

که رخساره فرسایش هزاردره مهمترین نقش را در فرسایش خاک این حوضه به دلیل وضعیت اقلیمی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی، کاهش پوشش گیاهی و همچنین وجود سازندهای مستعد فرسایش دارد.

مواد و روش‌ها

ابتدا نقشه پراکنش فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و پیمایش زمینی تهیه شد. با استفاده از نقاط و خطوط ارتفاعی موجود در نقشه‌های توپوگرافی تهیه شده از سازمان نقشه‌برداری کشور، نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) تهیه شد. نقشه‌های جهت شیب، درجه شیب، انحناء سطح، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و طبقات ارتفاع با استفاده از نقشه DEM و در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS10.3 و SAGA-GIS به دست آمد. نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز فیروزکوه با استفاده از تصاویر لندست ۸ و با روش تلفیقی به دست آمد. برای تهیه نقشه مشخصات مربوط به خاک ۳۰ نمونه خاک برداشت و در آزمایشگاه بررسی شد. نقشه زمین‌شناسی منطقه نیز از نقشه زمین‌شناسی ایران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استخراج شد. نقشه‌های فاصله از رودخانه نیز در محیط ArcGIS10.3 تهیه شد. نقشه بارش متوسط سالانه با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های هواشناسی تهیه شد. وزن مربوط به طبقات هر یک از عوامل مؤثر با استفاده از مدل ارزش اطلاعات محاسبه شد. مدل AHP نیز برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر استفاده شد. وزن به دست آمده از هر دو مدل در هم ضرب شد و وزن نهایی با استفاده از مدل تلفیقی محاسبه شد. با جمع کردن وزن‌ها، نقشه نهایی حساسیت فرسایش هزاردره تهیه شد. در آخرین مرحله، منحنی ROC و سطح زیر منحنی برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه از مدل AHP استفاده شد. نتایج نشان داد که درجه شیب، زمین‌شناسی، ارتفاع، و فاصله از رودخانه بیشترین تأثیر را بر وقوع فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه دارند. وزن طبقات مربوط به عوامل مؤثر با استفاده از مدل ارزش اطلاعات محاسبه شد. نتایج نشان داد که بیشترین وزن ارزش اطلاعات مربوط به شیب بالای ۳۵ درجه، سازندهای مارن، آهک و شیل، طبقه ارتفاعی ۱۷۱۲ تا ۲۲۸۶، جهت شمال غربی، درصد رس بالای ۲۵ درصد، کاربری مرتع و فاصله کمتر از ۱۱۵۰ متر تا رودخانه است. برای تهیه نقشه حساسیت فرسایش هزاردره از دو مدل ارزش اطلاعات و مدل تلفیقی استفاده شد. ارزیابی دقت مدل‌ها با استفاده از منحنی ROC و سطح زیر این منحنی انجام شد. میزان سطح زیر منحنی برای مدل ارزش اطلاعات و مدل تلفیقی به ترتیب

اولویت‌بندی عوامل مؤثر و تحلیل حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره با استفاده از مدل تلفیقی ارزش اطلاعات و AHP

مجید محمدی^۱، مجتبی امیری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶

<https://doi.org/10.22034/18.66.38>

چکیده مبسوط

مقدمه

خاک بخشی مهم از فرآیندهای زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، بیولوژیکی و محیط‌زیستی بوده و همواره در معرض تغییر و تبدیل است. افزایش تقاضا برای کالا، خدمات و نیازهای پایه بویژه در کشورهای توسعه نیافته و در حال توسعه فشار زیادی بر لایه‌های بالایی خاک وارد می‌کند. در مقیاس جهانی، فرسایش خاک از مهمترین پدیده‌های طبیعی است که مناظر را تغییر می‌دهد. فرسایش خاک اثرات درون‌منطقه‌ای و برون‌منطقه‌ای فراوانی دارد. فرسایش کیفیت و کمیت خاک را کاهش داده و یک فرآیند طبیعی و انسانی بوده که بسیاری از کشورهای جهان را تحت تأثیر قرار داده است. یکی از مهمترین رخساره‌های فرسایشی رخساره هزاردره یا بدلند است. رخساره فرسایشی هزاردره معمولاً به مناطق با رسوبات سست و غیرمتراکم، پوشش گیاهی بسیار ضعیف یا فاقد پوشش گیاهی که به دلیل تراکم بالای شیارها و بریدگی‌ها برای کشاورزی غیرقابل استفاده است اشاره می‌کند. فرسایش هزاردره در نتیجه برهم‌کنش عوامل مؤثر از قبیل اقلیم، هیدرولوژی، زمین‌شناسی و خصوصیات خاک، توپوگرافی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی است. با توجه به اینکه فرسایش خاک یک فرآیند بسیار پیچیده و تحت تأثیر خصوصیات سطح زمین، نوع خاک و دیگر فاکتورهای محیط‌زیستی است، بررسی کمی و تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری فرسایش امری بحث برانگیز است. هدف اصلی این پژوهش تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره با استفاده از مدل ارزش اطلاعات و مدل تلفیقی ارزش اطلاعات-AHP است. حوزه آبخیز فیروزکوه به این دلیل انتخاب شد

۱- نویسنده مسئول و دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، ایران. majid.mohammady@semnan.ac.ir

۲- دانشیار گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سمنان، ایران.

۶۸۴/۰ و ۸۱۱/۰ به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره مدل ارزش اطلاعات متوسط و مدل تلفیقی خیلی خوب است. برای بررسی حساسیت‌پذیری کلی حوزه آبخیز مساحت طبقات حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم محاسبه شد. در مدل تلفیقی مساحت طبقات حساسیت زیاد و خیلی زیاد، ۴۴ درصد (۶۴۰ کیلومترمربع) از حوزه آبخیز فیروزکوه را شامل می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌های ارزش اطلاعات و تلفیقی برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش هزاردره و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه مورد استفاده قرار گرفت. یازده عامل مؤثر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، TWI، انحنا، سطح، بارش، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از رودخانه، درصد رس، pH خاک انتخاب شده و به عنوان لایه‌های مکانی وارد محیط GIS شدند. برای بررسی اهمیت عوامل مؤثر و اولویت‌بندی آن‌ها از روش AHP استفاده شد. نتایج بررسی اهمیت عوامل مؤثر نشان داد که درجه شیب و زمین‌شناسی بیشترین تأثیر را بر وقوع فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه دارند. همچنین مدل‌های ارزش اطلاعات و تلفیقی کارایی قابل قبولی برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره در منطقه مورد مطالعه نشان دادند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که حدود ۴۴ درصد (۶۴۰ کیلومترمربع) از منطقه مورد مطالعه حساسیت زیاد و خیلی زیاد نسبت به فرسایش هزاردره دارند، بنابراین کنترل و مدیریت این پدیده در حوزه آبخیز فیروزکوه امری ضروری است. فرسایش هزاردره یکی از مهم‌ترین منابع تولید رسوب در منطقه بوده و برنامه‌ریزان باید در تصمیم‌گیری‌های خود به این موضوع توجه کنند. نقشه حساسیت فرسایش هزاردره یک ابزار مهم برای بهبود مدیریت مناطق فرسایشی در آینده و دیگر مناطق تحت تأثیر فرسایش در حوزه آبخیز فیروزکوه است.

کلیدواژه‌ها: فرسایش هزاردره، نقشه حساسیت‌پذیری، مدل ارزش اطلاعات، مدل تلفیقی، منحنی ROC

مقدمه

خاک به عنوان یک منبع طبیعی ارزشمند خدمات زیادی داشته و نقش زیادی در محیط‌زیست و اقتصاد جهانی بازی می‌کند [۱۹]. خاک جزئی مهم از فرایندهای زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، بیولوژیکی و محیط‌زیستی بوده و همواره در معرض تغییر و تحول است [۱۲]. افزایش تقاضا برای کالا، خدمات و نیازهای پایه، به‌ویژه در کشورهای توسعه‌نیافته و در حال توسعه فشار زیادی بر لایه‌های سطحی خاک وارد کرده است [۱۰]. فرسایش و تخریب خاک کیفیت و کمیت خاک را کاهش داده و یک فرآیند طبیعی و انسانی بوده که بسیاری از کشورهای جهان را تحت تأثیر قرار داده است. فرسایش آبی یکی از تیپ‌های معمول، مهم و خطرناک فرسایش به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بوده که موجب تخریب و هدررفت خاک می‌شود [۴]. فرسایش آبی حدود ۲ میلیارد هکتار از مناطق

جهان را تحت تأثیر قرار داده است که بیانگر اهمیت این موضوع در سرتاسر جهان است [۱۳]. فرسایش هزاردره یکی از مهمترین انواع فرسایش‌های آبی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک است. فرسایش هزاردره در نتیجه برهم‌کنش عوامل مؤثر از قبیل اقلیم (بارش‌های شدید و دوره‌های خشک بعد از آن)، هیدرولوژی (رواناب‌های فصلی و شدید)، زمین‌شناسی و خصوصیات خاک (املاح فراوان و بافت ریزدانه)، توپوگرافی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی است [۳]. فرسایش هزاردره به صورت دره‌های زیاد بریده بریده و ۷ شکل، شیب زیاد و تراکم زهکشی بالا مشخص می‌شود [۲۰]. هزاردره‌ها می‌توانند موجب کاهش حاصلخیزی خاک، تخریب مزارع، ناپایداری اراضی شیب‌دار، تضعیف زیرساخت‌ها و تغییر مسیرهای حمل و نقل شوند [۱۲].

هدف این تحقیق تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره با استفاده از مدل ارزش اطلاعات و مدل تلفیقی ارزش اطلاعات-AHP در حوزه آبخیز فیروزکوه است. در مدل تلفیقی وزن مربوط به عوامل اصلی با استفاده از مدل AHP و وزن مربوط به طبقات هر عامل با استفاده از روش ارزش اطلاعات محاسبه می‌شود. در نهایت وزن‌ها با هم تلفیق و نقشه حساسیت‌پذیری تهیه می‌شود. مدل ارزش اطلاعات از تراکم فرسایش‌ها در منطقه به منظور تعیین میزان حساسیت استفاده کرده و در عین سادگی دقت قابل قبولی دارد. مدل AHP نیز از نظرات کارشناسی در قالب پرسشنامه به منظور اولویت‌بندی عوامل مؤثر استفاده می‌کند. در بسیاری از تحقیقات از جمله روش‌های آماری دو متغیره مانند ارزش اطلاعات به اهمیت نسبی هر یک از عوامل توجه نمی‌شود. در این پژوهش اهمیت نسبی عوامل با مدل AHP مشخص شده و نتایج به دست آمده در مدل ارزش اطلاعات اعمال می‌شود. این موضوع مشکل ناشی از مدل‌های دومتغیره را برطرف کرده و می‌توان انتظار دقت بیشتر مدل تلفیقی را داشت.

به دلیل اهمیت موضوع فرسایش و خساراتی که ایجاد می‌کند، شناسایی عوارض فرسایشی، اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر آن و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش امری ضروری بوده و در بسیار از مناطق جهان به آن پرداخته شده است. به عنوان مثال ازاره و همکاران [۱] از مدل‌های عامل اطمینان و حداکثر انتروپی برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش در استان ایلام، ایران استفاده کردند. نتایج نشان داد جهت شیب و فاصله از رودخانه مهمترین عوامل مؤثر بر فرسایش هستند. کاما و همکاران [۵] مدل آنتروپی را برای بررسی حساسیت‌پذیری حوضه‌ای در اتیوپی به فرسایش ورقه‌ای، آب‌بندی و هزاردره استفاده کردند. نتایج نشان داد ارتفاع و کاربری اراضی مهمترین عوامل مؤثر بر فرسایش در این منطقه هستند. محمدی و داودی‌راد [۱۳] با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری فرسایش آب‌بندی را در حوزه آبخیز شاند مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد فاصله از جاده، ارتفاع و بارش بیشترین نقش را در وقوع فرسایش آب‌بندی دارند. محمدی و همکاران [۱۶] با استفاده از مدل جنگل تصادفی فرسایش هزاردره را در حوزه آبخیز فیروزکوه مورد مطالعه

قرار دادند. تراکم زهکشی و ارتفاع به عنوان مهمترین عوامل مؤثر بر فرسایش هزاردره در این پژوهش معرفی شدند. تین بای و همکاران [۲۱] از روش هوش مصنوعی برای بررسی فرسایش آبکندی در بخشی از استان کردستان استفاده نمودند. نتایج نشان داد روش هوش مصنوعی کارایی بالایی برای تحلیل خطر فرسایش آبکندی در منطقه مورد مطالعه دارد.

حوزه آبخیز فیروزکوه به دلیل شرایط آب و هوایی و زمین‌شناسی همواره با مشکل فرسایش مواجه بوده و فرسایش هزاردره از عوارض شاخص منطقه است. به همین دلیل این منطقه برای این پژوهش انتخاب شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز فیروزکوه در شرق استان تهران و بین عرض‌های ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۷ دقیقه شمالی و طول‌های ۵۲ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۷ دقیقه شرقی قرار گرفته و مساحتی در حدود ۱۴۵۰ کیلومترمربع دارد (شکل ۱). ارتفاع کیمینه و بیشینه حوزه آبخیز به ترتیب ۱۷۱۲ و ۳۹۴۱ متر از سطح دریا است. به دلیل توپوگرافی پیچیده میزان بارندگی سالانه نیز در بخش‌های مختلف منطقه متفاوت بوده و بین ۱۵۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است. کاربری اراضی منطقه شامل زمین‌های کشاورزی، مرتع، مسکونی و اراضی بایر است. فرسایش هزاردره با شیب خیلی زیاد و دره‌های بریده بریده مهم‌ترین فرسایش در حوزه آبخیز فیروزکوه است.

تهیه داده‌های مورد نیاز

به منظور تهیه نقشه پراکنش فرسایش هزاردره ابتدا با استفاده از نرم‌افزار گوگل ارث و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۰ موقعیت مناطق فرسایش هزاردره مشخص شد. در مرحله بعد به منظور تعیین محل دقیق فرسایش و اطمینان از وجود آن‌ها در منطقه پیمایش زمینی صورت گرفت. در نهایت در کل حوزه آبخیز فیروزکوه ۱۱۵ پلی‌گون به‌عنوان محل هزاردره‌ها ثبت شد (شکل ۱). حدود دو سوم از مناطق فرسایش هزاردره (۳۹۷۰ هکتار) برای تهیه نقشه حساسیت و یک سوم باقیمانده (۱۹۸۰ هکتار) برای ارزیابی دقت نقشه تهیه شده استفاده شد. مرحله بعد تهیه نقشه‌های مربوط به عوامل مؤثر بر فرسایش هزاردره بوده است. به این منظور بر اساس مرور منابع چند عامل به عنوان عوامل اصلی مؤثر بر فرسایش هزاردره مشخص شد که شامل ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنا سطح، بارش، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، درصد رس و اسیدته خاک است. البته موجودیت داده‌ها در یک منطقه نیز از مهم‌ترین عوامل تعیین کننده در انتخاب یا عدم انتخاب یک عامل است. تهیه نقشه برخی عوامل زمان‌بر و برخی دیگر مانند تهیه خصوصیات شیمیایی خاک، نفوذپذیری، حد روانی و ... هزینه‌بر بوده و بدون حمایت مالی تهیه آن‌ها مقرون به صرفه نیست. نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) از مهمترین نقشه‌های مورد استفاده در بررسی

فرسایش بوده که نقشه‌های دیگری نیز با استفاده از آن تهیه می‌شود. از نقاط و خطوط ارتفاعی نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده شده و نقشه DEM با اندازه پیکسل ۲۰ متر تهیه شد. نقشه‌های جهت شیب، درجه شیب، انحنا سطح^۱ و شاخص رطوبت توپوگرافی^۲ (TWI) با استفاده از نقشه DEM و در محیط GIS تهیه شد. نقشه زمین‌شناسی از سازمان زمین‌شناسی کشور در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه و در محیط نرم‌افزار ArcGIS رقومی شد. نقشه شبکه رودخانه رقومی شده و فاصله از رودخانه در محیط GIS تعیین شد. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و با استفاده از روش تلفیقی تهیه شد. در روش تلفیقی به طور هم‌زمان از روش نظارت‌نشده، نظارت‌شده و داده‌های کمکی مانند شیب و NDVI استفاده می‌شود [۲۱]. به منظور تهیه نقشه‌های درصد رس و pH خاک ۳۰ نمونه خاک به صورت تصادفی در کل منطقه برداشت و در آزمایشگاه میزان آن دو به دست آمد. داده‌های بارش مربوط به ایستگاه‌های داخل و اطراف حوزه آبخیز فیروزکوه تهیه و با میانبایی آن‌ها به روش IDW نقشه میزان بارش سالانه در حوزه آبخیز تهیه شد. تعیین آستانه و طبقه‌بندی نقشه‌ها بر اساس شکستگی طبیعی منحنی پراکنش پیکسل‌ها انجام شد [۱۲]. در این منحنی که در نرم‌افزار ArcGIS برای طبقه‌بندی نقشه‌های عددی تهیه می‌شود، میزان پراکنش پیکسل‌ها در وزن‌های مختلف نقشه مشخص می‌شود. بر اساس این پراکنش و تغییر شیب منحنی، حد بالا و پایین یک طبقه مشخص خواهد شد. نقشه‌های مربوط به عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش هزاردره در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲ واحد ارتفاع و فاصله از رودخانه بر حسب متر، بارندگی بر حسب میلی‌متر، شیب بر حسب درجه و میزان رس بر حسب درصد است.

تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره

برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه از یک مدل آماری و یک مدل تلفیقی آماری-کارشناسی استفاده شد. مدل آماری استفاده شده در این پژوهش مدل ارزش اطلاعات^۳ است که با وجود سادگی، دقت آن در مطالعات دیگر تأیید شده است [۷، ۱۸ و ۲۳]. وزن مربوط به هر یک از طبقات عوامل مؤثر با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۲۵]:

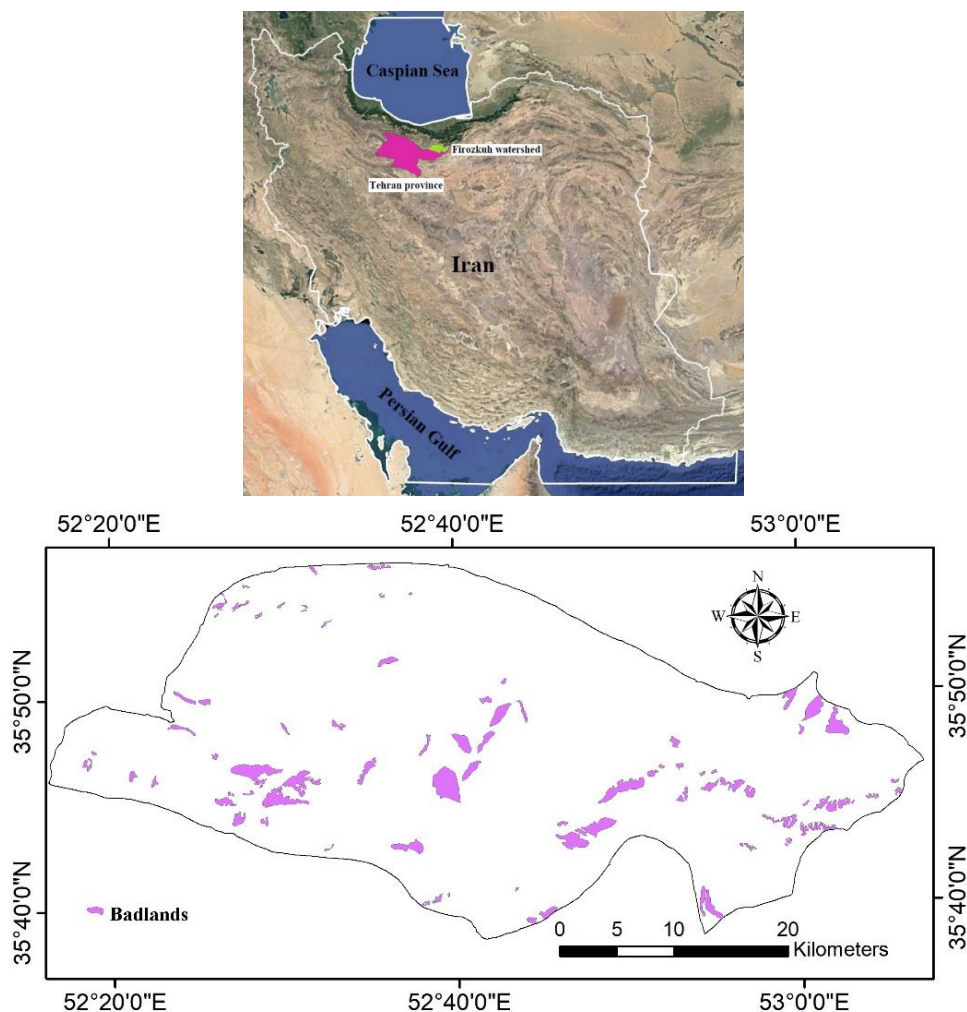
$$I = \sum_{i=1}^n Wi = \sum_{i=1}^n \ln \frac{P(\frac{y}{x_i})}{P(y)} \quad (1)$$

در این رابطه I وزن ارزش اطلاعات مربوط به هر پیکسل در منطقه، Wi وزن مربوط به هر طبقه از عوامل مؤثر، P(y) احتمال وقوع فرسایش هزاردره و P(y/Xi) احتمال وقوع هزاردره در یک طبقه است. برای محاسبه P(y) تعداد هزاردره‌های منطقه بر مساحت کل منطقه تقسیم می‌شود. برای محاسبه P(y/Xi) نیز تعداد هزاردره‌های

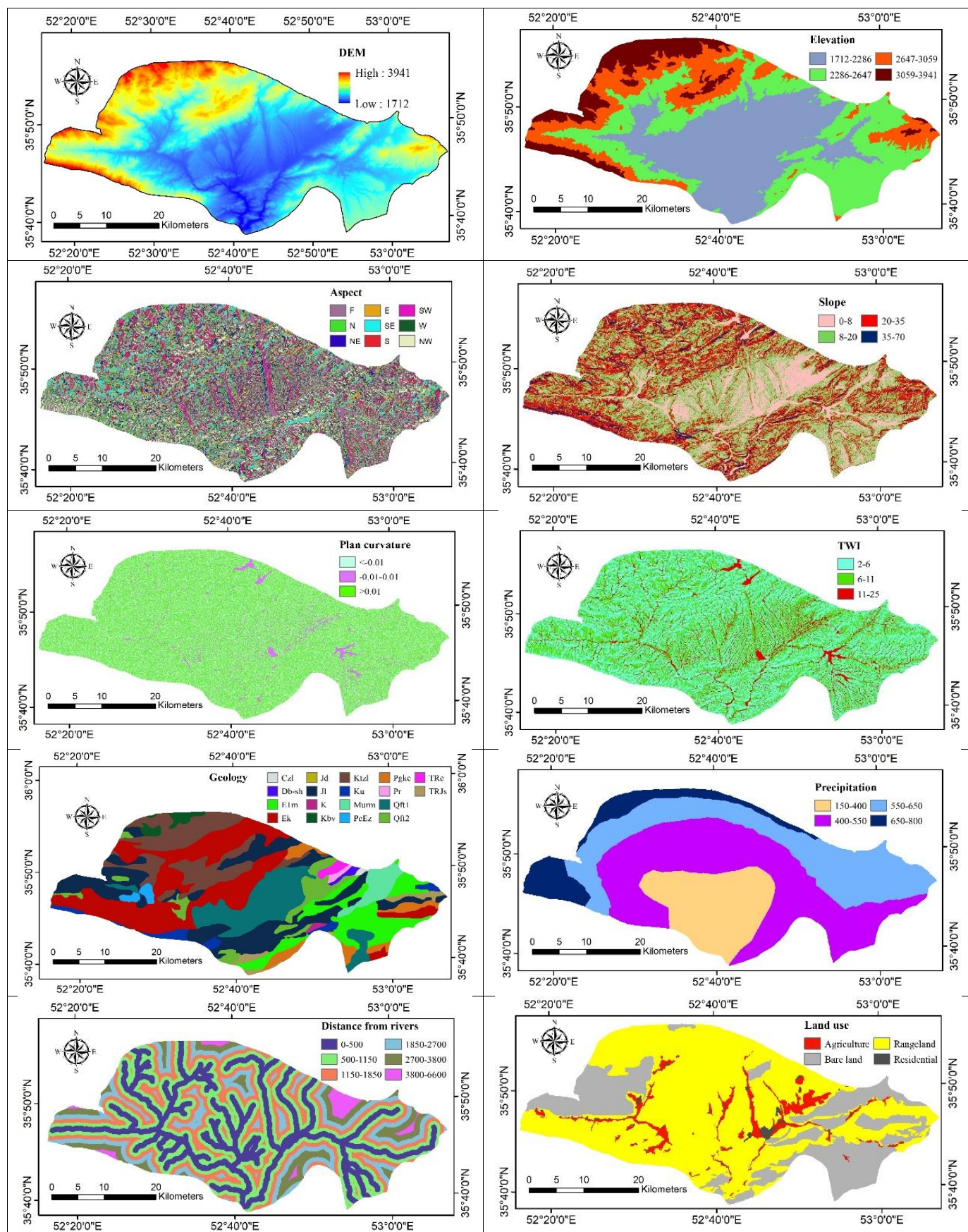
1. Plan curvature
2. Topographic Wetness Index
3. Information Value

جدول ۱ بر اساس نظر و دید کارشناسی عوامل مؤثر به صورت دو به دو باهم مقایسه و یکی از وزن‌های جدول انتخاب می‌شود [۲]. به عنوان مثال اگر از نظر کارشناس نقش شیب نسبت به جهت شیب در وقوع فرسایش هزاردره اهمیت خیلی قوی داشته باشد طبق جدول ۱ برای آن وزن ۷ انتخاب می‌شود. به این ترتیب کلیه عوامل نسبت به یکدیگر مقایسه شدند. در نهایت ماتریس به نرم‌افزار Expert Choice وارد و در آنجا وزن نهایی برای هر عامل محاسبه و تمامی عوامل نسبت به هم اولویت‌بندی شدند. برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری با استفاده از مدل تلفیقی وزن به دست آمده از روش AHP برای هر عامل در وزن طبقات آن عامل که از روش ارزش اطلاعات به دست آمده است ضرب می‌شود. به این ترتیب هر یک از طبقات نقشه وزن جدیدی خواهد داشت که از تلفیق مدل AHP و مدل ارزش اطلاعات به دست آمده است. در نهایت وزن مربوط به هر طبقه از نقشه‌های عوامل مؤثر در نقشه اعمال شد. در نهایت با جمع نقشه‌های وزنی در محیط ArcGIS، نقشه نهایی حساسیت‌پذیری با استفاده از روش تلفیقی به دست آمد.

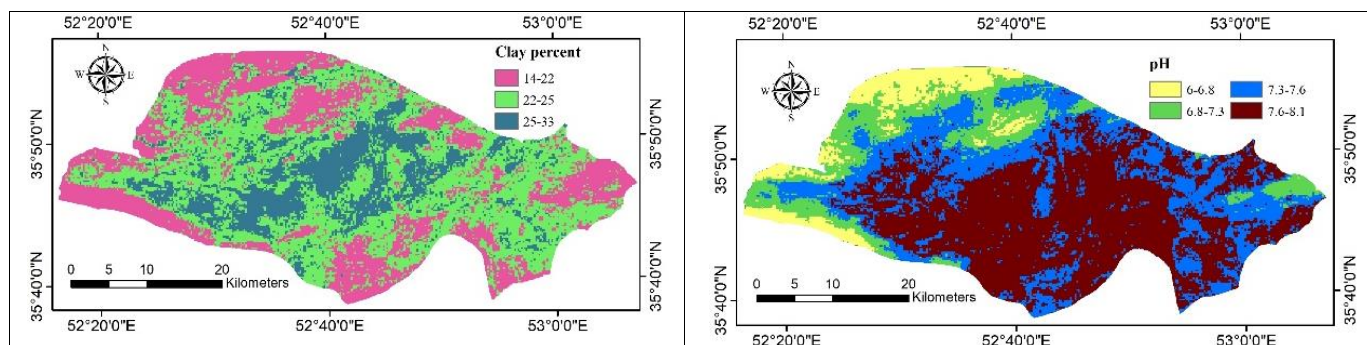
هر طبقه از عوامل مؤثر بر مساحت آن طبقه تقسیم می‌شود. به عنوان مثال اگر در کاربری مرتع ۵۰ فرسایش هزاردره وجود داشته باشد و مساحت مرتع نیز ۱۰۰۰ کیلومتر مربع باشد احتمال وقوع هزاردره در مرتع برابر با ۰/۰۵ است. با تقسیم $P(y/Xi)$ بر $P(y)$ وزن مربوط به هر طبقه محاسبه می‌شود. در نهایت همه نقشه‌های وزنی در محیط GIS با هم جمع شده و نقشه نهایی حساسیت‌پذیری به دست می‌آید. یکی از ایرادات مدل‌های آماری دومتغیره مانند ارزش اطلاعات، نسبت فراوانی و تراکم سطح عدم در نظر گرفتن اولویت عوامل مؤثر نسبت به یکدیگر است. برای رفع این مشکل از مدل تلفیقی ارزش اطلاعات-فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد. AHP یک روش نیمه‌کیفی است که شامل یک ماتریس وزن‌دهی بر مبنای مقایسات زوجی بین عوامل بوده و میزان مشارکت هر یک از عوامل را در وقوع یک پدیده مشخص می‌کند [۲]. مدل AHP روش ساده‌ای بوده که در صورت داشتن شناخت کافی از منطقه و پدیده مورد بررسی دقت قابل قبولی در اولویت‌بندی عوامل خواهد داشت. اولین قدم در استفاده از این روش انجام مقایسات زوجی عوامل بر اساس جدول استاندارد این روش است (جدول ۱). با استفاده از



شکل ۱- موقعیت مکانی حوزه آبخیز فیروزکوه و پلی‌گون‌های فرسایش هزاردره
Fig 1. Location of Firozkoh watershed and badland erosion polygons



شکل ۲- نقشه‌های عوامل مؤثر بر فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه
Fig 2. Conditioning factors of badland erosion in the Firozkuh watershed

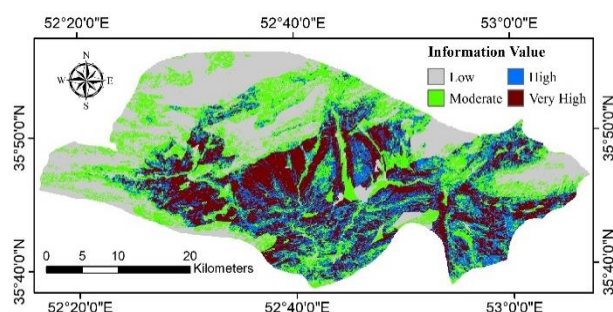


ادامه شکل ۲- نقشه‌های عوامل مؤثر بر فرسایش هزاردره در حوزه آبخیز فیروزکوه
Fig 2. Continued conditioning factors of badland erosion in the Firozkuh watershed

اساس میزان اهمیت و نقش در وقوع فرسایش شامل شیب (۲۶/۱ درصد)، زمین‌شناسی (۱۹/۹ درصد)، ارتفاع (۱۴/۵ درصد)، فاصله تا رودخانه (۱۱/۱ درصد)، بارندگی (۸/۲ درصد)، درصد رس (۶/۱ درصد)، pH خاک (۴/۵ درصد) و کاربری اراضی (۳/۴ درصد) TWI (۲/۶ درصد)، جهت شیب (۲ درصد) و انحناى سطح (۱/۶ درصد) است. به این ترتیب شیب و زمین‌شناسی بیشترین نقش را در وقوع فرسایش هزاردره دارند. جدول ۲ وزن‌های مربوط به مدل‌ها و اهمیت هر عامل را نشان می‌دهد.

نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره

همانطور که بیان شد ابتدا برای طبقات هر نقشه از عوامل مؤثر ارزش اطلاعات محاسبه شد. در نهایت با تلفیق نقشه‌های وزنی در محیط نرم‌افزار ArcGIS، نقشه وزنی نهایی به عنوان نقشه حساسیت‌پذیری به دست آمد. در روش دیگر وزن به‌دست آمده بر اساس ارزش اطلاعات برای هر طبقه نقشه در وزن آن عامل (به دست آمده با مدل AHP) ضرب و وزن نهایی طبقه محاسبه شد. در مرحله بعد با استفاده از روش شکستگی طبیعی، نقشه‌های تهیه شده به چهار طبقه مطابق شکل‌های ۳ و ۴ تقسیم شد [۱۵].



شکل ۳- نقشه حساسیت فرسایش هزاردره تهیه شده با مدل ارزش اطلاعات

Fig 3. Badland susceptibility provided using Information Value model

جدول ۱ مقادیر ترجیحات و قضاوت کارشناسی

Table 1. Preferences of AHP model

اهمیت	تعریف
Importance	Definition
9	کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر Extreme importance
7	اهمیت خیلی قوی Very strong importance
5	اهمیت یا مطلوبیت قوی Strong importance
3	کمی مطلوب‌تر یا کمی مهم‌تر Moderate importance
1	اهمیت یا مطلوبیت یکسان Equal importance
2, 4, 6 and 8	اولویت بین فواصل Intermediate value

ارزیابی نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش هزاردره

به‌منظور ارزیابی نقشه تهیه شده، در ابتدا حدود یک سوم از هزاردره‌ها جدا شده و در فرآیند تهیه نقشه حساسیت استفاده نمی‌شوند. برای ارزیابی دقت نقشه از این یک سوم (که در تهیه نقشه حساسیت به کار نرفته‌اند) استفاده می‌شود. برای ارزیابی دقت از منحنی تشخیص عملکرد نسبی^۱ (ROC) که یک نمایش ترسیمی از موازنه بین میزان خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌هاست استفاده شد [۱۷]. میزان سطح زیرمنحنی به‌صورت عالی (۰/۹-۱)، خیلی خوب (۰/۸-۰/۹)، خوب (۰/۷-۰/۸)، متوسط (۰/۶-۰/۷) و ضعیف (۰/۵-۰/۶) طبقه‌بندی می‌شود [۲۴].

نتایج

اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر فرسایش هزاردره

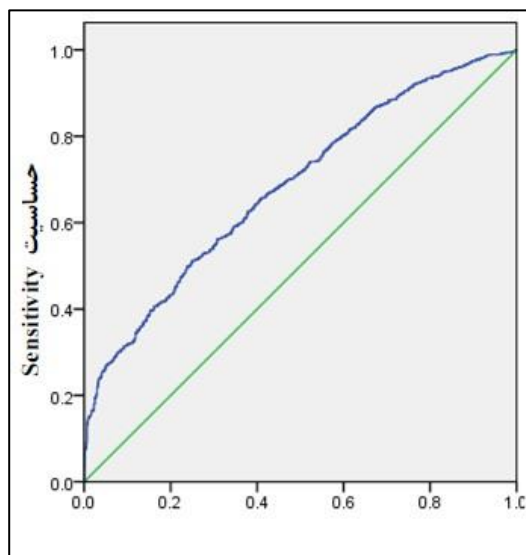
اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر فرسایش هزاردره و محاسبه وزن آن‌ها با استفاده از مدل AHP نشان داد که عوامل به ترتیب بر

1. Receiver Operating Characteristic

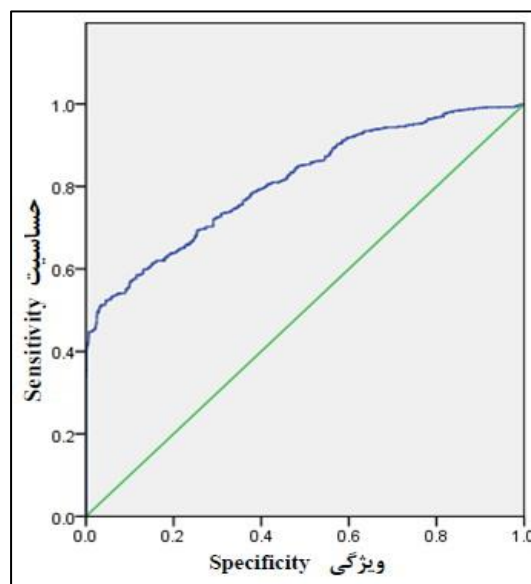
جدول ۲- وزن‌های به دست آمده با استفاده از مدل‌های AHP، ارزش اطلاعات و تلفیقی

Table2. Extracted weights using AHP, Information Value and synthetic models

وزن تلفیقی Synthetic weight	وزن ارزش اطلاعات IV weight	وزن AHP AHP weight	طبقات Classes	عامل مؤثر Factor	وزن تلفیقی Synthetic weight	وزن ارزش اطلاعات IV weight	وزن AHP AHP weight	طبقات Classes	عامل مؤثر Factor
-1.3649	-6.8586		Czl		0.0542	0.3740		1712-2286	
-1.5611	-7.8448		Db-sh		0.0055	0.0379	0.145	2286-2647	ارتفاع Elevation
0.0987	0.4962		Elm		-0.1860	-1.2831		2647-3059	
0.0816	0.4102		Ek		-0.0788	-0.5433		3059-3941	
-1.1092	-5.5738		Jd		-0.0655	-0.2508		0-80	
0.0002	0.0009		Jl		0.0372	0.1426	0.261	8-20	درجه شیب Slope
-1.4829	-7.4516		K		-0.0239	-0.0915		20-35	
0.0288	0.1445		Kbv		0.0691	0.2648		35-70	
-0.4409	-2.2158		Ktzt		0.0047	0.2330		مسطح Flat	
-0.5059	-2.5420		Ku		0.0043	0.2130		شمال North	
0.1707	0.8576	0.199	Murm	زمین‌شناسی Geology	-0.0014	-0.0688		شمال شرقی Northeast	
0.1952	0.9809		PeEz		-0.0077	-0.3860		شرق East	
0.0056	0.0283		Pgkc		-0.0102	-0.5084	0.020	جنوب شرقی Southeast	جهت شیب Aspect
-1.5449	-7.7634		Pr		-0.0048	-0.2411		جنوب South	
-0.1114	-0.5597		Qft1		-0.0002	-0.0121		جنوب غربی Southwest	
-0.0947	-0.4757		Qft2		0.0060	0.3009		غرب West	
-1.6727	-8.4057		TRe		0.0061	0.3051		شمال غربی Northwest	
-0.1980	-0.9952		TRjs		0.0008	0.0313		2-6	
-0.0079	-0.0709		0-500		0.0014	0.0523	0.026	6-11	TWI
0.0406	0.3657		500-1150	فاصله از	-0.0156	-0.6002		11-25	
-0.0287	-0.2583	0.111	1150-1850	رودخانه	0.0007	0.0435		-0.01 >	
-0.0318	-0.2862		1850-2700	Distance to	-0.0082	-0.5130	0.016	-0.01-0.1	انحنای سطح Plan Curvature
-0.0111	-0.0997		2700-3800	river	0.0002	0.0118		0.1 <	
-0.3090	-2.7839		3800-6600		0.0038	0.0466		150-400	
-0.0231	-0.3782		14-22		0.0232	0.2828	0.082	400-550	بارش Precipitation
0.0037	0.0615		22-25	درصد رس Clay%	-0.0312	-0.3810		550-650	
0.0183	0.2992		25-33		-0.0566	-0.6908		650-800	
-0.0202	-0.5041		6-6.8		-0.0764	-2.2461		کشاورزی Agriculture	
-0.0358	-0.8947		7,3-6,8		-0.0016	-0.0460		زمین بایر Bare land	
-0.0289	-0.7217	0.04	7.3-7.6	pH خاک Soil pH	0.0036	0.1051	0.034	مرتع Rangeland	کاربری اراضی Landuse
0.0187	0.4684		7.6-8.1		-0.2149	-6.3206		مسکونی Urban	

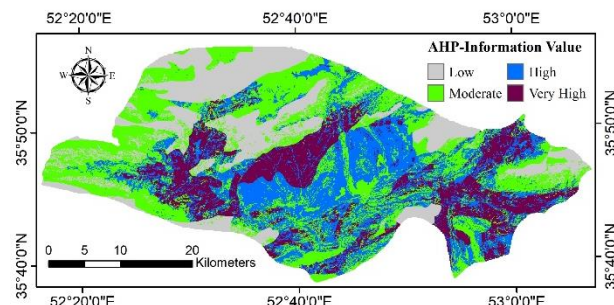


شکل ۵- منحنی تشخیص عملکرد نسبی برای مدل ارزش اطلاعات
Fig 5. ROC curve of Information Value model



شکل ۶- منحنی تشخیص عملکرد نسبی برای مدل تلفیقی
Fig 6. ROC curve of synthetic model

بررسی وزن مربوط به هر یک از طبقات عوامل مؤثر با استفاده از مدل ارزش اطلاعات نشان داد بیشترین وزن نسبت فراوانی مربوط به شیب بیشتر از ۳۵ درجه، ارتفاع ۱۷۱۲ تا ۲۲۸۶ متر، جهت‌های غرب و شمال غرب، رس بیشتر از ۲۵، شاخص رطوبت توپوگرافی ۶ تا ۱۱، کاربری اراضی مرتع، انحناء سطح کمتر از ۰/۰۱-، فاصله کمتر از ۱۱۵۰ متر تا رودخانه، سازندهای مارنی و آهکی، pH بیشتر از ۷/۶ و بارش کمتر از ۵۵۰ میلی‌متر بوده است.



شکل ۴- نقشه حساسیت فرسایش هزاردره تهیه شده با مدل تلفیقی
Fig 4. Badland susceptibility provided using synthetic model

برای بررسی وضعیت کمی حساسیت منطقه به فرسایش هزاردره مساحت هر یک از طبقات خطر در نقشه‌های تهیه شده ارائه شد (جدول ۳). درصد مساحت طبقات در این مدل نشان می‌دهد که حدود ۴۴ درصد از منطقه (حدود ۶۴۰ کیلومترمربع) دارای حساسیت زیاد و خیلی زیاد است.

جدول ۳ مساحت طبقات حساسیت‌پذیری
Table 3. Area of the susceptibility classes

مساحت (کیلومترمربع) Area (km ²)		طبقه حساسیت susceptibility class
مدل تلفیقی Synthetic model	مدل ارزش اطلاعات Information value model	
270	323	خیلی زیاد Very High
378	280	زیاد High
494	404	متوسط Moderate
300	435	کم Low

ارزیابی دقت نقشه حساسیت فرسایش هزاردره
منحنی ROC برای ارزیابی دقت ترسیم و سطح زیر آن محاسبه شد. میزان سطح زیر منحنی برای مدل ارزش اطلاعات و مدل تلفیقی به ترتیب ۰/۶۸۴ و ۰/۸۱۱ به دست آمد (شکل‌های ۵ و ۶). میزان سطح زیر منحنی به صورت عالی (۰/۹-۱)، خیلی خوب (۰/۸-۰/۹)، خوب (۰/۷-۰/۸)، متوسط (۰/۶-۰/۷) و ضعیف (۰/۵-۰/۶) طبقه‌بندی می‌شود [۲۴]. بر اساس این استاندارد، مدل ارزش اطلاعات و مدل تلفیقی به ترتیب در طبقات دقت متوسط و خیلی خوب قرار می‌گیرند.

فرسایش خاک به‌عنوان یکی از مهمترین مخاطرات طبیعی در تمام جهان و از جمله ایران مطرح است. به دلیل اینکه بخش‌های زیادی از ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است شرایط وقوع فرسایش بسیار مساعد است. از جمله مخرب‌ترین انواع فرسایش که در حوزه آبخیز فیروزکوه نیز مشاهده می‌شود فرسایش هزاردره است. به همین دلیل حوزه آبخیز فیروزکوه به عنوان منطقه مورد مطالعه برای بررسی این پدیده انتخاب شد.

همان‌طور که بیان شد در این پژوهش از مدل AHP برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر فرسایش هزاردره استفاده شد. با توجه به اینکه اعمال وزن‌های به دست آمده در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری دقت را افزایش داد، می‌توان به وزن‌های به دست آمده و اولویت‌بندی انجام شده نیز اعتماد کرد. نتایج نشان داد شیب، زمین‌شناسی و ارتفاع مهم‌ترین عوامل مؤثر در منطقه هستند. در بین طبقات شیب، شیب بالای ۳۵ درجه بیشترین وزن ارزش اطلاعات را به خود اختصاص داد. در شیب بیشتر پایداری مواد کمتر بوده و رواناب نیز با سرعت بیشتر شکل گرفته و حرکت می‌کند و به همین دلیل حساسیت نسبت به وقوع فرسایش بیشتر است. البته در صورتیکه در شیب‌های زیاد پوشش گیاهی بیشتر باشد ممکن است فرسایش را کنترل کند ولی به دلیل نوع سازندهای زمین‌شناسی منطقه، پوشش گیاهی نیز زیاد غنی نیست. در واقع شیب، تراکم زهکشی، رواناب سطحی و برداشت ذرات رسوبی را کنترل می‌کند [۹]. محققین دیگری نیز به نقش شیب در وقوع فرسایش اشاره کرده‌اند. کلارک و رندل [۸] در بخشی از ایتالیا فرسایش سالانه را مورد بررسی قرار داده و ارتباط مستقیم بین میزان فرسایش و درجه شیب را نشان دادند. محمدی و داودی راد [۱۳] نیز شیب را به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز شازند معرفی کردند.

زمین‌شناسی دومین عامل مؤثر بر وقوع فرسایش هزاردره است. در بین سازندهای زمین‌شناسی سازندهای مارنی و آهکی بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. معمولاً ذرات ریز مانند رس، مارن و شیل زمانی که تحت تأثیر دوره‌های متناوب خشک و مرطوب قرار گیرند منجر به فرسایش خواهند شد [۶]. ازاره و همکاران [۱] نیز در پژوهش خود زمین‌شناسی را به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر فرسایش در بخشی از استان ایلام معرفی کردند.

عوامل توپوگرافی از جمله ارتفاع بر فرایندهای هیدرولوژیکی و رطوبت خاک مؤثر بوده و از این طریق در وقوع فرسایش نقش دارند. میزان بارش، نوع بارش، درجه حرارت و نوع کاربری اراضی مستقیم تحت تأثیر تغییرات ارتفاع بوده و ارتفاع به این صورت بر فرایندهای هیدرولوژیکی و در نتیجه بر وقوع فرسایش مؤثر است [۱۶]. در بین طبقات ارتفاع طبقه ۱۷۱۲ تا ۲۲۸۶ متر بیشترین حساسیت را نسبت به فرسایش هزاردره نشان داده است. در ارتفاعات بالا بارش معمولاً به صورت برف بوده رواناب سطحی کمتری ایجاد می‌کند. در بین جهت‌های جغرافیایی نیز جهت‌های غرب و شمال غرب فرسایش

بیشتری داشته است. به طور کلی جهت شیب به دلیل نقشی که در دریافت تابش خورشیدی، بارش و در نتیجه رطوبت دارد بر وقوع فرسایش مؤثر است [۲۲]. جهت‌های شمالی و غربی بارش بیشتر و تابش خورشیدی کمتری دریافت کرده و به دلیل رطوبت بیشتر انحلال و فرسایش بیشتر خواهد بود.

در بین طبقات رس، طبقه با رس بالای ۲۵ درصد بیشترین وزن را به دست آورده است. رس‌های منطقه دارای املاح فراوان بوده که موجب حساسیت بالای آن‌ها نسبت به فرسایش می‌شود. در نتیجه وجود درصد بالای رس در سازندها انحلال و به تبع آن فرسایش را افزایش می‌دهد. ازاره و همکاران [۱] وجود رس در خاک را از عوامل مهم فرسایش در مناطق نیمه خشک ایران معرفی کردند.

در بین کاربری‌های مختلف نیز مرتع بیشترین میزان حساسیت به فرسایش را داشته است. زمین‌های بایر در منطقه معمولاً به صورت رخساره‌های سنگی بوده و با توجه به پوشش کم خاک طبیعی است میزان فرسایش کم باشد. در زمین‌های کشاورزی نیز به دلیل شخم سالانه شیارهای کوچک از بین رفته و اجازه توسعه و تبدیل آن‌ها به فرسایش هزاردره داده نمی‌شود. مراتع در شیب‌های بیشتر (بالای ۱۰ درجه) واقع شده و به دلیل پوشش گیاهی ضعیف بسیار مستعد وقوع فرسایش هستند.

از دیگر عوامل مؤثر بر فرسایش منطقه شبکه زهکشی بوده که طبقه فاصله کمتر از ۱۱۵۰ متر تا رودخانه بیشترین هزاردره‌ها را داشته است. این موضوع بیانگر ارتباط معکوس فاصله از رودخانه و میزان فرسایش است. شبکه زهکشی باعث تمرکز و جمع‌آوری بیشتر رواناب سطحی شده و فرسایش را افزایش می‌دهد [۱۶]. تین بای و همکاران [۲۱] نیز در بخشی از استان کردستان فرسایش را بررسی کرده و شبکه آبراهه را به عنوان یک عامل مهم در وقوع فرسایش معرفی کردند.

برای ارزیابی دقت مدل‌ها از سطح زیر منحنی ROC استفاده شد. میزان سطح زیر منحنی نشان داد مدل ارزش اطلاعات در طبقه متوسط و مدل تلفیقی در طبقه خیلی خوب قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در هر دو مدل برای محاسبه وزن اولیه طبقات از روش ارزش اطلاعات استفاده می‌شود می‌توان گفت وزن به دست آمده از اولویت‌بندی عوامل با مدل AHP دقت را افزایش داده است. افزایش دقت نقشه حساسیت بیانگر مناسب بودن مدل AHP در اولویت‌بندی و همچنین قابل اعتماد بودن نتایج آن است. تحقیقات دیگری نیز با استفاده از مدل‌های تلفیقی مبتنی بر AHP انجام شده است. به عنوان مثال محمدی و نور [۱۴] از مدل تلفیقی AHP و تراکم سطح برای تحلیل خطر زمین‌لغزش در بخشی از جاده هراز استفاده نمودند. نتایج نشان داد استفاده از مدل تلفیقی دقت نقشه تهیه شده را افزایش داده است. محمدی [۱۱] برای بهینه‌سازی تغییرات کاربری در شهرستان رامیان استان گلستان از مدل تلفیقی AHP-CLUE استفاده نموده و کارایی آن را تأیید کردند.

به طور کلی حوزه آبخیز فیروزکوه حساسیت بالایی به وقوع

susceptibility in a head catchment of the jemma basin. Ethiopian Highlands. Geosciences. 10(7): 248.

6. Cerda, A. 2002. The effect of season and parent material on water erosion on highly eroded soils in eastern Spain. Journal of Arid Environments. 52(3):319–337.

7. Chen, J. Yang, Z.F. and Liu, H.Q. 2005. Landslide susceptibility zoning and its probabilistic forecast. Chin J Rock Mech Eng. 24(13):2392–2396.

8. Clarke, M.L. and Rendell, H.M. 2006. Process-form relationships in Southern Italian badlands: Erosion rates and implications for landform evolution. Earth Surface Processes and Landforms, 31: 15–29.

9. Hembram, K. Paul, G.C. and Saha, S. 2018. Spatial prediction of susceptibility to gully erosion in Jainti River basin, Eastern India: A comparison of information value and logistic regression models. Modeling Earth Systems and Environment 5:689–708.

10. Hembram, T. Paul, G.C. and Saha, S. 2020. Modelling of gully erosion risk using new ensemble of conditional probability and index of entropy in Jainti River basin of Chotanagpur Plateau Fringe Area. India. Applied Geomatics 12:337–360.

11. Mohammady, M. 2021. Land use change optimization using a new ensemble model in Ramian County, Iran. Environmental Earth Sciences. 80:780.

12. Mohammady, M. 2023. Badland erosion susceptibility mapping using machine learning data mining techniques, Firozkuh watershed, Iran. Natural Hazards. 117:703–721

13. Mohammady, M. and Davudirad, A. 2024. Gully Erosion Susceptibility Assessment Using Different Machine Learning Algorithms: A Case Study of Shazand Watershed in Iran. Environmental Modeling & Assessment. 29:249–261.

14. Mohammady, M. and Noor, H. 2020. Landslide Susceptibility Zoning Using New Synthetic Method in the GIS Environment. Journal of Environmental Science and Technology, [online]. 21(12): 1-12. (In Persian)

15. Mohammady, M. Pourghasemi, H.R. and Amiri, M. 2019. Assessment of land subsidence susceptibility in Semnan plain (Iran): a comparison of support vector machine and weights of evidence data mining algorithms. Natural Hazards. 99: 951- 971.

16. Mohammady, M. Pourghasemi, H.R. and Yousefi, S. 2022. Badland erosion mapping and effective factors on its occurrence using random forest model. Computers in Earth and Environmental Sciences, Chapter. 42: 577–583.

17. Nefeslioglu, H.A. Duman, T.Y. and Durmaz, S. 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley

فرسایش و به‌ویژه فرسایش هزاردره دارد. ۴۴ درصد منطقه و مساحتی در حدود ۶۴۰ کیلومتر مربع در طبقات خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته که این موضوع به خوبی حساسیت منطقه و البته لزوم توجه به آن را نشان می‌دهد. فرسایش هزاردره یکی از مهم‌ترین منابع تولید رسوب در منطقه بوده و برنامه‌ریزان باید در تصمیم‌گیری‌های خود به این موضوع توجه کنند. بدون شک شناسایی عوامل مؤثر و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری منطقه به فرسایش هزاردره گام مهمی در مدیریت و کنترل این پدیده خواهد بود.

سپاسگزاری

مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی بوده و این طرح تحقیقاتی با استفاده از اعتبار ویژه پژوهشی (پژوهانه) دانشگاه سمنان با شماره طرح ۱۴۰۲۴ ط/۲۲۶/۱۴۰۳ انجام شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

مجید محمدی: نمونه‌برداری، تحلیل‌های نرم‌افزاری، نگارش نسخه اولیه مقاله

مجتبی امیری: تحلیل‌های آماری، کنترل نتایج، ویرایش مقاله

منابع

1. Azareh, A. Rahmati, O. Rafiei-Sardooi, E. Sankey, J.B. 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.
2. Ayalew, L. Yamagishi, H. Marui, H. Kanno, and T. 2005. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. Engineering Geology 81: 432–۳
3. Bosino, A. Omran, A. and Märker, M. 2019. Identification, characterisation and analysis of the Oltrepo Pavese calanchi in the Northern Apennines (Italy). Geomorphology. 340:53– 66.
4. BouKheir, R. Wilson, J. and Deng, Y. 2007. Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group. 32(12): 1770-1782.
5. Cama, M. Schillaci, C. Kropacek, J. Hochschild, V. Bosino, A. and Marker, M. 2020. A probabilistic assessment of soil erosion

22. Wang, D. Fan, H. and Fan, X. 2017. Distributions of recent gullies on hillslopes with different slopes and aspects in the black soil region of northeast China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189:508.
23. Yalcin, A. 2008 GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena* 72:1–12
24. Yesilnacar, E.K. 2005. The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey, PhD Thesis. Department of Geomatics the University of Melbourne, p 423
25. Yin, K.L. 2004. Landslide hazard prediction and evaluation. China University of Geosciences Press, Wuhan. 8-9.
- (Easten Black Sea Region of Turkey). *Geomorphology*. 94: 401-418.
18. Ogbonna, J.U, Alozie, M. Nkemdirim, V. and Eze, M .2011. GIS analysis for mapping gully erosion impacts on the geo- formation of the Old Imo State, Nigeria. *ABSU Journal of Environment, Science and Technology*. 1, 48-61.
19. Sepuru, T.K. and Dube, T. 2018. An appraisal on the progress of remote sensing applications in soil erosion mapping and monitoring. *Remote Sensing Applications Society and Environment* 9: 1–9.
20. Sinha, D. and Joshi, V.U. 2012. Application of universal soil loss equation (USLE) to recently reclaimed badlands along the Adula and Mahalungi Rivers, Pravara Basin. *Maharashtra Journal of the Geological Society of India*, 80, 341-350.
21. Tien Bui, D. Shirzadi, A. Shabani, H. Chapi, K. Omidvar, E. Pham, B.T. Talebpour Asl, D. Khaledian, H. Pradhan, B. Panahi, M. Ahmad, B.B. Rahmani, H. Crof, G. and Lee, S. 2019. A novel ensemble artificial intelligence approach for gully erosion mapping in a semi-arid watershed (Iran). *Sensors* 19(11): 2444.

Prioritizing Effective Factors and Badland Erosion Susceptibility Assessment Using Synthetic Model of Information Value and AHP

Majid Mohammady^{*1} and Mojtaba Amiri²

Received: 26-02-2024 Accepted: 06-07-2024

Extended Abstract

Introduction

Soil is an important component of geological, hydrological, biological, and environmental processes, and as such, it is always subject to change and transformation. Increasing demand for goods, services, and basic needs, especially in underdeveloped and developing countries, a huge stress has exerted on the top layers of soil. On a global scale, soil erosion and degradation is one of the most important natural phenomenon altering the relief of the landscape. Erosion is often capable of causing several on-site and off-site impacts. Soil degradation and erosion reduce the quality and quantity the soil and are important natural and anthropogenic processes that affect many countries. One of the most important kind of erosion is badland erosion. The term of badlands currently refers to areas of unconsolidated sediment with little or no vegetation, which are useless for agriculture because of their intensely dissected landscape. Badlands develop due to a complex interaction of conditioning factors, such as climatic, hydrologic, geologic and soil properties, topographic characteristics, and land use/land cover. Because soil erosion is a complicated process that is influenced by the properties of the land surface and the soil as well as by environmental factors, quantitatively accurate forecasts of soil erosion and susceptibility mapping are challenging. The main goal of this research is badland erosion susceptibility mapping in Firozkuh watershed using synthetic model of Information Value-AHP. Firozkuh watershed was selected as study area because in this watershed, badlands are the most important contributors to soil erosion because of the condition of climatic, hydrologic, topographic, and reduced vegetation conditions, and as well as presence of susceptible soil and geology formations in this region.

Materials and Methods

At first, distribution map of badland erosion in Firozkuh watershed was prepared using satellite images and field survey. Digital Elevation Model (DEM) map was prepared using the elevation points and lines in the topographic maps prepared by the National Cartography Center of Iran. Slope aspect, slope degree, plan curvature, TWI and elevation classes maps was created using DEM map in ArcGIS10.3 and SAGA-GIS environment. The land use of Firozkuh watershed was created from LANDSAT 8 images of year 2020 using a synthetic method. To map soil characteristics, 30 samples were taken and analyzed in the laboratory. The geology map of the watershed was extracted from the geologic map of Iran with the scale of 1:100000. The distance from river was created in ArcGIS10.3 environment. Average annual rainfall map was developed using rainfall data from meteorological

1. Corresponding author and Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Nature Resources, Semnan University, Iran Email: majid.mohammady@semnan.ac.ir

2. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Nature Resources, Semnan University, Iran

stations. The weight of the conditioning factor classes were calculated using the information value model. AHP model was also used to prioritize conditioning factor. The weight obtained from both models was multiplied together and the final weight was calculated using synthetic model. By combining the weights, the final badland erosion susceptibility map was prepared. In the last step, ROC curve and area under the curve was used for accuracy assessment of the models.

Results and Discussion

To prioritize the conditioning factors of badland susceptibility in Firozkuh watershed, AHP model was used. The results indicated that slope degree, geology, elevation, and distance from rivers have the greatest impact on badland occurrence in the Firozkuh watershed. The weight of the conditioning factor classes were calculated using the information value model. Results showed that the highest weight of the information value is related to the slope more than 35, marl, limestone and shale formations, elevation class of 1712 to 2286 meters, northwest aspect, clay 25 to 33%, rangelands, and distance less than 1150 meters from drainage network.

Two information value models and synthetic model were used to prepare the badland susceptibility map. Accuracy assessment of the models was done using ROC and area under this curve. The area under the curve for the information value and synthetic model was 0.684 and 0.811, respectively. This results show that Information Value was moderate, and synthetic model was very good for badland erosion susceptibility mapping. To check the overall susceptibility of the watershed, the area of very high, high, moderate and low classes was calculated. The land area of the very high and high classes is 44% (about 640 square kilometers) of the Firozkuh watershed for the synthetic model.

Conclusion

In this research, the Information Vale and synthetic models were used for prioritizing the condition factors of badland occurrence and badland susceptibility mapping in the Firozkuh watershed. Eleven conditioning factors including elevation, slope angle, slope aspect, TWI, Plan Curvature, Precipitation, Land-use, geology, distance to river, clay percent, and soil pH were selected and input as spatial layers in a GIS environment. AHP method was used to investigate importance of conditioning factors and their prioritization. The results of conditioning factors importance explained that slope degree and geology have the greatest impact on badland erosion in the Firozkuh watershed. Also, Information Value and synthetic models showed acceptable efficiency to map badland susceptibility in the study area. Results of this research showed that about 44% of the study area has high to very high susceptibility to the badland erosion, so control and management of this phenomenon is essential in Firozkuh watershed. Badland erosion is one of the most important sources of sediment production in the study area and planners should pay attention to this issue in their decisions. Badland susceptibility map is a very important tool that can be used to improve managing future badland erosion in the Firozkuh watershed and other areas affected by badland erosion.

Keywords: *Badland erosion, Susceptibility map, Information Value model, Synthetic model, ROC curve*

Acknowledgement

This research is funded by Semnan University, research grant No 14024



Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article

Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Majid Mohammady: Sampling, performing software analysis, writing the first version of the article

Mojtaba Amiri: Statistical analyses, controlling the results, revising the article