پیش‌بینی فرسایش خندقی با استفاده از داده‌های TanDEM-X و مدل حداکثرآنتروپی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خسویه)

رضا ذاکری نژاد*: *استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان*

پریوش الوندی: *دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته ژئومورفولوژی و آمایش محیطی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان*

نوع مقاله: پژوهشی

مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۹)

چکیده

فرسایش خندقی یکی از مخاطره‌آمیزترین انواع فرسایش آبی است که موجب تخریب اراضی و برهم خوردن تعادل منابع زیستی و محیط زیست می‌شود. در این مطالعه، به شناسایی عوامل مؤثر در فرسایش خندقی، پیش‌بینی و پهنه‌بندی فرسایش خندقی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (Maxent) در حوضه آبخیز خسویه در استان فارس پرداخته شد. ابتدا موقعیت خندق‌ها از طریق بررسی‌های میدانی، عکس‌های هوایی و با استفاده تصاویر نرم‌افزار گوگل ارث تهیه گردید و سپس در محیط نرم‌افزار GIS لایه رقومی خندق‌ها نیز به‌صورت نقطه‌ای شد، در مرحله بعدی شاخص‌های فیزیوگرافی حوضه را از داده‌های TanDEM-X با قدرت تفکیک ۱۲ متر در نرم‌افزار SAGA-GIS تهیه شد. در این تحقیق با عملیات میدانی در منطقه موردمطالعه و نمونه‌برداری از خاک و انجام آزمایش نقشه بافت خاک در نرم‌افزار GIS تهیه شد و نقشه کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌های سنتینل و لندست تهیه گردید و سپس هر یک از شاخص‌ها به خندق‌ها در محیط GIS اضافه شد. برای اجرای مدل حداکثر آنتروپی (Maxent) از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای آزمون مدل استفاده شده است. در این مطالعه با استفاده از آزمون جک نایف میزان تأثیر هر یک از شاخص‌ها بر دیگر شاخص‌ها مشخص شده که در نهایت تأثیرگذارترین شاخص‌ها معرفی شد. جهت اعتبار سنجی مدل جهت پهنه‌بندی فرسایش خندقی منطقه موردمطالعه با استفاده از منحنی (ROC) و مساحت زیر منحنی (AUC) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که شاخص ارتفاع وکاربری اراضی پوشش گیاهی و عمق آبراهه تأثیرگذارترین شاخص‌ها در ایجاد فرسایش خندقی است و میزان AUC=0/947 در سطح عالی است.

واژگان کلیدی: فرسایش خندقی، TanDEM، خسویه، مدل حداکثر آنتروپی

* **نویسنده مسئول:** r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

۱- مقدمه

از میان فرسایش‌های آبی، بادی و یخچالی، فرسایش ناشی از آب هر ساله خسارات گسترده‌ای را در سراسر جهان وارد می‌کند. فرسایش آبی با توجه به اهمیت و نحوی شکل‌گیری به چهار گروه شامل فرسایش پاشمانی، آبراهه‌ای، شیاری و آبکندی (خندقی) تقسیم می‌شود (Arab Ameri et al,2015) که فرسایش آبکندی (گالی زایی) پدیده‌ای معمول در آب‌وهوای مناطق مختلف خصوصاً نواحی خشک و نیمه‌خشک است که مناطق وسیعی با شرایط مورفولوژیکی، خاک‌شناسی و آب‌وهوایی متفاوت را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Gholami et al, 2017; Zakerinejad & Maerker, 2014). در واقع این نوع فرسایش هر چند مساحت کمتری نسبت به سایر اشکال فرسایش آبی را در برمی‌گیرد ولی به دلیل تولید رسوب بیشتر و از دست رفتن خاک موجب خسارات فراوان به اراضی، راه‌ها وسازه‌های عمرانی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Poesen et al, 2003; Valentin et al, 2016; Nikpour et al, 2005)، از این رو برای جلوگیری از رشد سریع خندق‌ها یا به حداقل رساندن خسارت ناشی از آن‌ها بااستفاده ازپهنه‌بندی نقشه خطر و شناسایی عوامل مؤثر بر آن می‌توان خطر وقوع این فرسایش را کاهش داد (Tahmasebipour et al, 2015; Zakerinejad, 2020) لذا لزوم بررسی و مطالعه این فرسایش و دلایل ایجاد و تعیین عوامل مؤثر، ضروری است (Besharti et al, ۲۰۱۸).

در یک مطالعه‌ای که به پهنه‌بندی فرسایش‌های خندقی حوضه رودخانه توربولو در جنوب ایتالیا با استفاده از نقاط خندقی برداشت شده و عوامل محیطی مؤثر بر آن در محیط GIS پرداخت شد، که برای تهیه نقشه حساسیت از تجزیه تحلیل دو متغیره استفاده نموده‌اند، که نتایج این تحقیق نشان داده است که دقت ارزیابی مدل در پهنه‌بندی نقشه خطر فرسایش خندقی ۸۸ درصد است. علاوه بر آن نتایج نشان داد که فراوانی خندق‌ها در مناطق فاقد پوشش گیاهی یا با پوشش ضعیف، دامنه‌های مقعر و شیب‌های بالا ۲۰ درصد بیشتر است (Conforti et al, 2011). در سال‌های اخیر استفاده از داده‌کاوی و مدل‌های آماری در پهنه‌بندی فرسایش آبی مطالعات فراوانی انجام شده است. در بسیاری از تحقیقات انجام شده در زمینه تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی و زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های از جمله تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و مدل فازی (FUZY) استفاده شده که کارایی این مدل‌ها را در پهنه‌بندی این نوع فرسایش‌ها را نشان می‌دهد (Dhianaufal et al, 2018; Habibi 2016 Zhu et al, 2014). ولی اخیراً در تحقیقی که با استفاده مدل حداکثر آنتروپی (مسکنت) برای اولین بار جهت تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی و به‌کارگیری شاخص‌های توپوگرافی در حوضه آبخیز مزایجان استان فارس انجام گرفت، که نتایج پژوهش بیانگر دقت بالای این مدل در پهنه‌بندی و تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی را نشان داد و مزیتی که این مدل در ارائه نمودن صحت پیش‌بینی برای ارزیابی نقشه تولید شده را دارد (Zakerinejad & Maerker, 2014). در مطالعه‌ای دیگر که توسط Ebrahim و همکاران (2018) انجام گردید، به بررسی توان مدل‌های وزن شواهد (WofE) و نسبت فراوانی (FR) جهت پیش‌بینی مکانی حساسیت به فرسایش خندقی و توصیف شرایط حساسیت در حوضه سنگان کلات صوت گرفت که نتایج نشان داد، نقشه حساسیت به فرسایش تولید شده توسط مدل نسبت فراوانی (AUC-۸۶/۳۲) در پیش‌بینی نسبت به مدل وزن شواهد (AUC-۷۳/۴۹) عملکرد بهتری در پیش‌بینی داشته است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

استفاده از روش آماری رگرسیون لجستیک نیز در تهیه نقشه خطر این نوع از فرسایش آبی صورت گرفته از جمله مطالعه‌ای که در منطقه صلوات آباد استان کردستان انجام شد که در این پژوهش از متغیرهای همچون لیتولوژی، کاربری، پوشش اراضی و توپوگرافی مشتمل بر شیب، جهت دامنه، شکل دامنه، شاخص قدرت رود و شاخص رطوبت توپوگرافی استفاده کرده‌اند. نتایج حاصل از تحقیق نشان داده که مساحت زیر منحنی 79/0 (AUC) است، که نشان‌دهنده تطبیق خوب مدل جهت پیش‌بینی نقاط حساس به فرسایش خندقی در منطقه است(Ismailie et al, 2014) .

در هر یک از تحقیقات ذکر شده از عوامل و شاخص‌های فراوانی در پهنه‌بندی و تهیه نقشه خطر فرسایش خندقی استفاده شده ولی شاخص‌های توپوگرافی منطقه از عوامل و تأثیرگذار در ایجاد این نوع از فرسایش آبی بسیار تأثیرگذار است، که در هر منطقه با توجه به ویژگی‌های فیزیکی منطقه منحصربه‌فرد عمل می‌کند. این پارامتر درواقع به‌صورت غیرمستقیم بر دیگر شاخص‌ها و یا معیارها تأثیرگذار است (Nazari Samani et al, 2009: Zakerinejad et al, 2018; Zakerinejad & Maerker 2014; در مطالعه‌ای که در این راستا به ارزیابی نقش شاخص‌های توپوگرافی و استفاده از مدل حداکثر آنتروبی در حوضه الوند در استان کرمانشاه پرداخته شد، که نتایج این تحقیق نشان داده است که مؤثرترین شاخص در ایجاد فرسایش خندقی مربوط به شاخص ارتفاع، فاصله عمودی از سطح کانال و تجمع جریان است. همچنین شاخص سطح زیر منحنی جهت اعتبار سنجی مدل ۰/۸۹۹ بوده که سطح خوب نتایج را نشان داده است. (Piroozinejad et al, 2017)، همچنین در یک مطالعه جدید که به بررسی نقشه حساسیت فرسایش خندقی حوضه سمیرم در جنوب استان اصفهان با استفاده از شاخص‌های توپوگرافی مؤثر و با استفاده از مدل مکسنت انجام گرفت که نتایج این پژوهش نشان داده است که بیشترین سهم مشارکت در مدل مذکور به ترتیب مربوط به شاخص قدرت فرسایندگی (۴۰/۳٪)، شاخص ارتفاع (۲۲/۷٪) و شاخص همگرایی (۱۸ ا٪) است، وهمچنین شاخص قدرت جریان با توجه شرایط فیزیکی شبکه آبراهه و گسترش تراکم بالایی انشعابات باعث شده است نسبت به دیگر شاخص‌ها در ایجاد فرسایش خندقی اهمیت بیشتری در این منطقه داشته است. ((Zakerinejad, 2020

با توجه به اینکه بخش وسیعی از مناطق جنوب شرق استان فارس به دلیل شرایط خاص اقلیمی، توپوگرافی و زمین‌شناسی، تحت تأثیر این نوع از فرسایش آبی قرارگرفته‌اند، که هدف اصلی این پژوهش نیز تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای خصوصاً مدل رقومی ارتفاعی با دقت بالا همچنین و به‌کارگیری مدل مکسنت جهت ارزیابی توانایی این مدل در پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش خندقی جنوب شهرستان داراب استان فارس (حوضه آبخیز خسویه) و همچنین بررسی میزان تأثیر هریک از عوامل تأثیرگذار در این نوع فرسایش است.

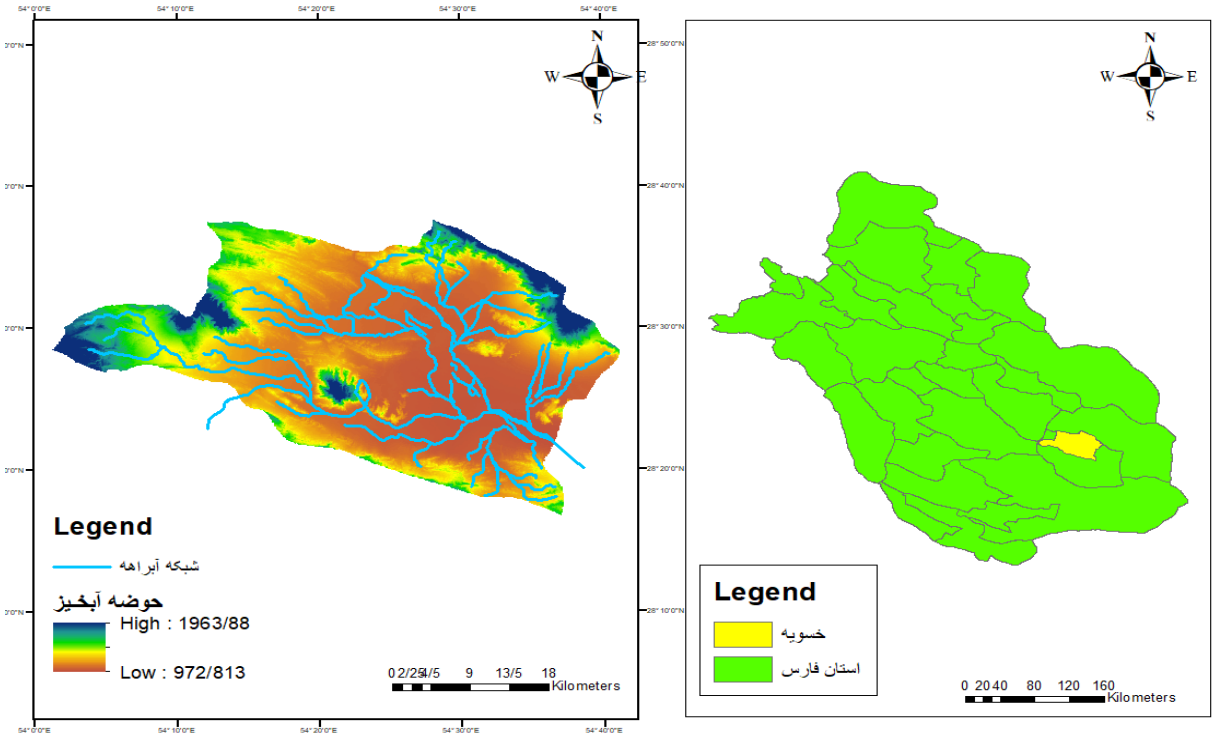
۲-منطقه مورد مطالعه

حوضه موردمطالعه منطقه موردمطالعه به وسعت ۱۳۹۲۴۸ هکتار در ۳۳۷ کیلومتری شیراز بین ۵۴ درجه ۹ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴۲ دقیقه طول شرقی و ۲۸ درجه ۱۸ دقیقه تا ۲۸ ۳۹ دقیقه عرض شمالی در جنوب شرقی استان فارس در شهرستان زرین‌دشت واقع‌شده است (شکل ۱). دمای متوسط سالیانه ماهانه به ترتیب ۲۱/۹۱ و ۱۹/۰۹ درجه سانتی‌گراد همچنین بیشینه وکمینه دمای میانگین حوضه به ترتیب ۳۳/۰۹ و ۹/۷۸ درجه سانتی‌گراد مربوط به ماه‌های تیر و دی میانگین بارندگی سالانه ایستگاه خسویه ۲۲۱/۵۴ میلی‌متر و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا حدود ۱۱۵۰ متر است (خرم و موسوی نسب، ۱۳۹۲). شرایط اقلیمی حوضه موردمطالعه خشک تا معتدل است و از نظر زمین‌شناسی، محدوده خسویه

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

– حاجی‌آباد در پهنه چین‌خورده زاگرس واقع‌شده است از ویژگی‌های اصلی این پهنه وجود چینه‌ای متوالی با روند شمال – جنوب شرق و دشت‌های کشیده بین این چین‌ها است سازندهای رخنمون شده در این محدوده به ترتیب قدمت سازندهای ساچون، آسماری، جهرم، گچساران، میشان، آغاجاری، بختیاری و رسوبات عهد حاضر است. در شکل ۲، نمونه‌هایی از فرسایش خندقی منطقه آورده شده است.



شکل ۱: نقشهٔ موقعیت منطقهٔ موردمطالعه



شکل ۲: نمونه‌ای از فرسایش خندقی حوضه موردمطالعه

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

۳- مواد و روش

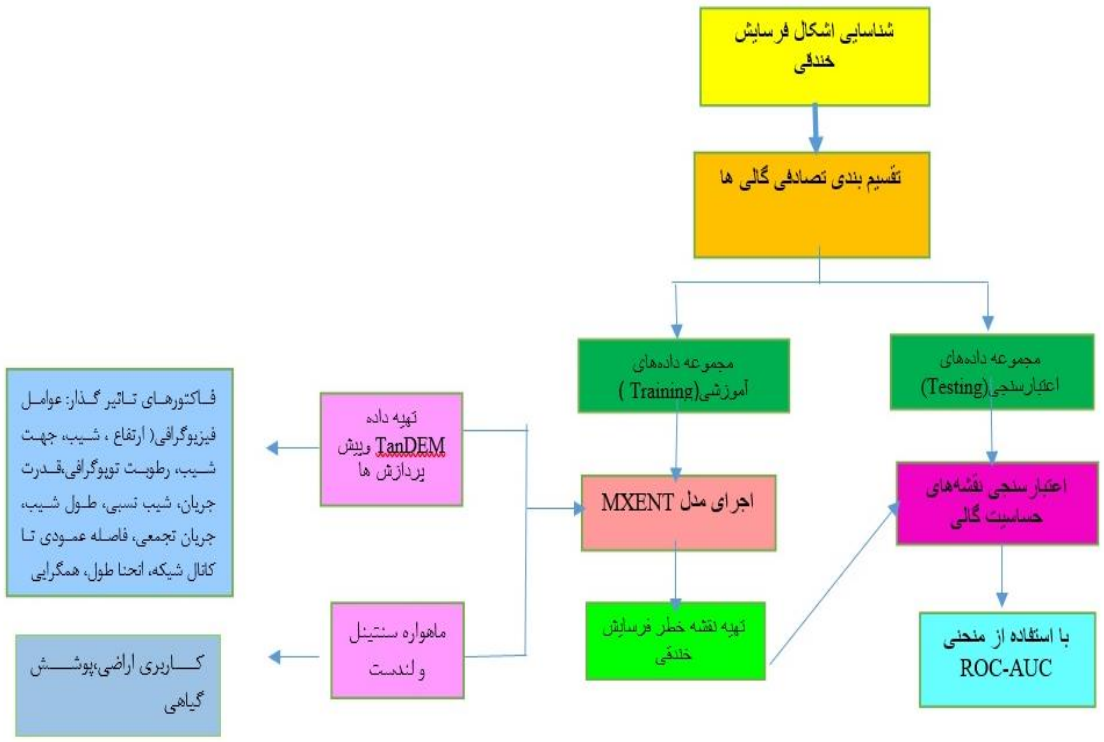
در این پژوهش، هدف پیش‌بینی فرسایش خندقی حوضه آبریز خسویه با استفاده از داده‌های TanDEM و مدل حداکثر آنتروپی (Maximum Entropy Model)، (Phillips et al., 2006)یا به اختصار مسکنت (Maxent) است. این مدل یکی از فناوری‌های ماشین یادگیری (MLTs) است که قابلیت پیش‌بینی مکانی بالایی در زمینه‌های مختلف علوم محیطی دارد (Phillips et al., 2006). مدل بیشینه آنتروپی براساس اصل آنتروپی شبکه ارتباطات بین متغیرهای مستقل و وابسته را تعیین کرده که بر اساس نقش هر متغیر مستقل و وزن تأثیر و منحنی پاسخ آن به دست می‌آید (Zakerinejad, 2020). این مدل اهمیت هریک از لایه‌های زیست‌محیطی در ایجاد فرسایش خندقی را بررسی می‌کند. برای ارزیابی عوامل زیست‌محیطی مؤثر در فرسایش خندقی، از توزیع مکانی خندق‌ها استفاده می‌کند و با استفاده از آزمون Jackknife اهمیت هریک از لایه‌های زیست‌محیطی در ایجاد فرسایش خندقی را بررسی می‌کند. همچنین برای بررسی اعتبار مدل نهایی از شاخص سطح زیر منحنی (AUC) برای منحنی ROC استفاده شد. چنانچه سطح زیر منحنی بیش از ۰/۹۰ باشد، قدرت تشخیص مدل بسیار عالی در نظر گرفته می‌شود (Hosmer, &2000(Lemeshow). شکل ۲ مراحل انجام روش تحقیق آورده شده است. در این پژوهش جهت اجرای مدل مورد استفاده از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای آزمون مدل استفاده شده است.

ابتدا موقعیت خندق‌ها از طریق بررسی‌های میدانی و تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی با استفاده از نرم‌افزار گوگل ارث (GE) ثبت گردیده و سپس نقشه‌های فیزیوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت شیب، طول شیب، شیب نسبی، فاصله عمودی تا کانال شبکه، رطوبت توپوگرافی، همگرایی، طول انحنا، قدرت جریان، جریان تجمعی، فاصله از آبراهه، عمق کانال)، با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاع TANDEM با قدرت تفکیک ۱۲ متر در نرم‌افزار (SAGA-GIS) تهیه شد. قبل از تهیه شاخص‌های توپوگرافی مورد نظر خطاهای هیدرولوژکی موجود در مدل رقومی ارتفاع (DEM) در محیط ساگا (SAGA-GIS) حذف گردید و نقشه پارامترهای پوشش گیاهی و کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۱ در نرم‌افزار (Arc GIS10.8) تهیه گردید.

نقشه شاخص‌های خاک‌شناسی (بافت خاک) که از نمونه‌های جمع‌آوری‌شده از خاک سطحی منطقه صورت گرفت و زمین‌شناسی (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱:۱۰۰۰۰۰) و در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.8 تهیه گردید (جدول ۲ و شکل ۳ و ۴). اساس انتخاب فاکتورهای مورد بررسی در مطالعات گوناگون دیگر پژوهشگران که دربارهٔ فرسایش خندقی در نقاط متفاوت جهان صورت گرفته شمرده شده است (MEhiorobo & Audu, 2012; Maerker et al., 2015 Qin et al., 2011, Rahimifar et al., 2011 Rahmati et al., 2017, Shit et al., 2013;). در ادامه این تحقیق با وارد کردن لایه‌های ذکر شده با فرمتascii. به‌عنوان متغییر مستقل و نقاط فرسایش خندقی به‌عنوان متغییر وابسته در بسته نرم‌افزار مسکنت مدل مربوطه اجرا گردید.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

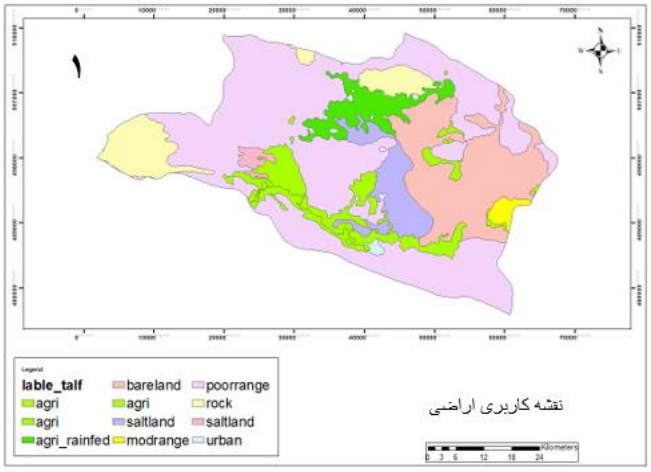


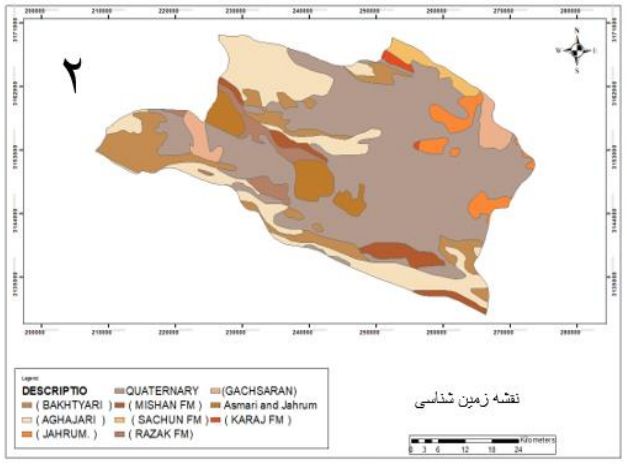
شکل ۳؛ فلوچارت روش تحقیق

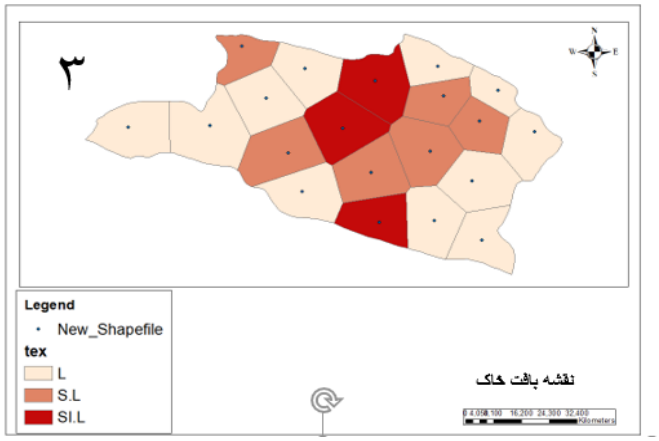
جدول ۱: معیارهای تأثیرگذار بر فرسایش خندقی حوضه آبریز خسویه

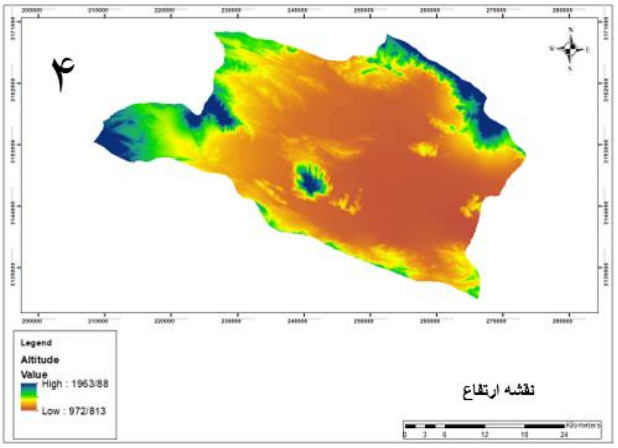
ردیف	معیارها	روش مورد استفاده	ردیف	معیارها	روش مورد استفاده
۱	شاخص قدرت آبراهه	الیا وکنارد (۲۰)	۱۱	موقعیت شیب نسبی	الیا وکنارد (۲۰)
۲	شاخص رطوبت توپوگرافی	الیا و کنارد (۲۰)	۱۲	انحنای طولی	زوربرگن وتورن (۳۲)
۳	طول شیب	زوربرگن وتورن (۳۲)	۱۳	شاخص عمق آبراهه	الیا وکنارد (۲۰)
۴	ارتفاع	تهیه شده در نرم‌افزار جی‌ای اس ۱۰/۸	۱۴	شاخص قدرت آبراهه	الیا وکنارد (۲۰)
۵	جریان تجمعی	الیا وکنارد (۲۰)	۱۵	تراکم پوشش گیاهی	لندست ۸، تهیه شده در نرم‌افزار Arc GIS10.8
۶	شاخص فاصله عمودی تا شبکه کانال	الیا وکنارد (۲۰)	۱۶	کاربری اراضی	سنتینل ۲، تهیه شده در نرم‌افزار Arc GIS10.8
۷	شاخص همگرایی	کوته و لحمیر (۱۰)	۱۷	بافت خاک	براساس یافته‌های جمع آوری شد. تهیه شده در نرم‌افزار Arc GIS10.8
۸	شیب	زوربرگن وتورن (۳۲)	۱۷	فاصله از آبراهه	تهیه شده در نرم‌افزار Arc GIS10.8
۹	جهت شیب	زوربرگن و تورن (۳۲)	۱۸	زمین‌شناسی	نقشه ۱٪ سازمان زمین‌شناسی تهیه شده در نرم‌افزار Arc GIS10.8
۱۰	سایه روشن	زوربرگن وتورن (۳۲)			

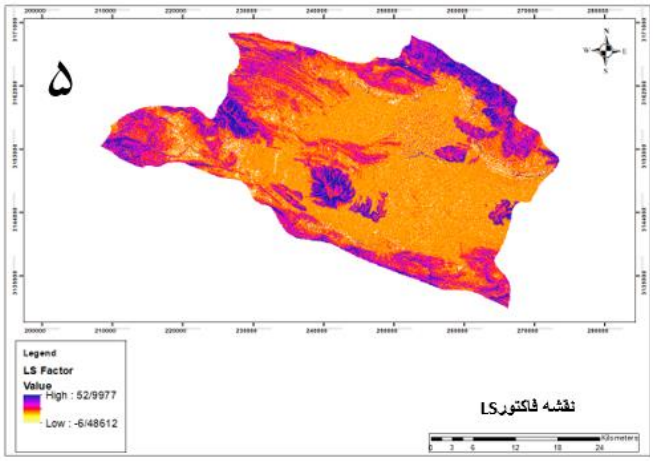
[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

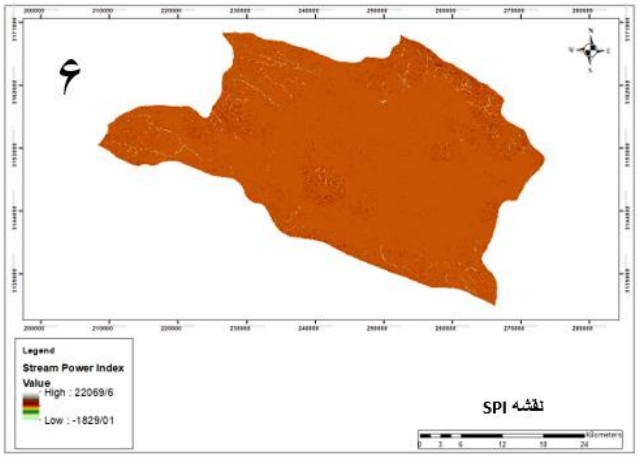


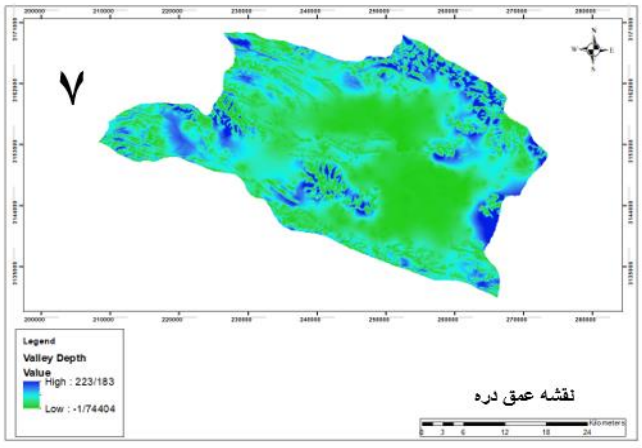


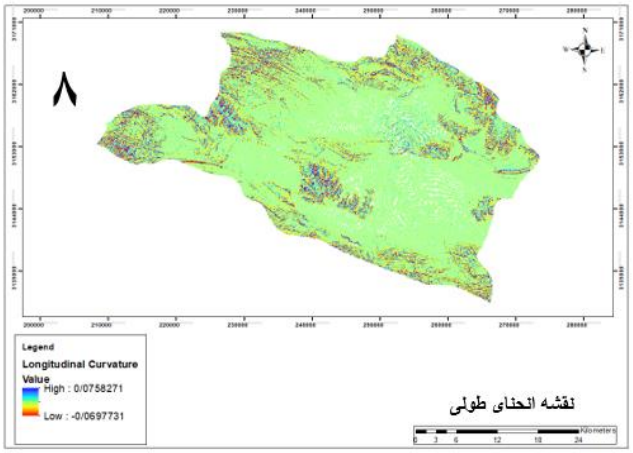




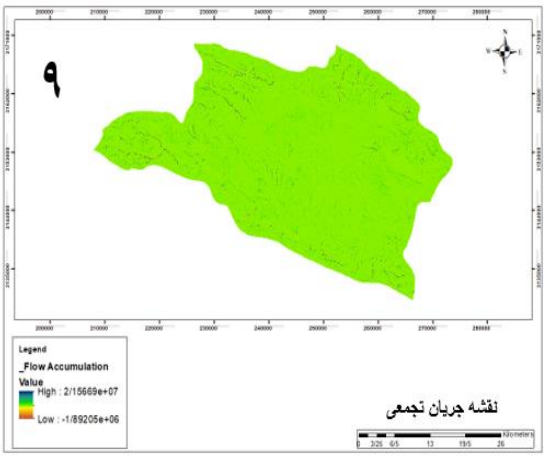


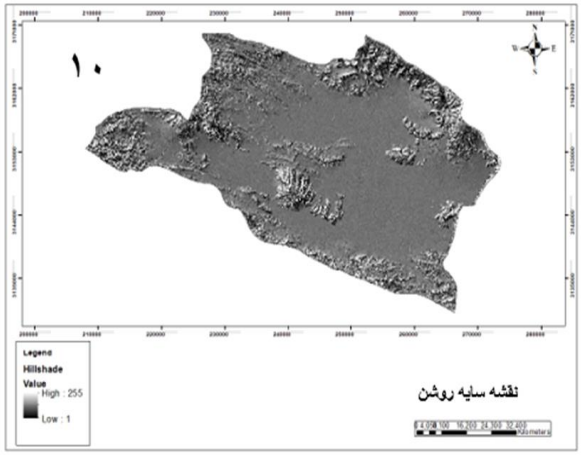


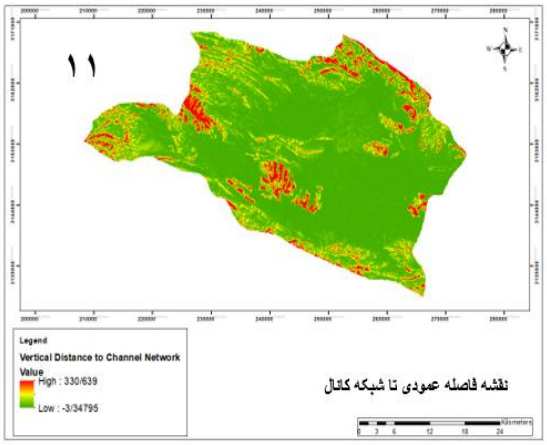


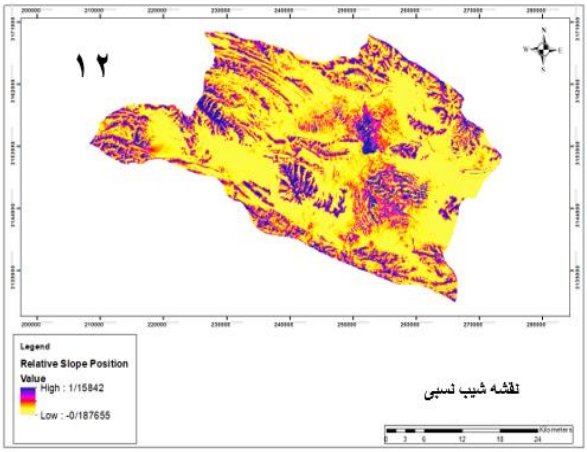


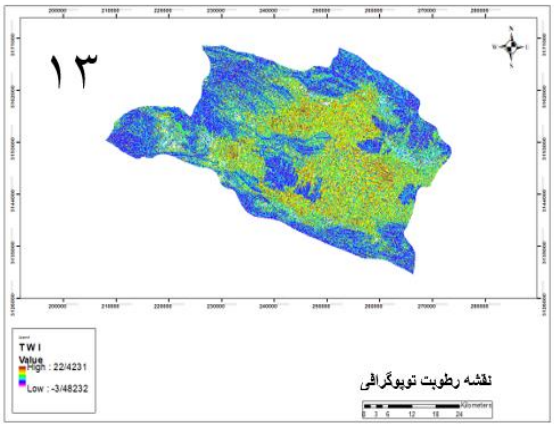
[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

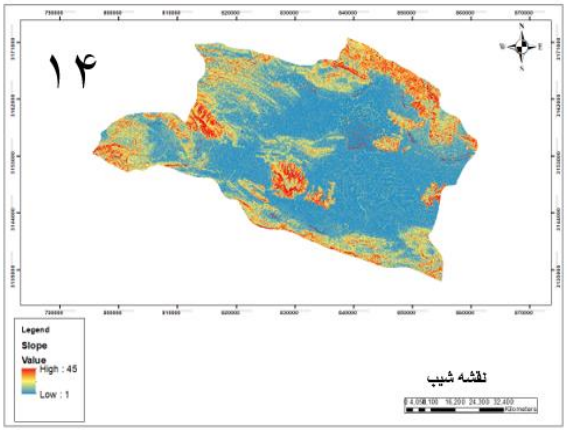






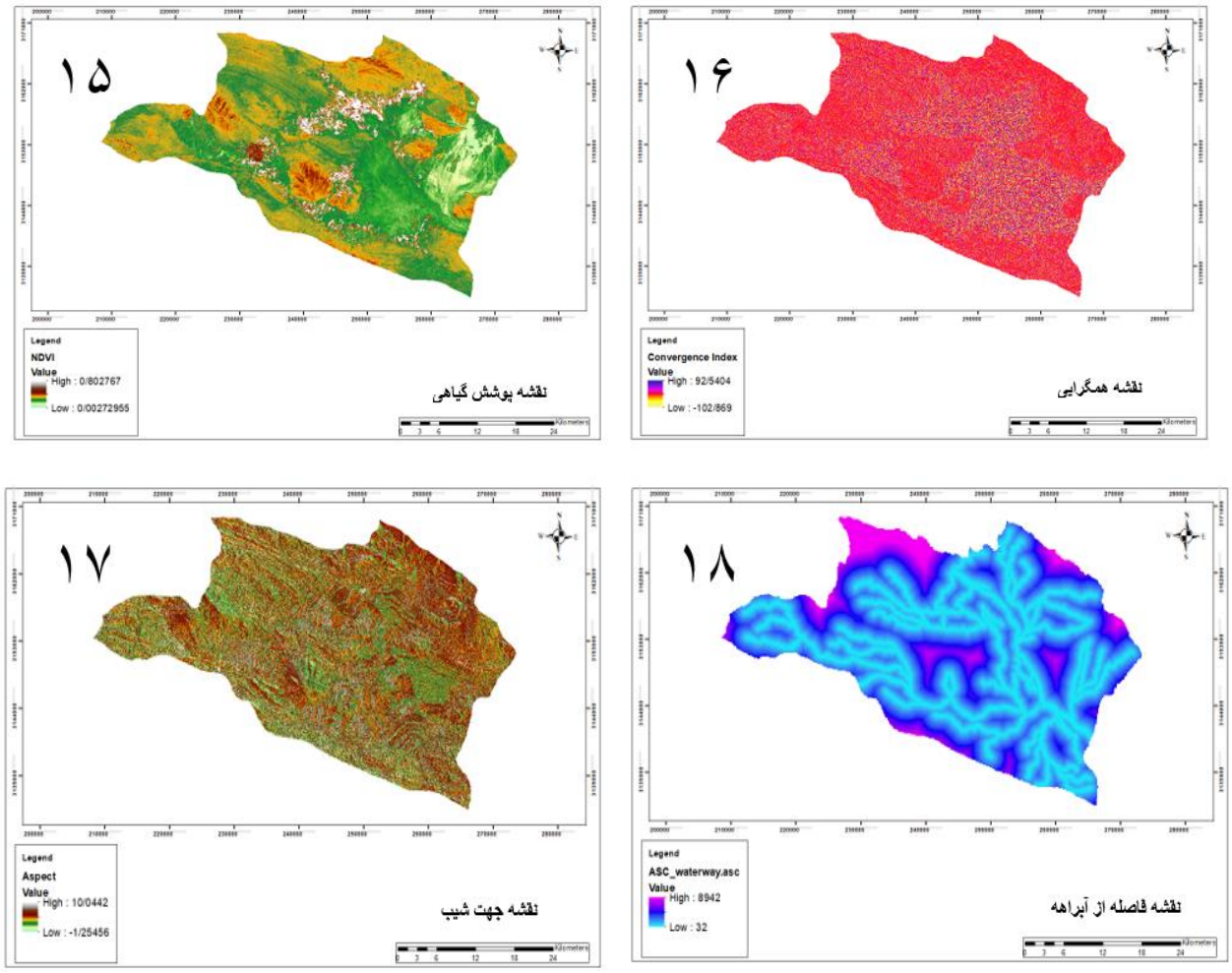






[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]



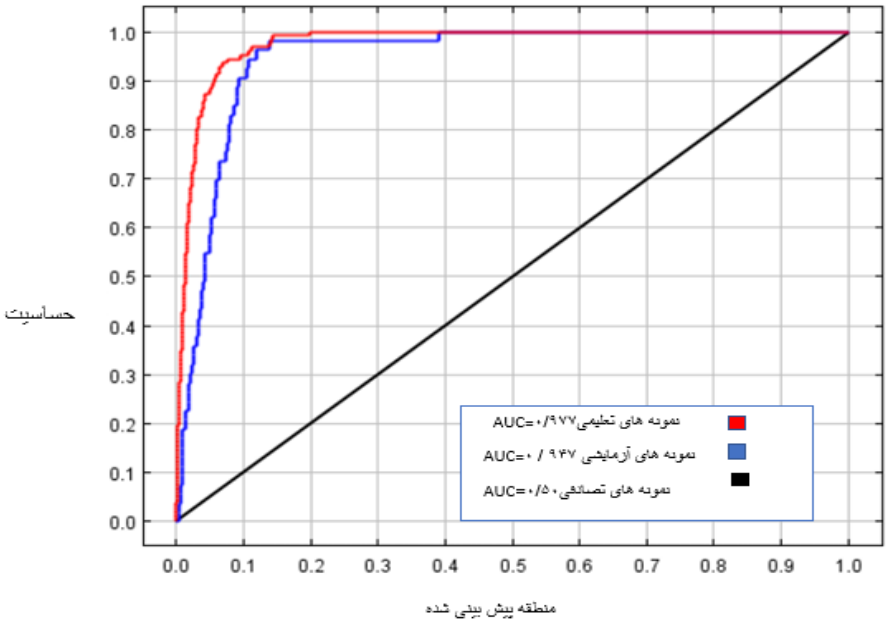
شکل ۴: نقشه‌های پارامترهای مورد ارزیابی در مدل مکسنت

۴- یافته‌ها (نتایج)

در این تحقیق بعد از تهیه تمامی شاخص‌های تأثیرگذار و تبدیل آن‌ها به فرمت رستری به‌عنوان متغییرهای مستقل و نقاط خندقی تهیه شده که دارای مختصات طول و عرض جغرافیایی بوده به‌عنوان متغیر مستقل در مدل مکسنت وارد شده و که در نهایت با اجرای مدل نقشه نهایی حساسیت به فرسایش خندقی تهیه گردید. برای اعتبار سنجی مدل همان‌طور که در قسمت روش تحقیق ذکر گردید، ۷۰ درصد نقاط خندقی به‌عنوان آموزشی (تعلیمی) و ۳۰ درصد باقیمانده جهت اعتبار سنجی (آزمایشی) مدل استفاده گردید. در شکل ۵ نمودار سطح زیر منحنی (AUC) آورده شده است. این منحنی، شامل نمودارهایی هستند که بر روی محور X ها، معیار معینی برای پارامتر مورد بررسی را دارا هستند و روی محور Y ها، میزان احتمال پیش‌بینی‌شده که توسط خروجی منطقی تعیین‌شده‌اند را نمایش می‌دهند. روند رو به بالا در منحنی، مشخص‌کننده رابطه مثبت و حرکت رو به پایین نشان‌دهنده رابطه منفی است. روند این نمودار در واقع، مشخص‌کننده میزان رابطه پارامتر با احتمال مورد بررسی است. مقدار سطح زیر منحنی مدل ۰/۹۷ و ۰/۹۴ به ترتیب برای نمونه‌های تعلیمی و آزمایشی است که نشان‌دهنده سطح عالی نتایج است که قدرت تشخیص مدل بسیار بالا

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

در نظر گرفته می‌شود (Lemeshow)&Hosmer, 2000 که مدل به‌خوبی می‌تواند مناطق مختلف خطر فرسایش خندقی را از یکدیگر تفکیک کند.



شکل ۵: منحنی بررسی اعتبار مدل خطر فرسایش خندقی حوضه آبریز خسویه

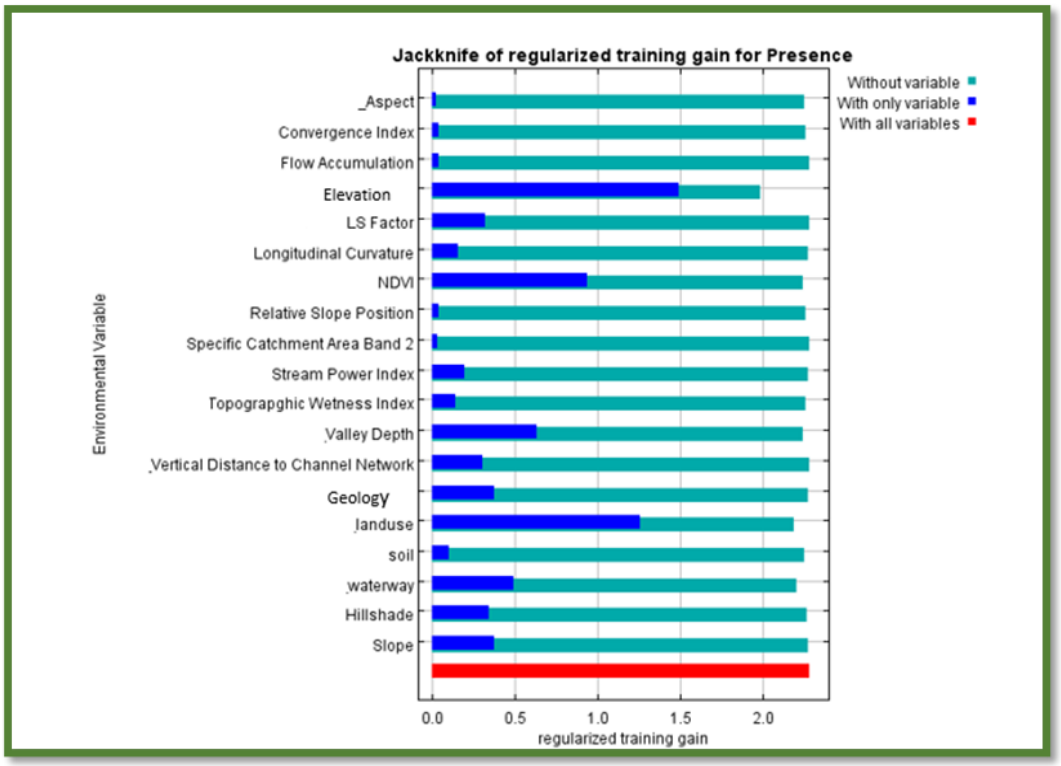
در این پژوهش، برای تعیین میزان تأثیر هر متغیر بر میزان فرسایش خندقی در منطقه از دو روش درصد مشارکت هر متغیر با استفاده از خروجی مکسنت و آزمون Jackknife استفاده شده است. این آزمون اهمیت هریک از شاخص‌ها را به‌عنوان متغیر وابسته در ایجاد فرسایش خندقی ارزیابی کرده است. ابتدا باید سهم نسبی هر یک از شاخص‌ها در مدل مکسنت مشخص شود و ازآنجاکه مدل مکسنت متغیرها را وابسته به یکدیگر می‌داند و باید تأثیر هر شاخص بر شاخص دیگر مشخص شود، به همین دلیل بر اساس الگوی مدل‌های متغیرهای جایگزینی تصادفی در هر مرحله از تکرار به‌صورت خودکار به ارزش هر یک از پارامترها میانگین تأثیرات در سایر پارامترها اضافه خواهد شد و جایگزین ارزش قبلی خود خواهد شد.

به ترتیب علاوه بر میزان تأثیر هر پارامتر، اهمیت جایگزینی یا تأثیر وجود این شاخص یا پارامتر در دیگر پارامترها نیز بررسی خواهد شد. درصد مشارکت در مدل نشان‌دهنده آن است که بیشترین پارامترهای تأثیرگذار بر فرسایش خندقی منطقه به ترتیب ارتفاع (۵۷/۹٪)، کاربری اراضی (۱۱/۶٪)، تراکم پوشش گیاهی (۹/۸٪) و فاصله از آبراهه (۸٪/۷) می‌باشند وکمترین پارامترهای تأثیرگذار نیز به ترتیب جهت جریان و مساحت حوضه آبریز با (۱ /۰٪) شیب، طول شیب و فاصله عمودی تا کانال با (۰/۲٪) می‌باشند. در جدول ۲ میزان تأثیر و اهمیت هریک از پارمترها مشخص شده است. در شکل شماره ۶ نیز نتایج آزمون جک نایف را نشان می‌دهد که شاخص‌های ارتفاع، کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی به ترتیب دارای اهمیت بیشتری می‌باشند. که در ادامه به معرفی دامنه‌های تأثیرگذار چهار شاخص با درصد مشارکت بالا پرداخته می‌شود.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

جدول: میزان مشارکت هریک از شاخص‌ها فرسایش خندقی حوضه آبریز خسویه

شاخص‌ها	آدرصد مشارکت
ارتفاع	۵۷/۹
کاربری اراضی	۱۱/۶
پوشش گیاهی	۹/۸
فاصله از آبراهه	۸/۷
عمق آبراهه	۴
جهت شیب	۱/۳
رطوبت توپوگرافی	۱/۳
_همگرایی	۱/۲
بافت خاک	۱/۲
انحنای طولی	۰/۷
سایه روشن	۰/۶
شیب نسبی	۰/۴
زمین‌شناسی	۰/۳
_قدرت جریان	۰/۳
شیب	۰/۲
فاصله عمودی تا شبکه کانال	۰/۲
طول شیب	۰/۲
جریان تجمعی	۰/۱

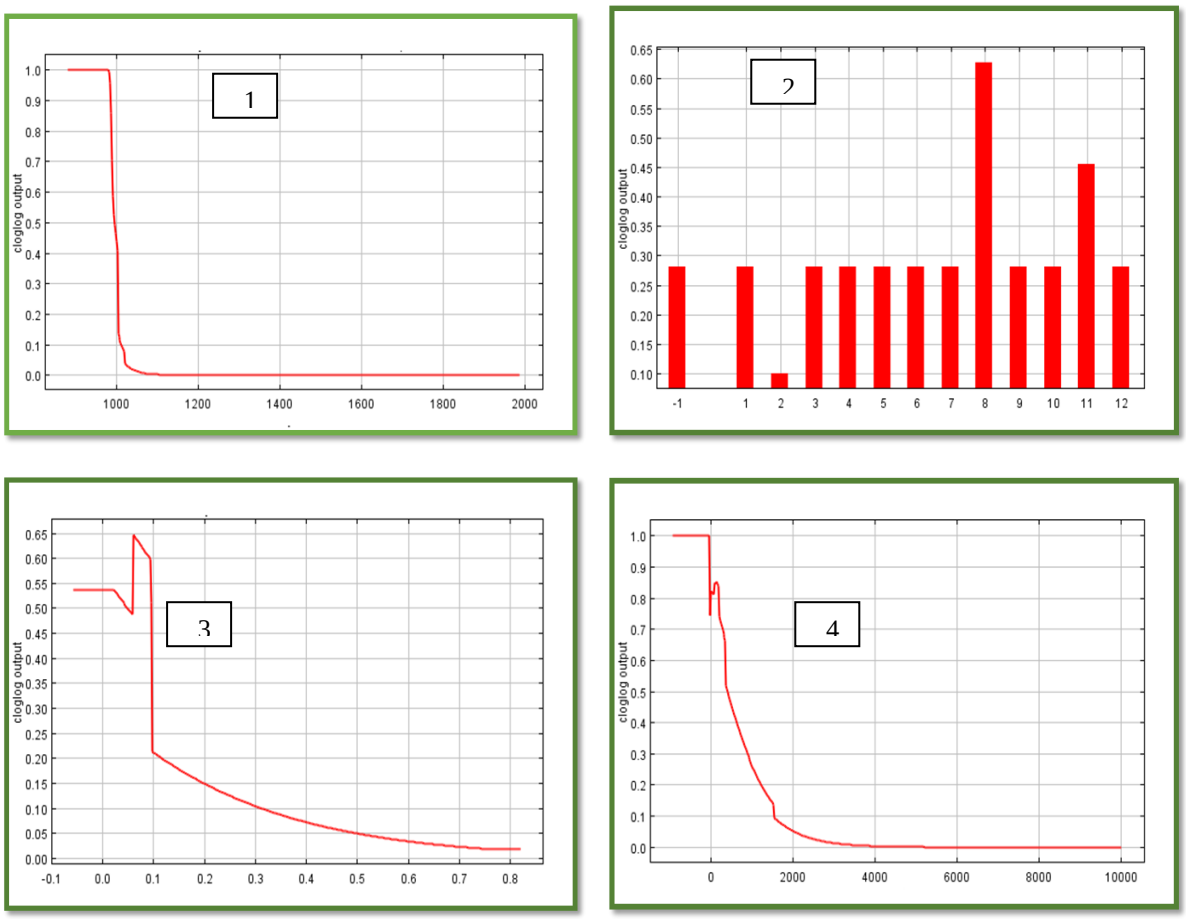


شکل ۶: نتایج آزمون جک نایف برای بررسی میزان نقش هریک از شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

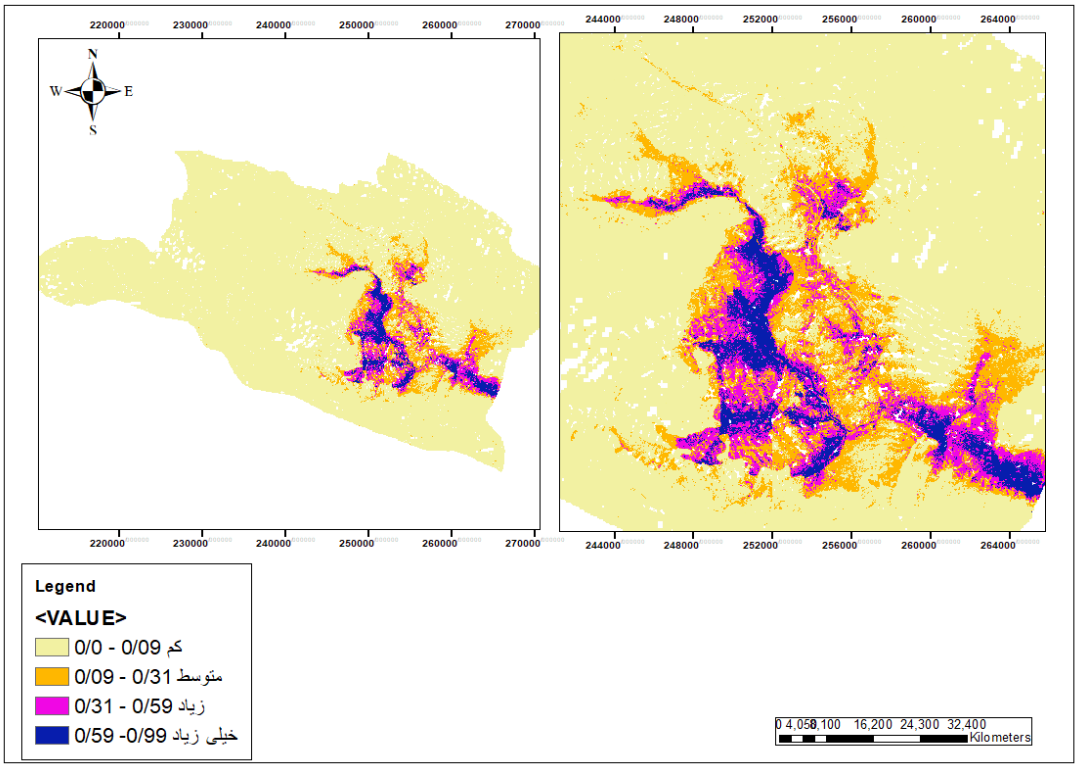
با توجه به نمودارهای شکل ۷ و نتایج حاصل از درصد مشارکت و آزمون جک نایف شاخص ارتفاع تأثیرگذارترین شاخص شناخته‌شده است که منحنی پاسخ بیانگر این است، که کمترین ارتفاع (۹۷۱ متر) بیشترین تأثیر را داشته و نمودار روند نزولی داشته است و هرچقدر ارتفاع بیشتر شده است، تأثیر عامل ارتفاع نیز کاهش‌یافته است. شاخص کاربری اراضی که دومین میزان بالای مشارکت و اثرگذاری را در پهنه‌بندی نقشه حساسیت به فرسایش خندقی در منطقه موردمطالعه را دارد، که با توجه به نمودار مربوطه بیشترین کاربری تأثیرگذار بر فرسایش خندقی منطقه مربوط به کاربری نمکزارها و مراتع ضعیف و کشاورزی بوده است. کمترین کاربری تأثیرگذار سنگ زار ها بوده و پس‌ازآن دیگر کاربری‌های تأثیر تقریباً یکسان و برابری داشته‌اند (شکل ۷ –نمودار ۲). منحنی پاسخ تراکم پوشش گیاهی نیز که به‌عنوان سومین شاخص تأثیرگذار بر پهنه‌بندی فرسایش خندقی است نشان می‌دهد که بیشترین میزان احتمال فرسایش خندقی در تراکم صفر الی ۰/۱ است (۶۴٪) و پس‌ازآن به‌طور ناگهان میزان فرسایش کاهش پیدا می‌کند و به (۲۰٪) می‌رسد و پس‌ازآن با یک شیب ملایم نمودار سیر نزولی پیدا می‌کند (شکل ۷ –نمودار ۳). منحنی پاسخ پارامتر شاخص فاصله از آبراهه نشان می‌دهد، که این شاخص تا حدود ۱۰۰ متر، بیشترین احتمال خطر فرسایش خندقی وجود دارد و با افزایش فاصله از آن، میزان فرسایش با کاهش چشمگیر مواجه شده است (شکل ۷ –نمودار ۴).



شکل ۷: منحنی پاسخ چهار شاخص با بیشترین اثرگذاری شامل: ارتفاع (۱)، کاربری اراضی (۲)، تراکم پوشش گیاهی (۳)، فاصله از آبراهه (۴) در فرسایش خندقی حوضه آبریز خسویه

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

در شکل ۸، نقشه پهنه‌بندی حوضه آبریز خسویه که با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و استفاده از شاخص‌های تأثیرگذار در تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی آورده شده که بیانگر گسترش مناطق با حساسیت به فرسایش خندقی در نواحی مرکزی حوضه آبخیز خسویه می‌باشند. در واقع همان‌طور که در نقشه نهایی پهنه‌بندی فرسایش خندقی نمایان هست این نقشه احتمال خطر را در بازهٔ ۰ تا ۱ نمایش می‌دهد به این صورت که مناطقی که ارزش پیکسلی آن‌ها به ۱ نزدیک است، دارای حساسیت با احتمال فرسایش خندقی بالاترین می‌باشند و مناطق دارای ارزش صفر یا نزدیک به صفر دارای کمترین خطر از لحاظ میزان خطر فرسایشی است.



شکل ۸: نقشه پهنه‌بندی فرسایش خندقی حوضه آبریز خسویه

۵- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به شرایط کنونی کشور ایران که بخش وسیعی از آن دارای شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک بوده و دارای پوشش گیاهی ضعیفی است که نسبت به شرایط فرسایشی خصوصاً فرسایش خندقی حساس است، لذا ارزیابی و پهنه‌بندی جهت تهیه نقشه خطر در زیر حوضه‌های آن می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های لازم در جهت حفاظت از مناطق مستعد فرسایش مؤثر باشد. در این تحقیق با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (Maxent) پیش‌بینی فرسایش خندقی در حوضه آبخیز خسویه در جنوب شرق استان فارس مدل‌سازی شد. نقاط آموزشی در این مدل که شامل مناطق فرسایش آبکندی می‌باشند با استفاده از تصاویر ماهواره ای و بازدیدهای میدانی تهیه شد. برای مدل‌سازی احتمال فرسایش خندقی، از شاخص‌های تأثیرگذار بر وقوع فرسایش آبکندی که عبارتند از ارتفاع، شیب، جهت شیب، شیب نسبی، طول شیب، سایه روشن، قدرت جریان، رطوبت توپوگرافی، فاصل عمودی تا شبکه کانال، مساحت حوضه آبریز، عمق آبراهه،

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

انحنای طولی، تجمع جریان، شاخص همگرایی، زمین‌شناسی، تراکم پوشش گیاهی، کاربری اراضی، بافت خاک، فاصله از آبراهه، به‌عنوان متغیرهای مستقل در پیش‌بینی مناطق حساس فرسایش خندقی استفاده گردید.

نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که بیش از ۸۰ درصد از منطقه که در بخش‌های مرتفع شمالی واقع‌شده در طبقه خیلی کم‌خطر قراردارد. درحالی‌که مناطق پرخطر نیز در نواحی مسطح و کم ارتفاع و جنوب شرق منطقه قرار دارد. ارزش عددی شاخص سطح زیر منحنی (AUC) در این مطالعه برابر با ۰/۹۴۷ به دست آمد، که نشان‌دهنده این است که پیش‌بینی مدل در پهنه‌بندی مناطق فرسایش خندقی بسیار بالا بوده و یا به‌بیان‌دیگر می‌توان گفت که مدل به‌خوبی می‌تواند مناطق مختلف خطر فرسایش خندقی را از یکدیگر تفکیک کند.

نتایج این مدل نشان داد که بیشترین تأثیر و اهمیت را شاخص ارتفاع دارد، که میان ارتفاع و مناطق مستعد فرسایش خندقی رابطه معکوسی وجود دارد بطوریکه هرچقدر ارتفاع منطقه کمتر باشد میزان فرسایش خندقی در منطقه بیشتر است و بیشترین خندق‌ها در کمترین ارتفاع ۹۷۲ متر قرار دارند دلیل این امر می‌توان کاهش عمق خاک در مناطق مرتفع باشد. شایان ذکر است که میزان ارتفاع با شیب منطقه و پوشش گیاهی منطقه رابطه مستقیم دارد و بیشترین فرسایش درمناطق کم ارتفاع و کم شیب با پوشش گیاهی اندک قرار دارند. که نتایج این پژوهش با نتایج سایر پژوهشگران که نشان داده است که با کاهش ارتفاع درصد پراکنش خندق‌های افزایش می‌یابد همخوانی دارد (Sheet et al,2013; Zakerinejad & Maerker 2014; Rahmati et al,2016). بعد از شاخص ارتفاع شاخص کاربری اراضی بیشترین تأثیر و اهمیت را دارد که بیشترین کاربری‌های تأثیرگذار براحتمال خطر فرسایش خندقی منطقه موردمطالعه مربوط به کاربری‌های مراتع ضعیف (نمکزارها)، و مناطق کشاورزی بوده است. همچنین درنتیجه تغییر کاربری و استفاده بیش‌ازحد از زمین معمولاً افزایش رواناب و درنتیجه توسعه ابعاد فرسایش خندقی است که در اراضی کشاورزی با عملیات کشاورزی و تردد ماشین‌آلات نیز تشدید می‌یابد. به‌طورکلی نتایج نشان داد که شاخص‌های فیزیوگرافی (توپوگرافی) استخراج‌شده از مدل رقومی ارتفاع و شاخص‌های انسانی (کاربری اراضی) در فرسایش خندقی حوضه موردمطالعه نقش مهمی در رخداد فرسایش آبکندی دارند. لازم به ذکر است در این پژوهش شاخص‌های توپوگرافی برای اولین بار در ایران از داده‌های TAN DEM با قدرت تفکیک ۱۲ متر تهیه شده علاوه بر این برای تهیه شاخص کاربری اراضی هم از داده‌های ماهواره سنتینل ۲ استفاده شده است. انتظار می‌رود، با توجه به حساسیت بالای منطقه به فرسایش آبکندی استفاده از نتایج این تحقیق می‌تواند در مدیریت بهتر و اولویت مناطق با حساسیت بالا جهت کارهای حفاظتی آب‌وخاک موردتوجه برنامه ریزان قرار گیرد.

منابع

1. Abdollahi, Sh., Habib, N., Mir Yaghoubzadeh, M. H., Najafi, S. (2017). Estimation of gully erosion and their development using GIS and remote sensing, Journal of Desert Ecosystem Engineering, 6 (17): 69-78(in Persian).

2. Arab Ameri, Al., Yamani, M., Shirani, K. (2015). Optimization of susceptibility map to gully erosion using integrated data-driven statistical method, (Case study: Taroud-Najarabad). Land knowledge research. 10 (37)): 38-18. (in Persian).

3. Arabameri, A., Cerda, A., Tiefenbacher, J.P. (2019). Spatial pattern analysis and prediction of gully erosion using novel hybrid model of entropy-weight of evidence. Water. 11(6): 1129.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

4. Besharti, B., Abedini, M., Asghari S. (2018). Investigation and analysis of factors affecting the creation and development of gully erosion in Shurchai watershed. Geographical Research Quarterly. 33 (2): 222-20 (in Persian).
5. Conforti, M, Aucelli, P., Robustelli, G., Scarciglia, F. (2011). Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). Natural hazards, 56(3): 881-898.
6. Dhianaufal, D., Kristyanto,T. H. W., Indra, T. L., & Syahputra, R. (2018). Fuzzy Logic Method for Landslide Susceptibility Mapping in Volcanic Sediment Area in Western Bogor, Proceedings of the 3rd International Symposium on Current Progress in Mathematics and Sciences 2017 (ISCPMS2017) AIP Conf.
7. Ebrahim, M., Abalghasem, A., Ahmadi, M., Asadi, A. (2018). Comparison of Gully Erosion Susceptibility Mapping Using Weight of Evidence and Frequency Ratio Models at Sanganeh Kalat Basin. (4)32: 105-126.
8. Gholami, M., Ahmadi, M., Mahmoudi, M. (2017). Analysis of Geomorphological Constraints in the Physical Expansion of the City with Emphasis on Gully Erosion, Case Study: Mehr City in the South of Fars Province. Journal of Natural Hazards. 6 (12): 124 -105. (in Persian).
9. Habibi, A. (2017). Gully erosion zoning to identify endangered villages using a fuzzy model in the Gargar Shushtar river basin. Geographical Quarterly of Scientific-Research Land 14 (53): 52-37.. (in Persian).
10.Hosmer D.W, Lemeshow, S. (2000) Applied Logistic Regression, 2nd ed. Wiley, New York 392 pp.
11. Ismaili, R., Shokati, R. (2014). Evaluation of Abkandi Erosion Sensitivity Using Logistic Regression in Salva Abad Basin of Kurdistan Province Geographical Studies of Southern Areas. 5 (20): 104-91. (in Persian).
12. Khorram, M., Mousavi Nasab, Z. (2013). Hydrogeochemistry of Groundwater Resources in Khasoyeh Plain - Hajiabad, Zarrin Dasht Fars. Iranian Geological Society. (in Persian).
13. Khajeh, N., Qudussi, J., Ismaili, R. (2017). Investigation of The Effect of Environmental Factors on The Formation and Spread of Gully Erosion Using GIS (Case Study: Tamarqareh Ghozi region, Golestan province) Watershed Management Research Journal. 8 (15): 212-202. (in Persian).
14. Nazari Samani, A., Ahmadi H., Jafari, M., Boggs, G., Ghoddousi, J., Malekian,A. (2009). Geomorphic threshold conditions for gully erosion in Southwestern Iran (Boushehr-Samal watershed). Journal of Asian Earth Sciences, 35(2): 180-189. doi:https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.02.004.
15. Nikpour, N., Fotouhi, S., Hossein, N., Sistani, M. (2017). Morphometry of gully erosion and the factors affecting its creation and expansion (Cham Fazel plain basin in the southwest of Ilam province). Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards. 4 (1): 97-11. (in Persian).
16. Piroozi Nejad, S., Soleimani, K., Habibnejad, M., Zakerinejad, R. (2017). Prediction of Gully Erosion Using Remote Sensing data and Maxsen model in Alvand Basin, M.Sc. Thesis in Watershed Management, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 9 (14): 110-95. (in Persian).
17. Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling, 190: 231-259.
18. Poesen, J, Nachtergaele, J, Verstraeten G, Valentin C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. CATENA, 50(2): 91-133. doi:https://doi.org/10.1016/S0341- 8162(02)00143-1.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

19.Rahmati, O, Haghizadeh, A, Pourghasemi, H.R, & Noormohamadi, F. (2016), Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. Natural Hazards, 82(2), 1231-1258.
20.Shahrivar, A., Shadfar, S., Khazaei, M., Adeli, B. (2017). Evaluation of Gully Erosion Zoning Methods, Case study: Abgandi watershed). Echo Hydrology.4 (1): 132-119. (in Persian).
21.Shit, P, K, Paira, R., Bhunia, G, Maiti, R. (2015). Modeling of potential gully erosion hazard using geo-spatial technology at Garbheta block, West Bengal in India. Modeling Earth Systems and Environment, 1(1-2), 2.129.
22. Tahmasebipour, N., Rahmati, O., Ghorbani Nejad, S. (2015). Predicting the sensitivity of Gully Erosion in Seymareh Region Based on the Heart of the Certainty Factor and Determining the Importance of the Factors Affecting It.Echo Hydrology y.3 (1):93-83. (in Persian).
23. Valentin, C, Poesen, J, Li Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. CATENA, 63(2): 132- 153.
24. Zakerinejad, R, Maerker, 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 Fisica e Dinamica Quaternaria, 37(1): 67- 76. doi:https://doi.org/10.4461/GFDQ.2014.37.7.
25.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(1): 25-50. doi:10.1007/s11069-015-1700-3.
26.Zakerinejad, R., Omran, A., Hochschild, V., Maerker, M. (2018). Assessment of gully erosion in relation to lithology in the Southwestern Zagros Mountains, Iran using ASTER data, GIS and stochastic modeling. Geografia Fisica Edinamica Quaternaria, 41(2): 95-104. doi:https://doi.org/10.4461/ GFDQ.2018.41.15.
27. Zakerinejad, R. (2020). Evaluation of digital elevation models to prepare a Gully Erosion Potential Map Using Maxent Model and GIS (Case Study: Semirom Watershed, South of Isfahan Province). Remote Sensing and GIS in Natural Resources.11 (3): 24-21 (.in Persian).
28.Zhu, A. X., Wang, R., Qiao, J., Qin, C. Z., Chen, Y., Liu, J., Du, F., Lin, y., & Zhu, T. (2014). An expertknowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic, Geomorphology, 7,pp: 128-138.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

Spatial Prediction of Gully Erosion Using TanDEM-X data and Maximum Entropy Model (A case study: Khasoyeh watershed, in Southeast of Fars Province)

Reza Zakerinejad[1]: *Assistant Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical and Planning, University of Isfahan, Isfahan*
Parivash Alvandi: Graduate *M.Sc. Student of Geomorphology and Spatial Planning, Faculty of Geographical and Planning, University of Isfahan, Isfahan*

Article History (Received: 2021/12/26 Accepted: 2022/05/30)



Extended abstract

1- Introduction

Soil erosion is a global problem that seriously threatens water and soil resources. Among water, wind and glacial erosions, water erosion causes extensive damage every year around the world.Water erosion is divided into four groups according to the importance and method of formation, including splash erosion, sheet, rill and gully erosion.One of the most important types of water erosion is gully erosion which is a common phenomenon in the climate of arid and semi-arid regions, which affects large areas with different morphological, soil and climatic conditions. In fact, this type of erosion is of special importance due to the production of sediment and soil loss, as well as extensive damage to land, roads and structures. Therefore, to prevent the rapid growth of gullies or to minimize the damages caused by them, it is very important to know the morphology of a gully and how it is formed and the reasons for its growth. In fact, by identifying areas prone to gully erosion and identifying the factors affecting it, the risk of this erosion can be reduced. A large part of the southeastern regions of Fars province due to special topographic and geological conditions, have been affected by this type of water erosion. The main purpose of this study is to prepare a gully erosion susceptibility map using satellite data and using Maxent model to evaluate the ability of this model to predict gully erosion prone areas south of Darab city in Fars province and also to investigate the impact of each factor in this is the type of soil loss.

2- Methodology

The study area is located in the Khasoyeh watershed, in Southeast of Fars Province in the Zagros Mountains (ZM) (54, 9' till 54, 42' E and 28, 18'-28, 39' N) and covering ca. 139248ha. In this research, we followed the subsequently mentioned working steps to predict the gully erosion susceptible:
In the first step the locations of characteristic gullies were digitized using Google Earth (GE) images, aerial photos and fieldwork. Subsequently, we converted the polygons into equally spaced points, which are congruent with the raster cell centroids.
ii) In the second step we prepared the predictor variables that are driving the erosion processes. These continuous predictor variables include; Physiographic indices including, elevation, topograpghic wettness index (TWI), vertical distance to streams, slope, slope direction, hillshade, LS factor, Stream Power Index (SPI), flow concentration with spatial resolution of 12 meters were prepared in SAGA GIS. Before applying the indices, the DEM was preprocessed with low pass filtering to extract artefacts and errors, like local noise and terraces using ArcGIS 10.8 (ESRI, 2010). Then, the DEM was hydrologically corrected eliminating sinks using the algorithm proposed by Planchon & Darboux (2001). The other applied indeice in this research are including, geological maps, land use, morphology, soil texture, were prepare. In the last stage, after preparing all the effective indices (Indepence layers) in the gully erosion of the region, the maximum entropy model was implemented.

3- Results

[1]. **Corresponding Author:** r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]

The results of the applied model showed that the elevation index is the most important factor. In the other words, the result indcated that there is an inverse relationship between the elevation and prone areas to gully erosion because the most gullies area are located at a minimum elevation of 900 meters. The reason for this can be reduced soil depth in high areas. The results of the modeling showed that more than 80% of the area is in the very low risk category and most of these areas are located in the northern parts and highlands. The high-risk areasare mostly located in flat and low elevation areas in southeast of the study area. The ROC curves in this study was equal to 0/94 that shows the applied model is considered well distinguish different areas of gully erosion prediction.

4- Discussion & Conclusions

Gully erosion is common geomorphological problems in arid and semi-arid regions; therefore, it is essential to develop methods to predict it with simple but highly accurate models. In this research, the spatial prediction of gully erosion in the Khasyoue watershed in Fars province was carried out by means of a stochastic model and a detailed terrain analysis as well as additional environmental variables. The validation of the Maxent model shows that the model prediction for gully is outstanding. Percentage of the important variables for prediction of gully erosion indicates that the most influential parameters on gully erosion in the study area are espectively elevation (57.9%), land use (11.6%), vegetation density (9.8%) respectively and the least effective parameters are the direction of flow and catchment area with (0.1%) slope and vertical distance to streams with (0.2%). The simplicity and the relative low data requirements of the applied method allows an effective method also in other regions.

Key Words:Khasoyeh,Tan-DEM, Gully erosion, Maximum entropy.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6]