

ارزیابی میزان پایداری و ناپایداری کناره و بستر رودخانه‌ی مسیل‌موچان

(شهرستان آستانه - استان مرکزی)

پروین غلامی*: کارشناسی‌ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی علوم‌زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

محمد مهدی حسین‌زاده: دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده‌ی علوم‌زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۵)

چکیده

فرسایش بستر و کناره، تغییرات کانال رود و در نهایت آسیب‌پذیری کانال، مسئله‌ای اجتماعی، محیطی و اقتصادی است که اغلب خسارات جبران‌ناپذیری را به ساکنان و تأسیسات حاشیه‌ی رودخانه وارد می‌سازد. در این تحقیق به منظور پیش‌بینی و ارزیابی میزان پایداری و ناپایداری کناره و بستر و شناسایی مناطقی با ریسک بالای آسیب‌پذیری کانال در رودخانه‌ی مسیل‌موچان، بازه‌ای از این رودخانه در حد فاصل روستاهای قلعه تا سرسختی به طول تقریبی ۵/۶۵ کیلومتر انتخاب شد. پس از مشاهدات میدانی، ۸ مقطع در طول بازه‌ی مورد مطالعه انتخاب و نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های موردنیاز صورت گرفت. با استفاده از داده‌های برداشت شده شامل مقدار دبی، تنش برشی مرزی و بحرانی، ضریب مانینگ، عرض کانال فعال، عرض دره، محاسبه‌ی مساحت پهنه‌های حفاظت شده و فاقد تولید رسوب در حوضه‌ی مورد مطالعه، محاسبه‌ی شیب کانال، عرض کانال در دبی لبالی، عمق کانال در دبی لبالی، عرض دبی سیلاب و مشخص کردن نوع رسوبات بستر، پارامترهای موردنیاز از جمله کلاس‌های خطر فرسایش کناره‌ای و فرسایش کانال در مدل رودخانه‌ای شوم، محاسبه و در نتیجه آسیب‌پذیری کانال در ۸ مقطع رودخانه‌ی مسیل‌موچان انجام شد. نتایج نشان داد که تمامی مقاطع این رودخانه در معرض آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد قرار دارد؛ مقاطع ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ دارای ریسک آسیب‌پذیری متوسط است و مقاطع ۶، ۷ و ۸ ریسک آسیب‌پذیری بالایی دارد. واژگان کلیدی: آسیب‌پذیری کانال، پایداری کانال، رودخانه‌ی مسیل‌موچان، فرسایش رودخانه.

۱- مقدمه

رودخانه‌ها از اشکال پویای چشم‌اندازهای طبیعی است که در زمینه‌ی تغییر در کنترل‌کننده‌های محیطی و دستکاری‌های انسانی در سیستم‌های طبیعی طی مقاطع زمانی و مکانی مختلف، تغییرات متفاوتی از خود نشان می‌دهند. ابعاد و گستره‌ی طولی این تغییرات در طول مسیر رودخانه‌ها، نحوه‌ی عکس‌العمل شاخاب‌ها به رخدادها، نوع تغییرات در مقطع بستر اصلی و نحوه‌ی تغییرات در سطوح شیب‌های حوضه از دیدگاه هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی، بسیار اهمیت دارد. تغییرات مجرای رودخانه، فرسایش بستر و کناره‌ی رودخانه، فرآیندهای طبیعی رودخانه‌های آبرفتی هستند که به تخریب زمین‌های کشاورزی اطراف و خسارت به تأسیسات انسانی اطراف رودخانه می‌انجامد. از سوی دیگر، توسعه‌ی فعالیت‌های انسانی مانند برداشت شن و ماسه، ایجاد ساخت و ساز در کنار رودخانه و تغییرات کاربری اراضی سبب تغییر در ماهیت دینامیک و مورفولوژی رودخانه می‌شود. فرسایش کناره‌ای، مسئله‌ای جدی برای هر سیستم

رودخانه‌ای است که می‌تواند ۹۰ درصد کل تولید رسوب را از کل بار رسوبی حوضه به خود اختصاص دهد (Wasson et al, 1998 & Prosser and Winchester, 1996 & Olley et al, 1993 & Wallbrink et al, 1998).

فرسایش کناره، یک مخاطره نیز محسوب می‌شود؛ زیرا می‌تواند به تلفات جانی و خسارت‌های مالی منجر شود. فعالیت‌های انسانی مانند تخریب پوشش گیاهی حوضه و برداشت بی‌رویه از آب رودخانه، به فشار بیشتر بر آن، از بین رفتن منطقه‌ی پوشیده از گیاه در کنار رودخانه و تغییر اکوسیستم آن منجر می‌شود. بنابراین فرسایش بستر و کناره، تغییرات کانال رود و در نهایت آسیب‌پذیری کانال^۱، مسئله‌ای اجتماعی، محیطی و اقتصادی است که اغلب خسارات جبران‌ناپذیری به ساکنان و تأسیسات حاشیه‌ی رودخانه وارد می‌سازد. در رودخانه‌ی مسیل موچان - که از نزدیکی روستای عمارت عبور می‌کند - چندین بازه‌ی فرسایش شدید کناره در آن رخ داده‌است.

فرسایش کناره که به آسیب‌پذیری کانال منجر می‌شود، حاصل فرآیندی است که نیروی فرسایشی آب (Bentrop and Hoag, 1998) و نیروی گرانشی را با یکدیگر ترکیب می‌کند. علاوه بر این عریض شدن کانال، ناپایداری کناره، تخریب زیستگاه‌های طبیعی حاشیه‌ی رود و بسیاری از واکنش‌های ژئومورفیک دیگر، روند فرسایش کناره را تسریع می‌کند (Arnold et al, 1982 & Hammer, 1972 & Booth, 1990 & Booth and Henshaw, 2001 & Jacobson et al, 2001).

با وجود اینکه پیش‌بینی موقعیت و میزان فرسایش و آسیب‌پذیری کناره‌ی رود امری مشکل به نظر می‌رسد، با این حال روش‌ها و مدل‌های مختلفی توسط محققین ارائه و اجرا شده‌است (Sands and David, 2000 & Bandyopadhyay et al, 2014).

در این میان برخی از روش‌های شناخته شده که به طور گسترده و در سطح جهان استفاده شده، در جدول ۱ ذکر شده‌است. بسیاری از این روش‌ها به کارهای میدانی بسیار یا تکنولوژی پیشرفته‌ای نیازمند است؛ از جمله روش پین‌های فرسایشی، محاسبه‌ی سرعت جریان در مجاور کناره، تنش برشی مرزی و غیره.

جدول ۱: خلاصه‌ی روش‌ها و مدل‌های موجود در زمینه‌ی برآورد فرسایش کناره

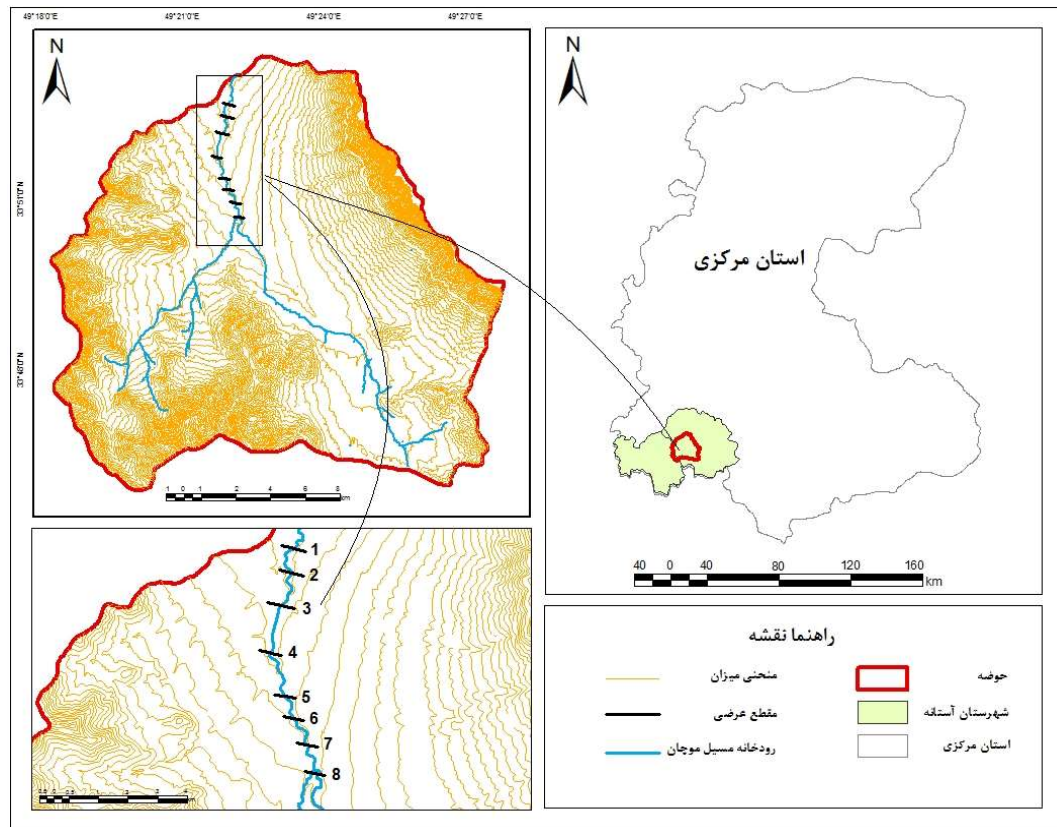
روش‌ها و مدل‌ها	منابع
۱- مقایسه‌ی پلان رودخانه‌ها در زمان‌های مختلف و اندازه‌گیری تغییرات آنها.	Gilvear and Winterbottom, (1992) & Gilvear et al, (1994, 1999) & Gilvear and Winterbottom, (1998) & Haghahi and Imamgholizadeh (2016) & Yamani et al, (2016).
۲- تحلیل عددی تغییرات بستر و کناره‌ی رودخانه و ارائه فرمول‌های جدید مرتبط با حمل رسوب و پاسخ کانال نسبت به فرآیندهای رودخانه‌ای.	Nagata et al, (2000) & Imanshoar et al, (2012) & Coryat, (2014) & Rezaei Moghadam et al, (2014).
۳- ارزیابی ویژگی‌های کناره‌ی رود نسبت به پایداری کانال و شرایط جریان و تأثیر آن بر پایداری کانال و کاربرد آنها در پیش‌بینی نرخ سالانه‌ی پسروی کناره رود.	Rosgen, (1996, 1999, 2001) & Nieber et al, (2008) & Simon and Kwan, (2014) & Simon et al, (2010) & Hoseinzadeh et al, (2006).

¹ Channel vulnerability

Hoseinzadeh and Gholami (2018) در پژوهشی، به بررسی پایداری و ناپایداری کانال رودخانه‌ی مسیل موچان با استفاده از روش تنش‌برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی پرداختند. به منظور بررسی ناپایداری کانال، ۴ اندازه ذره با قطر D_{16} ، D_{50} ، D_{84} و D_{95} با استفاده از روش‌های تنش‌برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی را محاسبه کردند. نتایج بدست‌آمده مشخص کرد که کانال رودخانه‌ی مسیل موچان در وضعیت ناپایداری قرار دارد. بررسی پژوهش‌های فوق نشان می‌دهد که فرسایش کناره‌ای و تشخیص ناپایداری یا ثبات کناره، یکی از مباحث مهم در سطح جهان و ایران است که به ابداع روش‌های مختلف منجر شده و در خصوص رودخانه‌های مختلف بررسی شده‌است. یکی از مدل‌های جدید در خصوص فرسایش کناره‌ای، مدل آسیب‌پذیری کانال است. مهم‌ترین ویژگی استفاده از این مدل در تشخیص وضعیت ناپایداری کانال مسیل موچان، نوآوری آن است و تاکنون از این مدل در هیچ یک از رودخانه‌های کشور استفاده نشده‌است.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه بازه‌ای از رودخانه‌ی مسیل موچان به طول ۵/۶۵ کیلومتر است. این رودخانه از ارتفاعات شمال و شرق روستای عمارت سرچشمه می‌گیرد و به رودخانه‌ی شرا یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه‌ی قره‌چای می‌پیوندد. رودخانه‌ی قره‌چای نیز یکی از رودخانه‌های حوضه‌ی مرکزی است که به دریاچه‌ی مسیله در قم منتهی می‌شود. دبی متوسط رودخانه‌ی مسیل موچان، ۰/۲۳ مترمکعب بر ثانیه و دبی رسوب آن، ۰/۷۶ مترمکعب در روز است. از آب این رودخانه برای آبیاری زمین‌های کشاورزی روستاهای عمارت، بازنه، قلعه و هفته استفاده می‌شود. رودخانه‌ی مسیل موچان با موقعیت جغرافیایی ۴۹ درجه، ۲۲ دقیقه و ۵ ثانیه طول شرقی و ۳۳ درجه، ۵۲ دقیقه و ۵۳ ثانیه عرض شمالی، در محدوده‌ی سیاسی شهرستان آستانه در استان مرکزی واقع شده‌است (Gholami, 2018). متوسط بارندگی سالانه براساس داده‌های ایستگاه عمارت (نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه d مورد مطالعه)، ۵۱۱/۲ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه‌ی آن ۱۴/۳۴ درجه‌ی سانتیگراد است (شکل ۱).



شکل ۱: محدوده‌ی مورد مطالعه در استان مرکزی

۳- مواد و روش

در این پژوهش از مدل آسیب‌پذیری کانال برای بررسی مقدار فرسایش‌پذیری آن در رودخانه‌ی مسیل موچان آستانه استفاده شده‌است. بدین منظور ۸ مقطع عرضی در بازه‌ای به طول ۵/۶۵ کیلومتر حد بین روستاهای قلعه و سرسختی انتخاب شد. این مدل توسط بخش مهندسی رودخانه‌ی سازمان دفاع آمریکا تهیه شده و هدف آن، محاسبه‌ی نسبت فرسایش‌پذیری و آسیب‌پذیری کانال به صورت کمی و کیفی است. در واقع با استفاده از این مدل مشخص می‌شود که کانال رودخانه در هر مقطع، در چه کلاسی از فرسایش قرار می‌گیرد. مدل آسیب‌پذیری کانال با تقسیم میانگین تنش برشی مرزی (نیروهای فرسایش‌دهنده) و تنش برشی محاسبه شده برای کانال در هر مقطع از رودخانه، نسبت فرسایش‌پذیری آنها را هم به صورت کمی و هم کیفی محاسبه می‌کند و براساس آن، میزان آسیب‌پذیری کانال تعیین می‌شود. داده‌ها و روابط مورد استفاده برای مدل آسیب‌پذیری در چهار مرحله و براساس واحد فوت تهیه می‌شود (در هر مرحله می‌توان واحدها را تبدیل کرد).

مرحله‌ی اول: داده‌های مورد نیاز برای مرحله‌ی اول به شرح ذیل است:

۱- **محاسبه‌ی مقدار دبی:** برای محاسبه‌ی مقدار دبی با دوره بازگشت‌های ۲ ساله، (Q_2) رودخانه براساس میانگین دبی‌های ماهانه و با استفاده از نرم‌افزار اسمادا محاسبه و مناسب‌ترین تابع توزیع با استفاده از مجموع مربع خطا (رابطه‌ی ۱) مشخص شد.

$$RSS = \sqrt{\frac{\sum Q_E - Q_m}{N-M}}$$

رابطه‌ی ۱

که در آن Q_E : داده‌ی پیش‌بینی شده، Q_m : داده‌های واقعی، M : تعداد پارامترهای تابع توزیع و N : تعداد کل داده‌ها است. هر تابعی که مقدار آن براساس رابطه‌ی ۱، کمتر از سایر توابع شد به عنوان تابع توزیع مناسب انتخاب می‌شود.

۲- تنش برشی مرزی و بحرانی: نیروی فرسایشی ایجاد شده به وسیله‌ی جریان رود را می‌توان با تنش‌های مرزی محاسبه کرد. تنش برشی مرزی (T)، شروع حرکت ذرات رسوبی را به وسیله‌ی جریان آب در بستر رود نشان می‌دهد (Hoseinzadeh et al, 2012) و با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود.

$$\tau = \rho_w gRS$$

رابطه‌ی ۲

براساس این رابطه T : تنش برشی مرزی (Ib/Ft^2)، P_w : وزن مخصوص آب بر حسب پوند بر فوت مکعب (Ib)، g : شتاب ثقل (32.1740 ft/s^2)، R : شعاع هیدرولیک به فوت (Ft) و S : شیب بستر بر حسب فوت بر فوت (Ft^3) است.

همچنین لازم است تنش برشی بحرانی برای حرکت یک ذره‌ی مشخص محاسبه شود. در مدل آسیب‌پذیری کانال با استفاده از نوع رسوبات و D_{50} هر مقطع، تنش برشی بحرانی موردنیاز برای حرکت ذرات در مقاطع موردنظر با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود.

در این رابطه T_c : تنش برشی بحرانی (Ib/Ft^2)، d : اندازه‌ی ذرات رسوبی بستر (این عدد نشان‌دهنده‌ی قطر d_{50} رسوبات است؛ یعنی ۵۰ درصد رسوبات از این مقدار بزرگ‌تر یا کوچک‌ترند). P_s : چگالی رسوب است که تقریباً ۲۶۵۰ کیلوگرم در متر مکعب است، θ_c : یک مقدار که تابع شکل ذره، ویژگی‌های سیال و آرایش ذرات سطح است. مقدار ثابت بی بعد θ_c ابتدا توسط یک مهندس آمریکایی به نام شیلدز در سال ۱۹۳۶ ارائه شد و او عدد ۰/۰۵۶ را پیشنهاد کرد (Gordon et al, 2004).

۳- ضریب مانینگ (n): مقدار ضریب مانینگ به شدت متغیر است و به فاکتورهای متعددی بستگی دارد که عبارتند از: ناهمواری‌های سطحی، پوشش گیاهی، ناهمواری‌های کانال، مسیر کانال، فرسایش و رسوب‌گذاری، موانع رسوبی، اندازه و شکل کانال، تغییرات سطح آب و دبی، تغییرات فصلی و بار رسوبی معلق و بستری. از این رو، kwan (2014) روشی را برای تخمین مقدار ضریب مانینگ ارائه کرد. در این روش غیر از اندازه‌ی ذرات در ناهمواری بستر، شاخص‌های دیگری هم به عنوان مؤلفه‌های تخمین ضریب زبری مانینگ قابل توجه قرار گرفته‌است (Hoseinzadeh et al, 2012).

۴- عرض کانال فعال: بخشی از کانال در مقطع عرضی است که به طور پیوسته تحت تأثیر جریان آب رودخانه قرار دارد. برای محاسبه‌ی این پارامتر لازم است نیمرخ عرضی کانال از طریق برداشت زمینی، تهیه و بر اساس نیمرخ عرضی کانال محاسبه شود.

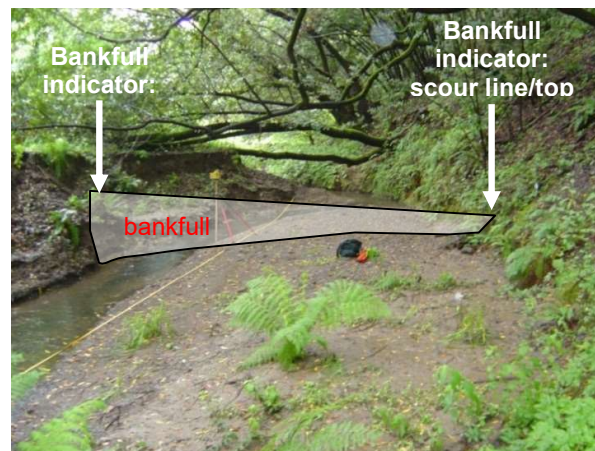
۵- عرض دره: فاصله‌ی بین انتهای دشت‌های سیلابی در دو طرف مقاطع عرضی رودخانه بیانگر عرض کانال است که بر اساس نیمرخ عرضی ترسیم شده محاسبه می‌شود.

۶- محاسبه‌ی مساحت پهنه‌های حفاظت شده و فاقد تولید رسوب در حوضه‌ی مورد مطالعه: در مدل آسیب‌پذیری کانال، منطقه‌ی حفاظت شده و فاقد رسوب به مناطقی از منطقه‌ی مورد مطالعه اطلاق می‌شود که در آنجا کارهای حفاظتی خاصی برای کاهش برداشت رسوب رودخانه یا مناطق مسکونی و غیره صورت گرفته‌است. برای محاسبه‌ی این پارامتر با استفاده از مشاهدات میدانی، نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و نرم‌افزار گوگل ارث محدودی تمامی مناطق حفاظت شده، مشخص و با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، مساحت آن بر اساس آکر (معادل ۷۴۰۴ مترمربع) محاسبه شد.

۷- محاسبه‌ی شیب کانال: شیب کانال برابر است با نسبت فاصله‌ی افقی به فاصله‌ی عمودی. بدین منظور ۲ نقطه در پایین‌دست و بالادست کانال در مقطع مورد مطالعه با فاصله‌ی مشخص (معمولاً ۱۰ متر) انتخاب می‌شود و با استفاده از شاخص و مترلیزی فاصله‌ی افقی و اختلاف ارتفاع آنها بدست می‌آید. در ادامه، میزان شیب بر اساس اختلاف ارتفاع به فاصله‌ی افقی محاسبه شد.

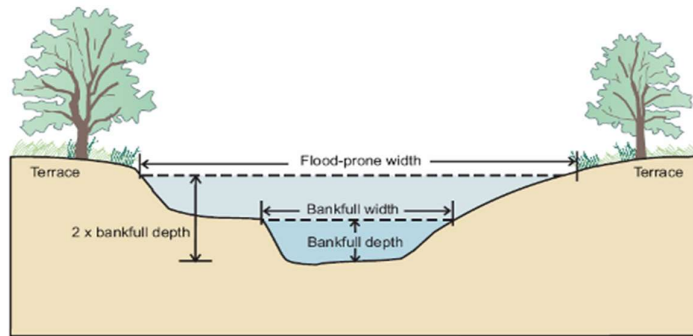
۸- محاسبه‌ی عرض کانال در دبی لبالبی: این پارامتر، فاصله‌ی بین دبی لبالبی کناره‌ی سمت راست و چپ رودخانه است که با استفاده از متر اندازه‌گیری می‌شود و عرض کانال در دبی لبالبی به دست می‌آید. همچنین با مشخص کردن عمق دبی لبالبی بر نیم‌رخ عرضی ترسیم شده، می‌توان عرض کانال در دبی لبالبی را اندازه‌گیری کرد.

۹- محاسبه‌ی عمق کانال در دبی لبالبی: با توجه به آثار کناره‌ی رودخانه از جمله زیربری رودخانه، تغییرات جنس در کرانه، آثار خزه‌ها و گل‌سنگ‌ها، تغییرات رنگ سنگ‌ها و در محل‌هایی که دشت سیلابی وجود دارد، لبه‌ی دشت سیلابی دبی لبالبی یا عمق دبی لبالبی مشخص می‌شود که این مقطع را می‌توان با استفاده از متر اندازه‌گیری کرد (شکل ۲).



شکل ۲: محاسبه‌ی عمق دبی لبالبی.

۱۰- عرض دبی سیلاب: به پهنه‌ای از کانال اطلاق می‌شود که در معرض سیلاب قرار می‌گیرد. مقدار این پارامتر، براساس عرض کانال در دو برابر عمق دبی لبالبی به دست می‌آید (شکل ۳).



شکل ۳: محاسبه‌ی عرض دبی سیلاب.

مرحله‌ی دوم:

داده‌های موردنیاز برای مرحله‌ی دوم مدل آسیب‌پذیری کانال به شرح ذیل است که برای تدارک داده‌ها در این مرحله، از مشاهدات میدانی و روابط طراحی شده‌ی موجود در مدل استفاده می‌شود:

۱- **مشخص کردن نوع رسوبات بستر:** براساس دسته‌بندی که در مدل آسیب‌پذیری وجود دارد، نوع رسوبات به سه دسته‌ی کلی رسوبات الف) غیر چسبنده، ب) رسوبات چسبنده و ج) سنگ بستری تقسیم می‌شود که پس از مشاهدات میدانی، نوع رسوبات هر مقطع مشخص و در مدل وارد می‌شود.

۲- **تعیین کلاس فرسایش کناره‌ای:** در این مدل، کلاس‌های فرسایش کناره‌ای به سه کلاس فرسایش کم، فرسایش متوسط و فرسایش زیاد تقسیم‌بندی می‌شود. براساس بازدیدهای میدانی و مقایسه‌ی آن با شکل‌های ۵ (الف، ب و ج)، کلاس فرسایش کناره‌ی مقاطع مورد مطالعه، تشخیص و نوع کلاس آن در مدل آسیب‌پذیری وارد شد.



(ب)



(الف)

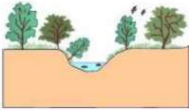
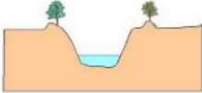
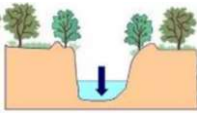
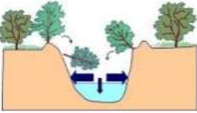


(ج)

شکل ۴: الف) کلاس‌های فرسایش کانال در مدل رودخانه‌ای شوم، ب) کلاس فرسایش کناره‌ای متوسط و ج) کلاس فرسایش کناره‌ای زیاد.

۳- تعیین کلاس فرسایش کانال در مدل رودخانه‌ای شوم: براساس مدل رودخانه‌ای شوم، رودخانه‌ها به شش کلاس طبقه‌بندی می‌شوند. نوع کلاس فرسایش کانال رودخانه با استفاده از مشاهدات میدانی، ترسیم نیمرخ عرضی و مقایسه‌ی آن با کلاس‌های رودخانه شوم در هر مقطع از رودخانه مشخص شد. سپس شماره‌ی کلاس فرسایش در مدل آسیب‌پذیری وارد شد. کلاس‌های فرسایش کانال در مدل رودخانه شوم به شرح جدول ۲ است.

جدول ۲: کلاس‌های فرسایش کانال در مدل رودخانه‌ای شوم

شماره	کلاس فرسایش کانال شوم	تعریف کلاس فرسایش کانال شوم	شکل کلاس فرسایش کانال شوم
۱	کانال طبیعی	کانال همراه و متصل به دشت سیلابی است و کناره‌هایی با عمق کم و تنوع پوشش گیاهی و زیستگاه دارد.	
۲	کانال دستکاری شده	جریان‌های کانالی شده از طریق ساخت خاکریز، حذف پوشش گیاهی و مستقیم کردن کانال است که به افزایش شیب و سرعت جریان منجر شده است.	
۳	کانال در حال عمیق شدن (دارای حفر)	کانال در پاسخ به کانالیزه شدن، بستر خود را حفر می‌کند و انرژی مازاد، صرف فرسایش بستر می‌شود.	
۴	کانال در حال عریض و عمیق شدن	در نتیجه‌ی عمیق شدن، زاویه و ارتفاع کناره‌ی کانال افزایش می‌یابد و به سقوط و ریزش کناره و تعریض کانال منجر می‌شود.	
۵	کانال در حال عریض شدن و فراسازی شدن (انباشت آبرفت)	کانال تعریض شده قادر نیست تمام مواد ناشی از ریزش کناره‌ی کانال را جابجا کند. در نتیجه مواد مازاد در پای دشت سیلابی پیشین، تراس‌های کوچک را ایجاد می‌کند.	
۶	کانال دارای تعادل دینامیکی جدید	در کانال، تراس‌ها و دشت سیلابی جدید ایجاد می‌شود. در کانال پیکان‌رودی جدید با دشت سیلابی جدید، سیستم رودخانه‌ای جدیدی ایجاد می‌شود.	

با توجه به نوع کلاس فرسایش کانال شوم و فرسایش کناره‌ای، میزان خطر فرسایش در هر دو کلاس متفاوت است.

مرحله‌ی سوم:

در مرحله‌ی سوم با استفاده از داده‌های تهیه شده، نسبت‌ها و کلاس‌های پارامترهای مؤثر، میزان آسیب‌پذیری کانال در تمامی مقاطع رودخانه محاسبه می‌شود. در ابتدا نسبت هر پارامتر محاسبه، سپس براساس آن میزان خطر و کلاس آن پارامتر در شدت آسیب‌پذیری کانال در هر مقطع مشخص می‌شود. نسبت‌ها و کلاس‌های مؤثر در میزان آسیب‌پذیری کانال به شرح زیر است:

۱- خطر فرسایش‌پذیری کانال: این پارامتر مقدار فرسایش‌پذیری را در مقاطع مختلف مشخص می‌کند. بر اساس آن، می‌توان

میزان مستعد بودن هر کانال برای فرسایش‌پذیری را مشخص کرد. این پارامتر با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$A = \frac{\tau}{\tau_o} \quad \text{رابطه‌ی ۴}$$

A: نسبت فرسایش‌پذیری، T : تنش برشی مرزی (Ib/Ft^2)، T_o : تنش برشی بحرانی (Ib/Ft^2).
بر اساس نسبت آسیب‌پذیری کانال (رابطه‌ی ۴)، خطر فرسایش‌پذیری آن در دو سطح متوسط و زیاد مشخص می‌شود (جدول ۳).

جدول ۳: خطر فرسایش‌پذیری کانال

خطر فرسایش‌پذیری کانال	متوسط	بالا
	بیش از ۱	کمتر از ۱

۲- خطر محدود بودن کانال: این پارامتر، میزان محدود بودن کانال را مشخص می‌کند. محدود بودن کانال شاخصی برای تعیین پهنه‌ی دشت سیلابی است. این پارامتر با استفاده از رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$C = \frac{D}{W} \quad \text{رابطه‌ی ۵}$$

C: مقدار محدود بودن کانال، D: عرض دره (Ft)، W: عرض کانال در دبی لبالبی (Ft). خطر محدود بودن کانال بر اساس مقادیر نسبت محدود بودن کانال ($TF(K32>3.99, "Medium", "High")$) در دو سطح متوسط و زیاد مشخص می‌شود (جدول ۴).

جدول ۴: خطر محدود بودن کانال

خطر محدود بودن کانال	متوسط	بالا
	بیش از ۳/۹۹	کمتر از ۳/۹۹

مرحله‌ی چهارم:

در پایان بر اساس نسبت خطر فرسایش‌پذیری هر مقطع به خطر حفر بستر، می‌توان میزان استعداد آسیب‌پذیری هر مقطع از رودخانه را تعیین کرد (جدول ۵).

جدول ۵: خطر آسیب‌پذیری کانال

خطر آسیب‌پذیری		
متوسط	متوسط	خطر فرسایش‌پذیری کانال
	متوسط	خطر حفر بستر
زیاد	متوسط	خطر فرسایش‌پذیری کانال
	زیاد	خطر حفر بستر
زیاد	زیاد	خطر فرسایش‌پذیری کانال
	متوسط	خطر حفر بستر

۴- یافته‌ها (نتایج)

در این پژوهش از مدل آسیب‌پذیری کانال برای بررسی و تعیین ناپایداری و میزان آسیب‌پذیری کانال در رودخانه‌ی مسیل‌موچان آستانه استفاده شد. براساس داده‌های میدانی و پارامترهای مؤثر در کانال، تنش برشی و نیروهای فرسایش‌دهنده‌ی کانال رودخانه محاسبه و در پایان، وضعیت آسیب‌پذیری مجرای رودخانه مشخص شد (جدول ۶، ۷ و ۸).

جدول ۶: پارامترهای اندازه‌گیری شده در مقطع‌های رودخانه‌ی مسیل‌موچان

شماره مقطع	لبالبی عمق دبی ft	n مانینگ	های حفاظت شده و فاقد پهنه تولید رسوب ac	لبالبی دبی cfs	میانگین دبی (Q ₂) cfs	کلاس فرسایش در مدل شوم	کلاس فرسایش فرسایش کناره
۱	۲/۹۵	۰/۰۵۹	۳۱۰/۴۸	۳۱/۸۷	۱۷/۳	۱	متوسط
۲	۰/۸۶	۰/۰۸۱	۳۱۰/۴۸	۷/۴۱	۱۷/۳	۱	متوسط
۳	۴	۰/۰۹۳	۳۱۰/۴۸	۴۳/۰۸	۱۷/۳	۱	متوسط
۴	۳/۴۷	۰/۰۷۳	۳۱۰/۴۸	۴۰/۲۵	۱۷/۳	۱	متوسط
۵	۲/۴۹	۰/۰۴۵	۳۱۰/۴۸	۲۶/۸۳	۱۷/۳	۳	زیاد
۶	۰/۹۵	۰/۰۸۴	۳۱۰/۴۸	۱۰/۲۴	۱۷/۳	۵	متوسط
۷	۲/۷۵	۰/۰۸۹	۳۱۰/۴۸	۲۹/۶۶	۱۷/۳	۱	متوسط
۸	۴/۳۳	۰/۰۹	۳۱۰/۴۸	۴۶/۶۱	۱۷/۳	۱	متوسط

جدول ۷: پارامترهای اندازه‌گیری شده در مقطع‌های رودخانه‌ی مسیل‌موچان

شماره مقطع	شیب کانال m/m	عرض کانال فعال ft	لبالبی عرض کانال در دبی ft	اندازه متوسط رسوب D ₅₀ mm	عرض دبی سیلاب ft	عرض دره ft
۱	۰/۰۱۹	۳/۲	۳/۸	۲۲	۵۶/۴۶	۴/۷
۲	۰/۰۰۵	۴/۳	۴/۴	۲۵	۵۴/۲۶	۷/۷
۳	۰/۰۰۵	۳/۷	۹/۳	۲۸	۳۸/۱۲	۱۰/۴
۴	۰/۰۱	۴/۴	۶/۹	۲۳	۲۸/۵۴	۹/۷
۵	۰/۰۵	۱/۴۷	۲/۶	۲۵	۳۷/۷۲	۶/۱
۶	۰/۰۳۶	۷/۵	۸/۶	۲۵	۳۶/۳۱	۱۲/۵
۷	۰/۰۶	۴/۴۹	۶/۱	۴۹	۴۷/۵۳	۹/۲
۸	۰/۰۱۸	۵/۱۸	۶/۷	۴۰	۳۹/۱	۱۰/۲

جدول ۸: نیروها و شاخص‌های تعیین‌کننده‌ی فرسایش کانال در مقطع‌های رودخانه‌ی مسیل موچان

شماره مقطع	تنش برشی بحرانی Ib/ft^2	شیب کناره چپ	شیب کناره راست	محیط خیس Ft	شعاع هیدرولیک Ft/ft^2	تنش برشی مرزی Ib/ft^2	نسبت حفر بستر Ft/Ft	سرعت جریان در دبی لبالبی Ft/sec
۱	۰/۳۵	۵۷/۳	۱۵/۴	۹/۱	۱/۱	۱/۳۴	۱۴/۳	۳/۸
۲	۰/۴	۲۱/۴	۱۴/۳	۵/۷	۰/۵	۰/۱۶	۱۲/۳	۰/۸
۳	۰/۴۶	۳۴/۶	۲۴/۲	۱۳/۵	۱/۹	۰/۶	۴/۱	۱/۸
۴	۰/۳۷	۳۲/۵	۱۰/۱	۱۱/۸	۱/۷	۱/۰۴	۴/۱	۳/۱
۵	۰/۴۱	۴۵/۹	۵۲/۱	۶/۶	۰/۸	۲/۴	۱۴/۵	۵/۱
۶	۱۲/۵	۱۱/۴	۲۵/۱	۹/۷	۰/۸	۱/۷۷	۴/۲	۴/۳
۷	۱۲/۱	۶۲/۵	۳۰/۷	۳۴/۹	۱	۳/۸۴	۷/۸	۴/۲
۸	۱۲/۵	۲۸/۳	۲۲/۵	۱۴	۱/۸	۲/۰۷	۵/۸	۳/۳

براساس داده‌ی جدول‌های ۶، ۷ و ۸، نسبت و خطر آسیب‌پذیری، میزان حفر بستر کانال، مقدار و خطر فرسایش‌پذیری در هر مقطع از رودخانه‌ی مسیل موچان محاسبه و مقادیر آن در جدول ۱۰ نشان داده شد.

جدول ۹: کلاس‌های خطر فرسایش بر اساس پارامترهای محاسبه شده

شماره مقطع	کلاس فرسایش شوم	خطر فرسایش کلاس شوم	کلاس فرسایش کناره	خطر فرسایش کناره	کلاس محدود	خطر کلاس محدود	نسبت عرض به عمق	خطر فرسایش نسبت عرض به عمق
۱	۱	متوسط	متوسط	بالا	۱/۲	بالا	۱/۳	بالا
۲	۱	متوسط	متوسط	بالا	۱/۸	بالا	۶/۵	بالا
۳	۱	متوسط	متوسط	بالا	۱/۱	بالا	۲/۳	بالا
۴	۱	متوسط	بالا	بالا	۱/۴	بالا	۲	بالا
۵	۳	بالا	بالا	بالا	۲/۳	بالا	۱	بالا
۶	۵	متوسط	متوسط	بالا	۱/۵	بالا	۹/۱	بالا
۷	۱	متوسط	متوسط	بالا	۱/۵	بالا	۲/۲	بالا
۸	۱	متوسط	متوسط	بالا	۱/۵	بالا	۱/۵	بالا

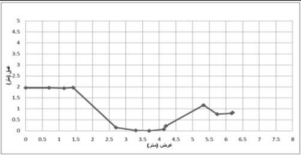
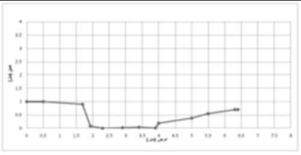
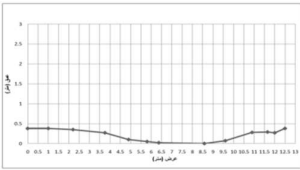
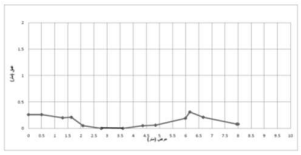
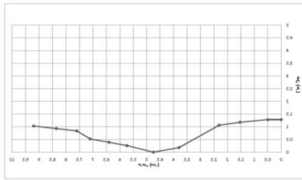
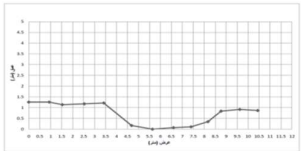
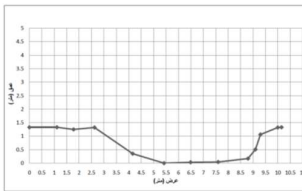
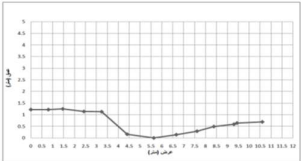
جدول ۱۰: مقادیر آسیب‌پذیری محاسبه شده برای رودخانه‌ی مسیل‌موچان در مقطع‌های مورد بررسی

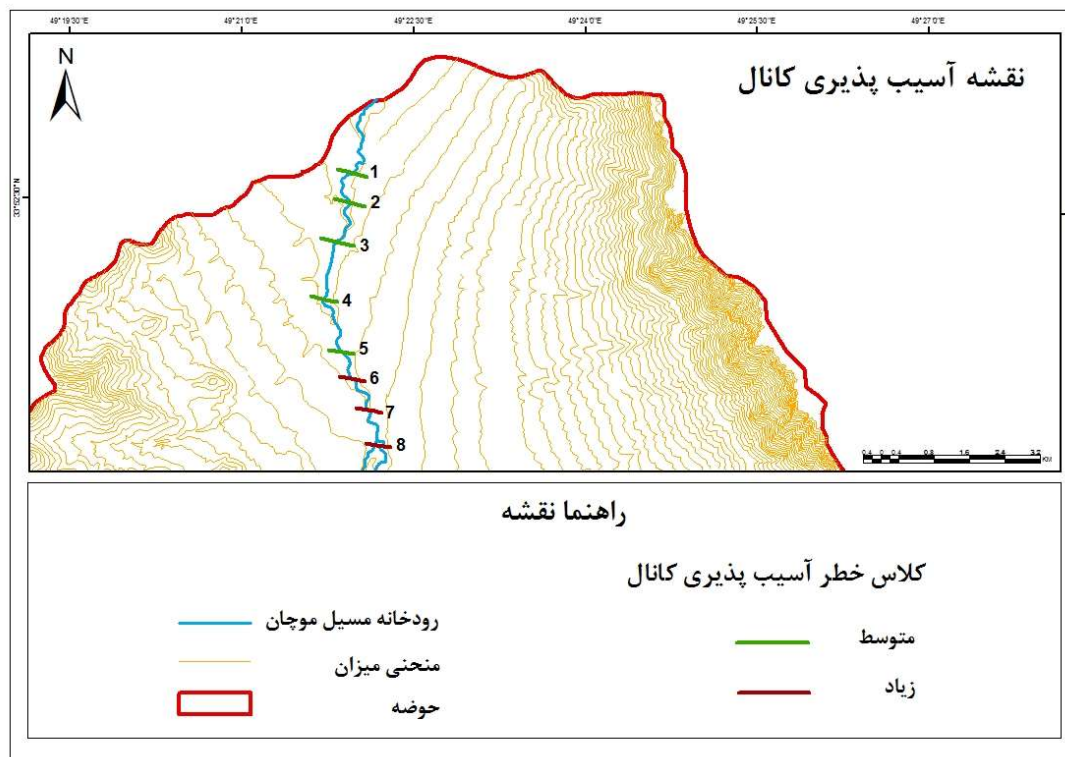
شماره مقطع	پذیری مقدار فرسایش	پذیری خطر فرسایش	میزان حفر بستر	پذیری خطر آسیب
	کانال*	کانال		کانال
۱	۳/۷۸	متوسط	متوسط	متوسط
۲	۱/۲۸	متوسط	متوسط	متوسط
۳	۱/۳۱	متوسط	متوسط	متوسط
۴	۲/۷۹	متوسط	متوسط	متوسط
۵	۵/۹	متوسط	متوسط	متوسط
۶	۰/۱۴	زیاد	متوسط	زیاد
۷	۰/۳۱	زیاد	متوسط	زیاد
۸	۰/۱۷	زیاد	متوسط	زیاد

* ۱ < = مستعد فرسایش کم، ۱ < = مستعد فرسایش زیاد.

آسیب‌پذیری کانال در ۸ مقطع رودخانه‌ی مسیل‌موچان (جدول ۱۱)، با استفاده از پارامترهای جدول ۸ انجام گرفته که نتایج یافته‌ها به شرح ذیل است. همچنین براساس محاسبات مشخص شد که تمامی مقاطع رودخانه‌ی مسیل‌موچان در معرض آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد قرار دارد؛ مقاطع ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ دارای ریسک آسیب‌پذیر متوسط و مقاطع ۶، ۷ و ۸ نیز ریسک آسیب‌پذیری بالایی دارد (شکل ۵).

جدول ۱۱: نیمرخ عرضی مقاطع رودخانه‌ی مسیل موچان

شماره مقطع	نیمرخ عرضی	شماره مقطع	نیمرخ عرضی
۱		۵	
۲		۶	
۳		۷	
۴		۸	



شکل ۵: نقشه آسیب پذیری مقاطع رودخانه‌ی مسیل موجان

مقطع ۱: در این مقطع از رودخانه، تفاوت بین عرض کانال فعال و عرض کانال در دبی لبالبی بسیار اندک است. در مقطع ۱ با توجه به بالا بودن شیب بستر، افزایش سرعت جریان مشاهده می‌شود. همچنین بالاتر بودن تنش برشی مرزی نسبت به تنش برشی بحرانی سبب شده‌است که در حالت تنش برشی بحرانی، رسوبات به آستانه‌ی مورد نیاز برای شروع حرکت خود نرسند، اما بالا بودن مقدار دبی لبالبی و شیب کانال به جابه‌جایی ذرات منجر شده‌است. بالا بودن تقریبی محیط خیس در این مقطع، عریض‌تر شدن عرض کانال را نشان می‌دهد که براساس اصل پیوستگی جریان به کاهش سرعت و قدرت جریان منجر می‌شود. از جنبه‌ی دیگر، کم بودن مقدار شعاع هیدرولیک نیز بیانگر کاهش قدرت فرسایش پذیری کانال در این مقطع است. در صورت وقوع دبی لبالبی، کناره‌ی سمت چپ کانال به دلیل داشتن شیب بیشتر نسبت به کناره‌ی سمت راست، در معرض آسیب پذیری بالاتری قرار دارد (جدول ۷ و ۸). براساس کلاس فرسایش کانال رودخانه‌ی شوم، در کلاس کانال طبیعی (کلاس ۱) و کلاس فرسایش کناره‌ای در حد متوسط است؛ بنابراین، از نظر ریسک فرسایش کناره‌ای بالا و ریسک فرسایش کلاس شوم در حد متوسط است (جدول ۹). کانال در این مقطع از رودخانه، از نظر محدود شدگی دارای ریسک بالای فرسایش است؛ زیرا هر چه میزان دشت سیلابی یک کانال کمتر باشد به محدود شدن بیشتر کانال و در نتیجه ریسک بالای فرسایش پذیری منجر می‌شود. از جنبه‌ی دیگر، کم بودن نسبت عرض به عمق کانال در مقطع شماره ۱ سبب شده‌است که در خطر فرسایش بالا قرار گیرد. در نتیجه این مقطع از رودخانه‌ی مسیل موجان، از نظر خطر آسیب پذیری و فرسایش در رده‌ی متوسط قرار دارد (جدول ۱۰ و ۱۱ شکل ۵).

مقطع ۲: در این مقطع، تفاوت بین عرض کانال فعال و عرض کانال در دبی لبالبی بسیار اندک است. این مقطع، تنش برشی بحرانی بالاتری نسبت به تنش برشی مرزی دارد که همین امر، زمینه‌ی مساعدی را برای جابه‌جایی رسوبات و افزایش فرسایش فراهم می‌کند. در مقطع ۲ به دلیل بالا بودن محیط خیس و پایین بودن مقدار شعاع هیدرولیک، مقاومت بیشتری در برابر عوامل فرسایشی دارد و براساس کلاس فرسایش کانال رودخانه‌ی شوم، در کلاس کانال طبیعی (کلاس ۱) و کلاس فرسایش کناره متوسط قرار می‌گیرد؛ بنابراین، از نظر ریسک فرسایش کناره‌ای بالا و ریسک فرسایش کلاس شوم، در حد متوسط است. علاوه بر موارد فوق، این مقطع دارای نسبت عرض به عمق کمتر از ۱۱/۹ است که همین عامل سبب شده از نظر خطر در حد بالا قرار داشته‌باشد. این مقطع، نسبت محدودشدگی ۱/۸ دارد که خطر فرسایش آن بالا است. با توجه به موارد فوق، میزان ریسک آسیب‌پذیری در مقطع ۲ در حد متوسط است که بیشترین میزان آسیب‌پذیری در کناره‌ی سمت چپ کانال اتفاق می‌افتد (جدول ۱۰ و ۱۱ و شکل ۵).

مقطع ۳: تفاوت بین عرض کانال فعال و عرض کانال در دبی لبالبی زیاد است که این امر، تفاوت بین جریان در حالت عادی و دبی لبالبی را نشان می‌دهد. این مقطع، میزان تنش برشی مرزی بالاتری نسبت به تنش برشی بحرانی دارد. از طرف دیگر، در این مقطع عمق دبی لبالبی افزایش می‌یابد. علاوه بر موارد فوق، بیشتر بودن مقدار شعاع هیدرولیک نسبت به مقطع ۲، امکان فرسایش بیشتر را در این مقطع فراهم می‌کند. از سوی دیگر، بالا بودن مقدار محیط خیس و در نتیجه عریض‌تر شدن کانال در این مقطع، تا حدی از قدرت فرسایش‌دهی جریان می‌کاهد. همانند دو مقطع قبلی، بیشترین میزان فرسایش در کناره‌ی سمت چپ رخ می‌دهد (جدول ۸ و ۷). این مقطع در کلاس کانال طبیعی (کلاس ۱) و کلاس فرسایش کناره متوسط قرار می‌گیرد، ولی از نظر ریسک آسیب‌پذیری به ترتیب در رده‌ی متوسط و بالا قرار دارد. همچنین میزان ریسک کانال این مقطع از رودخانه از نظر محدود بودن کانال و نسبت عرض به عمق، در رده‌ی بالا قرار دارد. براساس نتایج به دست آمده از جدول‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و شکل ۵ مشخص شد که این مقطع از نظر ریسک آسیب‌پذیری در رده‌ی متوسط قرار گرفته‌است.

مقطع ۴: در این مقطع از رودخانه، شیب بستر و عرض کانال فعال نسبت به مقطع ۳ افزایش یافته‌است. افزایش شیب بستر، سرعت جریان و شعاع هیدرولیک سبب شده‌است که با وجود کمتر بودن تنش برشی بحرانی از میزان تنش برشی مرزی، قدرت فرسایش‌دهی جریان افزایش یابد و کانال در معرض فرسایش بیشتری قرار گیرد که بیشترین میزان آسیب‌پذیری در کناره‌ی سمت چپ اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر، بالا بودن مقدار محیط خیس و در نتیجه عریض‌تر شدن کانال در این مقطع تا حدی از قدرت فرسایش‌دهی جریان کاهش می‌یابد (جدول ۷ و ۸). این مقطع از رودخانه در کلاس شماره ۱ شوم و از نظر فرسایش کناره‌ای در کلاس متوسط قرار دارد. از نظر خطر ریسک آسیب‌پذیری نیز به ترتیب دارای ریسک متوسط و بالاست. در این مقطع، محدود بودن کانال و کم بودن نسبت عرض به عمق سبب شده‌است که از نظر ریسک فرسایش در هر دو پارامتر، در رده‌ی بالا قرار گیرد. این مقطع از رودخانه براساس نتایج به دست آمده، در معرض آسیب‌پذیری متوسط است (جدول ۹، ۱۰، ۱۱ و شکل ۵).

مقطع ۵: در این مقطع همانند مقطع ۴، میزان تنش برشی بحرانی از میزان تنش برشی مرزی کمتر است و در زمان ایجاد تنش برشی بحرانی، رسوبات به آستانه حرکت اولیه‌ی خود نمی‌رسد. در این مقطع از رودخانه، مقدار شعاع هیدرولیک کاهش و مقدار محیط خیس افزایش نشان می‌دهد که همین عوامل سبب می‌شود قدرت رودخانه برای

فرسایش کانال کاهش یابد. علاوه بر موارد فوق این مقطع، سرعت جریان بالا دارد که همین عامل تشدیدکننده‌ی فرسایش‌پذیری این مقطع از رودخانه است (جدول ۷ و ۸). این مقطع از رودخانه‌ی مسیل‌موچان اینک دارای میزان بالای فرسایش در هر دو کناره است که همین عامل سبب شده از نظر ریسک آسیب‌پذیری کناره‌ی کانال، در رده‌ی بالا قرار بگیرد. این مقطع از نظر کلاس فرسایش کانال شوم، در کلاس شماره‌ی ۳- که خطر آسیب‌پذیری بالایی دارد - قرار می‌گیرد. این مقطع نیز همانند مقاطع دیگر رودخانه، دارای کانال محدود و با دشت سیلابی کم است که همین پارامتر سبب شده از نظر خطر آسیب‌پذیری، رده‌ی بالایی داشته باشد. این مقطع از رودخانه، تنها مقطعی است که نسبت عرض به عمق آن بیش از ۱۱/۹ می‌باشد و خطر آسیب‌پذیری متوسط دارد. در نتیجه موارد فوق و محاسبات انجام شده نشان داد که این مقطع از رودخانه، ریسک آسیب‌پذیری و فرسایش متوسط دارد (جدول ۹، ۱۰، ۱۱ و شکل ۵).

مقطع ۶: براساس نتایج بدست آمده مشخص شد که این مقطع از رودخانه، ریسک آسیب‌پذیری بالایی دارد (جدول ۹، ۱۰، ۱۱ و شکل ۵). در این مقطع با وجود بالا بودن مقدار محیط خیس و پایین بودن مقدار شعاع هیدرولیک، تفاوت بین عرض کانال فعال و عرض کانال در دبی‌لبالی کم است. علاوه بر پارامترهای فوق، افزایش شیب بستر و بالا بودن میزان تنش برشی بحرانی و سرعت جریان در دبی‌لبالی سبب افزایش قدرت جریان در این مقطع شده‌است و در صورت ایجاد دبی‌لبالی، کناره‌ی سمت راست فرسایش‌پذیری بیشتری را متحمل می‌شود (جدول ۷ و ۸). این مقطع از رودخانه در کلاس فرسایشی شماره‌ی ۵ شوم و از نظر کلاس فرسایش کناره‌ای، در رده‌ی متوسط و از نظر ریسک آسیب‌پذیری، به ترتیب در رده‌ی متوسط و بالا قرار دارد. نسبت محدود بودن کانال آن ۱/۵ است که همین عامل سبب شده از نظر خطر آسیب‌پذیری در حد بالا باشد؛ زیرا میزان دشت سیلابی آن محدود و کم است که همین پارامتر در افزایش میزان آسیب‌پذیری نقش بسیاری دارد. در این مقطع، نسبت عرض به عمق کمتر از ۱۱/۹۹ است که باعث شده از نظر کلاس فرسایش‌پذیری در حد بالا باشد (جدول ۹).

مقطع ۷: در این مقطع، تفاوت بین عرض کانال فعال و عرض کانال در دبی‌لبالی زیاد است که این امر تفاوت بین جریان در حالت عادی و در حالت دبی‌لبالی را نشان می‌دهد. در این مقطع با وجود بالا بودن مقدار محیط خیس و کم بودن مقدار شعاع هیدرولیک، وجود پارامترهای دیگر از جمله افزایش عمق دبی‌لبالی، میزان بالای تنش برشی بحرانی و سرعت بالای جریان، سبب می‌شود که قدرت رودخانه برای فرسایش کانال افزایش یابد و در نتیجه آسیب‌پذیری بالایی داشته‌باشد که بیشترین میزان آن در کناره‌ی سمت چپ اتفاق می‌افتد (جدول ۷ و ۸). این مقطع در کلاس کانال طبیعی (کلاس ۱) و کلاس فرسایش کناره متوسط قرار می‌گیرد و از نظر خطر ریسک آسیب‌پذیری به ترتیب دارای ریسک متوسط و ریسک بالاست. محدود بودن کانال و کم بودن نسبت عرض به عمق در این مقطع باعث شده‌است که از نظر ریسک فرسایش در هر دو پارامتر، در رده‌ی بالا قرار گیرد. همچنین این مقطع از رودخانه از نظر آسیب‌پذیری و میزان فرسایش نیز در کلاس بالا قرار دارد (جدول ۹، ۱۰، ۱۱ و شکل ۵).

مقطع ۸: این مقطع از رودخانه در کلاس آسیب‌پذیری بالا قرار می‌گیرد (جدول ۱۰ و شکل ۵)، اما تفاوت بین عرض کانال فعال و عرض کانال در دبی‌لبالی زیاد است که این امر تفاوت بین جریان در حالت عادی و در حالت دبی‌لبالی را نشان می‌دهد. پارامترهای مقدار محیط خیس و پایین بودن مقدار شعاع هیدرولیک تا حدی قدرت فرسایش‌دهی جریان را کاهش می‌دهند. از سوی دیگر، در این مقطع عمق دبی‌لبالی افزایش می‌یابد که همین عوامل

سبب می‌شود قدرت رودخانه برای فرسایش کانال افزایش یابد. علاوه بر موارد فوق، این مقطع از رودخانه دارای میزان بالای تنش برشی بحرانی و سرعت جریان است که همین عوامل سبب شده میزان بالایی از آسیب‌پذیری داشته باشد که در صورت وقوع دبی لبالی، کناره‌ی سمت چپ بیشترین میزان آسیب‌پذیری را دارد (جدول ۷ و ۸). در کلاس کانال طبیعی (کلاس ۱) و کلاس فرسایش کناره‌ای، در حد متوسط است؛ بنابراین، از نظر ریسک فرسایش کناره‌ای بالا و از نظر ریسک فرسایش کلاس شوم در حد متوسط است. کانال در این مقطع از رودخانه از نظر محدود شدگی دارای ریسک بالای فرسایش است؛ زیرا هر چه میزان دشت سیلابی یک کانال کمتر باشد به محدود شدن بیشتر کانال و در نتیجه ریسک بالای فرسایش‌پذیری منجر می‌شود. از جنبه‌ی دیگر، کم بودن نسبت عرض به عمق کانال در مقطع شماره ۸ باعث شده است که در خطر فرسایش بالا قرار گیرد (جدول ۱۰).

۵- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از محاسبات آسیب‌پذیری کانال نشان داد که تمامی مقاطع رودخانه‌ی مسیل موچان، در معرض فرسایش‌پذیری و در نتیجه آسیب‌پذیری قرار دارد. از ۸ مقطعی که ارزیابی شد، ۵ مقطع (مقاطع ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵) دارای ریسک آسیب‌پذیری متوسط است و ۳ مقطع (۶، ۷ و ۸) نیز در معرض خطر آسیب‌پذیری بالا قرار دارد. نتایج حاصل از آسیب‌پذیری در ۲ سطح مورد بررسی نشان می‌دهد که در سطح شاخص‌های مورفومتری کانال در تمامی این ۳ مقطع، میزان شیب و عمق دبی لبالی بالاست و این پارامترها سبب افزایش سرعت جریان در دبی لبالی در این مقاطع از رودخانه می‌شود. علاوه بر موارد فوق، هر سه مقطع بیشترین میزان تنش برشی بحرانی را دارد که در صورت وقوع دبی لبالی، بیشترین میزان تنش برشی و در نتیجه فرسایش رخ می‌دهد.

در این مقاطع با وجود بالا بودن مقدار محیط خیس و پایین بودن مقدار شعاع هیدرولیک که به کاهش قدرت جریان منجر می‌شود، بالا بودن میزان تنش برشی بحرانی و سرعت جریان در دبی لبالی سبب افزایش قدرت رودخانه و در نهایت ایجاد ریسک بالای آسیب‌پذیری منجر می‌شود.

با توجه به شکل ۵ و جدول ۱۰ مشخص شد که حساسیت مقاطع در مقابل فرسایش یکسان نیست؛ به گونه‌ای که مقاطع بالادست حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش دارند. برای تشخیص دلیل این موضوع، متغیرهای مورد مطالعه در مقاطع مختلف بررسی شد. بررسی‌ها نشان داد که در مقاطع میانی و پایینی (۱ تا ۵)، تراکم ریشه‌ها و عمق آن بیش از مقاطع دیگر بود که تحت عنوان پارامتر ضریب مانینگ و پهنه‌های حفاظت شده و فاقد تولید رسوب مورد بررسی قرار گرفت. در واقع، پوشش گیاهی هر سه فرآیند فرسایشی کناره (فرسایش هیدرولیک رودخانه، حرکات توده‌ای و تنش برشی مکانیکی و هیدرولیکی مواد کناره) را - که توسط Lawler (1995) بیان شده است - تحت تأثیر قرار می‌دهد. Wynn and Mostaghimi (2006) مشخص کردند که تراکم ریشه، تأثیر قابل توجهی بر فرسایش کناره در جنوب غربی ویرجینیای آمریکا دارد. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که پوشش گیاهی درختی، نرخ فرسایش را از طریق اتلاف انرژی ستون آب کاهش می‌دهد. این فرآیند، از طریق افزایش زبری و مقاومت کششی ناشی از افزایش چسبندگی فراهم شده به وسیله‌ی ترکیب ریشه و خاک صورت می‌گیرد (Schumm, 1973 & Thorne, 1990 & Gurnell, 1997).

(Genet et al, 2005 & Pollen, 2007). علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که تفاوت گونه‌های مختلف گیاهی نیز مقادیر متنوعی از مقاومت کششی را نسبت به خاک فراهم می‌کند (Genet et al, 2005 & Pollen, 2007).

حساسیت فرسایش محاسبه شده در مقاطع مختلف رودخانه‌ی مسیل موچان نشان می‌دهد که فرسایش، بیشتر در بخش‌هایی رخ می‌دهد که پوشش گیاهی وجود ندارد؛ یعنی جایی که پوشش گیاهی کم است، حساسیت به فرسایش نیز بیشتر است (مقاطع ۶ تا ۸). در این مدل متغیرهای ضریب مانینگ، پهنه‌های حفاظت شده، اندازه‌ی رسوبات، سرعت جریان و مورفومتری کانال با هم در ارتباط هستند و در صورتی که با یکدیگر ترکیب شوند، می‌توانند امتیاز بالایی را در مدل برای مقطع مورد مطالعه ایجاد کنند که به کسب امتیاز بالا برای مقطع مورد نظر و حساسیت بالای کناره نسبت به فرسایش منجر شود.

یک متغیر دیگر مورد بررسی در این مدل که می‌تواند در تفاوت حساسیت کناره‌ها دخالت داشته باشد، ویژگی‌های مواد تشکیل‌دهنده‌ی کناره (خاک) است. این ویژگی به‌عنوان متغیر تعدیل و تنظیم‌کننده‌ی مواد کناره شناخته می‌شود. در واقع مواد کناره‌ای مختلف، حساسیت‌های متفاوتی را در مقابل فرسایش ایجاد می‌کند؛ به عنوان مثال، کناره‌های رسی به علت چسبندگی نسبت به کناره‌های ماسه‌ای و شنی، به آهستگی و در زمان طولانی فرسایش می‌یابد. Wynn and Mostaghimi (2006) دریافته‌اند که وزن مخصوص ظاهری خاک، فاکتور خیلی مهم و مؤثر بر فرسایش کناره است. در واقع، خاک با وزن مخصوص ظاهری بالاتر به کاهش فرسایش‌پذیری خاک منجر می‌شود (Schumm, 1973). خاک غنی از رس، معمولاً وزن مخصوص ظاهری بالاتری دارد که در طول رودخانه‌ی مسیل موچان در مقاطع پایینی مشاهده شده‌است. رس تمایل به چسبندگی بیشتر با یکدیگر داشته و آستانه شکست آن خیلی بالاتر است؛ به‌عنوان مثال، در مقطع ۱ و ۴ با وجود پوشش گیاهی تقریباً مشابه مقاطع ۶ تا ۸ بوده، ولی حساسیت کمتری نسبت به فرسایش داشته‌است. این وضعیت ناشی از مواد تشکیل‌دهنده‌ی کناره است که به‌طور عمده، ریزدانه در حد رس بوده که یکی از عوامل مؤثر، نوع مواد تشکیل‌دهنده‌ی کناره و لایه‌بندی آن بوده‌است.

عدد زاویه قرار پاره‌سنگ‌ها در تمامی کناره‌ها، مشابه بدست آمد و به همین دلیل به عنوان پارامتری تأثیرگذار در آسیب‌پذیری کانال لحاظ نشده‌است. در نتیجه بیشترین میزان فرسایش در کناره‌هایی رخ می‌دهد که شیب بیشتری دارد. در تمامی مقاطع به جز مقطع ۵ و ۶، کناره‌ی سمت چپ به دلیل بیشتر بودن شیب دارای فرسایش‌پذیری بیشتری است. از نظر شاخص‌های کلاس خطر پارامترهای محاسبه شده نیز تفاوت در نسبت فرسایش‌پذیری سبب شده‌است که خطر آسیب‌پذیری در مقاطع مختلف باهم متفاوت باشد. مقدار فرسایش‌پذیری، از نسبت عرض دبی سیلاب به عرض کانال محاسبه می‌شود و همین عامل، تفاوت در مورفومتری کانال در این مقاطع را نشان می‌دهد و همگی کمتر از ۱/۶ است که ریسک فرسایش‌پذیری بالایی را نشان می‌دهد، همچنین میزان دشت سیلابی در هر سه مقطع نیز محدود است. مطالعه‌ی Hosseinzadeh and Gholami (2018) در خصوص بررسی پایداری بستری رودخانه‌ی مسیل موچان با استفاده از تنش برشی بحرانی و دبی واحد بحرانی نشان داد که مقاطع بالادست ناپایدارتر از مقاطع پایین‌دست است. زیر تمامی رسوبات در جریان دبی لب‌آبی در مقاطع بالادست به حرکت درآمده‌است و ناپایداری کانال را موجب می‌شود؛ در صورتی که در مقاطع پایینی، فقط ذرات D_{50} و D_{16} در حالت دبی لب‌آبی ناپایدار می‌شود. تحلیل ناپایداری رودخانه‌ی

مسیل موچان با استفاده از مدل آسیب پذیری نیز نتایج مشابهی را در پی داشته و حساسیت بیشتری را نسبت به فرسایش نشان داده است.

منابع

1. Arnold, C. L.; Boison, P. J.; & P. C. Patton, 1982. Sawmill Brook: an example of rapid geomorphic change related to urbanization, *J. Geol*, 90, 155–166.
2. Bandyopadhyay, S.; Ghosh, K.; & De. S. Kumar, 2014. A proposed method of bank erosion vulnerability zonation and its application on the River Haora, *Tripura, India, Geomorphology*, 224, 111–121.
3. Bentrup, G., & C. Hoag., (1998). The Practical Streambank Bioengineering Guide. USDA Natural Resources Conservation Service. Plant Materials Center. Aberdeen. Idaho. pp. 38–150.
4. Booth, D. B., 1990. Stream-channel incision following drainage-basin urbanization, *Water Resour. Bull*, 26, 407–417.
5. Booth, D. B., & P. C. Henshaw., (2001). Rates of channel erosion in small urban streams. In: Wigmosta, M. S., Burges, S. J. (Eds.), *Landuse and watersheds: human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas*. Water Science and Application. American Geophysical Union. Washington, DC. pp. 89–94.
6. Gholami, P., 2018. Morphodynamics Processes Affecting on Channel Unstability and Bank Erosion in Masiel Mouchan River of Astaneh, Master's Thesis. Natural Geography department, Shahid Beheshti University, 11p. (in Persian).
7. Gilvear, D. J., & S. J. Winterbottom., (1992). Channel change and flood events since 1783 on the regulated River Tay, Scotland: implications for flood hazard management. *Regul. Rivers Res. Manag.* 7, 247–260.
8. Gilvear, D. J., & S. J. Winterbottom., (1998). Changes in channel morphology, flood frequency and magnitude and floodplain land-use on the River Tay, Scotland, over the last 250 years; implications for floodplain management. In: Bailey, R.J. (Ed.), *UK Floodplains*. Westbury Publishing. Otley. pp. 93–114.
9. Gilvear, D. J.; Davies, J.; & S. J. Winterbottom, 1994. Mechanisms of flood embankment failure during large flood events; River Tay, Scotland, *Q. J. Eng. Geol*, 27, 319–332.
10. Gilvear, D. J.; Bryant, R.; & T. Hardy, 1999. Remote sensing of channel morphology and instream fluvial processes, *Prog. Environ. Sci*, 3, 257–284.
11. Gordon, N. D.; McMahon, T. A.; Finlayson, B. I.; Gipple, C. J.; & R. J. Nathan, 2004. Stream hydrology an interoduction for ecologists, John Wiley & Sons Ltd, 429 p.
12. Genet, M.; Stokes, A.; Salin, F.; Mickovski, S. B.; Fourcaud, T.; & J-F. Dumail et al, 2005. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots, *Plant and Soil*, 278, 1-9.
13. Gurnell, A., 1997, The hydrological and geomorphological significance of forested floodplains, *Global Ecology and Biogeography Letters*, 6, 219-229.
14. Hammer, T. R., 1972. Stream channel enlargement due to urbanization, *Water Resour. Res*, 8, 139–167.
15. Hassanzadeh, Y.; Tabatabai, M. R. M.; Imanshoar, & M. Frostamipoor, 2012. Experimental study of subsurface erosion in river banks, *World Acad. Sci. Eng. Technol*, 61, 791–795.
16. Hosseinzadeh, M. M.; Esmaili, R.; & S. Motevalli, 2012. Field techniques in Fluvial Geomorphology, 1st edition. Lahot Publishing, 22 p. (in Persian).
17. Hosseinzadeh, M. M; Esmaili, R; & S. Motevalli, 2006. An Analysis of the Efficiency of the Rosgen Classification System Case study of the Babylonian and Hollow River Rivers in the Range of the Caspian Sea coastal plain, *Journal of science and research branch*, 2(5), 53-66. (in Persian).

18. Hosseinzadeh, M. M., & P. Gholami., (2018). Hydrological analysis of bed stability in the Masiel Mouchan River- Markazi Province, *Journal of Eco Hydrology*, 2(5), 525-533. (in Persian).
19. Haghabi, A., & S. Emamgholizadeh., (2016). Estimation of lateral erosion of the wavy sections of the Kashkan River, *Journal of Geography and development*, 40, 125-138. (in Persian).
20. Jacobson, R. B.; Femmer, S. R.; & R. A. McKenney, 2001. Land-use changes and the physical habitat of streams — a review with emphasis on studies within the US Geological Survey Federal — State Cooperative Program, *Circular*, 1175, 131–152 (US Geological Survey. Reston, VA).
21. Kwan, H., & S. Swanson., (2014). Prediction of Annual Streambank Erosion for Sequoia National Forest, California, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50 (6), 1439–1447.
22. Lawler, D. M., 1995, The impact of scale on the processes of channel-side sediment supply: a conceptual model, *Effects of Scale on Interpretation and Management of Sediment and Water Quality*, 226, 175-184.
23. Nagata, N.; Hosoda, T.; & Y. Muramoto, 2000. Numerical analysis of river channel processes with bank erosion, *J. Hydraul. Eng.*, 126 (4), 243–252.
24. Nieber, J. L.; Wilson, B. N.; Ulrich, J. S.; Hansen, B. J.; & D. J. Canelon, 2008. Assessment of streambank and bluff erosion in the Knife River watershed, Final Report Submitted to Minnesota Pollution Control Agency, pp. 1–58.
25. Olley, J. M.; Murray, A. S.; Mackenzie, D. M.; & K. Edwards, 1993. Identifying sediment sources in a gullied catchment using natural and anthropogenic radioactivity, *Water Resour. Res.*, 29, 1037–1043.
26. Pollen, N., 2007, Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture, *Catena*, 69, 197-205.
27. Prosser, I. P., & S. J. Winchester., (1996). History and processes of gully initiation and development in Australia. *Z. Geomorphol. Suppl. bd.* 105, 91–109.
28. Rezaei Moghadam. M. H.; Servati, M. R.; & S. Asghari Sarasankarood, 2014. Analysis of the stability of the duct of Ghezel Ozan River using shear stresses Indices of relative strength of bed and field studies, *Journal of Irrigation & Water Engineering*, 1 (1), 33-46. (in Persian).
29. Rosgen, D. L., 1996. Applied River Morphology. Wildland Hydrology Books, Pagosa Springs, Colorado, pp. 6–42.
30. Rosgen, D. L., 1999. Development of a river stability index for clean sediment TMDL's. In: Olsen, D. S., Potyondy, J. P. (Eds.), *Proceedings of Wildland Hydrology*. AWRA, Bozeman, Montana, pp. 25–36.
31. Rosgen, D. L., 2001a. A practical method of computing streambank erosion rate, 7th Federal Interagency Sediment Conference, March 24–29, Reno, Nevada.
32. Sandra, J. W., & J. G. David., (2000). A GIS-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated River Tummel, *Scotland. Regul. Rivers Res. Manag.*, 16, 127–140.
33. Schumm, S. A., 1973, Geomorphic thresholds and complex response of drainage Systems, *Fluvial Geomorphology*, In: M. Morisawa (Editor), Binghamton, New York.
34. Simon, A.; Bankhead, N.; & R. E. Thomas, 2010. Iterative bank stability and toe-erosion modeling for predicting stream bank loading rates and potential load reductions, paper presented at Joint Federal Interagency Conference, Subcomm. on Hydrol, And Sediment., Advis, Conference on Water Info, Las Vegas, Nev., 27 June to 1 July.

35. Thorne, C. R., 1990, Effects of vegetation on riverbank erosion and stability, *Vegetation and Erosion: Processes and Environments*, Thornes, J. B. (Editor), John Wiley & Sons Ltd. West Sussex.
36. Wallbrink, P. J.; Murray, A. S.; Olley, J. M.; & L. J. Olive, 1998. Determining sources and transit times of suspended sediment in the Murrumbidgee River, New South Wales, Australia, using fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb , *Water Resour. Res.*, 34, 879–887.
37. Wasson, R. J.; Mazari, R. K.; Starr, B.; & G. Clifton, 1998. The recent history of erosion and sedimentation on the Southern tablelands of southeastern Australia: sediment flux dominated by channel incision, *Geomorphology*, 24, 291–308.
38. Wynn, T. M. & S. Mostaghimi., (2006). The effects of vegetation and soil type on streambank erosion, Southwestern Virginia, USA, *Journal of the American Water Resources Association*, 42 (1), 69-82.
39. Yamani, M.; Rahimi, M.; & A. Visi, 2016. The morphometry and comparison of the transitions of the Arus river during the last three decades, *Journal of Quantitative geomorphological research*, 3(4), 74-89. (in Persian).

Assessment of the sustainability and instability of bank and bed of the Masil-Muchan river (Astaneh city - Markazi province)

Parvin Gholami¹: MSc of geomorphology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran.

Mohammad Mahdi Hosseinzadeh: Associate Professor of Geomorphology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran.

Article History (Received: 2018/06/2 Accepted: 2019/02/14)

Extended abstract

1- Introduction

Rivers are one of the dynamic landforms of natural landscapes that are subject to changes due to environmental variables and human interactions during different times and locations. Changes in the river, erosion of the bed and river bank are natural processes of alluvial rivers that destroy the surrounding agricultural land and damage human installations around the river. Human activities, such as the degradation of basin vegetation and the uncontrolled harvesting of river water, cause more pressure on the river and the destruction of the plant covered area along the river and the change of the river ecosystem. Therefore, the erosion of bed and bank and channel changes, finally, the vulnerability of the channel, as social and economic issue, often causes irreparable damage to residents and facilities in riverside. Curitit (2014) predicts the erosion and sustainability of the riverbank in Stony Clove Creek in Catskills, using the analysis of the Bank Assessment for *Non-point. Source* Consequences of Sediment (*BANCS*). This study showed that the results obtained through the *BANCS* method may lead to improved management of the future of the Stony Clove Basin. Hosseinzadeh et al. (2005) studied the efficiency of the Rasgen classification system in the rivers of Babol and Talar in the Caspian Sea coastal plain. The results of this study showed that the prediction of the river type using this method can not be substituted as real research on the river and can lead to failure of management plans.

2- Methodology

The study area is a reach of 5.65 km in the Masil-Muchan river. The river originates from the northern and eastern mountains of Amarat village and joins the Shara River, one of the main branches of the Gharache river. The average discharge of Masil-Muchan river is 0.23 cubic meters per second and its Sediment discharge rate is 0.76 cubic meters per day. This river is located in Astaneh city, Markazi province. The channel vulnerability model, by dividing the average shear boundary stress (erosion forces) and shear stresses for each cross section of river, calculates the ratio of erodability both quantitatively and qualitatively, and based on that, the amount of damage to the channel is determined. The calculated data for the first stage for this model included active channel width, valley width, calculated area of protected areas and no sediment production in studied basin, channel slope, channel width in bankfull, channel depth in bankfull, boundary and critical shear stress, Manning coefficient and flood width are considered. The required data for the second stage of the channel vulnerability model is as follows:

- 1) Determining the type of sediment substrate: sediment types are classified into three general categories: a) non cohesive; b) cohesive deposits; and c) concrete bedrock, which the type of sediment was determined on the basis of field observations.
- 2) Determination of bank erosion class: In this model, bank erosion classes are divided into three erosion classes: low, moderate and high erosion, that their type at each cross section was determined on the basis of field observations and comparison with the photograph.
- 3) Determination of erosion class of the channel in Schumm class: According to Schumm river model, the rivers are classified into six classes. The type of erosion class of river channel, was determined using field

¹ Pari.gholami71@gmail.comq

observations and cross-sectional profiles, and comparing it with Schumm river classes at each cross section of the river, then the river erosion class number entered the vulnerability model. Depending on type of Schumm erosion class and bank erosion, the degree of erosion is different in both classes. In the third stage, using the data provided, the ratios and classes of effective parameters, the rate of channel vulnerability is calculated in all cross sections of river. the ratios and classes of effective in rate of channel vulnerability are as follows: 1) risk of channel erodability rate, 2) risk of channel entrenchment, 3) At the end is calculated channel vulnerability.

3- Results

In this study, the channel vulnerability model was used to investigate and determine the Instability and vulnerability of the channel in Masil Muchhan river. With this aim, 8 cross sections were selected in a reach of 5.55 km between villages of Ghaleh and Sarsakhti and calculated shear stress and channel erosive forces on the basis of field data and some of the effective parameters in the channel, and at the end was determined vulnerability of the river by describing all parameters as a table in the main article. Based on the calculations, it was found that all cross sections of the Masil Muchhan river are subject to moderate to high vulnerability; cross sections 1, 2, 3, 4, and 5 have a moderate vulnerability and cross sections 6, 7 and 8 have a high vulnerability risk that Is described the causes of erodibility difference, vulnerability and cross-sectional profile of all cross sections is expressed in the original article.

4- Discussion & Conclusions

The results of the channel vulnerability calculations showed that all cross sections of the Masil Muchan river are subject to erodibility and thus vulnerability. Of the 8 cross-sections that were evaluated, 5 cross-sections (sections 1, 2, 3, 4, and 5) have a medium vulnerability risk and three cross sections (6, 7, and 8) are at high vulnerability risk. The results of vulnerability were investigated in two levels: the results of vulnerability in two levels showed that at the level of morphometric indices of the channel, all of these three cross sections showed a high degree of slope and depth of bankfull. These parameters increase the flow velocity at bankfull discharge in these cross sections of river. In addition to the above, all three sections have the highest critical shear stress, which, in case of bankfull discharge, causes the highest amount of shear stress and thus erodibility. In these sections, despite the high Wet perimeter and low amount of hydraulic radius, which reduces the flow of power, but the high shear stress and flow velocity in bankfull discharge, increases the power of river and ultimately creates a high risk of vulnerability. Angle of repose on all banks was obtained by a similar number and therefore not considered as an effective parameter in the channel vulnerability. As a result, the largest amount of erosion occurs for banks which are more sloping. In all sections except sections 5 and 6, the left banks have more erodibility due to greater slope.

Key Words: Channel vulnerability, River erosion, Masil-Mochan River, Channel Stability.