

## ارزیابی و پیش‌بینی فرسایش شیاری با استفاده از روش داده‌کاوی و داده‌های سنجش از دور (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز خسویه در استان فارس)

رضا ذاکری نژاد\* - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.  
پریوش الوندی - دانشجوی دکتری رشته ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۵      تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۰۳/۲۴

### چکیده

فرسایش آبی امروزه به عنوان یکی از عوامل اصلی بیابان‌زایی و تخریب سرزمین در بسیاری از مناطق خصوصاً در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌گردد. از میان انواع مختلف اشکال فرسایش آبی، فرسایش شیاری یکی از مهمترین عوامل هدر رفت خاک، تغییر منظر و منابع آب و تخریب اراضی است. در زمینه اشکال مختلف فرسایش آبی مطالعات زیادی صورت گرفته‌است، ولی تحقیقات اندکی در زمینه فرسایش شیاری صورت گرفته‌است. کشور ایران نیز با توجه به شرایط اقلیمی و توپوگرافی متنوع آن، این نوع از فرسایش خاک به صورت وسیعی خصوصاً در مناطق کوهستانی و شیب‌دار گسترش یافته‌است. در این پژوهش، به شناسایی عوامل موثر در فرسایش شیاری، پیش‌بینی و پهنه‌بندی آن با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (Maxent) در حوضه آبخیز خسویه در استان فارس پرداخته شده‌است. در ابتدا موقعیت شیارها را با استفاده تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و بازدیدهای میدانی تهیه گردید و سپس در محیط نرم افزار GIS لایه رقمی شیارها تهیه گردید، در مرحله بعدی شاخص‌های فیزیوگرافی با استفاده از داده‌های Tan DEM-X با دقت تفکیک 12.5 متر در نرم افزار SAGA-GIS تهیه گردید. در این تحقیق با عملیات میدانی در منطقه مورد مطالعه و نمونه برداری از خاک نقشه بافت خاک تهیه گردید. لایه نقشه‌های کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی نیز با استفاده از تصاویر ماهواره‌های سنیتل-۲ و لندست تهیه گردید. جهت اجرای این مدل، از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد برای تست مدل استفاده شده گردید، که در نهایت تاثیر گذارترین شاخص‌ها مشخص شدند. جهت اعتبار سنجی مدل جهت پهنه‌بندی فرسایش شیاری منطقه مورد مطالعه با استفاده از منحنی ROC و مساحت زیر منحنی (AUC) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که شاخص شیب، کاربری اراضی و فاصله از ابراهه تاثیر گذارترین شاخص‌ها در ایجاد فرسایش شیاری می‌باشند. میزان AUC برای داده‌های آموزشی و اعتبار سنجی مدل بکار برده بیشتر از 0/94 بوده که در سطح عالی می‌باشد. برنامه ریزی مناسب جهت حفاظت خاک با روش‌های بیولوژیک و مکانیک در نواحی حساس به فرسایش شیاری به عنوان اولویت‌های اصلی در حوضه آبخیز مورد حفاظت خاک بسیار ضروری می‌باشد.

واژگان کلیدی: فرسایش شیاری، مدل مکسنت، پهنه‌بندی، خسویه، GIS.

## مقدمه

فرسایش خاک یک تهدید جدی برای رفاه و زندگی انسان است. خطر فرسایش خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به ویژه در مناطق کوهستانی نیمه‌خشک، یکی از موارد مهم در مدیریت زمین است (Bou-Imajane et al., 2020). فرسایش خاک به عنوان یکی از عوامل اصلی بیان زایی و تخریب سرزمین در نواحی وسیعی از کشور ایران به خصوص مناظر خشک و نیمه خشک محسوب می‌گردد (Masoudi & Zakerinejad, 2010; Razkerinejad & Maerker, 2015). فرسایش آبی با توجه به اهمیت و نحوه‌ی شکل‌گیری به چهار گروه شامل فرسایش پاشمانی، آبراه‌ای، شیاری و آب‌کندی تقسیم می‌شوند (احمدی، ۱۳۷۸؛ عرب خدردی، ۱۳۹۳). فرسایش شیاری عبارت‌اند، از جدا شدن و انتقال رسوب به وسیله جریان متمرکز آب در کانال باریک و فرسایش‌پذیر است (Bagnol, 1966). این فرسایش حدود ۷۰ تا ۵۰ درصد از کل فرسایش خاک را در بر می‌گیرد (Bruno et al., 2008; Zhang et al., 2022). شیارهای به وجود آمده منبع عمده تولید رسوب در دامنه‌های شیبدار است (Cerdan, et al, 2002). این نوع از فرسایش آبی غالباً دارای عرض و عمق ۲-۲۰ سانتیمتر ( ) بوده که موجب جدایش و انتقال ذرات خاک می‌گردد که عرض و عمق شیارها نیز تابعی از حجم و سرعت رواناب بوده که کمتر مورد تحقیق قرار گرفته است ( ; Zheng and Gao, 2003; Ou et al., 2021; , 2003). فرسایش شیاری به عنوان آغازین مرحله فرسایش آب‌کندی از اهمیت بسیاری برخوردار است. فرسایش شیارها نه تنها موجب از بین رفتن قابل توجه خاک و آب در مزارع شیبدار شده، بلکه باعث از بین رفتن عمده مواد مغذی خاک سطحی و در نتیجه باعث تخریب اراضی و آلودگی رودخانه‌های پایین دست می‌شوند (Lei et al., 2008; Hie et al., 2013). به طور کلی شکل‌گیری فرسایش شیاری در ارتباط با عوامل مختلف سطحی و زیرزمینی مانند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سازند، بافت خاک، شرایط آب و هوایی، وضعیت توپوگرافی منطقه و همچنین میزان و وضعیت پوشش گیاهی می‌باشد (رفاهی، ۱۳۸۲). به دلیل پیچیدگی این نوع از اشکال فرسایش آبی در مقایسه با دیگر اشکال آن مطالعات اندکی خصوصاً در ایران صورت گرفته است (Zakerinejad et al., 2021). یان<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۸)، با استفاده به مدلسازی فرسایش شیاری با استفاده از پارامترهای عرض شیار، طول شیار، درجه شیب، شدت باران و تنش برشی بحرانی خاک پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که، که ظرفیت انتقال، محدود به فرآیندهای رسوبگذاری و حداکثر غلظت رسوب ممکنه در خروجی شیار می‌باشد. علاوه بر این، ترکیبی از قابلیت فرسایش شیار و ظرفیت انتقال آن، میزان فرسایش در طول یک شیار را تعیین می‌کند. کیمارو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۸)، با اندازه‌گیری فرسایش شیاری و بین شیاری در شیب شمالی یکی از کوهستان‌های تانزانیا پرداختند. نتایج این تحقیق هدر رفت خاک توسط فرسایش شیاری را بیشتر از فرسایش بین شیاری، بین ۹۱ تا ۲۵۸ تن در هکتار در سال را نشان دادند، بیانگر اهمیت فرسایش شیاری بیشتری نسبت به فرسایش بین شیاری به ویژه در شیب‌های بالای ۴۰ می‌باشد. مورنودلاسهراس<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، در بررسی اثرات زیست محیطی فرسایش شیاری روی دامنه‌های خشک مدیترانه‌ای نشان دادند که، ازدست رفتن آب توسط شبکه شیارها منجر به افزایش استرس آب در گیاهان در حال رشد شده و باعث کاهش غیر خطی بیومس و غنای گونه‌ای و بروز شرایط نامطلوب برای استقرار گیاهان می‌گردد. در یک مطالعه دیگر در حوضه آبخیز تهم‌چای زنجان نیز با بررسی اثر شیب و ویژگی‌های خاک در شکل‌گیری فرسایش شیاری نشان دادند که، تندی شیب مهمترین خصوصیت توپوگرافی موثر در شکل‌گیری فرسایش شیاری است (واعظی و همکاران، ۱۳۹۵).

<sup>۱</sup>- Yan<sup>۲</sup> Kimaro<sup>۳</sup> Moreno-de las Heras

پورنادر<sup>۱</sup> و همکاران (۱۳۹۷)، نیز به بررسی کارایی روش حداکثر آنتروپی در تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری فرسایش شیاری در حوضه گلگل استان ایلام پرداختند. آنها در این مطالعه، ده عامل فرسایش شیاری شامل؛ ارتفاع، درصد شیب، ابعاد، شاخص قدرت جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از آبراهه، انحنای طول، سنگ شناسی، کاربری اراضی و خاک را در فرایند مدل‌سازی استفاده نمودند. نتایج ارزیابی عملکرد روش ME با استفاده از شاخص مساحت زیر منحنی (AUC) نشان داد که میزان ROC برای آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۶۷ و ۰/۷۹۴ بوده است. این محققین در بیان داشتند که، روش ME دارای کارایی بالایی می‌باشد و میتواند ابزار خوبی برای تولید نقشه‌های حساس به فرسایش شیاری باشد و همچنین خروجی آن میتواند برای حفاظت خاک در مناطق مشابه است. مرکز<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، با ارزیابی حساسیت فرسایش بدلندی و شیاری در ایتالیا با استفاده از مدل آنتروپی حداکثر، مدل خطی تعمیم یافته و رویکرد درخت رگرسیون تقویت شده نشان دادند که شاخص های موثر در توزیع فضایی فرسایش آبی در منطقه مورد مطالعه شامل، نوع خاک، شیب، ارتفاع و شاخص رطوبت توپوگرافی است. در مطالعه‌ی که اخیرا در حوضه آبخیز سمیرم در جنوب استان اصفهان با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (مکسنت) جهت تهیه نقشه خطر فرسایش آبی برای اشکال فرسایشی خندقی، شیاری و ورقه ای و با استفاده از شاخص های تاثیر گذار در منطقه مورد مطالعه صورت گرفت. نتایج این مطالعه از قابلیت مدل این مدل در پهنه‌بندی نقشه خطر اشکال فرسایش آبی خصوصا برای اشکال خندقی و شیاری می‌باشد (Zakerinejad et al., 2021). واعظی<sup>۳</sup> و محمدی (۱۴۰) نیز با بررسی الگوی تغییرات زمانی تولید رواناب و فرسایش شیاری نشان دادند که الگوی تغییرات زمانی تولید رواناب و فرسایش شیاری تحت تأثیر نوع خاک (بافت و ساختمان) و شیب سطح قرار می‌گیرند. لذا ارزیابی و پهنه‌بندی فرسایش اشکال آبی خصوصا فرسایش شیاری جهت حفاظت خاک بسیار ضروری می‌باشد (Borrelli et al., 2021; Ban & Lei, 2022; Qi et al., 2023).

حوضه آبخیز خسویه در جنوب شرق استان فارس، به دلیل شرایط خاص اقلیمی و توپوگرافی تحت تاثیر شدید انواع اشکال فرسایشی به ویژه فرسایش شیاری و خندقی می‌باشد که موجب تولید رسوب زیادی در پایین دست حوضه می‌شود (ذاکری نژاد، ۱۳۹۹؛ ذاکری نژاد و الوندی، ۱۴۰۲). لذا شناسایی شاخص های تاثیر گذار و همچنین تهیه نقشه پهنه‌بندی مناطق پر خطر فرسایش شیاری با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی، از اهداف این تحقیق می‌باشد.

### منطقه مورد مطالعه

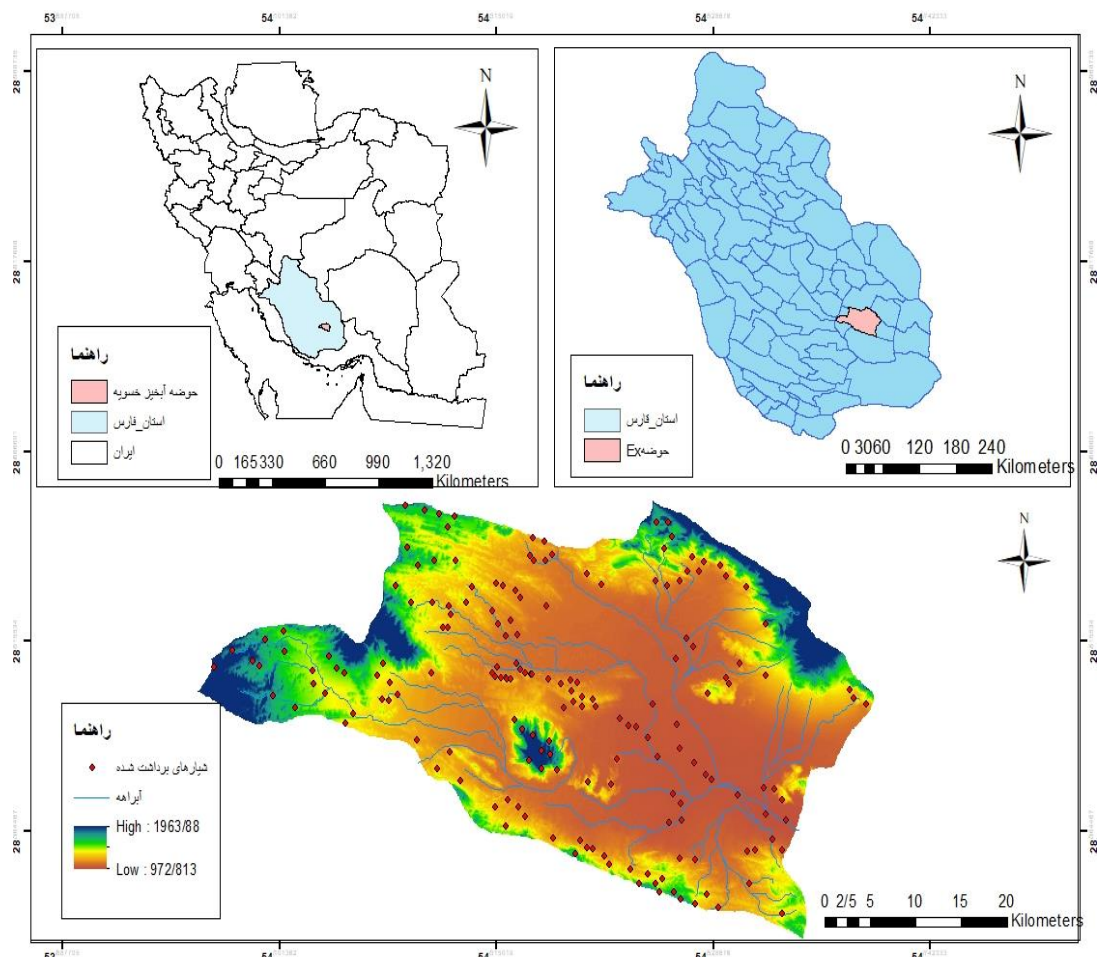
حوضه مورد مطالعه منطقه مورد مطالعه به وسعت ۱۳۹۲،۴۸ کیلومتر در ۳۳۷ کیلومتری شیراز بین ۵۴ درجه ۹ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴۲ دقیقه طول شرقی و ۲۸ درجه ۱۸ دقیقه تا ۲۸ درجه ۳۹ دقیقه عرض شمالی در جنوب شرقی استان فارس در شهرستان زرین دشت واقع شده است (شکل ۱). دمای متوسط سالانه ماهانه به ترتیب ۲۱/۹۱ و ۱۹/۰۹ درجه سانتی گراد همچنین بیشینه و کمینه دمای میانگین حوضه به ترتیب ۳۳/۰۹ و ۹/۷۸ درجه سانتی گراد مربوط به ماه های تیر و دی میانگین بارندگی سالانه ایستگاه خسویه ۲۲۱/۵۴ میلی متر و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا حدود ۱۱۵۰ متر می‌باشد(خرم و موسوی نسب، ۱۳۹۲). شرایط اقلیمی حوضه مورد مطالعه خشک تا معتدل است و از نظر زمین شناسی، محدوده ی خسویه – حاجی آباد در پهنه چین خورده زاگرس واقع شده است از ویژگی های اصلی این پهنه وجود چین های متوالی با روند شمال – جنوب شرق و دشت های کشیده بین این چین ها است سازندهای رخنمون شده در این محدوده به ترتیب

<sup>۱</sup> Pournader

<sup>۲</sup> Maerker

<sup>۳</sup> Vaezi, Mohammadi

قدمت سازند های ساچون، آسماری، جهرم، گچساران، میشان، آغاچاری، بختیاری و رسوبات عهد حاضر می‌باشد. در شکل ۲، نمونه هایی از فرسایش خندقی منطقه آورده شده است.



شکل ۱: موقعیت حوضه آبخیز خسویه و اشکال فرسایش شبیری



شکل ۲: نمونه ای از فرسایش شبیری در حوضه مورد مطالعه

## روش تحقیق

در این پژوهش، هدف پیش بینی فرسایش شیاری حوضه آبریز خسویه با استفاده از شاخص های تاثیر گذار بر رخداد فرسایش شیاری و مدل حداکثر آنتروپی (مکسنت) است. لذا ابتدا موقعیت شیارها را از طریق بررسی های میدانی، عکس های هوایی و تصاویر ماهواره ای گوگل ارث (Landsat, Copernicus) ثبت گردیده و سپس نقشه های فیزیوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت شیب، طول شیب، شیب نسبی، فاصله عمودی تا کانال شبکه، رطوبت توپوگرافی، همگرایی، طول انحناء، قدرت جریان، جریان تجمعی، فاصله از آبراهه، عمق کانال)، با استفاده از داده های مدل رقومی ارتفاع DEM -X Tan- با قدرت تفکیک ۱۲ متر در محیط نرم افزار SAGA-GIS بعد از اعمال پیش پردازش های لازم (رفع خطاهای هیدرولوژیک) (Planchon & Darboux, 2002)، تهیه شد (شکل ۳). شایان ذکر هست که خطاهای هیدرولوژیک مدل رقومی ارتفاع در اساس انتخاب فاکتورهای مورد بررسی در مطالعات گوناگون دیگر پژوهشگران که درباره فرسایش آبی در نقاط متفاوت جهان صورت گرفته است (Zakerinejad & Maerker, 2014; Zakerinejad et al., 2021; Congtan et al., 2023; Iro et al., 2023; Wilkinson et al., 2023).

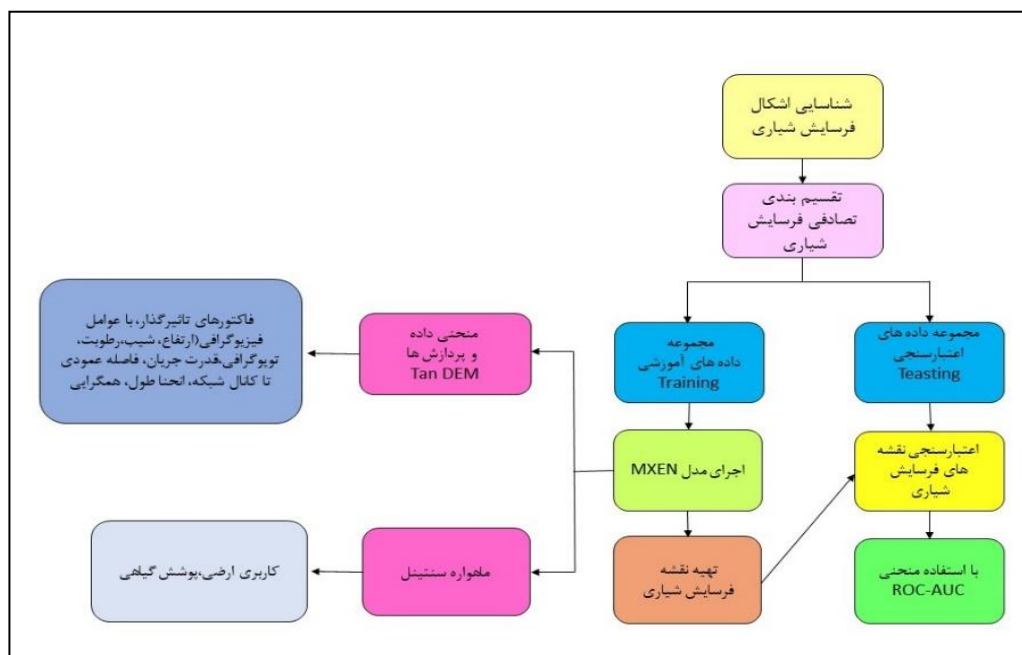
نقشه پارامتر های پوشش گیاهی و کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست ۸ و سنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۱ در نرم افزار Arc GIS 10.8 تهیه گردید. نقشه شاخص خاک شناسی (بافت خاک) با استفاده از نمونه های جمع آوری شده از کار میدانی و تهیه نقشه بافت خاک با استفاده از توابع درون یابی (IDW) تهیه گردید. در جدول ۱ شاخص های مورد استفاده در این تحقیق به عنوان متغیرهای مستقل و روش تهیه هر یک از شاخص آورده شده است. بعد از تهیه نقشه شاخص های تاثیر گذار (شکل ۴) به عنوان شاخص های مؤثر بر رخداد فرسایش شیاری و همچنین رقومی نمودن نقاط فرسایش شیاری در سرتاسر حوضه مورد مطالعه به عنوان لایه های ورودی در مدل استفاده گردید. در این مطالعه از مدل حداکثر آنتروپی (مکسنت) استفاده شده که این مدل یکی از فناوری های ماشین یادگیری (MLTs) است که قابلیت پیش بینی مکانی بالایی در زمینه های مختلف علوم محیطی دارد (Zakerinejad & Maerker, 2014; Zakerinejad et al., 2018). مدل پیشینه آنتروپی براساس اصل آنتروپی شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین کرده که بر اساس نقش هر متغیر مستقل و وزن تاثیر و منحنی پاسخ آن به دست می آید (Rahmati, 2019). مدل حداکثر آنتروپی بر اساس اصل آنتروپی، شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین نموده که بر اساس نقش هر متغیر مستقل و وزن تاثیر و منحنی پاسخ آن به دست می آید. این مدل قادر است توزیع احتمالاتی داده های هریک از لایه های رستری مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی استخراج نماید. مدل آنتروپی این توزیع ها بر اساس رابطه ۱ قابل محاسبه است.

$$(1) H(\pi) = - \sum_{x \in X} \pi(x) \ln \pi(x) \quad (1)$$

که در آن  $H(\pi)$  مقدار آنتروپی توزیع احتمالاتی متغیرموردنظر،  $\ln$  لگاریتم طبیعی،  $x$  مقدار ارزش هر سلول و  $X$  مجموعه ای از داده های یک لایه رستری است. توزیع احتمالاتی Gibbs برای هریک از متغیرهای مستقل مطابق رابطه ۲ به دست می آید.

$$(2) q_{\lambda}(x) = (e^{-\lambda \cdot f(x)}) / Z_{\lambda} \quad (2)$$

که در آن  $q_{\lambda}(x)$  تابع توزیع  $\lambda$ ، Gibbs وزن متغیرموردنظر،  $Z_{\lambda}$  ثابت نرمال کننده تابع Gibbs هستند. به منظور تعیین رابطه وقایع فرسایش خندقی، هریک از عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی، باید بر اساس "اصل آنتروپی" و استخراج منحنی های پاسخ یادگیری ماشین صورت گیرد (پورنادر و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین برای بررسی اعتبار مدل نهایی از شاخص سطح زیر منحنی (AUC) برای منحنی ROC استفاده شد. چنانچه سطح زیر منحنی بیش از ۰/۹ باشد، قدرت تشخیص مدل بسیار عالی در نظر گرفته می شود.



شکل ۳: فلوجارت روش تحقیق

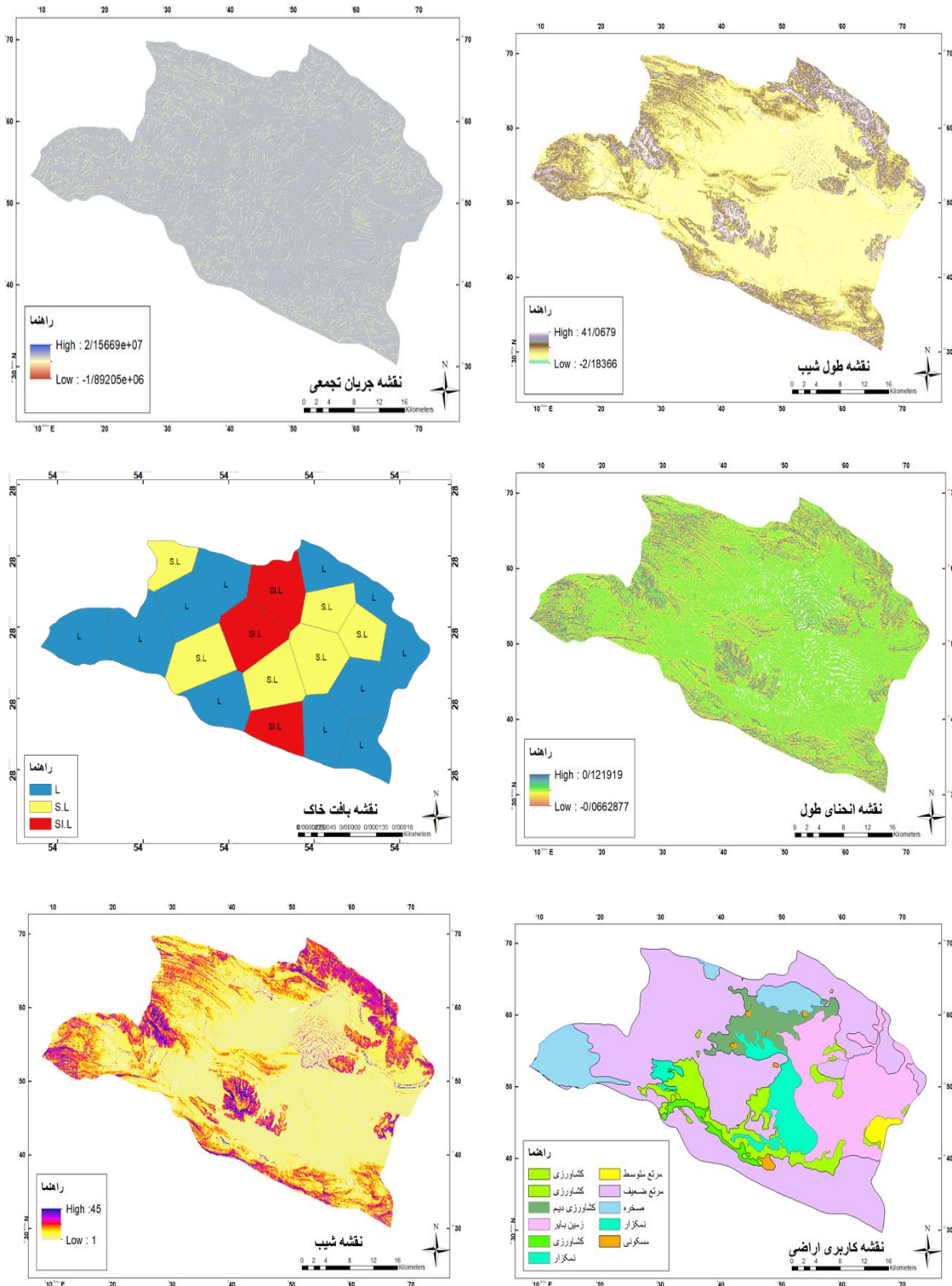
جدول ۱: معیار های تاثیر گذار بر فرسایش خندقی حوضه آبریز خسویه

ردیف	معیارها	روش مورد استفاده	ردیف	معیارها	روش مورد استفاده
۱	شاخص قدرت ابراهه	الیا و کنارد <sup>۱</sup>	۱۰	موقعیت شیب نسبی	الیا و کنارد
۲	شاخص رطوبت توپوگرافی	الیا و کنارد	۱۱	انحنای طولی	زوربرگن و تورن
۳	طول شیب	زوربرگن و تورن <sup>۲</sup>	۱۲	شاخص عمق ابراهه	الیا و کنارد
۴	ارتفاع	مدل رقومی ارتفاع	۱۳	زمین شناسی	سازمان زمین شناسی
۵	جریان تجمعی	الیا و کنارد	۱۴	تراکم پوشش گیاهی	لندست ۸
۶	شاخص فاصله عمودی تا شبکه کانال	الیا و کنارد	۱۵	کاربری اراضی	سنتینل ۲
۷	شاخص همگرایی	کوته و لحمیر <sup>۳</sup>	۱۶	بافت خاک	نمونه های خاک و انجام آزمایش بافت خاک
۸	شیب	زوربرگن و تورن	۱۷	فاصله از ابراهه	تابع فاصله اقلیدوسی
۹	جهت شیب	زوربرگن و تورن	۱۸	سایه روشن	زوربرگن و تورن

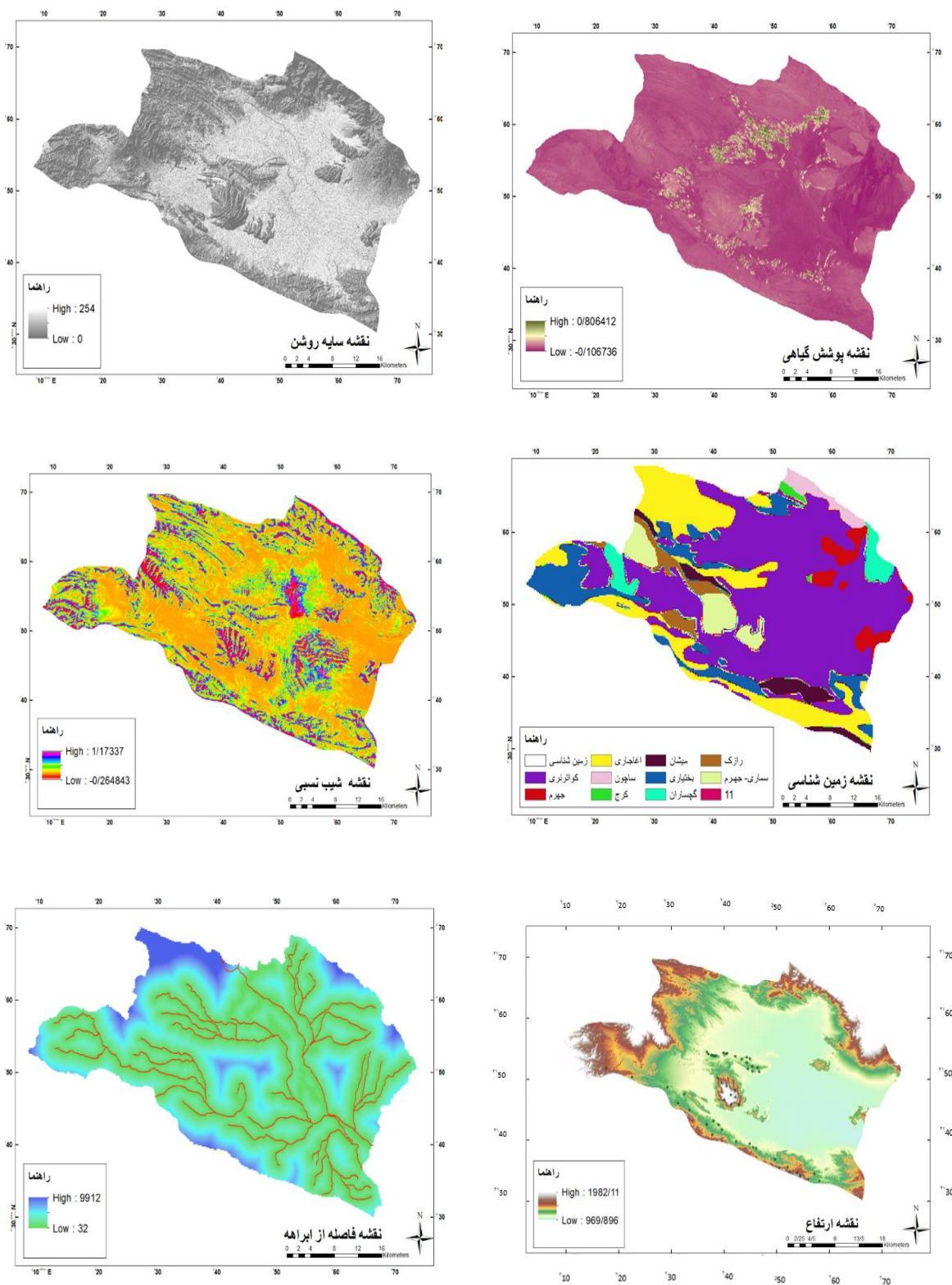
<sup>۱</sup> Elia & Kennard

<sup>۲</sup> Zorbergen Wetorn

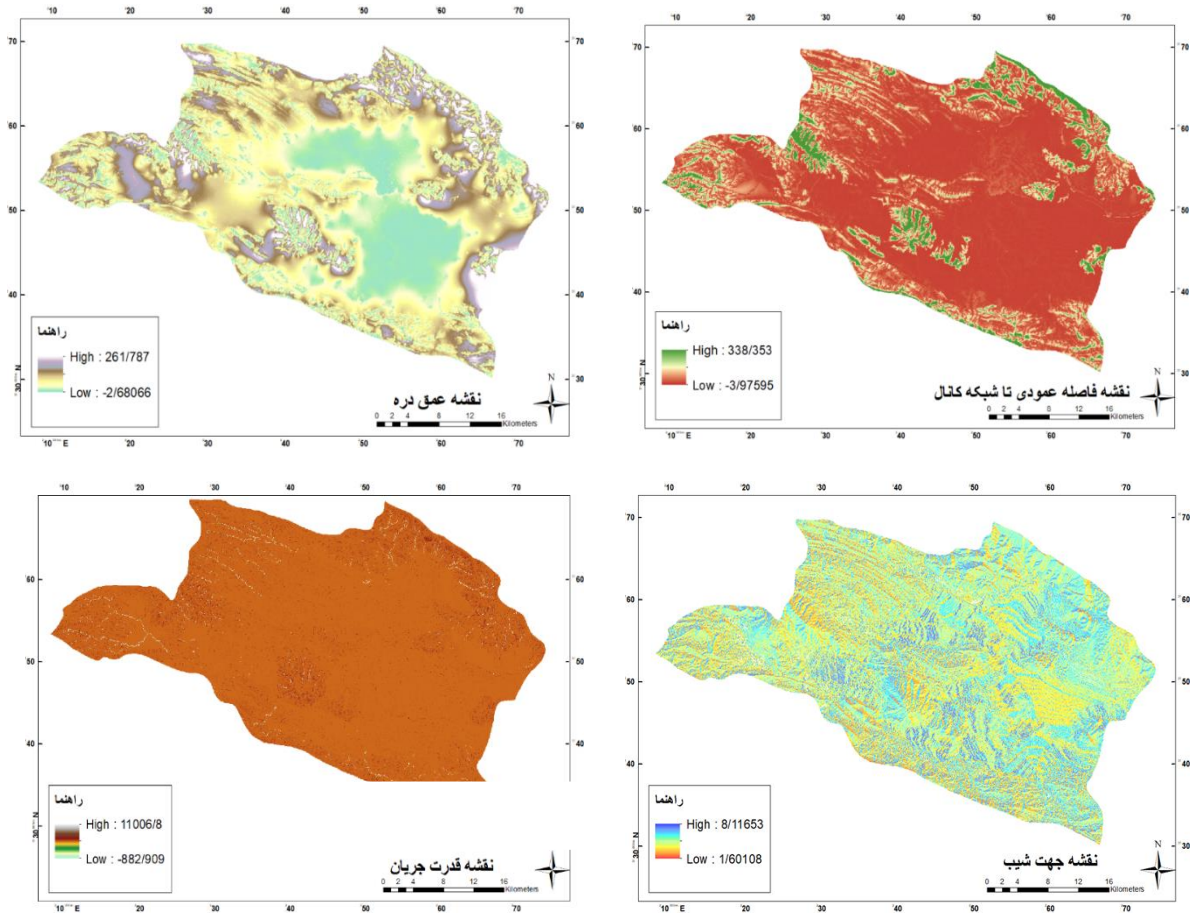
<sup>۳</sup> Short & short



شکل ۳: نقشه پارامترهای تاثیرگذار در مدل سازی فرسایش شیاری در حوضه آبخیز مورد مطالعه



ادامه شکل ۳: نقشه پارامترهای تاثیرگذار در مدلسازی فرسایش شیاری در حوضه آبخیز مورد مطالعه



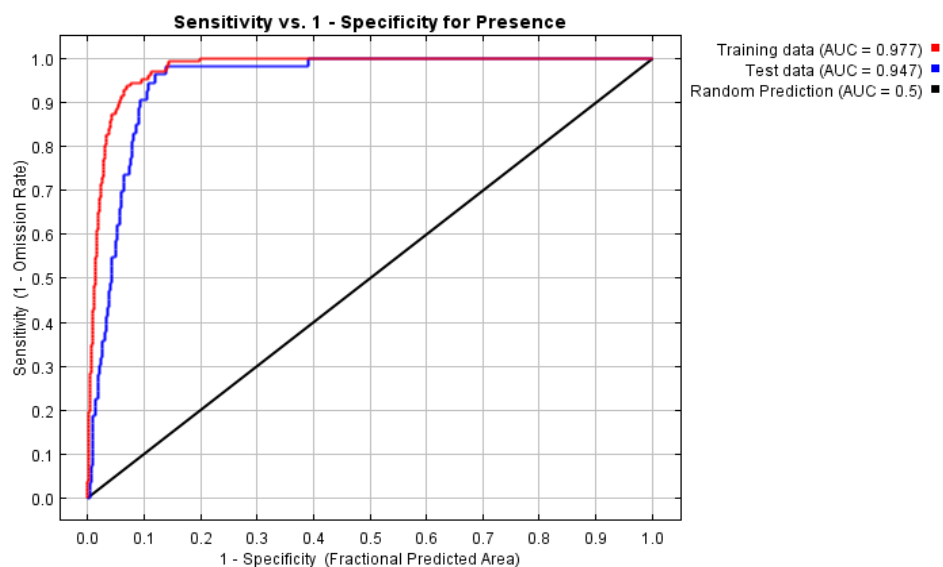
ادامه شکل ۳: نقشه پارامترهای تاثیر گذار در مدل سازی فرسایش شیاری در حوضه آبخیز مورد مطالعه

### یافته های پژوهش

در این مطالعه جهت پهنه بندی فرسایش شیاری به عنوان یکی از اشکال فرسایش آبی با استفاده از تهیه شاخص های تاثیر گذار به عنوان متغیرهای ورودی به مدل مسکنت و همچنین با رقومی کردن نواحی دارای فرسایش صورت گرفت. همچنین جهت اجرای این مدل نیز به ترتیب ۷۰ و ۳۰ درصد نقاط فرسایش شیاری جهت آموزش و صحت سنجی استفاده گردید. خروجی های این مدل علاوه بر پهنه بندی نقشه خطر همچنین شناسایی متغیرهای مهم تاثیر گذار بر رخداد این نوع فرسایش آبی می باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین پارامترهای تاثیر گذار بر فرسایش شیاری منطقه به ترتیب عبارتند از شیب (۵۰٪)، کاربری اراضی (۱۵/۶٪)، فاصله از آبراهه (۱۲/۸٪) و تراکم پوشش گیاهی (۱۰/۷٪) می باشند و کمترین پارامتر تاثیر گذار نیز جهت جریان تجمعی (۱/۰) می باشند (جدول ۲). همانطور که در قبلا اشاره گردید در این تحقیق نیز جهت اعتبار سنجی نتایج از منحنی ROC استفاده گردید. که نتایج نشان داد که مقدار AUC به ترتیب برای نقاط آموزشی و اعتبار سنجی مدل ۰/۹۷ و ۰/۹۴ می باشند (شکل ۴)، که نشان دهنده سطح عالی نتایج می باشد (Hosmer & Lemeshow, 2000). که بیانگر این می باشد که مدل مسکنت توانایی بالایی در پهنه بندی مناطق خطر فرسایش شیاری در حوضه مورد مطالعه می باشد.

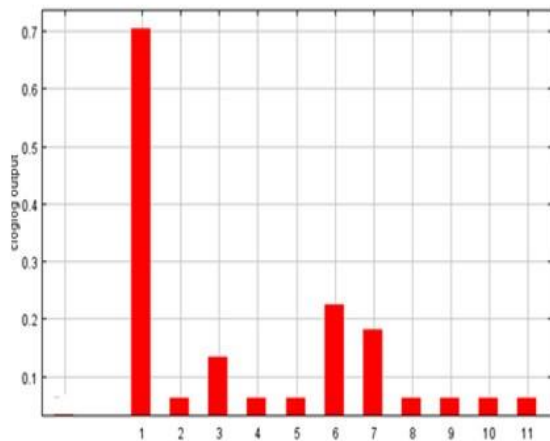
جدول ۲: میزان مشارکت (تاثیر گذاری) هریک از شاخص‌های مورد استفاده در مدل مکسنت

درصد مشارکت	شاخص‌ها
۵۰	شیب
۱۵/۶	کاربری اراضی
۱۲/۸	پوشش گیاهی
۱۰/۷	فاصله از ابراهه
۴	عمق آبراهه
۱/۴	ارتفاع
۱/۳	رطوبت توپوگرافی
۱/۲	همگرایی
۱/۲	بافت خاک
-۰/۷	انحنای طولی
-۰/۶	سایه روشن
-۰/۴	شیب نسبی
-۰/۳	زمین شناسی
-۰/۳	قدرت جریان
-۰/۲	جهت شیب
-۰/۲	فاصله عمودی تاشبکه کانال
-۰/۲	طول شیب
-۰/۱	جریان تجمعی

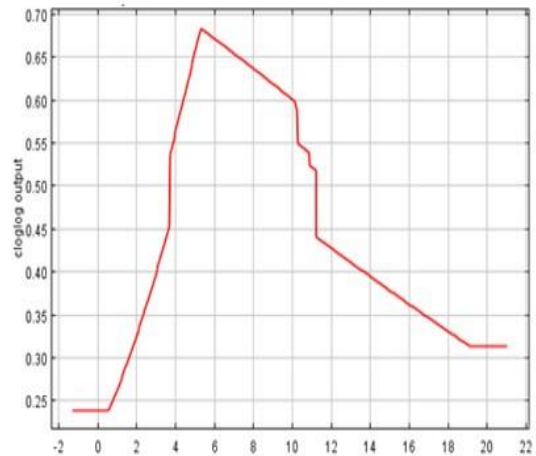


شکل ۴: منحنی بررسی اعتبار مدل خطر فرسایش شیاری حوضه آبریز خسویه

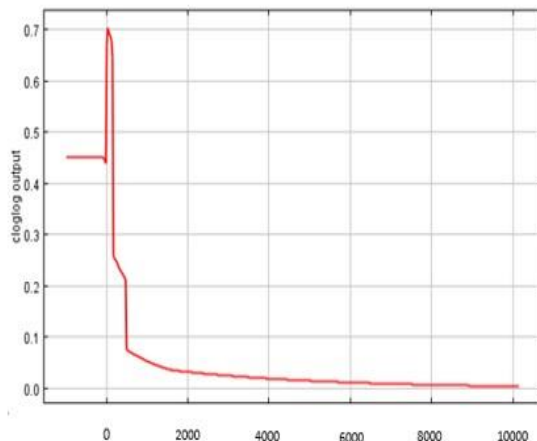
با توجه شکل ۵ (منحنی پاسخ شاخص های تاثیر گذار در این مطالعه)، تاثیرگذارترین شاخص شیب بوده که طبق منحنی پاسخ این شاخص، هرچه مقدار میزان شیب در حوضه مورد مطالعه افزایش کند، میزان فرسایش شیاری نیز در منطقه کاهش پیدا کرده است (شکل ۱-۵). دومین شاخص تاثیر گذار کاربری اراضی می باشد، که با توجه به نمودار مربوطه بیشترین کاربری تأثیرگذار بر رخداد فرسایش شیاری، مراتع ضعیف و متوسط، نمکزارها و اراضی کشاورزی است (شکل ۲-۵). منحنی پاسخ سومین شاخص مهم تاثیر گذار در این تحقیق، عامل پوشش گیاهی می باشد، که کمترین میزان فرسایش را در تراکم های بالا (بیشتر از ۰/۴) می باشد، که این بیانگر تاثیر بالای نقش پوشش گیاهی در تثبیت خاک و جلوگیری از فرسایش آبی به خصوص فرسایش شیاری می باشد به عبارتی دیگر با توجه به این نمودار تراکم های کمتر از ۰/۲ دارای بیشتر حساسیت نسبت به فرسایش شیاری را دارند (شکل ۳-۵). نمودار فاصله از آبراهه به عنوان چهارمین شاخص تأثیرگذار بر پهنه بندی فرسایش شیاری بوده که نشان می دهد که هرچه فاصله از آبراهه کمتر باشد، میزان فرسایش نیز افزایش پیدا می کند و رابطه معکوسی بین آنها وجود دارد (شکل ۴-۵).



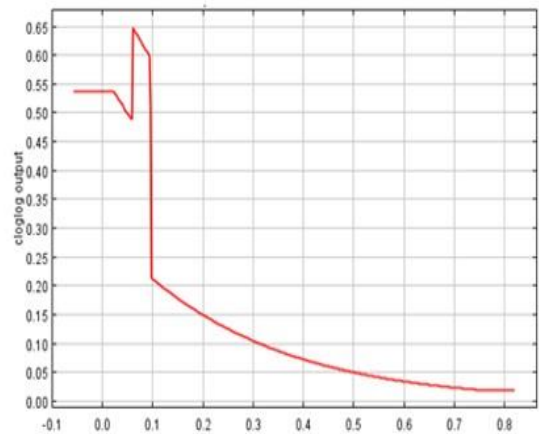
۲-نمودار کاربری اراضی (محور افقی کدهای مربوط به انواع اراضی)



۱-نمودار شیب (محور افقی درصد شیب)



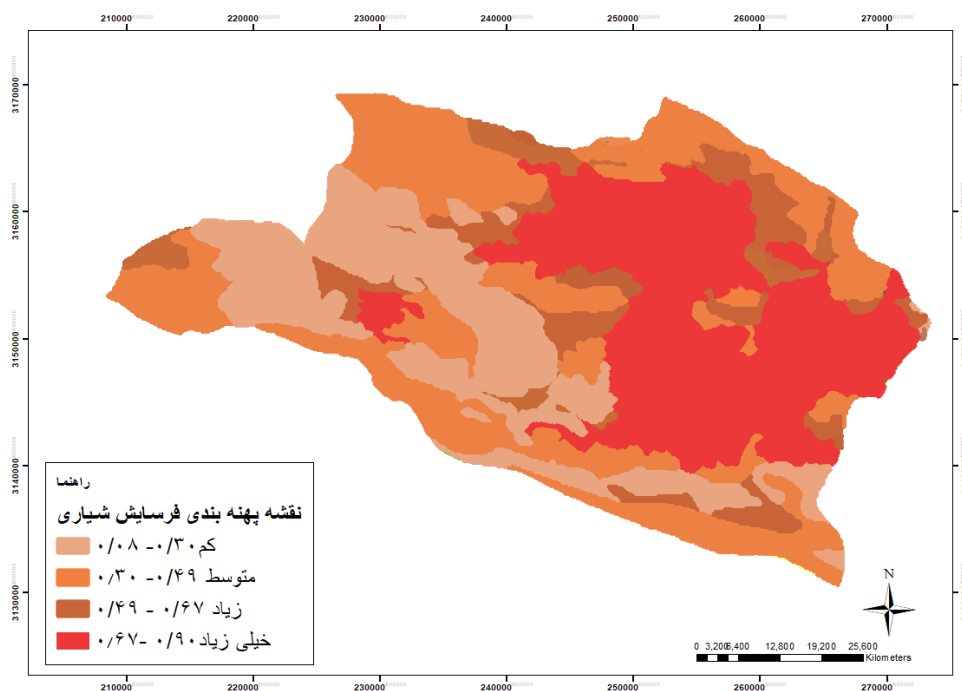
۴-نمودار فاصله از آبراهه (محور افقی فاصله بر حسب متر)



۳-نمودار پوشش گیاهی (محور افقی مقدار شاخص NDVI)

شکل ۵: منحنی پاسخ چهار شاخص با بیشترین اثر گذاری در تهیه نقشه خطر فرسایش شیاری

شکل ۶ نقشه کلاس بندی شده خطر فرسایش شیاری با استفاده از مدل مکسنت در حوضه آبخیز خسویه جنوب شرق استان فارس را نشان می‌دهد. این نقشه که دارای ارزش عددی بین ۰ تا ۱ می‌باشد که اعداد نزدیک به ۱ بیانگر کلاس خطر بالاتری نسبت به رخداد این نوع فرسایش آبی می‌باشد، در حالی که ارزش‌های نزدیک به صفر بیانگر پتانسیل کم از جهت رخداد فرسایش شیاری می‌باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد. با توجه به این نقشه مناطق شرق و جنوب شرق حوضه مورد مطالعه در کلاس‌های شدیدتری نسبت به سایر نواحی این حوضه می‌باشند.



شکل ۶: نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش شیاری حوضه آبخیز خسویه

### بحث و نتیجه‌گیری

فرسایش آبی به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب سرزمین و بیابان‌زایی در بسیاری از حوضه‌های آبریز ایران می‌باشد (Masoudi & Zakerinejad, 2010; Masoudi & Zakerinejad, 2011). نتایج حاصل از سطح زیر منحنی (AUC) در این مطالعه برای نقاط آموزشی و اعتبارسنجی بیشتر از 0/947 بوده، که بیانگر پیش‌بینی بالای مدل در پهنه‌بندی مناطق فرسایش شیاری در حوضه آبخیز خسویه در جنوب شرق استان فارس می‌باشد. همچنین نتایج مدل در این پژوهش نشان داد که شاخص شیب بیشترین تاثیر و اهمیت را دارد و میان شیب و مناطق مستعد فرسایش شیاری رابطه معکوس وجود دارد هرچقدر شیب کمتر باشد میزان فرسایش شیاری در منطقه بیشتر است. در واقع فرسایش شیاری در دامنه‌های مختلف تحت تاثیر شیب آنها بوده که علت آن را میتوان به نقش شیب در کاهش ماندگاری آب روی سطح و کاهش فرصت نفوذ آب جاری، افزایش سرعت جریان و در نتیجه فرسایش شیاری بیان کرد (ذاکری نژاد ۱۳۹۹؛ واعظی و همکاران،

۱۴۰۰؛ بالینزا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ انگاینو-مارلز<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۸) یکی دیگر از شاخص های تاثیر گذار در فرسایش شیاری منطقه کاربری اراضی است که با توجه به نقشه کاربری حوضه مورد مطالعه مساحت وسیعی از حوضه آبخیز خسویه دارای کاربری مرتع ضعیف می باشد که عامل مهمی در ایجاد فرسایش شیاری می باشد، این نتایج با پژوهش سایر محققین مرتبط می باشد (یوسفی فرد و همکاران، ۱۳۸۵؛ چن و همکاران، ۲۰۱۶). دیگر شاخص تاثیر گذار بر فرسایش شیاری در حوضه مورد مطالعه پوشش گیاهی می باشد که در مناطقی که پوشش گیاهی کم و تنک بوده میزان فرسایش شیاری نیز بیشتر می باشد. لازم به ذکر است که عامل پوشش گیاهی نقش بارزی در کنترل فرسایش خاک دارد و با افزایش پوشش گیاهی می توان میزان فرسایش را کاهش داد (ذاکری نژاد و مسعودی، ۲۰۱۹؛ ذاکری نژاد و همکاران ۲۰۱۸؛ مرکر و همکاران، ۲۰۲۰). لذا ایجاد پوشش گیاهی مناسب در مناطق کم خطر برای جلوگیری از پیشرفت نرخ فرسایش و همچنین جلوگیری از چرای بیش از حد ظرفیت دام در مراتع در این حوضه پیشنهاد می گردد. همچنین پیشنهاد می شود از ساخت ساز و کاربری های انسانی در نزدیکی مناطق پرخطر و امر تغییر و توسعه کاربری ها و استفاده بیش از زمین جلوگیری گردد. همچنین پیشنهاد می گردد در مطالعات آتی به مقایسه سایر روش های داده کاوی و مقایسه آن ها و همچنین استفاده از سایر شاخص های معیار خاک همانند شوری خاک، ماده آلی، ضریب رواناب و عمق خاک مورد استفاده قرار گیرد.

#### منابع

- احمدی، حسن (۱۳۷۸). ژئومورفولوژی کاربردی، جلد اول، فرسایش آبی، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۳۴ ص.
- پژوهش، م.، گرجی، م.، طاهری، م.، سرمیدیان، ف.، مجمدی، ج.، صمدی، ح. (۱۳۹۰). اثر کاربری اراضی مختلف حوضه سد زاینده رود علیا در تولید رسوب با استفاده از GIS. مجله پژوهش آب ایران، ۵ (۲): ۱۴۳-۱۵۲.
- رفاهی، ح. ق. (۱۳۸۸). فرسایش آبی و کنترل آن، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۶۷۲-۱.
- عرب خدری، م. (۱۳۹۳). مروری بر عوامل مؤثر بر فرسایش آبی خاک در ایران، نشریه مدیریت اراضی، دوره ۲، شماره ۱، صص ۱۷-۲۶.
- خرم، م.، موسوی نسب، ز. (۱۳۹۲). بررسی هیدروژئوشیمی منابع آب زیر زمینی دشت خسویه - حاجی آباد، زرین دشت فارس، انجمن زمین شناسی ایران.
- واعظی، ع و محمدی، الف. (۱۴۰۰). الگوی تغییرات زمانی تولید رواناب و فرسایش شیاری در خاک ها و درجات مختلف شیب. علوم آب و خاک. ۱۴۰۰؛ ۲۵ (۴): ۱۹۰-۳۱.
- واعظی، ع.، قره داغلی، ح.، مرزوان، س. (۱۳۹۴). بررسی نقش شیب و ویژگی های خاک در ایجاد فرسایش شیاری در دامنه ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز تهم چای، شمال غرب زنجان). نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۳(۱۴): ۸۳-۱۰۰.
- ذاکری نژاد، ر. (۱۳۹۹). ارزیابی مدل های رقومی ارتفاع جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از مدل مکسنت و سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبخیز سمیرم، جنوب استان اصفهان؛ نشریه سنجش از دور سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۱(۳)، ۱۲۲-۱۰۶.
- ذاکری نژاد، ر.، الوندی، پ. (۱۴۰۲). پیش بینی فرسایش خندقی با استفاده از داده های X-TanDEM و مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خسویه). پژوهش های فرسایش محیطی، ۴۹ (۱): ۱۳.
- Anguiano-Morales, M., Corral-Martínez, L.F., Trujillo-Schiaffino, G., Salas-Peimbert, D.P., García-Guevara, A.E. (2018). *Topographic investigation from a low altitude*

<sup>1</sup> Beullens

<sup>2</sup> Anguiano-Morales

- unmanned aerial vehicle. *Oppt. Lasers. Eng.* 110, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.05.015>
- Bagnold, R. A. (1966). *An approach to the sediment transport problem from general physics.* US government printing office, 10.3133/pp422I.
  - Battany, M. and Grismer, M. (2000). Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards: effects of slope, cover and surface roughness. *Hydrological Processes*. 14(7): 1289-1301.
  - Bai, S.B., Wang, J., Lü, G.N., Zhou, P.G., Hou, S.S. and Xu, S.N. (2010). GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 115(1-2), pp.23-31. [doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00045-4).
  - Ban, Y.Y., Lei, T.W. (2022). Mathematical method for physics-based rill erosion process using detachment and transport capacities. *Sci Rep* 12, 4812 [doi.org/10.1038/s41598-022-08512-6](https://doi.org/10.1038/s41598-022-08512-6).
  - Bruno, C., Di Stefano C., Ferro V. (2008). Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy. *Earth Surf Process Landf* 33:263-279. <https://doi.org/10.1002/esp.1544>
  - Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C. et al. (2017). An assessment of the global impact of the 21st century land use change on soil erosion. *Nat. Commun.* 8, 1–13, DOI:10.1038/s41467-017-02142-7.
  - Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis, *Science of The Total Environment*, Volume 780, 146494. [doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494).
  - Beullens, J., Van de Velde, D., Nyssen, J. (2014). Impact of slope aspect on hydrological rainfall and on the magnitude of rill erosion in Belgium and northern France. *CATENA* 114, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.10.016>.
  - Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturer, A., Bourennane, H., Souchere, V. (2002). Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil and Tillage Research*. 67: 99-108. [doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00045-4).
  - Chen, X.Y., Y.H. Huang, Y. Zhao, B. Mo and H.X. Mi. (2015). Comparison of loess and purple rill erosions measured with volume replacement method. *Journal of Hydrology*, 530: 476-483, [doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.001).
  - Chen, X.Y., Zhao, Y., Mi, H.X., Mo, B. (2016). Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method. *CATENA* 136, 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.013>.
  - Hosmer D.W. & Lemeshow S. (2000). *Applied Logistic Regression*, 2<sup>nd</sup> Ed. Wiley, Newyork, 392 Pp.
  - Hieke, F., Schmidt, J. (2013) The effect of soil bulk density on rill erosion - Results of experimental studies. *Zeitschrift fur Geomorphologie* 57, 245–266. [doi.org/10.1127/0372-8854/2012/0091](https://doi.org/10.1127/0372-8854/2012/0091).
  - Liu, C., Fan, H., Jiang, Y., Ma, R., Song, S. (2023). Gully erosion susceptibility assessment based on machine learning-A case study of watersheds in Tuquan County in the black soil region of Northeast China, *CATENA*, 222, [doi.org/10.1016/j.catena.2022.106798](https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106798).
  - Iro, S., Duru PN., Achalonu CA. (2022). The use of Remote Sensing and GIS Methodology in the Analysis of Urualla Gully Erosion site Imo State Nigeria. *J Environ Sci Curr Res*. 5, 030.

- Kimaro, D.N., Poesen, J., Msanya, B.M., & Deckers, J.A. (2008). Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interrill and rill erosion. *J. Catena.*, 75:38. [doi.org/10.1016/j.catena.2008.04.007](https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.04.007).
- Khorram, M., Mousavi Nasab, Z. (2013). Hydrogeochemistry of Groundwater Resources in Khasoyeh Plain - Hajiabad, Zarrin Dasht Fars. Iranian Geological Society. (in Persian)
- Lei, T. W., Zhang, Q. W., Yan, L. J., Zhao, J., and Pan, Y. H. (2008). A rational method for estimating erodibility and critical shear stress of an eroding rill. *Geoderma*, 144(3-4), 628-63
- Morgan, R.P.C. (2005). *Soil erosion and conservation*. Malden, MA: Blackwell Publishing
- Moreno-de las Heras, M., Espigares, T., Merino-Martín, L., Nicolau, J.M. (2011). Water-related ecological impacts of rill erosion processes in Mediterranean-dry reclaimed slopes. *Journal of Catena*, Vol. 84: PP. 114-124.
- Masoudi, M & Zakerinejad R. (2010). Hazard assessment of desertification using MEDALUS model in Mazayjan plain, Fars province, Iran. *Ecology, Environment and Conservation Journal*. 16 (3): 425-430.
- Masoudi M., Zakerinejad R. (2011). A new model for assessment of erosion using desertification model of IMDPA in Mazayjan plain, Fars province, Iran. *Ecol Environ Conserv* 17(3):489-594.
- Wilkinson, S. N., Rutherford, I.D., Brooks, A.P., Bartley, R. (2023). Achieving change through gully erosion research. *Earth Surf. Process. Landforms*. 1-9
- Maerker, M., Bosino, A., Scopesi, C., Giordani, P., Firpo, M., Rellini, I. (2020). Assessment of calanchi and rill-interrill erosion susceptibility in northern Liguria, Italy: A case study using a probabilistic modelling framework. *Geoderma*, 371, p.114367 <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114367>.
- Ou, X., Hu, Y., Li, X., Guo, S., Liu, B. (2021). Advancements and challenges in rill formation, morphology, measurement and modeling, *CATENA*, Volume 196, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104932>
- Pournader, M., Ahmadi, H., Feiznia, S., Karimi, H. and Peirovan, H.R. (2018). Spatial prediction of soil erosion susceptibility: An evaluation of the maximum entropy model. *Earth Science Informatics*, 11(3), pp.389-401.
- Planchon, O & Darboux, F. (2002). A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena*, 46(2): 159-176. [doi:https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00164-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00164-3)
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H, Feizizedeh, B. (2019). Assessing the effectiveness of the maximum entropy model to gully erosion susceptibility prediction in the Kashkan-Poldokhtar Watershed <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.118040>,
- Yan, L. J., Lei, T. W., Zhang, Q. W., Qu, L.Q. (2008). Effects of transport capacity and erodibility on rill erosion processes; A model study using the Finite Element method. *Journal of Geoderma*, Vol. 146: PP. 114-120 <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.05.009>.
- Zakerinejad, R & Märker, M. (2014). Prediction of Gully Erosion Susceptibilities using detailed Terrain Analysis and Maximum Entropy Modeling: A case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran, *Geografia Fisicae Dinamica Quaternaria*, 37(1): 67-76
- Zakerinejad, R., & Maerker, M. (2015). An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*, 79: 25-50.

- Zakerinejad R, Omran A, Maerker M, Hochschild V (2018). Assessment of gully erosion in relation to lithology in the Southwestern Zagros Mountains, Iran using ASTER data, GIS and stochastic modeling, *Geogr FIS DIN QUAT*, (ISSN: 0391-9838) (41.2).
- Zakerinejad, R., Sommer, C., Hochschild, V., Maerker, M. (2021). Spatial distribution of water erosion using stochastic modeling in the southern isfahan province, Iran. 2021; *Geogr FIS DIN QUAT* 44. (2): 203–216.
- Zakerinejad R, Masoud M (2020). Quantitative mapping of desertification risk using modified MEDALUS model: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran. *AUC Geographica* 54(2), 232–239.
- Zhang, J., Zhou, L. & Huang, D. (2022). Development of rill erosion on bare sloping farmland under natural rainfall conditions. *Environ Earth Sci* 81, 264 <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10383-z>