

تخمین اندازه سنگچین پایدار به منظور جلوگیری از پیشرفت آبشستگی در پایاب حوضچه آرامش (مطالعه موردی: سد نمرود)

حمید تائبی^۱، منوچهر فتحی مقدم^{۲*} و محمود شفاعی بجمستان^۳

چکیده

آبشستگی موضعی پایین دست حوضچه‌های آرامش پدیده‌ای است که به دلیل سرعت موضعی جریان بیش از حد آستانه حرکت سنگچین رخ می‌دهد. بر اثر این پدیده اختلاف ارتفاعی موضعی بین کف بتنی حوضچه و بستر رودخانه به وجود می‌آید. برای دستیابی به اندازه سنگچینی که بتواند در برابر جریان متلاطم خروجی از حوضچه پایدار بماند و مانع پیشرفت آبشستگی شود، از مدل هیدرولیکی سد نمرود استفاده شد. آزمایش‌ها با دبی‌های مختلف، اعماق پایاب و اختلاف ترازهای متفاوت بین کف بتنی حوضچه و بستر پایین دست اجرا شد. نتایج نشان می‌دهند با افزایش عمق بحرانی، قطر ذره سنگچینی که بتواند در برابر جریان خروجی از حوضچه مقاومت کند، افزایش می‌یابد. همچنین با اضافه شدن عمق فرسایش یافته و کاهش پایاب قطر، سنگچین بزرگتری لازم دارد. با استفاده از روابط و نمودارهای ارائه شده در این تحقیق، با داشتن دبی جریان و عمق پایاب می‌توان اندازه سنگچین پایدار را برای اختلاف ترازهای متفاوت بین کف حوضچه و بستر پایین دست تخمین زد.

واژه‌های کلیدی: حوضچه آرامش، آبشستگی، عمق پایاب، سنگچین، آستانه حرکت.

ارجاع: تائبی ح. فتحی مقدم م. و شفاعی بجمستان م. ۱۳۹۰. تخمین اندازه سنگچین پایدار به منظور جلوگیری از پیشرفت آبشستگی در پایاب حوضچه آرامش (مطالعه موردی: سد نمرود). مجله پژوهش آب ایران. ۵(۸): ۲۳-۳۲.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- دانشیار دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

*نویسنده مسئول: fathi49@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۲۱

مقدمه

از جمله مکان‌هایی که معمولاً در معرض گودشدن بستر (فرسایش) قرار می‌گیرد، محدوده پایین دست سدهای مخزنی است، زیرا سدهای مخزنی تا ۹۹٪ از رسوبات حمل شده توسط رودخانه را در پشت خود نگه می‌دارند و در نتیجه آب تقریباً بدون رسوب از سد به پایین دست جاری خواهد شد. از آنجا که قبل از ساخت سد، رودخانه با بستر و نرخ انتقال رسوب به تعادل رسیده است لذا بعد از ساخت سد و قطع ارتباط انتقال رسوب از بالادست به پایین دست سد، منبع رسوب موردنیاز جریان برای رسیدن به تعادل نسبی، بستر رودخانه در پایین دست سد خواهد بود. بنابراین همواره بعد از ساخت سدها شاهد افت بستر رودخانه و به تبع آن ایجاد اختلاف تراز بین کف حوضچه آرامش و رودخانه پایین دست هستیم. مثلاً شکل ۱ نمایی از سد انحرافی جعفرآباد را پس از ساخت و ۳ سال پس از بهره‌برداری نشان می‌دهد. شدت آبشستگی در این سد به اندازه‌ای بوده است که بستر پایین دست حوضچه ۲/۵ متر نسبت به کف حوضچه پایین رفته است.

به وجود آمدن اختلاف ارتفاع بین کف حوضچه و بستر پایین دست می‌تواند بر اثر آبشستگی موضعی پایین دست حوضچه‌های آرامش نیز باشد. آبشستگی موضعی پایین دست حوضچه‌های آرامش پدیده‌ای طبیعی است که به دلیل وجود سرعت محلی بیش از سرعت آستانه حرکت (سرعت بحرانی) به وجود می‌آید (شفاعی بجستان، ۱۳۷۸).

تحقیقات متعددی در مورد حفاظت بسترهای پایین دست سازه‌های آبی توسط دانشمندان و محققان مختلف صورت گرفته است. رایس و کادوی (۱۹۹۲) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی معیاری برای انتخاب قطر مناسب سنگچین ارائه کرده‌اند. آن‌ها ابتدا با ریختن ماسه بتنی ($D_{50}=0.74\text{mm}$) در پایین دست حوضچه‌های آرامش (بدون ریختن سنگچین) شکل فرسایش و حداکثر عمق آبشستگی را اندازه‌گیری نمودند و براساس نتایج آزمایشگاهی طول و ضخامت لایه لازم را برای سنگچین انتخاب کردند. آن‌ها براساس نتایج آزمایشگاهی رابطه زیر را به دست آورده‌اند:

$$\frac{D_{50}}{d_c} = \left[\left(\frac{D_{50}}{d_c} \right)_{pk} - \left(\frac{D_{50}}{d_c} \right)_{\min} \right] \times e^{-\left\{ \left[\left(\frac{y_t}{d_c} \right) - \left(\frac{y_t}{d_c} \right)_{pk} \right]^2 \right\} / \sigma^2} + \left(\frac{D_{50}}{d_c} \right)_{\min} \quad (1)$$

که در آن d_c عمق بحرانی جریان در آبشار، y_t فاصله رقومی ارتفاعی آب پایاب تا رقوم کف آبشار، $\left(\frac{D_{50}}{d_c} \right)_{pk}$ مقدار

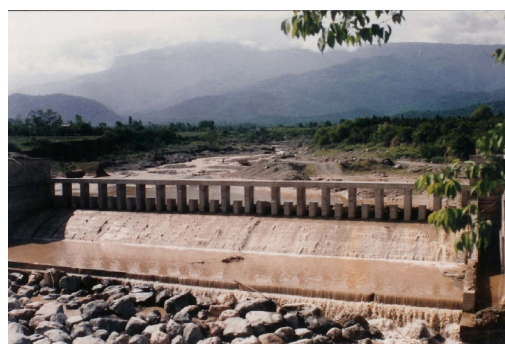
حداکثر $\left(\frac{D_{50}}{d_c} \right)$ به‌ازای y/d_c معین، $\left(\frac{y_t}{d_c} \right)_p$ مقدار

$\left(\frac{D_{50}}{d_c} \right)_{pk}$ به‌ازای $\left(\frac{D_{50}}{d_c} \right)_{pk}$ ، $\left(\frac{D_{50}}{d_c} \right)_{\min}$ حداکثر قطر

توصیه شده برای سنگچین σ تابعی از $\frac{y}{d_c}$ که همانند انحراف استاندارد در معادله توزیع نرمال یا تعیین گستردگی منحنی می‌باشد.

رایس و کادوی یک رابطه خطی بین $\left(\frac{D_{50}}{d_c} \right)$ با $\left(\frac{y}{d_c} \right)$ به صورت زیر برقرار کرده‌اند:

$$\left(\frac{D_{50}}{d_c} \right)_{pk} = \left[0.054 + 0.051 \left(\frac{y}{d_c} \right) \right] \quad (2)$$



(الف)



(ب)

شکل ۱- نمایی از سد انحرافی جعفرآباد (الف) پس از ساخت و (ب) ۳ سال پس از بهره‌برداری

نیل معادله‌ای به صورت زیر بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی به دست آورد (نیل، ۱۹۶۸):

$$\frac{\rho V^2}{g(\rho_s - \rho)D_{50}} = 2\left(\frac{D_{50}}{d}\right)^{-1/3} \quad (۶)$$

بوگاردی معادله‌ای به صورت زیر اثبات کرد (بوگاردی، ۱۹۶۸):

$$\frac{V}{\left[g\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)d\right]^{0.5}} = 1.7\left(\frac{d}{D_{50}}\right)^{-0.405} \quad (۷)$$

ماینورد برای ذرات سنگی واقع در بستر کانال و شرایط آستانه حرکت معادله‌ای به صورت زیر به دست آورد (ماینورد، ۱۹۸۷):

$$\frac{D_{30}}{d} = 0.3 \left[\left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{0.5} \frac{V}{\sqrt{gd}} \right]^{2.5} \quad (۸)$$

هدف از این تحقیق، بررسی اثرات عمق پایاب و اختلاف تراز کف حوضچه آرامش با بستر پایین دست بر آستانه حرکت سنگچین‌های پایین دست حوضچه است. استفاده موردی این تحقیق جهت تخمین حداقل قطر سنگچینی است که بتواند در پایین دست حوضچه آرامشی که قبلاً دچار فرسایش شده، پایدار بماند و مانع از پیشرفت آبستتگی شود.

مواد و روش‌ها

مشخصات مدل فیزیکی

برای دستیابی به قطر مناسب مواد سنگچین در پایین دست فرسایش یافته حوضچه آرامش از مدل هیدرولیکی سد نمرود که با مقیاس ۱/۴۰ در مؤسسه تحقیقات آب (وزارت نیرو) نصب گردیده است، استفاده شد. این مدل از اجزای مختلفی به شرح زیر تشکیل شده است:

کانال هدایت جریان، آستانه اوجی شکل، کانال تندآب، حوضچه آرامش تیپ ۲ USBR، محدوده پایین دست، دریچه تنظیم عمق آب پایین دست و مصالح بستر و سنگچین.

مواد بستری از جنس شن با قطر مشخصه $D_{50} = ۴/۲$ میلیمتر در مدل (۱۷/۰ متر در نمونه واقعی) می باشد. قطر متوسط سنگچین‌های به کار رفته ۱۳، ۲۰، ۳۱ و ۴۰ میلیمتر در مدل می باشد که در سطح فوقانی مواد بستری و به طور یکنواخت استقرار یافته است. منحنی دانه بندی مواد بستری و مواد سنگچین در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده

آن‌ها با انجام آزمایش‌های آبستتگی در پایین دست حوضچه آرامش آبشار قائم، گراف‌هایی را بر حسب $\frac{D_s}{d_c}$ در

برابر $\frac{y_t}{d_c}$ ارائه کرده‌اند، که برای به دست آوردن رابطه

موردنظر از تابع $D_{50} = f(d_c, y, y_t)$ برای تعیین D_{50} و از تابع $L_s = f(d_c, y, y_t)$ برای به دست آوردن طول سنگچین (L_s) استفاده نموده‌اند. (رایس و کادوی، ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲). فرهودی و ولیزادگان (۲۰۰۴) با انجام آزمایش‌هایی روی مدل آزمایشگاهی یک سرریز، معادله ۳ را برای تعیین معیار حفاظت پائین دست حوضچه‌های آرامش تیپ USBRI ارائه کردند:

$$\left(\frac{D_{50}}{d_1}\right) \left(\frac{V_*}{V_2}\right) = 0.4396 F_r^{1.7854} \quad (۳)$$

در این معادله D_{50} اندازه سنگچین پایدار در برابر فرسایش در پایین دست حوضچه آرامش، d_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی، V_2 سرعت در پایاب حوضچه آرامش، Fr عدد فرود جریان عمق اولیه پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش و $V_* = \sqrt{gRS}$ سرعت برشی جریان و عبارت است از $V_* = \sqrt{gRS}$ که در آن g شتاب ثقل، R شعاع هیدرولیکی و S شیب بستر جریان می باشد (فرهودی و ولیزادگان، ۲۰۰۴).

با توجه به اینکه در این تحقیق در زمینه آستانه حرکت مصالح سنگچین پایین دست حوضچه آرامش نیز مطالعاتی انجام شده است لذا در این قسمت به اختصار روابطی که توسط محققین پیشین در این زمینه به دست آمده، ارائه شده است.

ایسباخ بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی برای آستانه حرکت ذرات واقع در کانال‌های فرسایشی معادله‌ای به صورت زیر پیشنهاد داده است (ایسباخ، ۱۹۳۶):

$$V = 1.2 \left[2g \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) D_{50} \right]^{0.5} \quad (۴)$$

استراب از ترکیب فرمول مانینگ و معادله استریکلر و معادله شیلدز معادله‌ای به شرح زیر اثبات کرد (استراب، ۱۹۵۳):

$$V = 8.45 * \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) * \left(\frac{d}{D_s} \right)^{1/6} * D_s^{0.5} \quad (۵)$$

وضعیت پرش (پرش در پای بلوک تنداب) حاصل شود به این منظور در $Z = 2/5 \text{ cm}$ آزمایشات برای $0/1$ و $Z/y_t = 0/15$ و در $Z = 5 \text{ cm}$ آزمایشات برای $0/15$ نیز انجام شد.

برای حالت بهترین وضعیت پرش هیدرولیکی نیز آزمایشات انجام شد. در این حالت موقعیت جهش آبی (با برقراری عمق پایاب مشخص مربوط به هر دبی) طوری تنظیم گردید که انتهای جهش درست بر ابتدای مواد سنگچین پایین دست حوضچه منطبق گردد. در این حالت عمق آب پایین دست یادداشت و با توجه به اختلاف ترازوی که مورد آزمایش واقع

شده است نسبت $\frac{Z}{y_t}$ محاسبه شد.

تحلیل ابعادی

پایداری سنگچین پایین دست حوضچه‌های آرامش، تابعی از مشخصات هیدرولیکی جریان، مشخصات مصالح سنگچین و مشخصات هندسی مجرا است که در زیر تحلیل می‌شود.

الف - مشخصات هیدرولیکی جریان

عمق مشخصه جریان (y)، سرعت مشخصه جریان (V)، جرم مخصوص آب (ρ_w)، لزجت دینامیک آب (μ)، شتاب ثقل (g) و عمق آب پایین دست حوضچه آرامش (y_t).

ب - مشخصات مصالح سنگچین

قطر مشخصه ذرات سنگچین (D_s)، جرم مخصوص ذرات سنگچین (ρ_s)، انحراف معیار هندسی توزیع دانه بندی سنگچین (σ_g)، زاویه ایستایی ذرات سنگچین (ϕ)، فاکتور شکل (F_s).

ج - مشخصات هندسی مجرا

شیب بستر جریان (S)، زبری بستر (n)، اختلاف ارتفاع کف حوضچه و سطح سنگچین‌ها (Z)، عرض آبراهه (B)، ارتفاع سرریز (ارتفاع سقوط آب H_p)، طول حوضچه آرامش (L_B).

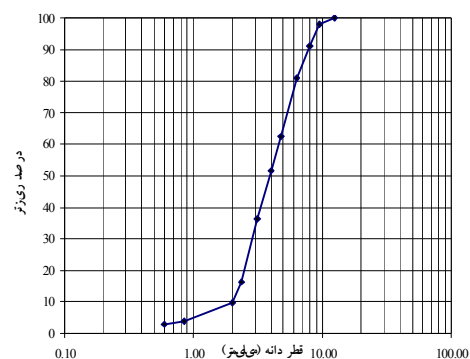
با توجه مطالب فوق، عوامل مؤثر بر پایداری سنگچین در پایین دست حوضچه‌های آرامش را می‌توان بصورت معادله ۹ نوشت:

(۹)

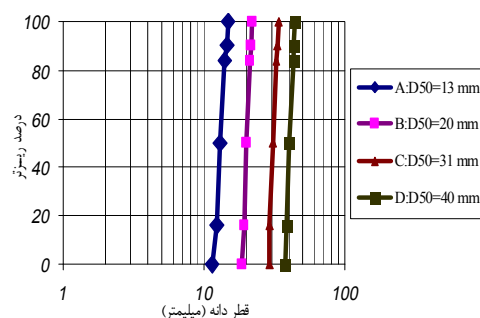
$$f(y, V, \rho_w, \mu, g, D_s, \rho_s, \sigma_g, \phi, F_s, S, n, Z, B, y_t, H_p, L_B) = 0$$

با توجه به اینکه n (ضریب زبری مانینگ) تابعی از قطر

است. لازم به ذکر است چگالی مصالح سنگچین مورد استفاده در این تحقیق $2/65$ می‌باشد.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مصالح بستر



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگچین

برای اندازه‌گیری سرعت آستانه حرکت سنگچین‌های پایین دست حوضچه آرامش از مولینه استفاده شد. لازم به ذکر است که سرعت جریان در خط مرکزی جریان و در اعماق $0/2$ و $0/8$ از سطح آب اندازه‌گیری شد سپس سرعت متوسط جریان با میانگین‌گیری از این دو عمق محاسبه شده است (چاو، ۱۹۵۹). در آزمایشات، شروع حرکت یک یا چند ذره که با چشم دیده شده، به‌عنوان آستانه حرکت ذره ثبت شد. ترازهایی که آزمایشات در آنها انجام شد به ترتیب $2/5$ ، 5 ، $7/5$ و 10 سانتی‌متر پایین تر از کف حوضچه می‌باشد. آزمایشات برای نسبت $\frac{Z}{y_t}$ های $1/3$ ، $0/5$ ، $0/4$ ، $1/3$ و $0/25$ صورت گرفت.

روش انجام آزمایشات به این ترتیب بود که به ازای هر Z مشخص (اختلاف تراز بین کف حوضچه و سطح سنگچین‌های بعد از حوضچه)، آزمایشات با افزایش عمق آب پایین دست (کاهش نسبت $\frac{Z}{y_t}$) ادامه یافت تا حالت بهترین

با توجه به اینکه پارامترهای Fr و $S.N$ هر دو تأثیر نیروی ثقل بر هیدرولیک جریان را نشان می‌دهند و همچنین نظر به اهمیت $S.N$ در آنالیز پایداری ذرات، در این تحقیق از اثر Fr صرف‌نظر شده است.

تمام جریان‌های مربوطه به سطح پوشیده از سنگچین آشفته هستند (ماینورد، ۱۹۹۱). بنابراین با صرف‌نظر نمودن از عدد رینولدز در آزمایشات معادله ۱۱ به صورت زیر در می‌آید:

$$S.N = f\left(\frac{D_s}{y_c}, \frac{D_s}{y_t}, \frac{D_s}{Z}\right) \quad (12)$$

نتایج و بحث

همان‌طور که در مبحث تحلیل ابعادی اشاره شد عدد پایداری تابعی از نسبت‌های بدون بعد چهار کمیت D_s, y_t, y_c و Z به دست آمد. به منظور دقت در محاسبات و با در نظر گرفتن کلیه نسبت‌های بدون بعد معادله ۱۳ به دست آمد:

$$S.N = f\left(\frac{D_s}{y_c}, \frac{D_s}{y_t}, \frac{D_s}{Z}, \frac{Z}{y_t}, \frac{Z}{y_c}, \frac{y_c}{y_t}\right) \quad (13)$$

با استفاده از نرم‌افزار $SPSS$ به رگرسیون انجام شد و نسبت‌هایی از این کمیت‌ها که بیشترین همبستگی را با عدد پایداری داشتند به عنوان بهترین معادله، مبنای تدوین این تحقیق قرار گرفتند.

نتایج رگرسیون خطی در جدول ۱ آمده است. در این حالت فرض شد که پارامتر $S.N$ تنها با یک پارامتر خاص همبستگی خطی دارد.

جدول ۱- میزان همبستگی و میانگین مربعات خطای $S.N$ با در نظر گرفتن یک پارامتر

متغیر وابسته	متغیر مستقل	درصد ضریب همبستگی (R^2)	میانگین مربعات خطا (MSE)
$S.N$	Z/y_c	۰/۷۱۸	۱۴/۰
$S.N$	D_s/Z	۰/۱۹/۱	۰/۳۴۵
$S.N$	Z/y_t	۰/۳۱/۴	۰/۵۶۷
$S.N$	D_s/y_c	۰/۸۹/۵	۱/۶۱۳
$S.N$	y_c/y_t	۰/۳۱/۳	۰/۵۶۳
$S.N$	D_s/y_t	۰/۸۵/۰	۱/۵۳۲

مشخصه (زبری مطلق) بستر می‌باشد، با استفاده از قطر مشخصه بستر می‌توان از دخالت دادن n صرف‌نظر نمود.

همچنین با توجه به تغییرات جزئی در اندازه ذرات سنگچین و فرض یکنواخت بودن آن می‌توان از تأثیر زاویه ایستایی (ϕ) و فاکتور شکل ذرات رسوبی (F_s) صرف‌نظر نمود. در این تحقیق عرض بستر پایین دست حوضچه در کلیه آزمایشات ثابت و بستر جریان افقی می‌باشد، لذا پارامترهای B و S تأثیر ثابتی بر کلیه آزمایش‌ها خواهد داشت. مقدار انحراف معیار هندسی برای کلیه سنگچین‌های آزمایش شده محاسبه شده است و بیشترین مقدار σ_g مربوط به سنگچین A و برابر ۱/۰۶۶ می‌باشد لذا سنگچین‌های به کار رفته در این تحقیق یکنواخت می‌باشند ($\sigma_g < 1.5$) و می‌توان از تأثیر σ_g نیز صرف‌نظر نمود. در آزمایشات از یک مدل با طول حوضچه و ارتفاع سرریز ثابت استفاده شد لذا از تأثیر L_B و H_p نیز صرف‌نظر شده و مسئله در واحد عرض بررسی می‌شود.

به دلیل اینکه در آزمایشات کف حوضچه آرامش و سطح بستر پایین دست هم‌تراز نیستند، لذا به جای y_t از y_c به عنوان مشخصه عمق جریان در حوضچه استفاده شده است. در نتیجه:

$$f(y_c, V, \rho_w, U, D_s, \gamma'_s, g, Z, y_t) = 0 \quad (10)$$

که در آن، γ'_s وزن مخصوص مستغرق ذرات است. با استفاده از تئوری باکینگهام و با در نظر گرفتن V, D_s, γ'_s به عنوان پارامترهای تکراری معادله ۱۰ را می‌توان به صورت زیر تغییر داد (ماینورد، ۱۹۸۷):

$$f\left(\frac{D_s}{y_c}, \frac{D_s}{y_t}, \frac{D_s}{Z}, Fr, \frac{V}{[g(G_s - 1)D_s]^{0.5}}, Re\right) = 0 \quad (11)$$

عدد بی‌بعد پنجم همان عدد فرود چگالی‌سنجی^۱ است که با $S.N$ نشان داده می‌شود و توسط راجاراتنام و بلتوز (۱۹۷۷) با روش تحلیل ابعادی به دست آمده است. شفاعی بجستان و آلبرتسون در تحقیقات خود عدد فرود چگالی‌سنجی را که بستگی شدیدی به پایداری سنگچین دارد، عدد پایداری نام نهاده‌اند. در تحقیق حاضر نیز این پارامتر را با $S.N$ نشان می‌دهیم. اعداد بی‌بعد چهارم و ششم نیز به ترتیب اشاره به عدد فرود (Fr) و عدد رینولدز (Re) دارند.

1- Densimetric froude number

2- Stability number (SN)

جدول ۲- میزان همبستگی و میانگین مربعات خطای $S.N$ با در نظر گرفتن دو پارامتر

متغیر وابسته	متغیرهای مستقل	درصد ضریب همبستگی (R^2)	میانگین مربعات خطا (MSE)
$S.N$	$Z/y_t, D_s/y_t$	٪۸۸/۲	۰/۷۹۵
$S.N$	$Z/y_t, y_c/y_t$	٪۸۶/۱	۰/۷۷۶
$S.N$	$Z/y_t, D_s/y_c$	٪۹۰/۵	۰/۸۱۵
$S.N$	$y_c/y_t, D_s/y_c$	٪۹۲/۲	۰/۸۳۱
$S.N$	$D_s/y_t, D_s/y_c$	٪۹۰/۲	۰/۸۱۳
$S.N$	$D_s/y_t, y_c/y_t$	٪۸۵/۶	۰/۷۷۱

با توجه به ضرایب همبستگی و رگرسیون در جدول ۱، ارتباط آماری مهمی بین $S.N$ بعنوان پارامتر وابسته و $\frac{D_s}{Z}$ و $\frac{Z}{y_c}$ به عنوان پارامترهای مستقل مشاهده نمی شود و به همین دلیل در رگرسیون چند متغیره خطی از آن ها استفاده نمی گردد. در حالت بعد ضرایب R^2 و MSE با در نظر گرفتن دو پارامتر به عنوان متغیر مستقل محاسبه شده است (جدول ۲). جدول ۳ ضرایب همبستگی با در نظر گرفتن سه و چهار پارامتر را نشان می دهد.

جدول ۳- میزان همبستگی و میانگین مربعات خطای $S.N$ با در نظر گرفتن سه و چهار پارامتر

متغیر وابسته	متغیرهای مستقل	درصد ضریب همبستگی (R^2)	میانگین مربعات خطا (MSE)
$S.N$	$D_s/y_t, y_c/y_t, Z/y_t$	٪۹۰	۰/۵۴۱
$S.N$	$D_s/y_c, y_c/y_t, Z/y_t$	٪۹۲/۷	۰/۵۵۷
$S.N$	$D_s/y_c, D_s/y_t, Z/y_t$	٪۹۰/۵	۰/۵۴۴
$S.N$	$D_s/y_c, D_s/y_t, y_c/y_t$	٪۹۳/۹	۰/۵۶۴
$S.N$	$D_s/y_c, D_s/y_t, y_c/y_t, Z/y_t$	٪۹۳/۹	۰/۴۲۳

با توجه به هدف این تحقیق که تخمین قطر سنگچین پایدار در پایاب فرسایش یافته حوضچه آرامش می باشد؛ چون در معادله ۱۷ پارامتر D_s یکبار فقط در سمت چپ معادله ظاهر شده است:

$$S.N = \frac{V}{[g(G_s - 1)D_s]^{0.5}} = 1.673 - 0.597\left(\frac{Z}{y_t}\right) - 1.105\left(\frac{y_c}{y_t}\right) \quad (17)$$

این معادله می تواند مناسب ترین رابطه جهت تخمین قطر سنگچین باشد. با استفاده از این رابطه و تعیین پارامترهای V و Z, y_t, y_c می توان قطر سنگچین پایدار در برابر

نتایج نشان می دهد که افزایش ضریب همبستگی در حالت چهار پارامتری نسبت به حالت سه پارامتری بسیار ناچیز می باشد. به همین دلیل از ترکیب چهار پارامتری جهت تخمین عدد پایداری صرف نظر می شود. با بررسی کلیه جداول ارائه شده می توان نتیجه گرفت که معادلات خطی دو و سه پارامتری با همبستگی قوی می توانند برای مطالعه پایداری استفاده شوند و افزایش یک پارامتر دیگر تأثیر محسوسی در افزایش ضریب همبستگی نخواهد داشت. معادلات خطی به دست آمده که دارای ضرایب همبستگی بالایی هستند در جدول ۴ نشان داده شده است.

جریان خروجی از حوضچه را پیش‌بینی کرد. با استفاده از معادله ۱۴ یا ۱۵ نیز می‌توان با یک آزمون و خطای ساده قطر سنگچین پایدار در برابر جریان متلاطم خروجی از حوضچه را تنها با محاسبه y_c یا y_t و V تخمین زد.

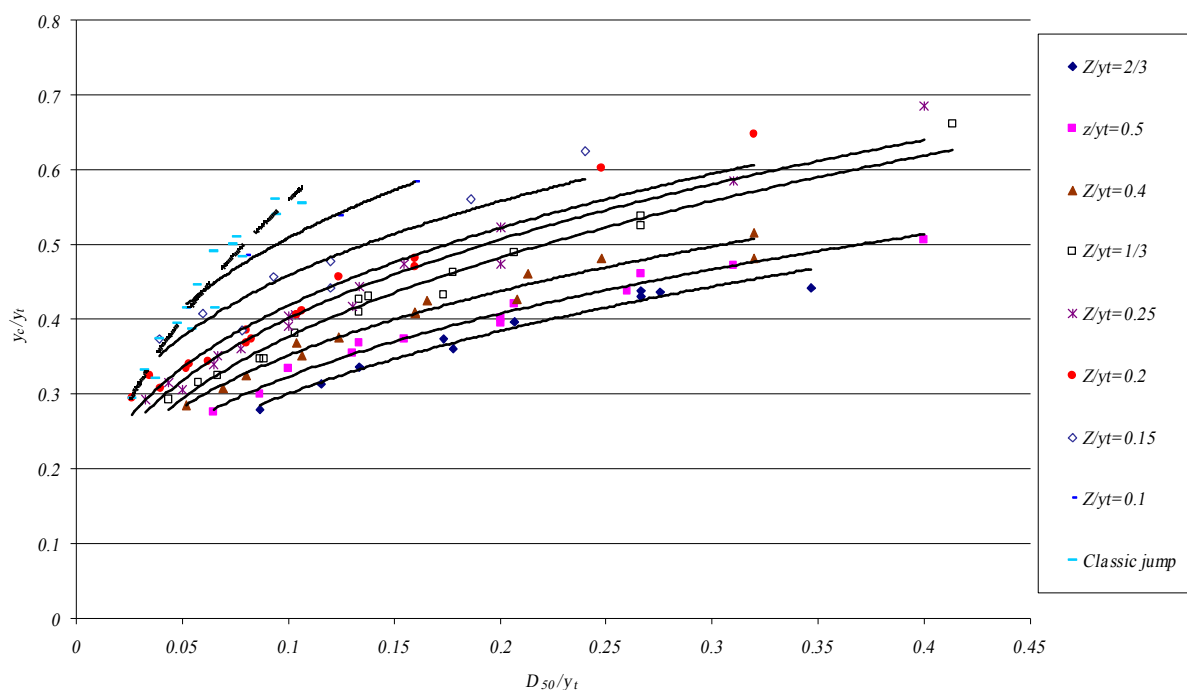
جریان خروجی از حوضچه پایدار بماند را تخمین زد. شکل ۴ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش مقدار $\frac{y_c}{y_t}$ یا به عبارتی با افزایش مقدار y_c (عمق بحرانی)، پارامتر $\frac{D_{50}}{y_t}$ نیز افزایش پیدا می‌کند. یعنی با افزایش عمق بحرانی، قطر ذره سنگچین افزایش می‌یابد. این شکل مؤید این مطلب نیز می‌باشد که در یک عمق پایاب ثابت هر چه اختلاف تراز کف حوضچه و سطح بستر پایین‌دست آن افزایش یابد مقاومت سنگچین‌ها در برابر جریان کاهش می‌یابد به عبارت دیگر در یک عمق پایاب ثابت، با افزایش اختلاف تراز، قطر مورد نیاز سنگچین برای حفاظت پایین‌دست حوضچه‌های آرامش افزایش می‌یابد.

منحنی تغییرات $\frac{y_c}{y_t}$ در برابر $\frac{D_{50}}{y_t}$ برای نسبت‌های مختلف $\frac{Z}{y_t}$ در شکل ۴ ارائه شده است. توضیح اینکه در شکل زیر خط *Classic jump* مربوط به حالتی است که پرش در پای بلوک تنداب تشکیل شده است.

با استفاده از شکل ۴ می‌توان تنها با محاسبه عمق پایاب (y_t) ، عمق فرسایش‌یافته نسبت به کف حوضچه (Z) و دبی جریان، اندازه سنگی که بتواند در برابر جریان متلاطم

جدول ۴- معادلات خطی به دست آمده برای تخمین عدد پایداری

شماره معادله	نعداد پارامترهای مستقل	فرمول مربوطه	R^2 (%)	(MSE)
(۱۴)	۱	$S.N = 1.252 - 0.723\left(\frac{D_s}{y_c}\right)$	۸۹/۵	۱/۶۱۳
(۱۵)	۱	$S.N = 1.203 - 1.291\left(\frac{D_s}{y_t}\right)$	۸۵/۰	۱/۵۳۲
(۱۶)	۲	$S.N = 1.234 - 0.153\left(\frac{Z}{y_t}\right) - 1.171\left(\frac{D_s}{y_t}\right)$	۸۸/۲	۰/۷۹۵
(۱۷)	۲	$S.N = 1.673 - 0.597\left(\frac{Z}{y_t}\right) - 1.105\left(\frac{y_c}{y_t}\right)$	۸۶/۱	۰/۷۷۶
(۱۸)	۲	$S.N = 1.241 - 0.792\left(\frac{D_s}{y_c}\right) + 0.105\left(\frac{Z}{y_t}\right)$	۹۰/۵	۰/۸۱۵
(۱۹)	۲	$S.N = 1.343 - 0.662\left(\frac{D_s}{y_c}\right) - 0.263\left(\frac{y_c}{y_t}\right)$	۹۲/۲	۰/۸۳۱
(۲۰)	۲	$S.N = 1.243 - 0.536\left(\frac{D_s}{y_c}\right) - 0.361\left(\frac{D_s}{y_t}\right)$	۹۰/۲	۰/۸۱۳
(۲۱)	۲	$S.N = 1.154 - 1.386\left(\frac{D_s}{y_t}\right) + 0.146\left(\frac{y_c}{y_t}\right)$	۸۵/۶	۰/۷۷۱
(۲۲)	۳	$S.N = 1.503 - 1.178\left(\frac{D_s}{y_c}\right) - 0.642\left(\frac{y_c}{y_t}\right) + 1.169\left(\frac{D_s}{y_t}\right)$	۹۳/۹	۰/۵۶۴



شکل ۴- منحنی تغییرات $\frac{y_c}{y_t}$ در برابر $\frac{D_{50}}{y_t}$ برای نسبت‌های مختلف $\frac{Z}{y_t}$ های آزمایشی

در مقدمه این تحقیق روابطی که محققین مختلف در زمینه آستانه حرکت کار کرده‌اند آورده شد؛ این روابط را می‌توان به صورت عمومی زیر نوشت:

در مقدمه این تحقیق روابطی که محققین مختلف در زمینه آستانه حرکت کار کرده‌اند آورده شد؛ این روابط را می‌توان به صورت عمومی زیر نوشت:

$$\frac{V}{[g(G_s - 1)D_s]^{0.5}} = a \left(\frac{y_t}{D_s} \right)^m \quad (23)$$

که در آن a و m ضرایب ثابت و G_s چگالی ذرات جامد خاک می‌باشد. در جدول ۵ این ضرایب و نام محقق آورده شده است.

در تحقیق حاضر نیز همان‌طور که قبلاً اشاره شد، همبستگی خوبی بین پارامتر $\frac{D_{50}}{y_t}$ و عدد پایداری وجود دارد. با توجه

به اینکه آزمایشات در ۴ تراز متفاوت پایین‌تر از کف حوضچه انجام شده است لذا برای هر کدام از ترازها منحنی تغییرات

در برابر عدد پایداری رسم شده که در شکل ۵ ارائه شده است.

شکل‌های (الف-د) نشان می‌دهد با کاهش مقدار $\frac{D_{50}}{y_t}$

عدد پایداری افزایش می‌یابد اما به‌ازای یک مقدار مشخص

جدول ۵- ضرائب a و m در رابطه (۲۳)

محقق	ایسباخ	ستراب نیل	بوگاردی	ماینورد	
a	۱/۷	۱/۴۹	۱/۵۸	۱/۷	۳/۳۳
M	۰	۰/۱۶۷	۰/۱	۰/۰۹۵	۰/۱

ضرائب a و m به دست آمده در این تحقیق به ترتیب ۰/۶۸۳ و ۰/۱۸۱ است بنابراین:

$$S.N = 0.683 \left(\frac{y_t}{D_{50}} \right)^{0.181} \quad (24)$$

دلیل اختلاف بین ضرایب a و m محاسبه شده در این تحقیق و تحقیقات پیشین را می‌توان به این موضوع مربوط دانست که هیچ یک از مطالعات پیشین در پایاب فرسایش یافته حوضچه آرامش صورت نگرفته است. در پایین دست حوضچه آرامش بدلیل تلاطم‌های ناشی از جهش هیدرولیکی شرایط خاصی حاکم می‌باشد که باعث می‌شود آستانه حرکت سنگچین‌ها نسبت به حالت جریان یکنواخت در کانال‌های فرسایشی (جریانی که مورد تحقیق محققین قبلی بوده است) در سرعت کمتری رخ دهد

نتیجه‌گیری

- به‌ازای یک تراز مشخص (پایین‌تر از کف حوضچه)، با افزایش عمق پایاب، دبی بیشتری برای حرکت دادن دانه‌های سنگچین لازم است.

- در یک عمق پایاب ثابت، با افزایش اختلاف تراز، قطر مورد نیاز سنگچین برای حفاظت پایین دست حوضچه‌های آرامش افزایش می‌یابد.

- با افزایش عمق بحرانی، قطر ذره سنگچین که بتواند در برابر جریان مقاومت کند، افزایش می‌یابد.

- با استفاده از شکل ۴ و با اندازه‌گیری عمق پایاب (Y_t)، عمق فرسایش یافته نسبت به کف حوضچه (Z) و دبی جریان، می‌توان اندازه سنگی که می‌تواند در برابر جریان متلاطم خروجی از حوضچه پایدار بماند را تخمین زد.

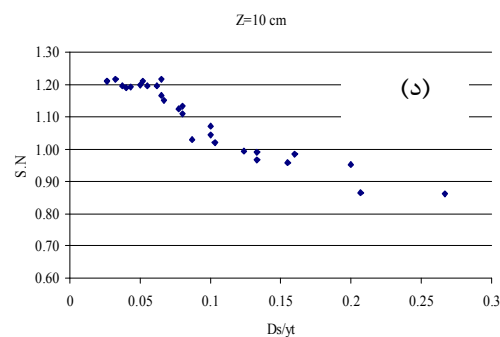
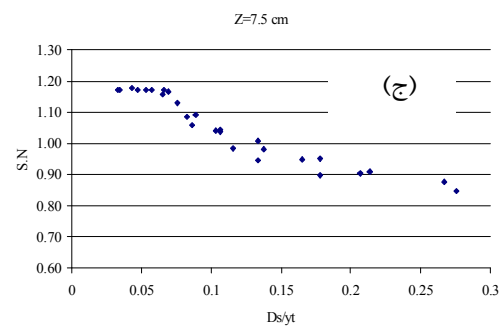
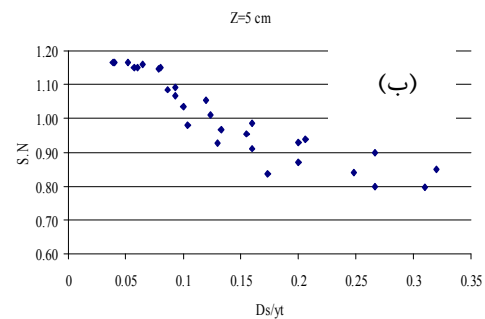
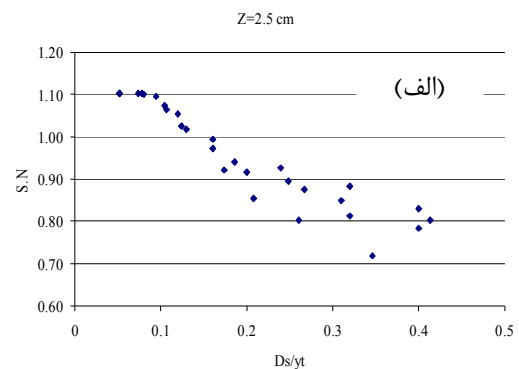
- هر چه موقعیت جهش آبی به طرف بالادست میل کند، مقاومت مواد سنگچین افزایش پیدا می‌کند. به‌عبارت دیگر هر چه موقعیت جهش آبی به پنجه سرریز میل کند، دبی بیشتری برای حرکت دادن دانه‌های سنگچین لازم است.

سپاس‌گزاری

بدینوسیله از دانشکده مهندسی علوم آب و قطب علمی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز و مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو به‌دلیل حمایت مالی و آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

۱- شفای بجستان م. ۱۳۷۸. هیدرولیک رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.



شکل ۵- نمودار تغییرات $S.N$ در برابر $\frac{D_{50}}{y_t}$ در ترازهای

آزمایشی: الف) $Z=2/5$ cm، ب) $Z=5$ cm

ج) $Z=7/5$ cm و د) $Z=10$ cm

- 6- Maynard S.T. 1991. Flow resistance of riprap. Am Soc. Civil Eng., J. of Hydraulic Eng. 117(6):689-696
- 7- Neill C.R. 1968. Note on initial movement of coarse uniform bed material. Journal of Hydraulic Research, IHAR. 6:137-176.
- 8- Rice C.E. and Kadavy K.C. 1991. Riprap design downstream of straight drop spillways. Transaction of ASCE. 34(4):7-12 .
- 9- Rice C.E. and Kadavy K.C. 1992. Riprap design for SAF stilling basins, Transaction of ASCE, 35(6):1817-1825
- 10- Straub L. G. 1953. Some Observation for Sorting of River Sediments. Trans. Amer Geophy. Union, 16: 463-467.
- 2- Bogardi J. L. 1968. Incipient sediment motion in region of critical mean velocity. Acta Technical Academiae Scientiarum Hungaricae, Budapest, 62 1 – 2: 1 – 24.
- 3- Farhoudi J. and Valizadeghan E. 2004. Bed protection criterion downstream of stilling basins. Proc. 9th ISRS Conference, China.
- 4- Isbash S.V. 1936. Construction of Dams by Depositing Rock in Running Water. Second Congress on Large Dams, Communication No.3, Washington D.C. , Paper C2, pp. 123-136.
- 5- Maynard S.T. 1987. Stable riprap for open channel flows. Ph.D dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, FtCollins, CO.