

## بررسی کناره‌های حساس به فرسایش با تأکید بر خصوصیات زمین‌شناسی، هندسی و هیدرولیکی (مطالعه موردی: رودخانه‌ی بشار)

مجید خزایی\*: دانش‌آموخته‌ی دکتری آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان

احمد نوحه‌گر: استاد دانشکده‌ی فنی محیط زیست، دانشگاه تهران

رسول مهدوی‌نجف‌آبادی: گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

عبدالرسول تلوری: گروه عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، خوزستان، اهواز

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۲۸)

### چکیده

بررسی عوامل مؤثر در فرسایش کناری و تغییر مورفولوژی رودخانه، مستلزم وجود اطلاعات پایه در زمینه‌های زمین‌شناسی، هیدرولیک و خصوصیات هندسی رودخانه است. در این تحقیق، کناره‌های حساس به فرسایش کناری در رودخانه‌ی بشار بررسی شده‌است. در این ارتباط ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و بازدیدهای صحرایی، مورفولوژی رودخانه بررسی و از تطبیق مورفولوژی، نقشه‌ی زمین‌شناسی، نقشه‌ی حساسیت به فرسایش کناری و بازدیدهای میدانی، نقاط آسیب‌پذیر رودخانه شناسایی شد. سپس با توجه به تنوع مورفولوژیکی مسیر رودخانه، بازه‌ای ۱۰ کیلومتری از رودخانه انتخاب و مطالعات دانه‌سنجی، ظرفیت ایمن رودخانه، سرعت متوسط جریان و تنش برشی بر آن اجرا شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد بازه‌هایی از رودخانه که از سازندهای ماری و سیلتی عبور می‌کند، حساسیت بالایی به فرسایش دارد. بیش از ۵۰ کیلومتر از مسیر رودخانه از سازندهای آسماری عبور می‌کند که در بخش زیادی از این سازندها، رسوبات تراس‌های پادگانه‌های آبرفتی روی این سازندها واقع شده‌اند و جریان رودخانه به فرسایش کناره انجامیده‌است (کیلومتر ۸۲-۹۲). نتایج مورفولوژی نشان داد که این رودخانه، بیش از ۱۰۰ مئاندر کوچک و بزرگ است؛ به طوری که تمامی بازه‌های رودخانه تا مرز پیچان رودی پیش رفته‌اند (ضریب خمیدگی  $< 1/2$ ). بازه‌های ۴۴-۵۵ و ۸۲-۹۲ دارای بیشترین ضریب تنش کناری معادل  $1/4$  بوده‌است. همچنین بررسی شاخص‌های تنش برشی جداره، پایداری بستر و ضریب اطمینان حاکی از ناپایداری ( $T_e \geq T_c$  و  $RBS < 1$  و  $FS < 1$ ) بازه، انتخابی می‌باشد. واژگان کلیدی: تنش برشی، رودخانه‌ی بشار، فاکتور اطمینان، فرسایش کناری و مورفولوژی.

### ۱- مقدمه

رودخانه‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین‌کننده آب برای انسان و سایر موجودات به شمار می‌آیند. یک نیاز حیاتی برای مدیریت رودخانه، درک فرسایش کناره‌ای و فرآیندهای رودخانه‌ای است. از جمله آسیب‌های ناشی از فرسایش کناره‌ای رودخانه‌ها و تغییرات کانال رودخانه، مشکلات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجه است. درک سازوکار فرسایش کناره‌ای سبب مدیریت موفق اکوسیستم آبی و محیط‌های دریایی است، فرسایش کناره‌ای به‌عنوان عامل اصلی مسائل مربوط به کیفیت آب و تخریب رودخانه‌ها است (Grimshaw and Lewin, 1980 & Prosser et al,).

(2001 & Simon et al, 2002).

همچنین در بسیاری از مناطق، فرسایش کناره‌ای منبع اصلی بار رسوب معلق رودخانه‌ها است (Thoma et al, 2005) (Belmont et al, 2011 & Kessler et al, 2013).

مطالعات مورفولوژی رودخانه، بررسی روند تغییرات مکانی جریان و مشخص کردن محدوده‌ی جابه‌جایی پیچان‌رودها، یکی از بخش‌های اساسی در مطالعات مهندسی رودخانه و ساماندهی سواحل آن است (Yammani and Sharafi, 2012). عوامل زیادی بر فرسایش کناری و تغییر مورفولوژی رودخانه مؤثر است؛ از جمله این عوامل مهم و تأثیرگذار می‌توان به عوامل هیدرولیکی، هیدرولوژیکی، خاک‌شناسی و تراس‌های، زمین‌شناسی، توپوگرافی و فیزیوگرافی، عوامل انسانی و کاربری اراضی اشاره کرد (Vanacker et al, 2005 & Batalla et al, 2004 Surian & Zhengyi et al, 2011 & Wellmeyer et al, 2005 & Rinaldi, 2003).

با توجه به دینامیک رودخانه، باید هرگونه بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری در حاشیه‌ی آن مبتنی بر شناخت صحیح رفتار رودخانه و مکانیسم فرسایش کناری باشد. در این راستا با توجه به تغییرات مورفولوژی و فرسایش کناری رودخانه و ارزش حیاتی اراضی حاشیه‌ی آن، قبل از هرگونه عملیات مهندسی و بازسازی و کنترل فرسایش کناری، باید مهم‌ترین عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش کناری را مشخص کرد. در زمینه‌ی بررسی مورفولوژی رودخانه‌ها در کشور، تحقیقات متعددی صورت گرفته‌است، ولی نکته‌ی حایز اهمیت این است که در مطالعات صورت گرفته با نگاه ژئومورفولوژی، تنها به بررسی مورفولوژی رودخانه در طی زمان پرداخته شده و کمتر مطالعه‌ای به بررسی این صورت از مورفولوژی با تأکید بر عوامل اصلی مؤثر بر فرسایش کناری و تعیین نقاط حساس و بحرانی در فرسایش رودخانه پرداخته‌است. در این تحقیق ضمن بررسی مورفولوژی رودخانه و تعیین نقاط حساس به فرسایش کناری، بازه‌ای از رودخانه نیز برای بررسی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پیشروی فرسایش کناری انتخاب و مطالعات تکمیلی در این بازه اجرا شد.

Mahmoodi & Nohegar (2002) آثار برداشت مصالح، بر شکل بستر و سیستم رودخانه‌ی میناب را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه نشان داده شد که برداشت مصالح به تغییرپذیری مسیر رودخانه از جمله گود افتادگی بستر، فرسایش شدید، تخریب کناره‌ها، توسعه‌ی مئاندرها، عریض شدن رو به گسترش بستر و تهدید سازه‌های انسانی و مزارع کشاورزی انجامیده‌است. آنها بابل رود را مورد بررسی قرار دادند. Ghafari و همکاران (2006) برای تعیین و شناسایی نقاط مستعد فرسایش و رسوب‌گذاری، مقادیر حداکثر و حداقل تنش برشی سواحل راست، چپ و مجرای اصلی هر مقطع را در دوره‌های بازگشت مختلف، تعیین کردند و در نهایت، مناطق در معرض خطر فرسایش مشخص شد. نتایج این بررسی نشان داد که مقدار تنش برشی در دیواره‌ها، کمتر از مجرای اصلی و در سمت خارجی پیچ‌ها و نواحی مئاندری رودخانه، مقدار تنش افزایش یافته‌است و میزان فرسایش کناری بالا می‌رود. مقایسه‌ی زمانی - مکانی تغییرات در پارامترهای هندسی رودخانه‌ی کشکان در دو بازه‌ی زمانی 1831-1833، نشان داد که عامل اصلی تغییر در بیش از نیمی از تغییرات در خمیدگی‌های رود در بازه‌ی زمانی مطالعاتی، برداشت شن و ماسه از بستر و کناره‌ی رودخانه بوده‌است (Shayan and Dehestani, 2012). بررسی نقش عوامل تأثیرگذار در تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ی سیستان از دید ژئومورفولوژی مهندسی و ارزیابی بازه‌های مختلف آن از نظر پایداری با استفاده از

پارامترهای هندسی، نشان داد که رودخانه‌ی سیستان در تمامی بازه‌ها وضعیت پایدار دارد (Hafezi Moghadas et al., 2012). rezaei و همکاران (2012) وضعیت پایداری رودخانه‌ی قزل‌اوزن را با ترکیبی از روش‌های تجربی، ریاضی، مطالعات صحرایی و ویژگی‌های هندسی با استفاده از روش‌های تنش برشی بررسی کردند. مقایسه‌ی نتایج محاسبات با مطالعات صحرایی نشان داد که در بازه‌ی اول محدوده‌ی مورد مطالعه، نتایج روش‌های تجربی با مطالعات صحرایی همخوانی دارد، ولی در بازه‌های دوم و سوم، نتایج روش‌های تجربی با مطالعات صحرایی همخوانی ندارد. این بررسی نشان داد که روش‌های تنش برشی و شاخص مقاومت نسبی بستر، تنها در مجراهای آبرفتی اهمیت دارد و به نتایج آنها می‌توان استناد کرد. Zeinali and Asghari Sarazankarood (2013) ضمن تحلیل ویژگی‌های رسوبی رودخانه و مقاومت ذرات رسوبی نسبت به فرسایش، با استفاده از روش‌های تنش برشی و شاخص مقاومت نسبی بستر، میزان فرسایش‌پذیری رودخانه‌ی سراسکندچای هشترود را بررسی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد که در اکثر نقاط رودخانه، میزان تنش برشی بحرانی بیش از تنش برشی کل است که بیانگر این است که ذرات رسوبی موجود در بستر رودخانه، نسبت به فرسایش در بستر رودخانه مقاوم است؛ بنابراین T رودخانه حالت پایداری دارد و میزان تغییرات رودخانه در آینده، بسیار کم و به صورت مقطعی خواهد بود.

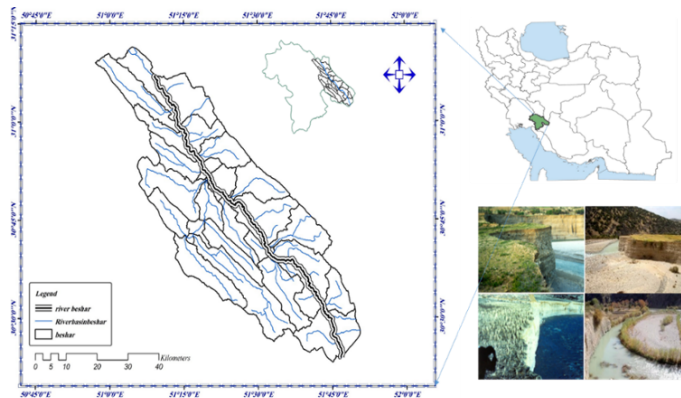
ارزیابی تغییرات مورفولوژی رودخانه‌ی گانژ<sup>۱</sup> با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست، توسط Hossein و همکاران (2013) طی چهار دوره‌ی زمانی اجرا شد. این پژوهش نشان داد که به علت افزایش پهنای رودخانه در اثر فرسایش کناری، سینوسیته رودخانه نیز افزایش یافته‌است. Kessler و همکاران (2013) تغییرات فرسایش کناره‌ای رودخانه مینه‌سوتا<sup>۲</sup> را در طول زمان، با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی و داده‌های ردیابی و مسافت‌یابی نور (میدان رادارلیدار) بررسی کردند. نتایج نشان داد که فرسایش کناری، موضعی است و مقایسه‌ی میزان فرسایش در فواصل زمانی نامشابه اعتمادناپذیر است. به طور متوسط، میزان عقب‌نشینی دیوار رودخانه طی سال‌های 1938 - 1855، ۰/۵۱ متر در سال و در مقابل طی سال‌های 2009 - 1938، معادل ۰/۳۷ متر در سال بوده‌است. Kankara و همکاران (2015)، تغییرات خط ساحلی کوتاه و بلندمدت را در طول ساحل هند با استفاده از روش سنجنش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی برآورد و بدین منظور از تصاویر سنجنده‌های لندست و IRS استفاده کردند. آنالیز ۹۷۴ کیلومتر از ساحل مورد بررسی نشان داد که ۲۷۵ کیلومتر از خط ساحلی تحت فرسایش، ۴۱۷ کیلومتر تحت برافزایش و ۱۵۳ کیلومتر نیز تحت شرایط پایدار قرار دارد.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

حوزه‌ی آبخیز بشار در استان کهگیلویه و بویراحمد، در محدوده‌ی جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۸ درجه ۵۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه ۲۵ دقیقه تا ۵۱ درجه ۵۶ دقیقه شرقی واقع شده‌است. رودخانه‌ی بشار مهم‌ترین رودخانه‌ی این حوضه است. این رودخانه از دامنه‌های غربی رشته‌کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد و پس از الحاق شاخه‌های دیگر، از سرشاخه‌های اصلی رودخانه‌ی کارون به رودخانه‌ی خراسان وارد می‌شود. این رودخانه پس از دریافت شاخه‌های دیگر، تحت عنوان رودخانه‌ی کارون به دشت خوزستان وارد می‌شود (شکل ۱).

<sup>۱</sup> Ganges

<sup>۲</sup> Minnesota



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه

### ۳- مواد و روش

ابتدا توسط نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌ی رودخانه‌ی اصلی بشار تهیه شد، سپس از طریق بازدیدهای صحرایی، کل مسیر رودخانه به صورت دقیق مورد بررسی و پایش قرار گرفت. محدوده‌های فرسایش‌پذیر و مقاوم از طریق پیمایش کناره‌ی رودخانه و سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی، ثبت و نقاط آسیب‌پذیر و بحرانی نیز مشخص شد. از طریق نقشه‌برداری‌های صورت گرفته، نقشه‌ی توپوگرافی رودخانه با مقیاس ۱/۲۰۰۰ تهیه و مورفولوژی آن از طریق نرم‌افزار AutoCAD و شاخص‌های مختلف مورفولوژی بررسی شد. از طریق تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی، نقشه‌ی سازندهای زمین‌شناسی این رودخانه نیز تهیه شد. با توجه به نقشه‌ی وضعیت فرسایش کناری ناشی از بازدیدهای صحرایی، نقشه‌ی توپوگرافی، مورفولوژی و زمین‌شناسی یک بازه به طول ۱۰ کیلومتر - که از لحاظ پیشروی فرسایش کناری، زمین‌شناسی و کاربری اراضی حاشیه‌ی رودخانه اهمیت بالایی داشت - برای متمرکز کردن مطالعات دانه‌سنجی، خصوصیات هیدرولیکی و تنش برشی تعیین شد. این قسمت علاوه بر داشتن خصوصیات لازم برای یک بازه، از نظر فرسایش کناری نیز یکی از حساس‌ترین قسمت‌های رودخانه به شمار می‌رود. در بازه‌ی انتخابی از طریق اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی و دانه‌بندی رسوبات بستر و کناره، میزان تنش برشی در هر مقطع محاسبه و پایداری و ناپایداری مقطع‌های انتخابی نیز تعیین شد.

$$s = \frac{L}{\frac{\lambda}{2}}$$

**هندس و مورفولوژی رودخانه:** به منظور درک سازوکار فرسایش کناری، وضعیت مورفولوژی رودخانه‌ی بشار با رقوم نمودن تصویر ماهواره‌ای لندست این رودخانه در نرم‌افزار ENVI مشخص شد. بعد از انجام اصلاحات لازم، خصوصیات هندسی و پارامترهای مورفولوژی رودخانه در نرم‌افزار اتوکد مشخص شد. مهم‌ترین شاخص‌های بکار رفته در این تحقیق شامل زاویه‌ی مرکزی پیمان‌رود، ضریب خمیدگی، شعاع نسبی و عرض و طول مئاندر است. برای محاسبه‌ی هر یک از شاخص‌ها، به راهنمای مطالعات مورفولوژی رودخانه‌ها مراجعه شود.

S = ضریب خمیدگی؛ L = طول موج قوس؛  $\lambda$  = طول دره قوس.

$$\theta = \frac{1800L}{R\lambda}$$

و  $\theta$  = زاویه مرکزی؛ L = طول موج قوس؛ R = شعاع انحناء قوس.

**بررسی زمین‌شناسی رودخانه:** برای بررسی وضعیت زمین‌شناسی رودخانه، نقشه‌ی زمین‌شناسی حوزه‌ی آبخیز بشار با استفاده از نقشه‌ی ۱/۴۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی تهیه شد. بعد از تهیه نقشه و رقومی کردن آن در سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، نقشه‌ی رقومی رودخانه‌ی اصلی بشار با نقشه‌ی سازنده‌های زمین‌شناسی همپوشانی و نقشه‌ی سازنده‌های زمین‌شناسی رودخانه استخراج شد.

### ۱-۲-۲- مطالعات فرسایش کناری رودخانه

برای بررسی وضعیت فرسایش کناری، در ابتدا فرم‌های وضعیت فرسایش کناری رودخانه تهیه شد. سپس رودخانه بشار با پیمایش صحرائی و دستگاه سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی، تحت پایش قرار گرفت. محل‌هایی که فرسایش کناری در آن پیشروی داشته‌است و اراضی حاشیه‌ی رودخانه مورد تهدید واقع شده‌اند، در فرم‌های مخصوص ثبت شد. در ادامه، موقعیت شریانی و نقاط بحرانی رودخانه نیز ثبت شد.

### ۲-۲-۲- محاسبه‌ی ضریب تنش برشی

برای تعیین بازه‌های فرسایش‌پذیر رودخانه، از شاخصی به نام ضریب تنش کناره استفاده شد که این شاخص با توجه به نسبت شعاع انحناء قوس‌های رودخانه به عرض آن محاسبه می‌شود. جدول زیر نحوه‌ی طبقه‌بندی ضریب تنش برشی را نشان می‌دهد.

جدول (۱) طبقه‌بندی مقادیر تنش کناره

توصیف تنش کناره	ضریب تنش کناره (Near Bank Stress)
خیلی کم	بیش از ۳
کم	۳-۲/۲
متوسط	۲/۲-۲/۰۱
بالا	۲-۱/۸۱
خیلی بالا	۱/۸-۱/۵
شدید	کمتر از ۱/۵

**انتخاب بازه‌ای از رودخانه برای مطالعات دانه‌سنجی و تنش برشی:** بعد از بررسی نقشه‌های توپوگرافی، مورفولوژی، زمین‌شناسی، فرسایش کناری و مطالعات صحرائی، بازه‌ای از رودخانه - که از لحاظ اراضی حاشیه‌ای و وضعیت فرسایش کناری اهمیت داشت - انتخاب شد.

### ۳-۲-۲- بررسی وضعیت دانه‌بندی رودخانه‌ی بشار

برای بررسی دانه‌بندی رودخانه، ابتدا بازه‌ی انتخابی به مقاطع مختلفی تقسیم شد. با توجه به تنوع مورفولوژیکی، بازه‌ی انتخابی رودخانه به هفت مقطع تقسیم شد. سپس از بخش‌های بستر و سواحل چپ و راست مقاطع رودخانه، تعدادی نمونه برداشت گردید. نمونه‌های برداشت‌شده، در آزمایشگاه تجزیه و تحلیل و دانه‌بندی رودخانه در بازه‌ی موردنظر مشخص شد.

### خصوصیات هیدرولیکی رودخانه‌ی بشار:

عمق هیدرولیکی و شعاع هیدرولیکی جریان (D): عمق هیدرولیکی و شعاع هیدرولیکی جریان در مقاطع نقشه‌برداری شده، با اندازه‌گیری ارتفاع جریان در مقاطع موردنظر و اندازه‌گیری نسبت مساحت خیس به محیط خیس شده، محاسبه شد.

ظرفیت عبور ماکزیمم در مقاطع مختلف: ظرفیت عبور ماکزیمم، برای حالتی است که سطح آب رودخانه در حد بالاترین نقطه از دیواره‌ی بستر آن قرار گیرد.

### ۲-۲-۴- بررسی تنش برشی مجاز و بحرانی کف و کناره‌ها

هنگامی که آب در بستر رودخانه جریان می‌یابد، نیرویی در جهت حرکت آب بر سطح بستر و دیواره‌ی آن اثر می‌کند که این نیرو را نیروی تنش برشی می‌نامند. برای تعیین وضعیت فرسایش‌پذیری کناره‌ها و کف میزان تنش برشی موجود، بحرانی و شاخص پایداری بستر در هر کدام از مقاطع انتخابی با استفاده از روابط زیر مشخص شد. نیروی تنش برشی بستر و کناره‌ی رودخانه از طریق فرمول‌های زیر در مقاطع مختلف محاسبه شد (Swamee and Mittal, 1976).

- تنش برشی موجود:

$$\tau' = C\gamma RS$$

$$\frac{\tau_c}{g\Delta\rho_s \left[ \frac{0.07^2}{g\Delta\rho_s} \right]^{1/3}} = 0.243 + \frac{0.06d^2}{(2600+d^2)^{1.2}}$$

- تنش برشی بحرانی:

$$\Delta\rho_s = \rho_s - \rho_w$$

در این رابطه‌ها:  $\tau$ : تنش برشی موجود؛  $\tau'$ : تنش برشی مرزی؛  $\tau_c$ : تنش برشی بحرانی ( $\frac{kg}{m^2}$ )؛ S: شیب خط انرژی؛ R: شعاع هیدرولیکی؛  $\gamma$ : وزن مخصوص آب؛  $\rho_s$ : جرم حجمی ذرات خاک ( $\frac{kg}{m^3}$ )؛  $\rho_w$ : جرم حجمی آب ( $\frac{kg}{m^3}$ )؛ d: قطر متوسط ذرات خاک (mm)؛ g: شتاب ثقل ( $\frac{m^2}{s^2}$ ) است.

- شاخص پایداری نسبی بستر (RBS)

این شاخص معادل با ذرات ریزبافت موجود در بستر بود که از سوی Buffington and Montgomery (1999) محاسبه شد و مشابه با پایداری نسبی بستری است.

Olsen و همکاران (1997)، این شاخص را نسبت بین تنش برشی بحرانی به تنش برشی کناره‌ها می‌دانند.

$$RBS = \frac{V_c}{V_b}$$

$$V_c = 0.155\sqrt{D_{50}}$$

$$V_b = 0.7V$$

در روابط بالا  $V_c$ : سرعت بحرانی؛  $V_b$ : سرعت حقیقی جریان نزدیک بستر رود و  $D_{50}$  قطر ۵۰ درصد ذرات خاک است.

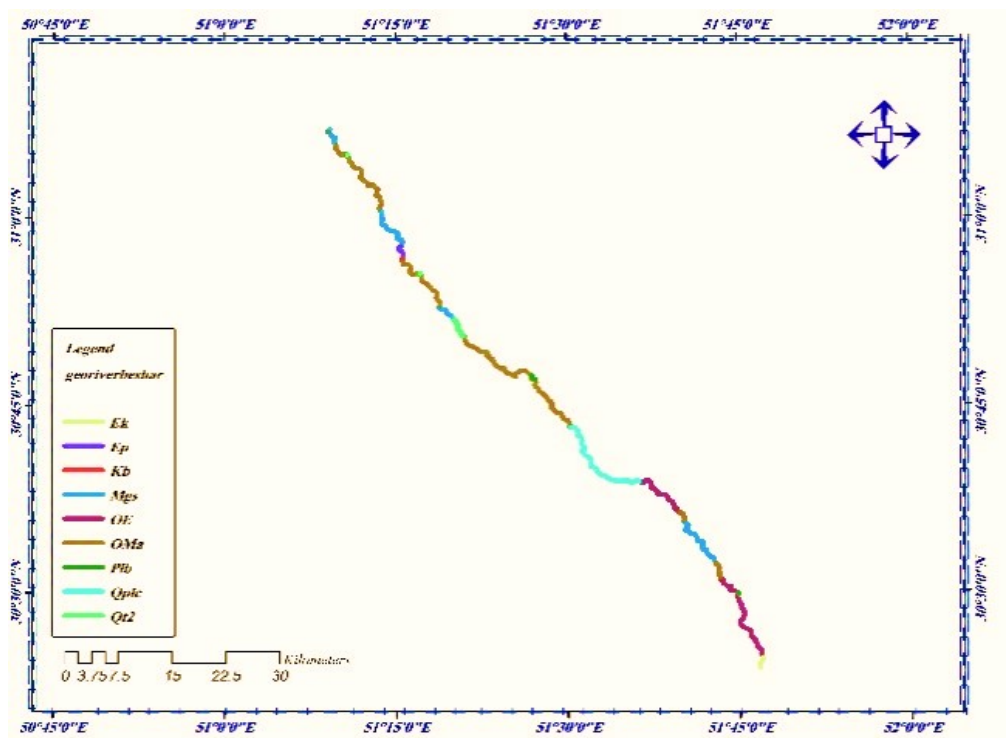
## • ضریب اطمینان

از نسبت تنش برشی بحرانی به تنش برشی موجود، ضریب اطمینان محاسبه می‌شود. هر چه این نسبت به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر پایداری و هر چه کوچک‌تر از یک باشد، بیانگر ناپایداری کناره و بستر رودخانه است.

## ۴- یافته‌ها (نتایج)

## ۴-۱- زمین‌شناسی

با توجه به اینکه سازند زمین‌شناسی، فاکتور اصلی مورفولوژی و فرسایش رودخانه‌ای است؛ در این بخش نقشه‌ی سازند زمین‌شناسی رودخانه‌ی بشار و میزان عبور بازه‌های مختلف رودخانه از هر سازند، در شکل (۳) ارائه شد. طول عبور رودخانه‌ی اصلی بشار از سازندهای زمین‌شناسی نیز در شکل (۳) ارائه شد.



شکل (۳) وضعیت زمین‌شناسی بازه‌های رودخانه‌ی بشار

رودخانه‌ی بشار از ارتفاعات شهرستان سپیدان سرچشمه می‌گیرد و از روی طبقات مارنی، شیلی و آهک مارنی سازند پابده - گورپی عبور می‌کند. مقاومت این سازند در برابر فرسایش، در حد پایین تا متوسط است؛ به همین دلیل در این محدوده، رودخانه بستر پهنه‌ی رسوبی عریض است و بار رسوبی زیادی دارد (۷-۱۴ کیلومتر). تراس‌های رودخانه، کلاً در این محدوده‌ی فرسایش‌پذیر قرار دارند. در ادامه، از پایین‌دست روستای تنگ‌سرخ تا محدود شهر یاسوج (۱۴-۴۳)، رودخانه‌ی بشار از روی طبقات سنگ آهک سازند آسماری، کنگلومرای بختیاری، طبقات تخییری و آواری مارنی - کنگلومرای سازند رازک عبور می‌کند. در این محدوده با توجه به مقاومت بالای سازندهای آهکی در برابر عوامل فرسایشی، دره‌ی ایجاد شده در آنها V شکل است و رودخانه در بستر باریکی جریان دارد. قسمتی از

رودخانه که از شهر یاسوج عبور می‌کند (۴۵-۵۵)، دیواره‌های فرسایش‌پذیر دارد که در بخشی از این محدوده، دیواره‌ی رودخانه حفاظت شده‌است. از کیلومتر (۶۵-۶۵)، رودخانه از روی پادگانه‌های آبرفتی قدیمی عبور می‌کند. با توجه به سازندهای فرسایش‌پذیر، رودخانه در این محدوده در بستر عریضی جریان دارد. از کیلومتر (۶۵-۷۶) در ادامه تا حوالی روستای دروهان که محل ورود شاخه‌ی کبکیان از ساحل چپ به رودخانه‌ی بشار است، ساحل چپ رودخانه با توجه به وجود سنگ‌های مقاوم سازند آسماری (سنگ آهک)، مقاومت زیادی در برابر فرسایش دارد و در ساحل راست به طور متناوب، واحدهای کنگلومرایی بختیاری، طبقات مارنی، سیلتی و ماسه‌ای چین نخورده‌ی دوران چهارم و طبقات مارنی آهکی سازند رازک رخنمون دارند که این بخش از مسیر، مقاومت کمتری در برابر فرسایش دارد؛ به طوری که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود، بیشترین طول رودخانه از سازند آسماری، پابده، گورپی و سازند گچساران عبور می‌کند.

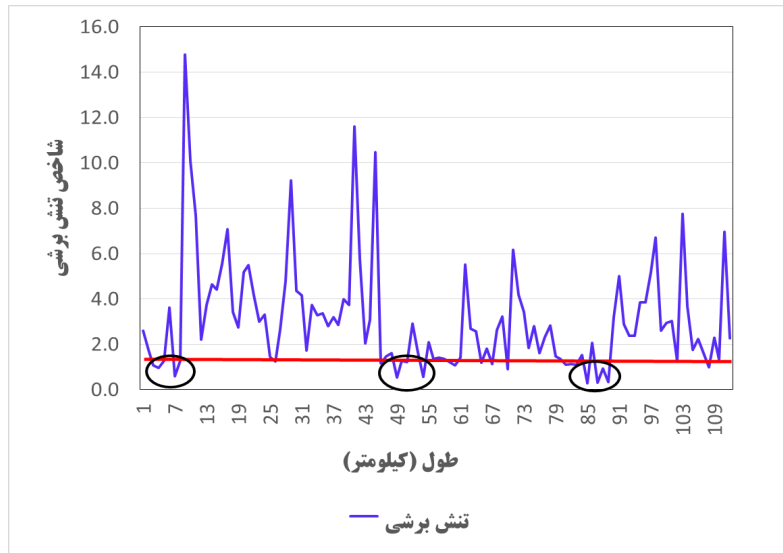
### ۲-۳- وضعیت مورفولوژی رودخانه

با بررسی‌های صورت گرفته از تصاویر ماهواره‌ای، پارامترهای مورفولوژی رودخانه‌ی بشار با توجه به شاخص‌های مختلف از جمله زاویه‌ی مرکزی مئاندر، ضریب شکل، ضریب خمیدگی، شعاع نسبی، شعاع انحناء و طول و عرض مئاندر محاسبه شد. میانگین مقادیر این پارامترها در جدول (۲) ارائه شده‌است.

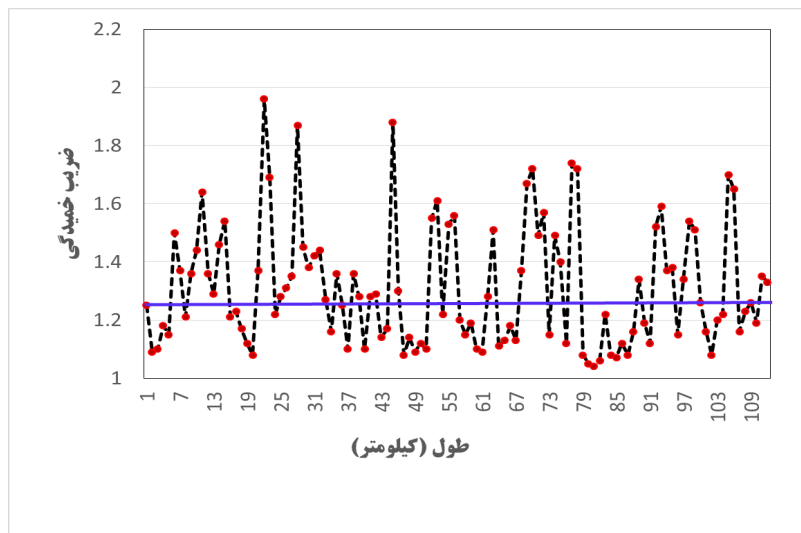
جدول (۲) مشخصات هندسی رودخانه‌ی بشار بر حسب بازه‌های فرسایشی

طول (کیلومتر)	شعاع انحنا	زاویه مرکزی مئاندر	ضریب خمیدگی	شعاع نسبی	عرض مسیر سیلابی	عرض رودخانه	سرعت میانگین	میانگین ارتفاع آب	تنش برشی	وضعیت تنش برشی
۰-۱۴	۳۰۶	۸۰/۲	۱/۲	۳/۱	۲۲	۱۶۲	۱/۶	۲/۱	۳/۱	خیلی کم
۱۴-۴۴	۱۸۵/۶	۱۰۹/۵	۱/۴	۴/۴	۵۹	۵۲	۲/۸	۴	۴/۴	خیلی کم
۴۴-۵۵	۲۰۶/۵	۷۳	۱/۲	۱/۵	۳۰۰	۱۸۴	۱/۴	۳/۱	۱/۵	شدید
۵۵-۸۲	۲۲۶/۲	۱۰۲/۴	۱/۴	۲/۷	۱۴۳	۱۰۸	۲/۱	۳/۵	۲/۷	کم
۸۲-۹۲	۱۸۰/۳	۸۱/۲	۱/۲	۱/۵	۱۵۴	۱۵۱	۲	۳/۲	۱/۴	شدید
۹۲-۱۰۴	۳۵۱/۱	۸۷/۴	۱/۳	۲/۲	۲۷۶	۲۰۷	۲	۲/۸	۲/۲	متوسط
۱۰۴-۱۲۹	۳۵۸	۱۰۷/۳	۱/۳	۳/۵	۱۶۷	۱۳۰	۲/۶	۴	۳/۵	خیلی کم





شکل (۴) نمودار ضریب تنش برشی در طول مسیر رودخانه‌ی بشار

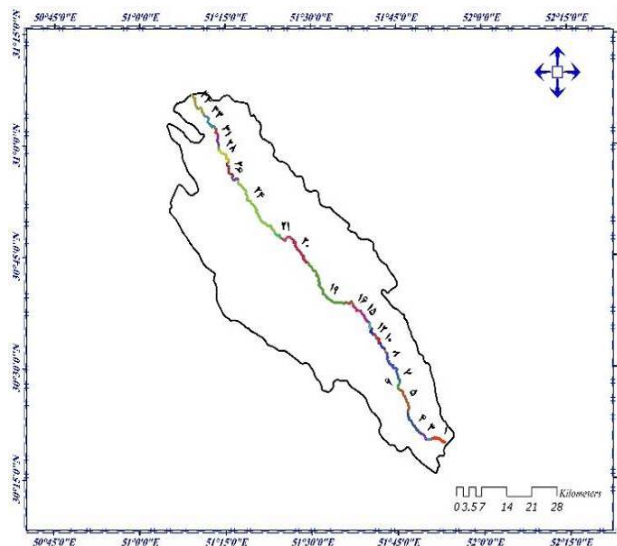


شکل (۵) نمودار ضریب خمیدگی در طول مسیر رودخانه‌ی بشار

به گونه‌ای که در شکل (۴) قابل مشاهده است، ضریب تنش کناره در بازه‌های ۴۴-۵۵ و ۸۲-۹۲ دارای بیشترین میزان است که نشان می‌دهد در این بخش‌ها، حساسیت به فرسایش بالا است. میزان ضریب خمیدگی در این بازه‌ها، به صورت پیچان رودی است؛ البته حداکثر ضریب خمیدگی در بازه‌های ۱۴-۴۳ رودخانه و ۵۵-۸۲ است (شکل ۵) که وسعت قوس رودخانه را نشان می‌دهد. با بازدیدهای صورت گرفته از مسیر رودخانه، مشخص شد که این بازه‌ها با توجه به سازند آسماری مقاوم به فرسایش و وضعیت اراضی کوهستانی اطراف، خطر فرسایش کناری در آن کمتر بوده و رودخانه از مرفولوژی دره‌ی رودخانه تبعیت کرده است. در بازه‌ی ۴۴-۵۵، رودخانه از شهر یاسوج می‌گذرد که با توجه به اراضی که در حاشیه‌ی رودخانه ارزش بالایی دارد، در بخشی از قسمت‌ها حفاظت شده است؛ ولی در بازه‌ی ۸۲-۹۲، رودخانه در ساحل راست به سمت جاده به شدت پیشروی دارد و اراضی کشاورزی (برنج‌کاری) اطراف را نیز به شدت تهدید کرده است.

### ۳-۳- فرسایش کناری رودخانه‌ی بشار

از طریق پیمایش صحرائی و تکمیل فرم‌های مربوط به وضعیت فرسایش رودخانه و اراضی حاشیه، با دستگاه سامانه‌ی موقعیت‌یاب جهانی تحت پایش قرار گرفت. در شکل (۷)، وضعیت فرسایشی بازه‌های رودخانه‌ها ارائه شده است. قسمتی از بازه‌ی رودخانه - که در کیلومترهای ۷-۱۵، ۴۴-۶۵ و ۷۸-۹۰ واقع شده‌اند - از لحاظ فرسایشی حساس هستند و به اقدامات مدیریتی نیاز دارند.



شکل (۶) بخش‌های مختلف رودخانه از لحاظ حساسیت به فرسایش

در بعضی از قسمت‌های رودخانه مانند بخش ۱۹ (شکل ۶)، عرض رودخانه به بیش از ۴۰۰ متر هم می‌رسد. معمولاً در جاهایی از رودخانه مانند بخش ۲۴ (شکل ۶) که نسبت عمق به عرض رودخانه افزایش می‌یابد، اگر مسیر رودخانه در کنار تراس‌های آبرفتی قرار گرفته باشد، در چنین مواردی با فرسایش شدید کناری روبرو هستیم و علت آن نیز افزایش انرژی آب است.

### ۳-۴- خصوصیات هیدرولیکی رودخانه‌ی بشار

مقادیر شیب، سرعت جریان، ظرفیت عبور ماکزیمم و تنش برشی در مقاطع مختلف عرضی در بازه‌ی مورد مطالعه‌ی رودخانه، در جداول (۳، ۴ و ۵) به ترتیب برای ساحل شرقی، غربی و بستر بازه‌ی انتخابی ارائه شده‌است.

جدول (۳) نتایج میزان تنش برشی متوسط و مجاز در ساحل شرقی رودخانه‌ی بشار

شماره مقطع	شعاع هیدرولیکی جریان	عمق هیدرولیکی جریان	D <sub>50</sub> mm	سرعت متوسط جریان	ماکزیمم ظرفیت عبور جریان	تنش برشی موجود	تنش برشی کناره	تنش برشی بحرانی	ضریب اطمینان	RBS شاخص پایداری نسبی بستر
۱	۲/۲	۵/۳۶	۸	۱/۳۴	۱۶۷۲/۳	۸۶/۳۲	۶۵/۶۰	۷/۹۱	۰/۱۲	۰/۴۶
۲	۱/۸۵	۱/۶۹	۱۸	۱/۲	۳۲۵	۹۰/۷۴	۶۸/۹۶	۱۸/۱۸	۰/۲۶	۰/۷۸
۳	۲/۳۵	۲/۹	۱۴	۱/۴	۸۹۴/۷	۹۲/۲۱	۷۰/۰۸	۱۴/۱۰	۰/۲۰	۰/۵۹
۵	۱/۶	۱/۵۷	۰/۱۷	۱/۰۸	۴۸۹	۶۲/۷۸	۴۷/۷۱	۰/۱۷	۰/۰۰۳	۰/۰۹۱
۵	۱/۶	۱/۵۷	۵/۳	۱/۰۸	۴۸۹	۶۲/۷۸	۴۷/۷۱	۵/۰۵	۰/۱۰	۰/۴۷
۷	۲/۴	۱/۳۹	۵/۵	۱/۷	۳۲۷/۶	۹۴/۱۷	۷۱/۵۷	۵/۲۷	۰/۰۷	۰/۳۰
-	۲	۲/۴۱	۸/۴۹	۱/۳	۶۹۹	۸۱/۵	۶۱/۹۳	۸/۵۵	۰/۱۴	۰/۵۸

جدول (۴) نتایج میزان تنش برشی متوسط و مجاز در ساحل غربی رودخانه بشار

شماره مقطع	شعاع هیدرولیکی جریان	عمق هیدرولیکی جریان	D <sub>50</sub> mm	سرعت متوسط جریان	ماکزیمم ظرفیت عبور جریان	تنش برشی موجود	تنش برشی کناره	تنش برشی بحرانی	ضریب اطمینان	RBS شاخص پایداری نسبی بستر
۳	۲/۳۵	۲/۹	۱۴	۱/۴	۸۹۴/۷	۹۲/۲۱	۷۰/۰۸	۱۴/۱۰	۰/۲۰	۰/۲۰
۴	۱/۵	۵/۳	۸/۵	۱/۰۴	۱۷۲۱/۲	۷۳/۵۷	۵۵/۹۱	۸/۴۳	۰/۱۵	۰/۱۵
۴	۱/۵	۵/۳	۲۰	۱/۰۴	۱۷۲۱/۲	۵۸/۸۶	۴۴/۷۳	۲۰/۲۲	۰/۴۵	۰/۲۴
۶	۳/۱	۱/۱۸	۱۷	۱/۷	۲۸۱/۵	۱۲۱/۶۴	۹۲/۴۴	۱۷/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۳
۶	۳/۱	۱/۱۸	۲۶	۱/۷	۲۸۱/۵	۱۲۱/۶۴	۹۲/۴۴	۲۶/۳۱	۰/۲۸	۰/۱۶
۷	۲/۴	۱/۳۹	۱۱	۱/۷	۳۲۷/۶	۹۴/۱۷	۷۱/۵۷	۱۱/۰۲	۰/۱۵	۰/۱۰
۷	۲/۴	۱/۳۹	۷	۱/۷	۳۲۷/۶	۱۱۳/۴۱	۶۸/۱۹	۶/۸۶	۰/۱۰	۰/۰۸
-	۲/۳۳	۲/۶۶	۱۴/۷۸	۱/۴۶	۷۹۳/۶۱	۹۶/۵	۷۰/۷۶	۱۴/۸۷	۰/۲۱	۰/۱۵

جدول (۵) نتایج میزان تنش برشی متوسط و مجاز بستر رودخانه‌ی بشار

شماره مقطع	شعاع هیدرولیکی جریان	عمق هیدرولیکی جریان	D <sub>50</sub> mm	سرعت متوسط جریان	ماکزیمم ظرفیت عبور جریان	تنش برشی موجود	تنش برشی بحرانی	ضریب اطمینان	RBS شاخص پایداری نسبی بستر
۱	۲/۲	۵/۳۶	۱۲/۵	۱/۳۴	۱۶۷۲/۳	۸۶/۳۲	۱۲/۵۶	۰/۱۴	۰/۵۸
۲	۱/۸۵	۱/۶۹	۱۰	۱/۲	۳۲۵	۹۰/۷۴	۹/۹۹	۰/۱۱	۰/۵۸
۳	۲/۳۵	۲/۹	۱۸	۱/۴	۸۹۴/۷	۹۲/۲۱	۱۸/۱۸	۰/۱۹	۰/۶۷
۴	۱/۵	۵/۳	۲۰	۱/۰۴	۱۷۲۱/۲	۵۸/۸۶	۲۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۹۵
۵	۱/۶	۱/۵۷	۲۴	۱/۰۸	۴۸۹	۶۲/۷۸	۲۴/۲۸	۰/۳۸	۱/۰۰۴
-	۱/۸۹	۳/۳۶	۱۶/۹	۱/۲	۱۰۲۰/۴۴	۷۸/۱۸	۱۷/۰۴	۰/۲۱	۰/۷۵

نتایج نشان می‌دهد نیروی تنش برشی محاسبه شده برای مقاطع عرضی ساحل شرقی در بازه‌ی رودخانه، بیش از حد مجاز است؛ به طوری که میانگین تنش برشی وارده بر جداره‌ی شرقی و غربی به ترتیب برابر با  $8/55$  و  $14/87 \text{ kg/m}^2$  می‌باشد. میانگین تنش برشی مجاز جداره‌ی شرقی و غربی به ترتیب برابر با  $61/93 \text{ kg/m}^2$  و  $70/76$  است؛ بنابراین، میانگین تنش برشی مجاز جداره کمتر از میانگین تنش برشی وارده است. همچنین میانگین تنش برشی کف رودخانه، برابر است با  $17/04 \text{ kg/m}^2$  و میانگین تنش برشی مجاز کف رودخانه، برابر است با  $78/17 \text{ kg/m}^2$ . بنابراین، میانگین تنش برشی مجاز کف نیز کمتر از میانگین تنش برشی وارده بر بستر است. این وضعیت نشان می‌دهد که نیروهای تنش برشی نیز در ایجاد فرسایش کف در کناره‌های رودخانه نقش زیادی دارد. در زمینه‌ی شاخص پایداری بستر، هر چه مقدار این شاخص بزرگ‌تر از یک باشد، بیانگر پایداری بستر و هر قدر کوچک‌تر از یک باشد، فاقد پایداری بستر است. با توجه به نتیجه‌ی جدول‌های (۳، ۴ و ۵) می‌توان نتیجه گرفت که در همه‌ی مقاطع نمونه‌برداری شده به جز مقطع ۱۳، بستر ناپایدار است.

**وضعیت خاک‌شناسی تراس‌های آبرفتی کنار رودخانه:** از طریق نمونه‌برداری از خاک تراس‌های آبرفتی کنار رودخانه و اجرای آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی بر روی آنها، وضعیت خاک‌شناسی در اراضی حاشیه‌ی رودخانه مشخص شد (جدول ۶).

جدول (۶) مشخصات بافت خاک در تراس‌های آبرفتی کنار رودخانه

نوع بافت خاک	Sand%	Silt%	Clay%	مشخصات نمونه
شنی لومی	۵۶	۳۰	۱۴	۱
لومی	۳۲	۴۵	۲۳	۲
لومی‌شنی	۸۳	۷	۱۰	۳
شنی رسی لومی	۵۰	۲۹	۲۱	۴
سیلتی رسی	۲۵	۴۵	۳۰	۵
رسی لومی	۲۴	۴۰	۳۶	۶

وضعیت کنونی تراس‌های کناری بازه‌ی انتخابی به دلیل بافت درشت‌دانه و خاک شنی آنها است؛ زیرا آب حاصل از آبیاری مزارع در این تراس‌ها با توجه به بافت خاک، طی یک شیب هیدرولیکی به سمت کناره‌های فرسایش‌یافته‌ی رودخانه حرکت می‌کند و به سنگین‌تر شدن و در نتیجه ریزش توده‌ای دیوارهای عمودی و ناپایدار رودخانه منجر می‌شود.

##### ۵- بحث و نتیجه‌گیری

رودخانه‌ی بشار از لحاظ مورفولوژی، عمدتاً رودخانه‌ای نیمه جوان و کوهستانی است. تراس‌ها و پادگانه‌های آبرفتی اطراف رودخانه‌ی بشار از فرسایش بستر حکایت می‌کند و این رودخانه هنوز به بستر تعادل خود نرسیده‌است. مسیر رودخانه از نظر مورفولوژی، عمدتاً از نوع پیچان‌رودی است. در طول مسیر نیز بستر این رودخانه بسیار عریض شده و به‌صورت شاخه‌شاخه درآمده‌است (کیلومترهای ۳-۱۴ و ۴۴-۵۵ و ۸۲-۹۲). بررسی وضعیت رودخانه‌ی بشار با توجه به

پارامتر ضریب خمیدگی هر قوس نشان داد، در بازه‌هایی که مقادیر ضریب خمیدگی قوس‌های رودخانه حدود ۱/۴ و بیشتر است (کیلومترهای ۴۳-۱۴ و ۵۵-۸۲)، بیشتر از مرفولوژی دره تبعیت می‌کند تا اینکه نیروی آب به ایجاد فرسایش و پیشروی رودخانه منجر شده باشد. با توجه به بررسی‌های صحرایی، قوس‌های بازه ۱۴-۴۳ بیشتر از مرفولوژی طبیعی منطقه تبعیت می‌کند و میزان پیشروی رودخانه به سبب وضعیت مقاوم به فرسایش سازند آسماری منطقه، ناچیز است. همچنین اراضی اطراف این بازه نیز بیشتر کوهستانی و غیر زراعی است، ولی در بازه‌ی ۸۲-۹۲ ضریب خمیدگی تا مرز پیچان رود پیش رفته‌است (۱/۲)، حتی در کیلومترهای ابتدایی این بازه (۸۴-۸۲)، دو قوس با ضریب خمیدگی بیش از ۱/۷ نیز مشاهده شده که نتیجه‌ی فرسایش ناشی از تنش برشی آب است (جدول ۲). پادگانه‌های آبرفتی که بر روی سازند آسماری این بازه واقع شده‌اند، به فرسایش شدید این پادگانه‌های دوران چهارم انجامیده و اراضی زراعی برنج-کاری را که بر روی این پادگانه کشت شده، تهدید کرده‌است. پیش‌بینی می‌شود در آینده نوع و جهت تغییرات شکل رودخانه در این بازه، بیش از دیگر بازه‌ها باشد. در نتیجه، به نظر می‌رسد که این بازه‌ها در طرح‌های کنترل سیلاب در اولویت قرار داشته باشند.

به طور کلی، مکانیسم فرسایش کناری رودخانه در قسمت‌های مختلف با هم فرق دارد. در قوس‌های خارجی رودخانه، جریان حلزونی بیشترین تأثیر را داشته و این جریان، عامل اصلی تخریب دیواره‌ی رودخانه در قوس‌های خارجی است. در بعضی از قسمت‌های رودخانه که دارای مسیر مستقیم است در اثر یک شیب عرضی، جریان رودخانه به یک طرف بستر متمایل و سبب می‌شود جریان تالوگ، متمایل به دیواره حرکت کند و به ایجاد فرسایش کناری منجر شود. در بعضی از بازه‌های دیگر، جریان متناوب سیلاب باعث فرسایش کناری و ریزش دیواره‌ها به صورت توده‌ای شده‌است. در مواقع سیلابی همراه با بالا آمدن سطح آب در این قسمت‌ها، کناره‌های حساس به فرسایش که عمدتاً تراس‌های آبرفتی حاشیه‌ی رودخانه است، اشباع می‌شود و مقادیر زیادی از این کناره‌ها فرسایش می‌یابد و به صورت رسوبات معلق و کف از دسترس خارج می‌شود. بخش‌هایی از کناره‌های اشباع شده که فرسایش نیافته‌اند با فرونشست سیلاب، آب نفوذ کرده در داخل توده‌های کناری تحت یک شیب هیدرولیکی، مجدداً به داخل رودخانه برمی‌گردد و طی این عمل، ذرات ریز و چسبنده‌ی سیلتی و رسی را به همراه خود از توده خارج می‌کند. همین امر سبب می‌شود سیلاب بعدی، خیلی سریع این توده‌ی فاقد ذرات ریز را مورد فرسایش قرار دهد. در این زمینه Amini (1991) نتایج مشابهی را گزارش داده‌اند. با توجه به نتایج مورفولوژی رودخانه در بازه‌های سوم (۴۴-۵۵) و پنجم (۹۲-۸۲)، ضریب تنش کناره که دارای بیشترین میزان است، تنش برشی است. در این باره Ipen and Dinerker (1965) به نقل از Ghaffari و همکاران (2006)، در گزارش مشابهی نشان دادند با افزایش شعاع انحنا پیچ، تنش برشی نیز افزایش می‌یابد و حداکثر تنش برشی نیز در تندترین قسمت هر پیچ اتفاق می‌افتد.

یکی از عوامل اصلی مؤثر در فرسایش کناری رودخانه، جنس سازنده‌های زمین‌شناسی است. به طور کلی، جنس سازنده‌های بخشی از حوزه که مسیر گذر رودخانه را تشکیل می‌دهد، تأثیر بسیار زیادی در فرسایش کناری رودخانه دارد. رودخانه‌ی بشار در طول مسیر خود از سازنده‌های آسماری، آسماری-جهرم، گچساران، رازک، پابده-گورپی و بختیاری عبور می‌کند. مقاومت این سازنده‌ها در مقابل فرسایش کناری متفاوت است و این اختلاف مقاومت، نقش و تأثیر سازنده‌های زمین‌شناسی را در فرسایش کناری رودخانه بیشتر مشخص می‌کند؛ به طوری که تلفیق نقشه‌ی فرسایش

کناری با نقشه‌ی زمین‌شناسی، بیانگر این مسئله است که در طول مسیر رودخانه هر جا آهک‌های آسماری و دولومیت‌های جهرم چه به صورت مجزا و چه به صورت واحد آسماری- جهرم برون‌زده دارند، فرسایش کناری رودخانه را نخواهیم داشت و عرض بستر رودخانه حداقل است. این خود بیانگر مقاومت زیاد این سازندها در مقابل فرسایش است. اگرچه حالت پیچان‌رودی رودخانه ممکن است باعث فرسایش کناری شود، در مسیرهایی که سازندهای مقاوم آسماری قرار گرفته‌اند، حتی اگر رودخانه حالت پیچان‌رودی نیز داشته باشد؛ مانند بخش‌های شماره‌ی ۱۵، ۲۹ و ۳۱ (شکل ۶)، به علت مقاومت این سازند فرسایش کناری نخواهیم داشت، یا در مسیرهای مستقیم رودخانه هر چند که سازندهای حساس به فرسایش وجود داشته باشد، به مقدار کمی فرسایش کناری مشاهده می‌شود. قسمت‌های حساس به فرسایش کناری در جاهایی واقع شده‌است که یا دیواره‌ی کناری را سازند جوان کواترنر با لایه‌های ضخیم رسی تشکیل داده‌است؛ مانند بخش‌های ۱۳، ۱۷، ۲۴ و ۲۲ (شکل ۶)، یا اینکه دیواره‌ی بستر رودخانه، محدود به دامنه‌هایی متشکل از مواد مارنی و شیلی واحد پابده - گورپی است و به همین دلیل می‌تواند مستعد فرسایش باشد (بخش ۶ شکل ۶). یمانی و شرفی در پژوهشی که در رودخانه هررود انجام داده‌اند، نتایج مشابهی ارائه کرده‌اند. آنها مقطعی از رودخانه هررود را - که جنس رسوبات بستر و کناره و دره‌ای که رودخانه در آن جریان دارد از نوع آبرفت، کنگولومرا و شیل است - فرسایش‌پذیر گزارش نمودند. عبور رودخانه از سازند کواترنر با لایه‌های ضخیم رسی و ماسه‌ای همراه با سازند مارنی گچساران، سنگ کف رودخانه با فرسایش شدید کناری مواجه است (بخش ۲۴ شکل ۶).

تأثیر تنش برشی بر مقاطع عرضی بازه‌ی رودخانه که در جداول (۵ و ۶) ارائه شده‌است، نشان می‌دهد که نیروی تنش برشی وارده به رسوبات کف و جداره‌ی رودخانه، بیش از حد مجاز است. نتایج نشان می‌دهد نیروی تنش برشی محاسبه شده برای مقاطع عرضی ساحل شرقی، غربی و بستر بازه‌ی رودخانه، بیش از حد مجاز است. همچنین میزان شاخص پایداری بستر در اکثر مقاطع کمتر از یک است؛ این امر از ناپایداری بازه‌ی مورد مطالعه حکایت می‌کند. در این زمینه Ghaffari و همکاران (2006) به نتایج مشابهی در رودخانه‌ی بابل رود دست یافتند. معمولاً مقدار تنش برشی در دیواره‌ها، کمتر از مجرای اصلی است. هم‌چنین در سمت خارجی پیچ‌ها و نواحی مئاندری رودخانه، مقدار تنش افزایش می‌یابد و میزان فرسایش کناری بالا می‌رود که با نتایج تحقیق Ghaffari و همکاران (2006) کاملاً مطابقت دارد. این وضعیت بیانگر این است که نیروهای تنش برشی نیز در ایجاد فرسایش کف و کناره‌های رودخانه نقش زیادی دارد. در زمینه‌ی شاخص پایداری بستر، هر چه مقدار این شاخص بزرگ‌تر از یک باشد، بیانگر پایداری بستر است و هر قدر کوچک‌تر از یک باشد، بیانگر فقدان پایداری در بستر است. در این زمینه نیز Rezaei Moghadam و همکاران (2011) به نتایج مشابهی رسیدند. آنها شاخص فرسایش‌پذیری زیاد و مقاومت برشی کم را از عوامل ناپایداری بازه‌ی مورد مطالعه در رودخانه‌ی قزل اوزن ذکر نموده‌اند. با توجه به نتایج جداول (۳، ۴ و ۵) می‌توان نتیجه گرفت که در همه‌ی مقاطع نمونه‌برداری شده به جز مقطع ۱۳، بستر ناپایدار است. البته باید این نکته را اضافه کرد که روش‌های تجربی مورد استفاده در این تحقیق، برای بررسی پایداری و محاسبه‌ی تنش برشی در رودخانه‌های آبرفتی صدق می‌کند و در رودخانه‌های با بستر سنگی مقاوم، با خطا مواجه است. با توجه به نتایج مطالعات هندسی، هیدرولیکی، زمین‌شناسی، فرسایش کناری، کاربری اراضی حاشیه‌ی رودخانه، وضعیت معادن برداشت شن و ماسه و

تنش برشی می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که رودخانه در بازه‌هایی که از پادگانه‌های آبرفتی عبور می‌کند، در حالت ناپایداری قرار می‌گیرد.

با توجه به شریانی بودن وضعیت بازه‌ی انتخابی، جزایر رسوبی و عرض رودخانه در این بازه پیوسته در حال تغییر و تحول است (۹۲-۸۲). بنابراین می‌توان بازه‌ی اول (۰-۱۴ km) را - که ترکیبی از شکل شریانی و پیچان‌رودی در بستر آبرفتی است - به عنوان بازه‌ی ناپایدار و بازه‌های دوم (۴۳-۱۴ km) را پایدار، بازه‌ی سوم (۴۴-۵۵ km) ناپایدار، بازه‌ی چهارم را - که رودخانه به وسیله‌ی سنگ بستر و کناره‌ها محدود شده‌است - به عنوان بازه‌ی کم و بیش پایدار، بازه‌ی پنجم (۹۲-۱۰۴ km) تا حدودی ناپایدار و بازه‌ی (۱۰۴ تا ۱۲۹ km) را بازه‌ی پایدار معرفی کرد. تغییرات احتمالی صورت گرفته در آینده، در بازه‌های شریانی بیشتر خواهد بود. با توجه به اینکه عمده‌ی زمین‌های کشاورزی در این بازه‌ها است، هرگونه تغییر در مؤلفه‌های ریخت‌شناسی، سبب به هم خوردن تعادل پویایی می‌شود و واکنش مورفودینامیک محیط، به صورت تعرض آب بر زمین‌های کشاورزی اطراف سواحل رودخانه و فرسایش بسیار شدید خواهد بود (رضایی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۱).

#### منابع

1. Asghari Saraskanroud, S., & B. Zeinali., (2013). Investigation Resistance of Sediment Particle to Erosion in Saraskanchai River by use of Mathematical Methods. *Scientific - Research Quarterly on Environmental Erosion Researches*. 7, 1-12. (In Persian).
2. Batalla, R. J.; Gomez, C. M.; & G. M. Kondolf, 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain), *Journal of Hydrology*, (290), 117-136.
3. Belmont, P.; Gran, K. B.; Schottler, S. P.; Wilcock, P. R.; Day, S. S.; Jennings, C.; Lauer, J. W.; Viparelli, E.; Willenbring, J. K.; Engstrom, D. R.; & G. Parker, 2011. Large shift in source of fine sediment in the Upper Mississippi River, *Environmental Science and Technology*, (45), 8804-8810.
4. Grimshaw, D. L., & J. Lewin., (1980). Source identification of suspended solids, *Journal of Hydrology*, (42), 151-162.
5. Hafezi Moghadas, N.; Sileuci H. R.; Jalilund, R.; & J. Rahnama Rad, 2012. *Geomorphology study of Sistan River*, (1), 1-18 (in Persian)
6. Hossain M. A.; Gan Thian, Y.; & A. B. M. Baki, 2013. Assessing morphological changes of the Ganges River using satellite images, *Quaternary International*, (304), 145-155.
7. Kankara, R. S.; Chenthamil Selvan, S.; Markose, V. J.; Rajan, B.; & S. Arockiaraj, 2015. Estimation of long and short term shoreline changes along andhra pradesh coast using remote sensing and gis techniques, *Procedia engineering*, 116, 855-862.
8. Kessler, A. C.; Gupta, S. C.; & M. K. Brown, 2013, Assessment of river bank erosion in Southern Minnesota rivers post European settlement, *Geomorphology*, 201, 312-322.
9. Kessler, A. C.; Gupta Satish, C.; & K. Brown Melinda, 2013. Assessment of riverbank erosion in Southern Minnesota Rivers post European settlement, *Geomorphology*, (201), 12-322.
10. Nohegar, A., & F. Mahmoudi., (2006). Study of the effects of aggregate harvesting (sand and sand) on the shape of bed and river Minab River, *geographic research*, 15, 5. (In Persian).
11. Prosser, I. P.; Rutherford, I. D.; Olley, J. M.; Young, W. J.; Wallbrink, P. J.; & C. J. Moran, 2001. Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia, *Marine and Freshwater Research*, (52), 81-99.
12. Rezaei Moghadam., Sarvati.; M. H. M. R., & S. Asghari Sareskanroud., 2012. Investigation of geometric alterations of Gezel Ozan River considering Geomorphologic and Geologic parameters, *Geography and Environmental Planning Journal 23rd Year*, 46, 2. (In Persian)
13. Shayan., Q. & E. rural. (2012). Analysis of factors influencing geometric and morphological changes in the river of Kashkan. *Geographic research*. 57, 61-71. (In Persian)

14. Simon, A., & A. J. C. Collison., (2002). Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms*. (27), 527–546.
15. Surian, N., & M. Rinaldi., (2003). Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*. (50), 307–326.
16. Swamee, P. K., & M. K. Mittal., (1976). An explicit equation for critical shear stress in alluvial streams, *Irrigation and Power*, 33 (2), 237-239.
17. Thoma, D. P.; Gupta, S. C.; Bauer, M. E.; & C. E. Kirchoff, 2005. Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment, *Remote Sensing of Environment*, (95), 493–501.
18. Vanacker, V.; Molina, A.; Govers, G.; Poesen, J.; Dercon, G.; & S. Deckers, 2005. River channel response to short-term human-induced change in landscape connectivity in Andean ecosystems, *Geomorphology*, (72), 340–353.
19. Wellmeyer, J. L.; Slattery, M. C.; & J. D. Phillips, 2005. Quantifying downstream impacts of impoundment on flow regime and channel planform lower Trinity River, Texas, *Geomorphology*, (69), 1–13.
20. Yamani. M., & S. Sharafi., (2012). Geomorphology and effective factors on lateral erosion in Hor Rood River, Lorestan province, *Geography and Environmental Planning Journal 23rd Year*, 45, 1.
21. Zhengyi, Y.; Wanquan, T.; Xiaopeng, J.; & X. Jianhua, 2011. Bank erosion and accretion along the Ningxia–Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008, *Geomorphology*, (127), 99–106.



# Investigating the Banks Sensitive to Erosion with an Emphasis on Geological, Geometric, and Hydraulic Characteristics: A Case Study of Bashar River

Khazaei, M., Ph.D\*. Watershed Management, Hormozgan University

Nohegar, A., Faculty of Environment, University of Tehran

Mahdavei, R, Faculty of Agricultural & Natural Resources, Hormozgan University

Telvvari, A.R, Science and Research Branch Islamic Azad University (Ahwaz Branch)

**Article History (Received: 08.12.2015**

**Accepted: 18.07.2017)**

## Extended abstract

### 1- Introduction

The vital need for river management is understood and predicts bank erosion processes. River bank erosion is one of the sediment major sources for many rivers across the world. Bank erosion is a key process in fluvial dynamics, affecting a wide range of physical, ecological and socio-economic issues in the fluvial environment. These include the establishment and evolution of river and floodplain morphology and their associated habitats, turbidity problems, sediment, nutrient and contaminant dynamics, loss of riparian lands, and associated threats to flood defense and transportation infrastructure. Moreover, recent studies have shown that the contribution of bank-derived sediments to catchment sediment budgets may be higher than what previously thought. The study of the factors influencing Bank Geomorphology and Erosion requires basic information on geological, hydraulic and geometric characteristics. Therefore, the main aim of this paper is to study the stream banks susceptible to bank erosion in Bashar River.

### 2- Methodology

#### 2-1- Geometry and Morphology of Beshar River

In order to understand the mechanism of the lateral erosion, the morphology of the Bashar River was identified through digitizing the Landsat satellite image in the ENVI software. After making necessary corrections, the geometric properties and the river morphological parameters were determined in the AutoCAD software. The most important indicators used in this study included the central angle of the grunge, the bending coefficient, relative radius and Meandander width and length. To calculate each of the indicators, refer to the guide for river morphological studies.

#### 2-2-Geology of Beshar River:

In order to study the geological condition of the Beshar river, the geology map of Bashar watershed was prepared using a map of 1/400,000 Geological organization; then the map of Bashar's main river was overlapped with the geological formations map and the geological map of the river was extracted.

#### 2-3- Shear Stress

The reach of Beshar river with a length of 10-km was selected and the hydraulic, morphologic and geologic characteristics were studied. Then, the critical shear stress was computed using the empirical relations based on the soil parameters.

##### 2-3-1- Near-Bank Shear Stress

In order to determine the erosion reaches of Beshar river, shear stress coefficient was used which was calculated according to the ratio of the curvature radius to the river's width.

##### 2-3-2-Total Shear Stress

Shear Stress ( $\tau$ ) is a measure of the force of friction from a fluid acting on a body in the path of that fluid. In the case of open channel flow, it is the force of moving water against the bed of the channel. Shear stress is calculated as:

$$\tau' = C\gamma RS$$

### 2-3-2- Critical Shear Stress

$$\frac{\tau_c}{g\Delta\rho_s \left[ \frac{\rho_s \gamma^2}{g\Delta\rho_s} \right]^{1/2}} = 0.243 + \frac{0.06d^2}{(3600+d^2)^{1/2}}$$

$$\Delta\rho_s = \rho_s - \rho_w$$

$$\tau_c = 0.1598 \left( \frac{0.432d^2}{1 + 0.183d^2} \right)^{1/2}$$

### 2-3-3-Relative Bed Stability Index

$$RBS = \frac{V_c}{V_b}$$

$$V_c = 0.155\sqrt{D_{50}}$$

$$V_b = 0.7 V$$

## 3- Results

The results showed that Beshar river has more than 100 large and small meander. Curvature coefficient in reach located in the kilometers of 7-14 and 75-85, is equal to 1.4. Critical shear stress index indicated that the reach of Beshar river located in 10km is instable ( $\tau_c > \tau$  and  $RBS < 1$  and  $FS < 1$ ). The results showed that the shear stresses calculated for the east, west and bed cross-sections are instable (factor safety  $< 1$ ). Also, the rate of bed stability index is less than one in most sections. The results indicated that the shear stresses calculated for the cross sections are more than threshold amount. The average shear stress on the eastern and western banks are 8.85 and 14.87 kg / m<sup>2</sup>, respectively Whereas Permissible shear stresses average in the eastern and western banks are 61.93 and 61.76 kg / m<sup>2</sup>, respectively. Therefore, shear stress average of the river bank is less than the Permissible shear stress average. Also, the shear stress average of the river bed is equal to 17.44 kg / m<sup>2</sup> and the bed Permissible shear stress mean of river bed is 78.17 kg / m<sup>2</sup>. Therefore, the average shear stress tolerance is lower than the shear stress average on the bed.

## 4- Discussion and Conclusions

Results indicated that the reach of Beshar River, crossing the silt formations, has a high level of sensitivity to erosion bank. More than 50 km of the Beshar River crosses Asmari formation. The long length of Beshar River contains alluvial sediments, which is located on Asmari formation. The effect of shear stress on the cross-sections of Beshar River indicated that the shear stresses on the riverbed and bank are more than the Permissible shear stress. Also, the bed stability index is less than one, which indicates the instability of Beshar

River in the selected reach, which is in line with the findings of Ghaffari et al (2006), who reached similar results in terms of Babol River. On the outer side, the amount of shear stress in the river bank is less than the main channel, so that in the river meanders, the amount of shear stress and the amount of bank erosion increased.

**Key Words:** Bashar River Erosion, Morphology, Safety Factor, Sheer stress.