳)، برای جلوگیری از تشکیل ریپل، قطر متوسط ذرات باید از ۰/۷ میلی‌متر بزرگ‌تر باشد. همچنین بیشتر تحقیقات در مبحث آستانه حرکت با مصالح یکنواخت صورت گرفته است که از جمله آنها دیاگرام شیلدز می‌باشد که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی روی مصالح یکنواخت صورت گرفته است که برای حذف تأثیر غیریکنواختی رسوبات بر آب‌شستگی، انحراف معیار هندسی ذرات باید کمتر از ۱/۳ باشد (شفاعی بجستان ۱۹۹۱). برای برآورده شدن شرایط ذکر شده، رسوبات انتخاب شده برای آزمایش‌ها دارای اندازه متوسط ۱/۶۳ میلی‌متر و انحراف معیار هندسی $\sigma_g = 304$ می‌باشند. ضخامت مصالح بستر نیز ۰/۳۶ متر انتخاب گردید.

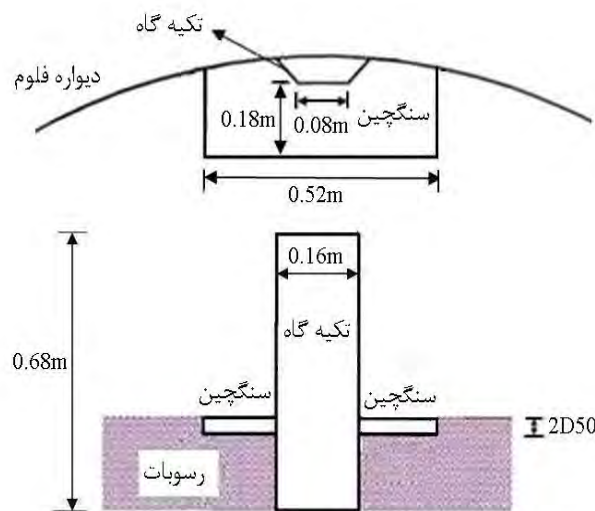
جدول ۱- مشخصات سنگ‌چین‌های به کار رفته در اطراف تکیه‌گاه

چگالی سنگ‌چین	اندازه متوسط سنگ‌چین (O O)
" ۲/۶۵	۱۹/۰۵ و ۱۲/۷، ۹/۵۲، ۴/۷۵
" ۲/۰۵	۱۲/۷ و ۹/۵۲
" ۱/۵۱	۱۹/۰۵ و ۱۲/۷

ابعاد گودال آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه انجام شد. در طی این آزمایش ۱۲ ساعته، عمق آب‌شستگی دماغه تکیه‌گاه و ساحل خارجی در فواصل زمانی معین به وسیله عمق‌سنج

برای تعیین وسعت سنگ‌چین (که برای تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است)، آزمایش بدون قرارگیری سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه به منظور بررسی حداکثر

شکل محدوده سنگ چین بر اساس مطالعات ملویل و همکاران (۲۰۰۷) به شکل مستطیلی و تراز آن، هم‌تراز با مصالح بستر در نظر گرفته شد. ضخامت لایه سنگ چین نیز با توجه به معیار ارائه شده توسط ملویل و همکاران (۲۰۰۷)، دو برابر قطر متوسط سنگ چین طراحی شد. ابعاد تکیه‌گاه و سنگ چین به کار رفته در اطراف آن در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- ابعاد تکیه‌گاه و سنگ چین به کار رفته در اطراف آن

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 و سپس دریچه را به آرامی باز کرده و مجدداً سطح سنگ چین به صورت چشمی بررسی می‌شد تا زمانی که آستانه شکست رخ دهد که شرایطی از جریان که ذرات سنگ چین به صورت گروهی شروع به حرکت می‌کردند \$آستانه شکست\$ تعریف گردید و در این لحظه عمق جریان در مسیر مستقیم پایین دست قوس به عنوان عمق آستانه شکست اندازه‌گیری می‌شد. در انتهای هر آزمایش، جریان ورودی قطع و فلوم زهکشی می‌شد. سپس ذرات سنگ چین جدا و بستر فلوم با مصالح مسطح و ذرات سنگ چین روی آن قرار می‌گرفتند و آزمایش با دبی دیگری انجام می‌گرفت. پس از تکمیل این آزمایش‌ها، اندازه و یا نوع مصالح تغییر و همان شرایط با ذره سنگی جدیدی تکرار می‌شد. شکل ۳ نشان‌دهنده آستانه شکست سنگ چین در پایان نمونه‌ای از آزمایشات می‌باشد.

اندازه‌گیری شد. پس از انجام آزمایش، مشخص گردید که حدود ۸۵ درصد آب‌شستگی در دو ساعت اول آزمایش به وقوع می‌پیوندد. بنابراین زمان آزمایش تعیین وسعت سنگ‌چین، دو ساعت در نظر گرفته شد و به ازای دبی حداکثر (۰/۰۲۸ مترمکعب بر ثانیه) و عمق جریان ۱۶ سانتی‌متر انجام شد. پس از انجام این آزمایش، وسعت سنگ چین برای انجام آزمایش‌ها مشخص گردید. همچنین

نحوه انجام آزمایشات: قبل از انجام هر گونه آزمایش ابتدا باید رسوبات درون فلوم آزمایشگاهی تسطیح گردد. سپس سنگ چین موردنظر به ضخامت $4D_{72}$ 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 پایین دست در پریودهای زمانی پانزده دقیقه به آهستگی کاهش داده شده و پس از هر بار کاهش عمق، شرایط جریان برای مدتی ثابت نگه داشته می‌شد تا تاثیر کاهش عمق به بالادست فلوم نیز برسد 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 سنگ چین به صورت چشمی بررسی می‌گردید. هر نوع حرکت ذرات سنگ چین اعم از لرزش، جابجایی کم و یا حرکت ممتد به سمت پایین دست ثبت می‌گردید. شرایط جریان را که در آن شرایط ذره سنگ چین از محل خود کنده شود و به



شکل ۳- آستانه شکست سنگچین در نمونه‌ای از آزمایشات

نتایج و بحث

پس از انجام آزمایش‌ها، به ازای هر عمق پایاب اندازه‌گیری شده، سرعت متوسط و عدد فرود جریان، در حالت آستانه حرکت و آستانه شکست محاسبه شد. مشاهدات نشان داد که به ازای هر اندازه قطر سنگچین ثابت، با افزایش دبی، عمق پایاب لازم جهت آستانه حرکت و آستانه شکست ذرات سنگچین افزایش می‌یابد. به ازای دبی ثابت Q ، با کاهش عمق پایاب، اندازه قطر سنگچین $+D_{72}^*$ که در آستانه حرکت و آستانه شکست قرار گرفته است نیز افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه اعماق پایاب جهت آستانه حرکت و آستانه شکست ذرات سنگچین با چگالی‌های مختلف نشان می‌دهد که هرچه چگالی ذرات

سنگچین بیشتر باشد، آستانه حرکت و آستانه شکست ذرات سنگچین در عمق پایاب پایین‌تری رخ می‌دهد. همچنین مشاهده سطح ذرات سنگچین در حین انجام آزمایش‌ها نشان داد که ناپایداری سنگدانه‌های اطراف تکیه‌گاه در تمامی آزمایشات ابتدا از دماغه پایین‌دست تکیه‌گاه آغاز شده و با کاهش عمق جریان به سمت بالادست دماغه کشیده می‌شود. مقادیر عدد فرود، سرعت متوسط جریان و عمق پایاب مربوط به آستانه حرکت و آستانه شکست به ازای کلیه دبی‌های آزمایشی و قطرهای چگالی‌های مورد استفاده برای ذرات سنگچین در جدول ۲ ارائه شده است.

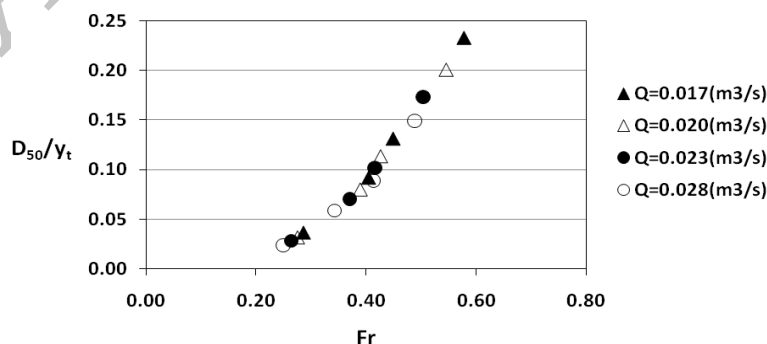
جدول ۲- نتایج حاصل از آزمایشات آستانه حرکت و آستانه شکست ذرات سنگچین

G_s	Q * $m^5/s+$	D_{72} * $mm+$	y_{tc} * $m+$	V_c * $m/s+$	Fr_c	y_{tf} * $m+$	V_f * $m/s+$	Fr_f
۲/۶۵	۰/۰۱۷	۴/۷۵	۰/۱۳۱	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۱۰	۰/۴۳	۰/۴۳
" ۲/۶۵	" ۰/۰۱۷	۹/۵۲	۰/۱۰۴	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۰۷۱	۰/۶۰	۰/۷۲
" ۲/۶۵	" ۰/۰۱۷	۱۲/۷	۰/۰۹۷	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۰۶۸	۰/۶۳	۰/۷۷
" ۲/۶۵	" ۰/۰۱۷	۱۹/۰۵	۰/۰۸۲	۰/۵۲	۰/۵۸	۰/۰۵۸	۰/۷۳	۰/۹۷
" ۲/۶۵	۰/۰۲۰	۴/۷۵	۰/۱۵	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۱۱۸	۰/۴۲	۰/۳۹
" ۲/۶۵	" ۰/۰۲۰	۹/۵۲	۰/۱۱۹	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۰۹	۰/۵۶	۰/۵۹
" ۲/۶۵	" ۰/۰۲۰	۱۲/۷	۰/۱۱۲	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۰۸	۰/۶۳	۰/۷۱
" ۲/۶۵	" ۰/۰۲۰	۱۹/۰۵	۰/۰۹۵	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۰۶۴	۰/۷۸	۰/۹۸
" ۲/۶۵	۰/۰۲۳	۴/۷۵	۰/۱۶۹	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۱۲۵	۰/۴۶	۰/۴۲
" ۲/۶۵	" ۰/۰۲۳	۹/۵۲	۰/۱۳۵	۰/۴۳	۰/۳۷	۰/۰۹۹	۰/۵۸	۰/۵۹
" ۲/۶۵	" ۰/۰۲۳	۱۲/۷	۰/۱۲۵	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۰۸۸	۰/۶۵	۰/۷۰
" ۲/۶۵	" ۰/۰۲۳	۱۹/۰۵	۰/۱۱	۰/۵۲	۰/۵۰	۰/۰۷۵	۰/۷۷	۰/۹۰
" ۲/۶۵	۰/۰۲۸	۴/۷۵	۰/۲۰	۰/۳۵	۰/۲۵	۰/۱۵۵	۰/۴۵	۰/۳۷
" ۲/۶۵	" ۰/۰۲۸	۹/۵۲	۰/۱۶۲	۰/۴۳	۰/۳۴	۰/۱۲	۰/۵۸	۰/۵۴

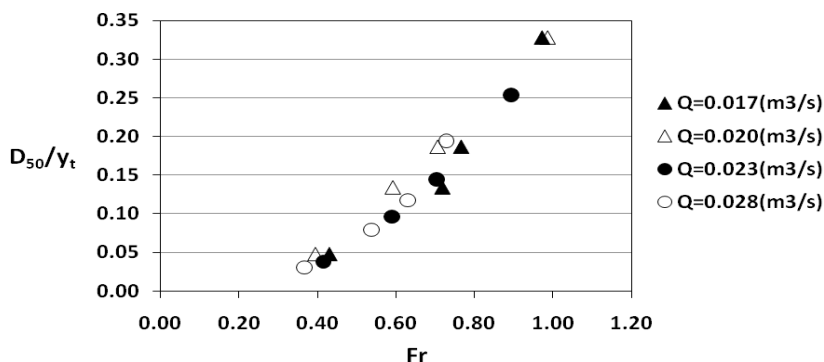
" ۲/۶۵ "	" ۰/۰۲۸ "	۱۲/۷	۰/۱۴۳	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۱۰۸	۰/۶۵	۰/۶۳
" ۲/۶۵ "	" ۰/۰۲۸ "	۱۹/۰۵	۰/۱۲۸	۰/۵۵	۰/۴۹	۰/۰۹۸	۰/۷۱	۰/۷۲
۲/۰۵ "	" ۰/۰۱۷ "	۹/۵۲	۰/۱۳۲	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۱۰	۰/۴۳	۰/۴۳
" ۲/۰۵ "	" ۰/۰۱۷ "	۱۲/۷	۰/۱۲	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۰۸۵	۰/۵۰	۰/۵۵
" ۲/۰۵ "	" ۰/۰۲۰ "	۹/۵۲	۰/۱۴۵	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۱۱	۰/۴۵	۰/۴۳
" ۲/۰۵ "	" ۰/۰۲۰ "	۱۲/۷	۰/۱۲۸	۰/۳۹	۰/۳۵	۰/۰۹۸	۰/۵۱	۰/۵۲
" ۲/۰۵ "	" ۰/۰۲۳ "	۹/۵۲	۰/۱۶۳	۰/۳۵	۰/۲۸	۰/۱۲	۰/۴۸	۰/۴۴
" ۲/۰۵ "	" ۰/۰۲۳ "	۱۲/۷	۰/۱۵۸	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۱۱۲	۰/۵۱	۰/۴۹
" ۲/۰۵ "	" ۰/۰۲۸ "	۹/۵۲	۰/۱۹۵	۰/۳۶	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۴۷	۰/۳۸
" ۲/۰۵ "	" ۰/۰۲۸ "	۱۲/۷	۰/۱۷۵	۰/۴۰	۰/۳۱	۰/۱۳۲	۰/۵۳	۰/۴۷
۱/۵۱ "	" ۰/۰۱۷ "	۱۲/۷	" ۰/۱۵۸	۰/۲۷	۰/۲۲	" ۰/۱۲	۰/۳۵	۰/۳۲
" ۱/۵۱ "	" ۰/۰۱۷ "	۱۹/۰۵	۰/۱۳۵	۰/۳۱	۰/۲۷	۰/۱۰۵	۰/۴	۰/۳۹
" ۱/۵۱ "	" ۰/۰۲۰ "	۱۲/۷	۰/۱۷۵	۰/۲۹	۰/۲۲	۰/۱۴	۰/۳۶	۰/۳۰
" ۱/۵۱ "	" ۰/۰۲۰ "	۱۹/۰۵	۰/۱۵۳	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۱۱۵	۰/۴۳	۰/۴۱
" ۱/۵۱ "	" ۰/۰۲۳ "	۱۲/۷	۰/۱۹۸	۰/۲۹	۰/۲۱	۰/۱۶	۰/۳۶	۰/۲۹
" ۱/۵۱ "	" ۰/۰۲۳ "	۱۹/۰۵	۰/۱۷	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۱۳۲	۰/۴۴	۰/۳۸
" ۱/۵۱ "	" ۰/۰۲۸ "	۱۲/۷	۰/۲۳۸	۰/۲۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۳۷	۰/۲۷
" ۱/۵۱ "	" ۰/۰۲۸ "	۱۹/۰۵	۰/۲۰۱	۰/۳۵	۰/۲۵	۰/۱۶۵	۰/۴۲	۰/۳۳

حالت آستانه حرکت و آستانه شکست و برای هر ۳ نوع چگالی سنگ چین مورد استفاده افزایش می‌یابد. شکل‌های ۴ و ۵ مقادیر عدد فرود محاسبه شده از نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر را در برابر پارامتر بدون بعد $\frac{D_{72}}{y_t}$ در شرایط آستانه حرکت و آستانه شکست سنگ چین با چگالی ۲/۶۵ و به ازای دبی‌های مورد استفاده در آزمایشات (۰/۰۱۷، ۰/۰۲۰، ۰/۰۲۳، ۰/۰۲۸ و مترمکعب بر ثانیه) نشان می‌دهند.

در جدول ۲، پارامتر G_s : چگالی ذرات سنگ چین، Q : دبی جریان، D_{72} : قطر متوسط سنگ چین، y_{tc} و y_{tf} : به ترتیب عمق پایاب در حالت آستانه حرکت و آستانه شکست، Fr_c : عدد فرود آستانه حرکت، Fr_f : عدد فرود آستانه شکست، V_c و V_f : سرعت جریان به ترتیب در حالت آستانه حرکت و آستانه شکست می‌باشند. بررسی پایداری سنگ چین بر اساس عدد فرود جریان: نتایج آزمایشات این تحقیق نشان داد که در هر دبی ثابت، با افزایش مقدار عدد فرود جریان، نسبت $\frac{D_{72}}{y_t}$ در هر دو



شکل ۴- تغییرات $\frac{D_{72}}{y_t}$ بر حسب عدد فرود در آستانه حرکت سنگ چین با $G_s = 4087$



شکل ۵- تغییرات $\frac{D_{72}}{y_t}$ بر حسب عدد فرود در آستانه شکست سنگ‌چین با $G_s = 487$

(۸) شرایط آستانه حرکت:

$$\frac{D_{72}}{y_t} = \frac{3085}{(G_s - 3)^{3084}} Fr^{4076}$$

(۹) شرایط آستانه شکست:

$$\frac{D_{72}}{y_t} = \frac{207}{(G_s - 3)^{3089}} Fr^{4045}$$

آنالیز آماری و مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج محققین

پیشین:

جدول ۳ مجموع مربع خطاهای TOUG* نتایج به دست آمده از رابطه ۸ و ۹ و همچنین روابط ارائه شده توسط محققین پیشین نسبت به داده‌های مشاهده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

جدول ۳- ارائه نتایج آماری تحقیق حاضر و مقایسه با نتایج محققین پیشین

تحقیق ارائه شده	TOUG*(آستانه حرکت)	TOUG*(آستانه شکست)
تحقیق حاضر	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲
سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا (۱۹۹۴)	۰/۰۱۷	۰/۱۴۱
سایمون و لویس (۱۹۷۱)	۰/۰۳۳	۰/۰۴۴
پاگان - ارتیز (۱۹۹۱) (تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای)	۰/۰۴۶	۰/۰۱۳
پاگان - ارتیز (۱۹۹۱) (تکیه‌گاه با دیواره عمودی)	۰/۰۷۰	۰/۲۱۰

استخراج رابطه:

در این قسمت داده‌های حاصل از آزمایش‌ها بر مبنای معادله‌ی بی بعد شماره ۷ مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای دستیابی به رابطه تخمین اندازه قطر ذرات سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه پل واقع در قوس، از نتایج کلیه آزمایش‌های انجام شده استفاده گردید و به منظور ایجاد رابطه مناسب بین پارامترهای عدد فرود جریان Fr^* ، نسبت قطر سنگ‌چین به عمق پایاب $\frac{D_{72}}{y_t}$ و چگالی سنگ چین G_s^* ، پس از تحلیل داده‌های آزمایشگاهی در نرم افزار URUU رابطه ۸ از نتایج حاصل از آزمایشات آستانه حرکت و رابطه ۹ از نتایج آزمایشات آستانه شکست ذرات سنگ‌چین استخراج شد. مقدار ضریب همبستگی این دو رابطه $T^4 = 0/97$ می‌باشد.

ثابت Q ، با کاهش عمق پایاب، اندازه قطر سنگ/چین $+D_{72}$ * که در آستانه حرکت و آستانه شکست قرار گرفته است افزایش می‌یابد.

۳- بر اساس آنالیز ابعادی روابط مناسب برای طراحی قطر سنگ‌چین در دو حالت آستانه حرکت و آستانه شکست ارائه گردید که روابط ارائه شده ضمن سادگی و داشتن ضریب همبستگی بالا، کلیه عوامل موثر در پایداری سنگ/چین را در بر دارند. روابط ارائه شده مبتنی بر عدد فرود جریان، نسبت قطر سنگ‌چین به عمق پایاب و چگالی مخصوص ذرات سنگ‌چین می‌باشند.

۴- مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات محققین پیشین نشان داد که نتایج به دست آمده توسط سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا (۱۹۹۴) و نتایج به دست آمده توسط پاگان-ارتیز (۱۹۹۱) (تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای)، مطابقت بسیار خوبی را به ترتیب با نتایج آستانه حرکت و نتایج آستانه شکست این تحقیق نشان می‌دهند. همچنین به منظور استفاده از این روابط در قوس رودخانه، ضرایب تصحیح مناسب ارائه گردید.

تشکر و قدردانی

از مسئولین دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران که امکانات لازم برای انجام این تحقیق را در اختیار نویسندگان قرار دادند و از مهندس وحید گریج که در انجام آزمایش‌ها کمک کردند، قدردانی می‌شود.

مقایسه نتایج به دست آمده از این تحقیق با نتایج ارائه شده در بخش مقدمه، نشان داد که نتایج به دست آمده توسط سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا (۱۹۹۴) و نتایج به دست آمده توسط پاگان-ارتیز (۱۹۹۱) (تکیه‌گاه با دیواره نوک دایره‌ای) به دلیل درصد خطای کمتر، مطابقت بسیار خوبی را به ترتیب با نتایج آستانه حرکت و نتایج آستانه شکست تحقیق حاضر نشان می‌دهند و می‌توان با در نظر گرفتن ضریب تصحیح $0/93$ برای رابطه ارائه شده توسط سازمان حمل و نقل و ترافیک راه نیوزلند و استرالیا و ضریب تصحیح $0/96$ برای رابطه ارائه شده توسط پاگان-ارتیز، از این روابط علاوه بر کانال مستقیم برای طراحی سنگ‌چین در اطراف تکیه‌گاه واقع در قوس‌های تند نیز استفاده نمود.

نتیجه‌گیری:

با بررسی مطالعات پیشین و انجام آنالیز ابعادی، پارامترهای بدون بعد موثر بر پایداری سنگ‌چین شناسایی و آزمایش‌ها بر مبنای آنها انجام شد. در زیر نتایج تحقیق به صورت خلاصه آورده شده است:

۱- مشاهده ذرات سنگ‌چین در حین انجام آزمایش‌ها نشان داد که در تمامی آزمایش‌ها، ناپایداری سنگ‌دانه‌ها از دماغه پایین دست تکیه‌گاه شروع شده و با کاهش عمق جریان به بالادست دماغه کشیده می‌شود.

۲- به ازای هر اندازه قطر سنگ‌چین ثابت، با افزایش دبی، عمق پایاب لازم جهت آستانه حرکت و آستانه شکست ذرات سنگ‌چین افزایش می‌یابد. همچنین به ازای دبی

منابع

- ۱- رضایع. شفاعی بجستان م. کاشفی پور س. م. طالب بیدختی 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. ۳۷۰ص.
- ۲- شفاعی بجستان م. ۱۳۸۷. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. دانشگاه شهید چمران. ۵۴۹ص.
- ۳- صانعی م. ۱۳۸۵. بررسی آزمایشگاهی اثر درصد انسداد در آب‌شستگی موضعی آب‌شکن‌ها. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۴- غزل ا. منتصری م. وجدانی ن. ۱۳۸۸. ارزیابی روابط عمق آب‌شستگی موضعی در محل تکیه‌گاه‌های پل. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۵- غلامزاده محمودی م. شفاعی بجستان م. ۱۳۸۸. عملکرد طوقه در کاهش نرخ آب‌شستگی پایه استوانه‌ای پل‌ها در قوس رودخانه. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز.

۶- قربانی ب. حیدرپور م. ۱۳۸۴. کنترل و کاهش آبهستگی موضعی با استفاده همزمان از شکاف و سنگ چین. گزارش طرح تحقیقاتی بین دانشگاهی. دانشگاه شهرکرد(شهرکرد) و صنعتی اصفهان(اصفهان). ۱۱۲ص.

۷- کیخانی م. حیدرپور م. موسوی س. ف. ۱۳۸۸. بررسی الگوی پوشش سنگ چین در محل احداث گروه پایه های استوانه ای در پل ها. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۳(۴۹):۱۳-۲۹.

: -"Gpi gnwpf "H0'3; 960'Hnqy "cpf "dgg"vqr qi tcr j {"kp"ej cppgn'dgpf u"(CUEG0'LO'J {f tcrw0F kx0' 322*33+3853/386: 0' ; -"I j qf ukcp"O 0"cpf "O qwucxk'UOM0'42280'Gzr gtlc gpvcr'uuf {"qp"dgg"ueqwt"kp"e"; 2q"ej cppgn' dgpf 0'kvgtpcvkapcn'lwtpcn'qh'Ugf ko gpv'Tgugctej 0'43*6+543/54: 0' 32-"Mknmcy c"J 0"knf c"U0"cpf "Mkci cy c"C0'3; 980'Hnqy "cpf "dgg"vqr qi tcr j {"kp"ewtxgf "qr gp" ej cppgn'(CUEG0'LO'J {f tcrw0F kx0'324*+3564/35940' 33-" O gnxknq" D0' Y 0" Eqrgo cp" U' G0' 42220' Dtkf i g" Ueqwt0' Y cvgt "T guqwtegu" Rwdrlccvkapu0' J ki j rcpf u"Tepej 0'Eqm0' 34-"O gnxknq" D0' Y 0" Xcp" Dcmgi qq{ "U0' Eqrgo cp" U' G0" cpf "Dctnf qm' D0' 42290' Tkr tcr "uk' g" ugrcvkap" cv' y kpi /y cm'cdwo gpw'(CUEG0'LO'J {f tcrw0'Gpi 0355*33+3487/348; 0' 35-"Qf i cctf "C0'LO'3; : 40'Dgg "ej ctcevgtknkcu'kp"cmxkn'ej cppgn'dgpf u'(CUEG0'LO'J {f tcrw0F kx0' 32: *33+348: /34: 30' 36/"Rci cp/Qtk' "LO'G0'3; ; 30'Ucdk'{"qh"tqem'tkr tcr "hqt"r tqvkap"cv'vj g"vqg"qh'cdwo gpw' mcevgf "cv'vj g"hnqf "r nkp" Tgr 0' P q0' HJ Y C/TF /; 3/2790' Hgf gten' J ki j y c {"Cf o kpkntcvkap" WUOF gr v'qh'Vtcur qtvcvkap" Y cuj kpi vqp'F 0' 37/"Tew nkk' C0'LO" cpf "Gwgo c" T0'3; : 50' Engct/y cvgt "ueqwt" cv'e {rkpf tkecn'r kgtu'(CUEG0'LO' J {f tcrw0'Gpi 032; *5+55: /5720" 38/" Tlej ctf uqp" G0' X0" cpf " F cxku" U' T0' 3; ; 70' Gxcmcvkpi " ueqwt" cv' dtkf i gu0' J {f tcrwle" Gpi kpggtkpi " Ektewrt" P q0' 3: 0' 5tf " Gf0' Tgr (P q0' HJ Y C/RR; /2/2390' hleg" qh' Vgej pqm { " Crr rncvkapu0' J VC/440' Hgf gten' J ki j y c {"Cf o kpkntcvkap" WUO' F gr v' qh' Vtcur qtvcvkap0' Y cuj kpi vqp'F 0' 39/"Uj chck Dclgucp"O 0'3; ; 30'Etkkecn'ucdk'{"pwo dgt "kp"tqem'rkpgf "ej cppgn'LO'Kcp"Ci tke0' Tgu0'; *4+343/35: 0' 3: /"Uko qpu" F 0'D0" cpf "Ngy ku" I 0'N0'3; 930'Hnqf "r tqvkap"cv'dtkf i g"etqukpi u0'E(UOW)Ekkn' Gpi kpggtkpi "Tgr 0' P q0' EGT93/94F DU/I N320'r tgr ctgf "hqt"vj g"Y {qo kpi "Ucvg" J ki j y c {"F gr v' kp"eqplwepkap"y kj "vj g" WUOF gr v'qh'Vtcur qtvcvkap" Y cuj kpi vqp'F 0' 3; /" [gp" E0'3; 920'Dgg "vqr qi tcr j {"ghge"v"qp"hnqy "kp" c"o gcpcf gt"(CUEG0'LO'J {f tcrw0'F kx0' ; 8*3+79/950' 42/"\ cttck' C0'T0" P c' ctkj c"O 0" cpf "O cuj cj k" O 0'D0' 42280' Tgf wvkap" qh' mcecn' ueqwt "kp"vj g" xk'k' {"qh"dtkf i g"r kgt"i tqw u" wukpi "eqmtu" cpf "tkr tcr (CUEG0'LO'J {f tcrw0'Gpi 0'354*4+376/ 3840'

”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”
”



"
"
"
"
"
"

F guki p'qh'Tkr tcr 'Uk'g'cv'Dtkf i g'Cdwo gpv'lp'c'Tkxgt 'Dgpf "

" Cdwtcev

Ueqwtkpi y km'dg" kpv'pukhgf " cv' yj g' tkxgt" dgpf " f wq" vj g' gzkukpi " qh" ugeqpf ct { " hmy " kp" eqo r ctkuqp" y kj " utcki j v'ej cpgnu' uq' c'wgpv'kqp" vj yj g' gtqkqp" cpf " ku" eqvtqn' cpf " o kki cvkqp" cv' yj ku" r ctv'qh' tkxgt " ku' xgt { " ko r qtvcv'0'Vj g' r t'gugpv' r cr gt " ku" cko gf " vj" uwf { " cpf " f guki p" yj g' tkr tcr " f lco gygt " cv' dtkf i g' cdwo gpv' lp' c" tkxgt " dgpf 0' k' yj ku" uwf { " htuv' c" i gpgtcr' pqp" f ko gpukqpcn' tgrv'kpuj kr " y cu' f gxgnr gf " dcugf " qp" f ko gpukqpcn' cpcn' uku' cv' yj g' r qkpv' qh' kpek kgpv' o qv'kqp" cpf " kpek kgpv' hckwt g'0'Vj gp' gz' v'pukxg' v'guv' y gtg' eqpf vevgf " wukpi " yj tgg' v' r gu' qh' tkr tcr " y kj " ur gekhe" i t'cxk' qh' 3073. "4027" cpf "4087" cpf "uk' gu' qh' 607. "; 074. "340" cpf "3; 027" o knko gygt 0' Gcej " tkr tcr " eqpf vevgf " wpf gt " hqt " f hgt gpv' f k' e j cti gu' qh' 2039. "2042. "2045" cpf "204: " o 5 lu' Gcej " v'guv' y cu' uctv'gf " hto " j ki j " hmy " f gr vj " cpf " i tcf wcm' " rny gtgf " wvki' yj g' htuv' f kur r'ego gpv' qh' t'qen' y cu' qdugt xgf 0' Vj g' hmy " ej ctcev' tkuk' eu" cv' yj ku" r qkpv' y gtg' tgeqtf gf " cu" kpek kgpv' o qv'kqp' kpek kgpv' hckwt g' f gh' k' gf " y j gp' cm' t'qemu" ctg' k' p" o qv'kqp' 0' Crr n' kpi " yj g' qd' v' k' p' gf " f cv. " hto w'cu" y gtg' f gxgnr gf " vj" dg' cr r' d'cdng' hqt " f guki p' qh' t'qem' uk' g' v' q' eqvtqn' qh' Ueqwt' dtkf i g' cdwo gpv' cv' tkxgt " dgpf 0' Vj g' hto w'cu" f gxgnr gf " kp" yj ku' t'gugctej " y gtg' eqo r ctgf " y kj " hto w'cu" qh' gct' r' k' gt " uwf k' gu' qp" tkr tcr " cv' cdwo gpv' hqt " utcki j v'ej cpgnu' cpf " uk' c' dng' " eqtt ge' v' k' p' " eqgh' k' k' p' w' y gtg' uwi i gu' gf " hqt " yj g' u' g' t' g' r' v' k' p' u' v' q' dg' cr r' d'cdng' cv' tkxgt " dgpf 0' "

Mg{y qtf u' Dtkf i g' cdwo gpv. Tkr tcr. Tkxgt dgpf. Ueqwtkpi. Ugeqpf ct { " hmy 0'

