

## اثر سازه‌های عرضی (پل) بر روی مورفولوژی رودخانه (مطالعه موردی: روستای جوربند، چمستان، مازندران)

افسانه خیری<sup>۱</sup>، محمدمهدی حسین‌زاده<sup>۱\*</sup>، حسن صدوق ونینی<sup>۱</sup>

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۶/۱۷ تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳

### چکیده

بررسی نقش انسان در تغییرات محیطی همواره یکی از موضوعات مهم مطالعات محیطی بوده است. جاده به عنوان یکی از مظاهر دخالت انسان در محیط و به خصوص در سیستم‌های رودخانه‌ای، سازه‌ای ناگزیر جهت حمل و نقل و ارتباطات بشری است. اثرات پل بر سیستم رودخانه از جنبه‌های مختلف (مورفومتریک، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و...) مورد توجه است. در بررسی اثر پل در روستای جوربند (واقع در حوضه واز، استان مازندران شهرستان چمستان) جهت دستیابی به داده‌های دقیق از روش فتوگرامتری برد کوتاه با استفاده از پهپاد استفاده شد. پس از تهیه لایه رقومی ارتفاعی و نقشه ارتوفتوی محدوده، بررسی و مقایسه ضریب تغییرات در پارامترهای مختلف (پروفیل طولی، مقطع عرضی، بیشترین عمق، میانگین عمق مقطع، عرض کانال، نسبت عرض به عمق، سرعت جریان، قدرت جریان، عدد فرود، تنش برشی، شاخص سینوسیته، شاخص تقارن و شاخص بریس) انجام شد. نتایج نشان داد که تمام پارامترها در بالادست و پایین‌دست پل با هم تفاوت دارند این درحالی‌ست که از نظر محیطی شرایط بالادست و پایین‌دست در وضعیت یکسانی از نظر کاربری، زمین شناسی و هیدرولوژی قرار دارند. ضریب تغییرات پارامترهای مختلف در بالادست برابر با ۳۶/۷۹ درصد و در پایین‌دست برابر با ۴۳/۴۲ درصد است. پارامتر شیب، تنش برشی و قدرت رود در بالادست و پایین‌دست پل بیشترین تغییرات را نشان می‌دهد. پژوهش فوق نشان داد که ساخت سازه‌ای مانند پل در مسیر جریان رود سبب تغییرات عمده در محیط رودخانه‌ای می‌شود که برآورد میزان این تغییرات می‌تواند گام مؤثری در امر مدیریت اکوسیستم رودخانه و سازه‌های انسانی باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پل، تغییرات انسانی، رودخانه، جوربند، فتوگرامتری برد کوتاه.

## مقدمه

در حال حاضر، تغییر جزء جدایی‌ناپذیر تمام سیستم‌های رودخانه‌ای است. غالباً بسیاری از این تغییرات در نتیجه تأثیرات ناشی از تغییرات حجم آب، منابع تدارک رسوب (فرسایش) و تجمع رسوب (رسوبگذاری) بوده است (حسین‌زاده و اسماعیلی، ۱۳۹۴). در رودخانه‌ها، تغییر مورفولوژی آبراهه بیشتر متأثر از حمل بار رسوبی است (Antonelli et al, 2004) اما به طور کلی فعالیت‌های انسانی و عوامل خارج از سیستم رودخانه‌ای مثل تغییرات اقلیمی، تکتونیک و زمین‌شناسی آثار زیادی بر روند هیدرولوژیکی رودخانه داشته و باعث تغییر در مورفولوژی آن می‌شود (Wang et al, 2010). در این صورت هرگونه تغییری که به سیستم رودخانه تحمیل شود، تعادل موجود را برهم زده و با عکس العمل رودخانه در جهت ایجاد موازنه جدید روبرو خواهد شد. فعالیت‌های انسانی و دخالت‌های او به طور جدی عملکرد طبیعی فرایندهای فیزیکی و زیستی رودخانه‌ها را تخریب می‌کند. این تغییرات منجر به تغییر رژیم آب و رسوب، تغییر هندسه و پلانفرم کانال و تغییر واحدهای ژئومورفیک کانال خواهد بود. تفاوت بین رودخانه‌های مختلف در الگو و شدت دخالت‌های انسانی و تفاوت در واکنش سیستم می‌باشد. این سیستم می‌تواند ناشی از عوامل محیطی، شکل، مقیاس و شدت دخالت انسان در گذشته و حال و حساسیت نسبی سیستم رودخانه‌ای به تغییرات باشد. (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴). مطالعات گذشته نشان از تأثیر مخرب بسیار گسترده و شگفت‌آور انسان بر رودخانه‌های سراسر دنیا دارد (Schumm, 1977; Surian and Rinaldi, 2003; Nilsson et al, 2005; Surian, 2006; Walter and Merritts, 2008) به گونه‌ای که می‌توان گفت به عصر انسان-زایی وارد شده‌ایم (Crutzen, 2002; Meybeck, 2003). اشکال دخالت انسان بر سیستم رودخانه به

دو صورت مستقیم و غیرمستقیم است. اثرات غیرمستقیم یا غیرعمدی مربوط به تغییراتی است که در سطح حوضه آبریز انجام می‌گیرد و موجب واکنش ثانویه چشم‌انداز می‌شود که نتیجه آن تغییر در رژیم جریان رودخانه‌ای و رسوبگذاری سیستم رودخانه است. اثرات مستقیم یا عمدی که مربوط به تغییرات کانال رودخانه است مانند اثرات غیرمستقیم، رژیم جریان و رسوب تغییر می‌کند. در این بخش تغییراتی که در هندسه کانال و ضریب زبری صورت می‌گیرد باعث تغییر شدت فرایندهای رودخانه‌ای می‌شود. با توجه به اثرات تأخیری دخالت انسانی، اغلب تفکیک واکنش‌های رودخانه به مداخله‌های مستقیم انسان در مقیاس کانال و اثرات غیرمستقیم انسان در مقیاس حوضه آبریز بسیار دشوار است (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴). یکی از اشکال دخالت مستقیم انسان در سیستم رودخانه، ساخت پل یا کالورت در مسیر جریان رود است. ساخت جاده‌هایی که از عرض رودخانه‌ها عبور می‌کنند برای حمل و نقل ناگزیر هستند، اما طراحی نادرست سازه‌ها ممکن است سبب تغییرات ژئومورفولوژیکی و شرایط زیستی رودخانه‌ها شود (Resh, 2005; Wheeler et al, 2005; Merrill and Gregory, 2007; Bousk et al, 2010). پل‌ها و کالورت‌ها همچنین سبب افزایش جریان رودخانه، تنش برشی، تلاطم جریان، تخریب و فرسایش کانال، توسعه فرسایش‌های عمیق کانال، منشعب شدن کانال و همچنین فرسایش کناره‌ای در پایین دست می‌شود (Sing, 1983; Grade and Kothiyari, 1998; Richardson and Richardson, 1999; Kothiyari and Ranga-Raju, 2000) بیشتر مطالعات و فعالیت‌های پژوهشی در زمینه مهندسی پل و اثرات هیدرولیکی آن انجام شده است. در ادبیات مهندسی تمرکز مطالعات بر روی تخمین جریان پیک در محل و اثرات هیدرولیکی مانند اثرات آب برگشتی و فرایند آبشستگی در

تغییرات در شکل کانال در پایین دست بسیاری از پل‌ها به همراه افزایش تا دوبرابر نسبت عرض به عمق همراه است که نشان از افزایش ظرفیت در زیر پل به دلیل پدیده آبشستگی است و این تغییرات در طول کانال (ده برابر بیشتر از عرض کانال) ادامه دارد. جونز و همکاران (۲۰۰۰)، ومپل و همکاران (۲۰۰۱) بلنتون و همکاران (۲۰۰۹) در مورد اثرگذاری جاده‌ها بر روی ژئومورفولوژی رودخانه براساس تغییرات اشکال دشت سیلابی، اندازه‌گیری میدانی، کاربرد سنجش از دور و تکنیک‌های جی آی اس تحقیق کردند. براساس کارهای روبرت (۲۰۰۳)، مک کنی و همکاران (۲۰۱۰) و وانگ و همکاران (۲۰۱۰) پایه‌های پل با افزایش سرعت آب و جریان‌ات آشفته سبب تغییر مورفولوژی کانال می‌شود و همچنین اب و همکاران (۲۰۰۳) بیان می‌کنند که پل‌ها به عنوان مانعی برای تخته‌سنگ‌ها و واریزه‌های چوبی که مستقیماً تحت تأثیر شاخه شاخه‌ای بودن، هندسه پلانفرم، توپوگرافی دشت سیلابی است عمل می‌کنند. روی (۲۰۱۳) در بررسی اثرات پل‌ها بر روی مورفولوژی رودخانه در حوضه رودخانه کونور با هدف تشریح تأثیرات محلی جاده‌ها بر مورفولوژی کانال و زندگی جانوران آبی براساس مشاهدات میدانی ژئومورفولوژی و طبقه‌بندی رودخانه از شاخص‌های متعددی مربوط به پارامترهای رودخانه‌ای از جمله میانگین عمق کانال در کناره‌ها، مساحت مقطع عرضی، سرعت جریان، گرادیان شیب بستر، عمق آب، شاخص انشعاب، توالی چالاب و خیزاب و ... استفاده کرد و به این نتیجه رسید که تغییرات در بالادست و پایین دست پل یکسان نیست. در این پژوهش مشخص شد که سقوط دیواره‌های کناری و شستشوی بستر یک پدیده طبیعی است که باعث می‌شود محیط مناسب برای حیات ماهی‌ها فراهم شود. از طرف دیگر در بالادست رسوبگذاری بالا، افزایش شاخص انشعاب و

اطراف پای پل‌هاست. طی دهه‌های اخیر مطالعات متنوعی در زمینه تخمین عمق آبشستگی پایه‌های پل انجام پذیرفته است. انصاری و همکاران (۲۰۰۲)، نجف‌زاده و همکاران (۲۰۱۶)، لی و همکاران (۲۰۰۷)، فیرات و گانگور (۲۰۰۹)، دپنات و چودهوری (۲۰۱۰)، مولر و وانگر (۲۰۰۹)، باتنی و همکاران (۲۰۰۷) و پال و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی عملکرد روش‌های مختلف تجربی، آماری و آزمایشگاهی در تخمین و برآورد میزان آبشستگی پای پل‌ها پرداختند. بوسکا و همکاران (۲۰۱۰) اشاره می‌کند که چگونه مقاطع عرضی در مسیر رودخانه باعث افزایش فواصل چالاب‌ها می‌شود. آنها همچنین اثرات آب برگشتی و تغییرات ناشی از آن در سطح محلی جریان را با استفاده از مدل طبقه‌بندی روسگن نشان می‌دهند. همانطور که روسگن (۱۹۹۴) بیان می‌کند نسبت حفر بستر (ER) نقش مهمی در توصیف روابط درونی رودخانه با شکل دره و عوارض آن دارد. نسبت حفر بستر به عنوان شاخص پایداری عمودی کانال در دره خودش تعریف می‌شود. نسبت حفر بستر به عنوان عرض منطقه مستعد سیلاب در هر ارتفاعی از بالاترین عرض کناره بر دو برابر بیشترین عمق تقسیم شده کانال تعریف می‌شود. کمترین مقدار حفر بستر ( $1/40$ ) نشان می‌دهد که کانال به‌طور عرضی برش خورده است در حالی که بالاترین نرخ حفر بستر ( $2/20$ ) نشان می‌دهد که کانال می‌تواند عرض خودش را در طول بالاترین رویدادهای بزرگ حفر کند و دشت سیلابی خوبی داشته باشد. توسعه آبشستگی کانال و تخریب بستر آن تأثیرات حیاتی برای بستر کانال بعد از ساخت پل خواهد داشت. در ارتباط با تأثیر پل‌ها بر مورفولوژی کانال گرگوری (۱۹۸۳) در پژوهشی تحت عنوان اثرات پل در پایین دست جریان، ۱۹ پل در محیط جنگلی را انتخاب کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که

باشد (Carrivick et al, 2013). چرا که این امر نقشه‌های سه‌بعدی، مقرون به صرفه و با سرعت بالا در گستره‌های فضایی را ارائه می‌دهد. تکنیک sfm این امکان را فراهم می‌آورد که داده‌های برداشت شده با استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین (پهپاد) با سهولت بیشتری مورد استفاده قرار بگیرد. پهپادها در یک دهه گذشته از نظر سهولت کاربرد و کاهش هزینه‌ها پیشرفت زیادی داشته‌اند. همین امر سبب شده داده‌های تصاویر پهپاد، فتوگرامتری مبتنی بر تکنیک sfm را در مقایسه با روش‌های رایج‌ترین کاربرد تصویربرداری با پهپاد (Unmanned aerial vehicles) بازسازی ارتفاع زمین از طریق تولید مدل رقومی زمین و تولید لایه پوشش زمین از طریق تولید ارتوفتو می‌باشد (Niedzielski, 2018) که این فرایند با استفاده از الگوریتم SfM از طریق تولید ابرنقاط پراکنده و متراکم به دست می‌آیند. از آنجایی که تصویر ارتوفتوی به دست آمده از تصاویر پهپاد قدرت تفکیک حتی تا زیر ۵ سانتیمتر را دارند در مطالعات مربوط به مخاطرات سیل (Kim et al, 2020; Chou et al, 2010; Lee et al, 2013) تشخیص اندازه رسوبات سطحی و موانع گراولی در رودخانه‌های شریانی (Vázquez-Tarrío, D et al, 2017)، بررسی توپوگرافی بستر و حتی داده‌های مربوط به بستر، حیات آبیان، تشخیص تغییرات بستر و کانال در گذر زمان (Carrivick et al, 2019)، پایش سیستم رودخانه (Merwe and Price (2015), Su (2015), and Fráter et al, (2015) and Chou (2015) و بسیاری مطالعات دیگر در زمینه مورفولوژی رودخانه، مورفولوژی بستر، تغییرات کانال در گذر زمان، فرسایش رودخانه‌ای، پوشش گیاهی ریزبارین (arbonneau et al, 2005; Fujita et al, 2015; RIEGL, 2017; Dimitriou et al, 2018; Tamminga et al, 2014) کاربرد دارند. همانطور

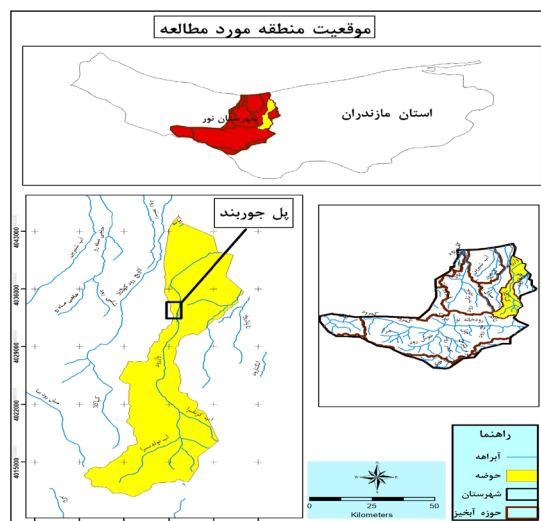
مساحت بالای موانع رسوبی وجود داشته است. افزایش نسبت حفر بستر و نسبت عرض به عمق نشان از توسعه اکوسیستم دشت سیلابی در محدوده پل داشته است. همچنین جلالی‌راد (۱۳۸۱) در تحقیق بر روی رودخانه دارآباد واقع در شهر تهران، پس از تهیه نقشه پهنه‌های سیل‌گیر این رودخانه به بررسی نقش پل‌های احداثی بر روی این رودخانه پرداخت. وی در تحقیق خود با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و نرم‌افزار HEC-RAS به بررسی تأثیر دو پل احداثی روی این رودخانه پرداخت و به این نتیجه رسید که این دو پل تأثیر قابل توجهی بر سطح و عمق پهنه‌های سیل‌گیر داشته‌اند، اگرچه میزان تأثیرات هر یک با دیگری متفاوت بوده است. همانطور که می‌دانیم روش‌ها و ابزارهای متعددی در زمینه مطالعات رودخانه استفاده می‌شود، از جمله؛ استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، نقشه‌های توپوگرافی، نقشه‌برداری زمینی، تهیه مقاطع طولی و عرضی، نمونه‌برداری رسوب و مطالعات مربوط به پوشش گیاهی، ارزیابی میدانی با استفاده از فرم‌های مختلف ارزیابی و ... یکی از مهم‌ترین موضوعات در زمینه جمع‌آوری داده‌ها و روش‌های مطالعاتی بروز بودن، دقت بالا، در دسترس بودن و کاربر پسند بودن آنهاست. استفاده از عکس‌های هوایی یا تصاویر ماهواره‌ای تاریخچه طولانی در مطالعات دارد اما در یکی دو دهه اخیر از ترکیب تکنیک‌های ساختار حرکتی (structure from motion-sfm) با تکنیک سنتی سه‌بعدی (multi-view stereo) انقلابی در زمینه جمع‌آوری منابع و داده‌ها به وجود آمد. در این روش نقاط سه بعدی (ابرنقاط) با کیفیت رزولوشن بسیار بالا از یک شی یا سطح با کمترین هزینه به دست می‌آید. در حالی که sfm در زمینه علوم زمین روش تازه‌ای است اما در همین مدت کوتاه توانسته است تأثیر بسیار زیادی داشته

در دامنه شمالی سلسله جبال البرز و در جنوب شهر چمستان واقع شده است. حوضه واز دارای جهتی شمالی-جنوبی بوده که رواناب آن به دریای خزر می‌ریزد. قسمت جنوبی حوضه (سراب) پهن‌تر از قسمت شمالی حوضه (نقطه خروجی) می‌باشد. مساحت حوضه برابر با ۱۴۰/۹ کیلومتر مربع است که سازندهای زمین‌شناسی آن به دوران مزوزئیک و بعد از آن برمی‌گردد، این سازندها شامل دولومیت و سنگ آهک (سازند الیکا) و شیل و ماسه سنگ به همراه لایه‌های زغالی (سازند شمشک) می‌باشد. موقعیت منطقه مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

که بیان شد استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه در مطالعات مختلف مرتبط با رودخانه کاربرد روزافزونی دارد لذا به همین منظور در این مطالعه که هدف از آن بررسی اثر پل و تعیین تغییرات پارامترهای مختلف هیدرومتری و مورفومتری در بالادست و پایین‌دست پل در یک بازه مشخص بر روی رودخانه واز در روستای جوربند است از تصویربرداری برد کوتاه استفاده شد.

### منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر به بررسی اثرات پل در مسیر رودخانه واز در روستای جوربند می‌پردازد. حوضه آبخیز واز



شکل ۱: موقعیت پل در حوضه واز

جزئیات کامل دارد. با توجه به پیشرفت روزافزون در زمینه سنجش از دور و استفاده از پهپادها با قابلیت تصویربرداری استرئوسکوپ، از روش فتوگرامتری برد کوتاه استفاده شد. همچنین برداشت نقاط کنترلی و ارزیابی دقیق‌تر در فاصله ۲۰۰ متر بالاتر و پایین‌تر پل مورد بررسی میدانی قرار گرفت. تصویربرداری برد کوتاه روشی تازه در زمینه جمع‌آوری داده‌های دقیق، به‌روز و با جزئیات است. به همین دلیل با استفاده از پهپاد بازه مورد

### مواد و روش‌ها

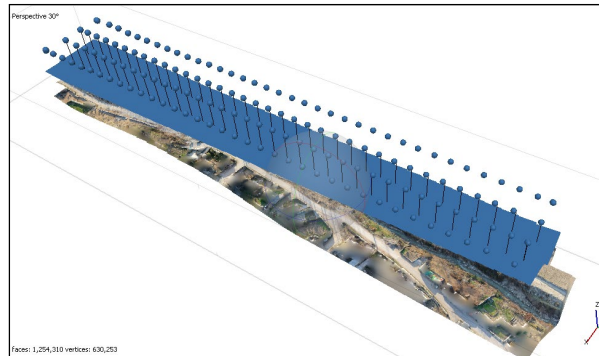
در این مطالعه از ۳ روش مطالعات کتابخانه‌ای، سنجش از دور (استفاده از پهپاد فتوگرامتری) و بازدید میدانی استفاده شد. مطالعات کتابخانه‌ای به منظور بررسی منابع و سوابق مطالعاتی و همچنین تهیه چارچوب مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که روابط متقابل پل و رودخانه در مقیاس مکانی کوچک تا متوسط تعریف می‌شود لذا جهت مطالعه این روابط نیاز به داشتن اطلاعات دقیق و با

زمستان سال ۱۳۹۹ انجام شد. مشخصات مسیر پرواز در جدول ۱ و شکل ۲ ارائه شده است.

نظر تصویربرداری شد با توجه به اینکه بازه مورد مطالعه در ناحیه شمال ایران واقع است لذا به دلیل فقدان تاج پوشش درختان، برداشت در فصل

جدول ۱: مشخصات پرواز با پهپاد جهت برداشت برداشت پل در روستای جوربند

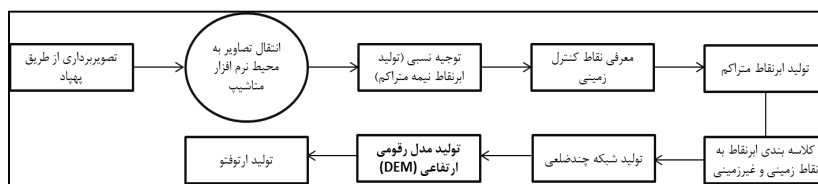
مدل پهپاد	ارتفاع پرواز	نوع پرواز	خط پرواز	طول پرواز	پوشش طول و عرضی
Mavic 2 Pro	۵۰ متر	اتوماتیک	۴ لاین (دولاین پرواز حذف شد)	۴۸۰ متر	۸۰ درصد



شکل ۲: لاین پرواز با استفاده از پهپاد

مقطع عرضی، سرعت جریان، محیط مرطوب، شعاع هیدرولیک، حداکثر عمق، میانگین عمق کانال و پارامترهای هیدرومتری شامل سرعت جریان، تنش برشی و قدرت جریان تعداد ۸ پروفیل عرضی در بالادست و با علامت (U) و پایین دست با علامت اختصاری (D) در فواصل ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ متر و در مقطع پل ترسیم شد. همچنین با استفاده از پروفیل طولی شیب منطقه و مقدار نسبت انشعاب کانال به دست آمد. پس از ترسیم پروفیل‌های عرضی، داده‌ها به محیط اکسل و برنامه spreadsheet منتقل و محاسبات مربوط به پارامترهای هیدرومتری و مورفومتری انجام شد.

در تصویربرداری برد کوتاه، از خاصیت استریوسکوپی تصاویر در همپوشانی با همدیگر استفاده می‌شود. در نرم‌افزار متاشیپ (Metashape) با تولید ابرنقاط متراکم می‌توان به لایه رقمی ارتفاعی و ارتوفتوی با دقت زیر ۵ سانتی‌متر رسید. مراحل تولید ارتوفتو در محیط نرم‌افزاری متاشیپ در شکل ۳ نشان داده شده است. در گام بعدی، لایه رقمی ارتفاع و ارتوفتو به محیط نرم‌افزار ArcGIS منتقل شد. با توجه به وجود داده دقیق و با جزئیات کامل (پیکسل سایز ۴/۶ سانتی‌متر)، پروفیل‌های عرضی در فواصل مشخص بر روی کانال ترسیم شد. جهت بررسی پارامترهای مختلف از جمله پارامترهای هیدرومتری شامل؛ مساحت



شکل ۳: مراحل تولید داده‌ها در محیط نرم‌افزار متاشیپ

در کانال مشخص و در محاسبات مربوط به دبی مورد استفاده قرار گرفت همچنین ضریب زبری (مانینگ) کانال در بالادست و پایین دست مورد ارزیابی و امتیازدهی قرار گرفت، سپس براساس داده‌های مختلف و بازدید میدانی از منطقه به تحلیل و آنالیز مربوط به اثر پل در بالادست و پایین دست آن پرداخته شد. براساس مشاهدات و ارزیابی میدانی میزان ضریب مانینگ که نقش مهمی در سرعت جریان، قدرت رود و فرسایش-پذیری کانال دارد به دست آمد. جهت برآورد سرعت جریان و دبی از معادله مانینگ (Shepherd et al, 2001) استفاده شد (رابطه ۱).

رابطه ۱)

$$v=(1/n)R^{2/3}s^{1/2}$$

$$Q=(v*a)$$

در این معادله؛

$V$  = سرعت ( $ms^{-1}$ )،  $N$  = ضریب زبری،  $R$  = شعاع هیدرولیکی ( $m$ )،  $S$  = شیب کانال (متر بر متر)،  $Q$  = دبی حداکثر لحظه‌ای ( $m^3s^{-1}$ ) و  $A$  = مساحت مقاطع عرضی ( $m^2$ ).

تنوع و پیچیدگی مورفولوژیکی اشکال کانال با استفاده از تعیین مساحت شاخص تقارن کانال نسبت به خط مرکزی جریان مشخص شد (Knighton, 1981; Milne, 1983; Rayburg and Neave, 2008) خط اصلی ژئومورفولوژی رودخانه بیان کننده اینست که در جریان‌های طبیعی به‌طور معمول در بیشتر طول خود دارای شکل مقطع نامتقارن هستند (Leopold et al, 1964; Schumm et al, 1987) در حالی که جریانات متأثر از فعالیت‌های انسانی از نظر شکل بسیار متقارن هستند (Rayburg and Neave, 2008). شاخص عدم تقارن کانال (رابطه ۲) همچنین برای تعیین تفاوت در شکل کانال در بالادست و پایین دست مقطع مورد استفاده قرار گرفت (Roy et al, 2017).

مقاطع عرضی براساس پروتکل‌های ارائه شده در مطالعات افرادی چون (Roy et al, 2017; Biswas et al, 1983; Gregory et al, 2018) به تعداد ۹ مقطع در یک بازه ۴۰۰ متری از بالادست تا پایین دست پل انتخاب شد، بگونه‌ای که ۱ مقطع در زیر پل و ۴ مقطع در بالادست (U) و ۴ مقطع در پایین دست پل (D) در فواصل ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ متری مشخص شد. علت عدم انتخاب فاصله نزدیکتر به پل وجود سازه‌های استحکامی در کنار کانال و بستر رود جهت حفاظت از پل می‌باشد. با توجه به اینکه محدوده مورد مطالعه در دویست متر بالاتر و پایین‌تر از کانال با استفاده از پهپاد تصویربرداری و سپس لایه رقومی ارتفاعی آن تهیه شد لذا پروفیل طولی و عرضی کانال با دقت ۴/۶ سانتی‌متر تهیه شد. شکل کانال و دیگر پارامترهای ژئومتری کانال مانند عرض ( $w$ )، میانگین عمق کانال ( $d$ )، بیشترین عمق کانال ( $D$ )، نسبت عرض به عمق ( $w/d$ )، مساحت مقطع عرضی ( $a$ ) و پارامترهای هیدرومتری شامل؛ قدرت جریان ( $\omega$ )، عدد فرود ( $Fr$ ) و سرعت جریان ( $v$ ) ترجیحاً در کانال فعال تعیین شدند. قسمت فعال کانال در هر جریانی براساس شکست ناگهانی شیب کنار، تغییرات در الگوی پوشش گیاهی (به عنوان مثال لبه دبی لبالبی کانال معمولاً با یک مرز خطی مشخص می‌شود به گونه‌ای که مناطق پایین‌تری یا پوشش گیاهی ندارند و یا به وسیله گیاهان آبی یا یکساله مشخص هستند در حالی که مناطق بالادست خط مرزی، پوشش گیاهی دائمی از جمله سرخس، بوته و درخت دارند)، تغییر در بافت و رنگ خاک و دیگر شاخص‌های مجاور مشخص می‌شود. با توجه به اینکه در محل احداث پل ایستگاه هیدرومتری وجود نداشت لذا در دومین مرحله از بازدید میدانی منطقه ارتفاع داغاب به جامانده بر روی پایه پل به عنوان ارتفاع دبی حداکثر لحظه‌ای

رابطه ۲)

$$A = A_{RI} - A_{LI} / A$$

در این معادله  $A$  برابر با شاخص عدم تقارن از منظر خط مرکزی کانال،  $A_{RI}$  = مساحت قسمت راست کانال نسبت به خط مرکزی،  $A_{LI}$  = مساحت قسمت چپ کانال نسبت به خط مرکزی. دامنه مقادیر محاسبه شده بین -۱ و +۱ است در حالی که مقادیر نزدیک به ۰ نشان از تقارن کانال می‌دهد و شاخص هرچه به مقدار  $\pm 1$  نزدیک باشد نشان دهنده وضعیت نامتقارن شکل کانال است. شاخص‌هایی مانند نسبت سینوسیته (SI index) (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۴) و نسبت انشعاب (Roy et al, 2013) از جمله شاخص‌های مورفولوژی مورد بررسی در این مطالعه است. شاخص نسبت سینوسیته که در آن نسبت طول جریان به طول دره است (چورلی و همکاران، ۱۹۸۵) نشان از خمیدگی کانال است که توسط لئوپلد و ولمن (۱۹۵۷) مقدار ۱/۵ برای آن مشخص شده است. چنانچه ضریب از ۱/۵ بیشتر باشد کانال به سمت پیچانرودی و هرچه از این مقدار کمتر باشد کانال مستقیم است. نسبت انشعاب که از روش بریس

برای برآورد آن استفاده می‌شود از مجموع طول موانع یا جزایر در نقطه مورد نظر بر طول خط وسط مقطع (رابطه ۳) مورد نظر تقسیم می‌شود:

رابطه ۳)

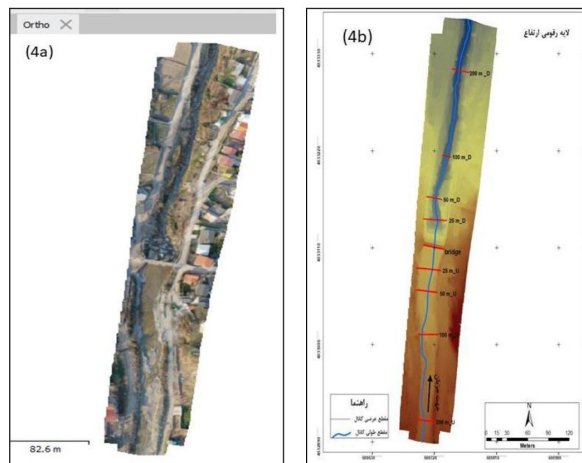
$$BI = 2 * (a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n) / L$$

در این رابطه  $a$  طول هریک از موانع و  $L$  طول بازه می‌باشد. شاخص انشعاب ابزار مناسبی برای تشخیص میزان بار بستر و ته نشست رسوب است. مقادیر بالای شاخص انشعاب نرخ بالای رسوبگذاری را نشان می‌دهد. منشعب شدن بیشتر در مناطقی که تحت فشار انسانی است نشان داده می‌شود (Bertoldi, 2004).

### بحث و نتایج

#### لایه DEM و فتوگرامتری

بر اساس خروجی از مدل ابرنقاط متراکم در محیط متاشیپ، لایه رقومی ارتفاع (4b) و فتوگرامتری (4a) در بازه مورد نظر با اندازه پیکس ۴/۶ سانتی-متر تولید شد (شکل ۴) سپس پروفیل‌های عرضی و طولی کانال بر روی آن ترسیم شد.



شکل ۴: محل ترسیم پروفیل‌های عرضی و طولی بر روی کانال

دبی از آثار داغاب بر روی پایه‌های پل استفاده شد بر این اساس دبی حداکثر لحظه‌ای بر اساس معادله

با توجه به اینکه در محدوده پل ایستگاه هیدرومتری وجود نداشت لذا جهت تشخیص میزان

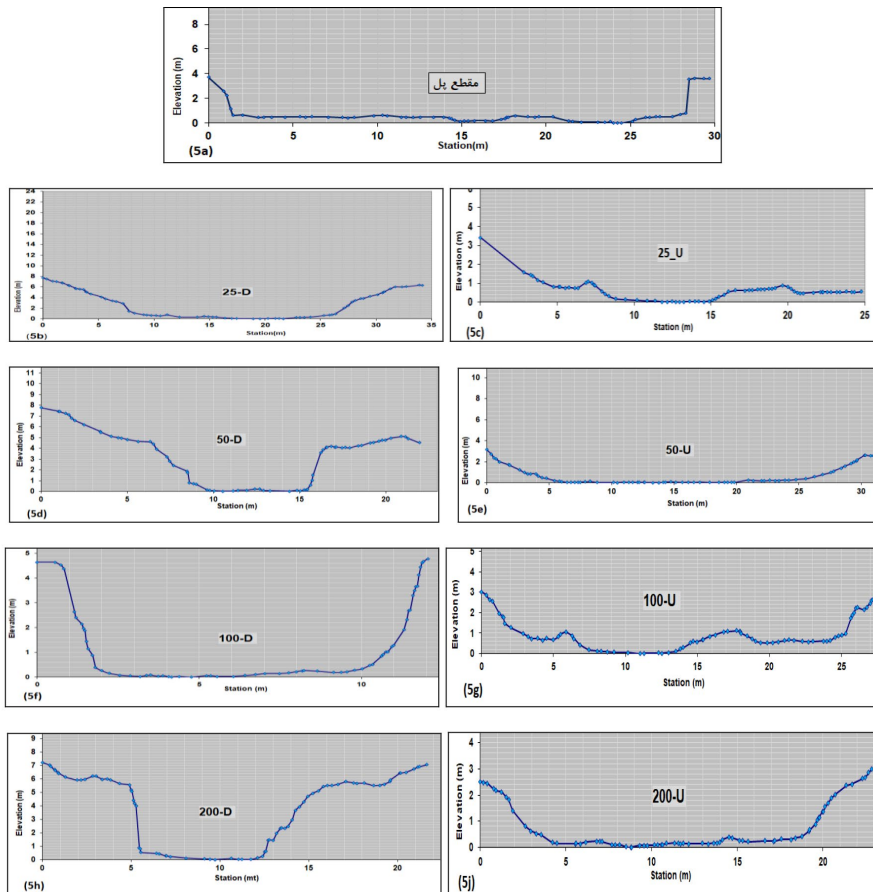


محل روستای جوربند در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین پروفیل طولی کانال در بازه ۴۰۰ متری در شکل ۵ نشان داده است (در این مقاطع U برای بالادست و D برای پایین دست استفاده شده است). همانطور که پیشتر اشاره شد جهت محاسبه پارامترهای مختلف ژئومتری و هیدرومتری از ارتفاع داغاب موجود بر روی پایه دبی به عنوان آثار به جا مانده از کانال در حالت دبی حداکثر لحظه‌ای استفاده شد. ارتفاع داغاب در پایه پل برابر با ۱۴۰ سانتی‌متر بود.

مانینگ در قسمت پایه پل برابر با ۳۹ متر مکعب بر ثانیه برآورده شد همچنین با توجه به اینکه در بازه مورد مطالعه جریانی انحرافی و انشعابی وجود نداشت لذا مقدار دبی حداکثر لحظه‌ای برای سایر مقاطع نیز مقدار ۳۹ میلی‌متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شد و سایر پارامترهای مقاطع براساس مقدار دبی حداکثر لحظه‌ای مورد محاسبه قرار گرفت.

### پویایی مورفولوژی کانال در نزدیک پل

پروفیل‌های عرضی و طولی: پروفیل‌های ترسیم شده بر روی لایه رقومی ارتفاعی بازه مورد مطالعه در



شکل ۵: مقاطع پروفیل عرضی بر روی کانال (5a-5j)

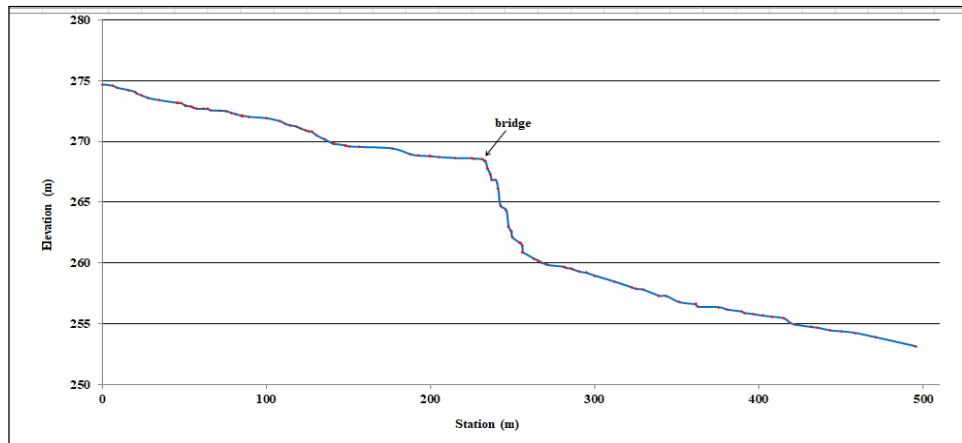
همانطور که در تصویر مشاهده می‌شود شیب جریان تا مقطع پل دارای روند مشخص و آرامی است. در بعد از پل، بستر کانال با افت ۸ متری، به صورت پلکانی دچار فرسایشی شده است. شیب کانال (شکل

### بررسی پروفیل طولی و شیب کانال

پروفیل طولی که نشان‌دهنده روند جریان کانال، پستی‌بلندی‌ها، شیب بستر و در کل مورفولوژی کانال است در شکل ۶ نشان داده شده است.

پل با شیب بسیار تند (حدود ۰/۲۲ متر بر متر) است، از ۲۵ متر پایین‌تر از پل مجدداً روند نرمال و تدریجی را دنبال می‌کند.

۶ و جدول ۲) از فاصله ۲۰۰ متری در بالادست تا نزدیک مقطع پل با یک روند تدریجی و نرمال روبروست، در فاصله ۱۰ متری پل، شیب به شدت کاهش یافته (۰/۰۰۵ متر بر متر) و بلافاصله بعد از



شکل ۶: پروفیل طولی پل جوربند

جدول ۲: مقدار شیب در مقاطع مشخص شده (شیب بر حسب m/m است)

بالادست پل (U)			پل	پایین دست پل (D)				
۱۰۰-۲۰۰	۵۰-۱۰۰	۲۵-۵۰	مقطع پل تا ۲۵ متر	۱۰ متر تا مقطع پل	مقطع پل تا ۲۵	۵۰-۲۵	۵۰-۱۰۰	۱۰۰-۲۰۰
۰/۰۳۴	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۵	۰/۲۱۷	۰/۰۵۷	۰/۰۴۱	۰/۰۲۴

است. علت بالا بودن ضریب تغییرات در محدوده پل جریان آب برگشتی (Back Water) و عریض شدن کانال در این قسمت است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود مقدار عرض کانال در مقاطع بعد از پل به شدت کاهش یافته است. این کاهش به دلیل افزایش مقدار شیب تا مقطع ۲۵ متر پایین‌تر از پل و افزایش سرعت آب در داخل کانال است.

#### بررسی عرض کانال

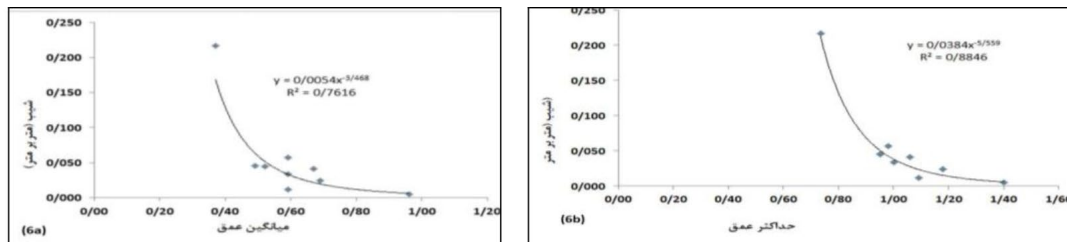
عرض کانال (w) در بازه‌های تعریف شده به جز در مقطع ۲۵ متر بالاتر از پل و خود پل تغییرات چندانی ندارد (جدول ۳) و سایر مقاطع علیرغم تفاوت ظاهری بین مقاطع بالادست و پایین‌دست دارای مقادیر مشابه است. براساس شاخص ضریب تغییرات، در بالادست پل ضریب تغییرات برابر با ۱۸/۴۷ درصد و در پایین‌دست برابر با ۲/۸ درصد

جدول ۳: مقدار عرض، میانگین و ماگزیمم عمق کانال در مقاطع مختلف (واحدها بر حسب متر است)

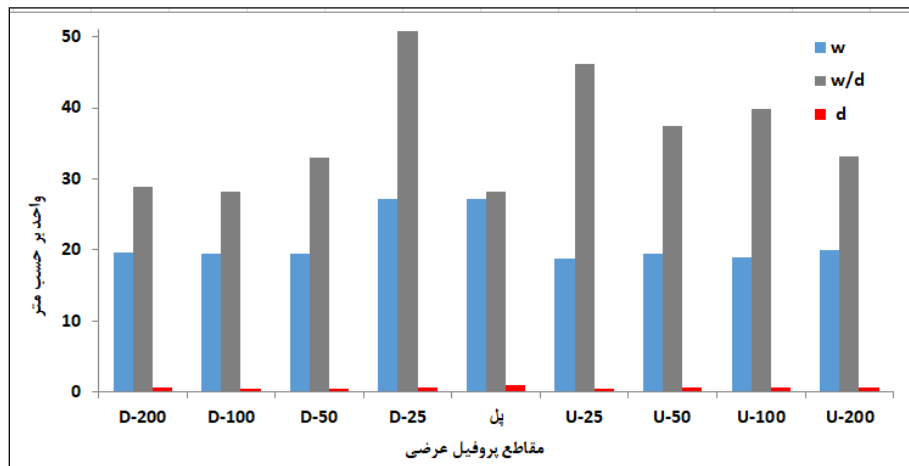
200_D	100_D	50_D	25_D	مقطع پل	25_U	50_U	100_U	200_U	مقطع
۱۹/۹۴	۱۸/۸۹	۱۹/۴۲	۱۸/۷۶	۲۷/۱۰	۲۷/۲۰	۱۹/۵۰	۱۹/۵۰	۱۹/۶۰	عرض کانال
۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۵۹	۰/۳۷	۰/۹۶	۰/۵۹	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۵۹	میانگین عمق
۱/۱۸	۱/۰۶	۰/۹۸	۰/۷۴	۱/۴۰	۱/۰۹	۰/۹۵	۰/۹۵	۱	حداکثر عمق
۲۸/۹۰	۲۸/۱۹	۳۲/۹۱	۵۰/۷۱	۲۸/۲۳	۴۶/۱۰	۳۷/۴۹	۳۹/۷۹	۳۳/۲۲	نسبت عرض به عمق

روشن باشد. بیشترین مقادیر عمق در مقاطع پل (۱/۴۰ متر) و ۲۰۰ متر پایین تر از پل (۱/۱۸) قرار دارد و کمترین مقدار حداکثر و میانگین عمق مربوط به ۲۵ پایین تر از مقطع پل (به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۳۷ متر) است (جدول ۳ و شکل ۸).

میانگین و ماگزیمم عمق کانال ماگزیمم عمق کانال به درک وضعیت ظرفیت فروسایبی کانال کمک می کند (Blogdett, 1986). این پارامتر نه به صورت قطعی اما مشابه مقادیر میانگین عمق می تواند در بیان وضعیت فروسایبی



شکل ۷: نمودار همبستگی شیب با مقادیر میانگین (6a) و حداکثر عمق کانال (6b).



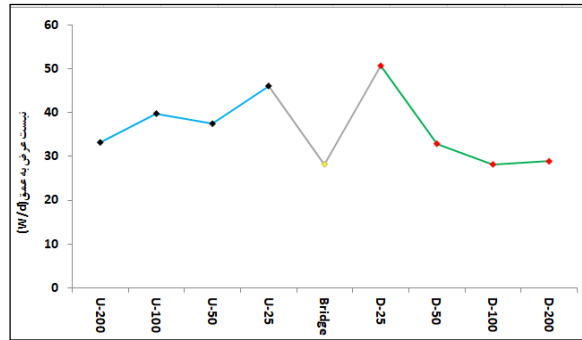
شکل ۸: نمودار مقدار عرض، عمق و نسبت عرض به عمق در مقاطع مختلف

متر نسبت به مقطع متقابل در بالادست (U-25) مشخص شده است. شکل شماره (۸ و ۹) وضعیت این مقدار در مقطع (D-25) برابر با ۵۰/۷۱ متر است. در مقطع پل نسبت عرض به عمق ۲۸/۲۳ متر و در ۲۵ متر بالاتر از پل برابر با ۴۶/۱۰ متر است. نسبت ضریب تغییرات شاخص نسبت عرض به عمق در بالادست و پایین دست پل از ۳۰ درصد در بالادست تا ۱۳ درصد در مقاطع پایین دست متغیر است.

براساس شاخص همبستگی (R) بین مقدار شیب، میانگین عمق و حداکثر عمق (۰/۶۸، -۰/۷۷) مشخص می شود که هرکجا مقدار شیب افزایشی باشد مقدار حداکثر عمق و میانگین عمق، کمتر است (شکل ۷).

نسبت عرض به عمق (w/d)

اختلاف فاحشی در میزان نسبت عرض به عمق در بالادست و پایین دست کانال به دست آمده است. به طوری که افزایش قطعی در حدود ۲۲ متر در پایین دست کانال (D-25) نسبت به مقطع پل و ۴



شکل ۹: نسبت عرض به عمق در مقاطع مختلف

این در حالیست که با مقایسه بازه بالادست و پایین دست پل مقدار ضریب تغییرات به ترتیب ۱۶ و ۳ درصد است. آنچه که قابل مشاهده است عدم تغییر در میزان پارامتر محیط مرطوب در پایین دست پل است. میزان عمق جریان هیدرولیک که از نسبت مساحت مقطع عرضی به عرض بالای جریان به دست می‌آید در بالادست و پایین دست پل به خصوص در مقاطع ۲۵ متری از پل تفاوت زیادی با هم دارند این در حالیست که ضریب تغییرات شعاع هیدرولیک در کل بازه برابر با ۲۲ درصد است. میزان ضریب تغییرات در پایین دست بازه (۲۶ درصد) بیشتر از میزان ضریب تغییرات در بالادست (۱۲ درصد) است.

#### مساحت و محیط مقاطع عرضی کانال

مساحت مقطع عرضی از ۷/۶۵ متر مربع در مقطع ۲۵ متر پایین تر از پل تا ۲۶/۷۹ متر مربع در مقطع پل متغیر است. مقادیر مساحت مقطع در قسمت‌های مختلف متفاوت است اما بیشترین اختلاف در مقطع ۲۵ متر بالاتر و پایین تر پل قابل مشاهده است. ضریب تغییرات پارامتر مساحت منطقه مرطوب برابر با ۳۸ درصد در تمام بازه است، اما ضریب تغییرات در بالادست و پایین دست بازه برابر با ۲۹ درصد می‌باشد. میزان شیب و شعاع هیدرولیکی تعیین کننده وضعیت عرض مقاطع است (جدول ۴). در ارتباط با ضریب تغییرات محیط مرطوب در کل بازه مقدار آن برابر با ۱۶ درصد است

جدول ۴: مقادیر مربوط به پارامترهای مساحت و محیط مرطوب، شعاع هیدرولیکی و عمق جریان

D-200	D-100	D-50	D-25	bridge	U-25	U-50	U-100	U-200	مقطع/پارامتر
۱۶/۳۳	۱۳/۴۸	۱۲/۳۷	۷/۶۵	۲۶/۷۹	۲۰/۴۷	۱۱/۸۰	۱۱/۸۰	۱۲/۹۷	مساحت منطقه مرطوب
۲۱/۰۴	۱۹/۳۸	۲۰/۱۶	۱۹/۳۹	۲۸/۷۲	۲۷/۶۷	۲۰/۴۰	۲۰/۴۰	۲۰/۵۶	محیط مرطوب
۰/۷۸	۰/۷۰	۰/۶۱	۰/۳۹	۰/۹۳	۰/۷۴	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۶۳	شعاع هیدرولیک (.)
۰/۸۲	۰/۷۱	۰/۶۴	۰/۴۱	۰/۹۹	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۶۶	عمق جریان هیدرولیکی

پارامترهای هیدرولیکی بازه سرعت جریان (۷)، قدرت جریان ( $\omega$ ) و عدد فرود ( $Fr$ ): پیکربندی‌های معمول این شاخص نشان‌دهند پرش هیدرولیکی در پایین دست ساختار جریان است و نشان از تبدیل شرایط جریان فوق بحرانی

به شرایط جریان بحرانی ( $Fr > 1$ ) است در نتیجه، ارتفاع آب در زیر سازه افزایش یافته و موجب ایجاد موجی ایستا می‌شود که سرعت بیشتری نسبت به جریان پایین دست دارد (Huggett, 2007). مقادیر مربوط به پارامترهای هیدرولیکی

پارامترهای هیدرولیکی بازه سرعت جریان (۷)، قدرت جریان ( $\omega$ ) و عدد فرود ( $Fr$ ): پیکربندی‌های معمول این شاخص نشان‌دهند پرش هیدرولیکی در پایین دست ساختار جریان است و نشان از تبدیل شرایط جریان فوق بحرانی

می‌دهد که بالاترین تغییرات در پارامتر عدد فرود (۴۱ درصد) و کمترین مقدار در ارتباط با پارامتر سرعت جریان (۳۰ درصد) است. با توجه به مقادیر عدد فرود تمام مقاطع در شرایط زیربحرانی است اما در مقطع ۲۵ متر پایین‌تر از پل جریان دچار افت هیدرولیکی شده و از وضعیت زیربحرانی به وضعیت بحرانی ( $Fr > 1, 1/05$ ) تبدیل شده است. در ارتباط با قدرت مخصوص رود ( $\omega$ ) بیشترین میزان قدرت مخصوص رود در بازه ۲۵ متر پایین‌تر از پل (۸۳۵۷۰/۷۴ وات بر مترمربع) و کمترین مقدار آن در بازه مقطع پل برابر با  $1986/18 (w/m^2)$  است.

جریان در بازه مشخص شده در جدول ۵ ارائه شده است. براساس مقادیر ارائه شده سرعت جریان از ۱/۳۸ متر برثانیه در مقطع پل تا ۴/۱۸ متر بر ثانیه در مقطع ۲۵ متر پایین‌تر از پل متغیر است. با توجه به اینکه هرچه مقطع کانال محدودتر شود سبب افزایش سرعت جریان می‌شود لذا در پایین‌دست پل سرعت جریان دارای بیشترین مقدار است. همچنین بیشترین میزان عدد فرود و قدرت جریان در مقطع ۲۵ متر پایین‌تر از پل واقع شده است اما کمترین میزان آن در مقطع پل قرار دارد. ضریب تغییرات در ارتباط با پارامترهای هیدرولیکی نشان

جدول ۵: مقادیر پارامترهای هیدرولیکی جریان در بازه پل جوربند

مقطع/پارامتر	U-200	U-100	U-50	U-25	bridge	D-25	D-50	D-100	D-200
سرعت جریان	۲/۷۲	۲/۹۵	۲/۹۵	۱/۷۹	۱/۳۸	۴/۱۸	۲/۸۸	۲/۶۵	۲/۳۰
عدد فرود	۰/۵۶	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۳۴	۰/۲۴	۱/۰۵	۰/۶۱	۰/۵۴	۰/۴۱
$\omega$	۱۳۰۶۳/۸۷	۱۷۳۹۷/۷۶	۱۷۲۸۱/۱۵	۴۵۲۷/۷۵	۱۹۸۶/۱۸	۸۳۵۷۰/۷۴	۲۲۱۴۰/۶۶	۱۵۶۷۸/۳۱	۹۳۸۹/۶۶

است در مقطع ۲۵ متر پایین‌تر از پل مقدار تنش برشی با عمق جریان و شیب کانال افزایش می‌یابد. براساس معادله تنش برشی که تحت تأثیر شیب، شعاع هیدرولیک و شتاب ثقل

تنش برشی ( $t$ )

مقدار تنش برشی با عمق جریان و شیب کانال افزایش می‌یابد. براساس معادله تنش برشی که تحت تأثیر شیب، شعاع هیدرولیک و شتاب ثقل

جدول ۶: مقادیر تنش برشی در بازه پل جوربند

مقطع/پارامتر	U-200	U-100	U-50	U-25	bridge	D-25	D-50	D-100	D-200
$t$	۶۶۶۵۲/۶۴	۸۹۲۳۵/۰۸	۸۸۶۳۶/۹۷	۱۶۶۴۷/۶۳	۷۳۲۹/۹۵	۴۴۵۳۸۱/۷۷	۱۱۴۰۱۷/۵۹	۸۳۰۱۴/۱۷	۴۷۰۸۹/۳۴

سینوسیته برابر ۱/۰۲ است. در مقاطع مختلف مقدار شاخص سینوسیته کانال برابر با ۱ است به جز در مقاطع ۲۰۰ متر بالاتر از پل و مقاطع ۵۰ و ۲۰۰ متر پایین‌تر از پل که به ترتیب برابر با ۱/۰۳، ۱/۰۲ و ۱/۰۱ متر است.

شاخص سینوسیته کانال (SI)

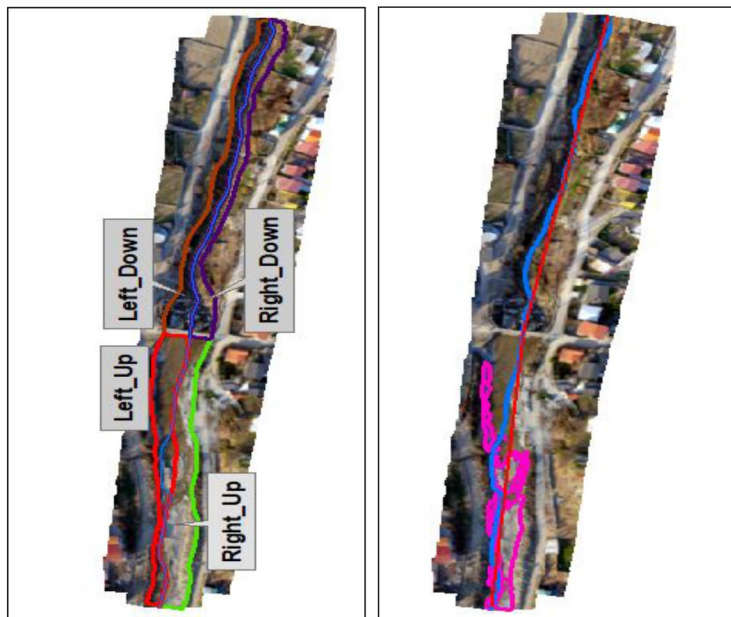
براساس پلانیمتر رودخانه در بازه مشخص شده (شکل ۱۰) در بالادست و پایین‌دست پل سینوسیته کانال به صورت مستقیم است که مقدار شاخص آن برابر با ۱/۰۲ است. بنابر شکل ۱۰ در بالادست علیرغم چندشاخه بودن کانال مقدار شاخص



شکل ۱۰: نمایی از وضعیت پلان کانال در بازه پل جوربند

تقارن در بالادست پل برابر با ۰/۱۴ و در پایین دست برابر با ۰/۱۲- است. بنابراین براساس قوانین ژئومورفولوژی رودخانه‌ای کانال متقارن تحت تأثیر فعالیت انسانی است و کانال‌های نامتقارن بیشتر تحت تأثیر فرایندهای طبیعی است.

آنالیز شکل کانال براساس شاخص تقارن (A) و شاخص موانع رسوبی (BI) مقادیر محاسبه شده در ارتباط با شاخص تقارن کانال در بالادست و پایین دست پل براساس شکل ۱۲ و جدول ۷ نشان می‌دهد که مقدار شاخص



شکل ۱۱: موانع رسوبی در کانال شکل ۱۲: شکل کانال در ساحل چپ و راست کانال

جدول ۷: مقادیر شکل کانال براساس شاخص تقارن (A)

Left_Up (m <sup>2</sup> )	Right_up (m <sup>2</sup> )	Right_Down (m <sup>2</sup> )	Left_Down (m <sup>2</sup> )
۲۳۰۱/۵۴	۳۰۳۹/۱۹	۱۸۳۷/۶۹	۲۳۲۶/۵۴
	-۰/۱۲		۰/۱۴

تک کاناله است و هیچ مانع رسوبی در بستر و کناره کانال وجود ندارد. کل مساحت موانع طولی در بالادست پل برابر با ۱۵۶۴/۷۳ مترمربع است در حالی که مساحت کانال در بازه بالادست پل برابر با ۵۳۴۰/۷۳ متر مربع است.

مقدار شاخص‌ها در بالادست و پایین دست به عدد ۱ نزدیک است و این مقدار نشان از اثرگذاری پل در کانال است. شاخص بریس (BI) که از تقسیم طول موانع بر طول تمام بازه به دست می‌آید براساس شکل ۱۱ و جدول ۸ برابر با ۱/۳۴ در بالادست است اما در پایین دست، کانال به صورت

جدول ۸: طول و مساحت موانع طولی در بازه تعیین شده

طول مانع (m)	مساحت مانع (m <sup>2</sup> )	طول مانع (m)	مساحت مانع (m <sup>2</sup> )
۴/۵۳	۴/۲۳	۶/۸۴	۱۱/۷۷
۲۶/۹۲	۲۸/۴۱	۷/۳۱	۶/۳۷
۱/۶۶	۰/۸۶	۱۲/۱۶	۱۳/۶۹
۷۲/۵۶	۲۳۷/۸۶	۶/۸۴	۴/۷۲
جمع کل طول موانع طولی	کل مساحت موانع طولی	۳۳/۴۶	۷۶/۶۹
۳۰۷/۶۱	۱۵۶۴/۷۳	۳۱/۸۸	۳۴۴/۳۳
ضریب I بین طول و مساحت موانع	مساحت کل بازه	۶/۳۷	۹/۳۵
۰/۸۸	۵۳۴۰/۷۳	۳/۹	۴/۲۰
۱/۳۴	شاخص بریس	۹۳/۱۸	۸۲۲/۲۴

در تمام بازه یکسان است لذا میزان دبی حداکثر لحظه‌ای به دست آمده براساس داغاب در مقطع پل به سایر مقاطع تعمیم داده شد. همان‌طور که در مطالعات پیشین (Roy et al, 2017; Biswas et al, 2018; Roy et al, 2013; Gregory et al, 1983) نشان داده شده است داده‌های به دست آمده براساس روابط مختلف نشان از تغییرات در پارامترهای مختلف مورفومتری و هیدرومتری از جمله شیب بستر، نیمرخ عرضی و طولی، مساحت و محیط مقطع، عمق متوسط و حداکثر عمق، نوع کانال، تنش برشی، قدرت رود، سرعت جریان، عدد فرود و ... دارد. پل‌ها به عنوان سازه‌های عرضی در مسیر جریان رود بنا به نوع سازه و طبیعت رود مانع

## بحث

مطالعه فوق در ارتباط با بررسی اثرات پل بر روی مورفولوژی کانال در رودخانه واز در محدوده روستای جوربند است. در این محدوده که طول آن ۴۰۰ متر است، به سیستم رودخانه جریانی وارد و یا منشعب نمی‌شود همچنین از نظر آورد و برداشت رسوبی نیز تغییرات خاصی وجود ندارد، به گونه‌ای که می‌توان براساس اصل پیوستگی جریان (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴) بیان داشت که میزان دبی در این بازه یکسان بوده و تغییرات در پارامترهای مختلف به دلیل وجود سازه عرضی پل در مسیر جریان است. با توجه به اینکه میزان دبی

کند و باعث فرسایش بیشتر کرانه‌ها در مقاطع بالادست پل جوربند (شکل ۱۱) شود (Frizzell et al, 2004). براساس نیمرخ‌های عرضی و محاسبات مربوط به برآورد عرض کانال در ارتفاع دبی حداکثر لحظه‌ای، عرض کانال تغییرات زیادی ندارد (Roy et al, 2018) به جز در مقطع ۲۵ متر بالادست پل (۲۷/۲۰ متر) و مقطع پل (۲۷/۱۰ متر) که همین باعث شده ضریب تغییرات پروفیل عرضی در بالادست بیشتر از ۱۸ درصد باشد اما در مقاطع پایین‌تر از پل کاهش چشم‌گیر (۱۸/۷۶ متر) مشاهده می‌شود. همین‌طور در مقطع بالاتر از ۵۰ متر در بالادست و پایین‌دست پل مقادیر عرض کانال تغییرات چندانی ندارند. هرچند بین شیب و عرض کانال ارتباط معناداری وجود ندارد ( $r = -0.46$ ) اما ضریب رگرسیون منفی نشان از اثر معکوس شیب بر روی عرض کانال دارد. نسبت عرض به عمق که نشان از وضعیت فرسایشی کانال و همچنین شاخص مهمی در تشخیص نوع دره است، در بالادست و پایین‌دست با هم متفاوت هستند. افت میزان این نسبت در پایین‌دست نشان از اثرگذاری پل و محدود شدن فضای کانال در پایین‌دست دارد. براساس نتایج در بخش مورفومتری کانال مشخص شد که سازه عرضی مانند پل توان لازم جهت ایجاد تغییر در مقادیر مختلف پارامترهای هندسی کانال در بالادست و پایین‌دست پل را داشته است. از جمله مهم‌ترین این پارامترها شیب جریان است که به تبع تغییر آن، تغییر در سایر پارامترهای مورفولوژیکی و هیدرولیکی کانال را نیز به دنبال دارد. شاخص سینوسیته کانال، شاخص تقارن و شاخص موانع رسوبی از جمله مهم‌ترین شاخص‌های مورد بررسی در زمینه تأثیرات پل بر مورفولوژی کانال بود. در ارتباط با شاخص تقارن شکل کانال، مقدار به دست آمده نشان می‌دهد کانال در بالادست و پایین‌دست

محسوب می‌شوند. در منطقه جوربند براساس شواهد مورفولوژیکی بجامانده از جریانات سیلاب-های گذشته و گفته‌های ساکنین روستای جوربند، بستر کانال تا قبل از ساخت پل (حدود ۳۰ سال قبل) هم سطح جاده بوده طوری که بین کانال اصلی و کانال سیلابی اختلاف ارتفاع مشخصی وجود نداشته به‌گونه‌ای که جریانات سیلابی باعث خسارات فراوانی به مناطق مسکونی می‌شده است. در طول زمان بر اثر عمل فرسایشی در بالادست بازه مورد مطالعه باعث شده اختلاف ارتفاع بستر از کناره در مقاطع مختلف بین ۳-۴ متر ایجاد شود. پس از احداث پل (تقریباً ۳۰ سال قبل) در بخش بالایی نه تنها عمل فرسایشی به دلیل سطح اساس محلی ایجاد شده (کفبند زیر پل) متوقف شده بلکه رسوبگذاری و تعریض کانال رخ داده و بستر کانال به وضعیت فعلی یعنی ۲-۳ متر پایین‌تر از کناره کانال رسیده است. در بازه پایین دست پل، فرسایشی به شدت ادامه داشته و دیواره‌ای به ارتفاع بالغ بر ۸ متر بر بستر غالب شده است (شکل 5b, 5d). براساس مشاهدات و سخنان افراد بومی هم، ساخت پل مانع از افت بستر رودخانه در بالادست پل شده و در سال‌های اخیر خطر سیل و آبگرفتگی منازل اطراف رودخانه را افزایش داده است. تغییر شیب کانال نقش مهمی در مورفولوژی کانال و پارامترهای هیدرولیکی آن دارد. کاهش زیاد شیب در فاصله ۵۰ متر بالاتر از پل و همچنین افزایش ناگهانی شیب در مقطع ۲۵ متر پایین‌تر از پل سبب تغییرات بیشتر در مورفومتری کانال شده است. کاهش شیب سبب افزایش سطح مقطع (جدول ۲ و ۴)، کاهش ظرفیت حمل رسوب و در نتیجه افزایش نهشته‌گذاری در بستر می‌شود (Merril and Gregory, 2007) و این افزایش میزان نهشته‌گذاری سبب تشکیل موانع میان‌کانالی شده که می‌تواند جریان‌ها را به سمت سواحل منحرف



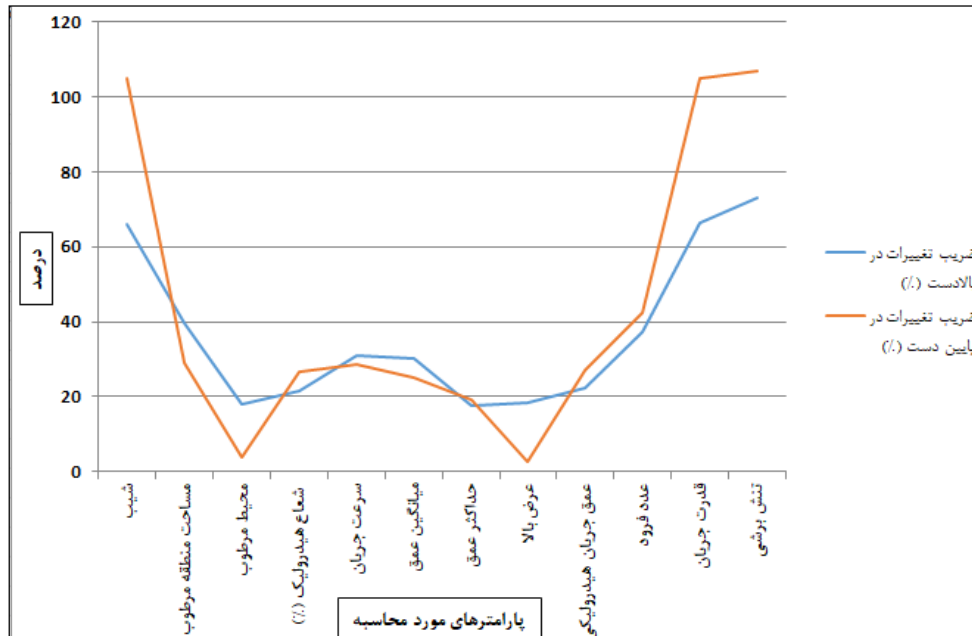
جریان (۴/۱۸ متر برثانیه) افزایش می‌یابد و مقدار آن با فاصله از پل روند کاهشی در پیش می‌گیرد. در این ارتباط قدرت رود در اثر افت هیدرولیکی نیز در مقطع پایین‌دست پل افزایش قابل توجهی دارد و با فاصله از پل از مقدار آن کاسته می‌شود و جریان از حالت آرام یا زیربحرانی ( $ft < 1$ ) به سمت جریان فوق بحرانی یا سریع ( $ft > 1$ ) در مقطع ۲۵ متر پایین تر از پل تغییر می‌کند (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴). همانطور که پیشتر بیان شد، زمانی که تغییری در یکی از پارامترهای جریان (فرم و فرایند) روی می‌دهد، سایر پارامترها نیز از این تغییر تأثیر می‌پذیرند. به تبع اثرگذاری یک عامل در پارامترهای مختلف یکسان نیست چنانچه در شکل ۱۳ و جدول ۹ مشاهده می‌شود بیشترین تأثیر پل جوربند بر پایین دست پل است که میانگین ضریب تغییرات پارامترهای مختلف آن در پایین‌دست ۴۳/۴۲ درصد است؛ این در حالی است که میانگین ضریب تغییرات در بالادست پل ۳۶/۷۹ درصد است. از میان پارامترهای مختلف، بیشترین تغییرات در پارامترهای قدرت رود و تنش برشی و کمترین اثر بر روی پارامتر محیط مرطوب (۱۸/۰۸ درصد در بالادست و ۳/۹۶ درصد در پایین‌دست پل) و عرض کانال (۱۸/۴۸ درصد در بالادست پل و ۲/۸۰ درصد در پایین‌دست پل) را دارد.

در محدود نرمال قرار دارد و این امر از دخالت انسان (پل) در جریان طبیعی کانال نشأت می‌گیرد (Rayburg et al, 2008). علیرغم کاهش شیب در بالادست و وجود موانع رسوبی در بالادست و تک کاناله شدن رودخانه در پایین‌دست پل، شاخص سینوسیته نشان از جریان مستقیم (شکل ۱۰) دارد اما شاخص بریس یا شاخص انشعاب (BI) نشان می‌دهد در بالادست موانع میان کانالی و کناره‌ای در طول بازه قابل توجه است به گونه‌ای که مقدار آن در بالادست برابر با ۱/۳ متر در طول کل بازه است. شاخص انشعاب براساس مطالعات برتولدی، ۲۰۰۴ در مناطقی که تحت فشار فعالیت‌های انسانی است افزایش می‌یابد به گونه‌ای که حدود ۳۰ درصد از مساحت بالادست کانال بوسیله موانع رسوبی پوشیده شده است اما در پایین‌دست کانال به دلیل عمل فرسایشی اثری از موانع رسوبی در کانال و کناره آن وجود ندارد (شکل ۱۱ و جدول ۸). بنابراین در بالادست پل الگوی چند کانالی شریانی و در پایین دست الگوی تک کانالی غالب است. از دیگر اثرات مورد بررسی در تحقیق، پارامترهای هیدرولیکی جریان است. براساس مطالعات پیشین و همچنین نتایج به دست آمده از پژوهش، نشان داده شد که با تغییر شیب جریان، سرعت جریان و به تبع آن قدرت جریان و عدد فرود نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. با شکست شیب در بعد از پل سرعت

جدول ۹: ضریب تغییرات پارامترهای مختلف در بالادست و پایین دست پل

پارامتر	ضریب تغییرات در بالادست (%)	ضریب تغییرات در پایین دست (%)
شیب	۶۶/۱۶	۱۰۴/۸۷
مساحت منطقه مرطوب	۳۹/۷۸	۲۹/۰۰
محیط منطقه مرطوب	۱۸/۰۸	۳/۹۶
شعاع هیدرولیک (/)	۲۱/۶۶	۲۶/۴۹
سرعت جریان	۳۰/۸۴	۲۸/۵۰
میانگین عمق	۳۰/۱۰	۲۵/۲۶
حداکثر عمق	۱۷/۵۲	۰۲۱۹
عرض بالا	۱۸/۴۸	۲/۸۰
عمق جریان هیدرولیکی	۲۲/۲۰	۲۷/۰۸

عدد فرود	۳۷/۱۶	۴۲/۴۲
قدرت جریان	۶۶/۴۰	۱۰۴/۹۵
تنش برشی	۷۳/۱۶	۱۰۶/۷۷
میانگین درصد ضریب تغییرات	۳۶/۷۹	۴۳/۴۳



شکل ۱۳: درصد ضریب تغییرات پارامترهای مختلف کانال

### نتیجه‌گیری

یکی از مسائل مهم در ارتباط با مطالعات محیطی دسترسی به اطلاعات و داده‌های دقیق و بروز از منطقه است. استفاده روزافزون از تصویربرداری برد کوتاه در زمینه مطالعات و تولید نقشه ارتوفتو و همچنین لایه رقومی ارتفاعی سبب افزایش توان محققین در زمینه بررسی، تحلیل و نتیجه‌گیری مناسب از موضوعات مختلف می‌شود. یکی از مشکلات در زمینه استفاده از پهپاد در مناطق با پوشش جنگلی محدودیت زمانی در فصل رویش گیاهان است. از موارد دیگر مسائل امنیتی در ارتباط با برداشت تصاویر پهپادی است. لذا در این زمینه ترکیبی از روش‌های مختلف تصویربرداری و برداشت میدانی می‌تواند در ارائه داده‌های کافی مؤثر باشد. در این پژوهش سعی شد سه پارامتر مورفولوژیکی، هیدرولیکی و مورفومتری مورد

بررسی قرار بگیرد اما بی‌شک مطالعات رسوب‌شناسی و مطالعات تاریخی از وضعیت کانال در قبل و بعد از ساخت پل نیز مورد نیاز است تا شناخت دقیق‌تری از اثرات پل به دست بیاید. - با توجه به اینکه در این مطالعه یک پل مورد بررسی قرار گرفت لذا جهت دستیابی به نتایج بهتر ضرورت بررسی موارد متعدد دیگر از پل و کالورت در مناطق مختلف احساس می‌شود. هدف از پژوهش حاضر تعیین و تشخیص میزان تأثیرات سازه عرضی پل بر روی رودخانه بوده است. در این تحقیق پارامترهای مختلف مرتبط با سیستم رودخانه مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت براساس مطالعات گذشته و نتایج به دست آمده مشخص شد پل جوړبند اثرات متعددی در بالادست و پایین دست خود از نظر مورفولوژیکی، هیدرولیکی، مورفومتری به جا گذاشته است. اما در پایین دست

### سیاسگزاری

در پژوهش حاضر از زحمات و محبت بی شائبه خانم مریم رشیدی، آقای میلاد رستمی و آقای شعبانی در بازدید از بازه مورد نظر و برداشت‌های میدانی و همچنین آقای ایرج شکری که در زمینه تهیه نقشه از تصاویر پهپاد کمک فراوانی انجام دادند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

پل افت بستر خطر آبگرفتگی ناشی از سیل را کاهش داده اما فرسایش کناره یکی از معضلاتی است که مالکان حاشیه رودخانه در پایین دست پل با آن مواجه هستند. بنابراین انتخاب مکان نامناسب پل یا سازه‌هایی که باعث تغییر مقطع کانال می‌شود می‌تواند با تغییر ویژگی‌های سیستم رودخانه‌ای مخاطرات مختلف را برای ساکنان حاشیه رودخانه به دنبال داشته باشد.

### منابع

-حسین‌زاده، م. و اسماعیلی، ر.، ۱۳۹۴. ژئومورفولوژی رودخانه‌ای، مفاهیم، اشکال و فرایندها، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، ۳۳۸ ص.

-جلالی‌راد، ر.، ۱۳۸۲. بهینه‌بندی سیل در بخشی از حوزه آبخیز شهری تهران با استفاده از GIS، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس.

-Abbe, T.B. and Montgomery, D.R., 2003. Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington, *Geomorphology*, v. 51, p. 81-107. 10.1016/S0169-555X(02)00326-4.

-Ansari, S.A., Kothiyari, U.C. and Ranga Raju, K.G., 2002. Influence of cohesion on scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*. v. 40, p. 717-729.

-Christelle, A., Mireille, P. and Clasude, V., 2004. Recent morphological channel changes in deltaic environment. The case of the Rhone River, *Geomorphology*, v. 57(3), p. 385-402.

-Bateni, S.M., Borghei, S.M. and Jeng, D.S., 2007. Neural network and neuro-fuzzy assessments for scour depth around bridge piers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 20(3), p. 401-414.

-Bertoldi, W., 2004. River Bifurcations. Thesis (PhD), University of Trento, Italy

Biswas, M., & Banerjee, Puja. 2018, Bridge construction and river channel morphology- A comprehensive study of flower behavior and sediment size

alteration of the river Chel, India, *Arabian Journal of Geosciences*, v. 11, 467 p. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3789-7>.

-Blanton, P. and Marcus, W.A., 2009. Railroads, roads and lateral disconnection in the river landscapes of the continental United State. *Geomorphology*, v. 122, p. 212-227.

-Bouska, W.W., Keane, T. and Paukert, C.P., 2010. The effects of road crossings on prairie stream habitat and function. *Journal of Freshwater Ecology*, v. 25(4), p. 499-506.

-Carbonneau, P.E. and Bergeron, N., 2005. Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes. *Water Resources Research*, v. 41, p. 114-126.

-Carrivick, J.L. and Smith, M., 2019. Fluvial and aquatic applications of structure from motion photogrammetry and unmanned aerial vehicle/drone technology, *WIREs Water*. DOI: 10.1002/wat2.1328.

- Carrivick, J.L., Smith, M.W., Quincey, D.J. and Carver, S.J., 2013. Developments in budget remote sensing for the geosciences, *Geology Today*, v. 29(4), p. 138-143.
- Chou, T., Yeh, M., Chen, Y. and Chen, Y., 2010. Disaster monitoring and management by the unmanned aerial vehicle technology, *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Vienna, Austria)*.
- Crutzen, P.J., 2002. Geology of mankind, *Nature*, v. 415, <https://doi.org/10.1038/415023a>.
- Depnath, K. and Chaudhuri, S., 2010. Laboratory experimental on local scour around cylinder for clay – sand mixed beds. *Journal of Geology*, v. 111, p. 51-61.
- Dimitriou, E. and Stavroulaki, E., 2018. Assessment of riverine morphology and habitat regime using unmanned aerial vehicles in a Mediterranean environment. *Pure and Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1929-3>.
- Firat, M. and Gungor, M., 2009. Generalized regression neural networks and feed forward neural networks for prediction of scour depth around bridge piers. *Advances in Engineering Software*, v. 40, p. 731-737
- Frizzell, R.L., Zevenbergen, L.W. and Navarro, R., 2004. Stream Channel restoration at Bridge Sites. Trimble Inc. 6445 Powers Ferry road, Suite 100, Atlanta, GA 30339, p. 1-9.
- Fujita, I., Notoya, Y. and Shimono, M., 2015. Development of UAVbased river surface velocity measurements by STIV based on ighaccurate image stabilization technique. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress (The Hague, the Netherlands).
- Fráter, T., Juzsakova, T., Lauer, J., Dióssy, L. and Rédey, A., 2015. Unmanned aerial vehicles in environmental monitoring—An efficient way for remote sensing. *Journal of Environmental Science and Engineering A*, v. 4, p. 85-91.
- Grade, R.J., and Kothyari, U.C., 1998. Scour around Bridge Piers. *PINSA*, v. 64(4), p. 569-580.
- Gregory, K.J. and Brookes, A., 1983. Hydrogeomorphology Downstream from Bridges. *Applied Geography*, v. 3, p. 145-159.
- Huggett, R.J., 2007. *Fundamentals of geomorphology*. 2nd ed. New York: Routledge *Fundamentals of Physical Geography*.
- Kim, S.S. and Kim, T.H. and Sim, J.S., 2019. application assessment of UAV mapping for disaster damage investigation in Korea, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-3/W8, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-209-2019>, 2019.
- Knighton, A.D., 1981. Asymmetry of river channel cross-section: part 1, Quantitative indices. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 6, p. 581-588.
- Kothyari, U.C. and Ranga—Raju, K.G., 2000. Scour around spur dikes and bridge abutments. *JOURNAL OF HYDRAULIC RESEARCH*, v. 39(4), p. 367-374.
- Jones, J.A., Swanson, F.J., Wemple, B.C. and Synder, K.U., 2000. Road effect on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream network. *Conservation Biology*, v. 14, p. 76-85.
- Knighton, A.D., 1984. *Fluvial Forms and Processes*. Edward Arnold, Sheffield, North America.
- Lee, T.L., Jeng, D.S., Zhang, G.H. and Hong, J.H., 2007. Neural network modeling for estimation of scour depth around bridge piers. *Hydrodynamics*, v. 19(3), p. 378-386.

- Lee, I., Kang, J. and Seo, G., 2013. Applicability analysis of ultralight UAV for flooding site survey in South Korea. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W1, ISPRS Hannover Workshop 2013, 21-24 May 2013, Hannover, Germany.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G. and Miller, J.P., 1964. Fluvial processes in geomorphology. New York: Dover.
- McKenney, R., Jacobson, R.B. and Wetheimer, R.C., 1995. Woody Vegetation and Channel Morphogenesis in Low Gradient Gravel-Bed Streams in the Ozark Plateaus, Missouri and Arkansas. *Geomorphology*, v. 13, p. 175-198.
- Merwe, D.V. and Price, K.P., 2015. Harmful algal bloom characterization at ultra-high spatial and temporal resolution using small unmanned aircraft systems. *Toxins - Open Access Toxinology Journal*, v. 7(4), p. 1065-1078, DOI: 10.3390/toxins7041065.
- Merril, M.A. and Gregory, J., 2007. The effects of culverts and bridges on stream geomorphology. In: J.F. Levine, et al. eds. A comparison of the impacts of culverts versus bridges on stream habitat and aquatic fauna, Technical Report (FHWA/NC/2006-15), North Carolina State University, Department of Forestry and Environmental Resources, Raleigh, p. 15-45.
- Meybeck, M., 2003. Global analysis of river systems: From Earth system controls to Anthropocene syndromes. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Biological Sciences*, v. 358, p. 1935-1955.
- Milne, J.A., 1983. Variation in cross-sectional asymmetry of coarse bedload river channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 8, p. 503-511.
- Mueller, D.S. and Wagner, C.R., 2005. Field observations and evaluations of streambed scour at bridges. Rep. No. FHWA-RD-03-052, Office of Engineering Research and Development, Federal Highway Administration, 134 p.
- Najafzadeh, M., Etemad-Shahidi, A. and Lim, S.Y., 2016. Scour prediction in long contractions using ANFIS and SVM. *Ocean engineering*, v. 111, p. 128-135.
- Niedzielski, T., 2018. Application of unmanned aerial vehicles in Geosciences: Introduction, Pure and Applied Geophysics, Pure Appl. Geophys. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1992-9>.
- Nilsson, C., Liermann, C.R. and Dyneslus, M., 2005. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems, *Science*, v. 308, p. 404-430.
- Pal, M., Singh, N.K. and Tiwari, N.K., 2012. M5 model tree for pier scour prediction using field dataset. *Civil Engineering*, v. 16, p. 1079-1084.
- Rayburg, S.C. and Neave, M., 2008. Assessing morphological complexity and diversity in river systems using three-dimensional asymmetry indices for bed elements, bedforms and bar units. *River Research and Applications*, v. 24, 1343-1361. doi:10.1002/rra.1096
- Resh, V.H., 2005. Stream crossings and the conservation of diadromous invertebrates in South Pacific island streams. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 15, p. 313-317.
- Richardson, E.V. and Richardson, J.R., 1999. Determining Contraction Scour. In: E.V. Richardson and P.F. Lagasse, (Ed.) *Stream Stability and Scour at Highway Bridges*, American Society of Engineers, p. 483-490.
- RIEGL, 2017. sUAV-Based Surveying System for Hydrographic Applications. Riedenburgstrasse, Austria, <http://www.ricopier.com>.

- Rosgen, D.L., 1994. A classification of natural rivers. *Catena*, v. 22, p. 169-199.
- Robert, A., 2003. *River Processes*. Arnold, London.
- Roy, S. and Sahu, A.S., 2017. Potential interaction between transport and stream networks over the lowland rivers in Eastern India. *Journal of Environmental Management*, v. 197, p. 316-330.
- Roy, S., 2013. The effect of road crossing on river morphology and riverine aquatic life: a case study in Kunur River Basin, West Bengal. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 6 (Supplement), p. 435-445. doi:10.4314/ejesm.v6i6.14S
- Schumm, S.A., Mosley, M.P. and Weaver, W.E., 1987. *Experimental fluvial geomorphology*. Chichester, NY: John Wiley & Sons
- Sing, S., 1983. Flood Hazard and environmental degradation: a case study of the Gomti River. In: L.R. Sing, (Ed.) *Environmental Management*, Allahabad Geographical Society, Department of Geography, Allahabad University, p. 271-286.
- Su, T. and Chou, H., 2015. Application of multispectral sensors carried on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to trophic state mapping of small reservoirs: A case study of tain-pu reservoir in kinmen, Taiwan, *Remote Sensing*, p. 10078-10097, DOI: 10.3390/rs70810078.
- Surian, N. and Rinaldi, M., 2003. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy, *Geomorphology*, v. 50(4), p. 307-326.
- Surian, N., 2006. Effects of human impacts on braided river morphology: Examples from northern Italy. In Sambrook Smith, G.H., Best, J.L., Bristow, C.S., and Petts, G.E., editors, *Braided Rivers*. Oxford, Blackwell, p. 327-338.
- Schumm, S.A., 1977. *The Fluvial System*. New York, WileyInterscience.
- Vázquez-Tarrió, D., Borgniet, L., Liébault, F. and Recking, A., 2017. Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps), *Geomorphology*, p. 94-105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.039>.
- Walter, R.C. and Merritts, D.J., 2008. Natural streams and the legacy of water-powered mills. *Science*, v. 319, p. 299-304.
- Wang, J., Edwards, P.J. and Goff, W.A., 2010. Assessing Changes to In-Stream Turbidity Following Construction of a Forest Road in West Virginia. TMDL 2010 Watershed Management to Improve Water Quality CD-ROM Proceedings, ASABE Publication Number 711P0710cd.
- Wemple, B.C., Swanson, F.J. and Jones, J.A., 2001. Forest roads and geomorphic process interactions, Cascade range, Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 26, p. 191-204.
- Wheeler, P.A., Angermeier, P.L. and Rosenberger, A.E. 2005, Impact of New Highways and Subsequent Landscape Urbanization on Stream Habitat and Biota. *Reviews in Fisheries Science*, v. 13(3), p.141-164.