

مدل مفهومی تنش برشی بستر در پل‌های تک دهانه محافظت شده با سنگچین

مقاله پژوهشی

امیر محجوب^{*}، استادیار، پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
فواد کیلانه‌ئی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
^{*}پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.mahjoob@bhrc.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۵/۰۵ - پذیرش: ۹۸/۱۰/۰۵

صفحه ۹۱-۱۰۴

چکیده

وجود تکیه‌گاه‌های عمودی پل در مسیر رودخانه باعث ایجاد جریان‌های سه‌بعدی می‌شود و می‌تواند سبب ایجاد آبشستگی در محل پل‌ها گردد و در نهایت تخریب پل صورت می‌پذیرد. در مواردی که از پی‌های عمیق استفاده نمی‌گردد سطح آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد. این نوع کوله‌ها اغلب برای پل‌های تک دهانه اجرا می‌شوند و اقدامات پیشگیرانه جلوگیری کننده از آبشستگی مانند پوشاندن بستر با مصالح مقاوم مثل سنگچین به عمل می‌آید. منظور از بررسی‌های حاضر ارایه مدلی مفهومی از تنش‌های برشی موضعی بستر وارد بر زیری بستر ناهمگون در دهانه پل است. سازگاری جریان با تغییر در زیری مصالح سنگچین نسبت به مصالح بستر منجر به افزایش تنش برشی بستر در مصالح بستر طبیعی محافظت نشده می‌گردد و در نهایت عمق آبشستگی تنگ‌شدگی بیشتر از حالت بدون حفاظت سنگچین خواهد گردید.

واژه‌های کلیدی: پی سطحی، تنش برشی، پل تک‌دهانه، ریپ‌رپ، سیلاب

۱- مقدمه

تک دهانه بر روی پی‌های کم عمق در برابر آسیب آبشستگی روش‌هایی لازم است که طراحی کوله (به عنوان جزئی یکپارچه از پل) و اقدامات پیشگیرانه ضد آبشستگی آن را مورد توجه قرار دهند (FHWA, 2017). با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان نسبت به مهار آبشستگی اقدام نمود. روش‌های مهار آبشستگی عموماً به دو دسته غیرمستقیم و مستقیم تقسیم می‌گردند. در روش‌های غیرمستقیم با ایجاد تغییراتی در الگوی جریان در محل پل باعث کاهش نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر بستر شده و در نتیجه عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. استفاده از دیوار هدایت آب برای کاهش آبشستگی کوله‌های پل، کاربرد طوق محافظ برای کاهش آبشستگی اطراف پایه‌ها و کوله‌ها و استفاده از گروه پایه‌ها به جای یک پایه با قطر بیشتر در طراحی پل از جمله این روش‌ها هستند. در روش مستقیم با

آبشستگی در زیر کوله‌های عمودی در اثر سیل دلبلی متداول برای شکست پل است. پی‌های کم عمق کوله‌ها در سواحل آبراهه‌ها یا در نزدیکی آن‌ها آسیب پذیرتر از سایر پی‌ها هستند زیرا به بستر جریان نزدیک‌ترند و می‌توانند جریان سیل را به طور قابل توجهی منقبض کنند. این نوع کوله‌ها اغلب برای پل‌های تک دهانه اجرا می‌شوند و اقدامات پیشگیرانه ضد آبشستگی بیشتری در طراحی به عمل می‌آید تا از قرار گرفتن آن‌ها در زیر عمق آبشستگی موضعی جلوگیری گردد. بر اساس آمار پل ملی آمریکا، بیش از ۶۰۰ هزار پل رودخانه‌ای در این کشور موجود است که حدود ۸۰ درصد آن را پل‌های تک دهانه با طول ۲۱ تا ۲۸ متر تشکیل می‌دهند (Adams et. Al., 2007). در ایران نیز آمار تعداد پل‌های تک دهانه نسبت به سایر پل‌ها بالاست. بنابراین، برای حفاظت از کوله پل‌های کوچک

مقاوم‌سازی مصالح بستر و کناره‌ها مقاومت بستر در برابر آبخستگی افزایش می‌یابد. پوشاندن بستر با مصالح مقاوم مانند سنگچین و گابیون، آبخستگی پایه‌ها و کوله‌ها را کنترل می‌کند (زراتی، ۱۳۸۶). استفاده از سنگچین برای محافظت کوله، به ویژه برای پل‌های کوچک است که بعضاً رویکرد طراحی مورد استفاده برای کوله‌های با دیوار عمودی روی پی‌های گسترده است. در این رویکرد، بالای پی در زیر عمق مجموع آبخستگی تنگ‌شدگی و فرسایش بلند مدت نسبت به خط‌القدر کانال اصلی قرار می‌گیرد و از سنگچین برای محافظت از کوله در برابر آبخستگی استفاده می‌شود. نشریه HEC-23 تحت عنوان "اقدامات مقابله با آبخستگی پل و بی‌ثباتی جریان" دستورالعمل‌هایی را برای اقدامات ضد آبخستگی در طراحی کوله ارائه می‌نماید (Lagasse et. al., 2009). سنگچین به صورت یک لایه سنگ طبیعی تعریف شده است که به علت وزن مرده خالص سنگ‌ها به صورت یک صفحه، از خاک زیرین که در معرض نیروی فرسایش ایجاد شده توسط سرعت جریان می‌باشد، حفاظت می‌کند. همچنین سنگچین از حرکت گردابه‌ای قوی در جلوی پایه پل و تشکیل گودال آبخستگی جلوگیری می‌کند. سنگچین انعطاف‌پذیر بوده و خودش را با تغییرات جدید و نشست خاک وفق می‌دهد. توانایی لایه‌های سنگچین به انطباق خود با نشست و آبخستگی ایجاد شده فاکتور بسیار مهمی در استفاده و پیشنهاد سنگچین می‌باشد (دولت‌شاهی و همکاران، ۱۳۹۶). جهت کاهش ریسک شکست پل از مصالح سنگچین با قابلیت مقابله با تنش‌های برشی حاصل از جریان استفاده می‌گردد. مصالح مناسب جهت استفاده بعنوان سنگچین در اکثر رودخانه‌ها قابل استحصال است. همچنین اجرای سنگچین از سایر روش‌های حفاظتی آسانتر است. لایه سنگچین شکل‌پذیر بوده و بعلافت نشست و یا جابجایی سطح زیر آن دچار خرابی کامل نمی‌گردد. خرابی‌های موضعی نیز در آن سهولت رفع شده و از لحاظ دوام و مقاومت در سطح بالایی قرار دارد (محبوب و همکاران، ۱۳۹۴).

بررسی‌های متعددی درخصوص استفاده از سنگچین در ادبیات فنی صورت گرفته که در ادامه به برخی از آن‌ها

اشاره می‌گردد. ناصریان و همکارانش بررسی اثر قطر نسبی سنگچین بر پایداری سنگ دانه‌ها در دبی‌های مختلف در اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره بالدار ۴۵ درجه در قوس ۱۸۰ درجه رودخانه را مد نظر قرار دادند. در این تحقیق سه نوع سنگچین با چگالی‌های ۱/۷، ۲/۱، ۲/۴۲ و با قطرهای ۴/۷۶، ۹/۵۲، ۱۲/۷، ۱۹/۱ میلی‌متر در محل تکیه‌گاه پل در موقعیت ۷۰ درجه از قوس و با استفاده از چهار دبی ۱۷، ۲۰، ۲۳، ۲۷ لیتر بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد در دبی و چگالی ثابت، افزایش قطر سنگ دانه‌ها باعث افزایش سطح تماس ذره با جریان و بالا رفتن تنش‌برشی سنگ دانه با سطح جریان شده و در نتیجه ناپایداری سنگچین‌ها را به دنبال خواهد داشت (ناصریان و همکاران، ۱۳۹۲). در تحقیق دیگری به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف آبشکن بر روی پایداری سنگچین جهت محافظت از آبشکن در قوس پرداخته شده است. ۲۰۵ آزمایش پایداری سنگچین با سایزهای مختلف سنگچین، تغییر پارامترهای آبشکن شامل طول، فاصله و ارتفاع آن با چهار دبی مختلف صورت پذیرفت و در پایان رابطه‌هایی برای طراحی سنگچین با استفاده از پارامترهای آبشکن و جریان جهت استفاده در مهندسی رودخانه ارائه شده است (جاسمی و همکاران، ۱۳۹۶). ملویل و همکارانش در پژوهشی کارآیی سنگچین و بلوک‌های متصل شده با کابل‌ها را به عنوان یک اقدام مقابله با آبخستگی برای کوله‌های با دیوار جانبی تحت شرایط بستر زنده برای مقادیر مختلف عمق، سرعت جریان و گستره و عمق دفن پیشبند مورد مطالعه قرار دادند (Melville et. al., 2006B). هدف آزمایشات تعیین حداقل گستره مورد نیاز پیشبند برای حفاظت از کوله در برابر آبخستگی تحت شرایط جریان بستر زنده بود. ملویل و همکاران نتیجه گرفتند که آبخستگی در کوله‌های با دیوار جانبی تحت شرایط بستر زنده مستقیماً با تراز عمیق‌ترین قسمت از شکل بستر (که به ماقبل کوله هم گسترش می‌یابد) همراه با هر نوع آبخستگی موضعی که ممکن است رخ دهد، مرتبط است. این محققین یک معادله برای پیش‌بینی حداقل عرض پیشبند که پس از فرسایش، افقی باقی می‌ماند، ارائه نمودند.

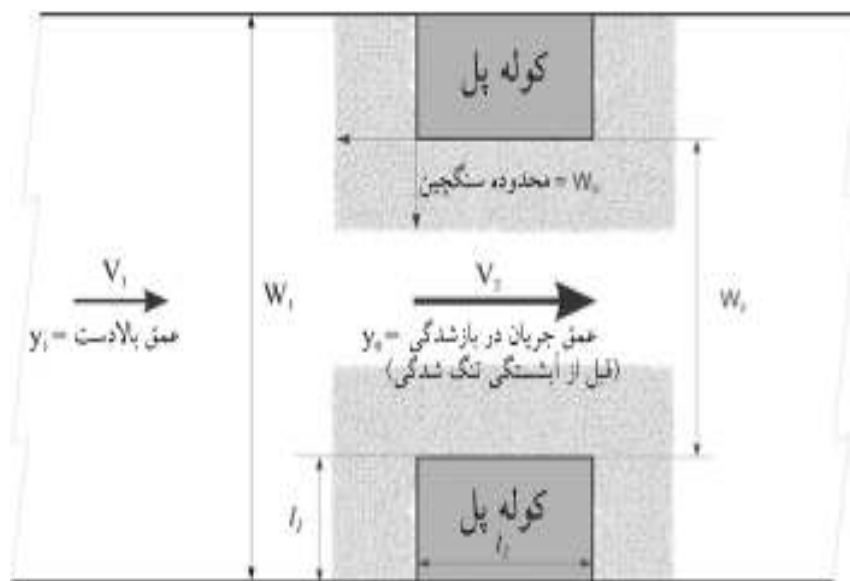
۲- تنش برشی در مصالح بستر طبیعی

رودخانه

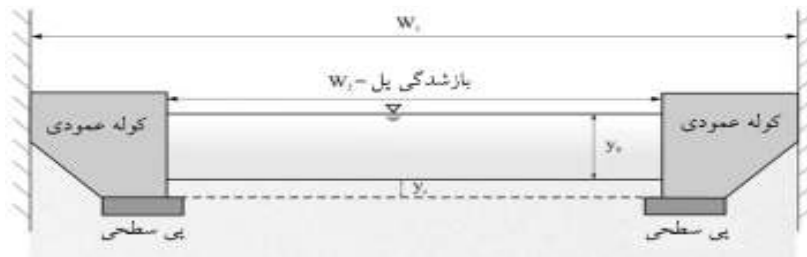
شکل (۱) نمایانگر پلانی ساده از یک کانال رودخانه است که کوله‌ها در آن پیشروی کرده‌اند و پیش‌بند‌های سنگچین نیز از آن‌ها در برابر آبشستگی حفاظت می‌کنند. پارامترهای هیدرولیکی مربوطه نیز که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند عبارتند از سرعت بالادست (V_1)، سرعت در دهانه کوله (V_2)، عرض بستر زیرین رودخانه در بالادست (W_1)، عرض دهانه پل (W_2)، عمق جریان در بالادست (y_1)، طول کوله (l_1)، عرض کوله (l_2) و عرض پیش‌بند سنگچین (W_R) است.

شکل (۲) نشان دهنده نمایی شماتیک از یک دهانه پل ساده (تنگ شدگی) بدون سکوی پیش‌بند سنگچین است که در آن میانگین آبشستگی تنگ شدگی در دهانه پل y_c است. تمرکز این تحقیق بر روی کوله‌های با دیوار عمودی (شکل (۲)) است. این نوع کوله و پی، غیرصُلب تلقی می‌شوند و طبق دستورالعمل طراحی نشریه HEC-23، بالای پی کوله باید در محدوده زیرین مجموع آبشستگی تنگ‌شدگی و فروسایش بلند مدت (که به دلیل استفاده از شرایط تعادل در مدلسازی فیزیکی ناچیز بود) تخمین زده شده قرار گیرد (Lagasse et. al., 2009).

پیترسون و همکارانش در سال ۲۰۱۵، مکانیزم‌های آبشستگی لبه را در شرایط وجود سنگچین با اندازه‌های مختلف بررسی کردند. این محققین مکانیزم‌های حاکم بر آبشستگی لبه را آشفتگی در جریان اولیه هنگام نزدیک شدن به تقاطع بین لایه سنگی و بستر ماسه‌ای و وجود جریان ثانویه بیان نمودند. میزان زبری المان‌ها و تا حدی شیب دیواره از جمله پارامترهای مؤثر در کنترل میدان جریان سه‌بعدی، شامل جریان‌های ثانویه و آشفتگی در مجاورت لایه سنگ پوششی بودند (Petersen et. al., 2015). علیرغم اینکه استفاده از سنگچین می‌تواند سبب مقابله با پدیده آبشستگی در محل پل گردد اما مطالعات نشان می‌دهد عدم یکنواختی مصالح بستر رودخانه در محل پل سبب تغییر در تنش برشی نسبت به حالت بدون سنگچین می‌گردد. از آنجایی که در کشور ما روشی مرسوم برای مقابله با آبشستگی در کوله‌ها استفاده از سنگچین است، در این مقاله مدلی مفهومی جهت تعیین نسبت تنش برشی در مصالح بستر در حالت با و بدون وجود پیش‌بند سنگچین مورد بررسی قرار گرفته تا طراحان و مجریان امر با نگاه ویژه‌تری به کاربرد و استفاده این روش مهار آبشستگی بپردازند.



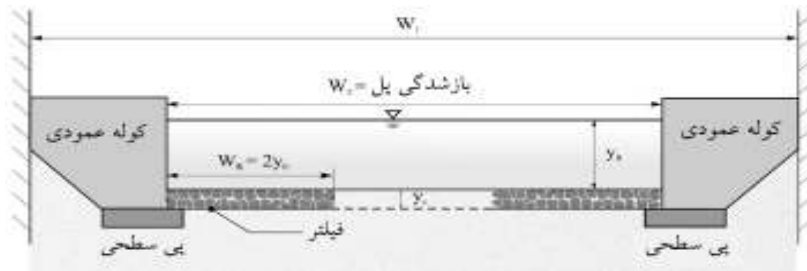
شکل ۱. پلان یک تنگ شدگی پل با پیش‌بند سنگچین



شکل ۲. مقطع پیش از شرایط آبستنگی برای حالت بدون سنگچین

23. ضخامت پیشنهادی پیش‌بند برابر است با $1/5 \times D_{50}$ یا D_{100} (حداکثر اندازه سنگ)، هر کدام بیشتر باشد. در شکل (۳)، این ضخامت از تراز بستر قبل از آبستنگی تا بالای پی نشان داده شده است.

شکل (۳) نمایانگر دهانه تنگ شده پل با پیش‌بند سنگچین برای محافظت از پی کوله در برابر آبستنگی طبق HEC-23 است (Lagasse et. al., 2009). عرض سکو (W_R) فاصله‌ای به اندازه دو برابر عمق جریان قبل از آبستنگی در دهانه (y_0) از سطح کوله گسترش یافته است. طبق HEC-



شکل ۳. مقطع پیش از شرایط آبستنگی برای حالت با سنگچین

و مورد استفاده قرار می‌گیرد. تغییر تعریف مفهومی به این دلیل است که مقطع بالادست طوری تغییر نماید که تراز کف به اندازه عمق تخمینی آبستنگی تنگ‌شدگی (y_c) پایین‌تر رود. در شرایط جریان در دهانه بدون سنگچین در حالت تعادلی آبستنگی تنگ‌شدگی، زبری کف برای مصالح طبیعی بستر n_B و متوسط تنش برشی روی بستر τ_B است.

شکل (۶) نمایی شماتیک برای استفاده از معادلات پیوستگی و انرژی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۵)، متغیر \hat{y}_1 برابر $y_1 + y_c$ است (FHWA, 2017). در این شکل \hat{V}_1 سرعت متوسط در مقطع بالادست، \hat{A}_1 مساحت مقطع بالادست، \hat{y}_1 میانگین عمق جریان در مقطع بالادست، y_2 میانگین عمق جریان در مقطع تنگ‌شده بدون سنگچین پس از آبستنگی تنگ‌شدگی و A_2 مساحت مقطع تنگ‌شدگی بدون سنگچین در حالت تعادلی آبستنگی تنگ‌شدگی می‌باشند.

معادلات پیوستگی و انرژی برای حالت بدون سنگچین به صورت رابطه‌های (۱) و (۲) خلاصه شده‌اند.

$$\hat{V}_1 \hat{A}_1 = V_2 A_2 \quad (1)$$

وقتی آبستنگی تنگ‌شدگی برای وضعیت نشان داده شده در شکل (۲) اتفاق افتاد، یک تنش برشی روی مصالح بستر ایجاد می‌گردد. در حالت تعادلی آبستنگی تنگ‌شدگی، تنش برشی با تنش برشی بحرانی مصالح بستر برابر می‌باشد. برای تعمیم موضوع، تنش برشی روی بستر بدون پیش‌بند سنگچین در این مطالعه به عنوان τ_B مطرح می‌شود. به همین طریق، وقتی همان آبستنگی تنگ‌شدگی اما با پیش‌بند سنگچین (شکل (۳)) رخ دهد، تنش برشی آن در این مطالعه به عنوان τ_R مطرح می‌گردد. هر دو تنش برشی در عمق یکسان ($y_0 + y_c$) در نظر گرفته شدند و هدف تعیین مقدار τ_R نسبت به τ_B است.

۳- مدل مفهومی تنش برشی بر روی مصالح

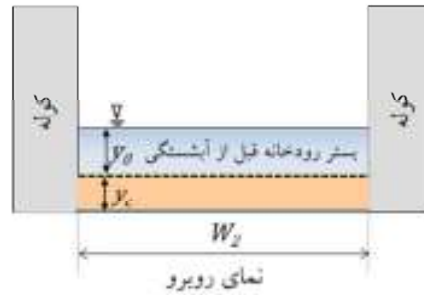
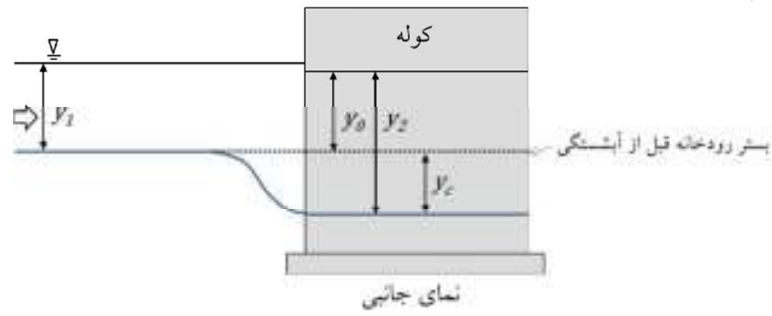
طبیعی بستر بدون سنگچین

شکل (۴) نشان دهنده نمایی کلی از تعریف مفهومی مقطعی از مسیر بالادست و مقطعی تنگ شده از دهانه پل برای حالت بدون سنگچین است. برای تسهیل کار، معمولاً طرح دیگری که در شکل (۵) نشان داده شده است، تعریف

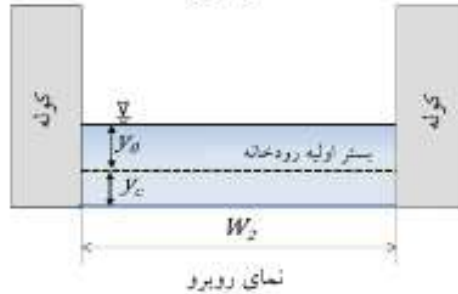
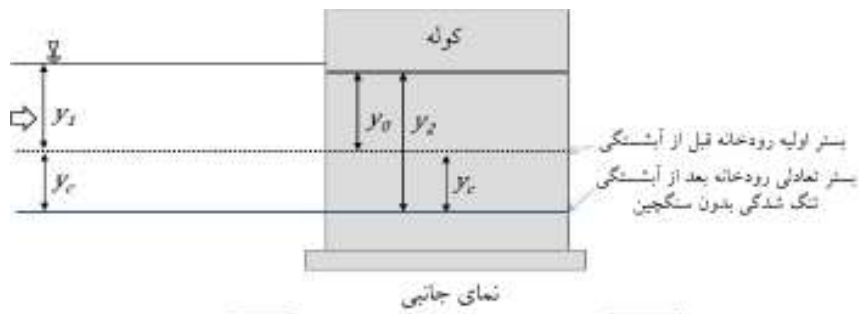
اصلاح انرژی برای مقطع بالادست (بدون بعد)، ضریب α_{2B} (بدون اصلاح انرژی برای مقطع تنگ‌شدگی بدون سنگچین) (بدون بعد)، و h_B افت انرژی بین مقطع بالادست و مقطع تنگ‌شدگی بدون سنگچین (متر) می‌باشند.

$$z_1 + \hat{y}_1 + \alpha_1 \frac{\hat{V}_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \alpha_{2B} \frac{V_2^2}{2g} + h_B \quad (2)$$

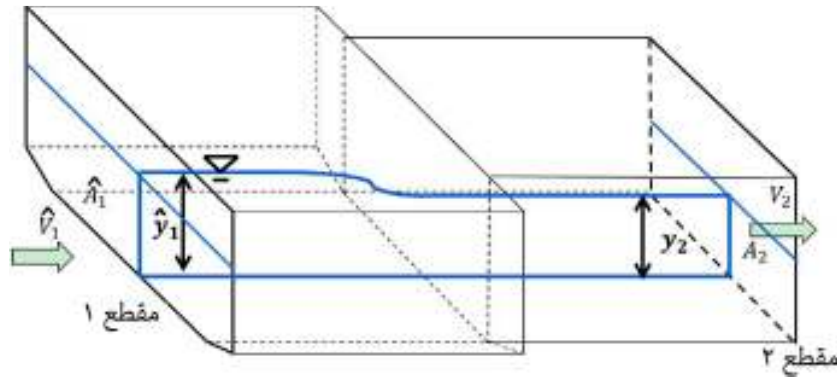
که در آن z_1 ارتفاع مرجع برای مقطع بالادست (متر)، z_2 ارتفاع مرجع برای مقطع پایین دست (متر)، α_1 ضریب



شکل ۴. نمای مفهومی در حالت بدون سنگچین



شکل ۵. نمای مدل ساده شده مفهومی در حالت بدون سنگچین



شکل ۶. حجم کنترل انرژی و پیوستگی در حالت بدون سنگچین

در رابطه فوق، \overline{Fr}_1 عدد فرود است که به صورت $\frac{\hat{V}_1}{\sqrt{g\hat{y}_1}}$ (بدون بعد) تعریف می‌گردد. برای تنش برشی میانگین بستر در حالت بدون سنگچین هم رابطه (۶) موجود است.

$$\tau_B = \gamma y_2 S \quad (6)$$

که در آن S شیب انرژی (متر/متر) و γ وزن واحد آب (lb/ft^3 (N/m^3)) هستند. استفاده از معادله مانینگ (معادله (۷)) و فرض دیوارهای نسبتاً صاف و عریض بودن مقطع به طوری که شعاع هیدرولیکی بتواند تقریباً با نسبت مساحت به عرض (A/W) برابر باشد، منتج به معادله (۸) گردید.

$$Q = \frac{1}{n_B} A_2 R_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

که در آن n_B ضریب زبری مصالح بستر (بدون بعد) و R_h شعاع هیدرولیکی (متر) می‌باشند (FHWA, 2017).

$$\tau_B = \gamma \left(\frac{W_2^{\frac{1}{7}}}{A_2} \right)^{\frac{7}{3}} (Q n_B)^2 \quad (8)$$

۴- مدل مفهومی تنش برشی بر روی مصالح طبیعی بستر با سنگچین

معادلات پیوستگی و انرژی برای حالت با سنگچین نیز مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۷) نشان دهنده نمای کلی از تعریف مفهومی مقطعی از مسیر بالادست و مقطع تنگ شده برای حالت با سنگچین است و در آن عمق جریان در حالت تعادلی آبشستگی ($V_2 R$) بزرگتر از حالت بدون سنگچین (V_2) است. مانند حالت بدون سنگچین، برای ساده‌سازی، از طرحی که در شکل (۸) نشان داده شده، استفاده می‌گردد. تغییر تعریف مفهومی به این دلیل است که مقطع بالادست

ضرایب اصلاح انرژی برای جریان متغیر تدریجی تقریباً برابر با ۱ تا ۱/۰۱ می‌باشند. افت انرژی بین دو مقطع در حالت بدون سنگچین (h_B) به صورت حاصلضرب ضریب تنگ‌شدگی (C_{CB}) در هد سرعت مقطع تنگ‌شدگی تعریف می‌شود. بنابراین معادله (۲) با این فرض که دو ارتفاع مرجع تقریباً برابرند (شیب ملایم) و با جایگزینی V_2 از معادله پیوستگی، به صورت معادله (۳) اصلاح می‌گردد.

$$\begin{aligned} y_2 &= \hat{y}_1 + \frac{\hat{V}_1^2}{2g} - (1 + C_{CB}) \frac{V_2^2}{2g} \\ &= \hat{y}_1 + \frac{\hat{V}_1^2}{2g} \left[1 - (1 + C_{CB}) \frac{\hat{A}_1^2}{A_2^2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن C_{CB} ضریب تنگ‌شدگی برای مدل بدون سنگچین (بدون بعد) است.

مقدار داخل پرانتز به عنوان ضریب شکل کانال برای حالت بدون سنگچین در رابطه (۴) تعریف شده است.

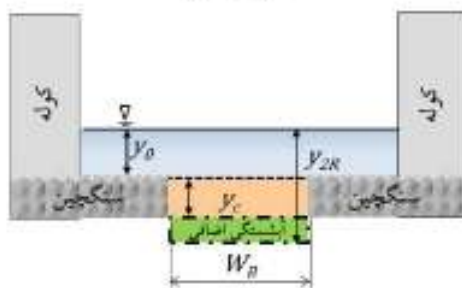
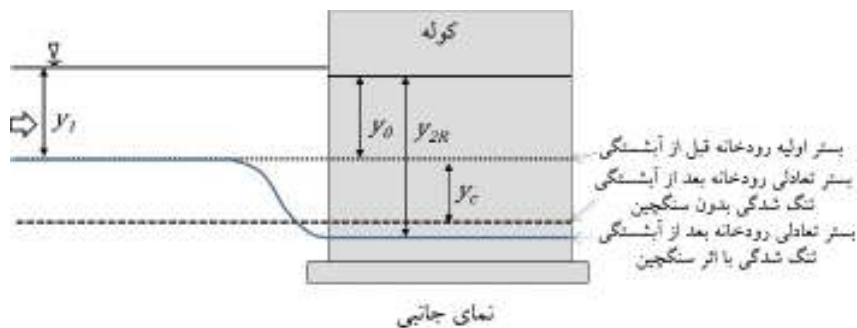
$$\beta_B = 0.5 \left[1 - (1 + C_{CB}) \frac{\hat{A}_1^2}{A_2^2} \right] \quad (4)$$

که در آن β_B ضریب شکل کانال برای مدل بدون سنگچین (بدون بعد) است. جایگزینی ضریب شکل کانال، منتهی به رابطه (۵) می‌گردد.

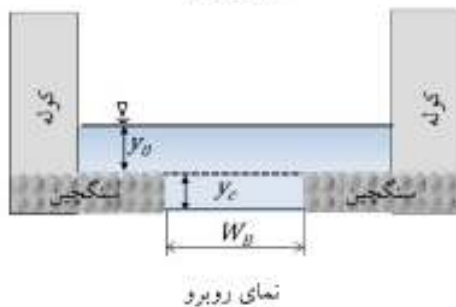
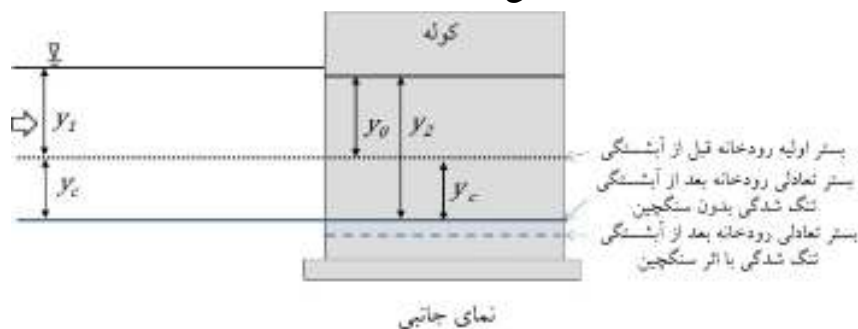
$$\frac{y_2}{\hat{y}_1} = 1 + \beta_B \overline{Fr}_1^2 \quad (5)$$

A_{2R} مساحت مقطع تنگ‌شدگی با سنگچین پس از آبشستگی تنگ‌شدگی تا عمق y_c است. شکل (۱۰) نمایی کلی برای استفاده از معادلات پیوستگی و انرژی را نشان می‌دهد. متغیر y_1 برابر است با $y_1 + y_c$ (شکل (۹)) (FHWA, 2017).

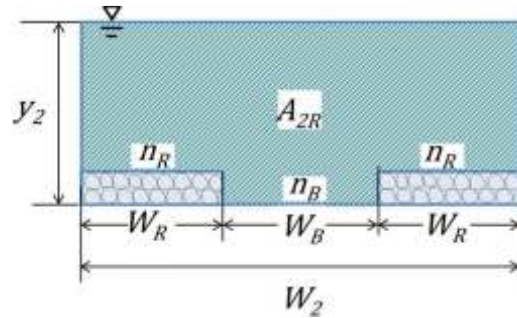
طوری تغییر کند که ارتفاع کف به اندازه عمق تخمینی آبشستگی (y_c) پایین‌تر رود. W_B عرض کف مصالح بستر است. شکل (۹) شرایط جریان در دهانه با سنگچین در حالت آبشستگی تنگ‌شدگی تخمینی بدون سنگچین ($y_2 = y_0 + y_c$) را نشان می‌دهد. در این حالت، زبری کف برای مصالح بستر طبیعی n_B و برای سنگچین n_R است.



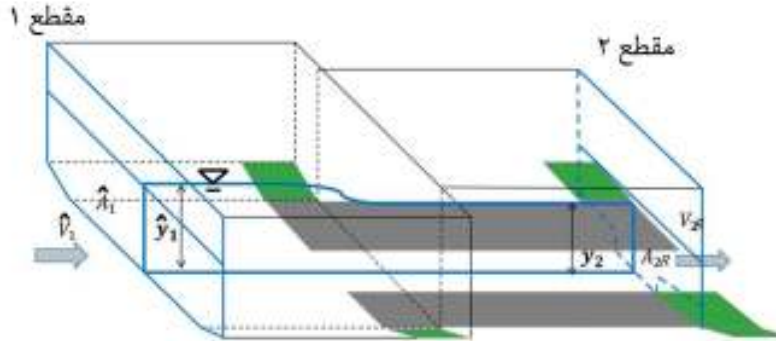
شکل ۷. طرح مفهومی در حالت با سنگچین



شکل ۸. نمای ساده شده مفهومی در حالت با سنگچین



شکل ۹. مقطع در دهانه در حالت با سنگچین



شکل ۱۰. حجم کنترل انرژی و پیوستگی در حالت با سنگچین

(۱۱) (معادله انرژی اصلاح شده در حالت با سنگچین) اصلاح می‌شود.

$$y_2 = \hat{y}_1 + \frac{\hat{V}_1^2}{2g} - (1 + C_{CR}) \frac{V_{2R}^2}{2g} + \frac{\hat{V}_1^2}{2g} \left[1 - (1 + C_{CR}) \frac{\hat{A}_1^2}{A_{2R}^2} \right] \quad (11)$$

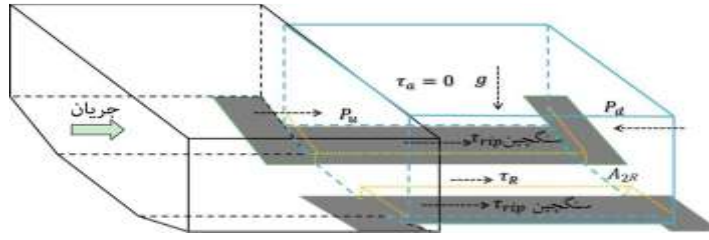
برای توسعه یک رابطه برای تنش برشی در بستر پس از رسیدن عمق آبشستگی تنگ‌شدگی به $2l$ ، دو فرض مد نظر قرار گرفته است. فرض اول به این صورت است که در تنگ‌شدگی، جریان می‌تواند به صورت جریان متغیر تدریجی در نظر گرفته شود و در نتیجه آن پارامتر شتاب و پارامتر اختلاف فشار بالادست و پایین‌دست تقریباً صفر است. از آنجایی که سطوح جلویی کوله صاف هستند فرض دوم به صفر بودن تقریبی برش در سطح جلویی کوله اشاره دارد ($\tau_a = 0$). این مقادیر به صورت شماتیک بر روی حجم کنترل در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند.

معادلات پیوستگی و انرژی برای حالت با سنگچین در معادلات (۹) و (۱۰) خلاصه شده‌اند.

$$\begin{aligned} \hat{V}_1 \hat{A}_1 &= V_{2R} A_{2R} \quad (9) \\ z_1 + \hat{y}_1 + \alpha_1 \frac{\hat{V}_1^2}{2g} &= z_2 + y_2 + \alpha_{2R} \frac{V_{2R}^2}{2g} + h_R \quad (10) \end{aligned}$$

V_{2R} سرعت متوسط در مقطع تنگ‌شدگی با سنگچین پس از آبشستگی تنگ‌شدگی تا عمق y_c (m/s)، ضریب اصلاح انرژی برای مقطع تنگ‌شدگی با سنگچین (بدون بعد) و h_R افت انرژی بین مقاطع بالادست و تنگ‌شدگی با سنگچین (متر) می‌باشند.

همانگونه که قبلاً نیز عنوان شد، ضرایب اصلاح انرژی برای جریان متغیر تدریجی تقریباً برابر با ۱ تا ۱/۰۱ است. افت انرژی بین دو مقطع با سنگچین (h_R) به صورت حاصلضرب ضریب تنگ‌شدگی مدل بدون سنگچین (C_{CR}) در هد سرعت مقطع تنگ‌شدگی تعریف می‌شود. معادله (۱۰) با این فرض که دو ارتفاع مرجع تقریباً برابرند (شیب ملایم) و با جایگزینی V_2 از معادله پیوستگی، به شکل معادله



شکل ۱۱. حجم کنترل مومنتوم در حالت با سنگچین

و نمایش عرض بستر طبیعی بر حسب W_2 نیز منجر به معادله (۱۸) برای ضریب زبری ترکیبی n شده است (Lagasse et. al., 2009).

$$n = \left(\frac{4y_0 n_R^{1.5} + (W_2 - 4y_0) n_B^{1.5}}{W_2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (18)$$

۴-۱- عمق معادل برای پیشبند سنگچین

مقطع شکل (۱۱) برای حالت با سنگچین به صورت مقطع مستطیلی معادل در شکل (۱۲) ساده‌سازی شده است. عمق معادل (y_e) به اضافه تنظیم عمودی (ΔZ) برابر با y_2 است. ضریب زبری ترکیبی بستر n و متوسط تنش برشی آن (τ_{avg}) است. مساحت مقطع مشابه همان است که در حالت سنگچین قبلی استفاده شده است.

شکل (۱۳) حجم کنترل برای عمق معادل در حالت با سنگچین را نشان می‌دهد. معادله انرژی برای این حالت در معادله (۱۹) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} z_1 + \hat{y}_1 + \alpha_1 \frac{\hat{V}_1^2}{2g} &= z_2 + y_2 + \alpha_{2R} \frac{V_{2R}^2}{2g} + h_R \\ &= z_2 + y_e + \alpha_{2e} \frac{V_{2e}^2}{2g} + h_e + \Delta Z \end{aligned} \quad (19)$$

با فرض شیب ملایم (z_1 تقریباً برابر با z_2) و برابر بودن ضرایب اصلاح انرژی (α_{2R} و α_{2e}) با مقدار ۱، معادله (۲۰) استخراج شده است.

$$\begin{aligned} y_e = \hat{y}_1 + \frac{\hat{V}_1^2}{2g} - (1 + C_{ce}) \frac{V_{2R}^2}{2g} - \Delta Z &= \hat{y}_1 + \frac{\hat{V}_1^2}{2g} \left[1 - (1 + C_{ce}) \frac{\hat{A}_1^2}{A_{2R}^2} \right] - \Delta Z \end{aligned} \quad (20)$$

τ_{rip} میانگین تنش برشی بستر بر روی سنگچین است. میانگین تنش برشی بستر در تنگ‌شدگی با سنگچین در رابطه (۱۲) نشان داده شده است.

$$\tau_R (W_2 - 2W_R) l_2 + \tau_{rip} 2W_R l_2 = \gamma A_{2R} l_2 S \quad (12)$$

میانگین تنش برشی بستر در دهانه در معادله (۱۳) نشان شده است.

$$\tau_{avg} = \frac{[\tau_R (W_2 - 2W_R) + \tau_{rip} 2W_R]}{W_2} \quad (13)$$

جایگزینی معادله (۱۳) در معادله معادله (۱۲) منجر به معادله شیب انرژی (معادله (۱۴)) می‌گردد.

$$S = \frac{\tau_{avg} W_2}{\gamma A_{2R}} \quad (14)$$

فرمول مانینگ در حالت با سنگچین در کانال باز با زبری ترکیبی (n) در معادله (۱۵) نشان داده شده است.

$$Q = \frac{1}{n} A_{2R} R_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

با فرض نسبتاً صاف بودن دیوارهای کوله، عرض بودن مقطع و صرف‌نظر نمودن از سطوح عمودی سنگچین، شعاع هیدرولیکی تقریباً A_{2R}/W_2 خواهد بود. جایگزینی معادله (۱۴) در معادله (۱۵) منجر به رابطه (۱۶) برای میانگین تنش برشی کف در حالت با سنگچین خواهد شد (FHWA, 2017).

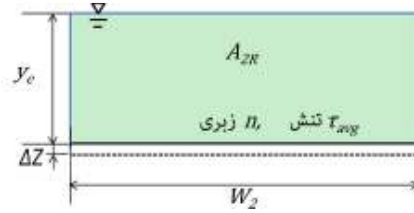
$$\tau_{avg} = \gamma \left(\frac{W_2^{\frac{1}{7}}}{A_{2R}} \right)^{\frac{7}{3}} (Qn)^2 \quad (16)$$

ضریب زبری ترکیبی مانینگ (n) می‌تواند با استفاده از فرمول زبری معادله (۱۷) محاسبه شود.

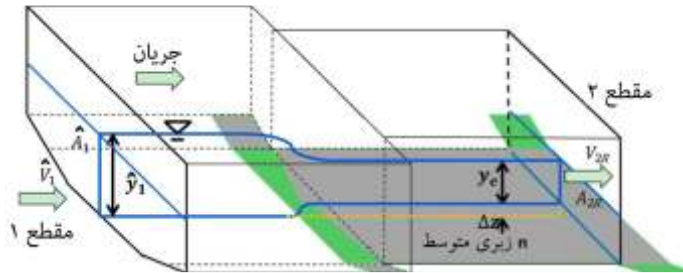
$$n = \left(\frac{2W_R n_R^{1.5} + W_B n_B^{1.5}}{W_2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (17)$$

ضریب زبری ترکیبی n برای بستر و سنگچین با استفاده از معادله استریکلر که بین ضریب زبری و اندازه مصالح بستر رابطه برقرار می‌کند، محاسبه شده است. عرض پیشبند (W_R) با توجه به دستورالعمل HEC-23 برابر $2y_0$ تعیین گردیده

که در آن C_{ce} ضریب تنگ‌شدگی برای مدل معادل با سنگچین (بدون بعد) است. با تعریف ضریب شکل کانال (β_e) (معادله (۲۱)) و بازنویسی معادله (۲۰) بر حسب نسبت عمق منجر به معادله (۲۲) می‌شود (FHWA, 2017).



شکل ۱۲. مقطع دهانه معادل با زبری و برش یکنواخت



شکل ۱۳. حجم کنترل برای عمق معادل در حالت با سنگچین

$$\frac{n}{n_B} = \left[\frac{4y_0 n_R^{1.5} + (W_2 - 4y_0) n_B^{1.5}}{W_2} \right]^{\frac{2}{3}} \frac{1}{n_B} \quad (24)$$

$$= \left[\frac{4n_R^{1.5} + \left(\frac{W_2}{y_0} - 4\right) n_B^{1.5}}{\frac{W_2}{y_0}} \right]^{\frac{2}{3}} \frac{1}{n_B}$$

از آنجایی که A_2 و A_{2R} بتربیب برابر با حاصلضرب W_2 در y_2 و W_2 در y_e است، نسبت مساحت مطابق معادله (۲۵) نشان داده می‌شود.

$$\frac{A_2}{A_{2R}} = \frac{y_2}{y_e} \quad (25)$$

جایگزینی نسبت زبری و نسبت مساحت در معادله (۲۳) منجر به نسبت تنش برشی (معادله (۲۶)) می‌شود.

$$\frac{\tau_{avg}}{\tau_B} = \left(\frac{y_2}{y_e}\right)^{\frac{7}{3}} \times \left(\left[\frac{4n_R^{1.5} + \left(\frac{W_2}{y_0} - 4\right) n_B^{1.5}}{\frac{W_2}{y_0}} \right]^{\frac{2}{3}} \frac{1}{n_B} \right)^2 \quad (26)$$

$$\beta_e = 0.5 \left[1 - (1 + C_{ce}) \frac{\hat{A}_1^2}{A_{2R}^2} \right] \quad (21)$$

$$\frac{y_e}{\hat{y}_1} = 1 + \beta_e \widehat{Fr}_1^2 - \frac{\Delta Z}{\hat{y}_1} \quad (22)$$

که در آن β_e ضریب شکل کانال برای مدل معادل با سنگچین (بدون بعد) است.

۵- نسبت تنش برشی

نسبت تنش برشی بستر برای حالت با سنگچین (معادله (۱۶)) به حالت بدون سنگچین (معادله (۸)) در معادله (۲۳) نشان داده شده است.

$$\frac{\tau_{avg}}{\tau_B} = \left(\frac{A_2}{A_{2R}}\right)^{\frac{7}{3}} \left(\frac{n}{n_B}\right)^2 \quad (23)$$

با استفاده از عبارت مربوط به ضریب زبری ترکیبی n در معادله (۱۸)، نسبت مقادیر زبری در معادله (۲۴) نشان داده شده است.

زبری مانینگ (n_R/n_B) بیان گردیده است. ابعاد جریان در تنگ‌شدگی نیز در نسبت عرض تنگ‌شدگی به عمق جریان قبل از آبشستگی بیان شده است. مقدار زیاد این نسبت می‌تواند نشان کانال عریض و مقدار کم آن می‌تواند نشان کانال باریک باشد. علاوه بر این، میزان تنگ‌شدگی، شامل اتلاف انرژی، در عبارت معادله‌ای که شامل ضرایب شکل کانال بود، لحاظ گردیده است. میزان تنگ‌شدگی نیز بر اندازه سنگچین مورد نیاز برای محافظت از کوله تاثیر می‌گذارد (FHWA, 2017). جهت بررسی و تایید عملکرد رابطه (۲۸) نتایج شبیه‌سازی عددی جریان در محل پل در حالت بدون استفاده از سنگچین و با استفاده از سنگچین در شکل ۱۴ نشان داده شده است (FHWA, 2017). این شکل توزیع تنش برشی بستر مدل با سنگچین را با مدل بدون سنگچین برای یک حالت مشابه مفروض مقایسه می‌کند که در آن تنش برشی برای مورد بدون سنگچین (τ_B) برابر ۱/۴ پاسکال، برای مورد با سنگچین (τ_R) برابر ۳/۳ پاسکال و نسبت این دو برابر τ_R/τ_B برابر ۲/۴ بوده است. این نتایج افزایش تنش برشی بستر در مصالح حفاظت نشده در حالت با سنگچین را تایید می‌کند.

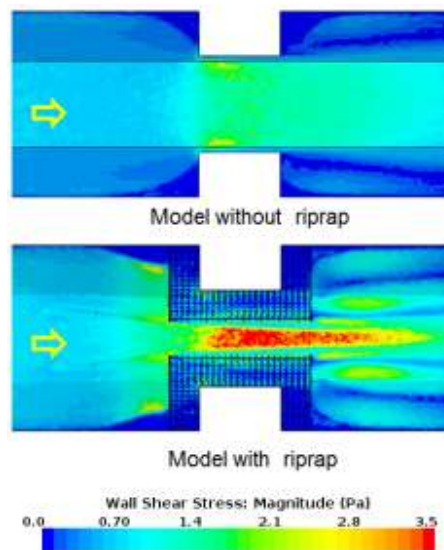
جایگزینی‌های دیگر برای y_2 (معادله (۵)) و y_e (معادله (۲۲)) منجر به معادله (۲۷) گردیده است.

$$\frac{\tau_{avg}}{\tau_B} = \left[\frac{4 \left(\frac{n_R}{n_B} \right)^{1.5} + \left(\frac{W_2}{y_0} - 4 \right)}{\frac{W_2}{y_0}} \right]^{\frac{4}{3}} \times \left(\frac{1 + \beta_B \bar{F}r_1^2}{1 + \beta_e \bar{F}r_1^2 - \frac{\Delta Z}{\bar{y}_1}} \right)^{\frac{7}{3}} \quad (27)$$

با جایگزینی (τ_{avg}) با (τ_R) در سمت چپ معادله و همچنین مقدار توان 4/3 با پارامتر جدید (ε) در سمت راست آن، معادله (۲۸) حاصل می‌گردد.

$$\frac{\tau_R}{\tau_B} = \left[\frac{4 \left(\frac{n_R}{n_B} \right)^{1.5} + \left(\frac{W_2}{y_0} - 4 \right)}{\frac{W_2}{y_0}} \right]^{\varepsilon} \times \left(\frac{1 + \beta_B \bar{F}r_1^2}{1 + \beta_e \bar{F}r_1^2 - \frac{\Delta Z}{\bar{y}_1}} \right)^{\frac{7}{3}} \quad (28)$$

در رابطه فوق ε تابع مربوط به نسبت زبری سنگچین به زبری مصالح فرسایش پذیر بستر (بدون بعد) است. طبق معادله (۲۸)، نسبت تنش برشی در وسط کانال، با و بدون پیشبندهای سنگچین، با چندین عامل تغییر می‌کند. اندازه نسبی سنگچین نسبت به مصالح بستر در پارامتر نسبت مقادیر



شکل ۱۴. مقایسه توزیع تنش برشی کف برای حالت با سنگچین و بدون سنگچین (FHWA, 2017)

۶- نتیجه گیری

- محجوب، ا. و گواشیری، ز.، (۱۳۹۴)، "راهنمای مطالعات هیدرولیکی پل‌ها"، ضابطه شماره ۳۸۷، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

- ناصریان، م.، مسجدی، ع.ر. و کمانبدست، ا.ع.، (۱۳۹۲)، "بررسی اثر قطرنسی سنگچین بر پایداری سنگدانه‌ها در اطراف تکیه‌گاه پل بالدار در قوس ۱۸۰ درجه"، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.

- Adams, M.T., Schlatter, W., and Stabile, T., (2007), "Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Abutments at the Bowman Road Bridge in Defiance County, Ohio.", Proceedings of Geo-Denver 2007: Geosynthetics in Reinforcement and Hydraulic Applications, American Society of Civil Engineers, Reston, VA. pp. 1-10.

- FHWA, (2017), "Hydraulic Performance of Shallow Foundations for the Support of Vertical-Wall Bridge Abutments", PUBLICATION NO. FHWA-HRT-17-013.

- Lagasse, P.F., Clopper, P.E., Pagán-Ortiz, J.E., Zevenbergen, L.W., Arneson, L.A., Schall, J.D., and Girard, L.G. (2009) Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures, Hydraulic Engineering Circular No. 23. Report No. FHWA-NHI-09-111. Federal Highway Administration, Washington DC.

-Melville, B.W., van Ballegooy, S., Coleman, S.E., and Barkdoll, B. (2006B), "Countermeasure Toe Protection at Spill-Through Abutments", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132, No. 3, pp. 235-245.

- Petersen, T.U., Sumer, M.B., Boegelund, J., Yazici, A., Fredsoe, J., and Meyer, K.E., (2015), "Flow and Edge Scour in Current Adjacent to Stone Covers," Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 141, No. 4.

یکی از روش‌های متداول محافظت از پل در برابر آبستگي، استفاده از سنگچين است. با اين حال، قرار دادن اين زبري ناهمگن (سنگچين در مقابل مواد طبيعي بستر) در دهانه پل، الگوي جريان را بر اثر گذر از روي سطح زبر تغيير مي‌دهد که در ابتدا به شکل جريان‌هاي قوي ثانويه نمود پيدا مي‌کند. آشفتهگي جريان ايجاد شده از اطراف سطح زبر پيشبند سنگچين به داخل بخش رسوبات بستر نرم‌تر پخش مي‌شود. جريان براي رسيدن به حالت تعادل در شرايط زبري متغير در کف، تنش برشي بستر در مصالح بستر طبيعي محافظت نشده را افزايش مي‌دهد و نهايتاً منجر به ايجاد عمق آبستگي تنگ‌شدگي بيشتري از حالت بدون حفاظت سنگچين خواهد گرديد. اين افزايش عمق مي‌تواند باعث ناپايداري پيشبند سنگچين و در نهايت شروع حرکت آن در لبه‌ها گردد. اندازه نسبي سنگچين نسبت به مصالح بستر، ابعاد جريان در تنگ‌شدگي و هندسه تنگ‌شدگي از پارامترهاي موثر در تعيين ميزان نسبت تنش برشي در وسط کانال، با و بدون پيشبندهاي سنگچين است.

۷- مراجع

- جاسمی زرگانی، ا. و کاشفی‌پور، س.م.، (۱۳۹۶)، "اثر شرايط جريان و عوامل هندسي آبشکن مستغرق در پايداري ريب رپ"، فصلنامه علوم آب و خاک، سال (۲۱)، شماره (۳).

- دولتشاهی پیروز، م. و کریمی، ع.، (۱۳۹۶)، "راهنمای پیشگیری و تعمیر خرابی‌های ناشی از آبستگي در پل‌ها"، شماره نشر: گ- ۷۹۵، انتشارات: پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و شهرسازی.

- زراتی، م. (۱۳۸۶)، "دستورالعمل تثبيت بستر پل‌هاي موجود"، معاونت آموزش، تحقيقات و فناوري وزارت راه و شهرسازي.

Conceptual Model of bed Shear Stress in Single-Span Rip rap-Protected Bridges

A. Mahjoob, Assistant Professor, Transportation Research Institute, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

F. Kilanehei, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

E-mail: a.mahjoob@bhrc.ac.ir

Received: September 2019- Accepted: December 2019

ABSTRACT

Vertical bridge abutments along the river cause three-dimensional flow and can cause scour at the bridges and eventually damage the bridge. In cases where deep foundations are not used, the level of vulnerability increases. These abutments are often used for single-span bridges and scour countermeasures such as using riprap apply. The purpose of the current study is to present a conceptual model of localized bed shear stresses applied to heterogeneous bed roughness at bridge opening. The adaptation of the flow with the change in roughness of the rock material compared to the bed material results in increased bed shear stress in the unprotected bed material and eventually the contraction scour depth increase compare with that without rock protection.

Keywords: Shallow Foundation, Shear Stress, Single-Span Bridge, Rip Rap, Flood