

شناسایی مناطق مستعد تشکیل مئاندر با استفاده از مدل‌های رگرسیونی لجستیکی و SVM (مورد مطالعه: بخشی از رودخانه خرم‌آباد)

یحیی کریمی^۱، علی حقی‌زاده^{۲*}، علیرضا سپه‌وند^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۴

چکیده

به منظور مدیریت رودخانه، بررسی الگوی مورفولوژیکی رودخانه‌ها برای درک بهتر شرایط کنونی و پتانسیل تغییرات احتمالی آن‌ها در آینده ضروری است. هدف این تحقیق، تهیه نقشه مناطق مستعد تشکیل مئاندر با استفاده از مدل رگرسیونی لجستیکی کرنال (KLR)، رگرسیونی لجستیکی کرنال بگینگ (BKLR) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) در بخش شمالی رودخانه خرم‌آباد است. در این تحقیق، ابتدا نقشه‌های عوامل مؤثر بر پیچان‌رودی شدن شامل کاربری اراضی، زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی، مدل رقومی ارتفاع، شیب و جهت شیب، گسل، فاصله از جاده، موقعیت توپوگرافی، رطوبت توپوگرافی، ناهمواری زمین، انحنای کلی و انحنای پروفیل توسط نرم‌افزارهای Arc GIS، ENVI، SAGA-GIS و فراهم شدند. سپس لایه‌های تهیه‌شده به‌عنوان داده‌های ورودی مدل به‌همراه ۷۰ نقطه از رودخانه که از طریق نقشه‌برداری برداشت شده بودند، به‌عنوان داده‌های خروجی وارد مدل شدند. برای مدل‌سازی، ۷۰ درصد داده‌ها در مرحله آموزش و ۳۰ درصد در مرحله آزمایش استفاده شدند. به‌منظور انتخاب بهترین مدل برای تهیه نقشه پتانسیل پیچان‌رودی شدن، از معیارهای RMSE، MAPE، NS و CORR استفاده شد. در نهایت روش SVM با حداقل مقادیر ۰/۱۵ و ۰/۲ به ترتیب برای RMSE و MAPE و حداکثر مقادیر ۰/۸۳ و ۰/۸۵ به ترتیب برای NS و CORR نسبت به دیگر روش‌ها، دقت برآوردی بیشتری داشت. براساس نتایج می‌توان از نقشه مناطق مستعد تشکیل پیچان‌رود به‌عنوان مبنا برای مدیریت بهتر سواحل استفاده کرد؛ به‌طوری‌که می‌توان اقدامات حفاظتی و اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب برای کنترل تغییرات پیچان‌رودی شدن رودخانه و جلوگیری از خسارات به تأسیسات کناره‌های رودخانه‌ها اعمال نمود.

کلیدواژه‌ها: پیچان‌رودی، رود خرم‌آباد، ساحل رودخانه، سنجش از دور، کاربری اراضی، SAGA-GIS.

۱. کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

۲. استاد گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. haghizadeh.a@lu.ac.ir

۳. دانشیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

• این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه لرستان است.

مقدمه

در علم مورفولوژی یا ریخت‌شناسی رودخانه، ویژگی‌های ظاهری مربوط به شکل رودخانه بررسی می‌شود (یمانی و همکاران، ۲۰۱۴). در حقیقت رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، سیستمی کاملاً پویا بوده و الگوی مورفولوژیک آن‌ها به‌طور پیوسته در طول زمان تغییر می‌کند؛ به همین دلیل فرسایش کناره‌ای و آسیب‌رسانی به تأسیسات ساحلی و جابه‌جایی مرز را به دنبال دارند. اگرچه عوامل متعددی مانند انحراف آبراهه در کناره‌ها، کف‌کنی رود، فعالیت‌های انسانی، اختلاف سازند بستر و سیل‌خیزی، باعث تخریب دیواره، کف بستر و تغییر الگوی مجاری می‌شوند (یمانی و شرفی، ۲۰۱۳)، مورفولوژی الگوی بستر رود طی زمان تابع عوامل متعددی همچون جنس سازندهای زمین‌شناسی، دبی سیلاب، تغییرات انسانی، پوشش گیاهی، توپوگرافی و حرکات تکتونیکی است. در میان پدیده‌های سطح زمین، رودهای مئاندری دارای بیشترین میزان فعالیت هستند (گانرلپ، ۲۰۱۰)؛ ولی بررسی‌های آماری الگوهای پیچان‌رودی نشان داده‌اند که این مورفولوژی از یکسری قواعد زمین‌آماری تبعیت می‌کنند (نوحه‌گر و یمانی، ۲۰۱۲). از الگوهای پیچان‌رودی می‌توان به الگوی فرکتالی اشاره کرد. الگوی فرکتالی یا خودتشابهی رودخانه‌ها به ویژگی مربوط به مورفولوژی و شکل رودخانه اشاره دارد که در طول طبیعی رودخانه‌ها مشاهده می‌شود. به عبارتی، الگوی فرکتالی رودخانه‌ها نشان‌دهنده این است که ساختار و الگوهای پیچان‌رودها در رودخانه‌ها در مسیر رودخانه تکرار می‌شود و در واقع، بخش‌های کوچک‌تر رودخانه، از نظر ظاهری مشابه شکل بزرگ‌تر آن است (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲). بررسی الگوی مورفولوژیکی رودخانه‌های پیچان‌رودی برای درک شرایط فعلی و پتانسیل تغییرات احتمالی آن‌ها در آینده ضروری بوده و تنها از این طریق می‌توان عکس‌العمل طبیعی آن‌ها را نسبت به تغییرات طبیعی و یا اقدامات ناشی از اجرای طرح‌های اصلاح مسیر و تثبیت کناره‌ها پیش‌بینی نمود و میزان جابه‌جایی، تغییرات ابعاد و الگوی آن‌ها را تشخیص داد

(گریگوری، ۲۰۰۶). برای کشف و ارزیابی تغییرات پدیده‌های زمینی، استفاده از ابزارهای سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تولید اطلاعات مکانی و برخورداری از امکانات تحلیلی می‌تواند نقش بسزایی داشته باشد (ناصری و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از مدل‌های آماری مناسب برای اجرای پهنه‌بندی و پتانسیل‌یابی براساس داده‌های موجود، استفاده از مدل رگرسیونی است (لی، ۲۰۰۴). در مدل رگرسیونی براساس داده‌های موجود، معادله به‌منظور پیش‌بینی مقادیر متغیر وابسته براساس یک یا چند متغیر پیش‌گویی مستقل به دست خواهد آمد؛ اما چنانچه مقادیر متغیر وابسته کیفی باشد، همواره دو حالت (وقوع یا عدم وقوع) در آن بدیهی است که رگرسیون عادی جواب‌گو نخواهد بود؛ در چنین حالتی، رگرسیون احتمالاتی با نام رگرسیون لجستیک به وجود خواهد آمد (مختاری و نجفی، ۲۰۱۶). مزیت مدل‌سازی با رگرسیون لجستیک نسبت به سایر فنون آماری چندمتغیره مانند تحلیل رگرسیون چندمتغیره تحلیل تشخیص، آن است که متغیر وابسته می‌تواند تنها دو مورد داشته باشد که یکی احتمال وقوع و دیگری عدم وقوع است (دای^۴ و لی، ۲۰۰۲). دلیل پیچیدگی موجود در روند پیچان‌رودی شدن، پیش‌بینی دقیق پیچان‌رودی شدن با استفاده از توابع رگرسیونی را نیز به چالش می‌کشد. از طرفی، کارایی مدل‌های رگرسیونی به‌طور عمده علاوه‌بر دلایل ذکرشده با توجه به دخالت عوامل دیگر قادر به پیش‌بینی و یا حتی نشان دادن رابطه پارامترهای مختلف و جریان رودخانه نیست. از سوی دیگر، با توسعه و گسترش روش‌های هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری از یک دهه قبل با توجه به امکان کشف و آشکارسازی بهتر، ارتباط بین متغیرهای مختلف هیدرولوژیکی به‌طرز چشمگیری میسر گردیده است (علایی و همکاران، ۲۰۱۲). یکی از الگوریتم‌های یادگیری، ماشین بردار پشتیبان است که یک نوع از ماشین‌های یادگیری براساس تئوری یادگیری آماری هستند و به کارگیری آن‌ها همچون پیش‌بینی متغیر محیطی به چندین عامل بستگی دارد. در رابطه

2. Gregory
3. Lee
4. Dai

1. Güneralp

کشاورزی به سیل به دلیل پویا بودن خط ساحلی رودخانه بود. امینی و همکاران (۲۰۲۴) نیز در یک مطالعه با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین (Machin Learning) به پیش‌بینی تکامل پلان فرم در رودخانه‌های مئاندری پرداختند. در نهایت، پیش‌بینی‌های انجام‌شده سطح بالایی از تطابق با پیکربندی‌های پلت فرم واقعی را نشان دادند که نشان‌دهنده کاربردی بودن این روش بود. نات^۴ و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به بررسی چالش‌های موجود در کمی‌سازی مورفولوژی رودخانه پیمان‌رودی پرداختند. به همین منظور با استفاده از مدل DSAS به تجزیه و تحلیل بلندمدت، تغییرات خط ساحلی رودخانه‌های پیمان‌رودی را مورد بررسی قرار دادند. ارزیابی یافته‌های پژوهش با استفاده از آزمون‌های t -test, RMSE, Chi-Square و ضریب کاپا انجام شد. پیش‌بینی‌ها نشان‌دهنده این بود که شهرنشینی سریع بر مورفولوژی رودخانه تأثیر می‌گذارد. با مطالعه پتانسیل پیمان‌رودی شدن تا حد زیادی می‌توان در جهت برنامه‌ریزی و اقدامات مدیریتی، فنی و نیز مدیریت سواحل گام برداشت. در رودخانه خرم‌آباد تغییرات مورفولوژی هر ساله موجب فرسایش کناره‌ای، تخریب زمین‌های کشاورزی و همچنین تخریب سازه‌های اطراف رودخانه می‌شود. در مطالعاتی که پیش از این بر روی پیمان‌رودی شدن رودخانه خرم‌آباد صورت گرفته، بیشتر از روش‌های سنتی مانند مدل‌سازی عددی و تحلیلی استفاده شده است؛ اما در مطالعه حاضر از مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شد. لذا هدف این تحقیق بررسی مناطق مستعد تشکیل مئاندر با استفاده از مدل رگرسیونی لجستیکی کرنال ($BKLR^6$)، مدل رگرسیونی لجستیکی کرنال بگینگ ($BKLR^6$) و مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM^7) در بخش شمالی رودخانه خرم‌آباد است.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه در حوالی روستاهای بهرام‌جو، قلعه‌سنگی، پاپی‌خالداری و منطقه حاشیه‌ای فلک‌الدین در شهر خرم‌آباد قرار

با پیمان‌رودی شدن رودخانه‌ها، تحقیقات زیادی در ایران و سایر نقاط جهان انجام‌شده است که می‌توان به تحقیقات زیر اشاره کرد:

سایناس^۱ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافیک، آشکارسازی تغییرات مسیر رودخانه و تعیین مناطق مستعد فرسایش را برای رودخانه پراوارا انجام دادند. در نهایت، نقشه مناطق مستعد فرسایش تهیه و پهنه‌بندی مناطق خطرپذیر نیز انجام شد. روزو^۲ و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات مسیر رودخانه آمازون را طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۶ با استفاده از تصاویر لندست مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از روش‌های پردازش تصویر سنجش از دور برای تصاویر Landsat استفاده کردند و تغییرات رودخانه در نمای پلان و همچنین ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی برای شناسایی اینکه کدام الگوی بستر رودخانه بهتر این سیستم بزرگ رودخانه‌ای گرمسیری را نشان می‌دهد، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که بین سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۱، فرسایش شدیدتر از رسوب‌گذاری بوده است. رجیبی و همکاران (۲۰۱۸) الگوی پیمان‌رودی شدن رودخانه آجی‌چای را با استفاده از شاخص‌های زاویه مرکزی و ضریب خمیدگی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که طول مسیر مورد مطالعه، دارای شیب یکنواختی است. عامل توپوگرافی به‌خصوص شیب بر میزان و گسترش پیمان‌رودی شدن، بیشترین تأثیر را دارد.

کومار^۳ و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی به شناسایی تغییرات مورفولوژی رودخانه با استفاده از روش‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) پرداختند. در این پژوهش در مجموع پنج دهه از تصاویر Landsat تجزیه و تحلیل شدند و کاربری زمین را با الگوریتم ماشین بردار پشتیبان یادگیری نظارت‌شده (SVM) و الگوریتم بدون نظارت خوشه ISO برای ترسیم رودخانه‌ها و مطالعه تأثیر تغییر پوشش کاربری زمین بر مورفولوژی رودخانه طبقه‌بندی کردند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده حساسیت خانه‌ها و زمین‌های

4. Nath

5. Kernel Logistic Regression

6. Bagging Kernel Logistic Regression

7. Support Vector Machine

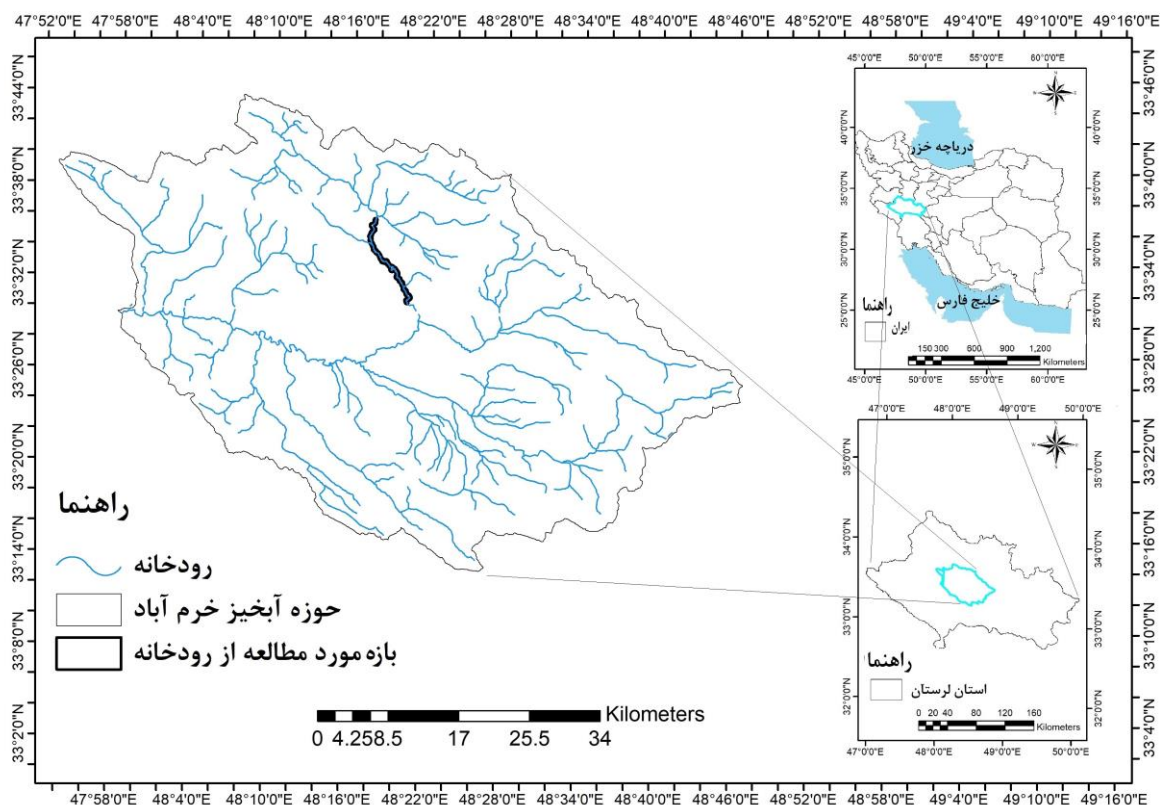
1. Sainath

2. Roza

3. Kumar

حدود ۲۶ قوس اصلی و ۳۱ پوینت بار در آن دیده می‌شود. بزرگ‌ترین قوس نرسیده به روستای پای‌خالددار است که احتمال می‌رود تا چند سال آینده پدیده میانبری در آن رخ دهد. همچنین در بعضی از قسمت‌های رودخانه، جزایر کوچکی به وجود آمده که نشان‌دهنده بالا بودن انرژی جریان است. منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه شده است.

دارد. طول بازه مطالعاتی برابر با ۱۴/۰۸۲ کیلومتر است که حداکثر عرض کف رودخانه، برابر ۳۴/۲۰ متر و حداقل آن برابر ۵ متر است که متوسط آن حدود ۱۶/۵ متر است. دبی متوسط سالانه این بازه از رودخانه در ایستگاه بهرام‌جو برابر ۱/۶ مترمکعب بر ثانیه است. سواحل بازه مطالعاتی رودخانه، بیشتر به صورت اراضی کشاورزی و باغی است. در طول بازه مورد مطالعه از رودخانه، ۳ سازه پل وجود دارد؛ همچنین



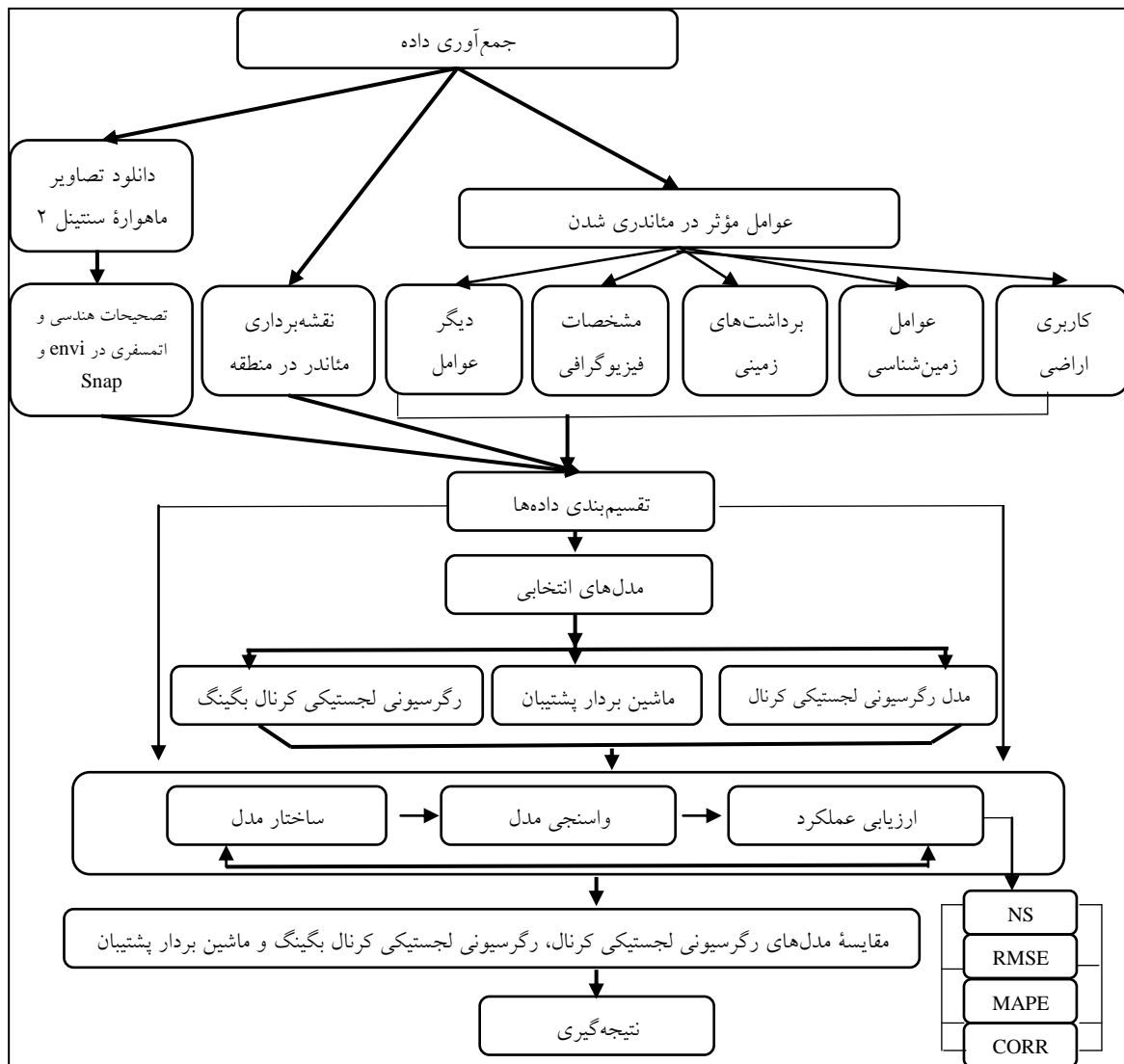
شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه روی نقشه استان لرستان و ایران

Figure (1): Location of the study area

نقشه برداری زمین در منطقه مورد مطالعه با پیکسل‌های ۳۰ متر هستند. به منظور تهیه لایه کاربری اراضی تصویر ماهواره‌ای ستینل مربوط به تاریخ ۱۴۰۰/۰۲/۲۵ از منطقه مورد مطالعه (رودخانه خرم آباد) با پوشش ابر کمتر از ۱۰ درصد و بدون خطای هندسی از سایت سازمان فضایی اروپا (<https://scihub.copernicus.eu/>) تهیه شد. در شکل (۲)، نمودار جریان روش انجام پژوهش را نشان داده شده است.

داده‌های پژوهش

داده‌های مورد استفاده شامل کاربری اراضی استخراج شده از تصاویر ماهواره ستینل ۲، مدل رقومی ارتفاع، شیب و جهت شیب، زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، شاخص رطوبت توپوگرافی و برخی خصوصیات ژئومتری مانند شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص انحنای دامنه، شاخص ناهمواری زمین و داده‌های حاصل از



شکل (۲): نمودار جریان‌ی انجام پژوهش

Figure (2): flow chart of research

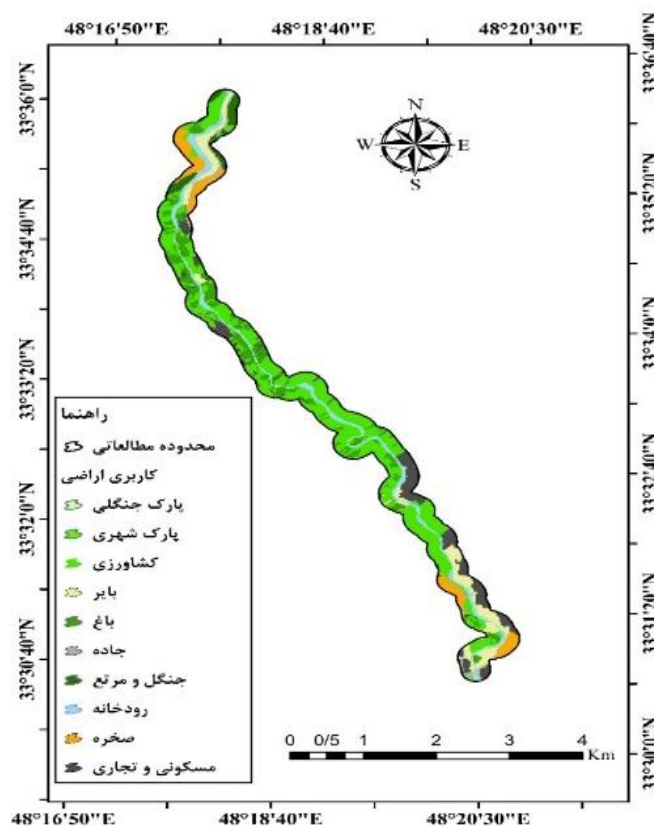
پیش‌پردازش تصاویر

پیش‌پردازش‌های (هندسی و رادیومتریک) تصویر در محیط نرم‌افزاری ENVI5.3 و نرم‌افزار SNAP که مخصوص پردازش تصاویر ماهواره‌ای سستینل است، صورت گرفت. تصحیح اتمسفری با استفاده از افزونه Sen2Cor نرم‌افزار SNAP انجام شد.

تهیه لایه کاربری اراضی

با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر احتمال

از طریق نمونه‌های آموزشی در سطح پیکسل، کاربری اراضی محدوده اطراف رودخانه برآورد گردید (شکل ۳). برای مطالعه پیچان رودی شدن در رودخانه شمال خرم‌آباد حریم ۲۰۰ متری براساس توپوگرافی رودخانه، اراضی کشاورزی، شبکه دسترسی، شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی در نظر گرفته شده است. تمام لایه‌های مؤثر ورودی به نرم‌افزار Arc GIS و SAGA-GIS براساس نقشه حریم ۲۰۰ متری برش و وارد مدل گردید.



شکل (۳): نقشه کاربری اراضی محدوده رودخانه خرم‌آباد با هدف تعیین مناطق مستعد پیچان‌رود

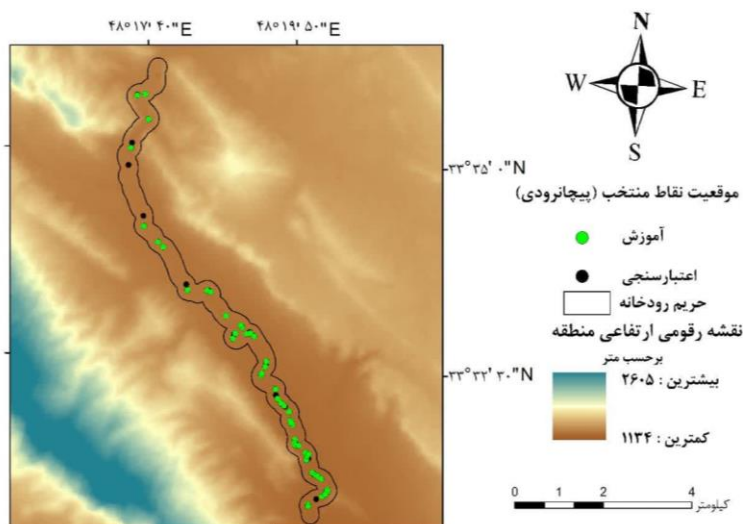
Figure (3): Land use map of Khorram Abad river area with the aim of determining areas susceptible to meandering

تهیه نقشه پیچان‌رودی شدن

از آنجاکه ایجاد نقشه پتانسیل پیچان‌رودی بر مبنای وزن‌دهی عوامل و ساخت مدل است، پس از تهیه فهرستی از همه عوامل مؤثر بر ایجاد پیچان‌رودی شدن، اقدام به تهیه فایل‌های قابل اجرا در محیط ArcGIS گردید؛ به طوری که ابتدا کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای از طریق نرم‌افزار ENVI5.3 استخراج و سپس از طریق نقشه‌برداری زمینی، مسیر رودخانه برداشت گردید و همراه با سایر لایه‌ها در بخش داده‌های مورد نیاز به محیط Arc GIS فراخوانی شدند. اینک با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک با کرنل‌های مختلف و مدل ماشین بردار پشتیبان، مناطق حساس به مماندگی شدن و همچنین میزان پیچان‌رودی شدن پیش‌بینی شد. مدل‌های مورد استفاده در پژوهش با در نرم‌افزار SAGA-GIS اجرا شدند.

به منظور ارزیابی مکان‌های مستعد ایجاد مماندگی شدن با بازدید میدانی و تصاویر گوگل ارث، ۷۰ نقطه که دارای فرسایش کناری در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی و شیب کم و سینوزیته بیشتری بودند (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۶؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۲؛ المدرسی و همکاران، ۲۰۱۷) انتخاب شدند و نقشه رستری از موقعیت جغرافیایی این نقاط تهیه گردید.

نقاط منتخب بر روی شکل (۴) با دایره‌هایی سبز (نقاط آموزش) و سیاه‌رنگ (نقاط اعتبارسنجی) نشان داده شده‌اند. شایان ذکر است که به صورت تصادفی از مجموع کل داده‌های نقاط مماندگی (۷۰ نقطه)، ۷۰ درصد (۴۹ نقطه) برای مرحله آموزش و ۳۰ درصد (۲۱ نقطه) برای اعتبارسنجی مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل (۴): نقشه موقعیت نقاط منتخب پیچان‌رودی در بازه مورد مطالعه در رودخانه خرم‌آباد

Figure (4): Location map of selected meandering points of Khorram Abad river

مدل رگرسیون لجستیک بگینگ کرنال

الگوریتم بگینگ در سال ۱۹۹۶ توسط برایمن^۲ به منظور بهبود دقت طبقه‌بندی و تعمیم الگوهای داده معرفی شد. این الگوریتم از گروهی طبقه‌بندی کننده‌های برمبنای درخت تشکیل شده است. این روش، یک متالگوریتم است که برای بهبود دادن یادگیری ماشین رده‌بندی و مدل‌های پس‌رفتی براساس پایداری و دقت رده‌بندی است. (بی^۳ و همکاران، ۲۰۱۶). شایان ذکر است که در این پژوهش روش طبقه‌بندی natural break برای پتانسیل طبقه‌بندی پیچان‌رود در ۴ کلاس کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد استفاده شده است (صلحی و خسروی، ۲۰۲۰).

عوامل مؤثر بر پیچان‌رودی شدن

از دیدگاه مطالعات ژئومورفولوژی بین همه اشکال قابل وقوع در مسیر رودخانه‌ها، پیچان‌رودها به لحاظ تغییرات عمده‌ای که در دیواره دره‌ها و به‌طورکلی در ویژگی‌های هیدرولوژیکی دره‌ها پدید می‌آورند، اهمیت ویژه‌ای دارند (المدرسی و همکاران، ۲۰۱۷). در واقع مورفولوژی الگوی بستر رود طی زمان تابع عوامل متعددی همچون جنس سازندهای زمین‌شناسی، دبی سیلاب، تغییرات انسانی، پوشش گیاهی، توپوگرافی، شیب و حرکات تکتونیک است (گو و همکاران،

مدل‌سازی با مدل رگرسیون لجستیک کرنال

یکی از مدل‌های آماری مناسب برای اجرای پهنه‌بندی و پتانسیل‌یابی براساس داده‌های موجود، استفاده از مدل رگرسیونی است (لی، ۲۰۰۴). فرضیه‌های رگرسیون لجستیک عبارت‌اند از متغیر وابسته (Y)، دو حالتی است و فقط مقادیر صفر یا یک اختیار می‌کند. متغیر وابسته (Y) به متغیر مستقل بستگی است (چپی و همکاران، ۲۰۱۷). به‌طورکلی، رگرسیون لجستیک کرنال، یک مدل رگرسیون لجستیک خطی در یک فضای با ابعاد بالاست که داده‌هایی را که تشخیص آن‌ها در فضای ابعاد موجود دشوار است، طبقه‌بندی و پردازش می‌کند (چپی و همکاران، ۲۰۱۷).

مدل‌سازی با مدل ماشین بردار پشتیبان

اولین الگوریتم برای طبقه‌بندی و دسته‌بندی الگوها در سال ۱۹۳۶ توسط فیشر ارائه شد (عشقی و همکاران، ۲۰۱۶) و معیار آن برای بهینه کردن، کم کردن خطای طبقه‌بندی داده‌های آموزشی بوده است (وانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۱) ماشین بردار پشتیبان بر مبنای تئوری بهینه‌سازی مقید است که از اصل استقرار کمینه‌سازی خطای ساختاری استفاده کرده و منجر به یک جواب بهینه کلی می‌گردد (شاهی‌نژاد و دهقانی، ۲۰۱۷).

دارند، اما دامنه‌های محدب سرعت جریان بیشتر و نفوذ کمتری از خود نشان می‌دهند. انحنا نیم‌رخ در واقع انحنا در طول خط شیب است؛ یعنی انحنا معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان در طول مسیر جریان است که نشان‌دهنده فرایند فرسایش و رسوب‌گذاری است. شاخص ناهمواری زمین (TRI) به‌نوعی اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت پیکسل اطراف خود است (جعفری رودسری و همکاران، ۲۰۱۶).

$$TRI = \sqrt{\sum_{p=1}^8 ZMd} \quad (2)$$

که در آن P تعداد پیکسل اطراف و ZMd میانگین تفاضل ۸ پیکسل اطراف هر پیکسل است.

معیارهای ارزیابی کارایی مدل

در این تحقیق همانند پژوهش لی و همکاران (۲۰۲۳) برای ارزیابی کارایی روش‌های استفاده‌شده در برآورد پیچان‌رودی شدن، از معیارهای سنجش خطا از جمله نش ساتکلیف (NS)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) و ضریب همبستگی (CORR) در مرحله آموزش و آزمایش استفاده شد که معادلات مربوط به آن‌ها در رابطه‌های (۱) تا (۴) ارائه شده است (جدول ۱). هرچه میزان NS و CORR بیشتر و میزان RMSE و MAPE کمتر باشد، مدل از کارایی بیشتری برای ارائه بهترین جواب برخوردار است (لی و همکاران، ۲۰۲۳). در نهایت با مقایسه این شاخص‌ها، بهترین روش برای پیش‌بینی مکان‌های مستعد پیچان‌رودی شدن معرفی می‌گردد.

در رگرسیون لجستیک نیز استفاده از متغیرهای مستقل که نقش مهمی در تعیین متغیر وابسته داشته باشند، مدل کامل‌تری را ایجاد می‌کند.

در این پژوهش مدل رقومی ارتفاع، شیب و جهت شیب، زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، شاخص رطوبت توپوگرافی و برخی خصوصیات ژئومتری مانند شاخص موقعیت توپوگرافی، شاخص انحنا دامنه، شاخص ناهمواری زمین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از لحاظ زمین‌شناسی یک رودخانه ممکن است در سازندی مقاوم نسبت به فرسایش تشکیل شود؛ در این صورت موقعیت و ابعاد آن ثابت می‌ماند. همچنین رودخانه می‌تواند در مصالح آبرفتی فرسایشی پدیدار شود. در چنین حالتی یک تمایل همیشگی برای تقویت پیوسته موقعیت رودخانه از طریق فرسایش و تشکیل مجدد دیواره‌های ساحلی یا کناره‌ها به‌وضوح قابل مشاهده است (رضایی مقدم و همکاران، ۲۰۱۲). در رابطه با شاخص‌ها نیز، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) از جمله شاخص‌هایی است که حالت گودی‌ها و برآمدگی‌ها را توجیه می‌کند.

$$TPI_i = Z_0 - \sum_{n=1} Z_{n/n} \quad (1)$$

که در آن Z_0 ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Z_n ارتفاع از شبکه و n تعداد کل نقاط اطراف است (بابلی مؤخر و نگهبان، ۲۰۲۱).

شاخص انحنا دامنه تأثیر بسزایی در سرعت و نفوذ دارد؛ به‌طوری‌که دامنه‌های مقعر سرعت جریان کم و نفوذ بیشتری

جدول (۱): معیارهای ارزیابی کارایی مدل

Table (1): Evaluation criteria of the model efficiency

مقدار بهینه	رابطه	معیار ارزیابی
۱	$CORR = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}}$	ضریب همبستگی
۱	$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	نش ساتکلیف
۱	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}$	ریشه میانگین مربعات خطا
۱	$MAPE = 100 \times \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{ O_i - P_i }{O_i} \right)$	میانگین درصد خطای مطلق

O: observed data, P: estimated data, n: number of measured data

نتایج

همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها ذکر شد، ابتدا عوامل مؤثر در پیچان‌رودی شدن به‌صورت لایه‌های مختلف در نرم‌افزار Arc GIS تهیه شدند.

برای تعیین حدود اراضی از تصاویر گوگل ارث و بینگ مپ به منظور دیجیتالیز نمودن استفاده گردید که نوع کاربری اراضی براساس تفسیر چشمی تصاویر ماهواره ستیتل (۲) که کاملاً وابسته به توان فنی و تفسیر چشمی کارشناس است، استخراج

گردید که حاصل نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است. در حاشیه رودخانه مورد مطالعه، انواع مختلفی از کاربری‌ها مانند اراضی کشاورزی و باغی، مناطق مسکونی و بایر دیده می‌شود که هرکدام به نوبه خود تأثیر بسزایی در ایجاد یا کاهش ایجاد پیچان‌رودی شدن ایفا می‌کنند؛ چراکه رودخانه‌ها بر اثر فعالیت‌های انسانی و یا دیگر عوامل محیطی پایداری خود را از دست داده و به مجموعه‌های اکوسیستمی شکننده و بسیار ناپایدار تبدیل شده‌اند.

جدول (۲): مساحت کاربری اراضی براساس نوع کاربری

Table (2): land use area based on land use type

نوع کاربری	مساحت (هکتار)	نوع کاربری	مساحت (هکتار)
پارک جنگلی	۵۰/۳۹	جاده	۸۷/۲
پارک شهری	۶/۵۱	رودخانه	۶۳/۸۳
کشاورزی	۶۰۱/۹۶	صخره	۷۹۸/۸
بایر	۲۸۵/۵۱	مسکونی، تجاری، صنعتی	۶۳۶/۰۸
باغ	۱۴۶/۷۵		

لایه‌های مؤثر در وقوع پیچان‌رودی

مدل رقومی ارتفاع (DEM)

شمای کلی منطقه، حالت کوهستانی را نشان می‌دهد که رودخانه در بین اراضی کشاورزی محصور شده است. حداقل، حداکثر و میانگین ارتفاع منطقه به ترتیب ۱۱۹۶، ۱۳۷۱ و ۱۲۴۱ متر است. در این محدوده، اختلاف ارتفاع به‌وجودآمده بیشتر به دلیل مناطق مرتفع بوده است و در مسیر رودخانه، اختلاف ارتفاع قابل توجهی وجود ندارد (۱۵۰ متر) که خود عاملی برای ایجاد پیچان‌رود است.

شیب و جهت شیب

حداقل، حداکثر و میانگین درصد شیب منطقه به ترتیب ۰/۱۱، ۳۵/۳۵ و ۴/۵ درصد است. جهت شیب عمومی رودخانه در مسیر عمدتاً شمال شرقی و جنوب غربی است. از آنجاکه شیب‌های کم در ایجاد پیچان‌رود مؤثر است و منطقه مورد مطالعه، شیب کمی در بستر دارد؛ لذا از لحاظ شیب، منطقه در معرض ایجاد پیچان‌رود دارد. از طرفی، مناطقی از رودخانه رو به شمال شرقی به‌علت حفظ رطوبت و انواع هوازدگی و سستی لایه‌ها به‌میزان بیشتری در معرض ایجاد پیچان‌رودی

شدن قرار دارد و مناطقی دیگر از ساحل رودخانه که رو به جنوب غربی قرار دارند؛ به‌علت زهکشی بهتر و کم بودن رطوبت، کمتر در معرض پیچان‌رودی شدن قرار دارند.

زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی

زمین‌شناسی منطقه از ۵ سازند اصلی زمین‌شناسی تشکیل شده که شامل سازندهای امیران، بنگستان، رسوبات مخروط‌افکنه، گورپی و آسماری با سنگ‌شناسی که شامل ماسه‌سنگ و کنگلومرا، آهک و شیل، مارن و شیل، آهک و رسوبات هستند (شکل‌های ۸ و ۹)؛ که هرکدام مقاومت مختلفی نسبت به فرسایش از کناره‌های رودخانه را نشان می‌دهند که براساس حساسیت به ۵ دسته به‌صورت جدول (۳) طبقه‌بندی شده‌اند.

گسل

در محدوده مورد مطالعه، گسل فعالی وجود ندارد که تأثیر بسزایی بر روند پیچان‌رودی شدن در محدوده مورد نظر بگذارد؛ به طوری که نزدیک‌ترین گسل به منطقه مورد مطالعه بیش از ۱۰ کیلومتر فاصله دارد (شکل ۱۰).

فاصله از جاده

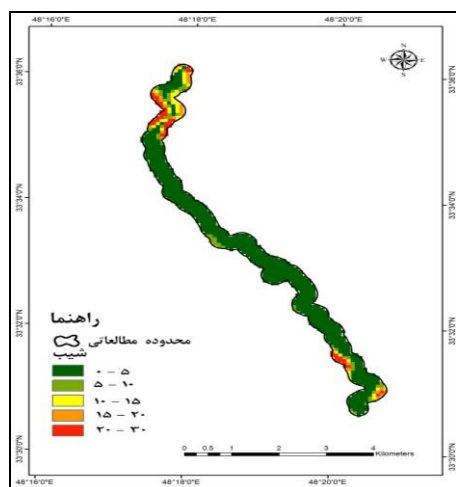
طول رودخانه و سواحل کناری آن است که خود بیانگر در معرض فرسایش بودن کناره‌ها و ایجاد پیچان رودی شدن است.

شاخص انحناى دامنه و انحناى پروفیل

با توجه به شکل (۱۴) که دامنه حالت محدب دارد، می‌توان گفت سرعت جریان در آن زیاد و سرعت نفوذ کم است. لذا در محدوده مطالعاتی با توجه به آنکه سرعت جریان کم باعث وقوع پیچان رودی شدن می‌شود، این شاخص به‌عنوان عامل کاهنده در میزان پیچان رودی شدن محسوب می‌شود. با توجه به شکل (۱۵)، مقادیر منفی نشان‌دهنده انحناى محدب است که سرعت جریان افزایش و فرایند فرسایش افزایش می‌یابد، ولی مقادیر مثبت نشان‌دهنده انحناى مقعر و کاهش سرعت جریان و رسوب‌گذاری است.

شاخص ناهمواری زمین

شاخص ناهمواری زمین به‌نوعی اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت پیکسل اطراف خود است که برای منطقه مورد مطالعه به‌صورت شکل (۱۶) ارائه شد. حداقل این شاخص، برابر ۰/۴۴ و حداکثر آن، برابر ۴۳/۳۱ در محدوده مطالعاتی است که هرچه مقدار آن بیشتر باشد، نشان‌دهنده تکتونیک فعال است؛ به‌طوری‌که در بیشتر منطقه، مقادیر این شاخص در ۸۰ درصد مساحت محدوده مطالعاتی کمتر از ۱۰ را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تکتونیک با فعالیت کم است ولی حدود ۲۰ درصد منطقه دارای تکتونیک متوسط تا زیاد را نشان می‌دهد.



شکل (۶): شیب محدوده مطالعاتی

Figure (6): Slope of the study area

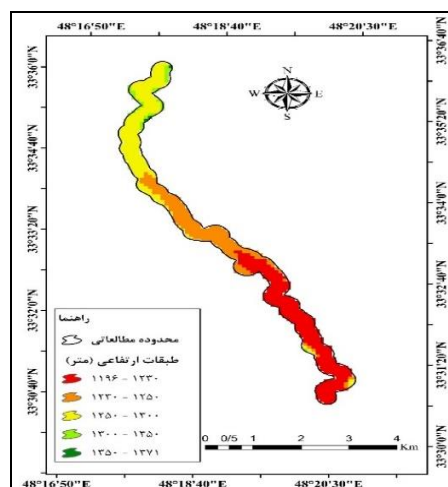
در محدوده مطالعاتی، جاده آسفالتی و خاکی وجود دارد که اصلی‌ترین جاده آن، جاده خرم‌آباد به نورآباد است که قسمتی از آن در کنار رودخانه قرار گرفته است. همچنین جاده آسفالتی بین روستایی نیز در آن به تعداد زیادی دیده می‌شود و جاده خاکی بین مزارع و باغ‌ها و بخشی از روستاها دیده می‌شود. با توجه به موارد گفته‌شده، نقشه حریم آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

شاخص موقعیت توپوگرافی

همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده، حد پایین و بالای شاخص موقعیت توپوگرافی به ترتیب ۲/۰۹- تا ۲/۰۵ است که مناطق با مقادیر منفی، نشان‌دهنده دره‌ها و گودال‌ها و مقادیر مثبت، نشان‌دهنده یال‌ها و ستیغ‌هاست؛ هرچه اعداد مسیر و کناره رودخانه منفی باشند، پتانسیل فرسایش‌پذیری و رسوب‌گذاری بیشتر است. بنابراین پتانسیل پیچان رودی شدن نیز افزایش پیدا می‌کند.

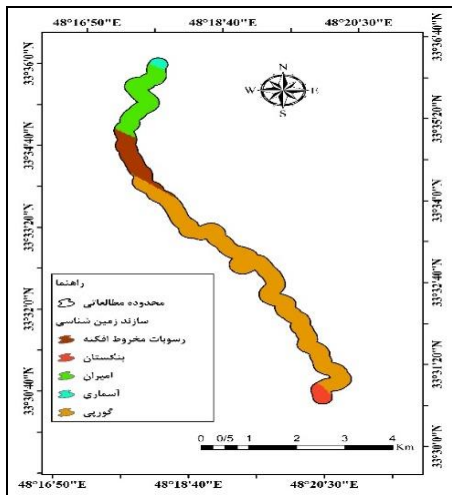
شاخص رطوبت توپوگرافی

در شاخص رطوبت توپوگرافی استخراج‌شده که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، در محدوده مطالعاتی مقادیر بالاتر از ۱۰/۵۸ به منزله مناطق دارای خیزی زیاد محسوب می‌شوند که حدود ۲۵ درصد از این محدوده مطالعاتی، مقادیری بالاتر از این مقدار را نشان می‌دهد که اکثریت این مقادیر محاسبه‌شده در

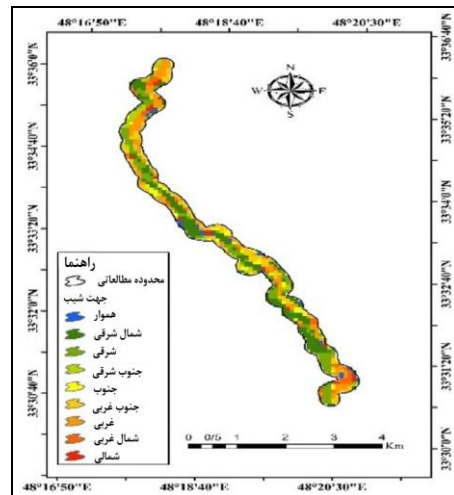


شکل (۵): مدل رقمی ارتفاعی محدوده مطالعاتی

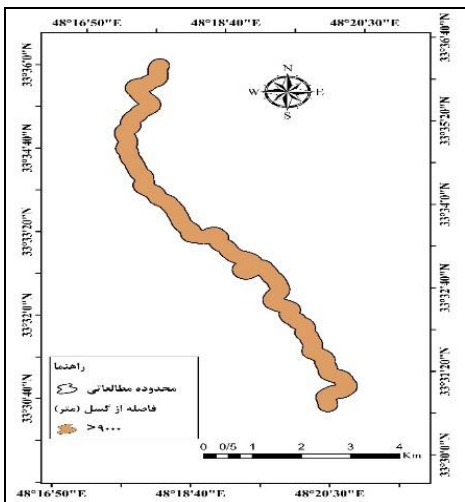
Figure (5): Digital elevation model of the study area



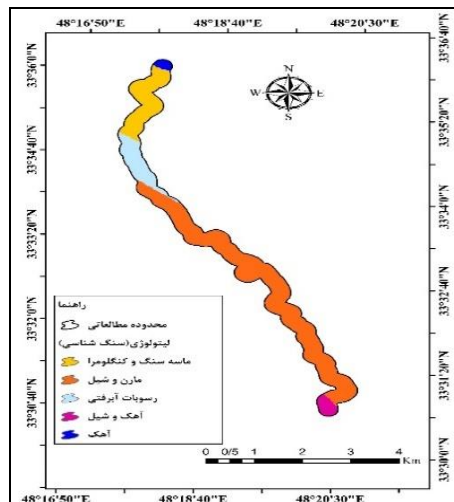
شکل (۸): سازند زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی
Figure (8): Geological formation of the study area



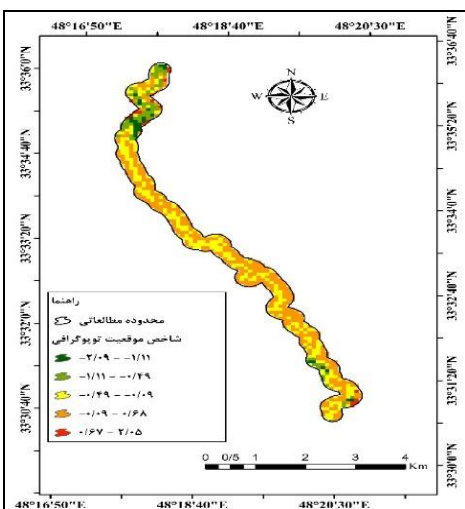
شکل (۷): جهت شیب محدوده مطالعاتی
Figure (7): Slope direction of the study area



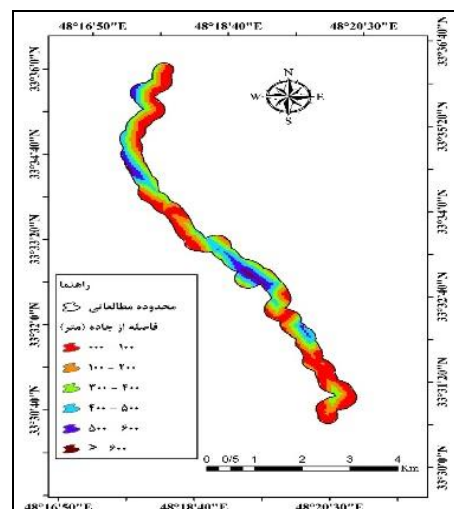
شکل (۱۰): نقشه فاصله از گسل محدوده مطالعاتی
Figure (10): Map of the distance from the fault



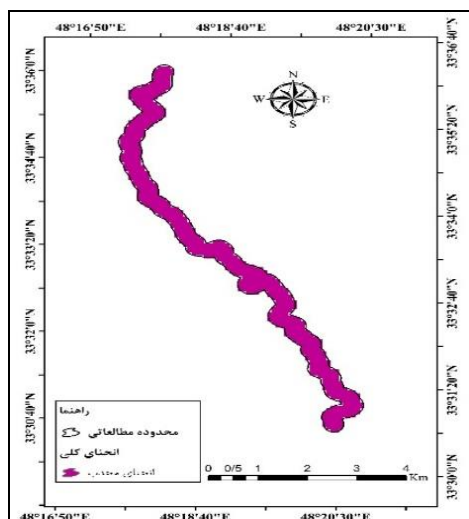
شکل (۹): نقشه سنگ‌شناسی محدوده مطالعاتی
Figure (9): Lithological map of the study area



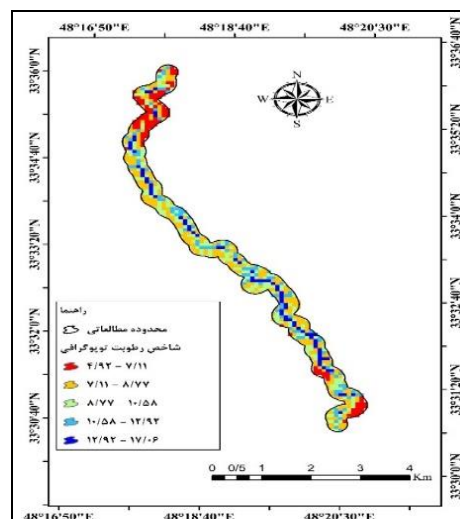
شکل (۱۲): شاخص موقعیت توپوگرافی محدوده مطالعاتی
Figure (12): Topographic position index of the study area



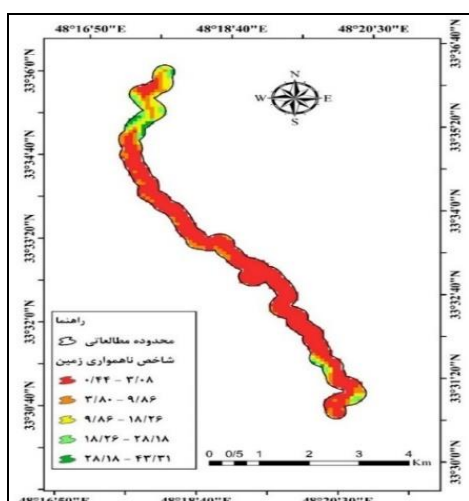
شکل (۱۱): نقشه فواصل جاده از محدوده مطالعاتی
Figure (11): Map of road distances from the study area



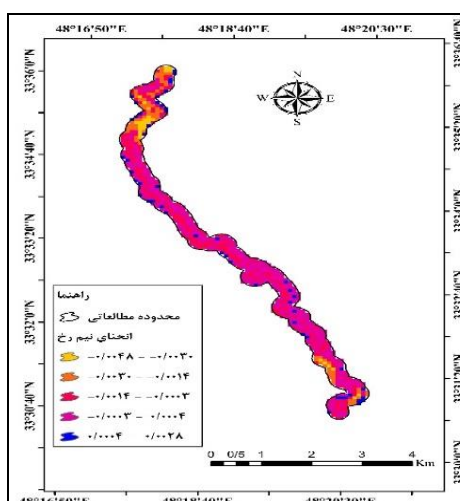
شکل (۱۴): نقشه حالت انحنا کلی محدوده مطالعاتی
Figure (14): General curvature state map of the study area



شکل (۱۳): شاخص رطوبت توپوگرافی محدوده مطالعاتی
Figure (13): Topographic humidity index of the study area



شکل (۱۶): نقشه شاخص ناهمواری سطح زمین محدوده مطالعاتی
Figure (16): Roughness index of the study area



شکل (۱۵): نقشه شاخص انحنای نیم رخ محدوده مطالعاتی
Figure (15): Profile curvature index of the study area

جدول (۳): طبقه‌بندی سازند زمین‌شناسی در حساسیت به ایجاد پیچان‌رود
Table (3): Classification of geological formations in sensitivity to the meandering

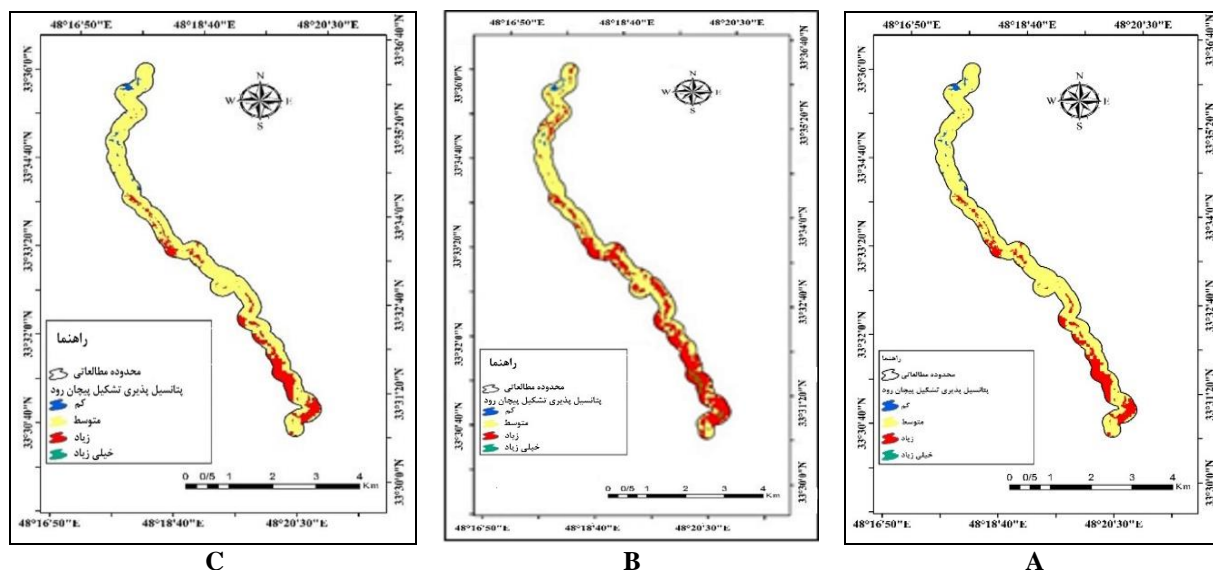
کلاس طبقه	نوع سازند
۵	گورپی
۴	رسوبات مخروط‌افکنه
۳	بنگستان
۲	آسماری
۱	امیران

ضرایب رگرسیون لجستیک کرنال و بگینگ به‌صورت بهینه، مناطقی از پیچان‌رود که نقشه‌برداری شده بود، به‌عنوان متغیر آموزشی پاسخ‌دهنده وارد مدل گردید. شکل‌های A15 تا C15

نقشه پتانسیل پیچان‌رودی شدن

نقشه‌ها پس از ورود به نرم‌افزار SAGA-GIS از طریق اکستنشن رگرسیون لجستیک به مدل معرفی شدند. سپس برای رسیدن به

به ترتیب نقشه پتانسیل تشکیل مئاندر در منطقه مورد مطالعه با لجستیک بگینگ و ماشین بردار پشتیبان را نشان می‌دهند. روش‌های رگرسیون لجستیک کرنال و بگینگ، رگرسیون



شکل (۱۷): پتانسیل تشکیل پیچان رود به روش‌های (A) KLR، (B) BKLR، (C) SVM

Figure (17): The potential of meandering by: A) KLR, B) BKLR, C) SVM methods

نشان داد که روش ماشین بردار پشتیبان به دلیل نزدیکی آماره‌های NS و CORR به یک و نیز نزدیکی مقادیر شاخص‌های ریشه مربعات خطا و میانگین درصد خطای مطلق به عدد صفر، قادر است به بهترین شکل ممکن میزان پتانسیل پیچان رودی شدن را پیش‌بینی کند.

نتایج اعتبارسنجی مدل

به منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد بررسی از معیارهای سنجش خطای نش‌ساکلیف (NS)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) و ضریب همبستگی (CORR) استفاده شد. نتایج جدول (۴)

جدول (۴): معیارهای اعتبارسنجی سه روش برآوردی پتانسیل پیچان رودی شدن

Table (4): Validation criteria of three methods for estimating meandering potential

CORR	MAPE	RMSE	NS	معیاره	روش
۰/۶۲	۰/۳۶	۰/۳	۰/۷۵	رگرسیون لجستیک کرنال	
۰/۶۱	۰/۳۹	۰/۳	۰/۷۳	رگرسیون لجستیک بگینگ	
۰/۸۵	۰/۲	۰/۱۵	۰/۸۳	ماشین بردار پشتیبان	

بحث

حالت توسعه یافته و پایدارند، زیرا در مناطق کوهستانی واقع شده و تقریباً مقاوم و فرسایش ناپذیر است. در بازه ساحلی به دلیل سست و فرسایش پذیر بودن، میزان پیچان رودی شدن می‌تواند گسترش پیدا کند و حلقه‌های پیچان رودی شدن به صورت نعل اسبی دیده شوند؛ به طوری که در قسمت میانی رودخانه یعنی کیلومتر ۸/۵ نمونه‌ای از این حالت دیده می‌شود. از لحاظ شاخص ارتفاع، در مناطقی که ارتفاع از ۱۱۹۶ تا ۱۲۵۰

در این تحقیق به بررسی پتانسیل پیچان رودی شدن و تشکیل مئاندر در رودخانه خرم‌آباد پرداخته شد. بررسی مقاطع مختلف، رودخانه به سه مقطع کلی شامل کیلومتر ۰ تا ۴ به نام بازه شمالی، کیلومتر ۴ تا ۸ بازه میانی و ۸ تا ۱۴ بازه جنوبی تقسیم‌بندی شد. بیشترین میزان پیچان رودی شدن در میانه و قسمت جنوبی رودخانه دیده شد. در بازه شمالی، بیشتر قوس‌ها

رودخانه کمک می‌کند؛ اما به دلیل اینکه اکثریت عوامل در جهت کنترلی در این مناطق (کوهستانی) عمل می‌کنند، به‌خودی‌خود مؤثر نخواهد بود.

در این پژوهش از ۳ روش برای بررسی پیچان‌رودی شدن استفاده شد. روش رگرسیون لجستیک کرنال با شرایط آسان‌تر به بررسی مناطق پتانسیل پیچان‌رود می‌پردازد؛ بنابراین وسعت و پهنه کمتری را در جهت پیش‌بینی انتخاب می‌کند. این درحالی است که روش ماشین بردار پشتیبان، سخت‌گیرانه‌تر عمل می‌کند و پهنه بیشتری را انتخاب می‌کند؛ اما روش دقیق‌تری به حساب می‌آید، زیرا مقدار آماره‌های ارزیابی RMSE و MAPE دارای حداقل مقدار یعنی ۰/۱۵ و ۰/۲ هستند و آماره‌های NS و CORR دارای حداکثر مقدار عددی یعنی ۰/۸۳ و ۰/۸۵ نسبت به دیگر روش‌ها هستند. در این همین راستا امینی و همکاران (۲۰۲۴) نیز در یک پژوهش به‌منظور بررسی پیچان‌رودی شدن رودخانه، به‌جای استفاده از روش‌های سنتی مانند مدل‌سازی عددی و تحلیلی، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده دقت مناسب این الگوریتم برای پیش‌بینی پیچان‌رودی شدن بود. این نتیجه با نتایج پژوهش حاضر مبنی بر دقت مناسب روش یادگیری ماشین بردار در پیش‌بینی مطابقت دارد. همچنین پژوهش حاضر نشان داد که روش ماشین بردار پشتیبان، سخت‌گیرانه‌تر عمل می‌کند و پهنه بیشتری را انتخاب می‌کند؛ اما روش دقیق‌تری است. لی و همکاران (۲۰۲۳) نیز در یک پژوهش با استفاده از مدل رگرسیون خطی محلی K- نزدیک‌ترین همسایه (KLR)، به تعیین مرز مقطع رودخانه پرداختند. نتایج نشان‌دهنده کارایی مناسب این روش در تعیین سطح مقطع رودخانه بود. در پژوهش حاضر نیز نشان عملکرد مناسب روش‌های مورد استفاده در پژوهش نشان داده شد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به پیش‌بینی مناطق مستعد پیچان‌رودی شدن با استفاده از ۳ مدل رگرسیونی لجستیکی کرنال (KLR)، رگرسیونی لجستیکی کرنال بگینگ (BKLR) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) در بخش شمالی رودخانه خرم‌آباد پرداخته شد. نتایج نشان‌دهنده این بود که مدل ماشین بردار پشتیبان

است، بیشترین میزان پیچان‌رودی شدن رؤیت گردید. همچنین در مناطقی که شیب از مقدار کمتری برخوردار است، می‌توان گفت که پیچان‌رودی شدن به‌علت سرعت کمتر جریان در رابطه با آن خیلی حائز اهمیت است. در مناطقی که شیب دارای جهت شرقی و جنوب شرقی است، در هر سه روش برآوردی میزان پیچان‌رودی شدن افزایش یافت، چون شیب در مناطق جنوبی کمتر است؛ بنابراین احتمال ایجاد پیچان‌رودی شدن بیشتر خواهد شد. از لحاظ کاربری اراضی، اکثر مناطق به‌دلیل نوع کاربری تحت تأثیر پیچان‌رودی شدن قرار دارند. در مکان‌هایی که در آن‌ها تلاقی رودخانه با صخره‌ها دیده می‌شود، عملاً پیچان‌رودی شدن در آن کاربری دیده نشد؛ درحالی‌که در مناطق اراضی بایر، پیچان‌رودی شدن در آن‌ها رؤیت گردید.

در مناطقی که دارای سازندهای امیران و آسماری هستند، با توجه به نوع سنگ‌شناسی، مقاومت در مقابل آب‌شویی وجود دارد؛ بنابراین کمتر در معرض پیچان‌رودی شدن قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی، سازندهای پابده و گورپی در زاگرس از لحاظ سنگ‌شناسی از نوع مارن و شیل خاکستری هستند که حالت فرسایش‌پذیر دارند و دارای توانایی بالایی برای ایجاد پیچان‌رود هستند. شاخص رطوبت توپوگرافی در سواحل رودخانه خرم‌آباد از لحاظ مقدار، عدد بالایی را نشان می‌دهد؛ در نتیجه شرایط خیزی و رطوبتی بالایی دارد و سواحل را به‌لحاظ لغزش و فرسایش مستعد نگه می‌دارند که این خود، عاملی بر پیچان‌رودی شدن است. حالت کلی که انحناى تحذب در رودخانه خرم‌آباد و حریم آن را نشان می‌دهد، در جهت ایجاد کاهش پیچان‌رودی شدن قدم برداشته است؛ زیرا سرعت جریان در این نوع انحناها بیشتر از انحناى مقعر بوده و بنابراین یک عامل بازدارنده پیچان‌رودی شده محسوب می‌شود. در حالت کلی در رودخانه خرم‌آباد با توجه به اینکه گسل و شکستگی‌ها در فاصله دور از رودخانه قرار دارند، کمترین تأثیر را در فرایند پیچان‌رودی شدن منطقه دارند؛ اما شاخص ناهمواری توپوگرافی در رودخانه خرم‌آباد نشان‌دهنده تکتونیک فعال است و مقدار عددی نسبتاً بالایی را در کل مسیر و ساحل از خود نشان می‌دهد؛ ولی در مناطق مرتفع و کوهستانی، این مقدار بیشتر از دیگر مناطق است؛ یعنی در جهت پیچان‌رودی شدن

ژئومورفولوژی این تحقیق می‌تواند نقش مهمی را در مهندسی رودخانه داشته باشد. لذا اقدامات ناشی از اصلاح مسیر، حفاظت از سواحل، لای‌روبی و برداشت شن و ماسه بدون دانش مهندسی رودخانه امکان‌پذیر نیست. در راستای پیشگیری از پیچان‌رودی شدن پیشنهاد می‌شود اقدامات حفاظتی و اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب برای کنترل تغییرات پیچان‌رودی شدن رودخانه و جلوگیری از خسارات به تأسیسات کناره‌های رودخانه‌ها بیش از پیش در منطقه مورد مطالعه اعمال گردد.

به‌دلیل پیچیدگی مدل و به‌کارگیری داده‌های بهینه می‌تواند نتایج بهتر و بهینه‌تری را نسبت به دو روش رگرسیون لجستیک کرنال و بگینگ اتخاذ نماید که ناشی از اصل استقرار و کمینه‌سازی خطای ساختاری است. شایان ذکر است که فراهم نمودن و به‌کارگیری داده‌ها و اطلاعاتی همچون جریان سیلابی، دبی‌های لحظه‌ای، سالانه، میزان بار رسوبی، هندسه مقاطع رودخانه، قوس، طول‌موج و انحنا رودخانه، فعالیت‌های انسانی و مباحث هیدرولیک رسوب می‌تواند موجب افزایش دقت در انجام پیش‌بینی پیچان‌رودی شدن شود. از دیدگاه

منابع

- Alai Taleghani, M., Hashi, F., & Ahmadi Malavardi, M. (2012). Evaluation of the human role in the bank erosion and lateral expansion of the meanders of the Gamasiab river in Biston Plain. *Geography and Environmental Sustainability*, 6, 107-120. [In Persian]
- Al-Madrasi, S.A., Khabazi, M., Aliai, & A., Shabhazi, M. (2017). Investigating the role of influencing factors on the twisting and changes of Dalki River using remote sensing and geographic information system. *Geography and Environmental Planning*, 29 (1), 165-176. [In Persian]
- Amini, H., Monegaglia, F., Shakeri, R., Tubino, M. & Zolezzi, G. (2024). Meanders on the move: Can AI-based solutions predict where they will be located?. *Water*, 16(17), 2460.
- Breiman L. (1996). Bagging predictors. *Machine learning*, 24(2), 123-140.
- Bui, D.T., Ho, T.C., Pradhan, B., Pham, B.T., Nhu, V.H., & Revhaug, I. (2016). GIS-based modeling of rainfall-induced landslides using data mining-based functional trees classifier with AdaBoost, Bagging, and MultiBoost ensemble frameworks. *Environmental Earth Sciences*, 75(14), 1101.
- Baboli Moakher, H., & Negahban, S. (2021). Investigating land surface form characteristics based on morphometric indices and using GIS, case study: Fahlian watershed. *Geography (Quarterly Scientific Research and International Journal of Geographical Society of Iran)*, (19) 68.
- Chepi, K., Talebpour, D., & Shirzadi, A. (2017). Comparison of logistic regression and Bayesian logistic regression models in order to predict the location of mass movements in Kurdistan province. *Quantitative Geomorphology Research*, 7(2), 60-81. [In Persian]
- Dai, F.C., & Lee, C.F. (2002). Landslide Characteristics and Slope in Stability Modeling using GIS Lantau Island Hong Kong. *Geomorphology*, 42, 213-228.
- Eshghi, P., Farzad Mehr, J., Dastorani, M.T., & Arab Asadi, Z. (2016). Investigating the effectiveness of intelligent models in estimating river suspended sediments (case study: Baba Aman watershed, North Khorasan). *Research paper on watershed management*, 7 (14): 95-88. [In Persian]
- Gregory, K.J. (2006). The human role in changing river channels. *Journal of Geomorphology*, 79,172-191.
- Gu, L., Zhang, S., He, L., Chen, D., Blanckaert, K., Ottevanger, W., & Zhang, Y. (2016). Modeling flow pattern and evolution of meandering channels with a nonlinear model. *Water*, 8(10): 418. [In Persian]
- Güneralp, I., & Rhoads, B.L. (2010). Spatial autoregressive structure of meander evolution revisited. *Geomorphology*, 120, 91-106.
- Jafari Rudsari, M., Jalali, S., Samadi Ghashlaghchayi, M., & Samadi Arghini, H. (2016). Morphometric analysis of the Gorganrood basin using GIS. *National Geospatial Conference*.
- Kumar, S. S., Pandey, M., & Shukla, A. K. (2024). Spatio-temporal analysis of riverbank changes using remote sensing and geographic information system. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 136, 103692.
- Lee, S.A. (2004). Verification of spatial logistic regression for landslide susceptibility analysis: A case study of Korea. *J. Geomorphology*, 44, 15-18.
- Lee, T., Park, J., Hwang, S., & Singh, V. (2023). Nonparametric estimation method for river cross-sections with point cloud data from UAV photography U River-X version 1.0 methodology development. *Geosci. Model Dev. Discuss.* <https://doi.org/10.5194/gmd-2023-57>, 2023. [preprint]

17. Mokhtari, M.H., & Najafi, A. (2016). Comparison of classification methods of support vector machine and artificial neural network in extracting land uses from Landsat TM satellite images. *Journal of Water and Soil Sciences*, 19, (72). [In Persian]
18. Mostafazadeh, R., Esfandyari Darabad, F., Naseri, A., Abyat, A., & Adhami, M. (2023). Determining the fractal pattern in a reach of Qharesou river, Ardabil province, Northwest of Iran. *Hydrogeomorphology*, 10(37), 97-81. [In Persian]
19. Naseri, N., Shayan, S., & Sharifi Kia, M. (2016). Analysis of morphological factors in changes in the spatial and spatial pattern of Alvand River. *Geographical Research Quarterly*. No.1. [In Persian]
20. Nath, D. A., & Ghosh, D. S. (2024). Geo-Spatial Analyzes Meandering Rivers, Assessing Past and Future Impacts on Bank Landforms and Lulc Changes. Available at SSRN 4687790.
21. Nohegar, A., & Yamani, M. (2012). Investigation of the geomorphological situation of Pichan River and its role in the erosion of the Minab River bed and banks (downstream of the Minab Dam). *Geographical Research Quarterly*, No. 51. [In Persian]
22. Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R., & Nourmohammadi, F. (2016). Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Nat Hazards*, 82, 1231-1258.
23. Rajabi, M., Raushi, S., & Akbari, B. (2018). Investigating the meandering pattern of the Aji Chai river using central angle indices and curvature coefficient (the range between Boshaiish to Khajahe). *Hydrogeomorphology*, 6(20), 21-40. [In Persian]
24. Rezaei Moghaddam, M.H., Sarvati, M.R., & Asghari Sareskanrood S. (2012). Investigation of geometric alterations of Gezel Ozan River considering Geomorphologic and Geologic parameters. *Geography and Environmental Planning*, 23(2), 1-14. [In Persian]
25. Roza, G., Nogueira, A.C., & Castro, S. (2014). Remote sensing based analysis of the planform changes in the Upper Amazon River over the period 1716- 2226. *Journal of South American Earth Sciences*, 41, 21-44.
26. Shahi Nejad, B. & Dehghani, R. (2017). Evaluation and Performance of Support Vector Machine Model in Estimation of Suspended Sediment, *Irrigation and Water Engineering*, 8(1): 30-42. [In Persian]
27. Sainath, P.A., Shashikant, I.B., Pragati, P.D., & Ravindra D.G. (2012). River Changee Detecation and Bank Erosion Identification using Topographical and Remote Sensing Data. *International. Journal of Applied Information Systems*, 2(3): 1-7.
28. Solhi, S., & Khosravi, G. (2020). Using a New method in the Terrain Landscape Classification of Iran. *Quantitative Geomorphological Research*, 9(3), 132-154. [In Persian]
29. Wang, X., Niu, R., & Wu, K. (2011). Lithology intelligent identification using support vector machine and adaptive cellular automata in multispectral remote sensing image. *Optical Engineering*, 50, 7.
30. Yamani, M., Rahimi, M., & Vesey, A. (2014). Morphometry and comparison of latitudinal changes of Aras River during the last three decades, case study: downstream of Mil Moghan Dam. *Quantitative Geomorphology Research*, 3(4), 74-89. [In Persian]
31. Yamani, M., & Sharfi, C. (2013). Geometrical parameters and their role in time-spatial changes of river beds, a case example: Harud River, a tributary of Karkhe River in Kurdistan Province. *Journal of Geography and Development*. 26. [In Persian]
32. Zarei, M., Zandi, R., Naemitabar, M., 2022. Assessment of Flood Occurrence Potential using Data Mining Models of Support Vector Machine, Chaid and Random Forest (Case study: Frizi watershed). *Journal of Watershed Management Research*, 13(25), 133-144. [In Persian]

Identifying Meander Formation-Prone Areas Using Logistic Regression and SVM Models: A Case Study of Part of Khorramabad River

Yahya Karimi,¹ Ali Haghizadeh,^{2*} Alireza Sepahvand³

Received: 25/08/2024

Accepted: 01/01/2025

Extended abstract

Introduction: Analyzing the morphological patterns of rivers is crucial for better comprehension of the rivers' current status and their potential for prospective alterations, thereby enabling effective river management. Meandering is one of the most important river issues that influences human activities along riverbanks. Therefore, this study sought to prepare the map of meander formation-prone areas using Kernel Logistic Regression (KLR), Bagging Kernel Logistic Regression (BKLR), and Support Vector Machine (SVM) models in the northern part of Khorramabad River, Lorestan Province.

Materials and methods: The data used in this study included the land use data extracted from Sentinel-2 satellite images, digital elevation model, slope and aspect, geology, and lithology, distance from the fault, distance from the road, topographic wetness index, and some geometric attributes such as topographic position index, profile curvature index, plain curvature index, and terrain ruggedness index, together with the data obtained from field surveys. To this end, a Sentinel-2 satellite image of the study area taken on 15/05/2021 with less than 10% cloud cover and no geometric errors was extracted from the European Space Agency website. Moreover, pre-processing (geometric and radiometric) of the image was performed in ENVI5.3 software and SNAP software, which are specifically designed for processing Sentinel satellite images. Then, atmospheric correction was applied using the Sen2Cor plugin in SNAP software. Subsequently, land use was estimated using a supervised maximum likelihood classification method based on pixel-level training samples. To study meandering in the northern part of the Khorramabad River, a 200-meter buffer zone was considered based on river topography, agricultural lands, access network, and other relevant factors. All input layers in Arc GIS and SAGA-GIS were clipped based on the 200-meter buffer map and entered into the model. On the other hand, 70% of the total data collected for meandering analysis was used for training the model and the remaining 30% was used for testing the model. It should be noted that the training samples used in this study consisted of samples of meandered cases along the studied waterway. Finally, to compare the performance of different models and select the best one for generating meandering potential maps, RMSE, MAPE, NS, and CORR error metrics were used.

Results: This study investigated the potential of the Khorramabad River for meandering and meander formation. To analyze different parts of the river, three main segments were designated, including the northern part consisting of kilometers 0 to 4, the middle part consisting the kilometers 4 to 8, and the southern part consisting the kilometers 8 to 14. The meandering potential was generally assessed in all three parts mentioned above. Accordingly, the highest level of meandering was observed in the middle and southern parts of the river. On the other hand, most of the meanders found in the northern part were well-developed and stable, as they are located in mountainous areas, thus being relatively tough and erosion-resistant. In the coastal zone, due to the soft and erodible nature of the sediments, meandering may expand, and meanders can develop into horseshoe shapes, an example of which can be observed in the middle part of the river, i.e., at kilometer 8.5. As the topographic

1. MSc in Watershed Management Engineering, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2. Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran; Haghizadeh.a@lu.ac.ir

3. Associate Professor, Department of Range and Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran

position index along the river displays a concave pattern, this factor tends to promote meandering both in the longitudinal and lateral directions of the river. However, in areas with a convex pattern, the factor hinders meandering.

The high numerical value of the topographic wetness index along the banks of the Khorramabad River which indicates high moisture and wetness conditions makes the banks susceptible to landslides and erosion, which in turn contributes to meandering. Moreover, it can be argued that the overall condition of convex curvature in Khorramabad River and its floodplain has contributed to a decrease in meandering, as the flow velocity is higher in convex bends compared to the concave ones, thereby acting as an inhibiting factor for meandering. While the curvature of the profile varies at nearly every pixel level, its values tend towards negative in parts where the river is located near ridges, indicating increased erosion. Conversely, positive values suggest increased sedimentation due to a decrease in flow velocity.

Characterized by simpler conditions, the Kernel Logistic Regression Method examines areas with the potential for meandering, thus selecting a smaller and narrower extent for prediction. In contrast, the Support Vector Machine Method acts more strictly and selects a broader range. However, the method is considered to be more accurate, as RMSE and MAPE evaluation statistics bear the minimum values of 0.15 and 0.20, respectively, while the NS and CORR statistics enjoy the maximum values of 0.83 and 0.85 compared to other methods, respectively.

Conclusion: Meandering in the river located north of Khorramabad is a process influenced by geomorphological and hydrological features, leading to agricultural land degradation, reduced production, and increased suspended sediment load. From a geomorphological perspective, this study can play a significant role in river engineering. Therefore, activities such as channel modification, shoreline protection, dredging, and sand mining cannot be carried out without knowledge of river engineering.

Keywords: Meandering, Khorramabad River, Riverbank, Remote sensing, Land Use, SAGA-GIS.