

# ارزیابی حساسیت زمین نسبت به فرسایش خندقی با تکنیک داده‌کاوی گروهی مطالعه موردی: حوضه شاهرود

علیرضا عرب عامری<sup>۱</sup>، خلیل رضایی<sup>۲</sup> و مجتبی یمانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دکتر، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

<sup>۲</sup>استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

<sup>۳</sup>استاد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۸

## چکیده

فرسایش خندقی یکی از فرایندهای فرسایشی است که عمدتاً باعث تغییر شکل سطح زمین می‌شود و توسعه آن یکی از دلایل عمده تخریب زمین و از بین رفتن خاک در سراسر جهان است. در این پژوهش از یک چهارچوب روش شناسی جدید به منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی در حوضه شاهرود در استان سمنان استفاده شده است که حساسیت بالایی نسبت به فرسایش خندقی دارد. بدین صورت که از ترکیب دو روش داده‌محور شاخص آنتروپی (Index of Entropy) و تابع شواهد یقینی (Evidential Belief Function) برای محاسبه وزن پارامترهای زمین‌محیطی مؤثر در ایجاد خندق و رابطه فضایی بین خندق‌ها و پارامترها استفاده شده است. بدین منظور در ابتدا نقشه پراکنش خندق با استفاده از عملیات میدانی گسترده و تفسیر عکس‌های هوایی تهیه شد و از ۱۷۲ خندق، ۷۰ درصد (۱۲۱ خندق) به منظور مدل‌سازی و ۳۰ درصد (۵۱ خندق) به منظور صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. در گام بعد، برای انتخاب پارامترها، پس از شناسایی اولیه آنها، تست هم‌خطی با استفاده از شاخص‌های ضریب تحمل (Tolerance) و عامل تورم واریانس (Variance Inflation Factor) بین پارامترها انجام و پارامترهایی که دارای هم‌خطی بودن به علت کاهش دقت مدل از جریان مدل‌سازی حذف شدند. در نهایت ۱۲ پارامتر به منظور مدل‌سازی انتخاب شد. نتایج حاصل از تعیین اهمیت معیارها با روش شاخص آنتروپی نشان داد که پارامترهای ارتفاع، لیتولوژی و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index) بیشترین تأثیر را در رخداد خندق‌ها داشته‌اند. به منظور صحت‌سنجی مدل از نرخ پیش‌بینی (Prediction Rate) و نرخ موفقیت (Success Rate) و همچنین شاخص سطح سلول هسته (Cell SCAI Area Index) استفاده شد. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که مدل ترکیبی با نرخ پیش‌بینی ۰/۹۵۶ (۹۵/۶ درصد) و نرخ موفقیت ۰/۹۲۳ (۹۲/۳ درصد) دارای دقت پیش‌بینی عالی است و نسبت به روش‌های شاخص آنتروپی و شواهد وزن یقینی با نرخ پیش‌بینی ۰/۹۳۲ و ۰/۹۱۷ و نرخ موفقیت ۰/۹۱۱ و ۰/۹۰۱ دقت بالاتری دارد. طبق نتایج شاخص SCAI، قدرت تفکیک طبقات در مدل ترکیبی مناسب بوده و طبق نتایج ۲۸/۹۵ درصد از منطقه مطالعاتی در کلاس حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. نتایج این پژوهش می‌تواند مورد استفاده برنامه‌ریزان کاربری اراضی در جهت توسعه فعالیت‌های عمرانی مانند جاده‌سازی و تعیین خطوط انتقال گاز و برق قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها:** فرسایش خندقی، تست هم‌خطی، شاخص آنتروپی، تابع شواهد یقینی، صحت‌سنجی.

\*نویسنده مسئول: علیرضا عرب عامری

E-mail: Alireza.ameri91@yahoo.com

## ۱- پیش‌نوشتار

مختلفی مانند توپوگرافی، سنگ‌شناسی، بارندگی، خاک و کاربری اراضی در ایجاد آنها مؤثر است (Arabameri et al., 2019b; EI Maaoui et al., 2012). پژوهشی دیگر Go'mez-Gutie'rre et al. (2015) توپوگرافی، لیتولوژی، کاربری اراضی، پوشش سطحی و اقلیم را پارامترهای مؤثر در وقوع فرسایش خندقی و Conoscenti et al. (2014) در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از رگرسیون لجستیک در سسیلی ایتالیا، پارامترهای توپوگرافی، لیتولوژی، ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی، جاده و ویژگی‌های خاک را در ایجاد خندق مؤثر معرفی کرده‌اند. Rahmati et al. (2017) به ارزیابی تأثیر پارامترهای زمین‌محیطی در فرسایش خندقی در مناطق نیمه‌خشک پرداخته و توپوگرافی، لیتولوژی، کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک، پوشش سطحی و هیدرولوژی را پارامترهای مؤثر در وقوع فرسایش خندقی دانسته‌اند. (Porghasemi et al. (2017) عملکرد مدل‌های ترکیبی و انفرادی را به منظور مدل‌سازی فرسایش خندقی در استان گلستان ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که پارامترهای توپوگرافی، لیتولوژی، ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی، زیرساخت‌ها و هیدرولوژی در وقوع فرسایش خندقی مؤثر هستند. Arabameri et al. (2018c) به ارزیابی مقایسه‌ای و ترکیب روش‌های شواهد وزن قطعی و رگرسیون لجستیک در زمینه مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی در حوضه طرود در استان سمنان پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که پارامترهای کاربری اراضی، لیتولوژی و فاصله از جاده بیشترین تأثیر را در وقوع فرسایش خندقی داشته‌اند. Arabameri et al. (2019a) از یک متدولوژی

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در زمینه توسعه پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Arabameri et al., 2017a and 2018a). خندق به عنوان مخرب‌ترین نوع فرسایش خاک، معمولاً به عنوان یک کانال عمیق است که به وسیله جریان آب متمرکز فرسایش یافته و خاک‌های سطحی و مواد آن از بین رفته و بزرگتر از آن است که به وسیله عمل شخم زدن معمولی ایجاد (USDA-SCS, 1966) شود و معمولاً زمانی ایجاد می‌شود که آستانه ژئومورفولوژیک به علت افزایش در قدرت فرسایش‌پذیری آب و یا فرسایش‌پذیری رسوب افزایش پیدا کند (رجب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲؛ Torri et al., 2012). مورفولوژی عمق و مقطع عرضی خندق‌ها با فرسایش‌پذیری افق‌های خاک و ویژگی‌های زمین‌شناسی لایه‌های زیرین منطبق است (EI Maaoui et al., 2012). خندق‌ها از لحاظ مورفولوژی به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱) خندق‌های خطی که یک پیشانی منفرد دارند؛ ۲) خندق‌های پنجه‌ای که دارای چند پیشانی مجزا هستند و ۳) خندق‌های جبهه‌ای که عموماً در حاشیه رودخانه‌ها ایجاد می‌شوند و یا به صورت شاخه‌ای از خندق‌های اصلی هستند (De ploey, 1989). فرسایش خندقی یک مشکلی عمده به منظور مدیریت منابع طبیعی است که منجر به تخریب زمین و خسارات اقتصادی در سرتاسر جهان می‌شود (Chaplot, 2013). این پدیده باعث آسیب رساندن به زیرساخت‌ها مانند جاده و خطوط انتقال گاز و برق، منابع طبیعی و کشاورزی می‌شود (Go'mez-Gutie'rre et al., 2015; Arabameri and Pourghasemi, 2019). خندق‌ها از ویژگی‌های معمول شیب‌ها و مناطق تپه‌ماهوری هستند که عوامل زمین‌محیطی

مطالعاتی با استفاده از تفسیر عکس‌های هوایی و عملیات میدانی گسترده به وسیله سیستم موقعیت‌یاب جهانی (Global Position System) تهیه شد (Pourghasemi et al., 2017). مجموعه‌ای از گالی‌ها با مقطع عرضی U شکل و V شکل با چندین متر عمق و عرض در منطقه مطالعاتی و در مجموع ۱۷۲ خندق در منطقه مطالعاتی شناسایی شد (شکل ۱).

خندق‌ها به صورت تصادفی به دو گروه مدل‌سازی و صحت‌سنجی تقسیم شدند که ۷۰ درصد (۱۲۱ موقعیت خندق) به منظور مدل‌سازی و ۳۰ درصد (۵۱ موقعیت خندق) به منظور صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند (Rahmati et al., 2016; Arabameri et al., 2017b and 2018b, c and d). در گام بعد گالی‌ها در فرمت پلیگون به فرمت نقطه تبدیل شد و در جریان مدل‌سازی و صحت‌سنجی استفاده شد. تعداد مشابه مناطق فاقد فرسایش خندقی نیز به منظور استفاده در جریان صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت.

### ۳-۲. پارامترهای زمین‌محیطی مؤثر در فرسایش خندقی

در این پژوهش بر اساس عملیات میدانی گسترده و شرایط محیطی منطقه مطالعاتی، دسترسی به داده‌ها و مطالعه گسترده ادبیات تحقیق، ۱۹ پارامتر انتخاب شد (جدول ۱) و پس از انجام تست هم‌خطی، ۱۲ پارامتر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، طول شیب (Slope Length)، شاخص خیزی توپوگرافی (Topography Wetness Index)، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، کاربری اراضی/ پوشش سطحی، لیتولوژی، فاصله از جاده و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) به منظور مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲). منبع و دقت پارامترهای مؤثر در این پژوهش در جدول ۲ نشان داده شده است.

برای استخراج پارامترهای توپوگرافیک و هیدرولوژیک منطقه مطالعاتی از مدل رقومی ارتفاعی ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.5 و برای تهیه نقشه کاربری اراضی/ پوشش سطحی منطقه مطالعاتی از تصاویر لندست ۸ استفاده شد. بدین منظور الگوریتم طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر شباهت در محیط نرم‌افزار ENVI به کار رفت. منطقه مطالعاتی به ۷ کلاس شامل زراعت آبی، محدوده شهری، اراضی بایر، اراضی شور، اراضی باتلاقی و ماندابی، مرتع با تاج پوشش غنی و مرتع با تاج پوشش فقیر تقسیم‌بندی شد.

جدول ۱- تست هم‌خطی بین متغیرهای مؤثر در فرسایش خندقی.

متغیر	تست هم‌خطی		متغیر	تست هم‌خطی	
	ضریب تحمل	عامل تورم واریانس		ضریب تحمل	عامل تورم واریانس
ضریب ثابت	-	-	شیب	۰/۶۷۲	۱/۴۸۹
عمق خاک	۰/۰۴۳	۱۸/۵۴	تراکم آبراهه	۰/۶۶۶	۱/۵۰۳
لیتولوژی	۰/۹۲۰	۱/۰۸۷	فاصله از آبراهه	۰/۶۷۴	۱/۴۸۳
NDVI	۰/۸۶۴	۱/۱۵۸	ارتفاع	۰/۲۹۹	۳/۳۴۳
شکل شیب	۰/۹۴۵	۱/۰۵۸	طول شیب	۰/۸۴۳	۱/۶۴۵
LU/LC	۰/۸۲۶	۱/۲۱۱	جهت شیب	۰/۹۴۱	۱/۰۶۳
SPI	۰/۰۹۳	۱۱/۳۴	بافت خاک	۰/۰۵۶	۱۴/۲۳
TWI	۰/۹۹۸	۱/۰۰۲	فاصله از گسل	۰/۰۴۸	۱۳/۹۸
بارندگی	۰/۰۷۵	۱۴/۳۴	فاصله از جاده	۰/۳۲۳	۳/۰۹۴
انحنای مقطع	۰/۰۳۲	۲۴/۷۵	تراکم گسل	۰/۰۲۴	۲۸/۵۴

ترکیبی نوین به منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که از بین ۱۲ پارامتر توپوگرافیک، هیدرولوژیک، اقلیمی و محیطی مورد استفاده، پارامترهای فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در رخداد فرسایش خندقی داشته‌اند. با توجه به اهمیت فرسایش خندقی، در طی چند دهه گذشته روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران در سراسر جهان به منظور آنالیز رابطه آماری بین پارامترهای مؤثر در وقوع فرسایش خندقی و خندق‌ها و تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی به کار رفته است که شامل مدل‌های آماری دومتغیره و چن متغیره و مدل‌های ماشینی است (Komejady et al., 2015). در سال‌های اخیر روش‌های ترکیبی به علت نتایج دقیق‌تر بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. علیرغم حساسیت بالای حوضه شاهرود به فرسایش خندقی و با توجه به خطرات ناشی از این نوع فرسایش برای زیرساخت‌های انسانی و منابع آب و خاک، تاکنون در زمینه ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی در این حوضه پژوهشی انجام نشده است. هدف از این پژوهش استفاده از یک روش ترکیبی نوین با استفاده از روش‌های داده‌محور شاخص آنتروپی و تابع شواهد یقینی به منظور ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی در حوضه شاهرود است.

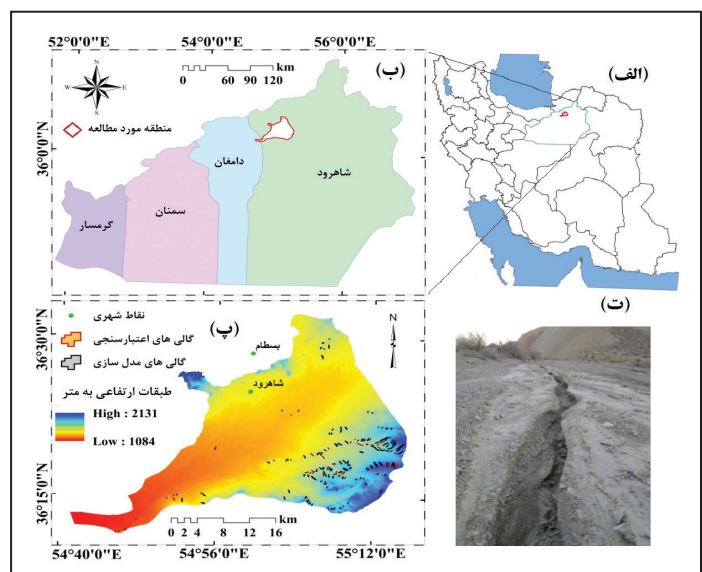
### ۲-۲. موقعیت جغرافیایی

حوضه شاهرود با مساحتی حدود ۸۴۷/۸۷ کیلومتر مربع در خاور استان سمنان، در شهرستان شاهرود و در محدوده جغرافیایی  $54^{\circ} 54' 54''$  تا  $55^{\circ} 15' 03''$  درجه طول خاوری و  $36^{\circ} 11' 19''$  تا  $36^{\circ} 26' 47''$  عرض شمالی قرار دارد. ارتفاع منطقه مطالعاتی بین ۱۰۸۴ تا ۲۱۳۱ متر بالاتر از سطح دریا متغیر است. حوضه شاهرود با میانگین بارندگی سالیانه ۲۵۰ میلی‌متر در سال آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک دارد. از مهم‌ترین سازندهای موجود در منطقه می‌توان به سازندهای زیارت و لار اشاره کرد. بیشترین مساحت منطقه مطالعاتی را ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید کم‌ارتفاع در بر گرفته است.

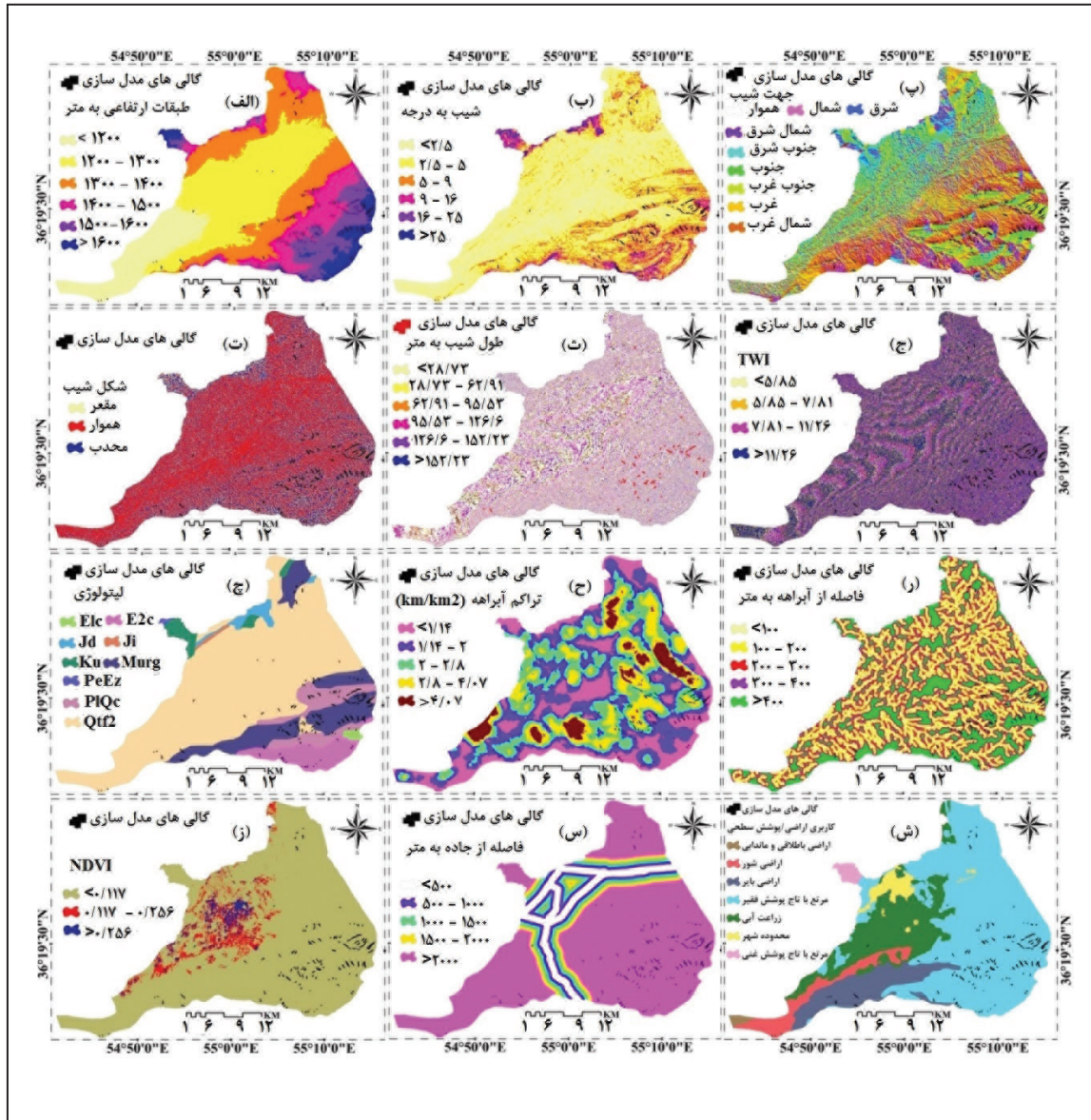
### ۳-۲. تهیه لایه‌های اطلاعات

#### ۳-۱. نقشه پراکنش خندق

در پژوهش حاضر، نقشه پراکنش فرسایش خندقی دقیق و با جزئیات منطقه



شکل ۱- الف) موقعیت منطقه مطالعاتی در ایران؛ ب) موقعیت منطقه مطالعاتی در استان سمنان؛ پ) موقعیت خندق‌های مدل‌سازی و اعتبارسنجی در منطقه مطالعاتی؛ ت) نمونه‌ای از خندق‌های رخ داده در منطقه مطالعاتی.



شکل ۲- پارامترهای زمین‌محیطی مؤثر در فرسایش خندقی.

جدول ۲- منبع و دقت پارامترهای مورد استفاده در پژوهش.

پارامترها	منبع	دقت	پارامترها	منبع	دقت
ارتفاع	مدل رقومی ASTER	۳۰ متر	فاصله از آبراهه	مدل رقومی ASTER	۳۰ متر
شیب	مدل رقومی ASTER	۳۰ متر	تراکم آبراهه	مدل رقومی ASTER	۳۰ متر
جهت شیب	مدل رقومی ASTER	۳۰ متر	لیتولوژی	نقشه زمین‌شناسی	۱:۱۰۰۰۰
شکل شیب	مدل رقومی ASTER	۳۰ متر	کاربری اراضی	تصویر لندست ۸	۳۰ متر
طول شیب	مدل رقومی ASTER	۳۰ متر	فاصله از جاده	نقشه توپوگرافی	۱:۵۰۰۰۰
TWI	مدل رقومی ASTER	۳۰ متر	NDVI	تصویر لندست ۸	۳۰ متر

به همراه عملیات میدانی استفاده شد. واحدهای لیتولوژی منطقه مطالعاتی در جدول ۳ نشان داده شده است. برای تهیه نقشه فاصله از جاده در ابتدا راه‌های ارتباطی از طریق تصاویر Google Earth و نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۷۸) استخراج و در مرحله بعد در محیط ArcGIS و با استفاده از ابزار distance نقشه فاصله از جاده تهیه شد. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، تمامی لایه‌ها به رستر با اندازه سلولی ۳۰ متر تبدیل شد که مشابه اندازه سلولی مدل رقومی مورد استفاده در پژوهش است (Conoscenti et al., 2014).

نقشه تهیه شده با استفاده از ۲۸۵ نقطه کنترل زمینی در منطقه مورد صحت‌سنجی قرار گرفت و ضریب کاپا با استفاده از رابطه برای آن محاسبه شد (Lo and Yeung, 2002):

$$K = \frac{\{N \sum_{i=1}^r (X_{ii}) - N \sum_{i=1}^r (X_{i+} \cdot X_{+i})\}}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \cdot X_{+i})} \quad (1)$$

که در آن  $r$  تعداد سطرها در ماتریس خطا،  $X_{ii}$  تعداد مشاهدات در سطر  $i$  و ستون  $i$ ،  $X_{i+}$  تعداد کل مشاهدات در ستون  $i$  و  $N$  تعداد کل مشاهدات در ماتریس است. ضریب کاپا برای نقشه کاربری اراضی/ پوشش سطحی تهیه شده ۹۸/۶۵ به دست آمد. برای تهیه نقشه لیتولوژی از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰

جدول ۳- سازندهای زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۷).

کد	لیتولوژی	دوران	دوره	مساحت (km <sup>2</sup> )	درصد مساحت
Murmg	مارن ژیس دار	سنوزویک	میوسن	۱۲۹/۹۷	۱۵/۳۱
Qft2	ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید	سنوزویک	کواترنر	۵۵۵/۴۶	۶۵/۴۶
Ku	سنگ‌های تفکیک نشده کرتاسه بالایی	مزوزویک	کرتاسه	۲۱/۵۷	۲/۵۴
Jd	سنگ‌آهک رسی سبز تا خاکستری ضخیم تا نازک‌لایه با میان‌لایه‌هایی از شیل آهکی	مزوزویک	ژوراسیک	۱۶/۴۰	۱/۹۳
PeEz	سنگ‌آهک ریفی و مارن ژیس دار (سازند زیارت)	سنوزویک	پالئوسن-ائوسن	۱/۳۰۴	۰/۱۵۳
PIQc	کنگلومرای پلی‌ژنیک سست	سنوزویک	پلستوسن - عهد حاضر	۳۹/۲۷	۴/۶۲
Jl	سنگ‌آهک توده‌ای - نازک‌لایه خاکستری روشن	مزوزویک	ژوراسیک - کرتاسه	۲/۹۴۷	۰/۳۴۷
E2c	کنگلومرا و ماسه سنگ	سنوزویک	ائوسن	۵۲/۵۲۳	۶/۱۹۰
PIQc	کنگلومرای پلی‌ژنیک سست	سنوزویک	پلستوسن - عهد حاضر	۲۴/۶۶۹	۲/۹۰۷
E1c	ماسه سنگ، کنگلومرا، مارن و سنگ‌آهک ماسه‌ای	سنوزویک	پالئوسن - ائوسن	۴/۳۳۷	۰/۵۱۱

### ۳-۳. شاخص آنتروپی

آنتروپی بیانگر نحوه انتخاب مهم‌ترین عوامل از بین عوامل مؤثر در وقوع یک رخداد است، به عبارت دیگر این روش پارامترهای با اهمیت بیشتر را در وقوع یک رخداد تعیین می‌کند (منصوری و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به اینکه در رخداد فرسایش خندقی عوامل مختلفی دخیل هستند، مدل شاخص آنتروپی به عنوان یک رویکرد مدیریتی تأثیر شگرفی در شناسایی عوامل مؤثر در رخداد خندقی و تعیین میزان تأثیرگذاری آنها دارد.

### ۳-۴. مدل تابع شواهد یقینی

مدل تابع شواهد یقینی بر اساس تئوری دمپستر-شیفر و نوع ساده شده احتمالات بالا و پایین بیزین است (Shafer, 1976). این مدل در جاتی از قطعیت در دامنه‌ای بین ۰ و ۱ را شامل می‌شود (Lee et al., 2013). در آنالیز پتانسیل فرسایش خندقی بر اساس مدل تابع شواهد یقینی، ساختار مدل می‌تواند به شکل رابطه زیر نشان داده شود:

$$m = 2^0 = \{\emptyset, T_p, \overline{T_p}, \theta\} \quad \theta = \{T_p, \overline{T_p}\} \quad (2)$$

که در آن  $T_p$  پیکسل‌هایی که به وسیله فرسایش خندقی تحت تأثیر قرار می‌گیرد،  $\overline{T_p}$  پیکسل‌هایی که به وسیله فرسایش خندقی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و  $\emptyset$  مجموعه خالی است. بر اساس رابطه بالا، تابع قطعیت (Bel) می‌تواند به صورت روابط (۳ و ۴) بیان شود:

$$|\lambda(T_p)_{A_{ij}}| = \frac{|N(F \cap A_{ij})|}{N(F)} \quad (3)$$

$$(Bel) = |\lambda(T_p)_{A_{ij}}| / \sum |\lambda(T_p)_{A_{ij}}| \quad (4)$$

که در آن  $N(F \cap A_{ij})$  تعداد سلول‌های خندقی‌هایی که در طبقه  $j$  عامل  $A_{ij}$  رخ داده‌اند،  $N(F)$  تعداد تمامی سلول‌های خندقی‌ها در منطقه مطالعاتی،  $N(A_{ij})$  تراکم سلول‌ها در  $A_{ij}$  و  $N(P)$  تراکم سلول‌ها در کل منطقه مطالعاتی است. در این پژوهش از تابع قطعیت برای تعیین وزن کلاس‌های عوامل استفاده شده است (Tahmassebi et al., 2016). پس از تعیین وزن پارامترها با استفاده از روش شاخص آنتروپی و تعیین وزن کلاس‌های آنها با استفاده از روش تابع شواهد یقینی، با استفاده از رابطه ۵ اقدام به ترکیب روش‌ها و تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از روش ترکیبی نوین شد:

(۵)

$$GESM = (factor1_{Bel} \times W_j) + (factor2_{Bel} \times W_j) + (factor3_{Bel} \times W_j) + (factor12_{Bel} \times W_j)$$

که در آن (Gully Erosion Susceptibility Mapping) GESM نقشه حساسیت فرسایش خندقی است.

### ۳-۵. ارزیابی صحت مدل

در این پژوهش به منظور ارزیابی دقت نقشه حساسیت فرسایش خندقی تهیه شده از منحنی ویژگی عملکرد گیرنده (Receiver Operating Characteristic) و شاخص سطح سلول هسته (seed cell area index) استفاده شد (Rahmati et al., 2014 and 2016). مساحت زیر منحنی (Area Under Curve) در منحنی ROC کیفیت پیش‌بینی مدل را نشان می‌دهد (Rahmati et al., 2016). مقادیر AUC بین ۰/۵ تا ۱ متغیر است و هر چه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد بیانگر دقت پیش‌بینی بالاتر مدل است

توپوگرافی و جهت شیب با کسب پایین ترین امتیازات (۰/۰۷، ۰/۰۴، و ۰/۰۶۹) کمترین تأثیر را در وقوع فرسایش خندقی داشته‌اند. پارامترهای فاصله از جاده، شیب، کاربری اراضی، شکل شیب، تراکم آبراهه و فاصله از آبراهه در رتبه‌های چهارم تا نهم قرار گرفته‌اند.

#### ۴-۳. تعیین رابطه آماری بین خندق‌ها و پارامترهای مؤثر در ایجاد آنها با روش تابع شواهد یقینی

نتایج حاصل از رابطه آماری بین خندق‌ها و پارامترهای زمین محیطی مؤثر در ایجاد آنها در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس پارامتر ارتفاع، رابطه مستقیمی بین ارتفاع و رخداد خندق مشاهده می‌شود. به گونه‌ای که با افزایش ارتفاع احتمال رخداد فرسایش خندقی افزایش پیدا می‌کند و کلاس بیشتر از ۱۶۰۰ متر با بیشترین مقدار قطعیت (۰/۴۹۴) بیشترین تأثیر را در رخداد خندق در منطقه مطالعاتی داشته است و در مقابل کلاس کمتر از ۱۲۰۰ متر با کمترین مقدار قطعیت (۰/۰۰۲) رابطه ضعیفی با رخداد خندق از خود نشان داده است. نتایج حاصل از پارامتر شیب نشان داد که از بین ۶ کلاس، کلاس شیب ۹ تا ۱۶ درجه با بیشترین مقدار قطعیت (۰/۳۰۵) تأثیر زیادی در فرسایش‌پذیری منطقه مطالعاتی داشته است.

بر اساس پارامتر جهت شیب، جهت‌های شمال باختری بیشترین تأثیر را در رخداد فرسایش خندقی داشته و بیشترین مقدار قطعیت (۰/۲۲۸) را کسب کرده‌اند که از مهم‌ترین علل آن دریافت رطوبت بیشتر شیب‌های واقع در این جهات است. طبق نتایج حاصل از پارامتر شکل شیب، شیب‌های محدب و مقعر نسبت به مناطق هموار تأثیر بیشتری در ایجاد فرسایش خندقی داشته‌اند که این امر به علت واگرایی و همگرایی جریان و انبساط و انقباض خاک‌ها در این دامنه‌هاست که در نتیجه شرایط را برای ایجاد فرسایش فراهم می‌کند که با نتایج حاصل از تحقیقات (Conforti et al., 2011) مطابقت دارد. در پارامتر شاخص خیزی توپوگرافی، کلاس بیشتر از ۵/۸۵ رابطه قوی با رخداد فرسایش خندقی و دارای مقدار قطعیت بالاتری (۰/۲۶۸) نسبت به بقیه کلاس‌هاست. پارامترهای فاصله از آبراهه و فاصله از جاده رابطه مستقیمی با رخداد فرسایش خندقی داشته‌اند. به گونه‌ای که در پارامتر فاصله از آبراهه، کلاس بیشتر از ۴۰۰ متر و در پارامتر فاصله از جاده، کلاس بیشتر از ۲۰۰۰ متر با کسب بیشترین مقدار قطعیت نسبت به بقیه کلاس‌ها ارتباط بیشتری با رخداد فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی داشته‌اند. در مقابل پارامتر تراکم آبراهه رابطه معکوس با ایجاد فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی داشته است. به گونه‌ای که با افزایش تراکم آبراهه، احتمال رخداد فرسایش خندقی کاهش پیدا می‌کند و کلاس کمتر از ۱/۱۴ متر در متر مربع با بیشترین مقدار قطعیت (۰/۳۳۷) ارتباط قوی با خندق‌های منطقه مطالعاتی داشته است.

(Regmi et al., 2010). در این پژوهش منحنی ROC نرخ موفقیت و نرخ پیش‌بینی به منظور محاسبه و ارزیابی دقت و توانایی پیش‌بینی مدل به کار رفت. به ترتیب از داده‌های اعتبارسنجی و مدل‌سازی برای محاسبه نرخ پیش‌بینی و نرخ موفقیت استفاده شد. شاخص SCAI در ابتدا به وسیله (Süzen and Doyuran, 2004) ارائه شد. در این شاخص کلاس‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد باید دارای مقادیر پایین SCAI و کلاس‌های حساسیت کم و خیلی کم باید دارای مقادیر بالا باشند.

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱. آنالیز تست هم‌خطی بین پارامترهای مؤثر در فرسایش خندقی

در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی، انجام تست هم‌خطی بین پارامترها از اهمیت بالایی برخوردار است. در صورت وجود هم‌خطی بین پارامترها دقت پیش‌بینی مدل کاهش پیدا می‌کند. در این پژوهش از دو شاخص ضریب تحمل (tolerance) و عامل تورم واریانس (variance inflation factor) برای بررسی تست هم‌خطی استفاده شد. اگر مقدار ضریب تحمل کمتر یا مساوی ۰/۱ و مقدار عامل تورم واریانس بیشتر یا مساوی ۱۰ باشد، وجود هم‌خطی بین متغیرها را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تست هم‌خطی بین متغیرها در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس جدول ۱، از میان ۱۹ متغیر مورد بررسی، ۷ متغیر دارای هم‌خطی هستند و در نتیجه به علت پایین آوردن دقت پیش‌بینی مدل حذف شدند و ۱۲ پارامتر که دارای ضریب تحمل بیشتر از ۰/۱ و عامل تورم واریانس کمتر از ۱۰ هستند، در جریان مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

##### ۴-۲. تعیین وزن پارامترهای مؤثر در رخداد خندق با روش شاخص آنتروپی

نتایج حاصل از تعیین وزن پارامترهای مؤثر در فرسایش خندقی در جدول ۱ نشان داده شده است. طبق نتایج پارامترهای ارتفاع، لیتولوژی و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی به ترتیب با کسب بیشترین امتیازات (۰/۶۰۶، ۰/۳۹۵، و ۰/۳۶۳) بیشترین تأثیر را در رخداد فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی داشته‌اند با نتایج حاصل از تحقیقات قبلی انجام شده (Golestani et al., 2014; Rahmati et al., 2016; Ghorbani Nejad et al., 2016) مطابقت دارد. (Rahmati et al., 2016) در پژوهش خود بیان کردند که ارتفاع نقش مهمی در نوع پوشش گیاهی و ویژگی‌های بارش و در نتیجه تأثیر زیادی در وقوع فرسایش خندقی دارد. (Golestani et al., 2014) در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که ویژگی‌های سنگ‌شناسی مواد سطح زمین و نزدیک سطح زمین در رخداد خندق تأثیر زیادی دارند. (Ghorbani Nejad et al., 2016) عامل شیب را یکی از مهم‌ترین عوامل در رخداد فرسایش خندقی معرفی کرده‌اند. در مقابل پارامترهای طول شیب، شاخص خیزی

جدول ۴- ارتباط بین پارامترهای زمین محیطی مؤثر در وقوع فرسایش خندقی و خندق‌های موجود در منطقه مطالعاتی.

پارامتر	کلاس	مساحت هر کلاس		مساحت کالی		مدل EBF	مدل IOE
		مساحت	%	مساحت	%		
ارتفاع	<۱۲۰۰	۱۱۴/۲۵	۱۳/۴۷	۰/۰۰۸	۰/۳۲	۰/۰۰۲	۰/۰۸۳
	۱۲۰۰ - ۱۳۰۰	۲۶۸/۶۳	۳۱/۶۸	۰/۰۰۶	۲/۶۶	۰/۰۰۷	۰/۳۵۵
	۱۳۰۰ - ۱۴۰۰	۲۱۱/۱۰	۲۴/۸۹	۰/۰۲۱	۸/۸۵	۰/۰۳۳	۱/۷۴۱
	۱۴۰۰ - ۱۵۰۰	۱۱۵/۲۱	۱۳/۵۸	۰/۰۵۸	۲۳/۶۶	۰/۱۶۴	۳/۱۴۵
	۱۵۰۰ - ۱۶۰۰	۸۴/۷۹	۱۰	۰/۰۷۷	۳۱/۴۶	۰/۲۹۷	۵/۱۹۸
	>۱۶۰۰	۵۳/۸۷	۶/۳۵	۰/۰۸۱	۳۳/۰۲	۰/۴۹۴	۱۰/۵۴۹

ادامه جدول ۴-

پارامتر	کلاس	مساحت هر کلاس		مساحت کالی			مدل EBF	مدل IOE
		مساحت	%	مساحت	%	Bel	Pij	W
شیب	< ۲/۵	۳۸۴/۰۴	۴۵/۲۹	۰/۲۲	۹/۰۷	۰/۱۸	۰/۲۰۰	
	۲/۵ - ۵	۲۵۹/۲۰	۳۰/۵۷	۰/۶۱	۲۵/۰۴	۰/۰۷۳	۰/۸۱۹	
	۵ - ۹	۱۲۴/۶۱	۱۴/۶۹	۰/۹۰	۳۶/۷۴	۰/۲۲۶	۲/۵۰۰	۰/۲۳۶
	۹ - ۱۶	۵۴/۱۸	۶/۳۹	۰/۵۳	۲۱/۴۷	۰/۳۰۵	۳/۳۵۹	
	۱۶ - ۲۵	۱۹/۵۶	۲/۳۰	۰/۱۶	۶/۷۴	۰/۲۶۵	۲/۹۲۲	
	> ۲۵	۶/۲۵	۰/۷۳	۰/۰۲	۰/۹۱	۰/۱۱۱	۱/۲۳۵	
جهت شیب	هموار	۹۴/۶۹	۱۱/۱۶	۰/۲۳	۹/۶۹	۰/۱۰۴	۰/۸۶۸	
	شمال	۶۵/۹۳	۷/۷۷	۰/۱۴	۵/۷۹	۰/۰۸۹	۰/۷۴۵	۰/۰۶۹
	شمال خاوری	۶۸/۴۰	۸/۰۶	۰/۰۳	۱/۳۸	۰/۰۲۰	۰/۱۷۱	
	خاور	۸۲/۸۴	۹/۷۷	۰/۰۵	۲/۴۰	۰/۰۲۹	۰/۲۴۶	
	جنوب خاوری	۹۴/۲۱	۱۱/۱	۰/۲۲	۸/۹۶	۰/۰۹۶	۰/۸۰۷	
	جنوب	۱۰۰/۵۵	۱۱/۸۵	۰/۳۳	۱۳/۵۹	۰/۱۳۷	۱/۱۴۶	
	جنوب باختری	۱۱۳/۸۷	۱۳/۴۳	۰/۳۵	۱۴/۲۵	۰/۱۲۷	۱/۰۶۱	
	باختری	۱۱۵/۶۱	۱۳/۶۳	۰/۴۶	۱۸/۸۸	۰/۱۶۶	۱/۳۸۴	
	شمال باختری	۱۱۱/۷۲	۱۳/۱۷	۰/۶۱	۲۵	۰/۲۲۸	۱/۸۹۷	
فاصله از آبراهه	< ۱۰۰	۲۱۴/۴۹	۲۵/۲۹	۰/۱۸	۷/۵۸	۰/۰۵۸	۰/۲۹۹	۰/۱۱۳
	۱۰۰ - ۲۰۰	۱۸۷/۰۲	۲۲/۰۵	۰/۴۱	۱۶/۶۹	۰/۱۴۷	۰/۷۵۶	
	۲۰۰ - ۳۰۰	۱۴۵	۱۷/۱۰	۰/۳۵	۱۴/۴۷	۰/۱۶۵	۰/۸۴۶	
	۳۰۰ - ۴۰۰	۱۲۰/۵۱	۱۴/۲۱	۰/۳۵	۱۴/۳۶	۰/۱۹۷	۱/۰۱۰	
	> ۴۰۰	۱۸۰/۸۲	۲۱/۳۲	۱/۱۵	۴۶/۸۸	۰/۴۳۱	۲/۱۹۸	
تراکم آبراهه	< ۱/۱۴	۱۸۲/۱۹	۲۱/۴۸	۰/۷۵	۳۰/۶۹	۰/۳۳۷	۱/۴۲۸	۰/۱۱۶
	۱/۱۴ - ۲	۲۴۵/۰۱	۲۸/۸۹	۰/۸۱	۳۳/۰۶	۰/۲۷۰	۱/۱۴۴	
	۲ - ۲/۸	۲۲۳/۵۲	۲۶/۳۶	۰/۵۷	۲۳/۲۲	۰/۲۰۸	۰/۸۸۰	
	۲/۸ - ۴/۰۷	۱۴۵/۵۱	۱۷/۱۶	۰/۳۱	۱۲/۸۳	۰/۱۷۶	۰/۷۴۷	
	> ۴/۰۷	۵۱/۶۲	۶/۰۸	۰/۰۴	۰/۱۸	۰/۰۰۷	۰/۰۲۹	
لیتولوژی	Murmg	۱۲۹/۹۷	۱۵/۳۱	۱/۳۸	۵۶/۲۸	۰/۴۳۸	۳/۶۷۴	۰/۳۹۵
	Qft2	۵۵۵/۴۵	۶۵/۴۶	۰/۳۷	۱۵/۲۰	۰/۰۲۷	۰/۲۳۲	
	Ku	۲۱/۵۷	۲/۵۴۲	۰	۰	۰	۰	
	Jd	۱۶/۴۰	۱/۹۳	۰	۰	۰	۰	
	PeEz	۱/۳۰	۰/۱۵	۰	۰	۰	۰	
	PIQc	۶۳/۹۵	۷/۵۳	۰/۵۴	۲۱/۸۷	۰/۳۴۵	۲/۹۰۲	
	Jl	۲/۹۴	۰/۳۴	۰	۰	۰	۰	
	E2c	۵۲/۵۴	۶/۱۹	۰/۱۵	۶/۳۴	۰/۱۲۱	۱/۰۲۴	
	E1c	۴/۳۳	۰/۵۱	۰/۰۰۷	۰/۲۹	۰/۰۶۷	۰/۵۷۰	

ادامه جدول ۴-

پارامتر	کلاس	مساحت هر کلاس		مساحت کالی			مدل EBF		مدل IOE	
		مساحت	%	مساحت	%	Bel	Pij	W		
کاربری اراضی	زراعت آبی	۱۶۱/۷۰	۱۹/۰۵	۰/۰۰۷	۰/۲۹	۰/۰۰۷	۰/۰۱۵	۰/۱۹۹		
	محدوده شهر	۲۶/۶۱	۳/۱۳	۰	۰	۰	۰			
	اراضی بایر	۹۳/۴۴	۱۱/۰۱	۰/۰۹	۳/۹۷	۰/۱۷۷	۰/۳۶۰			
	اراضی شور	۴۹/۲۱	۵/۸۰	۰/۰۰۶	۰/۲۵	۰/۰۲۱	۰/۰۴۳			
	اراضی باطلاتی و ماندایی	۴/۵۰	۰/۵۳	۰	۰	۰	۰			
	مرتع با تاج پوشش غنی	۱۰/۲۵	۱/۲۰	۰	۰	۰	۰			
	مرتع با تاج پوشش فقیر	۵۰۲/۷۵	۵۹/۲۵	۲/۳۵	۹۵/۴۷	۰/۷۹۳	۱/۶۱۱			
شکل شیب	مقعر	۲۵۵/۶۵	۳۰/۱۵	۰/۷۴	۳۰/۳۶	۰/۲۳۸	۱/۰۰۷	۰/۱۴۰		
	هموار	۵۳۱/۹۸	۶۲/۷۴	۱/۳۰	۵۲/۸۶	۰/۱۹۹	۰/۸۴۲			
	محدب	۶۰/۲۲	۷/۱۰	۰/۴۱	۱۶/۷۶	۰/۵۶۱	۲/۳۶۰			
NDVI	-۰/۱۱۷ -۰/۱۱۴	۷۷۶/۸۷	۹۱/۶۲	۲/۴۶	۱۰۰	۱	۱/۰۹۱	۰/۳۶۳		
	-۰/۲۵۶ ۰/۱۱۷	۵۱/۰۷	۶/۰۲	۰	۰	۰	۰			
	-۰/۶۰۸ ۰/۲۵۶	۱۹/۹۹	۲/۳۵	۰	۰	۰	۰			
فاصله از جاده	<۵۰۰	۶۹/۲۷	۸/۱۷	۰	۰	۰	۰	۰/۲۴۲		
	۵۰۰ - ۱۰۰۰	۵۷/۱۸	۶/۷۴	۰	۰	۰	۰			
	۱۰۰۰ - ۱۵۰۰	۵۱/۵۳	۶/۰۷	۰	۰	۰	۰			
	۱۵۰۰ - ۲۰۰۰	۳۳/۳۲	۳/۹۲	۰/۰۰۸	۰/۳۲	۰/۰۵۸	۰/۰۸۳			
	>۲۰۰۰	۶۳۶/۵۶	۷۵/۰۷	۲/۴۶	۹۹/۶۷	۰/۹۴۱	۱/۳۲۷			
طول شیب	> ۲۸/۷۳	۱۴۳/۴۷	۱۶/۹۲	۰/۳۸	۱۵/۴۹	۰/۱۵۵	۰/۹۱۵	۰/۰۰۷		
	۲۸/۷ - ۶۲/۹	۱۲۵/۲۷	۱۴/۷۷	۰/۳۶	۱۴/۹۹	۰/۱۷۱	۱/۰۰۹			
	۶۲/۹ - ۹۵/۵	۱۱۳/۳۴	۱۳/۳۶	۰/۲۹	۱۱/۸۷	۰/۱۵۰	۰/۸۸۸			
	۹۵/۵ - ۱۲۶/۶	۱۳۱/۵۱	۱۵/۵۱	۰/۳۳	۱۳/۵۴	۰/۱۴۸	۰/۸۷۲			
	- ۱۵۲/۲ ۱۲۶/۶	۱۵۲/۹۰	۱۸/۰۳	۰/۳۸	۱۵/۶۴	۰/۱۴۷	۰/۸۶۷			
	> ۱۵۲/۲	۱۸۱/۳۶	۲۱/۳۹	۰/۷۰	۲۸/۵۳	۰/۲۲۶	۱/۳۳۳			
TWI	< ۵/۸۵	۷۵/۸۷	۸/۹۴	۰/۲۴	۹/۸۰	۰/۲۶۸	۱/۰۹۵	۰/۰۴۲		
	۵/۸۵ - ۷/۸۱	۲۲۷/۴۹	۲۶/۸۳	۰/۶۴	۲۶/۲۴	۰/۲۳۹	۰/۹۷۸			
	۷/۸۱ - ۱۱/۲۶	۱۱۶/۷۴	۱۳/۷۶	۰/۳۴	۱۳/۹۶	۰/۲۴۸	۱/۰۱۴			
	> ۱۱/۲۶	۴۲۷/۷۶	۵۰/۴۵	۱/۲۳	۴۹/۹۸	۰/۲۴۲	۰/۹۹۰			

که به دلیل پوشش گیاهی متراکم و وجود زمین‌های کشاورزی و باغات و همچنین توپوگرافی هموار در این منطقه، فرسایش در این بخش‌ها بسیار ناچیز است و امکان تشکیل گالی در این مناطق وجود ندارد. مساحت هر یک از کلاس‌های حساسیت در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس جدول ۴، از کل منطقه به مساحت ۸۴۷/۲۳ کیلومتر مربع، ۸/۲۸ درصد (۷۰/۱۸ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت خیلی کم، ۲۸/۰۷ درصد (۲۳۷/۸۶ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت کم، ۳۴/۶۸ درصد (۲۹۳/۸۳ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت متوسط، ۱۵/۹۷ درصد (۱۳۵/۳۵ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت زیاد و ۱۲/۹۸ درصد (۱۰۹/۹۸ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت خیلی زیاد قرار گرفته و از کل گالی‌های منطقه مطالعاتی به مساحت ۰/۷۲۹ کیلومتر مربع، ۲/۷۱ درصد (۰/۱۰۹ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت کم، ۵/۷۶ درصد (۰/۴۲ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت متوسط، ۳۳/۸۱ درصد (۰/۲۴۶ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت زیاد و ۵۷/۷۰ درصد (۰/۴۲۱ کیلومتر مربع) در کلاس حساسیت خیلی زیاد قرار گرفته است.

#### ۴-۵. صحت‌سنجی مدل ترکیبی

به منظور بررسی دقت مدل ترکیبی در شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی، نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از روش‌های شاخص آنتروپی (شکل ۳-الف) و تابع شواهد یقینی (شکل ۳-ب) نیز تهیه و با استفاده از روش‌های سطح زیر منحنی و شاخص سطح سلول هسته به مقایسه روش ترکیبی با مدل‌های انفرادی پرداخته شد. نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل و مقایسه آن با مدل‌های انفرادی با استفاده از روش‌های نرخ پیش‌بینی و نرخ موفقیت در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۴، مقدار نرخ پیش‌بینی و نرخ موفقیت روش ترکیبی به ترتیب ۰/۹۵۶ (۹۵/۶ درصد) و ۰/۹۲۳ (۹۲/۳ درصد) و بیانگر دقت عالی مدل در شناسایی و پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش خندقی است. این مقادیر برای مدل شاخص آنتروپی ۰/۹۳۲ (۹۳/۲ درصد) و ۰/۹۱۱ (۹۱/۱ درصد) و برای مدل شواهد وزن یقینی ۰/۹۱۷ (۹۱/۷ درصد) و ۰/۹۰۱ (۹۰/۱ درصد) به دست آمد. علیرغم اینکه مدل‌های شاخص آنتروپی و شواهد وزن یقینی نیز با دقت عالی به پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش خندقی پرداخته‌اند، نتایج نشان داد که مدل ترکیبی دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به مدل‌های انفرادی دارد و ادغام دو مدل باعث بالا رفتن دقت پیش‌بینی آنها شده است که با نتایج حاصل از تحقیقات قبلی انجام شده (Shrestha et al., 2017; Youssef et al., 2017; Pourghasemi, and Kerle, 2016) مطابقت دارد. نتایج حاصل از شاخص سطح سلول هسته نیز در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که قدرت تفکیک بین طبقات در هر سه مدل مناسب بوده به طوری که مقادیر کلاس‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد در هر سه مدل پایین است.

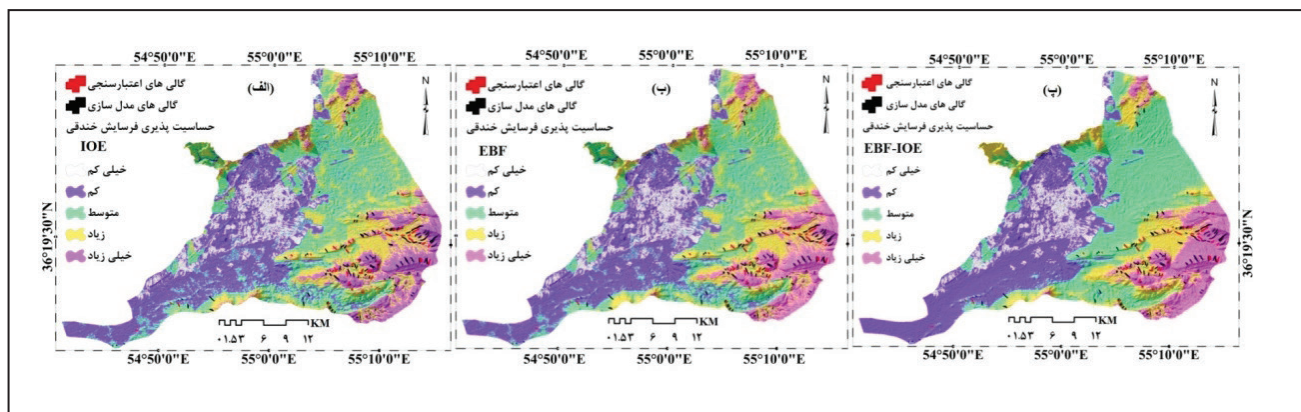
بر اساس پارامتر لیتولوژی، کلاس مارن ژئوس دار با کسب بیشترین مقدار قطعیت (۰/۴۳۸) نسبت به بقیه کلاس‌ها بیشترین تأثیر را در ایجاد فرسایش خندقی داشته است که از مهم‌ترین علل آن می‌توان به حساسیت بالای این سازند نسبت به فرسایش اشاره کرد. بر اساس پارامتر کاربری اراضی/ پوشش سطحی، کلاس مرتع با تاج پوشش فقیر با بیشترین مقدار قطعیت (۰/۷۹۳) بیشترین تأثیر را در وقوع فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی داشته است. طبق پارامتر شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی، این پارامتر رابطه معکوس با فرسایش خندقی داشته و با افزایش پوشش گیاهی منطقه احتمال رخداد فرسایش خندقی کاهش یافته است. به گونه‌ای که کلاس ۰/۱۱۴ تا ۰/۱۱۷ با کمترین مقدار پوشش گیاهی نسبت به بقیه کلاس‌ها، با بیشترین مقدار قطعیت (۱)، بیشترین ارتباط را با فرسایش خندقی از خود نشان داده که بیانگر تأثیر شگرف پوشش گیاهی در حفاظت خاک است. به گونه‌ای که پوشش گیاهی با کاهش قدرت فرساینده‌گی رواناب سطحی و به هم چسباندن ذرات خاک به وسیله ریشه، باعث کاهش حساسیت فرسایش خندقی می‌شود (Conforti et al., 2011). بر اساس نتایج حاصل از پارامتر طول شیب، کلاس طول شیب بیشتر از ۱۵۲/۲ متر که بیشترین مقدار طول شیب بین کلاس‌هاست، با بیشترین مقدار قطعیت (۰/۲۲۶) نسبت به بقیه کلاس‌ها بیشترین تأثیر را در وقوع فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی داشته است.

#### ۴-۴. تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی با رویکرد ترکیبی نوین

پس از تعیین وزن پارامترها و کلاس‌های آنها، به منظور تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی، از رابطه ۱۵ استفاده و در محیط نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از ابزار weighted sum نقشه حساسیت منطقه مطالعاتی تهیه شد.

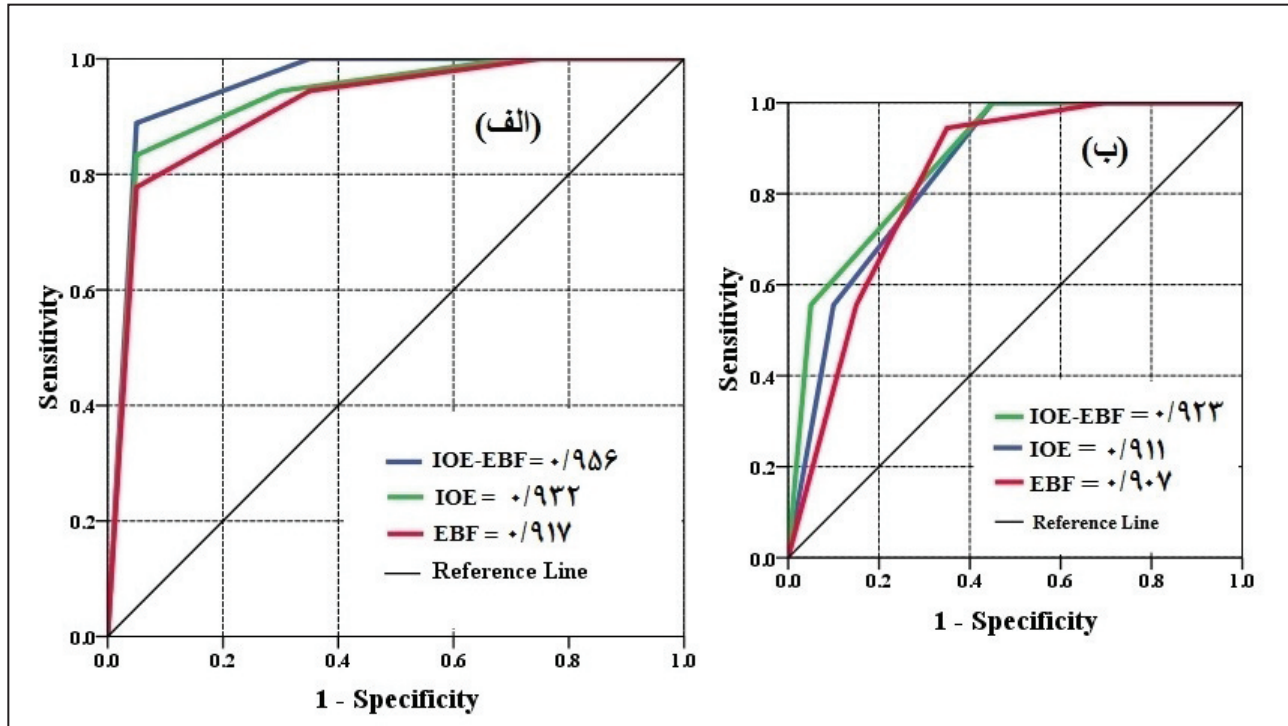
$$GESM_{AHP} = [(elevation_{Bel} \times 0.606) + (slope_{Bel} \times 0.236) + (slope\ aspect_w \times 0.069) + (plan\ curvature_{Bel} \times 0.140) + (ls_{Bel} \times 0.007) + (Twl_{Bel} \times 0.042) + (distance\ to\ stream_{Bel} \times 0.113) + (drainage\ density_{Bel} \times 0.116) + lithology_{Bel} \times 0.395] + (lu/lc_{Bel} \times 0.199) + (distance\ to\ road_{Bel} \times 0.242) + (NDVI_{Bel} \times 0.363)]$$

نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از روش ترکیبی شاخص آنتروپی - تابع شواهد یقینی در شکل ۳-پ نشان داده شده است. نقشه حساسیت تهیه شده با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی شکست‌های طبیعی (عرب‌عامری و همکاران، ۱۳۹۶ الف و ب؛ Arabameri et al., 2017b) به ۵ کلاس طبقه‌بندی شد. بر اساس شکل ۳-پ، کلاس حساسیت خیلی زیاد عمدتاً در بخش جنوب‌خاوری منطقه مطالعاتی قرار گرفته که به دلیل وجود سازندهای مارنی حساس به فرسایش، توپوگرافی تپه ماهوری و وجود پوشش گیاهی بسیار تنک و تا حدودی عدم پوشش گیاهی در این منطقه بوده و در مقابل کلاس حساسیت خیلی کم در بخش‌های مرکزی منطقه مطالعاتی قرار گرفته



شکل ۳- نقشه‌های حساسیت‌پذیری فرسایش خندقی. الف) روش شاخص آنتروپی؛ ب) روش شواهد یقینی؛ پ) روش ترکیبی.





شکل ۴- مساحت زیر منحنی. الف) نرخ پیش بینی؛ ب) نرخ موفقیت.

جدول ۵- مساحت کلاس‌های حساسیت فرسایش خندقی در هر یک از مدل‌ها همراه با مقادیر SCAI.

SCAI	مجموع درصد مساحت کالی‌ها	مساحت کالی‌های مدل‌سازی (km <sup>2</sup> )		مساحت کالی‌های اعتبارسنجی (km <sup>2</sup> )		مساحت هر کلاس (km <sup>2</sup> )		کلاس‌های حساسیت	مدل‌ها
		%	مساحت	%	مساحت	%	مساحت		
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸/۳۷	۷۰/۹۷	خیلی کم	IOE
۷/۸۳۷	۳/۳۷	۱/۸۹	۰/۰۴۶	۱/۴۷	۰/۰۱۰	۲۶/۴۵	۲۲۴/۱۲	کم	
۲/۲۶۷	۱۳/۷۵	۶/۸۵	۰/۱۶۹	۶/۹۰	۰/۰۵۰	۳۱/۲۰	۲۶۴/۳۴	متوسط	
۰/۳۵۶	۶۰/۳۹	۲۳/۷۶	۰/۵۸۶	۳۶/۶۲	۰/۲۶۷	۲۱/۵۰	۱۸۲/۲۳	زیاد	
۰/۱۰۱	۱۲۲/۴۷	۶۷/۴۸	۱/۶۶۵	۵۴/۹۹	۰/۴۰۱	۱۲/۴۵	۱۰۵/۵۵	خیلی زیاد	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸/۴۷	۷۱/۷۷	خیلی کم	EBF
۷/۴۱۰	۳/۷۰	۲/۲۲	۰/۰۵۴	۱/۴۷	۰/۰۱۰	۲۷/۴۴	۲۳۲/۵۱	کم	
۲/۲۶۸	۱۳/۲۵	۵/۹۷	۰/۱۴۷	۷/۲۷	۰/۰۵۳	۳۰/۰۶	۲۵۴/۷	متوسط	
۰/۳۳۳	۶۳/۹۵	۲۳/۸۷	۰/۵۸۹	۴۰/۰۷	۰/۲۹۲	۲۱/۳۳	۱۸۰/۷۹	زیاد	
۰/۱۰۶	۱۱۹/۰۸	۶۷/۹۱	۱/۶۷۶	۱۵/۱۷	۰/۳۷۳	۱۲/۶۸	۱۰۷/۴۵	خیلی زیاد	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۸/۲۸	۷۰/۱۸	خیلی کم	IOE-EBF
۵/۸۱۶	۴/۸۲	۲/۱۱	۰/۰۵۲	۲/۷۱	۰/۰۱۹	۲۸/۰۷	۲۳۷/۸۶	کم	
۳/۱۸۸	۱۰/۸۷	۵/۱۰	۰/۱۲۶	۵/۷۶	۰/۰۴۲	۳۴/۶۸	۲۹۳/۸۳	متوسط	
۰/۲۷۲	۵۸/۶۰	۲۴/۷۹	۰/۶۱۲	۳۳/۸۱	۰/۲۴۶	۱۵/۹۷	۱۳۵/۳۵	زیاد	
۰/۱۰۳	۱۲۵/۶۹	۶۷/۹۸	۱/۶۷۸	۵۷/۷۰	۰/۴۲۱	۱۲/۹۸	۱۰۹/۹۸	خیلی زیاد	

## ۶- نتیجه‌گیری

فرسایش خندقی یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی در حوضه شاهرود به خصوص در بخش‌های جنوب خاوری و جنوبی آن است و در نتیجه قبل از انجام هر گونه اقدامات عمرانی و زیربنایی در این منطقه، باید ارزیابی حساسیت انجام گیرد تا از خسارات احتمالی جلوگیری شود. تهیه نقشه حساسیت فرسایش خندقی یک مرحله مهم است که می‌تواند به برنامه‌ریزان، مدیران محلی و تصمیم‌گیران در زمینه برنامه‌ریزی خطر کمک کند. در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی حساسیت فرسایش خندقی از توزیع فضایی خندق‌ها و رابطه آن با پارامترهای زمین محیطی مؤثر در آن در حوضه شاهرود استفاده شده است. بدین منظور از یک رویکرد ترکیبی نوین داده‌محور استفاده شده است.

به گونه‌ای که برای تعیین وزن پارامترها از روش داده‌محور شاخص آنتروپی و برای محاسبه وزن کلاس‌ها از روش داده‌محور تابع شواهد یقینی استفاده و در نهایت از تلفیق آنها، نقشه حساسیت فرسایش خندقی تهیه شد. با توجه به اینکه نتایج مدل‌های داده‌محور، از داده‌هایشان استخراج می‌شود، دقت داده‌های ورودی اهمیت بسیار زیادی دارد. بدین منظور برای تهیه نقشه پراکنش خندق از تفسیر عکس‌های هوایی و پیمایشات میدانی گسترده استفاده شد و ۷۰ درصد خندق‌ها برای مدل‌سازی و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفتند. در زمینه پارامترهای مؤثر در فرسایش خندقی، در ابتدا با استفاده از مطالعه ادبیات تحقیق، دسترسی به داده‌ها و شرایط محیطی منطقه مورد مطالعه،

۱۹ پارامتر مؤثر شناسایی و تهیه شد. نتایج حاصل از تعیین وزن پارامترها نشان داد که پارامترهای مختلف دارای میزان مشارکت متفاوت در وقوع فرسایش خندقی هستند. به طوری که پارامترهای ارتفاع، لیتولوژی و شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را در رخداد فرسایش خندقی در منطقه مطالعاتی داشته‌اند. تأثیر بالای این ۳ پارامتر به دلیل این است که اکثر گالی‌های منطقه مطالعاتی در مناطق توپوگرافی تپه‌ماهوری و سازندهای حساس به فرسایش مانند مارن دارند و در مناطق دارای پوشش گیاهی ناچیز قرار گرفته‌اند.

نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل با استفاده از نرخ پیش‌بینی، نرخ موفقیت و شاخص SCAI نشان داد که مدل ترکیبی شاخص آنتروپی - شواهد وزن یقینی دارای دقت پیش‌بینی عالی و نسبت به مدل‌های شاخص آنتروپی و شواهد وزن یقینی دارای دقت پیش‌بینی بالاتری بوده که این موضوع بیانگر دقت بالاتر روش‌های ترکیبی نسبت به روش‌های انفرادی است. روند شاخص SCAI نیز نشان داد که قدرت تفکیک طبقات در مدل ترکیبی مناسب است. با توجه به دقت عالی مدل ترکیبی در شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی، نقشه حساسیت فرسایش خندقی تهیه شده در این پژوهش می‌تواند مورد استفاده برنامه‌ریزان کاربری اراضی جهت انتخاب مکان مناسب برای برنامه‌های عمرانی مانند جاده سازی و خطوط انتقال گاز و برق قرار گیرد.

## کتابنگاری

- رجب‌زاده، ح. ا.، نظری سامانی، ع. ا.، احمدی، ح. و مهرابی، ع. ا.، ۱۳۹۲- بررسی و تحلیل عوامل و آستانه‌های محیطی مؤثر بر فرسایش خندقی با تأکید بر شرایط توپوگرافی و پوشش زمین (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کلوچه بیجار)، اولین همایش ملی برنامه‌ریزی، حفاظت از محیط زیست و توسعه پایدار، همدان، انجمن ارزیابان محیط زیست هگمتانه.
- سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۳۷۸- نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، لجنه ورقه ۷۰۶۲II، دزج ۷۰۶۲IV، کوه کله قوچ ورقه ۶۹۶۲ II و شاهرود ورقه ۶۹۶۲ I.
- سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۷- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بر گه‌های شاهرود و بسطام.
- عرب عامری، ع. ر.، شیرانی، ک. و رضایی، خ.، ۱۳۹۶الف- ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های احتمالاتی وزن واقعه و نسبت فراوانی در پهنه بندی خطر زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز ونک)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، سال ۸، شماره ۱۵، صص. ۱۴۷ تا ۱۶۰.
- عرب عامری، ع. ر.، شیرانی، ک. و تازه، م.، ۱۳۹۶ب- آنالیز عددی عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن با روش‌های رگرسیون لجستیک و رگرسیون چندمتغیره خطی (مطالعه موردی: حوضه ماریز)، مرتع و آبخیزداری، سال ۷۰، شماره ۱، صص. ۱۵۱ تا ۱۶۸.
- منصوری، م.، شیرانی، ک.، قاضی‌فرد، ا. و امامی، س. ن.، ۱۳۹۵- پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش‌های آنتروپی و وزن شاهد (مطالعه موردی: منطقه دو آب صمصامی استان چهارمحال و بختیاری)، علوم زمین، سال ۲۶، شماره ۱۰۲، صص. ۲۶۷ تا ۲۸۰.

## References

- Arabameri, A. and Pourghasemi, H. R., 2019- Spatial Modeling of Gully Erosion Using Linear and Quadratic Discriminant Analyses in GIS and R. Edit; Pourghasemi, H. R., Gokceoglu, C. Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences. First edition. Elsevier publication. p.796.
- Arabameri, A., Pourghasemi, H. R. and Cerda, A., 2017a- Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models. Science of the Total Environment, V. 613–614, p. 1385- 1400.
- Arabameri, A., Pourghasemi, H. R. and Yamani, M., 2017b- Applying different scenarios for landslide spatial modeling using computational intelligence methods. Environmental Earth Sciences, V. 76, p. 832.
- Arabameri, A., Pradhan, B. and Rezaei, K., 2019a- Gully erosion zonation mapping using integrated geographically weighted regression with certainty factor and random forest models in GIS. Journal of environmental management, V. 232, p. 928- 942.
- Arabameri, A., Pradhan, B. and Rezaei, K., 2019b- Spatial prediction of gully erosion using ALOS PALSAR data and ensemble bivariate and data mining models. Geosciences Journal, p.1- 18
- Arabameri, A., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R. and Rezaei, K., 2018a- Identification of erosion-prone areas using different multi-criteria decision-making techniques and GIS. Geomatics, Natural Hazards and Risk, V. 9, p. 1129- 1155.
- Arabameri, A., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Rezaei, K. and Kerle, N., 2018b- Spatial Modelling of Gully Erosion Using GIS and R Programing: A Comparison among Three Data Mining Algorithms. Applied sciences, V. 8, p. 1369.
- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., Yamani, M., Pourghasemi, H. R. and Lombardo, L., 2018c- Spatial modelling of gully erosion using Evidential Belief Function, Logistic Regression and a new ensemble EBF–LR algorithm. Land Degradation and Development, V. 29, p. 4035- 4049.
- Arabameri, A., Rezaei, K., Pourghasemi, H. R., Lee, S. and Yamani, M., 2018d- GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison among three data-driven models and AHP knowledge-based technique. Environmental Earth Sciences, V. 77, p. 628.
- Conforti, M., Aucelli, P. P., Robustelli, G. and Scarciglia, F., 2011- Geomorphology and GIS analysis formapping gully erosion susceptibility in the Turbolo streamcatchment (Northern Calabria, Italy). Natural Hazards, V. 56, p. 881- 898.
- Chaplot, V., 2013- Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. Geomorphology, V. 186, p. 1- 11.
- Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V. and Ma'rker, M., 2014- Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: a case of Sicily (Italy). Geomorphology, V. 204, p. 399- 411.
- De ploey, J., 1989- A model for headcut retreat in rills and gullies. Catena, V. 14, p. 81- 86.
- El Maaoui, M. A., Sfar Felfoul, M., Boussema, M. R. and Snane, M. H., 2012- Sediment yield from irregularly shaped gullies located on the Fortuna lithologic formation in semi-arid area of Tunisia. Catena, V. 93, p. 97- 104.

- Ghorbani Nejad, S., Falah, F., Daneshfar, M., Haghizadeh, A. and Rahmati, O., 2016- Delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS-based data-driven models. *Geocarto International*, V. 32, p. 167- 187.
- Go´mez-Gutie´rrez, A., Conoscenti, C., Angileri, S. E., Rotigliano, E. and Schnabel, S., 2015- Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: advantages and limitations. *Nat Hazards*, V. 79, p. 291- 314.
- Golestani, G., Issazadeh, L. and Serajamani, R., 2014- Lithology effects on gully erosion in Ghoori chay tershed using RS and GIS. *Int J Biosci*, V. 4, p. 71- 76.
- Kornejady, A., Heidari, K. and Nakhavali, M., 2015- Assessment of landslide susceptibility, semi-quantitative risk and management in the Ilam dam basin, Ilam. Iran. *Environmental Resources Research*, V. 3, p. 85- 109.
- Lee, S., Hwang, J. and Park, I., 2013- Application of data-driven evidential belief functions to landslide susceptibility mapping in Jinbu, Korea, *Catena*, V. 100, p. 15- 30.
- Lo, C. P. and Yeung, A. K. W., 2002- *Concepts and Techniques of Geographic Information System*. New Jersey: Pearson Education Inc.
- Pourghasemi, H. R. and Kerle, N., 2016- Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran. *Environ Earth Sciences*, V. 75, p.185.
- Pourghasemi, H. R., Yousefi, S., Kornejady, A. and Cerdà, A., 2017- Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Science of the Total Environment*, V. 609, p. 764- 775.
- Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R. and Noormohamadi, F., 2016- Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS based bivariate statistical models and their comparison. *Nat Hazards*, V. 82, p.1231- 1258.
- Rahmati, O., Nazari Samani, A., Mahdavi, M., Pourghasemi, H. R. and Zeinivand, H., 2014- Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, V. 8, p. 7059- 7071.
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. R. and Feizizadeh, B., 2017- Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework. *Science of the Total Environment*, V. 579, p. 913- 927.
- Regmi, N. R., Giardino, J. R. and Vitek, J. D., 2010- Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, V. 115, p. 172- 187.
- Shafer, G., 1976- *A mathematical theory of evidence*, vol 1. Princeton University, Princeton.
- Shrestha, S., Kang, T. S. and Suwal, M. K., 2017- An Ensemble Model for Co-Seismic Landslide Susceptibility Using GIS and Random Forest Method. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*, V. 6, p. 365.
- Süzen, M. L. and Doyuran, V., 2004- A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, V. 45, p. 665- 679.
- Tahmassebipoor, N., Rahmati, O., Noormohamadi, F. and Lee, S., 2016- Spatial analysis of groundwater potential using weights-of-evidence and evidential belief function models and remote sensing. *Arabian Journal of Geosciences*, V. 9, p. 79.
- Torri, D., Poesen, J., Borselli, L., Bryan, R. and Rossi, M., 2012- Spatial variation of bed roughness in eroding rills and gullies. *Catena*, V. 90, p. 76- 86.
- USDA-SCS, 1966- Procedure for determining rates of land damage, land depreciation, and volume of sediment produced by gully erosion. Technical Release No. 32. US GPO 1990-261-419:20727/SCS.US Government Printing Office, Washington, DC.
- Youssef, A., Pradhan, B., Jebur, M. N. and El-Harbi, H., 2017- Landslide susceptibility mapping using ensemble bivariate and multivariate statistical models in Fayfa area, Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences*, V. 73, p. 3745- 3761.

# Assessment land susceptibility to gully erosion using ensemble data-mining techniques (Case study: Shahroud Basin) evidence and fluid and solid inclusion studies

A. Arabameri<sup>1\*</sup>, K. Rezaei<sup>2</sup> and M. Yamani<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Faculty of Literature and Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Faculty of Geosciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Professor, Faculty of Geography, Tehran University, Tehran, Iran

Received: 2017 November 14

Accepted: 2018 February 07

## Abstract

Gully erosion is one of the erosive processes that mostly contributes to shape the earth surface and its development considered as one of the principal causes of land degradation in the worldwide. In this research, a new methodology framework was developed to gully erosion susceptibility mapping in Shahroud basin, Semnan province, which has a high susceptibility to soil erosion. In this way, the combination of two data-mining methods of entropy index and evidential relief function are used to calculate the weight of the geo- environmental factors that affecting in gully occurrence and the spatial relationship between the gullies and the parameters. For this purpose, at first, a gully erosion inventory map was prepared using extensive field surveys and interpretation of aerial photographs, of which 172 gully erosion, 70% (121 gully) are used for modeling and 30% (51 gully) are used for validation purposes. In the next step, for the selection of parameters, after their initial identification, the multicollinearity analysis test was performed using coefficients of tolerance and variance inflation factor and the parameters with multicollinearity were deleted due to the reduced accuracy of the modeling. Finally, 12 parameters were selected for modeling. The results of determining the significance of the criteria by entropy index method showed that elevation, lithology and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) parameters had the greatest effect on the occurrence of gully. In order to validate the model, the prediction rate and success rate as well as the SCAI index were used. The validation results showed that the combined model with a prediction rate of 956.0 (95.6%) and a success rate of 92.33 (92.3%) had excellent predictive accuracy and compared with the entropy index and evidential belief function with prediction rates of 0.932 and 0.917, and the success rates of 0.911 and 0.901, have higher accuracy. According to the results of the Cell SCAI Area Index (SCAI), class differentiation was appropriate in the combined model. According to the results, 28.95 percentage of the study area is located in high and very high susceptibility classes. The results of this research can be used by landuse planners to expansion development activities such as road construction and gas and electricity transmission lines.

**Keywords:** Soil erosion, Multicollinearities test, Index of entropy, Evidential belief function, Validation.

For Persian Version see pages 139 to 150

\*Corresponding author: A. Arabameri; E-mail: Alireza.ameri91@yahoo.com