

(۴۵۶۳۳ هکتار) دارای حساسیت زیاد و خیلی زیاد به فرسایش آبکندی است.

**کلیدواژه‌ها:** توزیع مکانی، حساسیت، شبکه عصبی مصنوعی، فرسایش آبکندی، یادگیری ماشینی

### مقدمه

فرسایش خاک صرف‌نظر از انواع شکل آن پدیده‌ای است که دیرینه‌ای به قدمت پیدایش خشکی‌ها در کره زمین دارد. فرسایش آبکندی از جمله انواع فرسایش آبی است که رخداد و گسترش آن موجب تغییرات بارز در سیمای سرزمین و تخریب خاک می‌شود [۷ و ۳۲]. با توجه به تنوع و میزان تأثیر عوامل مختلف در شکل‌گیری و گسترش فرسایش آبکندی، به‌منظور مهار توسعه آن، شناسایی و پهنه‌بندی خطر مناطق حساس و عوامل مؤثر بر آن بسیار ضروری است [۲]. این نوع فرسایش یک مشکل اساسی برای مدیریت منابع طبیعی است که منجر به تخریب شدید اراضی و خسارات اقتصادی در سراسر جهان می‌شود [۵]. این پدیده باعث ایجاد انواع خسارت‌ها در جاده‌ها، منابع طبیعی، مناطق مسکونی، کشاورزی و زیرساخت‌ها می‌شود [۳۴ و ۴۰] و به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب محیط زیست در شمال شرق کشور محسوب می‌شود [۳۲]. فرآیند فرسایش آبکندی و تخریب زمین در شمال شرق کشور ناشی از افزایش جمعیت، تغییر کاربری اراضی، حضور دام‌ها در جنگل‌ها و جنگل‌زدایی است [۳۲]. عواملی که باعث وقوع و توسعه این نوع فرسایش می‌شوند در درجه اول شامل توپوگرافی، لیتولوژی، بارندگی، خاک و کاربری اراضی است [۴ و ۲۸]. در سال‌های اخیر تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و یادگیری ماشینی در مقایسه با روش‌های سنتی (در زمینه تعیین مناطق حساس به فرسایش آبکندی) که زمان‌بر هستند، با کارایی بالاتری باعث افزایش دقت و سرعت در زمینه ارزیابی و پتانسیل فرسایش آبکندی شده‌اند [۳۱]. فاکتورهای مختلفی از طیف وسیعی از پارامترهای محیطی از قبیل هیدرولوژیکی (شاخص قدرت جریان، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی)، اقلیمی (بارندگی)، توپوگرافی (ارتفاع، شیب، طول شیب، جهت شیب و عمق دره)، اکولوژیکی (کاربری اراضی، بافت خاک و نوع خاک)، فاکتورهای زمین‌شناسی و انسانی شامل فاصله از جاده و تراکم جاده بر میزان پتانسیل فرسایش آبکندی تأثیرگذار هستند [۲، ۴ و ۱۸]. در چند دهه گذشته چندین

## ارزیابی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و حداکثر آنتروپی در پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی حوزه آبخیز سد گلستان

علی شهبازی<sup>۱</sup>، فرزانه و کیلی تجربه<sup>۲</sup>، احسان الوندی<sup>۳</sup>، اصغر بیات<sup>۴</sup>،

امید اسدی نلیوان<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۶

### چکیده

پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی و تعیین فاکتورهای کنترل‌کننده آن بسیار مهم و حیاتی است. این مطالعه با هدف بررسی توزیع مکانی فرسایش آبکندی با استفاده از دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و حداکثر آنتروپی و تعیین عوامل اثرگذار بر این نوع فرسایش در حوزه آبخیز سد گلستان انجام شد. لذا ۱۴ عامل، شامل عوامل توپوگرافی، سایر عوامل و تلفیق عوامل (۱۴ عامل) به عنوان فاکتورهای پیش‌بینی‌کننده حساسیت در نظر گرفته شدند. از مجموع ۱۰۴۲ موقعیت فرسایش آبکندی، به صورت تصادفی و به نسبت ۳۰ و ۷۰ درصد به ترتیب به عنوان داده‌های اعتبارسنجی و آزمون در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از آزمون Jackknife نشان داد که پارامترهای ارتفاع، بارندگی و عمق دره مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر پیش‌بینی فرسایش آبکندی می‌باشند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که بهترین دقت مدل بر اساس منحنی ROC در حالت آموزش (۰/۹۲۳) و در مرحله اعتبارسنجی (۰/۹۰۲)، مدل شبکه عصبی مصنوعی بوده است و این شرایط زمانی حاصل می‌شود که همه عوامل در مدل‌سازی دخالت داده شوند. بر اساس این مدل بیش از ۲۰ درصد حوزه

- ۱- دانش آموخته‌ی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- ۲- دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- ۳- دانش آموخته‌ی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
- ۵- نویسنده مسئول و دانش آموخته‌ی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، پست الکترونیک: [omid.asadi@alumni.ut.ac.ir](mailto:omid.asadi@alumni.ut.ac.ir)

مدل برای ارزیابی میزان این نوع فرسایش توسعه پیدا کرده‌اند. از جمله این مدل‌ها که فیزیکی محور هستند می‌توان مدل‌های WEPP [۱۲] و CREAMS [۲۰] را نام برد. با این حال، مدل‌های فوق توزیع مکانی آبکندها را به عنوان ابزاری اساسی برای ارزیابی تاثیر آبکنده بر تغییرات محیطی و برنامه‌ریزی روش‌های کنترل فرسایش، پیش‌بینی نمی‌کنند [۷ و ۳۰]. علاوه بر این، توزیع مکانی فرسایش خاک، به‌ویژه فرسایش آبکنده، عامل بسیار مهمی در مدیریت حوزه‌های آبخیز و منابع طبیعی است [۲۲]. از طرفی مدل‌هایی وجود دارد که به محققان اجازه می‌دهد نقشه حساسیت به فرسایش آبکنده را تهیه کنند و با تعیین روابط آماری بین عوامل محیطی و توزیع مکانی آبکندها، احتمال مکانی وقوع آبکنده را ارزیابی و پیش‌بینی کنند [۴ و ۳۱]. از جمله این مدل‌ها می‌توان مدل‌های جنگل تصادفی<sup>۱</sup>، حداکثر آنتروپی<sup>۲</sup>، رگرسیون خطی و لجستیک<sup>۳</sup>، شبکه عصبی مصنوعی<sup>۴</sup> و ماشین بردار پشتیبان<sup>۵</sup> را نام برد که به روش‌های یادگیری ماشینی معروف هستند. بررسی عوامل مؤثر بر تشکیل و گسترش فرسایش آبکنده، مدل‌سازی و تغییرات ابعاد هندسی آبکندها مورد توجه محققان، در مناطق مختلف قرار گرفته است، که از این جمله می‌توان به برخی از تحقیقات اخیر اشاره کرد: کریمی و همکاران [۱۷] در تحقیقی به بررسی روش‌های آماری رگرسیون گام به گام و لجستیک در حوزه ناغان (شهرکرد) جهت ارزیابی خطر فرسایش آبکنده پرداختند. در این مطالعه با توجه به منحنی ROC روش رگرسیون گام به گام را برتر دانستند و بیان داشتند که مناطق با خطر بالای فرسایش آبکنده در کاربری دیم واقع شده‌اند. قربانی‌نژاد و همکاران [۱۴] در تحقیقی مدل‌سازی پتانسیل فرسایش آبکنده در منطقه سیمره (لرستان) بر اساس روش‌های آماری و آنتروپی شانون را بررسی نمودند. در این تحقیق جهت مدل‌سازی از ۹ عامل استفاده و بیان شد که مدل‌های مذکور توانایی بالایی در شناسایی مناطق حساس به فرسایش آبکنده دارند. همچنین عوامل لیتولوژی، ارتفاع و کاربری اراضی را به عنوان اصلی‌ترین عوامل مؤثر شناسایی کردند. ذبیحی و همکاران [۳۹] در مطالعه‌ای به مدل‌سازی پتانسیل فرسایش آبکنده با استفاده از مدل‌های آماری دو متغیره، نسبت فراوانی، وزن‌دهی شواهد و شاخص آنتروپی بر اساس ۱۱ عامل مهم و تأثیرگذار بر فرسایش آبکنده در استان مازندران پرداختند. نتایج نشان داد که مدل نسبت فراوانی عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر دارد. در پژوهشی دیگر با استفاده از ۱۹ شاخص مهم و تأثیرگذار پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکنده با استفاده از شش مدل هیبریدی ترکیبی جدید یادگیری ماشینی در استان کردستان انجام شد. با توجه به نتایج بیان داشتند که مدل ترکیبی RF-ADTree نسبت به سایر مدل‌ها بر اساس شاخص AUC برتری دارد. همچنین شاخص‌های فاصله از

1. Random Forest
2. Maximum Entropy
3. Linear and Logistic Regression
4. Artificial Neural Network
5. Support Vector Machine

رودخانه، ژئومورفولوژی، کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، لیتولوژی و درصد شیب از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فرسایش آبکنده تشخیص داده شدند [۳۶]. جمع‌بندی مرور منابع نشان‌دهنده اهمیت تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش آبکنده جهت مدیریت این فرسایش با توجه به خسارات گسترده آن و همچنین توانایی بالای روش‌های یادگیری ماشینی در این امر مهم و حیاتی می‌باشد.

حوزه آبخیز سد گلستان با افزایش تغییر کاربری اراضی، افزایش زمین‌های دیم و رها شده، حضور دام‌ها در جنگل‌ها و جنگل‌زدایی و همچنین افزایش جمعیت روبرو است. بنحوی که برون‌داد این نحوه برخورد با طبیعت در قالب ظهور اشکال مختلف فرسایش آبکنده هویدا شده است. لذا با توجه به اصل علاج واقعه قبل از وقوع، بایستی جهت جلوگیری از خسارات ویران‌گر این نوع فرسایش به زیر ساخت‌های عمرانی، منابع طبیعی، توسعه و کشاورزی نسبت به تعیین مناطق حساس اقدام تا تدابیر لازم جهت مهار و مدیریت آن سنجیده و اقدام شود.

هدف از این تحقیق تجزیه و تحلیل سهم عوامل محیطی و توپوگرافیکی در وقوع و توسعه فرسایش آبکنده و تهیه نقشه حساسیت به فرسایش آبکنده با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و حداکثر آنتروپی به عنوان روش‌های یادگیری ماشینی و سیستم اطلاعات جغرافیایی است.

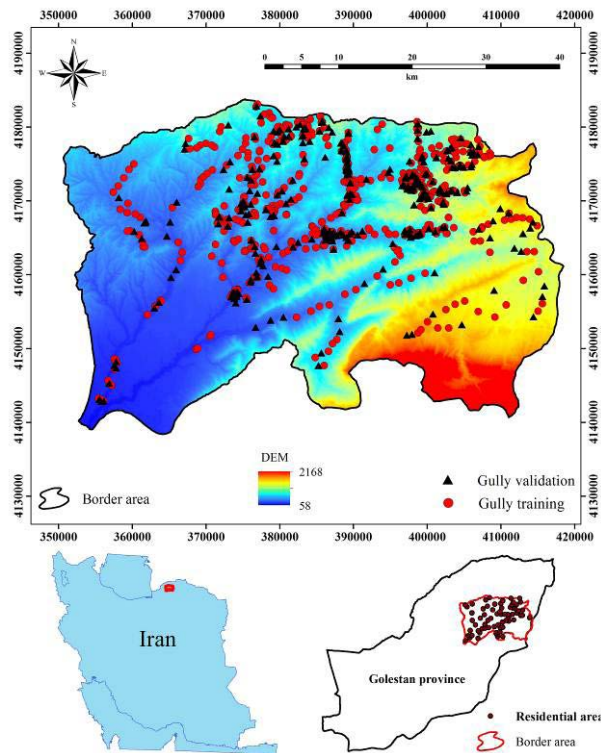
## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز سد گلستان با مساحت ۲۲۳ هزار هکتار و میانگین ارتفاعی ۵۶۴ متر در جنوب شرقی دریای خزر در چین خوردگی‌های شمالی البرز قرار دارد. این حوضه در مختصات ۵۵ درجه و ۱۶ دقیقه و ۵۶ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۹ دقیقه و ۴۹ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. کاربری عمده محدوده مورد مطالعه کشاورزی آبی، دیم، جنگل و مرتع است. خروجی حوضه در محل سد گلستان به عنوان پست‌ترین نقطه محدوده در ارتفاع ۵۸ متر از سطح دریا قرار دارد. شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

### داده‌ها

در تحقیق حاضر بر اساس مرور منابع گسترده تعداد ۱۴ عامل شامل شیب، طول شیب، ارتفاع، جهت شیب، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، فاصله از جاده، تراکم جاده، کاربری اراضی، لیتولوژی، عمق دره، میزان بارندگی، شاخص قدرت جریان و شاخص رطوبت توپوگرافی [۴، ۱۳، ۱۴ و ۲۹] جهت تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش آبکنده انتخاب گردید (جدول ۱). همچنین از مجموع ۱۰۴۲ موقعیت فرسایش آبکنده، به صورت تصادفی ۳۱۳ آبکنده (۳۰ درصد) به عنوان داده‌های اعتبارسنجی و ۷۲۹ آبکنده (۷۰ درصد) به عنوان داده‌های آزمون (آموزش) طبقه‌بندی شدند.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز سد گلستان در ایران و استان و آبکندهای آموزشی و اعتبارسنجی

Fig 1. Location of Golestan Dam basin in Iran and the province and educational and validation Gullies

افزایش قدرت جریان دارد [۸]. لایه لیتولوژی از نقشه زمین شناسی منطقه (مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) استخراج شده است. نوع سنگ شناسی و سازندهای موجود عامل بسیار مهمی در وقوع فرسایش آبکندی محسوب می‌شوند و واحدهای سنگی مختلف دارای درجات حساسیت گوناگونی در وقوع فرسایش آبکندی هستند [۶]. کاربری اراضی بر روی رواناب سطحی و میزان نفوذ آب اثرگذار است و از طریق مقدار نفوذ بر وقوع فرسایش آبکندی تأثیرگذار است و پوشش گیاهی نقش مهمی در پایداری دامنه دارد [۹]. نقشه بارندگی با استفاده از اطلاعات ۳۵ ایستگاه باران‌سنجی تهیه شده است. ابتدا میانگین بارندگی ۲۶ ساله (دوره آماری مشترک) برای هر ایستگاه محاسبه شد و سپس با استفاده از روش کریجینگ جهانی (به دلیل کمترین میزان RMSE) در نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی بارندگی انجام گرفت. لایه شاخص رطوبت توپوگرافی با استفاده از مدل رقمی ارتفاعی و با استفاده از نرم‌افزار SAGA GIS تهیه گردید. شاخص رطوبت توپوگرافی TWI (رابطه ۱) گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوزه آبخیز و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین دست توصیف می‌کند. این شاخص تعیین‌کننده تأثیر توپوگرافی بر روی میزان سطوح اشباع جهت تولید رواناب است [۳]. شاخص SPI یا همان شاخص قدرت جریان نیز بر روی فرسایش آبکندی تأثیرگذار است که از رابطه ۲ و در نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شده است. این شاخص یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کنترل‌کننده فرایندهای فرسایش می‌باشد. مناطق دارای قدرت جریان

ابتدا مدل رقمی ارتفاعی با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat-8 در ابعاد ۲۷ در ۲۷ متر تهیه شد. تغییرات ارتفاع موجب تغییرات بارندگی می‌شود و در نتیجه بر میزان هوازدگی و میزان نفوذ آب تأثیرگذار خواهد بود و از این طریق فرسایش آبکندی را کنترل می‌کند [۳۱]. لایه‌های شیب و جهت شیب با استفاده از مدل رقمی ارتفاعی و به ترتیب از توابع Slope و Aspect تهیه شده‌اند. لایه شیب یکی از پارامترهای توپوگرافی خیلی مهم در کنترل وقوع فرسایش آبکندی است و شیب‌های ملایم برای تجمع جریان‌های سطحی و در نتیجه فرسایش آبکندی مساعد می‌باشند [۱۶]. جهت شیب بر میزان دریافت بارندگی، تبخیر و تعرق و میزان رطوبت اثرگذار است و بر همین اساس نوع پوشش گیاهی و توزیع آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳۸]. شاخص طول شیب نیز به نوعی بر فرسایش آبکندی تأثیرگذار است و طول شیب‌های بیش‌تر باعث گسترش بیش‌تر فرسایش آبکندی می‌شوند [۱]. لایه‌های فاصله از آبراهه بر اساس نقشه آبراهه‌ها و فاصله از جاده بر اساس جاده‌های موجود و با استفاده از تابع Euclidean distance در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. فاصله از آبراهه و فاصله از جاده نقش بسیار مهمی در حساسیت وقوع فرسایش آبکندی ایفا می‌کنند [۱۰]. لایه‌های تراکم آبراهه و تراکم جاده بر اساس نقشه آبراهه‌ها و جاده‌های موجود در منطقه و با استفاده از تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS بدست آمدند. تراکم آبراهه بیش‌تر باعث کاهش نفوذپذیری، رواناب بیش‌تر و به تبع آن اثر بر حساسیت فرسایش آبکندی از طریق

بالا دارای پتانسیل فرسایش بالایی می‌باشند.

$$TWI = \ln \frac{A_s}{\tan \beta} \quad (1)$$

که در آن  $A_s$ : مساحت منطقه مشارکت‌کننده بالادست (متر)،  $\beta$ : گرادیان توپوگرافی (شیب بر حسب درجه). شاخص SPI (رابطه ۲) نشان‌دهنده میزان قدرت فرساینده‌گی جریان آب است و افزایش آن باعث کاهش نفوذ و افزایش گل‌آلودگی می‌شود.

$$SPI = A_s * \tan \beta \quad (2)$$

$A_s$ : مساحت حوزه آبخیز (متر) و  $\beta$ : گرادیان شیب بر حسب درجه است.

### روش پژوهش

چنانچه قبلاً نیز بحث شد، پس از تعیین متغیرهای اصلی، با استفاده از مدل‌های زیر پژوهش انجام گردید:

### الف - مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt)

مدل حداکثر آنتروپی یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است که قابلیت پیش‌بینی مکانی بالایی در زمینه‌های مختلف علوم محیطی دارد [۲۶ و ۲۷]. این مدل فقط بر اساس موقعیت فرسایش آبکنندی مدل‌سازی را انجام می‌دهد، درحالی‌که مدل‌های آماری و سایر روش‌ها علاوه بر موقعیت‌های وقوع فرسایش آبکنندی، نیازمند موقعیت‌های عدم وقوع فرسایش آبکنندی نیز هستند. مدل قادر است توزیع احتمالاتی داده‌های هریک از لایه‌های رستری مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکنندی را استخراج نماید. آنتروپی

این توزیع‌ها بر اساس رابطه (۳) قابل محاسبه است [۲۷]:

$$H(\hat{\pi}) = - \sum_{x \in X} \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x) \quad (3)$$

که در آن  $H(\hat{\pi})$  مقدار آنتروپی توزیع احتمالاتی متغیر موردنظر،  $\ln$  لگاریتم طبیعی،  $x$  مقدار ارزش هر سلول و  $X$  مجموعه‌ای از داده‌های یک لایه رستری است. به‌منظور تعیین رابطه وقایع فرسایش آبکنندی، برای هریک از عوامل مؤثر بر تولید آبکنند، باید بسط "اصل آنتروپی" و استخراج منحنی‌های پاسخ یادگیری ماشینی صورت گیرد [۲۷]. در این تحقیق همبستگی پارامترهای مؤثر بر فرسایش آبکنندی با نقاط مستعد فرسایش آبکنندی محاسبه و با همبستگی متغیرها با ۵۰۰۰۰ نقطه تصادفی از منطقه به عنوان نقاط زمینه یا شبه عدم حضور مقایسه گردید و از این طریق بی‌نظمی نسبی میان نقاط مستعد فرسایش آبکنندی و نقاط تصادفی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر از آنجا که یافتن نقاط عدم مستعد فرسایش آبکنندی و اطمینان از این عدم استعداد مشکلات زیادی در مطالعات در پی خواهد داشت [۲۷]، استفاده از مدل MaxEnt به عنوان یک روشی که فقط وابسته به نقاطی هست که مستعد فرسایش آبکنندی هستند، می‌تواند منجر به حذف بسیاری از ناکارآمدی‌ها و عدم قطعیت ناشی از نقاط عدم حضور گردد [۲۷]. همچنین یکی از مهم‌ترین مزایای به‌کارگیری الگوریتم حداکثر آنتروپی به کمک نرم‌افزار MaxEnt، قابلیت این مدل در شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و تعیین اهمیت نسبی هریک از عوامل مؤثر بر شناسایی مناطق فرسایش

جدول ۱- عوامل مورد استفاده جهت تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش آبکنندی در حوزه آبخیز سد گلستان

Table 1. Factors used to determine areas with susceptibility to gully erosion in the watershed of Golestan Dam

عوامل Factors	روش تهیه و ابعاد Preparation method and dimensions
مدل رقومی ارتفاعی (ارتفاع) Digital elevation model (height)	بر اساس تصاویر ماهواره Landsat-8 در ابعاد ۲۷×۲۷ متر Based on Landsat-8 satellite images in dimensions of 27 × 27 meters
شیب و جهت شیب Slope and slope aspect	بر اساس مدل رقومی ارتفاعی در نرم‌افزار ArcGIS Based on DEM in ArcGIS software
فاصله از آبراهه و فاصله از جاده Distance from stream and distance from road	تابع Euclidean distance در نرم‌افزار ArcGIS Euclidean distance function in ArcGIS software
تراکم جاده و تراکم آبراهه Road density and drainage density	تابع Line Density در نرم‌افزار ArcGIS Line Density function in ArcGIS software
لیتولوژی Lithology	بر اساس نقشه زمین‌شناسی (مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰) Based on the geological map (scale 1/100000)
کاربری اراضی Land use	اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان (مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰) General Department of Natural Resources and Watershed Management of Golestan Province (Scale 1:100000)
TWI, SPI، طول شیب، عمق دره TWI, SPI, slope length, valley depth	بر اساس مدل رقومی ارتفاعی در نرم‌افزار SAGA GIS Based on digital elevation model in SAGA GIS software
بارندگی Rainfall	بر اساس ایستگاه‌های باران‌سنجی و پهنه‌بندی با روش زمین‌آمار Based on rainfall and zoning stations by geostatistical method

آبکندی و تحلیل حساسیت مدل به روش Jackknife می‌باشد [۲۷]. در این روش پس از ایجاد مدل کامل با دخالت تمامی متغیرها، مدل‌سازی به تعداد متغیرها تکرار شده و هر بار یکی از متغیرها از روند مدل‌سازی حذف می‌گردد. بدین ترتیب میزان تأثیر هر یک از متغیرها در پیش‌بینی نواحی مطلوب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۲۷].

#### ب - مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)

در یک شبکه عصبی، نرون‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین عنصر پردازش شناخته شده‌اند که برای حل یک مسئله با هم هماهنگ عمل می‌کنند. شبکه‌های عصبی مصنوعی از تعدادی نرون تشکیل شده‌اند که به‌صورت لایه‌ای در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. هر شبکه حداقل از دو لایه تشکیل می‌شود، یک لایه ورودی و یک لایه خروجی. درعین حال می‌تواند چندین لایه مخفی بین لایه‌های ورودی و خروجی قرار گیرد. در این تحقیق از شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه استفاده شده است. عناصر اصلی یک شبکه عصبی، عصب‌ها یا نرون‌های مصنوعی هستند. الگوی ورودی به یک گره شبیه دندریت یک سلول بیولوژیک است که می‌توان آن را با برداری با  $n$  متغیر یا نرون به‌صورت  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  نشان داد. مجموع حاصل ضرب ورودی‌ها در وزن‌های نظیرشان را نیز می‌توان با کمیت اسکالر  $s$  نمایش داد. در این شبکه‌ها وزن‌های داده شده به نرون به نحوی تنظیم می‌شود که نزدیک‌ترین مقدار خروجی را نسبت به مقدار مشاهده‌ای تولید کند. این کار آموزش شبکه نام دارد. الگوریتم‌های آموزش، روندهایی هستند که توسط آن‌ها وزن‌های شبکه تنظیم می‌گردد. هدف از آموزش شبکه این است که شبکه قانون کار را یاد بگیرد و پس از آموزش به ازای هر ورودی، خروجی مناسب را ارائه دهد. یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌های آموزشی، الگوریتم پس انتشار خطا<sup>۱</sup> می‌باشد.

$$S = \sum_{n=1}^N W_n \cdot x_n = W^T \cdot X \quad (4)$$

که در آن  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  بردار وزن نرون‌ها است. کمیت  $s$  سپس وارد یک تابع غیرخطی  $f$  می‌شود تا خروجی را نتیجه دهد:

$$y = f(s) \quad (5)$$

تابع غیرخطی انتقال معمولاً به فرم یک تابع حلقوی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(s) = (1 + \exp(-s))^{-1} \quad (6)$$

خروجی  $y$  می‌تواند نتیجه مدل و یا ورودی لایه بعدی در شبکه‌های چند لایه باشد. الگوریتم‌های مختلفی جهت محاسبه وزن‌های بهینه ارائه شده است که در این میان الگوریتم پس انتشار خطا پرکاربردترین آن‌هاست. شبکه‌هایی که در این تحقیق استفاده شده‌اند، از نوع شبکه‌های پرسپترون چندلایه هستند. این شبکه‌ها به‌صورت پیشرو عمل نموده و در ساختار تمامی آن‌ها سعی شده تا حتی‌الامکان طراحی بهینه با یک لایه میانی صورت پذیرد. آموزش شبکه‌های پرسپترون چندلایه با استفاده از الگوریتم آموزش پس انتشار خطا انجام می‌شود. فرآیند عملکرد این شبکه‌ها بدین نحو

است که لایه ورودی، نسبت به پذیرش داده‌ها اقدام نموده و لایه (لایه‌های) میانی عمل فرآوری داده‌ها را انجام می‌دهند. در نهایت، لایه خروجی نیز به نمایش خروجی‌های حاصل از کاربرد مدل اقدام می‌نماید. در طی مرحله مدل‌سازی، ضرایب مربوط به خطای موجود در گره‌ها به‌صورت سعی و خطا تصحیح می‌شود که در اغلب موارد از شاخص خطای متوسط داده‌ها بهره برده می‌شود. این امر از طریق مقایسه خروجی‌های مدل با داده‌های ورودی مشاهداتی انجام می‌پذیرد. کلیه محاسبات شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز با استفاده از نرم‌افزار کامپیوتری Modeco انجام شده است.

جهت ارزیابی مدل‌ها از منحنی ROC بهره گرفته شده است. این منحنی به صورت نموداری ارائه می‌شود که در آن احتمال تشخیص صحیح نقاط حضور مدل با احتمال تشخیص صحیح نقاط عدم حضور مورد مقایسه قرار می‌گیرد [۱۱ و ۲۷]. سطح زیر نمودار (AUC) به دست آمده به عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور از عدم حضور مورد توجه قرار می‌گیرد. این سطح مدلی با قدرت پیشگویی بسیار کم، ۰/۵ و مدلی کامل با قدرت پیشگویی بسیار زیاد دارای AUC به میزان یک خواهد بود. منحنی ROC به صورت پیکسلی نقشه حساسیت را با واقعیت زمینی مورد مقایسه قرار می‌دهد و این نشان‌دهنده آن است که این منحنی خیلی جزئی حساسیت آبکند را بررسی می‌کند. از طرف دیگر منحنی ROC قبل از طبقه‌بندی نقشه‌های حساسیت اعمال می‌شود، لذا خطای طبقه‌بندی در آن اثر ندارد.

در این تحقیق ابتدا عوامل موثر بر وقوع فرسایش آبکندی به سه بخش عوامل توپوگرافی، سایر عوامل نظیر زمین‌شناسی، کاربری اراضی و اقلیمی و تلفیق کلیه عوامل تقسیم‌بندی شدند و نقشه پتانسیل وقوع فرسایش آبکندی بر اساس آن‌ها تهیه گردید. سپس بهترین مدل بر اساس منحنی ROC انتخاب گردید.

### نتایج

شکل ۲ لایه‌های مورد استفاده جهت تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش آبکندی را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل فاصله از جاده‌ها در حوزه مذکور تا حداکثر ۲۰ کیلومتر و همچنین فاصله از آبراه‌های حوزه نیز تا حداکثر ۸ کیلومتر می‌رسد. تراکم جاده‌ها بسیار پایین و حداکثر تا ۰/۶ کیلومتر بر کیلومتر مربع و تراکم آبراه‌ها تا ۱/۴ کیلومتر بر کیلومتر مربع می‌رسد. جاده‌های حوزه در راستای محور شمال‌شرقی به جنوب غربی بیش‌ترین پراکندگی را دارند. حوزه آبخیز سد گلستان ۸ نوع کاربری مختلف شامل مرتع (فقیر، متوسط و خوب)، جنگل (کم تراکم، متوسط و متراکم)، مناطق مسکونی، باغ، باغ و دیم‌زار، مسیل، کشاورزی و دیم‌زار دارد. لازم به ذکر است که به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مساحت حوزه را مراتع متوسط و مناطق مسکونی اشغال کرده‌اند. همچنین این حوزه دارای جنس سنگ‌های مختلف شامل ماسه‌سنگ، شیل سبز رنگ (کم‌ترین مساحت)، آهک نازک و ضخیم، سیلت، دولومیت، لس و باتلاق

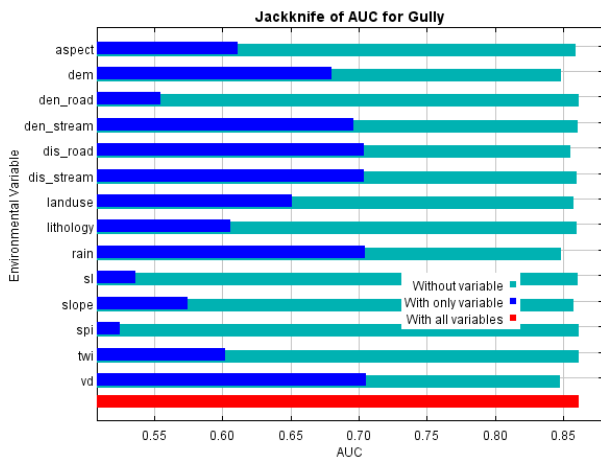
#### 1. Back Propagation algorithm



(بیشترین مساحت) می‌باشد.

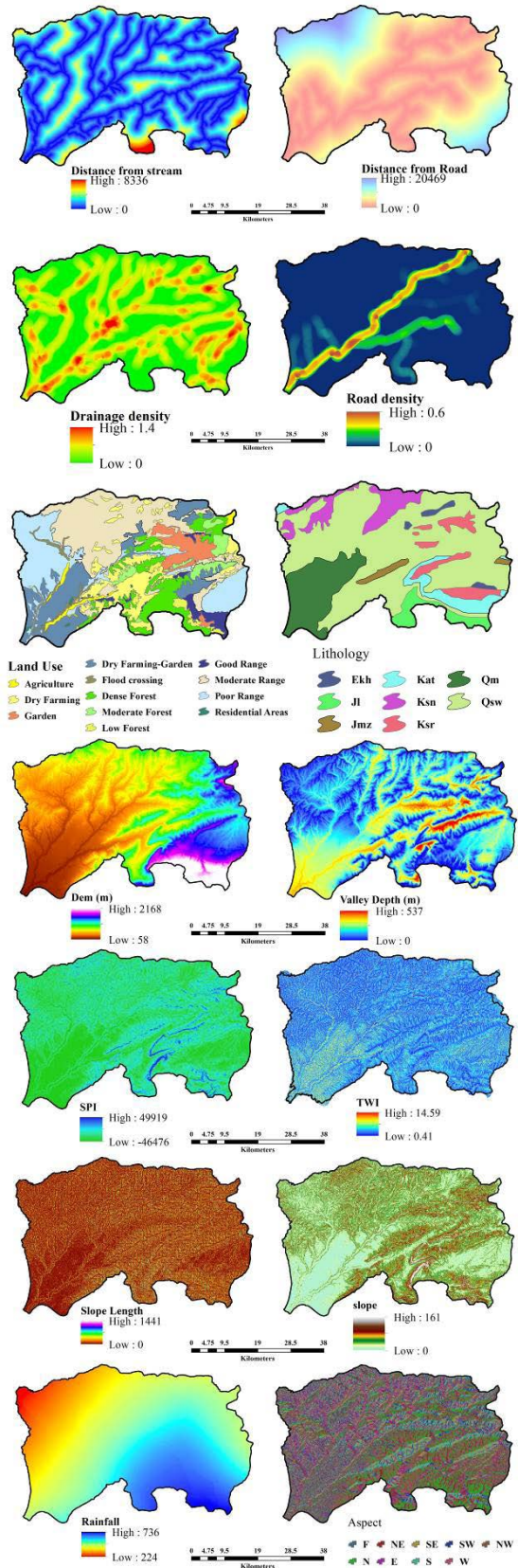
دامنه ارتفاعی بین ۵۸ الی ۲۱۶۸ متر متغیر و از غرب به سمت شرق حوزه ارتفاع کاهش داشته و جنوب شرقی دارای بیشترین ارتفاع از سطح دریا است. عمق دره در این حوزه آبخیز تا ۵۳۷ متر می‌رسد که این مورد نشان‌دهنده فعالیت فرسایش در این حوزه می‌باشد و بیشترین میزان آن در مرکز و جنوب حوزه است. شاخص رطوبت توپوگرافی نیز بین ۰/۴۱ الی ۱۴/۵۹ متغیر است. شاخص قدرت جریان دامنه بسیار متغیر بین ۶۶۷۶- الی ۴۹۹۱۹ را دارد که این مورد خود نشان‌دهنده اثرات و فعالیت آبراهه‌ها در این حوزه می‌باشد و توجیه‌کننده عمق زیاد دره در این حوزه می‌باشد. همچنین شیب حوزه آبخیز تا ۱۶۱ درصد نیز می‌رسد که نشان‌دهنده شیب بسیار بالا می‌باشد. طول شیب تا ۱۴۴۱ متر نیز می‌رسد که این مورد به گسترش فرسایش آبکندی کمک می‌کند. میانگین بارندگی در حوزه آبخیز سد گلستان بین ۲۲۴ میلی‌متر الی ۷۳۶ میلی‌متر متغیر است و این بارندگی شرایط ایجاد و گسترش آبکنند را فراهم می‌کند و میزان بارندگی از شمال‌غربی به سمت جنوب شرقی در حال افزایش است.

نتایج حاصل از آزمون Jackknife در بخش تلفیق عوامل جهت تعیین مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار نشان داد که پارامترهای ارتفاع، بارندگی، عمق دره، فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه، فاصله از جاده، لیتولوژی و کاربری اراضی مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر حساسیت فرسایش آبکندی می‌باشند و مدل نسبت به این عوامل بیشترین حساسیت را نشان داده است (شکل ۳).



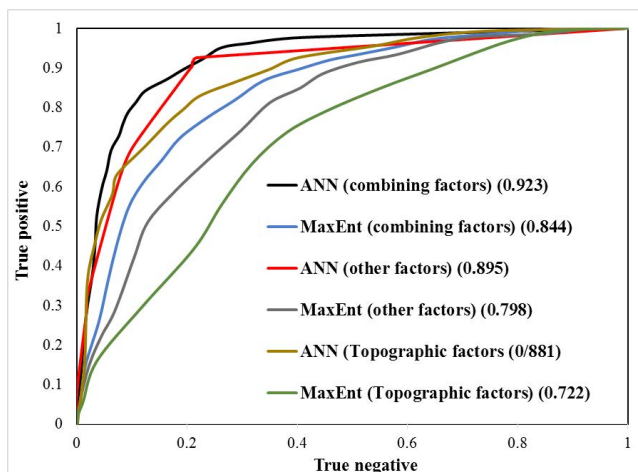
شکل ۳- نتایج حاصل از آزمون جکنایف جهت تعیین مهم‌ترین عوامل موثر بر فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سد گلستان  
Fig 3. Results of Jackknife test to determine the most important factors affecting gutter erosion in the watershed of Golestan Dam

جدول ۲، درصد سهم نسبی مشارکت هر یک از عوامل را در مدل‌سازی فرسایش آبکندی نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است

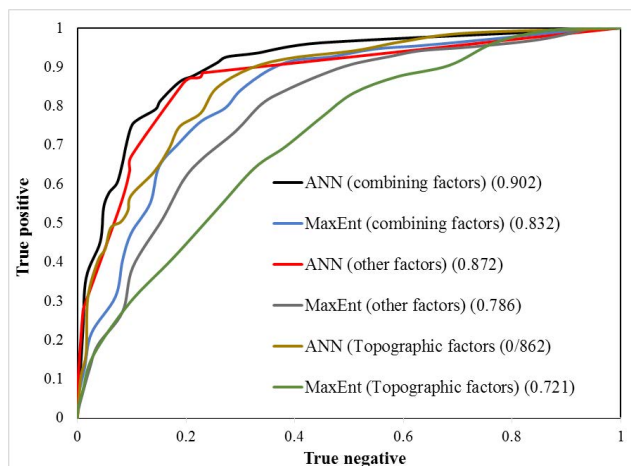


شکل ۲- عوامل مورد استفاده در حساسیت فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سد گلستان  
Fig 2. Factors used in the sensitivity of gutter erosion in the watershed of Golestan Dam

شکل ۴ و ۵ نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل‌ها را بر اساس AUC بدست آمده از منحنی ROC به تفکیک عوامل توپوگرافی، سایر عوامل و تلفیق عوامل در دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی مدل‌سازی نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل شبکه عصبی مصنوعی در بخش تلفیق عوامل در هر دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی بهترین نتیجه را ارائه کرده است.



شکل ۴- منحنی ROC در مرحله آموزش (یادگیری) مدل‌ها  
Fig 4. ROC curve in the training (learning) stage of the models



شکل ۵- منحنی ROC در مرحله آزمون (اعتبارسنجی) مدل‌ها  
Fig 5. ROC curve in the test (validation) stage of the models

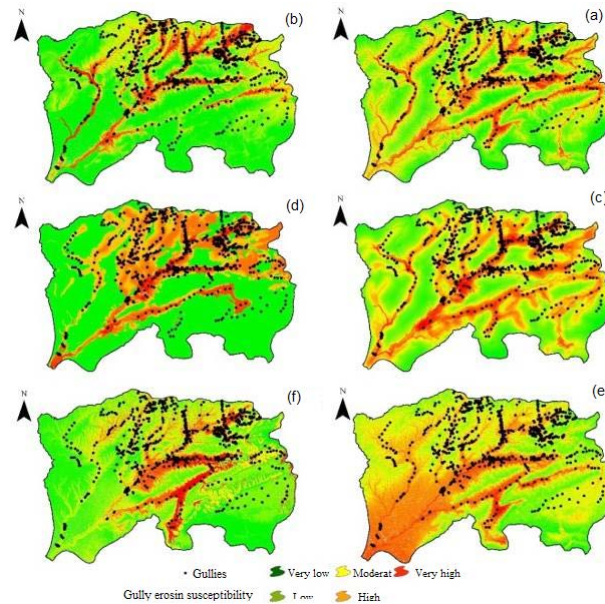
شکل ۶ نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی را بر اساس عوامل توپوگرافی، سایر عوامل و تلفیق عوامل بر اساس دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و حداکثر آنتروپی نشان می‌دهد. بر اساس این شکل نحوه مدل‌سازی بر اساس عوامل مختلف بسیار متغیر است و این نشان‌دهنده اهمیت عوامل می‌باشد.

که عامل تراکم آبراهه با اینکه درصد سهم مشارکت نسبتاً پایینی داشته است، ولی همین مقدار کم، بسیار تاثیرگذار بوده است و یکی از عوامل مهم و مؤثر بر مدل‌سازی حساسیت فرسایش آبکندی بوده است.

جدول ۲- درصد سهم مشارکت هر یک از عوامل در مدل‌سازی فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز سد گلستان

Table 2. Percentage of participation of each factor in modeling gully erosion in Golestan dam watershed

درصد سهم مشارکت Percentage of participation	متغیر Variable
23.1	فاصله از آبراهه Distance from stream
19.7	فاصله از جاده Distance from road
15.3	عمق دره depth valley
10.9	بارندگی Rainfall
9.5	کاربری اراضی Land use
7.1	لیتولوژی Lithology
6.4	ارتفاع Height
2.7	شیب Slope
1.6	جهت Aspect
1.3	تراکم جاده Road density
1	تراکم آبراهه Drainage density
0.8	شاخص رطوبت توپوگرافی Topographic Wetness index
0.5	طول شیب Slope length
0.1	شاخص قدرت جریان Stream power index



شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آب‌کندی بر اساس دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و حداکثر آنتروپی تلفیق مدل: a: حداکثر آنتروپی؛ b: شبکه عصبی مصنوعی؛ سایر عوامل: c: حداکثر آنتروپی؛ d: شبکه عصبی مصنوعی؛ عوامل توپوگرافیک: e: حداکثر آنتروپی؛ f: شبکه عصبی مصنوعی

Fig 6. Zoning map of gully erosion sensitivity based on two models of artificial neural network and maximum entropy Model integration: A: Maximum entropy; B: artificial neural network; Other factors: C: Maximum entropy; D: artificial neural network; Topographic factors: e: maximum entropy; And: artificial neural network

جدول ۳- توزیع میزان حساسیت فرسایش آب‌کندی در سطح حوزه آبخیز سد گلستان (مدل شبکه عصبی مصنوعی)

Table 3. Distribution of gully erosion sensitivity in Golestan dam watershed (artificial neural network model)

مساحت (درصد) Area (percentage)	مساحت (هکتار) Area (hectares)	طبقات حساسیت Sensitivity classes
50.7	113311.8	خیلی کم very low
16.4	36518.3	کم Low
12.5	27846.4	متوسط Moderate
8.6	19226.1	زیاد High
11.8	26407.8	خیلی زیاد very high

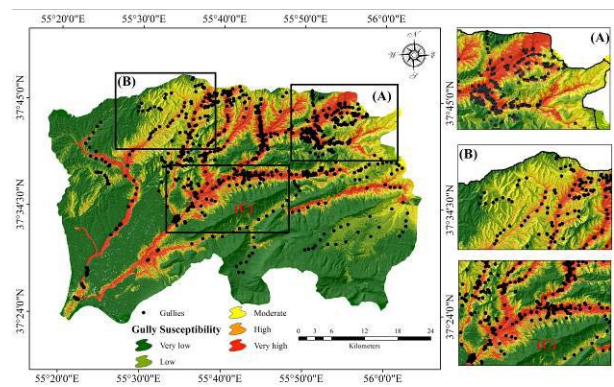
توزیع میزان حساسیت فرسایش آب‌کندی در سطح حوزه را بر اساس مدل فوق‌الذکر نشان می‌دهد. بر اساس این جدول بیش از ۵۰ درصد مساحت حوزه دارای حساسیت کم و حدود ۱۲ درصد حساسیت خیلی زیاد به فرسایش آب‌کندی دارد.

شکل ۷ نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آب‌کندی بر اساس مدل شبکه عصبی مصنوعی و تلفیق عوامل به عنوان مدل برتر را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل مرکز حوزه به سمت شمال شرقی دارای بیش‌ترین میزان حساسیت به فرسایش آب‌کندی است. جدول ۳ نیز



مورد تاکید قرار گرفته است [۴، ۱۵، ۲۳، ۳۱، ۳۴، ۳۵ و ۳۷]. نتایج نشان‌دهنده افزایش حساسیت فرسایش آب‌کندی با افزایش شاخص رطوبت توپوگرافی است. در واقع این نتیجه بیان‌گر این است که در مناطقی که افزایش رطوبت و میزان سطوح اشباع در سطح حوزه آبخیز افزایش می‌یابد، احتمال رخداد و حساسیت فرسایش آب‌کندی افزایش پیدا می‌کند که با نتایج [۱۷ و ۳۵] مبنی بر اهمیت و تأثیر این شاخص بر احتمال رخداد فرسایش آب‌کندی مطابقت دارد. نتایج نشان داد که در میان انواع کاربری‌ها، مسیل‌ها، مراتع فقیر و کاربری کشاورزی دارای بیش‌ترین احتمال رخداد فرسایش آب‌کندی هستند. عدم وجود پوشش گیاهی در کاربری‌های مذکور احتمال رخداد فرسایش آب‌کندی را افزایش داده است که با نتایج [۴۱] مطابقت دارد. این در حالی است که مناطق جنگلی دارای کم‌ترین میزان حساسیت به این فرسایش بوده‌اند. همچنین در تحقیقات [۴، ۱۵، ۱۷، ۲۳، ۳۰، ۳۴ و ۳۷] بر اهمیت نقش متغیر کاربری بر احتمال رخداد فرسایش آب‌کندی تأکید شده است. نتایج نشان داد که شاخص بارندگی شرایط متغیری داشته و از میزان ۲۲۰ الی ۴۲۰ میلی‌متر احتمال رخداد فرسایش آب‌کندی افزایش پیدا کرده است و از ۴۲۰ الی ۵۰۰ میلی‌متر ثابت بوده و بالاترین میزان حساسیت را نشان داده است و با افزایش بارندگی از ۵۰۰ میلی‌متر به بالا با کاهش حساسیت فرسایش آب‌کندی مواجه شده است. از دلایل کاهش احتمال رخداد فرسایش آب‌کندی در بارندگی‌های بالای ۵۰۰ میلی‌متر می‌توان به افزایش پوشش گیاهی و ایجاد شرایط مناسب برای زمین‌لغزش‌ها اشاره کرد. اهمیت شاخص بارندگی و تأثیر آن بر ایجاد و توسعه فرسایش آب‌کندی در تحقیقات [۱ و ۱۵] نیز مورد تأکید قرار گرفته است. نتایج نشان داد که عمق دره تا ۲۷۰ متر باعث افزایش احتمال رخداد فرسایش آب‌کندی شده است و از ۲۷۰ متر به بالا باعث کاهش احتمال رخداد فرسایش شده است. در واقع تا عمق مذکور فعالیت آبراهه‌ها وجود دارد و در مناطق نزدیک به آبراهه‌ها و تقاطع آن‌ها فرسایش آب‌کندی از نوع جبهه‌ای اتفاق می‌افتد و از عمق ۲۷۰ متری به بعد فرسایش بستر آبراهه‌ها و فرسایش به صورت عمقی گسترش پیدا می‌کند. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله از جاده میزان حساسیت فرسایش آب‌کندی کاهش پیدا می‌کند و این مورد اثرات جاده‌سازی و تغییرات چشم‌انداز سرزمین و تشدید شرایط برای فرسایش آب‌کندی را نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که شناسایی مناطق دارای حساسیت فرسایش آب‌کندی مبنی بر روش‌های سنتی و نظرات کارشناسی از دقت قابل قبولی برخوردار نیست، استفاده از روش‌های نوین یادگیری ماشینی امری ضروری است. در این مطالعه با در نظر گرفتن ۱۴ عامل مهم و تأثیرگذار و با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و حداکثر آنتروپی نقشه حساسیت وقوع فرسایش آب‌کندی تهیه گردید. نتایج نشان داد که عوامل ارتفاع، بارندگی، عمق دره، فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه، فاصله از جاده، لیتولوژی و کاربری اراضی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر حساسیت فرسایش آب‌کندی هستند که مدیریت



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آب‌کندی بر اساس مدل شبکه عصبی مصنوعی و کلیه عوامل به عنوان مدل برتر  
Fig 7. Zoning map of gully erosion sensitivity based on artificial neural network model and all factors as the superior model

### بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تاثیر عوامل مختلف بر حساسیت فرسایش آب‌کندی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت نقشه حساسیت فرسایش آب‌کندی برای سطح حوزه آبخیز تهیه شد. رابطه بین فرسایش آب‌کندی و ارتفاع (طبقات ارتفاعی) نشان داد که کلاس ارتفاعی پایین‌تر حساسیت بیش‌تری نسبت به ارتفاعات بالاتر دارد. این موضوع بیانگر این است که احتمال ایجاد فرسایش آب‌کندی در کلاس‌های پایین‌تر در این حوزه بیش‌تر است که این موضوع در تحقیقات دیگر [۲] مورد تأکید قرار گرفته است. نتایج نشان داد که ارتفاع یکی از متغیرهای مهم و تأثیرگذار بر فرسایش آب‌کندی بوده است که در تحقیقات [۲۳ و ۳۱] نیز به اهمیت تأثیر آن بر فرسایش آب‌کندی تأکید شده است. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله از آبراهه حساسیت به رخداد فرسایش آب‌کندی کاهش پیدا می‌کند که با نتایج [۲، ۴، ۹، ۱۰، ۱۷، ۲۳، ۳۴ و ۳۰] که بیان داشتند فاصله کم از آبراهه رابطه مثبت با فرسایش آب‌کندی دارد، مطابقت دارد. نتایج نشان داد که رابطه بین تراکم آبراهه با حساسیت فرسایش آب‌کندی به صورت مستقیم بوده است و با افزایش تراکم آبراهه احتمال رخداد فرسایش آب‌کندی بیش‌تر شده است. در تحقیقات مشابه نیز به این مورد تأکید شده است و افزایش تراکم آبراهه را یکی از متغیرهای اساسی در فرسایش آب‌کندی تلقی کرده‌اند [۱، ۱۷، ۳۰، ۳۱ و ۳۷]. طبق نتایج حاصل از متغیر لیتولوژی، پادگانه‌های قدیمی، شیل و لس‌ها بیش‌ترین ارتباط را با ایجاد فرسایش آب‌کندی دارند که از مهم‌ترین علل آن می‌توان به وجود املاح گچ و نمک در آن، وجود رسوبات ریزدانه رس و سیلت، پایداری کم لس‌ها و عدم وجود ساختمان قوی خاک‌دانه‌ها و همچنین کمبود مواد آلی اشاره کرد. اهمیت متغیر لیتولوژی در احتمال رخداد فرسایش در واحدهای مختلف با درجه حساسیت بالا و پایین قبلا در تحقیقات دیگران

Scarciglia, F. 2011. Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). *Natural Hazards*, 56, 881–898.

7. Conoscenti, C., Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E. and Marker, M. 2013. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy. *Environment Earth Science*, 70(3), 1179–1195.

8. Conoscenti, C., Agnesi, V., Cama, M., Caraballo-Arias, N.A. and Rotigliano, E. 2018. Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and accounting for terrain connectivity. *Land Degradation and Development*, 29, 724–736.

9. Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V. and Märker, M. 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: a case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204, 399–411.

10. Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J. and Mashauri, D. 2014. Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in mbire district–Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 67, 145–152.

11. Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E. and Yates, C.J. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Divers Distribution*, 17(1), 43–57.

12. Flanagan, D.C. and Nearing, M.A. 1995. USDA-water erosion prediction project: hill slope profile and watershed model documentation. NSERL Report #10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.

13. Garosi, Y., Sheklabadi, M., Pourghasemi, H.R., Besalatpour, A.A., Conoscenti, C. and Van Oost, K. 2018. Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma*, 330, 65–78.

14. Ghorbani Nejad, S., Rahmati, O. and Noormohammadi, F. 2017. Modeling the Potential of Gully Erosion Occurrence Applying Shannon Entropy and Statistical Index Models in Seymareh Region.

کاربری اراضی به عنوان فعالیت‌های انسانی را می‌طلبد. منحنی ROC رسم شده در بخش تلفیق عوامل نشان داد که دقت مدل‌ها در برآورد مناطق دارای حساسیت فرسایش آبکندی هم در مرحله آزمون و هم در مرحله اعتبارسنجی عالی بوده است که بر اساس نظر فیلیپس [۲۷] به معنای عملکرد عالی مدل می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که مدل ANN توانایی بالایی در تعیین مناطق دارای حساسیت فرسایش آبکندی دارد و با توجه به سرعت و دقت بالای مدل پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات مشابه مورد استفاده قرار بگیرد. لازم به ذکر است که محققان دیگر از جمله [۱۹، ۲۱ و ۲۵] توانایی مدل MaxEnt را تأیید کرده‌اند. نتایج این تحقیق در تصمیم‌گیری و آمایش سرزمین استانی و همچنین برنامه‌ریزی کاربری اراضی قابل استفاده خواهد بود و نقش بسزایی در پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از وقوع فرسایش آبکندی خواهد داشت. پیشنهاد می‌شود که با استفاده از عوامل دیگر و روش‌های مختلف نقشه پهنه‌بندی حساسیت آبکنند در این حوزه آبخیز تهیه گردد و نتایج آن با نتایج این تحقیق مقایسه شود.

## منابع

1. Arabameri, a., Cerda, A. and Tiefenbacher, J. 2019. Spatial Pattern Analysis and Prediction of Gully Erosion Using Novel Hybrid Model of Entropy-Weight of Evidence. *Water*, 11, 1129.

2. Arabameri, A., Rezaei, K. and Yamani, M. 2018. Analysis of Geo-environmental parameters and gully erosion susceptibility mapping in toroud watershed using data-driven Evidential Belief Function method. *Journal of Range and Watershed Management*, 71(1), 97-114. (In Persian)

3. Arulbalaji, P., Padmalal, D. and Sreelash, K. 2019. GIS and AHP techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 9: 2082, doi: 10.1038/s41598-019-38567-x.

4. Azareh, A., Rahmati, O., Rafiei, E., Sankey, J., Lee, S., Shahabi, H. and Ahmad, B. 2019. Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models. *Science of the Total Environment*, 655, 684–696.

5. Chaplot, V. 2013. Impact of terrain attributes parent material and soil types on gully erosion. *Geomorphology*, 186, 1–11.

6. Conforti, M., Aucelli, P.P.C., Robustelli, G. and

24. Meliho, M., Khattabi, A. and Mhammdi, N. 2018. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling using bivariate statistics methods in the Ourika watershed, Morocco. *Environment Earth Science*, 77(18), 655.
25. Pandey, V.K., Pourghasemi, H.R. and Sharma, M.C. 2018. Landslide susceptibility mapping using maximum entropy and support vector machine models along the Highway Corridor, Garhwal Himalaya. *Geocarto International*, DOI:10.1080/10106049.2018.1510038.
26. Park, N.W. 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences*, 73, 937-949.
27. Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*, 190, 231-259.
28. Poesen, J., Nachetergaele, J., Verstraeten, J. and Valentin, C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50(2-4), 91-133.
29. 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*, 609, 764-775.
30. Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. and Noormohammadi, F. 2016. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*, 82, 1231-1258.
31. Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. 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*, 579, 913-927.
32. Saber Chenari, K., Bahremand, A., Sheikh, V. and Komaki, C.B. 2016. Gully Erosion Hazard Zoning Using of Dempster-Shafer Model in the Gharnaveh Watershed, Golestan Province. *Eco-Hydrology Journal*, *Environmental Erosion Research*, 7(1), 25, 69-89. (In Persian)
15. Gornami, R. and Shadfar, S. 2019. Application of the GIS in the Determination of Susceptible Areas to Gully Erosion Using the Analytic Network Process (ANP). *Watershed Management Research*, 31(4), 121, 58-68. (In Persian)
16. Hongchun, Z.H.U., Guoan, T., Kejian, Q. and Haiying, L. 2014. Extraction and analysis of gully head of loess plateau in China based on digital elevation model. *China Geographic Science*, 24(3), 328-338.
17. Karimi, E. and Ownegh, M. 2016. Evaluation of gully erosion hazard by statistical models in Naghan Inter basin, Chaharmahal Va Bakhtiari province. Short Technical Report, *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(5), 315-319. (In Persian)
18. Kariminejad, N., Hosseinalizadeh, M., Pourghasemi, H., Bernatek, A., Campetella, G. and Ownegh, M. 2019. Evaluation of factors affecting gully headcut location using summary statistics and the maximum entropy model: Golestan Province, NE Iran. *Science of the Total Environment*, 677, 281-298.
19. Kerekes, A.H. 2016. Landslide Susceptibility evaluation using GIS. Case Study: Sylvania Hills (Romania), *Studia Ubb Geographia*, 2, 85-99.
20. Knisel, W.G. 1980. CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. US Department of Agriculture. Conservation research report (USA), 26, 474-485.
21. Kornejady, A., Ownegh, M. and Bahremand, A. 2017. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*, 152, 144-162.
22. Kumar, B.M. and Nair, P.K.R. 2006. Tropical homegardens: a time-tested example of sustainable agroforestry. Springer Science, Dordrecht, 380 p.
23. Mehraban, M., Golkarian, A. and Khosravi, K. 2018. Evaluation of susceptibility to gully erosion using maximum entropy model (Case study: Shorlou region of Khorasan Razavi province). Third National Conference on Soil Conservation and Watershed Management, Soil Conservation and Watershed Management Institute, Tehran, Iran. (In Persian)

37. Valentin, C., Poesen, J. and Yong, L. 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena*, 63, 132–153.
38. Wang, L., Wei, S., Horton, R. and Shao, M.A. 2011. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the loess plateau of china. *Catena*, 2011, 87, 90–100.
39. Zabihi, M., Mirchooli, F., Motevalli, A., Darvishan, A., Pourghasemi, H., Zakeri, M. and Sadighi, F. 2018. Spatial modelling of gully erosion in Mazandaran Province, northern Iran. *CATENA*, 161, 1-13.
40. Zakerinejad, R. and Maerker, M. 2015. An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Nat Hazards*, doi: 10.1007/s11069-015-1700-3.
41. Zheng, F. 2006. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 16(4), 420–427.
- 3(2), 219-231. (In Persian)
33. Sanaei, S., Pashayi, A., Ayubi, S. and Ekhtesasi, M. 2005. Sedimentological survey of loess areas of Qopan and Naharkhoran valley from morphometric perspective. Third Erosion and Sediment National Conference. Soil Conservation and Watershed Management Institute, Tehran, Iran. (In Persian)
34. Shadfar, S. 2016. Identifying the gully erosion potential by using artificial neural network (ANN), case study: Troud Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 8(3), 256-263. (In Persian)
35. Shit, P.K., Paira, R., Bhunia, G. and Maiti, R. 2015. Modeling of potential gully erosion hazard using geo-spatial technology at Garbgheta block, West Bengal in India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1(1–2), 1–16.
36. Tien Bui, D., Shirzadi, A., Shahabi, H., Chapi, K., Omidvar, E., Thai Pham, B., Talebpour, D., Khaledian, H., Pradhan, B., Panahi, M., Ahmad, B., Rahmani, H., Grof, G. and Lee, S. 2019. A Novel Ensemble Artificial Intelligence Approach for Gully Erosion Mapping in a Semi-Arid Watershed (Iran). *Sensors*, 19, 2444.



## Assessment of Artificial Neural Network Models and Maximum Entropy in Zoning of Gully Erosion Sensitivity of Golestan Dam Basin

A. Shahbazi<sup>1</sup>, F. Vakili Tajareh<sup>2</sup>, E Alvandi<sup>3</sup>, A. Bayat<sup>4</sup> and O. Asadi Nalivan<sup>5</sup>

Received: 14-04-2020 Accepted: 26-06-2020

### Abstract

Zoning of gully erosion susceptibility and determining the factors controlling gully erosion is very important and vital. The aim of this study was to investigate the spatial distribution of gully erosion using two models of ANN and MaxEnt and to determine the factors affecting this type of erosion in Golestan Dam basin. Therefore, 14 factors in the form of three divisions, including topographic factors, other factors and combination of factors (14 factors) were considered as predictors of sensitivity. Out of 1042 gully erosion points, 30 and 70 percent were randomly classified as validation and test data, respectively. The results of Jackknife test showed that the parameters of height, rainfall and depth of valley are the most important variables affecting the prediction of gully erosion. The results of the modeling showed that the best accuracy of the model based on the ROC curve in the training model (0.923) and in the validation, stage (0.902) was the artificial neural network model, and this condition is achieved when all the factors in the modeling be involved. According to this model, about more than 20 percent of the domain (45633 ha) has a high sensitivity and is very susceptible to gully erosion.

**Keywords:** *Spatial distribution, Artificial neural network, Susceptibility, Gully erosion*

- 
1. Ph.D Graduated in Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.
  2. M.Sc Graduated in Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.
  3. Ph.D Graduated in Watershed Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
  4. M.Sc Student in Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran.
  5. Corresponding author and Ph.D Graduated in Watershed Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Email: [omid.asadi@alumni.ut.ac.ir](mailto:omid.asadi@alumni.ut.ac.ir)