

نسبت تنش برشی در بستر محافظت نشده در شرایط

با و بدون سنگچین در دهانه پل

مقاله پژوهشی

امیر محجوب*، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.mahjoob@bhrc.ac.ir

دریافت: ۹۹/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۹۹/۰۶/۲۰

صفحه ۱۵۶-۱۴۵

چکیده

یکی از عمده‌ترین دلایل تخریب پل‌های رودخانه‌ای، آبخستگی زیر پی سطحی کوله در اثر سیلاب است. در برخی موارد جهت مقابله با این پدیده، بستر با مصالح سنگچین مقاوم‌سازی می‌گردد. استفاده از این روش دارای مزایا و معایب متعددی است. یکی از معایب استفاده از سنگچین همتراز با بستر طبیعی این است که زبری ناهمگون سنگچین در مقابل زبری مواد طبیعی بستر، سبب ایجاد اختلال در جریان شده و جریان‌های قوی ثانویه ایجاد می‌کند. جریانات مذکور می‌تواند منجر به افزایش تنش برشی و عمق آبخستگی در بستر محافظت نشده گردد. جهت مطالعه موضوع، مدل مفهومی تعیین نسبت تنش برشی در بستر محافظت نشده در دو حالت با و بدون سنگچین بررسی شده است. در استخراج مدل مفهومی، از آزمون‌های شبیه‌سازی عددی در بستر انعطاف‌پذیر استفاده شده است. در ادامه ضمن ارائه صحت‌سنجی عملکرد مدل عددی Flow3D، از مدل مذکور جهت شبیه‌سازی جریان در دو حالت با و بدون سنگچین در بستر صلب استفاده شده است. در شرایط بستر صلب هزینه‌های محاسباتی و سخت‌افزاری به طور قابل توجهی نسبت به شرایط بستر انعطاف‌پذیر کاهش می‌یابد. نسبت تنش برشی در بستر محافظت نشده محاسبه گردیده و معادله چند جمله‌ای درجه دو برآزش شده برای نسبت‌های مختلف زبری ارائه گردیده است. ضریب تعیین در هر مورد نشان از تطابق مناسب نسبت تنش در دو حالت بستر انعطاف‌پذیر و صلب دارد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، تکیه‌گاه پل، پل‌های تک دهانه، تنش برشی، ریپ‌رپ

۱- مقدمه

بالاست. بنابراین، برای حفاظت از کوله پل‌های کوچک تک دهانه بر روی پی‌های کم عمق در برابر آسیب آبخستگی روش‌هایی لازم است که طراحی کوله (به عنوان جزئی یکپارچه از پل) و اقدامات پیشگیرانه ضد آبخستگی آن را مورد توجه قرار دهند (FHWA, 2017). یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین اقدامات پیشگیرانه ضد آبخستگی، پوشاندن بستر با مصالح مقاوم مثل سنگچین است که می‌تواند آبخستگی زیر کوله‌ها را کنترل کند (Tippireddy, 2017). وزن مرده خالص سنگ‌ها، از بستر که در معرض نیروی فرسایش ایجاد شده توسط سرعت جریان می‌باشد، حفاظت می‌کنند. برای حفظ ثبات و پایداری سنگچین و بمنظور جلوگیری از شسته شدن ذرات خاک از لابه‌لای قطعات

وجود تکیه‌گاه پل در مسیر رودخانه باعث ایجاد جریان‌های سه‌بعدی شده و می‌تواند سبب ایجاد آبخستگی موضعی در محل پل‌ها گردد. با افزایش آبخستگی، زیر پی کوله خالی شده و گاه منجر به تخریب پل می‌شود. پی‌های سطحی کوله‌ها که اغلب برای پل‌های تک دهانه اجرا می‌شوند آسیب پذیرتر از سایر پی‌ها هستند. در این نوع پی‌ها اقدامات پیشگیرانه ضد آبخستگی بیشتری در طراحی به عمل می‌آید تا از قرار گرفتن آن‌ها در زیر عمق آبخستگی موضعی جلوگیری گردد. حدود ۸۰ درصد از بیش از ۶۰۰ هزار پل رودخانه‌ای (در آمار پل ملی آمریکا)، پل‌های تک دهانه با طول ۲۱ تا ۲۸ متر هستند (Adams et. Al., 2007). در ایران نیز تعداد پل‌های تک دهانه نسبت به سایر پل‌ها

سنگی درشت، لازم است لایه سنگچین روی یک لایه فیلتر متشکل از شن و ماسه با دانه بندی مناسب استقرار یابد. نشریه HEC-23 دستورالعمل‌هایی برای حداقل ضخامت و محدوده پیش‌بند برای محافظت از پی کوله در برابر آبشستگی ناشی از گرداب‌های موضعی حفاظت شود را ارائه کرده است (Lagasse et. al., 2009).

برای تحلیل بهتر موضوع، بررسی ادبیات فنی به عمل آمد و نشان می‌دهد تحقیق در مورد عملکرد سنگچین و مصالح دیگر به عنوان اقدامات پیشگیرانه برای حفاظت از کوله‌های پل در برابر آبشستگی بیش از چهار دهه ادامه داشته است. در پژوهشی به صورت آزمایشگاهی، مکانیسم تخریب، پایداری و تاثیر تراز قرارگیری سنگچین در اطراف پایه‌های پل‌ها در شرایط آب صاف و بستر زنده بررسی شده است. تاثیر نحوه قرارگیری سنگچین به صورت همسطح با بستر و همچنین به صورت مدفون نیز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مطالعات نشان داد که با افزایش سرعت جریان، توانایی سنگچین برای محافظت از پایه کاهش می‌یابد. علاوه بر آن نصب سنگچین در تراز پایین‌تر از بستر در مقابل آبشستگی موضعی عملکرد بهتری دارد. رابطه‌ای جهت تعیین اندازه سنگدانه‌های سنگچین نیز پیشنهاد شده است که شامل تراز قرارگیری سنگچین می‌باشد (Lauchlan and Melville, 2001).

ملویل و همکارانش مطالعه آزمایشگاهی مقابله با آبشستگی برای کوله‌های مخروط ناقص مستقر بر سیلاب‌دشت مقاطع مرکب را انجام دادند. هدف از این مطالعه تعیین تغییرات در هندسه حفره آبشستگی تحت شرایط آب صاف با تغییر در هندسه کوله و کانال مرکب است. ترکیب روش استفاده از سنگچین و روش بلوک‌های به هم پیوسته کابلی مدنظر قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در اکثر موارد، با افزایش عرض پیشبند (افزایش عملیات حفاظتی)، حفره آبشستگی از کوله دورتر شده و ابعاد آن کم می‌شود. با این حال، در مواردیکه حفره آبشستگی در نزدیکی ساحل کانال اصلی تشکیل می‌گردد، ابعاد حفره آبشستگی با افزایش عرض پیشبند افزایش می‌یابد. همچنین معادله‌ای برای محاسبه عمق آبشستگی و حداقل طول پیشبند سنگچین مورد نیاز برای کوله‌های مخروط ناقص مستقر در سیلاب‌دشت کانال مرکب ارائه گردیده است (Melville et. al., 2006). در تحقیق دیگری طراحی پیشبند سنگچین به عنوان روش حفاظتی

کوله‌های مخروط ناقص و عمودی در مقابل آبشستگی تحت شرایط آب صاف بررسی گردید. تحقیق مذکور بر روی توسعه حفره آبشستگی در لبه پیشبند متمرکز شده است. حفره آبشستگی در حالت کوله مخروط ناقص نسبت به حالت کوله عمودی در فاصله دورتری تشکیل می‌شود و با افزایش طول کوله، فاصله عمیق‌ترین نقطه آبشستگی تا کوله افزایش می‌یابد. همچنین، اظهار کردند که تاثیر انقباض جریان روی این فاصله قابل تشخیص نیست. در نهایت حداقل طول پیشبند پیشنهاد شده است (Cardoso et. al., 2010). برای بررسی مکانیزم‌های آبشستگی لبه سنگچین در جریان‌ها و درک بهتر علل آن پترسن و همکاران مبادرت به انجام دو آزمایش تحت شرایط بستر زنده و شرایط آب صاف نمودند. مکانیزم‌های حاکم بر آبشستگی لبه عبارت بودند از آشفستگی در جریان اولیه هنگام نزدیک شدن به تقاطع بین لایه سنگی و بستر ماسه‌ای و شکل گرفتن جریان ثانویه پیچیده. رسوب بستر توسط آشفستگی جریان معلق شده و سپس توسط جریان ثانویه به جای دیگری حمل می‌شود. علت معلق شدن رسوب ترکیب دو نوع آشفستگی با هم بود: (۱) آشفستگی در جریان اصلی که در لایه مرزی کاملاً توسعه یافته بر روی بستر ماسه‌ای و لایه سنگی تولید شده بود و (۲) آشفستگی‌ای که به طور موضعی در اطراف هر یک از سنگ‌ها در پنجه ایجاد و باعث تشکیل گردابه‌های نعل اسبی گردید. با سقوط سنگ‌های زیرین، سنگ‌های فوقانی نیز به سمت لبه حرکت کردند. پارامترهای مؤثر در ایجاد میدان جریان سه‌بعدی، شامل جریان‌های ثانویه و آشفستگی در مجاورت لایه سنگ پوششی، عبارت بودند از میزان زبری المان‌ها و تا حدی شیب دیواره سنگچین (Petersen et. al., 2015). در پژوهشی استفاده از سنگچین در هنگام بهره‌برداری، جهت ترمیم و بهسازی عملکرد پل بررسی شد. خصوصاً در زمانیکه شرایط جریان در طی دوران بهره‌برداری تغییر کرده باشد. به عنوان نمونه بدلیل تغییر زاویه برخورد جریان به پلی در ایالت کالیفرنیا، فرآب تشدید شده و عمق آبشستگی افزایش یافت. مطالعاتی درخصوص استفاده از سنگچین جهت بهبود شرایط انجام شد (Bojanowski et. al., 2017). از نکات قابل توجه اینست که در مواردی ساین سنگدانه‌های موجود برای مقاومت ۱۰۰ درصد در مقابل آبشستگی کافی نیست. در تحقیقی اثر اندازه‌های کوچکتر

سبب تاخیر در فرآیند آبستگی و تغییر محل حفره آبستگی گردید (Hong and Irfan, 2019).

در موارد فوق برخی از مطالعات انجام شده در مورد نحوه استفاده از سنگچین ارائه گردید اما استفاده از سنگچین همتراز با بستر طبیعی معایبی نیز دارد و می‌تواند سبب ایجاد اختلال در جریان باشد. یکی از این موارد اختلال، افزایش تنش برشی در بستر محافظت نشده در مجاورت سنگچین است که شناخت آن بسیار حائز اهمیت است. در ادامه مدل مفهومی تعیین نسبت تنش برشی با وجود سنگچین (T_R) به تنش برشی بدون وجود سنگچین (T_B) در بستر محافظت نشده ارائه خواهد شد. از طرف دیگر نسبت تنش برشی مذکور را می‌توان با استفاده از انجام مطالعات عددی در شرایط بستر انعطاف‌پذیر نیز محاسبه نمود. اما روشن است که هزینه‌های محاسباتی انجام مطالعات هیدرولیکی در بستر انعطاف‌پذیر از لحاظ دانش فنی مورد نیاز، سخت‌افزار مورد نیاز و زمان انجام محاسبات پرهزینه‌تر از مطالعات هیدرولیکی در بستر صلب است. در این مقاله در شرایط بستر صلب، نسبت تنش در همان شرایط هندسی و هیدرولیکی محاسبه شده و نشان داده شده است که می‌توان با انجام برازش چندجمله‌ای مرتبه دوم، با دقت بسیار خوبی به نسبت تنش در شرایط بستر انعطاف‌پذیر رسید.

۲- مدل مفهومی نسبت تنش برشی در بستر محافظت نشده در شرایط وجود سنگچین به حالت بدون سنگچین

نکته قابل ذکر اینست که در استفاده از سنگچین باید به تاثیر وجود زبری‌های ناهمگون سنگچین در مقابل زبری مواد طبیعی بستر در کنار یکدیگر توجه کرد. این شرایط سبب تغییر در جریان شده و در ابتدا به شکل جریان‌های قوی ثانویه نمود پیدا می‌کند. تحقیقی تجربی توسط پیترسون و همکاران نشان داده است که آشفته‌گی جریان ایجاد شده چگونه از اطراف سطح زبر پیش‌بند سنگچین به داخل بخش رسوبات بستر نرم‌تر پخش می‌شود (Petersen et. al., 2015). تغییرات جریان به علت تفاوت زبری مصالح سنگچین و زبری مصالح بستر، سبب افزایش تنش برشی بستر در مصالح بستر طبیعی محافظت نشده نسبت به حالت بدون سنگچین خواهد گردید. عمق آبستگی افزایش یافته و

سنگدانه بر عمق آبستگی مورد مطالعه قرار گرفته است. سنگدانه‌های گرد و تیز گوشه برای پهنه‌های دایروی و بیضوی سنگچین مورد آزمون قرار گرفتند. تمامی آزمون‌ها تا آستانه حرکت رسوبات بستر انجام شدند و حداکثر عمق آبستگی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد در مورد اندازه‌های سنگدانه‌های نزدیک به سنگدانه‌های پایدار سنگچین، بازده سنگدانه‌های گرد و تیز گوشه یکسان بود. چنانچه اندازه ذرات سنگچین کاهش یابد، حفره‌های آبستگی عمیق‌تری با هر دو مصالح گرد و تیز گوشه مشاهده شدند. افزایش پهنه سنگچین از دایره به بیضی با حجم سنگچین ۵ برابر، تاثیر قابل توجهی بر حفره آبستگی برای سنگدانه‌های تیز گوشه دارد و در ضمن سبب کاهش عمق آبستگی در مصالح گرد می‌گردد. در این پژوهش همچنین بر اساس نتایج آزمایشگاهی روشی برای محاسبه اندازه سنگچین کوچکتر بر اساس حفره آبستگی کوچکتر قابل قبول ارائه گردید (Khademghaeiny et. al., 2018). کریمایی و همکارانش یک روش احتمالی برای تخمین اندازه سنگچین پایدار در اطراف پایه‌های پل توسعه دادند. در این تحلیل عدم قطعیت‌ها در تعیین متغیرهای هیدرولیکی سیلاب طراحی و همچنین عدم قطعیت‌ها در دقت مدل تجربی لحاظ شده است. با استفاده از روش مذکور اندازه سنگچین با هر سطحی از قابلیت اطمینان مورد نظر و طول عمر مفید پل محاسبه می‌گردد. این بدان معناست که امکان طراحی مهندسی اندازه سنگچین بر اساس محدودیت‌های اجرایی و اقتصادی امکان‌پذیر است. استفاده از روش مذکور با استفاده از دو مطالعه موردی توضیح داده شد. (Karimaei, Tabarestani and Zarrati, 2018). اخیراً نیز در تحقیقی، مطالعات آزمایشگاهی آبستگی کوله در سه حالت جریان آزاد، مرز استغرق (تراز جریان در تراز عرشه پل) و کاملاً مستغرق (جریان کاملاً از روی پل عبور نماید) بر روی کانال مرکب انجام گردیده است. کوله‌ها با استفاده از سنگچین و بر اساس استاندارد HEC-23 در مقابل آبستگی مقاوم‌سازی شده‌اند. طول‌های مختلفی از کوله برای تعیین اثر تنگ‌شدگی جریان بر آبستگی کوله در نظر گرفته شد. در بازه‌های زمانی تعیین شده، خطوط همتراز بستر برای جریان‌های مذکور تعیین گردیده است. لازم به ذکر است وجود سنگچین

محققینی برای درک بهتر رابطه بین نسبت برش (در دو حالت با و بدون حفاظت کوله با سنگچین) به متغیرهای مستقل بالقوه آن از آنالیز ابعادی استفاده کردند. با کاربرد معادلات پیوستگی، انرژی، و مومنتوم برای حالت با و بدون سنگچین و انجام ساده‌سازی‌هایی، نسبت تنش برشی در بستر طبیعی محافظت نشده به صورت رابطه زیر بدست آمده است (FHWA, 2017).

$$\frac{\tau_R}{\tau_B} = \left[\frac{4 \left(\frac{n_R}{n_B} \right)^{1.5} + \left(\frac{W_2}{y_0} - 4 \right)}{\frac{W_2}{y_0}} \right]^\varepsilon \left(\frac{1 + \beta_B \widehat{F}T_1^2}{1 + \beta_e \widehat{F}T_1^2 - \frac{\Delta Z}{y_1}} \right)^{\frac{7}{3}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = 1.25 \frac{n_R}{n_B} - 2.55 \quad (2)$$

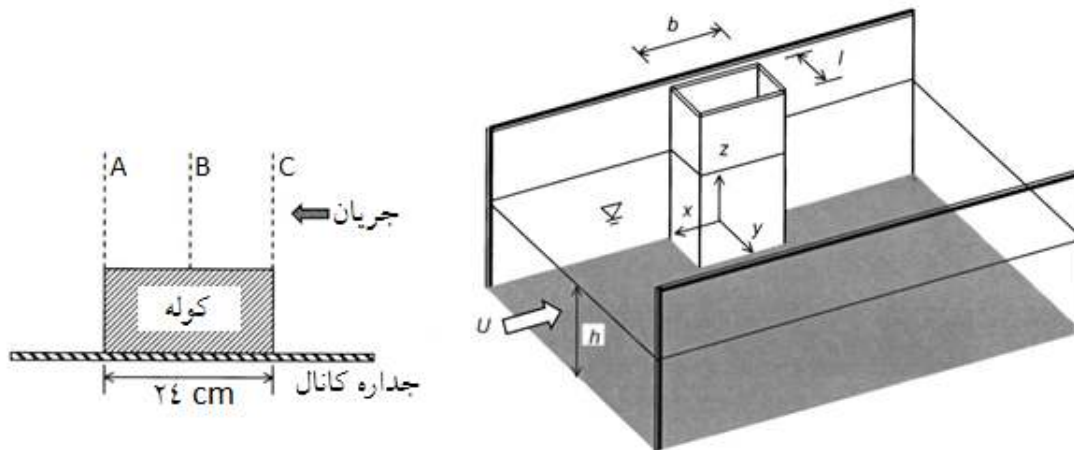
انعطاف پذیر بدست آمده است (FHWA, 2017). شرایط و نتایج آزمون‌ها در بخش ۴ ارائه خواهد شد. در این تحقیق برای تعیین نسبت تنش در شرایط بستر صلب از نرم‌افزار Flow3D استفاده گردید و با نتایج حاصل از شرایط بستر انعطاف پذیر مقایسه شده است. پیش از استفاده از نرم‌افزار، صحت سنجی عملکرد مدل ارزیابی شده است.

۳- مدلسازی جریان در اطراف کوله پل جهت تایید عملکرد نرم‌افزار

برای انجام مدلسازی جریان در بستر صلب، از نرم‌افزار Flow3D استفاده شده است. جهت اطمینان از صحت عملکرد نرم‌افزار، میدان جریان در دهانه پل با کوله عمودی شبیه‌سازی شده و با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. بدین منظور از نتایج مدلسازی آزمایشگاهی که توسط دی و باربهویا انجام پذیرفته است، استفاده گردید (Dey and Barbhuiya, 2005). فلوم آزمایشگاهی به طول ۲۰ متر، عرض ۰/۹۰ متر و عمق ۰/۷۰ متر مطابق شکل ۱ ساخته شده است. کوله عمودی به طول (b) ۰/۲۴ متر (در راستای جریان)، عرض (l) ۰/۱۲ متر و ارتفاع ۰/۳۰ متر در فلوم قرار داده شده است. عمق (h) و سرعت جریان (U) در بالادست به ترتیب ۰/۲۰ متر و ۰/۲۹۴ متر بر ثانیه بوده است. برای ایجاد بستر صلب، بستر با رزین پوشانده شده است.

می‌تواند باعث ناپایداری پیش‌بند سنگچین و در نهایت شروع حرکت آن در لبه‌ها گردد و عملکرد سنگچین را مختل نماید. به عبارت دیگر در مواردیکه سنگچین برای حفاظت از اطراف کوله مورد استفاده قرار می‌گیرد، وجود سنگچین می‌تواند تنش برشی را نسبت به حالتی که سنگچینی مورد استفاده قرار نگرفته در بستر طبیعی محافظت نشده وسط دهانه، بیشتر نماید.

که در آن τ_R میانگین تنش برشی بستر در مقطع تنگ شده بین پیش‌بندهای سنگچین، τ_B میانگین تنش برشی بستر در مقطع تنگ شده بدون وجود سنگچین (در نقطه متناظری که τ_R محاسبه شده است)، n_R ضریب زبری سنگچین، n_B ضریب زبری مصالح طبیعی بستر، W_2 عرض کانال در مقطع تنگ‌شده پل، θ عمق جریان قبل از آبستنگی در دهانه پل، β_B ضریب شکل مقطع کانال برای حالت بدون سنگچین، β_e ضریب شکل مقطع کانال برای حالت با سنگچین، $\widehat{F}T_1$ عدد فرود جریان در بالادست، ΔZ اختلاف عمق واقعی و عمق معادل در حالت با سنگچین، \widehat{y}_1 مجموع عمق جریان در بالادست پل و عمق آبستنگی تنگ‌شدگی در محل پل و ε تابع مربوط به نسبت زبری سنگچین به زبری مصالح فرسایش پذیر بستر (بدون بعد) است. طبق رابطه (۱)، نسبت تنش برشی در وسط کانال، با و بدون پیش‌بندهای سنگچین، با چندین عامل تغییر می‌کند. اندازه نسبی سنگچین نسبت به مصالح بستر در نسبت مقادیر زبری مانینگ (n_R/n_B) بیان گردیده است. ابعاد جریان در تنگ‌شدگی نیز در نسبت عرض تنگ‌شدگی به عمق جریان قبل از آبستنگی 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. رابطه (۲) طی یک فرایند برازش منحنی بر اساس روش حداقل مربعات نتایج تحلیل عددی با بستر



شکل ۱. سیستم مختصات و مقاطع عرضی در فلوم آزمایشگاهی (Dey and Barbhuiya, 2005)

مدل‌های عددی (آزمون‌های ۱ تا ۱۵) در مقیاس مدل کوچک ساخته شدند که از آن‌ها صرف‌نظر شده و از آزمون‌های ۱۶ تا ۳۰ (گروه‌های ۴ تا ۶) که در مقیاس نمونه اصلی ساخته شده است، استفاده گردید. در جدول ۱ مقادیر W_2/y_0 و D_{50} مصالح سنگچین برای آزمون‌های ۱۶ تا ۳۰ مذکور ارائه شده است. هر آزمون شامل دو مدل شبیه‌سازی عددی است. یکی با سنگچین و دیگری بدون آن، به طوری که بتوان نسبت τ_R/τ_B را برآورد نمود. تعریف پارامترهای آزمون‌ها شامل هندسه، سایز سنگچین، اندازه مصالح بستر و پارامترهای هیدرولیکی در جدول ۲ خلاصه گردیده‌اند.

مقطع کانال‌های شبیه‌سازی شده جهت عبور جریان، ذوزنقه‌هایی با شیب کناره ۲ : ۱ (V: H) برای حالت‌های با و بدون سنگچین بودند. سنگچین طبق استاندارد HEC-23 DG 14 (Lagasse et. al., 2009) مدل گردید و پیشنهاد آن تا فاصله‌ای به اندازه $2y_0$ از کوله (که نباید از $7/6$ متر بیشتر شود) در کانال و به همین مقدار در بالادست و پایین دست پیشروی نمود.

۴-۱- مدلسازی عددی در بستر انعطاف پذیر

اداره فدرال بزرگراه‌های آمریکا براساس پارامترهای مندرج در جدول (۲) مدلسازی عددی در شرایط بستر انعطاف پذیر را انجام داده است. شکل ۳ رابطه بین نسبت‌های برشی و نسبت‌های دهانه به عمق را برای آزمون‌های عددی با بستر انعطاف‌پذیر به صورت نقطه و برای نتایج حاصل از معادله (۱) و (۲) به صورت منحنی نشان می‌دهند (FHWA, 2017).

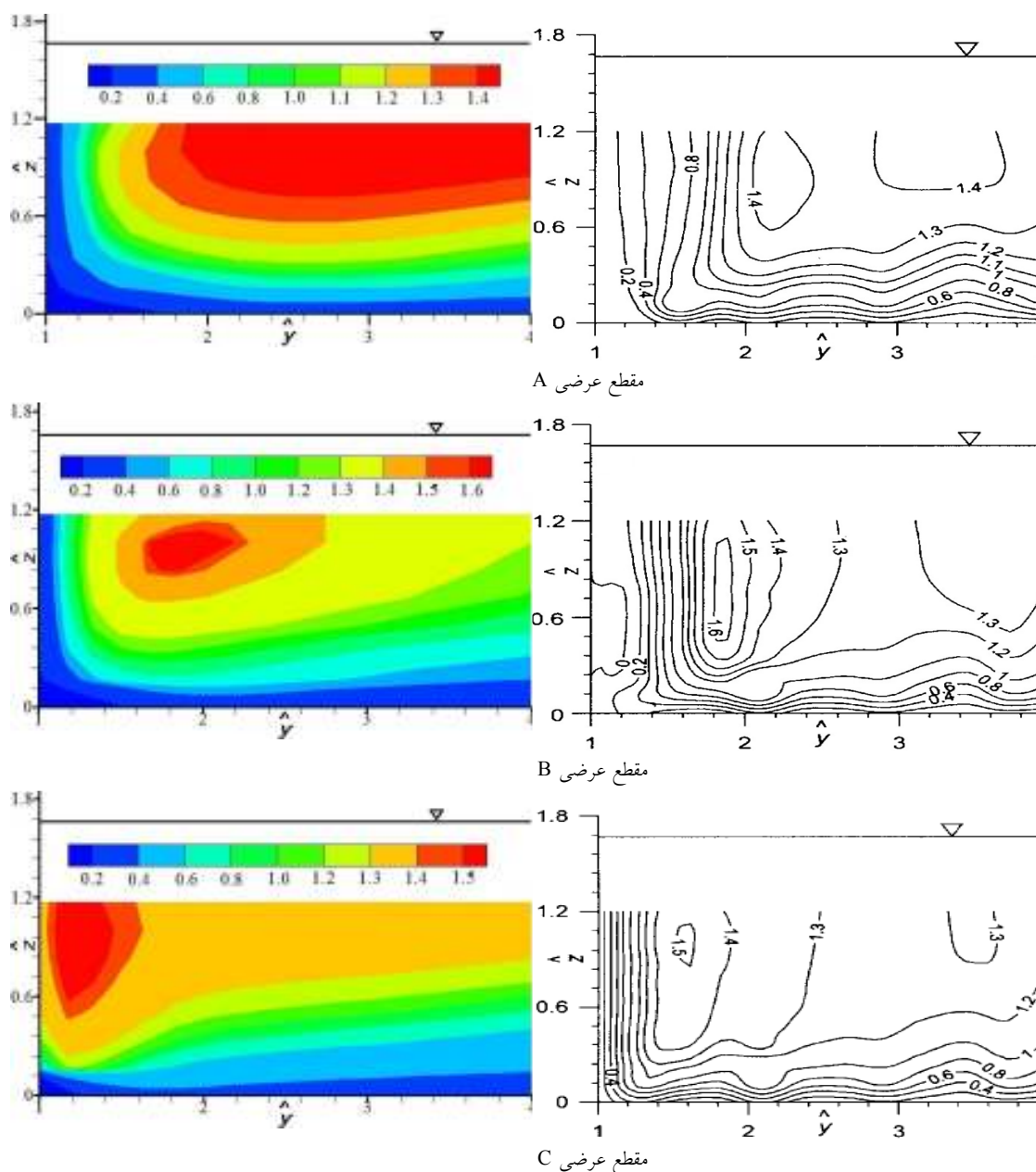
شرایط مذکور در نرم‌افزار Flow3D اعمال گردید و خروجی میدان جریان در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در شکل ۲ در مقاطع A، B و C ارائه شده است. محور افقی $\hat{y} = \frac{y}{l}$ و محور عمودی $\hat{z} = \frac{z}{l}$ با استفاده از عرض کوله (l) بی‌بعد شده‌اند. در سیستم مختصات کارتیزین نشان داده شده در شکل فوق، مولفه‌های سرعت در راستای x و y و z با پارامترهای u ، v و w بیان گردیده‌اند. مقدار سرعت نشان داده شده در شکل (۲) نیز با استفاده از سرعت جریان در بالادست (U) به صورت $\hat{V} = \frac{(u^2+v^2+w^2)^{0.5}}{U}$ بی‌بعد سازی شده است.

مقایسه نتایج توزیع سرعت حاصل از مدلسازی عددی با نرم‌افزار Flow3D و مدل آزمایشگاهی، نشان از عملکرد مناسب مدل عددی داشته و در ادامه از نرم‌افزار مذکور جهت شبیه‌سازی جریان در بستر صلب مقاوم‌سازی شده با سنگچین، استفاده شده است.

۴- مدلسازی عددی

در اداره فدرال بزرگراه‌های آمریکا، برای مطالعه اندرکنش بین تنش‌برشی بستر و سنگچین در دهانه‌های پل با عرض‌های مختلف (W_2) در حالت نصب هم‌تراز سنگچین با بستر، شبیه‌سازی عددی در شرایط بستر انعطاف پذیر انجام گرفت (FHWA, 2017).

یکی از خروجی‌های شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده، تعیین پارامتر E و استخراج رابطه (۲) است. در این مقاله نیز همان شرایط هندسی و هیدرولیکی لحاظ گردید با این تفاوت که بستر صلب در نظر گرفته شد. سه گروه اول از



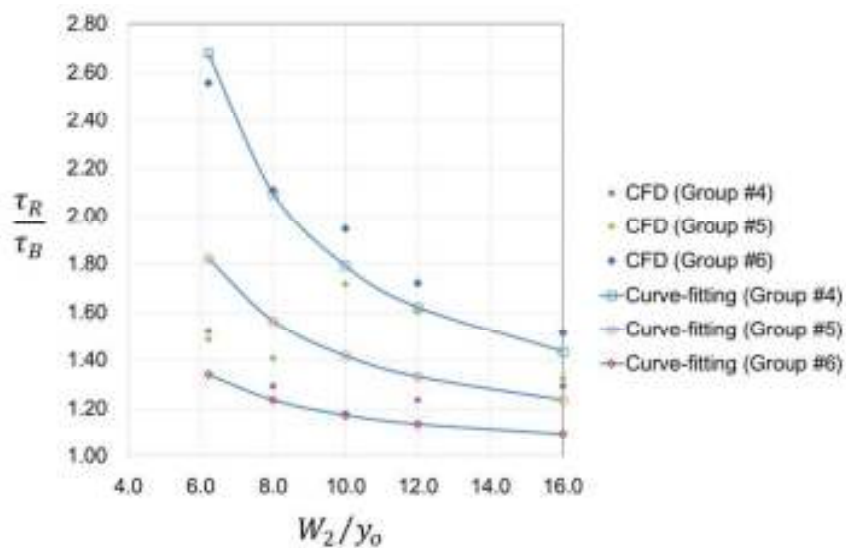
شکل ۲. توزیع سرعت در دهانه پل (سمت راست نتایج مدل آزمایشگاهی، سمت چپ نتایج مدل عددی نرم افزار Flow3D)

جدول ۱. ماتریس آزمون‌های عددی برای مقایسه سنگچین‌ها

W_2/y_0	گروه ۴	گروه ۵	گروه ۶
۶/۲۰	آزمون ۱۶	آزمون ۲۱	آزمون ۲۶
۸/۰۰	آزمون ۱۷	آزمون ۲۲	آزمون ۲۷
۱۰/۰۰	آزمون ۱۸	آزمون ۲۳	آزمون ۲۸
۱۲/۰۰	آزمون ۱۹	آزمون ۲۴	آزمون ۲۹
۱۶/۰۰	آزمون ۲۰	آزمون ۲۵	آزمون ۳۰
(متر) D_{50} سنگچین	۰/۲۳	۰/۳۵	۰/۵۲۵

جدول ۲. پارامترهای آزمون‌های عددی برای نصب سنگچین‌ها

گروه	شماره آزمون	D_{50} سنگچین (متر)	D_{50} بستر (متر)	W_1 (m)	y_1 (m)	A_1 (m^2)	V_1 (m/s)	W_2 (m)	y_0 (m)	y_2 (m)	V_2 (m/s)
گروه ۴	۱۶	۰/۲۳	۰/۰۰۴۱	۲۰/۰۲	۲/۳۶	۳۶/۱۱	۰/۹۷	۱۱/۸۰	۱/۹۰	۲/۳۶	۱/۲۶
	۱۷	۰/۲۳	۰/۰۰۴۱	۲۳/۲۴	۲/۳۶	۴۴/۱۳	۱/۰۲	۱۵/۲۰	۱/۹۰	۲/۳۶	۱/۲۶
	۱۸	۰/۲۳	۰/۰۰۴۱	۲۷/۲۲	۲/۳۶	۵۳/۱۰	۱/۰۶	۱۹/۰۰	۱/۹۰	۲/۳۶	۱/۲۶
	۱۹	۰/۲۳	۰/۰۰۴۱	۳۱/۰۲	۲/۳۶	۶۲/۰۷	۱/۰۹	۲۲/۸۰	۱/۹۰	۲/۳۶	۱/۲۶
	۲۰	۰/۲۳	۰/۰۰۴۱	۳۸/۶۲	۲/۳۶	۸۰/۰۱	۱/۱۲	۳۰/۴۰	۱/۹۰	۲/۳۶	۱/۲۵
گروه ۵	۲۱	۰/۳۵	۰/۰۰۴۱	۲۰/۹۸	۲/۶۰	۴۱/۰۳	۰/۹۵	۱۱/۸۰	۱/۹۰	۲/۶۰	۱/۲۸
	۲۲	۰/۳۵	۰/۰۰۴۱	۲۴/۳۸	۲/۶۰	۴۹/۸۷	۱/۰۱	۱۵/۲۰	۱/۹۰	۲/۶۰	۱/۲۸
	۲۳	۰/۳۵	۰/۰۰۴۱	۲۸/۱۸	۲/۶۰	۵۹/۷۵	۱/۰۵	۱۹/۰۰	۱/۹۰	۲/۶۰	۱/۲۸
	۲۴	۰/۳۵	۰/۰۰۴۱	۳۱/۹۸	۲/۶۰	۶۹/۶۳	۱/۰۹	۲۲/۸۰	۱/۹۰	۲/۶۰	۱/۲۸
	۲۵	۰/۳۵	۰/۰۰۴۱	۳۹/۵۸	۲/۶۰	۸۹/۳۹	۱/۱۳	۳۰/۴۰	۱/۹۰	۲/۶۰	۱/۲۸
گروه ۶	۲۶	۰/۵۲۵	۰/۰۰۴۱	۲۲/۳۸	۲/۹۵	۴۸/۶۲	۰/۹۳	۱۱/۸۰	۱/۹۰	۲/۹۵	۱/۳۰
	۲۷	۰/۵۲۵	۰/۰۰۴۱	۲۵/۷۸	۲/۹۵	۵۸/۶۵	۰/۹۹	۱۵/۲۰	۱/۹۰	۲/۹۵	۱/۳۰
	۲۸	۰/۵۲۵	۰/۰۰۴۱	۲۹/۵۸	۲/۹۵	۶۹/۸۵	۱/۰۴	۱۹/۰۰	۱/۹۰	۲/۹۵	۱/۳۰
	۲۹	۰/۵۲۵	۰/۰۰۴۱	۳۳/۳۸	۲/۹۵	۸۱/۰۷	۱/۰۸	۲۲/۸۰	۱/۹۰	۲/۹۵	۱/۳۰
	۳۰	۰/۵۲۵	۰/۰۰۴۱	۴۰/۹۸	۲/۹۵	۱۰۳/۴۸	۱/۱۲	۳۰/۴۰	۱/۹۰	۲/۹۵	۱/۳۰

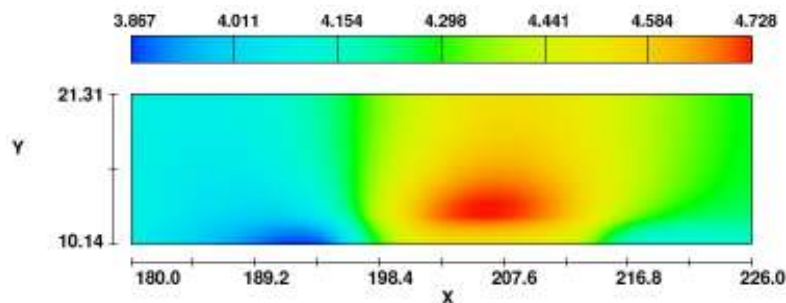


شکل ۳. نتایج عددی و برازش منحنی برای مدل‌های کامل - مقیاس با بستر انعطاف پذیر (FHWA, 2017)

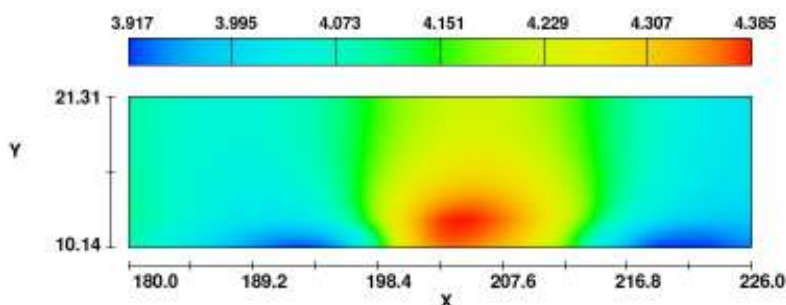
۴-۲- مدل‌سازی عددی در بستر صلب

در اینجا جهت شبیه‌سازی جریان در بستر صلب، از نرم‌افزار Flow3D استفاده گردید. موارد ۱۶ تا ۳۰ در دو حالت با و بدون سنگچین مدل‌سازی شده و نتایج آن ارائه و مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای هندسی کانال و هیدرولیکی جریان مطابق با موارد بیان شده در جداول (۱) و (۲) استفاده شد. در تمامی موارد هندسه کانال، کوله و سنگچین در نرم‌افزار AutoCad رسم شده و به فرمت stl ذخیره گردیده و در نهایت در قسمت meshing & Geometry نرم‌افزار Flow3D بازخوانی شده است. از مدل $k-\epsilon$ برای شبیه‌سازی آشفتگی استفاده شد و شرایط مرزی، شرایط اولیه و گام زمانی اعمال گردید. با توجه به تقارن هندسی و هیدرولیکی موجود در مدل‌ها، نصف مقطع عرضی شبیه‌سازی گردید و در مرز خط تقارن از شرایط مرزی

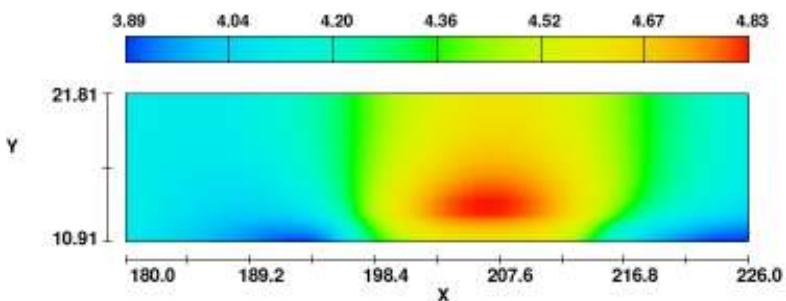
تقارن استفاده شد. در مقطع‌سازی ترم‌های انتقال مومنتوم از روش مرتبه اول استفاده گردید. روش ضمنی و روش باقیمانده حداقل تعمیم یافته در حل عددی معادلات به کار رفت. مدل‌ها تا رسیدن به حالت پایدار اجرا گردید. فرضیات مذکور برای دامنه‌های محاسباتی بزرگ نتایج مطلوبی‌تری دارند (Kocaman, 2014). پس از انجام مراحل آماده‌سازی، مدل‌های مربوط به آزمون‌ها اجرا شد و خروجی‌های آن‌ها حاصل گردید. به‌عنوان نمونه پروفیل توزیع تنش برشی در محدوده میانی دهانه پل در منطقه بدون سنگچین از کمی بالادست پل تا کمی پایین‌دست پل برای آزمون‌های ۲۰، ۲۵ و ۳۰ در شکل‌های (۴) تا (۹) رسم شده است. در تمامی موارد محدوده سنگچین بر روی محور X از ۱۹۵ تا ۲۱۵ متر و محدوده کوله از ۲۰۰ تا ۲۱۱ متر است.



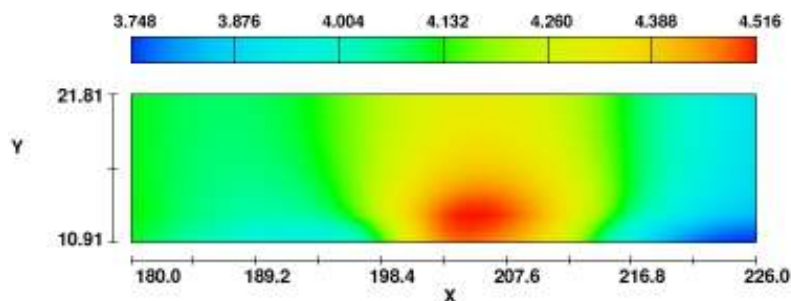
شکل ۴. پروفیل توزیع تنش برشی در حالت با سنگچین در مورد آزمون ۲۰



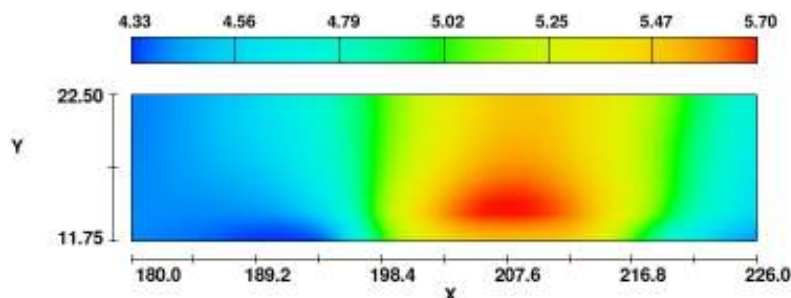
شکل ۵. پروفیل توزیع تنش برشی در حالت بدون سنگچین در مورد آزمون ۲۰



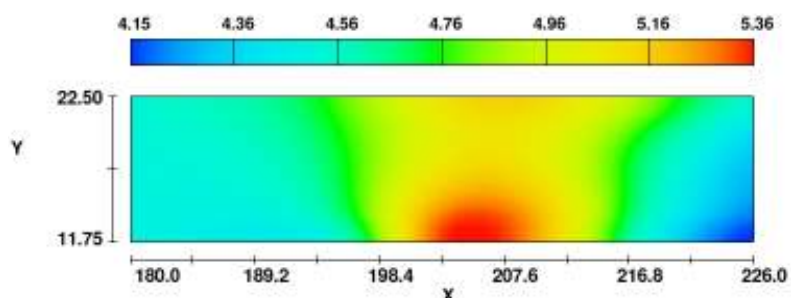
شکل ۶. پروفیل توزیع تنش برشی در حالت با سنگچین در مورد آزمون ۲۵



شکل ۷. پروفیل توزیع تنش برشی در حالت بدون سنگچین در مورد آزمون ۲۵



شکل ۸. پروفیل توزیع تنش برشی در حالت با سنگچین در مورد آزمون ۳۰



شکل ۹. پروفیل توزیع تنش برشی در حالت بدون سنگچین در مورد آزمون ۳۰

منحنی برازش شده حاصل از ترکیب تحلیل عددی در بستر انعطاف پذیر و معادله (۱) و (۲) (*Curve Fitting*) که با *CF* نشان داده شده است، برای خروجی گروه‌های ۴، ۵ و ۶ ارایه گردیده است. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، با استفاده از رگرسیون چند جمله‌ای درجه دو، تطابق مناسبی بین کمیت‌های مذکور وجود دارد بطوریکه ضریب تعیین (*Coefficient of Determination*) برای اطلاعات گروه ۴، ۵ و ۶ به ترتیب برابر ۰/۹۹۴۸، ۰/۹۹۶۰ و ۰/۹۶۴۸ است. معادله رگرسیونی برازش شده برای هر مورد در شکل نشان داده شده است.

در تمامی آزمون‌ها افزایش تنش برشی در بستر انعطاف پذیر در شرایط وجود سنگچین نسبت به حالت بدون سنگچین مشاهده می‌گردد. در جدول ۳ مقادیر تنش برشی حداکثر در دو حالت با و بدون سنگچین و نسبت تنش برشی برای آزمون‌های ۱۶ تا ۳۰ در شرایط بستر صلب ارائه شده است.

بدیهی است که نتایج بدست آمده از تحلیل عددی در بستر صلب با نتایج بدست آمده از تحلیل عددی در بستر انعطاف پذیر و همچنین نتایج حاصل از مدل مفهومی (معادلات (۱) و (۲)) متفاوت است.

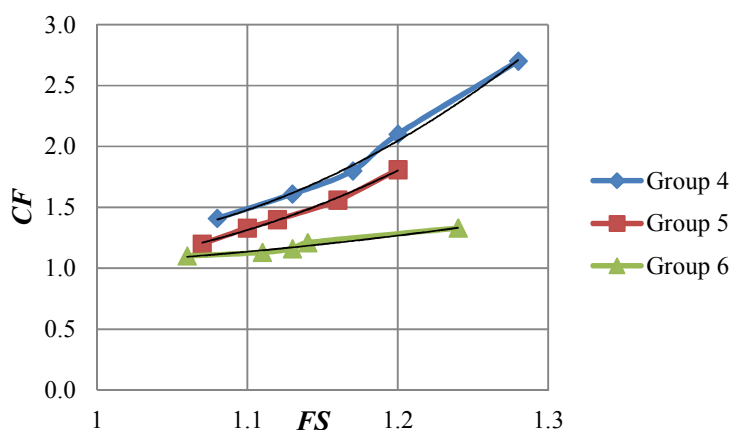
در نمودار شکل (۱۰) رابطه بین نسبت تنش برشی در تحلیل عددی در شرایط بستر صلب (*Flow3D Simulation*) که با *FS* نشان داده شده و نسبت تنش در

جدول ۳. تنش برشی حداکثر در نصب همتراز بر روی بستر صلب با استفاده از نرم‌افزار Flow3D

گروه	Case	W_2/y_0	τ_B (Pa)	τ_R (Pa)	τ_R/τ_B
گروه ۴	۱۶	۶/۲۰	۴/۲۳	۵/۴۱	۱/۲۸
	۱۷	۸/۰۰	۴/۲۹	۵/۱۶	۱/۲۰
	۱۸	۱۰/۰۰	۴/۳۰	۵/۰۱	۱/۱۷
	۱۹	۱۲/۰۰	۴/۳۳	۴/۹۰	۱/۱۳
	۲۰	۱۶/۰۰	۴/۳۹	۴/۷۳	۱/۰۸
گروه ۵	۲۱	۶/۲۰	۴/۳۸	۵/۲۷	۱/۲۰
	۲۲	۸/۰۰	۴/۴۶	۵/۳۲	۱/۱۹
	۲۳	۱۰/۰۰	۴/۴۵	۴/۹۹	۱/۱۲
	۲۴	۱۲/۰۰	۴/۴۵	۴/۸۸	۱/۱۰
	۲۵	۱۶/۰۰	۴/۵۲	۴/۸۳	۱/۰۷
گروه ۶	۲۶	۶/۲۰	۵/۳۱	۶/۶۱	۱/۲۴
	۲۷	۸/۰۰	۵/۱۱	۵/۸۴	۱/۱۴
	۲۸	۱۰/۰۰	۵/۰۱	۵/۶۶	۱/۱۳
	۲۹	۱۲/۰۰	۵/۰۷	۵/۶۴	۱/۱۱
	۳۰	۱۶/۰۰	۵/۳۶	۵/۷۰	۱/۰۶

جدول ۴. معادله برازش و ضریب تعیین برای گروه‌های ۴ تا ۶

	گروه ۴	گروه ۵	گروه ۶
معادله برازش	$CF = 14.519(FS)^2 - 27.716(FS) + 14.399$	$CF = 10.964(FS)^2 - 20.336(FS) + 10.416$	$CF = 1.9466(FS)^2 - 3.157(FS) + 2.2536$
ضریب تعیین	$R^2 = 0.9948$	$R^2 = 0.996$	$R^2 = 0.9648$



شکل ۱۰. رابطه بین نسبت تنش برشی در تحلیل عددی در شرایط بستر صلب و نسبت تنش برشی در منحنی برازش شده حاصل از ترکیب تحلیل عددی در بستر انعطاف پذیر و معادلات (۱) و (۲)

-Cardoso, A.H., Simarro, G., Fael, C., le Doucen, O. and Schleiss, A.J., (2010), "Toe protection for spill-through and vertical-wall abutments", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48, No. 4, pp. 491-498.

-Dey, S. and Barbhuiya, A.K., (2005), "Flow field at a vertical-wall abutment", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 12, pp. 1126-1135.

-FHWA, (2017), "Hydraulic performance of shallow foundations for the support of vertical-wall bridge abutments", Publication NO. FHWA-HRT-17-013.

-Hong, H.A. and Irfan, A., (2019), "Scour around an Erodible Abutment with Riprap Apron over Time", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 145, No. 6, 06019007.

-Karimaei Tabarestani, M. and Zarrati, A.R., (2018), "Reliability analysis of riprap stability around bridge piers", *Journal of Applied Water Engineering and Research*, DOI: 10.1080/23249676.2018.1497556.

-Khademghaeiny, G.N., Abrishami, J., Zarrati, A. R., Karimaei Tabarestani, M., Badali Mashahir, M., "Riprap design at bridge piers with limited scouring", *Scientia Iranica*, Article in Press. Accepted Manuscript, Available Online from 18 December 2018.

-Kocaman, S., (2014), "Prediction of backwater profiles due to bridges in a compound channel using CFD", *Advances in Mechanical Engineering*, Article ID 905217, 9 pages.

-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.

-Lauchlan, C.S., Melville, B.W., (2001), "Riprap protection at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, No. 5, pp. 412-418.

-Melville, B.W., van Ballegooy, S., Coleman, S.E., and Barkdoll, B. (2006), "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., Fredsooe, 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.

-Tippireddy, R.T.R., (2017), "Air injection as a scour countermeasure at bridge piers", Open Access Master's Thesis, Michigan Technological University.

۵- نتیجه گیری

مطالعه حاضر بمنظور ارائه تصویری کاملتر از تنش‌های برشی در بستر حفاظت نشده و در مجاورت سنگچین در پل‌های تک دهانه انجام شده است. در صورتیکه سنگچین به صورت همتراز بستر و صرفاً در بالای پی سطحی کوله احداث گردد، زبری ناهمگون بستر در دهانه سبب تشدید تنش برشی در بستر حفاظت نشده می‌گردد. براساس مدل مفهومی بیان شده، افزایش تنش مذکور به اندازه نسبی قطر متوسط مصالح سنگچین نسبت به قطر متوسط مصالح بستر، نسبت عرض تنگ‌شدگی به عمق جریان قبل از آبشستگی در دهانه پل و همچنین میزان تنگ‌شدگی بستگی دارد. تعیین نسبت تنش با استفاده از شبیه‌سازی عددی نیز امکان پذیر است. مدلسازی عددی با بستر انعطاف‌پذیر بدلیل افزایش تعداد معادلات و تغییرات مداوم شرایط هندسی بستر، با افزایش هزینه‌های محاسباتی و هزینه‌های سخت افزاری همراه خواهد بود. علاوه بر آن دانش فنی مورد نیاز نیز بالاتر خواهد بود. در نتیجه در شبیه‌سازی عددی انجام شده با نرم‌افزار Flow3D، بستر صلب در نظر گرفته شد و نسبت تنش برشی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که برای نسبت‌های مختلف زبری سنگچین به زبری مصالح بستر، با استفاده از برازش چند جمله‌ای مرتبه دوم، ارتباط معناداری بین نسبت تنش برشی در حالت شرایط بستر صلب و بستر انعطاف‌پذیر وجود دارد به طوریکه ضریب تعیین در هر حالت تا حد بسیار زیادی به یک نزدیک است.

۶- سپاسگزاری

این مقاله از پروژه تحقیقاتی "بررسی عملکرد ریپ رپ جهت محافظت از کوله‌های عمودی پل‌های تک دهانه" با شماره قرارداد ۱۸۳۶۵-۲۹-۹۷ مورخ ۱۳۹۷/۰۸/۲۹ استخراج گردیده است. از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به جهت حمایت مالی تشکر می‌شود.

۷- مراجع

-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*, p. 1-10. American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

-Bojanowski, C., Lottes, S.A., Flora, K. Suaznabar, O., Shen, J. and Kerenyi, K., (2017), "Development of a computational approach to detect instability and incipient motion of large riprap rocks", *Argonne National Laboratory, U.S. Department of Energy laboratory*.

Shear Stress Ratio on the Unprotected Bed in Conditions with and without Riprap at the Bridge Span

Amir Mahjoob, Assistant Professor, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Email: a.mahjoob@bhrc.ac.ir

Received: March 2020-Accepted: September 2020

ABSTRACT

Scour at the shallow abutment foundation during floods is a common cause of bridge failure. In some cases, the bed is reinforced with riprap. There are several advantages and disadvantages of using this method. One of the disadvantages of using flush riprap aprons with the bed is that heterogeneous roughness (riprap versus native bed materials) alters the flow and manifesting as strong secondary currents. This flow can increase the shear stress and the scour depth in the unprotected bed. To study the subject, a conceptual model for determining the shear stress ratio in the unprotected bed in both with and without riprap has been investigated. In developing the conceptual model, numerical simulation tests in a flexible bed have been used. Then, the validation of Flow3D numerical model is presented and the mentioned model is used to simulate the flow in two cases with and without riprap in the rigid bed. In a rigid bed compare to flexible bed, computational and hardware costs are significantly reduced. The shear stress ratio in the unprotected bed is calculated and the quadratic polynomial equation is fitted for different roughness ratios. The coefficient of determination in each case indicates the appropriate correlation of the stress ratio in the two modes of flexible and rigid bed.

Keywords: Numerical Simulation, Abutment, Single Span Bridges, Shear Stress, Riprap