

کاربرد الگوریتم‌های داده‌کاوی در تحلیل حساسیت و پهنه‌بندی مناطق مستعد به فرسایش آبکندی در حوضه‌های شاخص استان خراسان رضوی

مریم اکبری: کارشناس ارشد آبخیزداری، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربت حیدریه

مهدی بشیری*: استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربت حیدریه

عبدالصالح رنگ‌آور: استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۲۹)

چکیده

فرسایش آبکندی یکی از مهمترین صورتهای فرسایش آبی در مناطق مختلف جهان است و علاوه بر تخریب اراضی به تشدید سیلاب و جابه‌جایی حجم قابل توجهی از خاک منجر می‌شود. این نوع فرسایش که در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان بیشتر مشهود است، در اثر بهره‌برداری نامناسب از منابع خاک، آب و پوشش گیاهی ایجاد می‌شود. پژوهش حاضر با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی و پهنه‌بندی آن در پنج حوضه‌ی شکرکلات، قره‌تیکان، کماج‌خور در گز، کلوت‌های سبزوار و موشک‌کاشمر در استان خراسان رضوی انجام شد. در این پنج حوضه، ۱۵ آبکند معرف انتخاب و متعاقب آن، نقشه‌ی پراکنش آبکندهای حوضه‌ها تهیه شد. سپس هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی در مناطق مورد مطالعه، در ۱۷ لایه‌ی اطلاعاتی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، آب و هوا، کاربری اراضی، قابلیت اراضی، سنگ‌شناسی، پهنه‌های سیلابی، تبخیر، بارش، دما، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص انتقال رسوب و شاخص قدرت جریان در محیط نرم افزار ArcGIS 10.3 تهیه و رقومی شد. با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی در نرم‌افزار R، عوامل مؤثر بر تولید آبکند معرفی شدند. در نهایت، پهنه‌بندی خطر فرسایش آبکندی در GIS با استفاده از مدل‌های آماری دومتغیره انجام شد. نتایج حاصل از الگوریتم‌های داده‌کاوی نشان داد که متغیرهای فاصله از جاده، سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، شاخص قدرت جریان، شاخص انتقال رسوب و شاخص رطوبت توپوگرافی مهم‌ترین عوامل در وقوع فرسایش آبکندی هستند. با توجه به نقشه‌ی پهنه‌بندی به دست آمده و نیز وزن کلاس‌های هر یک از پارامترها، شیب صفر تا پنج درجه، جهات شمال شرقی و جنوب شرقی، فاصله‌ی بیش از ۲۰۰۰ متر از جاده، کلاس ماسه‌سنگ گلوکونیتی در لایه‌ی سنگ‌شناسی و طبقات با مقادیر بالای شاخص‌های ثانویه‌ی توپوگرافی، بیشترین وزن و تأثیر را در وقوع فرسایش آبکندی در منطقه‌ی مورد مطالعه دارند. نتایج ارزیابی نقشه‌ی پهنه‌بندی با روش‌های ارزش اطلاعات و تراکم سطح بر اساس مقادیر وزنی کمی‌شده نشان داد که در روش ارزش اطلاعات، ۹۸/۰۸ درصد و ۱/۹۲ درصد آبکندها به ترتیب در پهنه‌های با خطر متوسط و بالا و در روش تراکم سطح، ۱۰۰ درصد آبکندها در پهنه‌ی با خطر خیلی کم واقع شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که مناطق مستعد به فرسایش آبکندی، با دقت بالایی شناسایی نشده‌اند؛ اما روش ارزش اطلاعات نسبت به روش تراکم سطح مطلوبیت بهتری دارد.

واژگان کلیدی: ارزش اطلاعات، پهنه‌بندی خطر، تراکم سطح، داده‌کاوی، فرسایش آبی.

* نویسنده مسئول: m.bashiri@torbath.ac.ir

۱- مقدمه

شناخت فرآیندهای مؤثر در فرسایش یکی از راهکارهای مهم مدیریت منابع آب و خاک محسوب می‌شود. در مناطقی که برای جلوگیری از فرسایش یا کنترل آن اقدامی صورت نمی‌گیرد، خاک‌ها به تدریج فرسایش می‌یابد و نه تنها حاصلخیزی خود را از دست می‌دهد، بلکه به ایجاد فقر در منطقه نیز منجر می‌شود و از این رهگذر خسارات جبران‌ناپذیری بر پیکر جامعه وارد می‌سازد. حتی با ترسیب مواد در آبراهه‌ها، مخازن سدها، بنادر و کاهش ظرفیت آنها نیز به زیان‌های بسیاری می‌انجامد. یکی از انواع فرسایش آبی که به تخریب اراضی و برهم خوردن تعادل در پهنه‌های منابع طبیعی و اراضی کشاورزی منجر می‌شود و خسارات سنگینی به بار می‌آورد، پدیده‌ی فرسایش آب‌بندی است. فرسایش آب‌بندی یکی از مهم‌ترین منابع رسوب‌دهی حوزه‌های آبخیز است و از پدیده‌های معمول در آب‌وهوای نیمه‌خشک به شمار می‌رود که در اثر بهره‌برداری نامناسب و بیش از توان طبیعی از منابع خاک، آب و پوشش گیاهی ایجاد می‌شود (Ezochi, 2000) و مناطق وسیع با شرایط مورفولوژیکی، خاک‌شناسی و آب و هوایی متفاوت را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Saghafi and Ismaili, 2009).

در زمینه‌ی بکارگیری روش‌های مختلف داده‌کاوی^۱ در انتخاب متغیرهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش مطالعاتی انجام شده‌است، اما این روش برای تعیین متغیرهای مؤثر در وقوع آب‌بندی‌ها چندان استفاده‌ای ندارد و بیشتر پژوهش‌ها برپایه‌ی سایر روش‌های آماری است. داده‌کاوی، استخراج دانش در پایگاه داده‌ها^۲ نامیده می‌شود و روشی برای کشف اطلاعات سودمند جدید و بالقوه از بین حجم انبوهی از اطلاعات است. مفهوم داده‌کاوی، شامل الگوریتم‌ها و روش‌هایی است که به استخراج اطلاعات از داده‌ها منجر می‌شود. پیدا کردن الگوهای مفید در داده‌ها با نام‌های مختلف (از جمله داده‌کاوی)، در جوامع مختلف (به عنوان نمونه، استخراج دانش، کشف اطلاعات، برداشت اطلاعات، باستان‌شناسی داده‌ها و پردازش الگوی داده‌ها) شناخته شده‌است (Fayyad et al, 1996). برخی از مهم‌ترین الگوریتم‌های داده‌کاوی شامل درخت تصمیم^۳، جنگل تصادفی^۴، تجمیعی بوستینگ^۵، ماشین بردار پشتیبان^۶، رگرسیون لجستیک^۷ و شبکه‌ی عصبی^۸ است.

الگوریتم درخت تصمیم: درخت تصمیم یک روش داده‌کاوی است که غالباً برای رده‌بندی و پیش‌بینی به کار می‌رود و نتایج آن در یک فلوچارت^۹، شبیه ساختار درخت ارائه می‌شود. یکی از مزایای درخت تصمیم در رده‌بندی داده‌ها نسبت به سایر روش‌های رده‌بندی مانند شبکه عصبی، سادگی تفسیر و فهم تصمیم‌گیرندگان برای مقایسه‌ی نتایج با دانش حوضه‌ی خودشان و تعیین اعتبار و تعدیل تصمیماتشان است.

الگوریتم جنگل تصادفی: الگوریتم جنگل تصادفی، روش یادگیری مبتنی بر دسته‌ای از درخت‌های تصمیم است (Breiman, 2001). در روش جنگل تصادفی به جای رشد یک درخت، صدها یا هزاران درخت طبقه‌بندی تولید می‌شود.

¹ Data Mining

² Knowledge Discovery in Database (KDD)

³ Decision tree

⁴ Random Forest

⁵ Boosting

⁶ Support Vector Machine

⁷ Logistic Regression

⁸ Neural Network

⁹ Flowchart

الگوریتم تجمیعی بوستینگ: این روش از الگوریتمی تکرارشونده استفاده می‌کند تا به‌طور تطبیقی، توزیع نمونه‌های آموزشی را تغییر دهد و در فرآیند یادگیری، روی مشاهداتی تمرکز می‌کند که در مراحل قبلی به اشتباه رده‌بندی شده‌اند (Saniee abadeh et al, 2012).

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان: ماشین بردار پشتیبان، روش جدیدی برای دسته‌بندی داده‌های خطی و غیرخطی است. این روش می‌تواند با یک نگاشت غیرخطی مناسب به یک بعد بالاتر، داده‌های دو کلاس را به وسیله‌ی یک ابرصفحه از هم جدا کند.

الگوریتم رگرسیون منطقی یا لجستیک: این مدل که مدل تحلیلی چندمتغیره از گروه مدل‌های آماری خطی تعمیم‌یافته است، برای تحلیل حضور یا فقدان حضور یک ویژگی یا خروجی بر مبنای ارزش‌های مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل مفید است (Lee and Pradhan, 2007).

الگوریتم شبکه عصبی: این شبکه، تقلید بسیار ساده‌ای از مغز انسان براساس یک پیکربندی ریاضی است که می‌تواند به پردازش داده‌های تجربی و کشف قوانین یا دانش نهفته در پشت داده‌ها پردازد؛ به گونه‌ای که از چند لایه و هر لایه از چند گره (نرون) تشکیل شده است (Menhaj, 1998).

پژوهش‌های مختلفی در سطح ایران و جهان در راستای پژوهش حاضر صورت گرفته است؛ به عنوان نمونه Ghorbani nejad و همکاران (2017) در مدل‌سازی پتانسیل رخداد فرسایش‌های آبکندی در منطقه‌ی سیمره، با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و شاخص آماری بدین نتیجه رسیدند که دو مدل مذکور در شناسایی مناطق حساس به فرسایش آبکندی قابلیت بالایی دارند. همچنین براساس نتایج مدل آنتروپی شانون^۱، عوامل سنگ‌شناسی، ارتفاع و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در وقوع فرسایش‌های آبکندی داشتند. Entezari و همکاران (2013) نیز پهنه‌بندی فرسایش آبکندی را در حوزه‌ی آبخیز دیره با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی^۲ بررسی کردند. پس از انتخاب مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی شامل شیب، جهت شیب، انحنای افقی و عمودی شیب، لیتولوژی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و کاربری اراضی، این لایه‌ها در سیستم اطلاعات جغرافیایی تولید شدند. باتوجه به ضرایب حاصل شده، نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر در شش طبقه‌ی بدون خطر، خطر بسیار کم، خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد و خطر خیلی زیاد به دست آمد. باتوجه به نتایج، ۳۶ درصد از حوضه‌ی دیره در پهنه‌ی با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرد که به جابه‌جایی حجم زیادی از خاک منجر می‌شود. Yamani و همکاران (2013) در بررسی عوامل مؤثر بر شکل‌گیری و توسعه‌ی فرسایش آبکندی با فرایند تحلیل سلسله مراتبی در حوضه‌ی دشت کهور در استان فارس، عامل سنگ‌شناسی را در درجه‌ی اول و عامل کاربری اراضی را در درجه‌ی دوم اهمیت در ایجاد آبکندهای منطقه معرفی کردند. بررسی میزان صحت نقشه‌ی پهنه‌بندی با نقشه‌ی محدوده‌ی آبکندهای منطقه، نشان داد که ۱۰۰ درصد مناطق مورد بررسی با شرایط آبکندی، در پهنه‌های با ریسک‌پذیری زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. Farajzadeh و همکاران (2012) در ارزیابی میزان حساسیت به فرسایش آبکندی با استفاده از مدل رگرسیون چندمتغیره در جنوب شرق استان مازندران (کیاسر)، بیشترین سهم از نظر حساسیت به آبکندی شدن را به فاکتورهای سنگ‌شناسی، خاک، شاخص رطوبت توپوگرافی و کاربری زمین نسبت دادند و براساس طبقه‌بندی در راستای میزان حساسیت به فرسایش

¹ Shannon entropy

² Analytic Hierarchy Process

آبکندی، بیشترین مساحت به طبقه‌ی فرسایش کم و کمترین سهم، به طبقه‌ی فرسایش خیلی زیاد اختصاص یافت. Maqsoodi و همکاران (2012) در پهنه‌بندی حساسیت اراضی به فرسایش آبکندی با استفاده از شاخص هم‌پوشانی در حوضه‌ی زواریان استان قم، فاکتورهای سنگ‌شناسی، شیب، منابع و قابلیت اراضی، جهت شیب و کاربری اراضی را عوامل اصلی مؤثر در وقوع این فرسایش معرفی کردند. نتایج نشان داد که واحد سنگ‌شناسی Q2 (تراس‌های جوان و مخروط افکنه‌های درشت‌دانه- دوره‌ی کواترنری)، ۹۴/۴۱ درصد و تیپ اراضی دشتی و تپه‌ماهوری، ۹۹/۹۶ درصد از مناطق تحت‌تأثیر فرسایش آبکندی را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین طبقه‌ی شیب صفر تا ۱۰ درصد، جهت شیب شمال، مشرق و جنوب شرقی با کاربری مرتع متوسط و زمین‌های کشاورزی، دارای بیشترین گسترش مناطق تحت تأثیر فرسایش آبکندی در حوزه‌ی آبخیز مورد مطالعه بود. Shit و همکاران (2015)، مدل‌سازی خطر فرسایش آبکندی را با استفاده از روش زمین‌مکانی در بلوک گاربتا^۱ در غرب بنگال هند بررسی کردند. نتایج نشان داد که فاکتور کاربری اراضی، شیب، شاخص توپوگرافی، شاخص طول شیب، قطعات سنگریزه، تخته‌سنگ، ماسه و رسوبات قدیمی، نقش مهمی را در فرآیند فرسایش آبکندی برعهده دارند. اعتبار سنجی مدل نیز نشان داد که نقشه‌ی مناطق مستعد به فرسایش آبکندی، از دقت پیش‌بینی ۸۸/۲۵ درصد برخوردار است. Dube و همکاران (2014) در پهنه‌بندی حساسیت اراضی به فرسایش آبکندی با استفاده از شاخص وزنی در زیمباوه، پنج فاکتور پوشش زمین، نوع خاک، فاصله از رودخانه، شاخص انتقال رسوب و شاخص قدرت جریان را فاکتورهای مؤثر در وقوع آبکند معرفی کردند. همچنین نقشه‌ی خطر فرسایش آبکندی نشان داد که ۷۰ درصد آبکندها در طبقه‌ی خطر بالا و خیلی بالا قرار دارند. Conoscenti و همکاران (2013)، حساسیت فرسایش آبکندی را با استفاده از رگرسیون لجستیک مبتنی بر GIS در سیسیل ایتالیا ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که فاکتورهای بافت خاک، انحنای کلی و جهت بر توزیع مکانی آبکند در منطقه‌ی مورد مطالعه، تأثیر منفی یا صفر دارند؛ درحالی‌که در مقابل، انحنای مماسی، شاخص قدرت جریان و انحنای نقشه، قدرت پیش‌بینی بالایی را نشان می‌دهند. Conforti و همکاران (2011) در پهنه‌بندی حساسیت فرسایش آبکندی در حوزه‌ی آبخیز رودخانه توربولو^۲ (شمال کالابریا^۳ ایتالیا)، فاکتورهای سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، شیب، جهت، انحنای نقشه، شاخص جریان آبراهه، شاخص توپوگرافی و طول شیب را به‌عنوان فاکتورهای مستعد فرسایش آبکندی معرفی کردند.

نتایج اعتبار سنجی نشان داد که بیش از ۸۸ درصد آبکندهای حوضه، در پهنه‌های دارای حساسیت بالا و خیلی بالا قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه داده‌کاوی، به استخراج اطلاعات مفید از حجم زیاد داده‌ها می‌پردازد و طبق مرور منابع، کارایی مناسبی از خود نشان داده‌است؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر، اولویت‌بندی عوامل محیطی مؤثر بر وقوع فرسایش آبکندی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، آب‌وهوا، کاربری اراضی، قابلیت اراضی، سنگ‌شناسی، پهنه‌های سیلابی، تبخیر، بارش، دما، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی^۴، شاخص انتقال رسوب^۵ و شاخص قدرت جریان^۶ با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی و پهنه‌بندی حساسیت آن، با

¹ Garbheta block

² Turbolo

³ Calabria

⁴ Topographic Wetness Index

⁵ Sediment Transport Index

⁶ Stream Power Index

مدل‌های آماری دومتغیره ارزش اطلاعاتی^۱ و تراکم سطح^۲ در پنج حوضه شکرکلات، قره‌تیکان، کماج‌خوردرگز، کلوت‌های سبزوار و موشک‌کاشمر در سطح استان خراسان رضوی است.

۲- منطقه مورد مطالعه

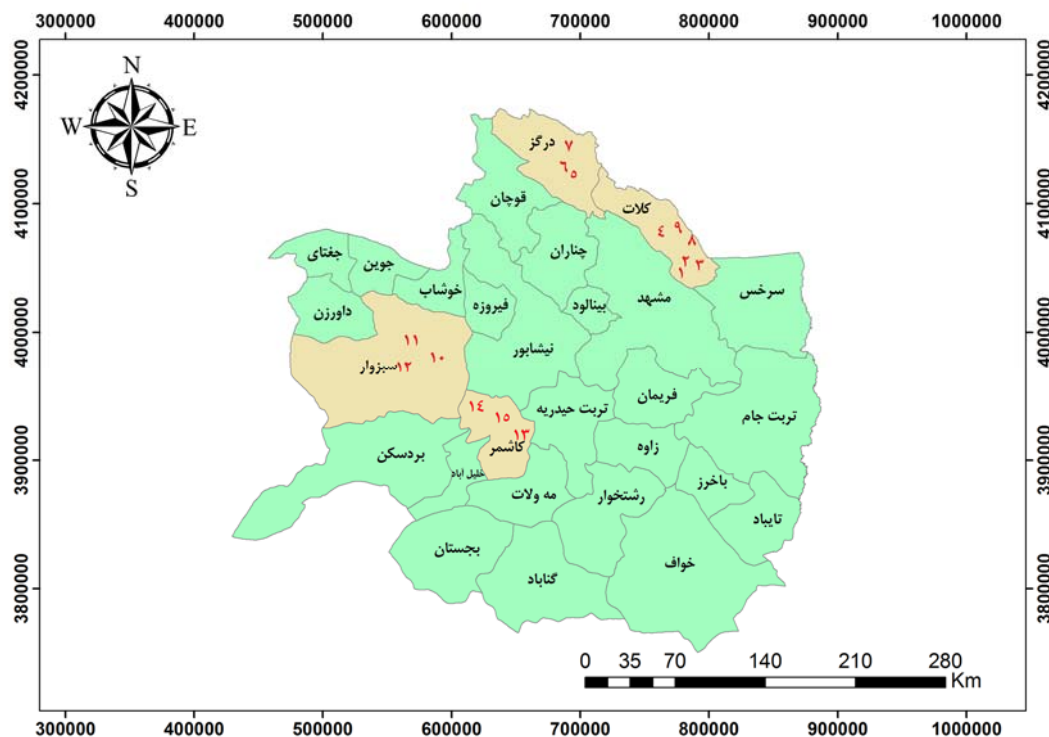
استان خراسان رضوی دارای وسعتی بیش از ۱۲۷ هزار کیلومترمربع است که بین مدار جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. متوسط بارش استان طی دوره‌ی آماری (۱۳۶۸-۱۳۹۴)، ۲۰۷/۵ میلی‌متر محاسبه شده است و متوسط درجه حرارت سالانه، ۱۵/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد است. همچنین طبق اقلیم‌نمای دومارتن، عمدتاً در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد. خصوصیات حوضه‌های آبکنده‌های شاخص و موقعیت مناطق آبکندی مورد مطالعه در استان خراسان رضوی، به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات حوضه‌های آبکندی شاخص استان

ردیف	نوع اقلیم	نام حوضه	مساحت (ha)	بارش (mm)	نام آبکند معرف	شماره آبکند	مساحت (ha)	مختصات آبکند
							عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	شبه‌گرمسیر	شکرکلات	۱۹۳۹۳/۸	۱۷۰	ساریخان	۱	۰/۹۳	۴-۳۹-۳۶-۵۶-۰۷-۶۰
					رباط	۲	۰/۰۵	۰۷-۳۹-۳۶-۱۳-۰۸-۶۰
					قوچ‌خانه	۳	۰/۰۶	۰۸-۳۹-۳۶-۲۰-۰۸-۶۰
					شیرین‌کاریز	۴	۰/۶۱	۱۷-۴۳-۳۶-۴۳-۰۶-۶۰
۲	گرمسیر	کماج‌خور	۸۸۸۹/۴۷	۲۱۷	کماج‌خور ۱	۵	۰/۰۶	۴۹-۲۲-۳۷-۱۵-۰۹-۵۹
					کماج‌خور ۲	۶	۰/۰۱	۳۰-۲۲-۳۷-۵۰-۰۸-۵۹
					گبنه‌دره	۷	۰/۴۵	۳۱-۲۴-۳۷-۳۵-۰۸-۵۹
۳	شبه‌گرمسیر	قره‌تیکان	۳۹۱۴/۷۶	۲۰۲	جعفرخان	۸	۱/۲۹	۵۸-۴۴-۳۶-۴۷-۱۴-۶۰
					پس‌خندق	۹	۰/۵۵	۱۹-۴۵-۳۶-۳۴-۱۴-۶۰
۴	گرمسیر	کلوت‌های سبزوار	۱۲۶۷۳/۲۸	۱۸۸	پادگان قدس ۱	۱۰	۰/۰۱	۱۶-۱۵-۳۶-۱۳-۴۳-۵۷
					پادگان قدس ۲	۱۱	۰/۰۱	۱۱-۱۵-۳۶-۳۰-۴۲-۵۷
					پادگان قدس ۳	۱۲	۰/۰۶	۵۹-۱۴-۳۶-۱۰-۴۲-۵۷
۵	شبه‌گرمسیر	موشک-کاشمر	۲۴۳۲۴/۲	۲۱۲	سرمرغ	۱۳	۰/۵۴	۵۴-۳۲-۳۵-۴۹-۳۳-۵۸
					خضربیک	۱۴	۰/۰۶	۱۰-۳۶-۳۵-۰۸-۲۱-۵۸
					اوندر	۱۵	۰/۰۰۲	۴۲-۳۴-۳۵-۴۵-۲۲-۵۸

^۱ Information Value

^۲ Area Density



شکل ۱: موقعیت ۱۵ آبکند مورد مطالعه در سطح استان خراسان رضوی

۳- مواد و روش

برای انجام پژوهش، ابتدا حوزه‌های دارای فرسایش آبکندی شاخص در سطح استان خراسان رضوی مشخص و بازدید میدانی شد. در هر یک از حوزه‌های کماج‌خور درگز، کلات‌های سبزواری و موشک‌کاشمر، سه آبکند؛ حوزه‌ی شکرکلات، چهار آبکند و در حوزه‌ی قره‌تیکان، دو آبکند (در مجموع ۱۵ آبکند) مشخص شد. با توجه به تعداد زیاد آبکندهای مناطق مورد مطالعه و عدم امکان مطالعه‌ی همه‌ی آنها، مشخصاتی از قبیل طول، عرض، عمق، پلان عمومی، شکل پلان پیشانی، نیمرخ طولی پیشانی و شکل مقطع عرضی آبکند، به‌عنوان شاخص‌های به‌کار گرفته‌شده در انتخاب آبکند معرف بوده است و سعی شده آبکند معرف در هر منطقه به‌گونه‌ای انتخاب شود که مشخصات آن، مشابهت زیادی با سایر آبکندهای آن منطقه داشته باشد. سپس با استفاده از GPS^۱، پلان گسترش سطحی آبکندها مشخص شد. با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی^۲ (DEM) منطقه با دقت ۳۰ متر و لایه آبراهه‌های استان، مرزهای پنج حوزه‌ی مورد مطالعه توسط نرم‌افزار ArcHydro ترسیم و در محیط گوگل ارث^۳ (سال ۲۰۱۶) بازبینی شد.

۳-۱- اطلاعات ورودی

نقشه‌های ۱۷ عامل مؤثر بر وقوع آبکندها شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، آب‌وهوا، کاربری اراضی، قابلیت اراضی، سنگ‌شناسی، پهنه‌های سیلابی، تبخیر، باران، دما، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص انتقال رسوب و شاخص قدرت جریان به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته و نقشه‌های این عوامل در محیط GIS تهیه شد. بدین ترتیب که با استفاده از DEM منطقه با دقت ۳۰ متر و در نرم‌افزار ArcGIS،

^۱ Global Positioning System

^۲ Digital Elevation Model

^۳ Google Earth

ویژگی‌های اولیه (لایه‌ی شیب و جهت دامنه) و ثانویه‌ی توپوگرافی (شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص انتقال رسوب (STI) و شاخص قدرت جریان (SPI) محاسبه و سایر لایه‌ها نیز از سازمان هواشناسی و سازمان جغرافیایی تهیه و براساس مطالعات پیشین، طبقه‌بندی شد. همچنین برای ایجاد ویژگی‌های ثانویه‌ی توپوگرافی و جریان، از روابط به شرح زیر استفاده شد:

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI): نظریه‌ی شاخص خیسی، اولین بار به وسیله‌ی Beven and Kirkby (1979) در مدل بارش- رواناب^۱ TOPMODEL معرفی شد. این نظریه می‌تواند تأثیر توپوگرافی را بر تولید رواناب به صورت کمی بیان کند که با استفاده از معادله‌ی ۱ قابل محاسبه است (Moor and Grayson, 1991).

$$TWI = \ln \left(\frac{As}{\tan \sigma} \right) \quad \text{معادله (۱)}$$

شاخص قدرت جریان (SPI): Wilson and Gallant (2000)، معادله‌ی ۲ را برای محاسبه‌ی شاخص قدرت رودخانه پیشنهاد کردند که در این معادله، اندازه‌ی قدرت فرسایش جریان آب بر این فرض استوار است که عمل تخلیه متناسب با وسعت حوضه صورت می‌گیرد.

$$SPI = \ln (As * \tan \sigma) \quad \text{معادله (۲)}$$

شاخص انتقال رسوب (STI): این شاخص همان عامل طول شیب^۲ (LS) و مدل اصلاح‌شده‌ی معادله‌ی جهانی تلفات خاک (AUSLE)^۳ است (Moor et al, 1993). این شاخص، قدرت فرسایش جریان‌ها را بر روی زمین نشان می‌دهد (معادله ۳).

$$STI = \left(\frac{fa * cellsize}{22.13} \right)^{0.6} * \left(\frac{\sin \sigma * 0.01745}{0.0896} \right)^{1.3} \quad \text{معادله (۳)}$$

در سه معادله‌ی فوق، As مساحت ویژه‌ی حوضه برحسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز)، σ گرادیان شیب برحسب درجه و fa جریان تجمعی^۴ است. برای محاسبه‌ی جریان تجمعی، ابتدا نقشه‌ی جهت جریان^۵ با استفاده از مدل رقومی ارتفاع حوضه در محیط GIS به دست آمد و در مرحله‌ی بعد، نقشه‌ی جریان تجمعی به کمک نقشه‌ی جهت جریان تهیه شد. در نهایت، جریان تجمعی در اندازه‌ی شبکه‌های مدل رقومی ارتفاع برحسب متر ضرب شد.

۲-۳- کاربرد و ارزیابی الگوریتم‌های طبقه‌بندی

لایه‌ی پراکندگی مکانی فرسایش آب‌کندی با مشاهدات میدانی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگ ارث (2016)، به صورت پلیگون ترسیم و مساحت هر یک محاسبه شد. سپس لایه‌ی نقطه‌ای فرسایش آب‌کندی شامل ۱۵ نقطه به دست آمد. همچنین به تعداد آب‌کندهای موجود در هر حوضه، نقاطی فاقد فرسایش آب‌کندی به صورت تصادفی در همان حوضه

^۱ Topography-Based Hydrological Model (TOPMODEL)

^۲ Length of Slope

^۳ Adapted Universal Soil Loss Equation

^۴ Flow Accumulation

^۵ Flow Direction

برگزیده شد. از ترکیب دو لایه‌ی فوق، ۳۰ نقطه حاصل شد که ۵۰ درصد نقاط، دارای فرسایش آب‌بندی و ۵۰ درصد نقاط فاقد فرسایش آب‌بندی بودند. از قطع دادن لایه نقاط با هر یک از لایه‌های مختلف اطلاعاتی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، آب‌وهوا، کاربری اراضی، قابلیت اراضی، سنگ‌شناسی، پهنه‌های سیلابی، تبخیر، باران، دما، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه و شاخص‌های رطوبت توپوگرافی، انتقال رسوب و قدرت جریان، وقوع یا عدم وقوع فرسایش آب‌بندی در هر لایه مشخص شد. پس از تعیین وقوع یا عدم وقوع فرسایش آب‌بندی در هر لایه و تهیه‌ی بانک اطلاعاتی در محیط Excel، به برازش مدل‌های طبقه‌بندی شامل الگوریتم‌های درخت تصمیم، جنگل تصادفی، تجمیعی بوستینگ، ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی در محیط نرم‌افزاری R و افزونه Rattle پرداخته شد. در این فرایند، داده‌ها به دو دسته‌ی آموزشی^۱ (۷۰ درصد داده‌ها) و آزمایشی^۲ (۳۰ درصد داده‌ها) تقسیم شدند (Ismaili and Shokati, 2015). انتخاب داده‌های آموزشی و آزمایشی به صورت سیستماتیک و توسط کاربر انجام شد و بدیهی است که داده‌های آزمون، در مرحله آموزش استفاده نشده‌اند.

برای ساخت مدل‌های مذکور، ۱۷ لایه‌ی اطلاعاتی موجود به‌عنوان متغیرهای پیش‌گو و متغیر وجود یا عدم وجود آب‌بند به‌عنوان متغیر هدف تعیین شد. سپس به منظور ارزیابی الگوریتم‌های ایجادشده، از منحنی مشخصه عملیاتی دریافت‌کننده (ROC^۳) استفاده شد. منحنی ROC، نمایشی گرافیکی از خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌ها است. سطح زیر منحنی ROC، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخداد (وقوع آب‌بند) و عدم وقوع رخداد آن (عدم وقوع آب‌بند) است. مقادیر سطح زیر منحنی^۴ (AUC) از ۰/۵ تا یک متغیر است و ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد. در نتیجه، هر چه سطح زیر منحنی به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه‌ی پهنه‌بندی تهیه‌شده است (Pourghasemi et al., 2014).

۳-۳- پهنه‌بندی خطر فرسایش آب‌بندی

برای پهنه‌بندی مناطق حساس به فرسایش آب‌بندی، مجموعه داده‌های مناطق آب‌بندی با استفاده از تقسیم‌بندی تصادفی به دو زیرمجموعه تقسیم می‌شوند (Chung and Fabbri, 2003). یک زیرمجموعه (مجموعه داده‌های آموزشی (چهار حوضه)) که برای تعیین وزن و تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت با استفاده از دو روش ارزش اطلاعات^۵ و تراکم سطح^۶ مورد استفاده قرار می‌گیرند. زیرمجموعه‌ی دوم (مجموعه داده‌های آزمایشی (یک حوضه)) برای اعتبار سنجی نقشه‌ی حساسیت استفاده می‌شوند؛ لذا به منظور تعیین اهمیت هر کلاس از عوامل در وقوع فرسایش آب‌بندی، ابتدا لایه‌های مختلف چهار حوضه مورد مطالعه برای مدل‌سازی کلاسه‌بندی شد. سپس با به دست آوردن فراوانی پیکسل‌های آب‌بندی‌شده‌ی هر کلاس از لایه اطلاعاتی و فراوانی کل هر کلاس، تراکم آب‌بندها در هر کلاس محاسبه، سپس با استفاده از فراوانی پیکسل‌های آب‌بندی‌شده در کل حوضه و فراوانی کل حوضه، تراکم آب‌بندها در حوضه‌های

^۱ Training data

^۲ Testing data

^۳ Relative Operating Characteristic

^۴ Area Under Curve

^۵ Information Value

^۶ Area Density

مورد مطالعه به دست آمد. پس از تعیین وسعت آبکندها در طبقات مختلف عوامل، کمی کردن عوامل مؤثر و وزن‌دهی به طبقات براساس روابط مربوط به روش‌های آماری دومتغیره، ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح صورت پذیرفت (معادلات ۴ و ۵). در نهایت وزن نهایی کلاس‌های هر یک از لایه‌های اطلاعاتی با انواع مثبت و منفی، در ستون جداگانه‌ای حاصل و با استفاده از اطلاعات این ستون، ۱۷ لایه‌ی اطلاعاتی وزنی تهیه شد که از جمع جبری آنها، لایه‌ی اطلاعاتی دربردارنده‌ی مقادیر حساسیت به وقوع آبکندها تهیه گردید (معادله ۶). در نهایت، نقشه‌ی حساسیت وقوع آبکندهای حوضه در پنج طبقه حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تهیه شد.

$$W_i = \ln \left[\frac{\text{Densclass}}{\text{Densmap}} \right] = \ln \left[\frac{\frac{N_{\text{pix}}(S_i)}{N_{\text{pix}}(N_i)}}{\frac{\sum N_{\text{pix}}(S_i)}{\sum N_{\text{pix}}(N_i)}} \right] \quad \text{معادله (۴)}$$

$$W_{\text{erea}} = 1000 \left[\frac{N_{\text{pix}}(S_i)}{N_{\text{pix}}(N_i)} - \frac{\sum N_{\text{pix}}(S_i)}{\sum N_{\text{pix}}(N_i)} \right] \quad \text{معادله (۵)}$$

در دو معادله‌ی فوق، W_i و W_{erea} مقدار وزن هر یک از طبقات (به ترتیب روش‌های ارزش اطلاعات و تراکم سطح)، Densclass تراکم آبکندهای موجود در هر طبقه، Densmap تراکم کل آبکندهای موجود در حوضه‌های مورد مطالعه، $N_{\text{pix}}S_i$ تعداد پیکسل آبکندهای موجود در هر طبقه، $N_{\text{pix}}N_i$ تعداد پیکسل‌های هر یک از طبقات، $\sum N_{\text{pix}}S_i$ مجموع کل پیکسل آبکندهای موجود در حوضه‌های مورد مطالعه و $\sum N_{\text{pix}}N_i$ مجموع کل پیکسل‌های حوضه‌های مورد مطالعه است.

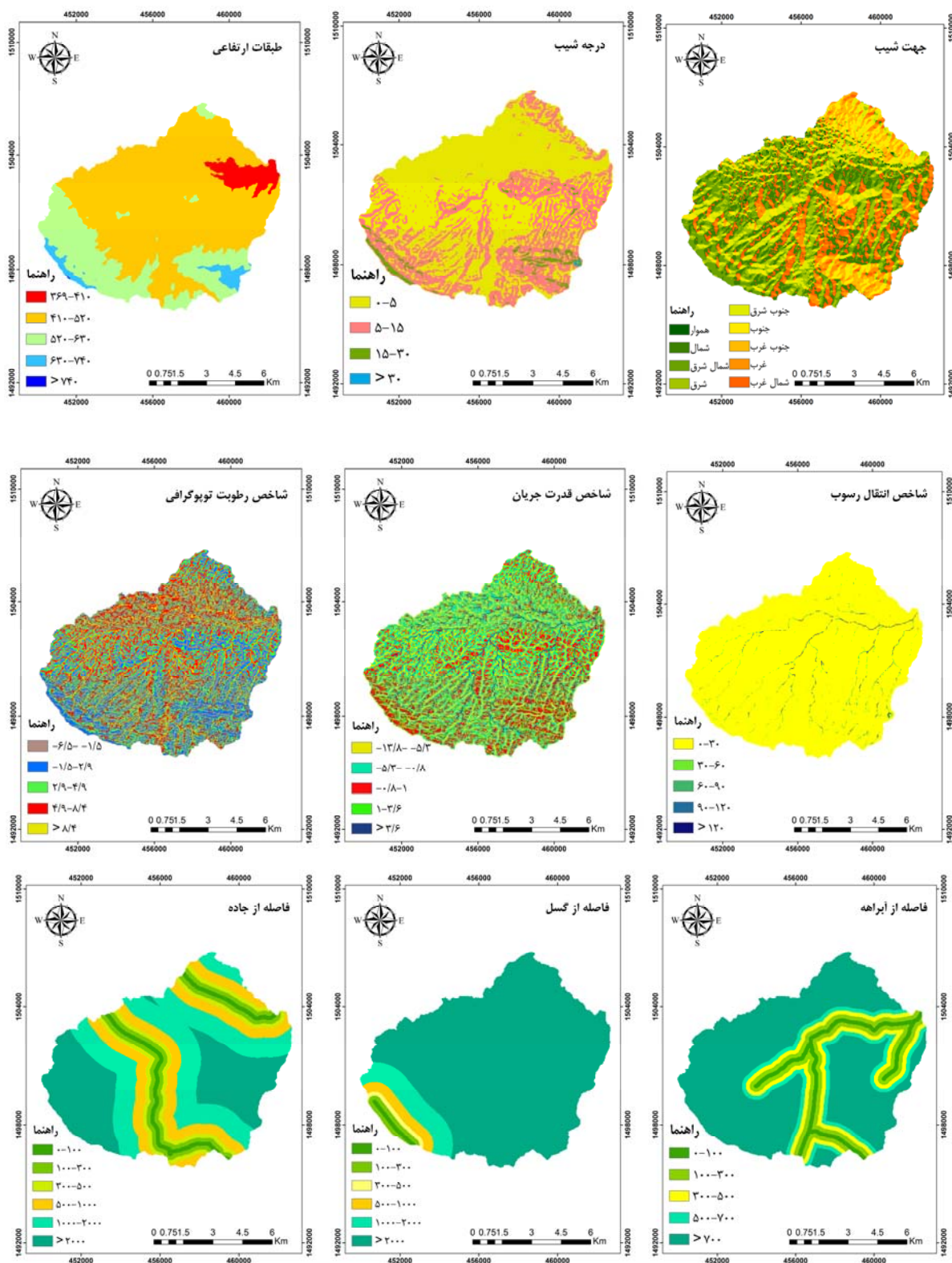
$$\text{Map}_w = \text{Hieght}_w + \text{Slope}_w + \text{Aspect}_w + \text{TWI}_w + \text{STI}_w + \text{SPI}_w + \dots + N_w \quad \text{معادله (۶)}$$

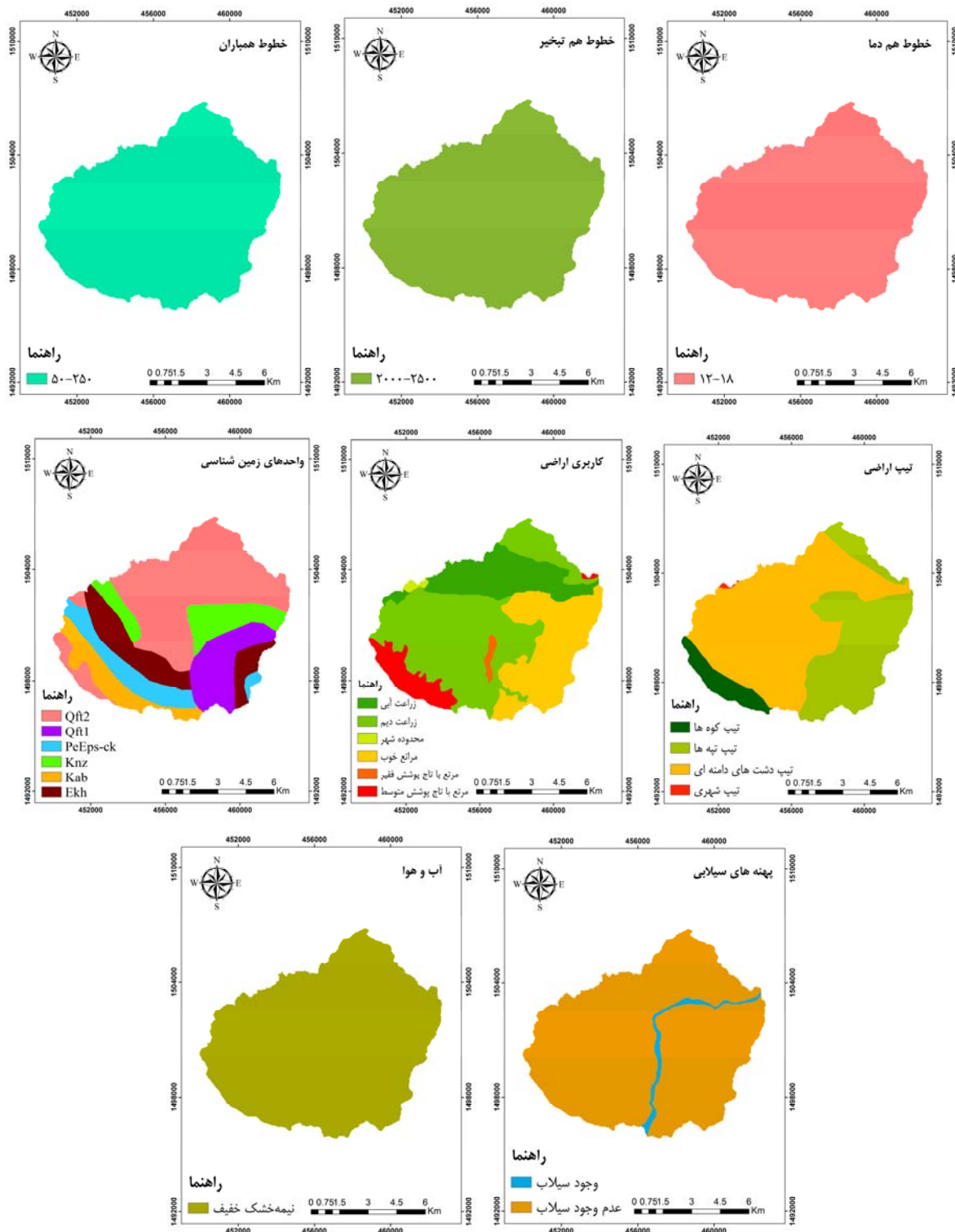
۴-۳- ارزیابی روش‌های مختلف پهنه‌بندی

برای ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش آبکندی، نباید از نقشه‌ی پراکنش آبکندهای حوضه استفاده شود؛ لذا باتوجه به اینکه برای ارزیابی مدل نمی‌توان از همان آبکندهایی استفاده کرد که در پهنه‌بندی استفاده شده‌اند، یک حوضه‌ی (حوضه کماج‌خور در گز) کنار گذاشته شده، برای ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت. این حوضه باتوجه به ویژگی‌های سایر مناطق آبکندی، می‌تواند معرف حوضه‌ها باشد. در ابتدا، به تهیه‌ی کلیه‌ی لایه‌های اطلاعاتی در این حوضه پرداخته شد و براساس وزن طبقات هر یک از لایه‌های چهار حوضه‌ی دیگر، لایه‌های حوضه‌ی پنجم با هم ادغام شدند. سپس نقشه‌ی حاصل شده به پنج عرصه‌ی خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد با فواصل مساوی طبقه‌بندی شد. بدین ترتیب، نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر فرسایش آبکندی با استفاده از دو مدل مختلف ارزش اطلاعات و تراکم سطح تهیه شد. در نهایت، نقشه‌ی تهیه‌شده با نقشه‌ی پراکنش واقعی آبکندهای حوضه مقایسه شد.

۴- یافته‌ها (نتایج)

لایه‌های مختلف اطلاعاتی که به عنوان متغیر مستقل در وقوع فرسایش آبکندی حوضه نقش دارند، برای حوضه کماج‌خور در گز در شکل ۲ ارائه شده است.

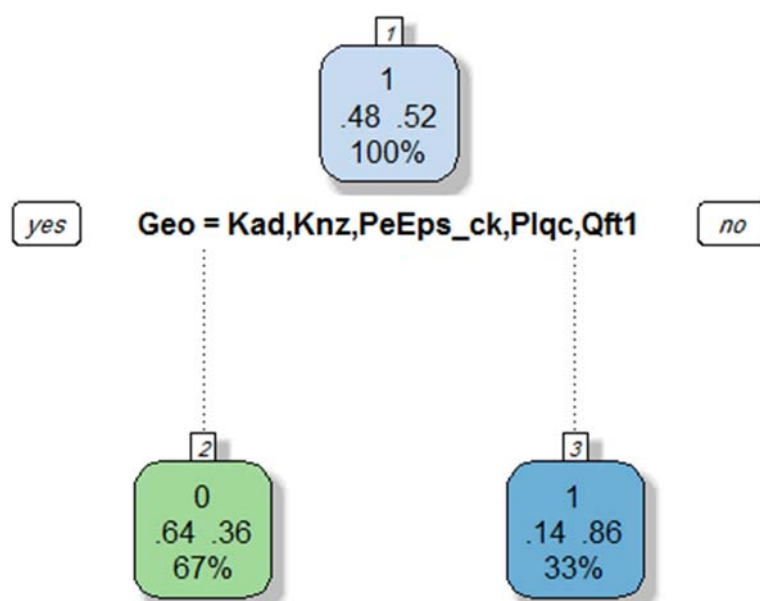




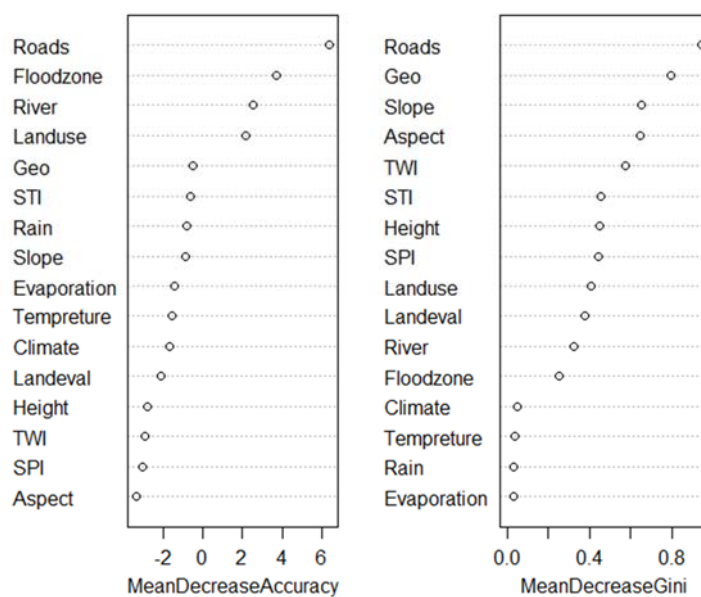
شکل ۲: لایه‌های طبقه‌بندی شده‌ی عوامل مؤثر بر وقوع آب‌کندها در حوضه‌ی کماج‌خور درگز

۴-۱- نتایج کاربرد الگوریتم‌های داده‌کاوی

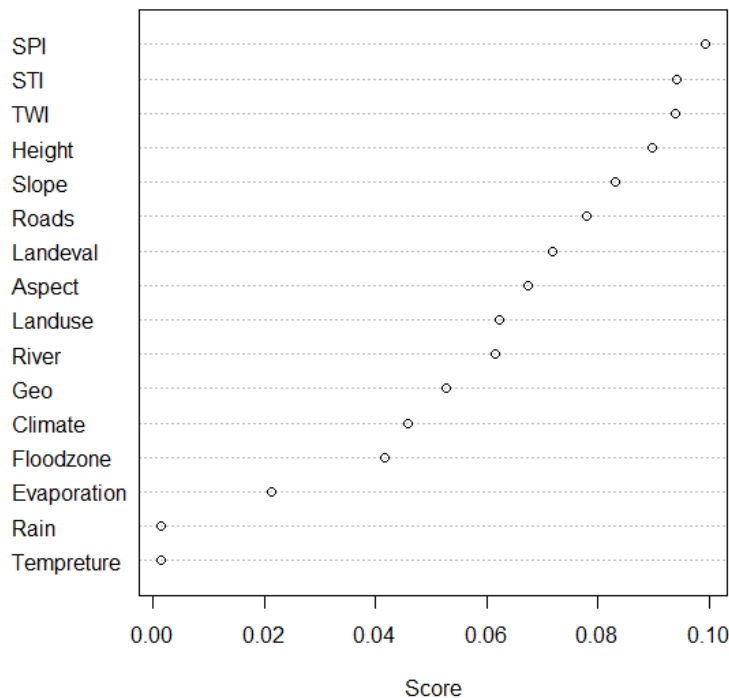
در ارزیابی نتایج الگوریتم‌های داده‌کاوی، متغیرهای فاصله از جاده، سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، شاخص قدرت جریان، انتقال رسوب و رطوبت توپوگرافیک به عنوان مهم‌ترین عوامل در وقوع فرسایش آب‌کندها با استفاده از سه الگوریتم درخت تصمیم، جنگل تصادفی و تجمعی بوستینگ معرفی شدند.



شکل ۳: مدل رده‌بندی درختی برای تعیین عوامل مؤثر بر آب‌بندی شدن



شکل ۴: اهمیت محاسبه‌شده برای متغیرهای موردبررسی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی



شکل ۵: نمودار اهمیت متغیرهای پیشگو براساس نمودار درختی بوستینگ

با توجه به شکل شماره ۳، مدل درخت تصمیم از بین ۱۷ پارامتری که در اختیار داشته، فاکتور سنگ‌شناسی را انتخاب کرده و درخت براساس این پارامتر ساخته شده است. شکل شماره ۴ نیز نتایج الگوریتم جنگل تصادفی را نشان می‌دهد. در این الگوریتم، اهمیت متغیرهای ورودی براساس شاخص جینی^۱ و شاخص صحت^۲ به دست آمده است. در هر دو شاخص، متغیر فاصله از جاده به عنوان مهم‌ترین متغیر ورودی تعیین شده است. سپس متغیرهای سنگ‌شناسی، شیب و جهت شیب برای شاخص جینی، در رده‌های بعدی اهمیت در طبقه‌بندی پهنه‌های حاصل از سایش آب‌کنندگی قرار می‌گیرند. در درخت تصمیم بوستینگ نیز می‌توان نمودار اهمیت متغیرها را در رده‌بندی داده‌ها ترسیم کرد. این نمودار در شکل شماره ۵ ارائه شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که متغیر شاخص قدرت جریان دارای بیشترین اهمیت است، سپس شاخص انتقال رسوب و شاخص رطوبت توپوگرافی به ترتیب در رتبه‌ی دوم و سوم قرار دارد.

جدول ۲: مقادیر سطح زیر منحنی ROC برای پیش‌بینی فرسایش آب‌کنندگی با استفاده از الگوریتم‌های مختلف

الگوریتم	درخت تصمیم	جنگل تصادفی	تجمعی بوستینگ	ماشین بردار پشتیبان	شبکه عصبی
سطح زیر منحنی	۰/۵	۰/۷	۰/۶	۰/۶	۰/۶۵

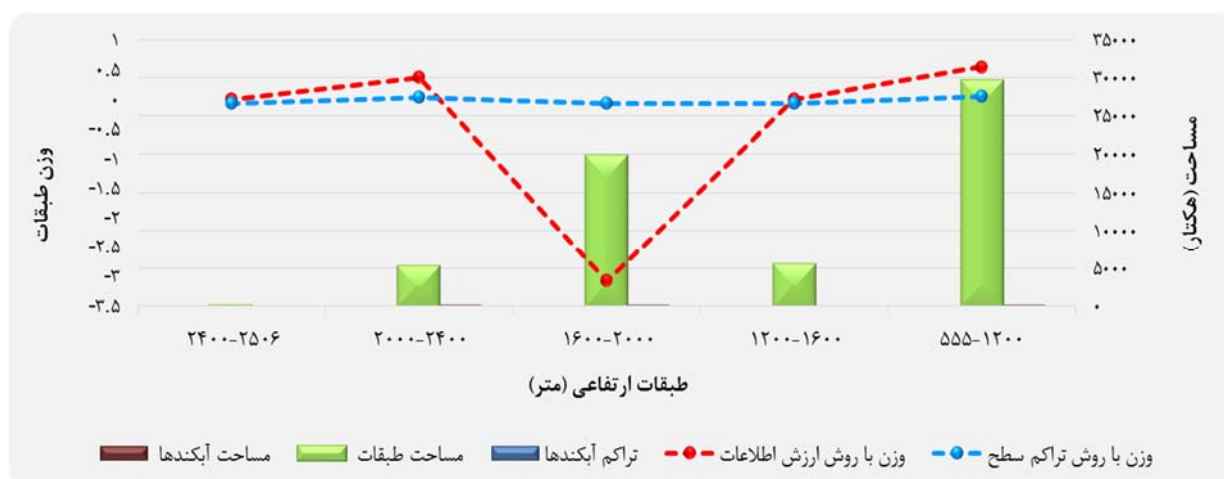
همچنین نتایج ارزیابی الگوریتم‌های مورد مطالعه با استفاده از منحنی ROC نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی با سطح زیر منحنی برابر با ۷۰ درصد، در طبقه‌بندی پهنه‌های فرسایش آب‌کنندگی نسبت به چهار مدل دیگر بهترین عملکرد را دارد (جدول ۲).

^۱ Gini index

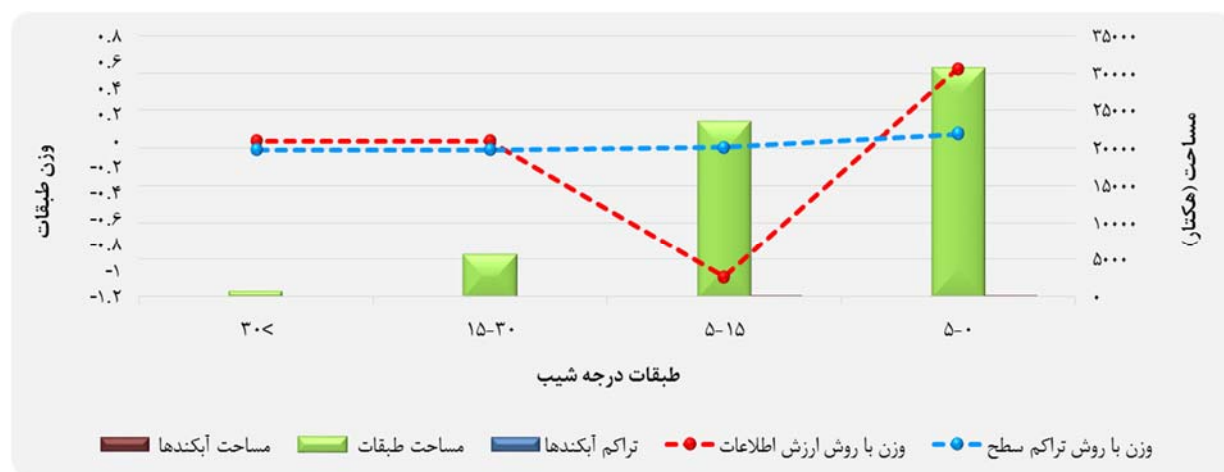
^۲ Accuracy index

۴-۲- نتایج پهنه‌بندی خطر فرسایش آب‌کندی

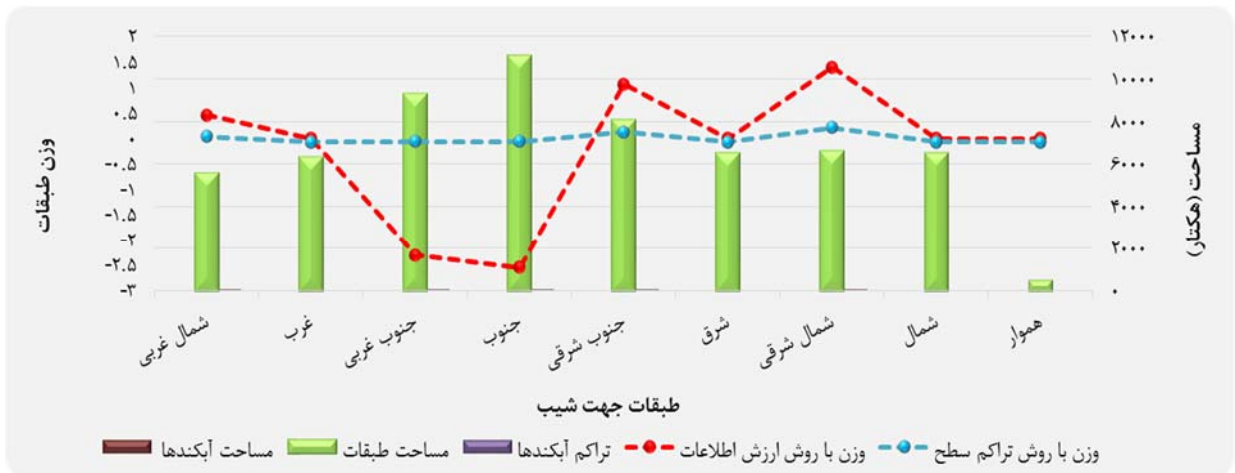
تراکم مناطق آب‌کندی و مقادیر وزنی به دست آمده با استفاده از روش‌های ارزش اطلاعات و تراکم سطح در چهار حوضه‌ی شکرکلات، قره‌تیکان کلات، کلوت‌های سبزوار و موشک کاشمر، در شکل‌های ۶ تا ۲۲ گزارش شده‌است. نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر فرسایش آب‌کندی نیز با استفاده از وزن‌های به دست آمده در چهار حوضه، با دو روش مذکور تهیه و با آب‌کندهای واقعی مطابقت داده شد (شکل ۲۳) که نتایج صحت نقشه‌ی پهنه‌بندی در جدول ۳ ارائه شده‌است.



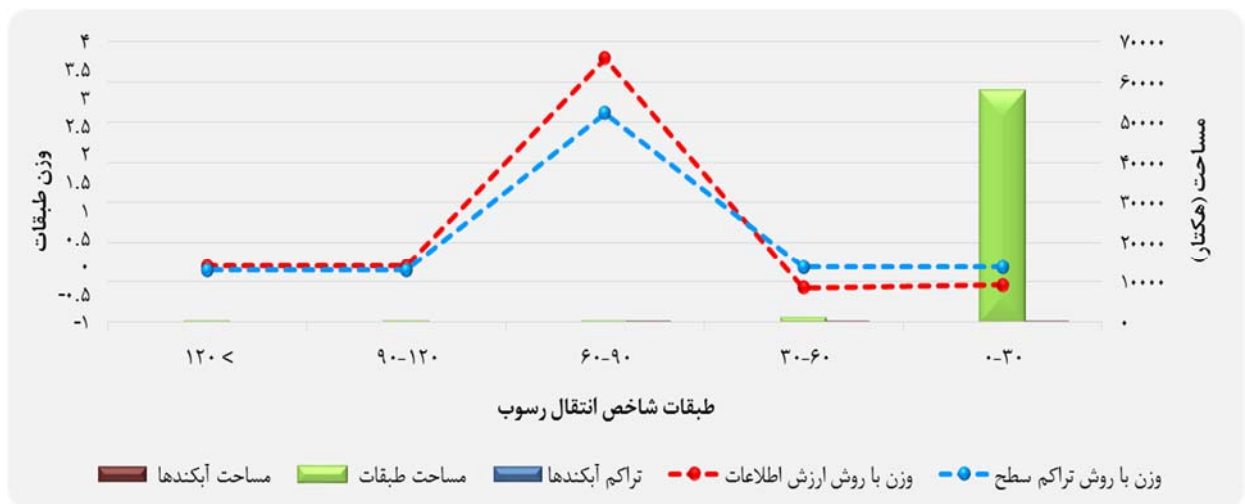
شکل ۶: طبقات مختلف ارتفاع در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



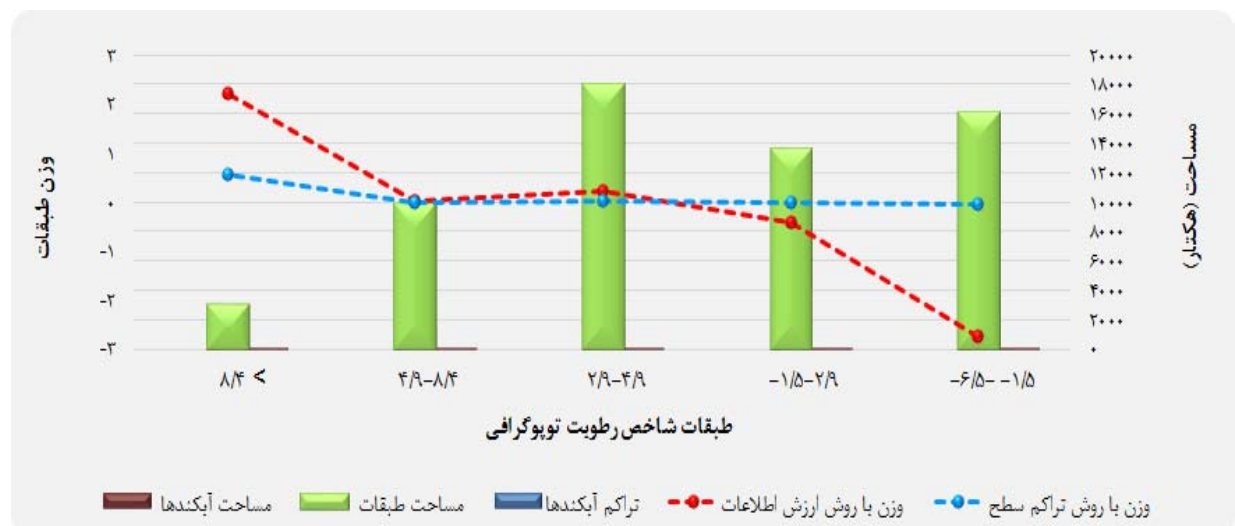
شکل ۷: طبقات مختلف درجه‌ی شیب در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



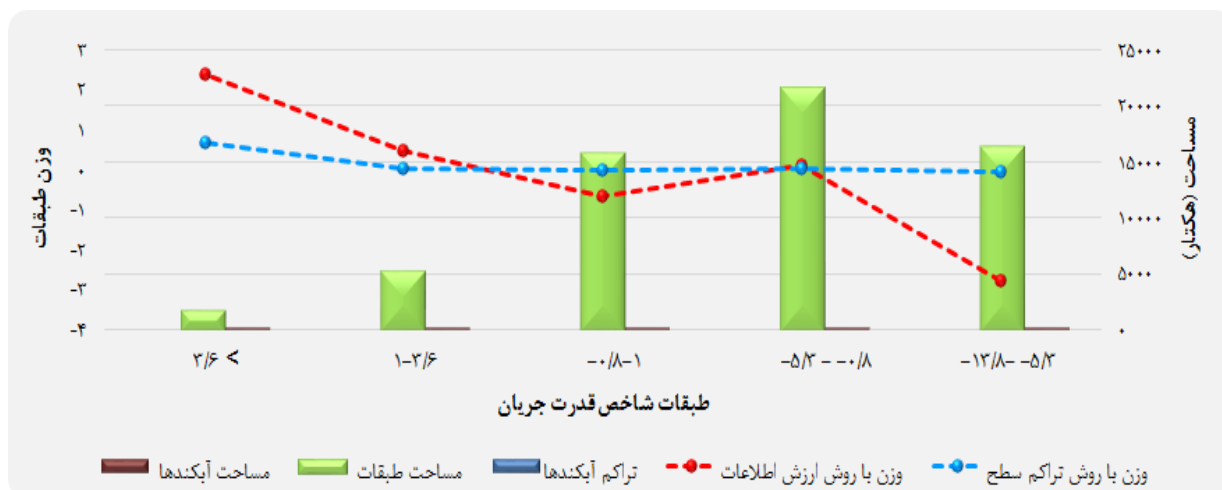
شکل ۸: طبقات مختلف جهت شیب در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



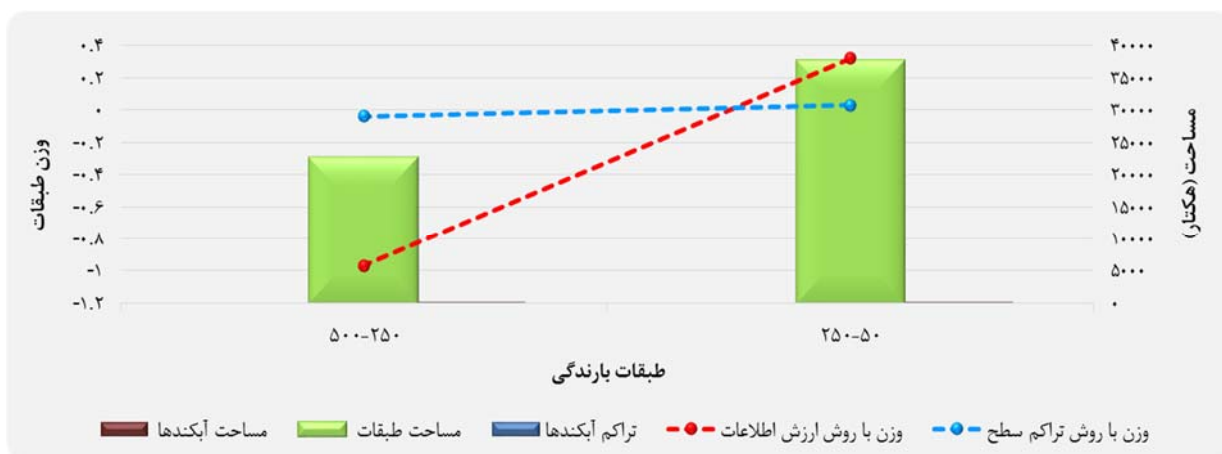
شکل ۹: طبقات مختلف شاخص انتقال رسوب در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



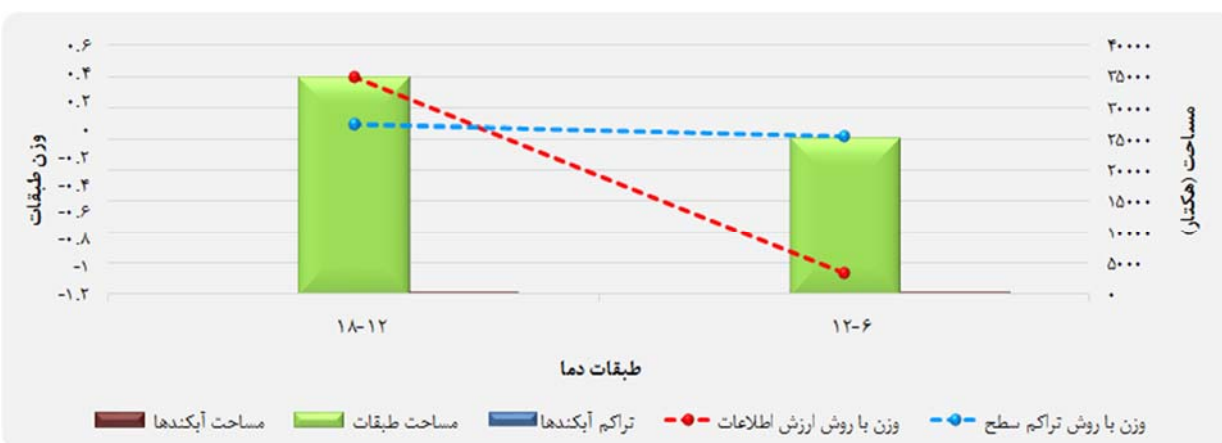
شکل ۱۰: طبقات مختلف شاخص رطوبت توپوگرافی در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



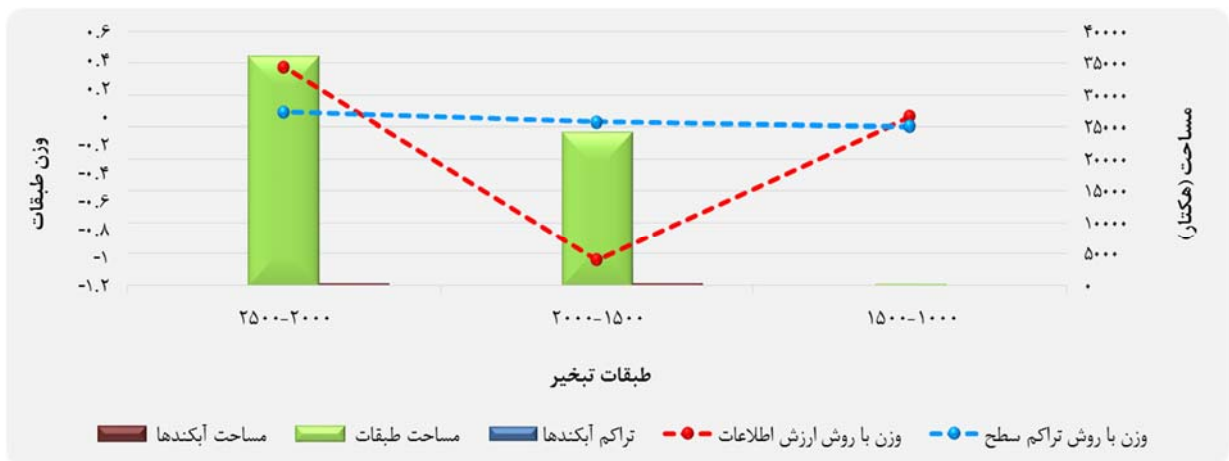
شکل ۱۱: طبقات مختلف شاخص قدرت جریان در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



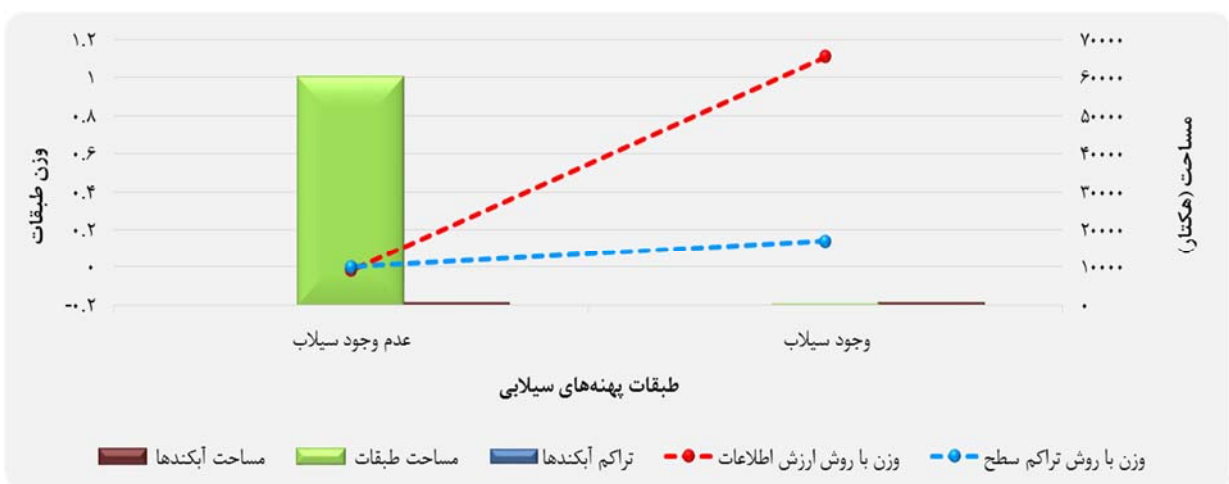
شکل ۱۲: طبقات هم‌باران در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



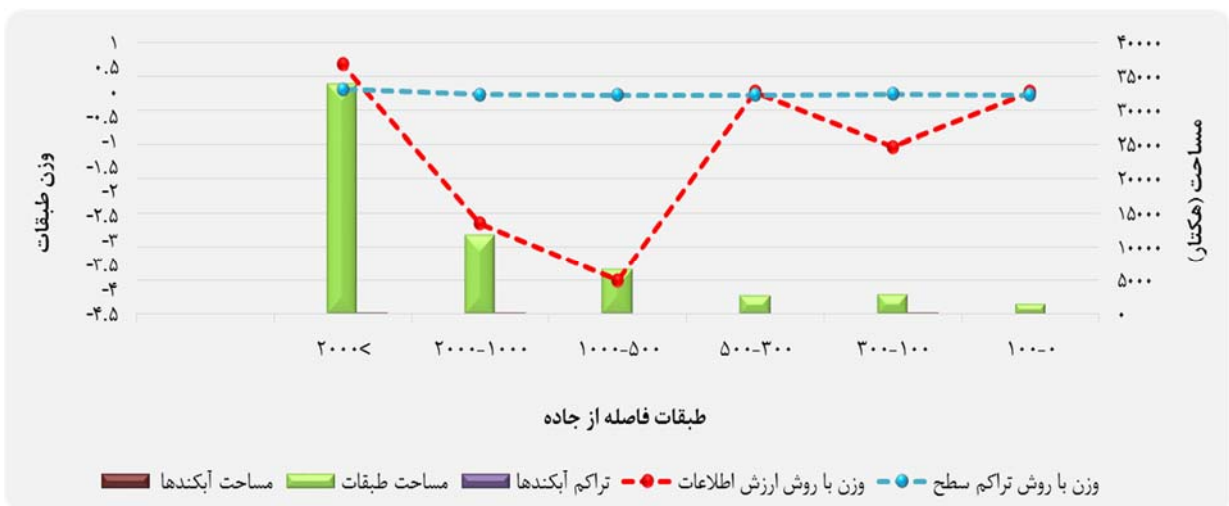
شکل ۱۳: طبقات هم‌دما در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



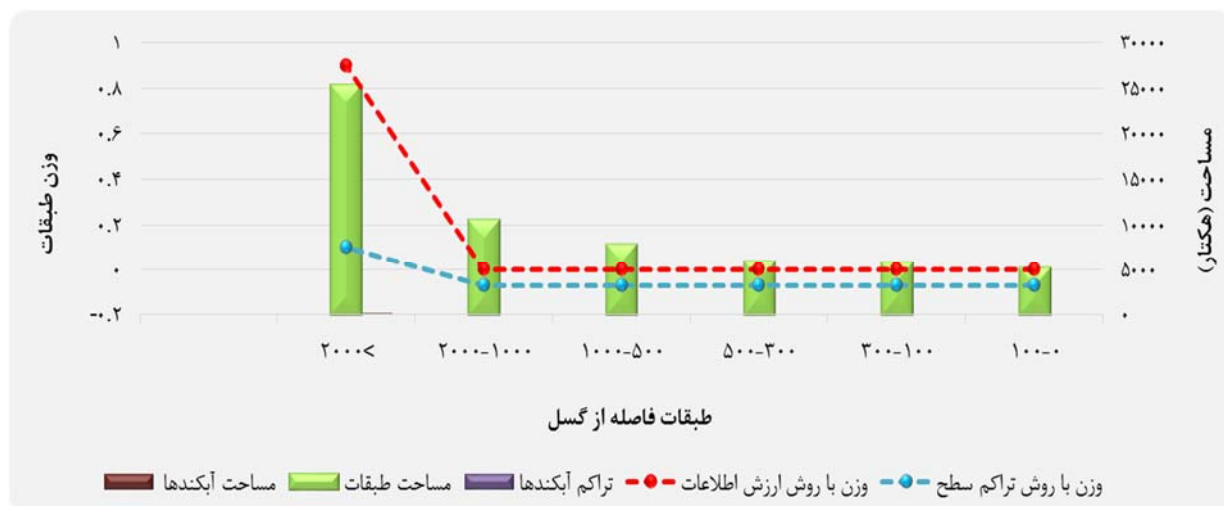
شکل ۱۴: طبقات هم تبخیر در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



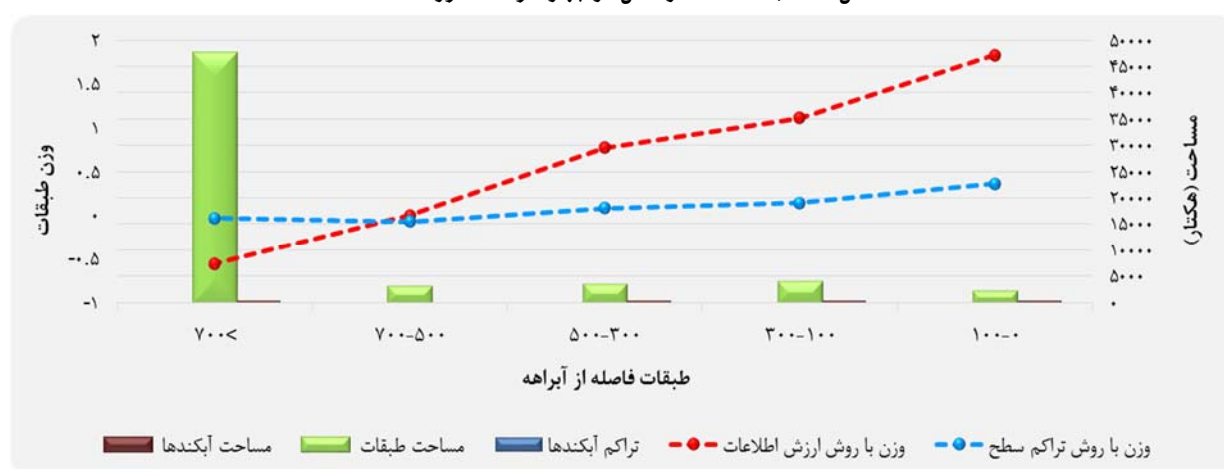
شکل ۱۵: طبقات پهنه‌های سیلابی در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



شکل ۱۶: طبقات فاصله از جاده در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



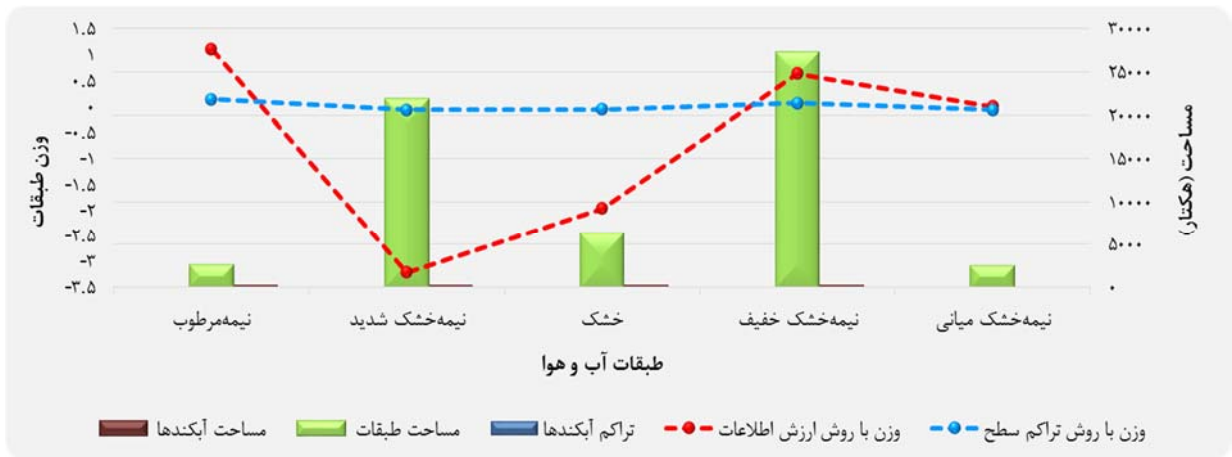
شکل ۱۷: طبقات فاصله از گسل در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



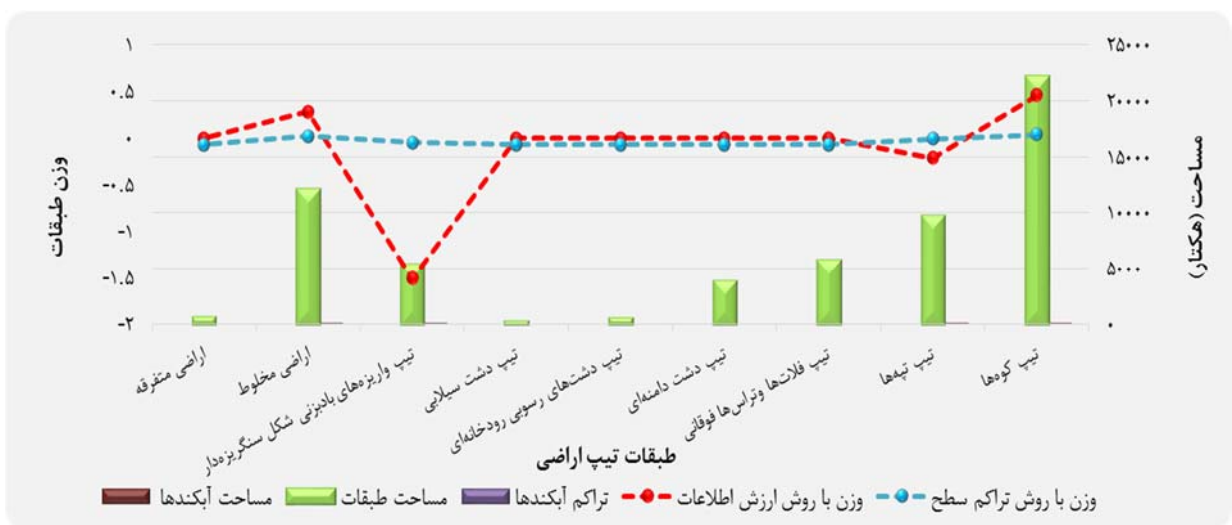
شکل ۱۸: طبقات فاصله از آبراهه در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



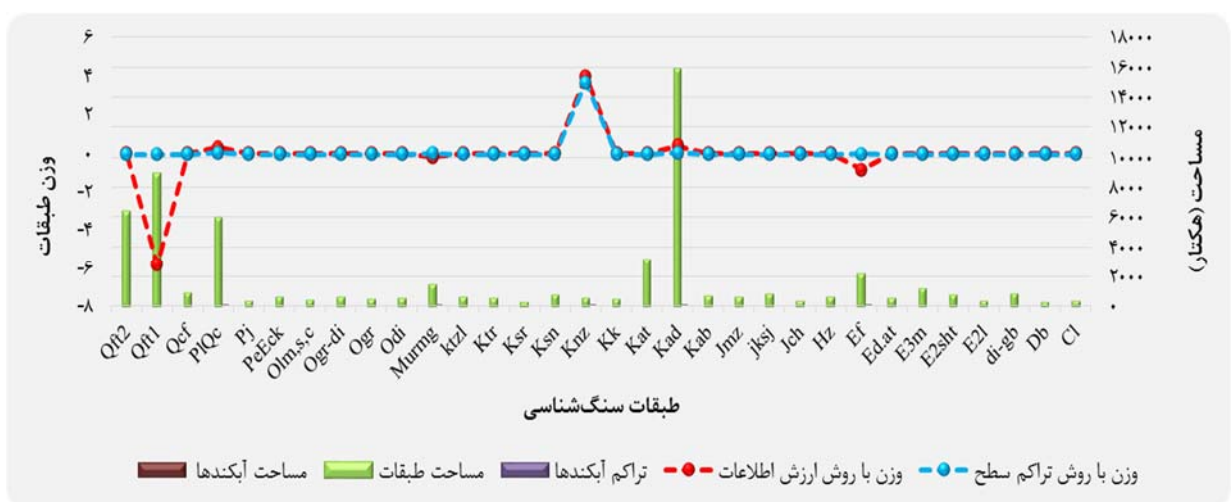
شکل ۱۹: طبقات کاربری اراضی در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



شکل ۲۰: طبقات آب و هوا در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



شکل ۲۱: طبقات تپ اراضی در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه



شکل ۲۲: طبقات سنگ‌شناسی در چهار حوضه‌ی مورد مطالعه

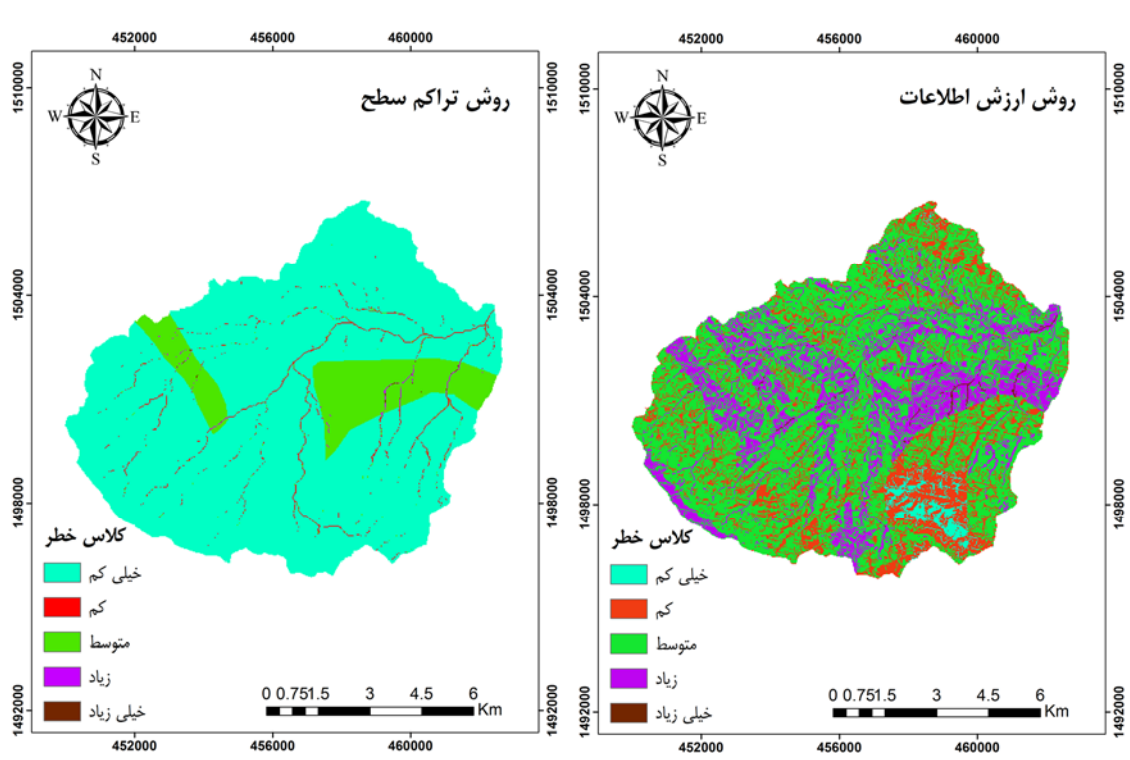
با استناد به نقشه‌های زمین‌شناسی و بررسی‌های میدانی، واحدهای سنگ‌شناسی موجود در حوضه‌های مورد مطالعه تشخیص داده شدند که ویژگی‌های سنگ‌شناسی بدین شرح است: آرکوزیک دانه‌بندی شده متوسط قرمز تیره (Cl)، دیاباز (Db)، گابرو-دیوریت (di-gb)، ماسه سنگ و شیل سبز زیتونی (Ekh)، سنگ آهک نرومولیتی (E2l)، سنگ توفی (E2sht)، مارن، ماسه سنگ و سنگ آهک (E3m)، توف داکتیکی و آندزیتی (Ed.at)، کنگلومرا و سنگ آهک (Ef)، هارزبورگیت (Hz)، سنگ آهک رسی خاکستری تیره و مارن (Jch)، سنگ آهک رسی قرمز کم‌رنگ، مارن، مارن گچی، ماسه سنگ و کنگلومرا (jksj)، سنگ آهک و دولومیت ضخیم و خاکستری (Jmz)، مارن-شیل و ماسه سنگ (Kab)، سنگ آهک سفید تا خاکستری و مارن و سنگ آهک گلوکونیتی (Kad)، ماسه سنگ و شیل گلاکونیت‌دار (Kat)، آهک ماسه‌ای (Kk)، ماسه سنگ گلوکونیتیکی (Knz)، آهک و ماسه سنگ سازند سنگانه (Ksn)، شیل آمونیتی با سنگ آهک اوربیتولین (Ksr)، سنگ آهک اوربیتولینی بیوکلاستیک و الیتیک خاکستری (Ktr)، سنگ آهک اربیتولین‌دار ضخیم لایه تا توده‌ای (ktzl)، مارن گچی (Murmng)، دیوریت (Odi)، گرانیت (Ogr)، گرانیت-دیوریت (Ogr-di)، سیلت سبز و قرمز، مارن گچی، ماسه سنگ و سنگ گچ (Olm,s,c)، سنگ آهک، مارن و مارن گچی (PeEck)، واحد غیرمتعارف از جمله کنگلومرا، ماسه سنگ، آهک و مارن (PeEps-)، نوعی سنگ آهک خاکستری تیره و یک نوار ضخیم زردرنگ دولومیت در قسمت فوقانی (Pj)، کنگلومرای رودخانه‌ای، کوهپایه‌ای و ماسه سنگ (Plqc)، رس هموار (Qcf)، ذخایر تراسی و مخروط افکنه‌های کوهپایه‌ای قدیمی مرتفع (Qft1)، ذخایر تراسی و مخروط افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید کم ارتفاع (Qft2).

با توجه به وزن‌های به‌دست آمده و تراکم آبکندها در هر طبقه، براساس لایه طبقات ارتفاعی (شکل ۶) در روش‌های ارزش اطلاعات و تراکم سطح می‌توان گفت طبقات کم ارتفاع بیشترین وزن را به‌خود اختصاص داده‌اند و همراه با افزایش ارتفاع، میزان حساسیت به خطر فرسایش آبکندی کم شده است. این موضوع، کاهش دخالت‌های انسانی و سنگ‌شناسی مقاوم منطقه را در ارتفاعات بالاتر نشان می‌دهد که با نتایج Shit و همکاران (2015) مغایرت دارد. نتایج بررسی عامل شیب نشان می‌دهد که شیب صفر تا پنج درجه در وقوع فرسایش آبکندی، تأثیر بیشتری نسبت به طبقات دیگر شیب دارد (شکل ۷). Abbasi (2008) و Maqsoodi و همکاران (2012) که به بررسی فرسایش آبکندی در حوزه‌ی آبخیز راهجرد و زواریان در استان قم پرداختند، از وقوع فرسایش آبکندی در شیب‌های کم گزارش می‌دهند؛ زیرا در شیب‌های پایین، امکان نفوذ آب در خاک و ایجاد حفره برای توسعه‌ی آبکندها بیشتر است. از سوی دیگر، به دلیل تجمع املاح محلول، احتمال زیادی وجود دارد که فرسایش تونلی (انحلالی) رخ دهد؛ به همین دلیل، این مناطق محل مستعد و حساس به رخداد فرسایش آبکندی هستند. Ismaili and Shokati (2015) در منطقه‌ی صلوات‌آباد استان کردستان و Conforti و همکاران (2011) در حوضه‌ی توربولوی (ایتالیا)، از وقوع فرسایش آبکندی در شیب‌های بیش از ۳۰ و ۴۰ درجه خبر دادند که با نتایج پژوهش حاضر، همخوانی ندارد. علت عدم مغایرت پژوهش حاضر با مطالعات Ismaili and Shokati (2015) و Conforti و همکاران (2011) در زمینه‌ی شیب دامنه، این است که آبکندها در مناطق مورد مطالعه در شیب‌های کم (شیب صفر تا پنج درجه)؛ اما در دو پژوهش فوق در شیب‌های بیش از ۳۰ و ۴۰ درجه رخ داده است. در این پژوهش، نخست جهت شمال شرقی و در درجه‌ی دوم، جهت جنوب شرقی بیشترین تأثیر را در وقوع فرسایش آبکندی دارد (شکل ۸). Farajzadeh، Abbasi (2008) و همکاران (2012)،

Maqsoodi و همکاران (2012) نیز گزارش دادند که حساسیت مناطق مستعد به فرسایش آب‌کندی در جهت‌های شمالی و شرقی است. Ismaili and Shokati (2015) در حوضه‌ی صلوات‌آباد استان کردستان، Conforti و همکاران (2011) در سیسیل ایتالیا و Shit و همکاران (2015) در غرب بنگال در هند، رخداد فرسایش آب‌کندی را در جهت‌های جنوبی و جنوب غربی گزارش می‌دهند. تراکم آب‌کندها در طبقاتی که مقادیر بالای شاخص‌های ثانویه‌ی توپوگرافی دارند، بیش از سایر طبقات است (شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱). این نتایج با یافته‌های Ismaili and Shokati (2015)، Conforti و همکاران (2011) و Shit و همکاران (2015) همخوانی دارد. با افزایش شاخص انتقال رسوب، رطوبت بیشتری در پایین دامنه جمع می‌شود که زمینه را برای فرسایش آب‌کندی فراهم می‌سازد. بررسی عامل بارش در منطقه‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین محل تشکیل آب‌کندها در طبقات ۵۰-۲۵۰ میلی‌متری بارندگی است (شکل ۱۲). طبق نظر Ahmadi (2009) افزایش بارندگی بیش از ۱۳ میلی‌متر در ۲۴ ساعت، به بروز آب‌کند در منطقه منجر می‌شود. همچنین طبقات دمای ۱۸-۱۲ (شکل ۱۳) و طبقات تبخیر ۲۵۰۰-۲۰۰۰ میلی‌متر (شکل ۱۴)، وزن بیشتری دارند. تبخیر سطح خاک در پاره‌ای از نواحی، می‌تواند به شور شدن نیمرخ خاک لایه‌ی سطحی منجر شود. در نتیجه، عمل انحلال سریع‌تر صورت می‌گیرد و هدکث ایجاد می‌شود. همچنین سرما و گرما موجب خرد شدن سنگ‌ها می‌شود و فرسایش‌پذیری آنها را افزایش می‌دهد. براساس شکل شماره‌ی ۱۵ نیز مناطقی که محل عبور سیلاب و رواناب هستند، بیشترین وزن تأثیر را در وقوع فرسایش آب‌کندی دارند. بررسی متغیرهای فاصله از جاده و گسل نشان می‌دهد که بیشترین وزن طبقات، در فاصله‌ی بیش از ۲۰۰۰ متری واقع شده‌است (اشکال ۱۶ و ۱۷). لذا جاده و گسل در ایجاد آب‌کند در منطقه‌ی مورد مطالعه تأثیری ندارد. عامل فاصله از جاده با نتایج Shadfar (2015) در بررسی فرسایش آب‌کندی در حوزه‌ی طرود مطابقت دارد. بررسی نتایج فاصله از آبراهه (شکل ۱۸) نیز نشان می‌دهد، طبقات صفر تا ۱۰۰ و ۱۰۰ تا ۳۰۰ متری، بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. این امر بیانگر تأثیر آبراهه در تشکیل آب‌کند است. علت این امر این است که رودخانه با عمل زیرشویی و فرسایش کناری، تعادل دامنه‌های مشرف به آبراهه را برهم می‌زند و حساسیت نسبت به فرسایش آب‌کندی را در کناره‌ی رودخانه افزایش می‌دهد. یکی از علل دیگر آن، تجمع جریان‌های سطحی در خط القعرها است که نتایج این بخش از پژوهش، با نتایج Entezari و همکاران (2013) در نزدیکی وقوع آب‌کند به آبراهه مطابقت دارد. بررسی نتایج حاصل از کاربری اراضی (شکل ۱۹) نشان می‌دهد که بیشترین وزن، متعلق به مراتع با تاج پوشش متوسط است که با نتایج Abbasi (2008) همخوانی دارد. همچنین طبقات آب و هوای نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک خفیف نیز بیشترین وزن را دارند (شکل ۲۰). فرسایش آب‌کندی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در اثر انحلال و قلیایی بودن آب ایجاد می‌شود (Ahmadi, 2009). از لحاظ تیپ اراضی (شکل ۲۱)، بیشترین وزن‌ها به تیپ کوه‌ها اختصاص داده شده‌است. همچنین بررسی نتایج حاصل از واحدهای سنگ‌شناسی (شکل ۲۲) نشان داد که بیشترین وزن در واحد سنگ‌شناسی ماسه‌سنگ گلوکونیته (knz) وجود دارد؛ هر چند که این واحد سنگ‌شناسی و این تیپ از اراضی نسبت به فرسایش مقاوم هستند، اما خصوصیتی مانند قرار گرفتن آب‌کندها در آب و هوای نیمه‌خشک، کاربری مرتع و شوری بالای خاک سطحی و رطوبت زیاد، بر این نوع واحد سنگ‌شناسی و تیپ اراضی غالب می‌شود و مناطق را مستعد فرسایش می‌سازد.

جدول ۳: وسعت طبقات خطر آبکندی شدن به روش‌های ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح در حوضه کماج خور درگز

طبقات پهنه‌بندی		ارزش اطلاعات		تراکم سطح	
طبقه (درصد)	آبکند (درصد)	طبقه (درصد)	آبکند (درصد)	طبقه (درصد)	آبکند (درصد)
خطر خیلی کم	۱/۹۴	۰	۸۷/۱۲	۱۰۰	
خطر کم	۱۶/۴۳	۰	۱/۰۹	۰	
خطر متوسط	۶۰/۳۹	۹۸/۰۸	۱۱/۶۳	۰	
خطر زیاد	۲۰/۹۵	۱/۹۲	۰/۱۳	۰	
خطر خیلی زیاد	۰/۲۹	۰	۰/۰۳	۰	



شکل ۲۳: نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر فرسایش آبکندی در حوضه‌ی کماج‌خور درگز به روش‌های ارزش اطلاعات و تراکم سطح

در نهایت با روی هم گذاشتن لایه‌ی پهنه‌بندی خطر وقوع آبکند با لایه‌ی پراکنش فرسایش آبکندی، مشخص شد که در مدل ارزش اطلاعات، حدود ۹۸/۰۸ درصد آبکندها در پهنه‌ی با خطر متوسط و حدود ۱/۹۲ درصد آبکندها در پهنه‌ی با خطر بالا قرار گرفته‌اند. در مدل تراکم سطح نیز ۱۰۰ درصد آبکندها در پهنه‌ی با خطر خیلی کم واقع شده‌اند. بنابراین این دو روش — روش‌های ارزش اطلاعات و تراکم سطح — در تخمین خطر فرسایش آبکندی در این مناطق، دقت مناسبی ندارند؛ اما دقت روش ارزش اطلاعات در مقایسه با روش تراکم سطح به مراتب بیشتر است. کار مشابهی که توسط Ismaili و همکاران (2012) در منطقه‌ی بیجار استان کردستان انجام شده‌است، نشان می‌دهد که مدل آماری ارزش اطلاعات، با دقت خوبی توانسته‌است مناطق حساس به فرسایش آبکندی را پیش‌بینی کند. همچنین یافته‌های این بخش از پژوهش با نتایج Arabqashqae و همکاران (2011)، Yamani و همکاران (2013)، Conforti و همکاران (2011) و Dube و همکاران (2014) مغایرت دارد؛ چون یافته‌های این پژوهشگران بیانگر این است که بیشترین درصد

از محدوده‌ی آب‌کندی، در پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. اما نتایج این بخش از پژوهش، با نتایج پژوهش Farajzadeh و همکاران (2012) هم‌سو است. این پژوهشگران، کمترین مساحت را به طبقه‌ی فرسایش خیلی زیاد متعلق می‌دانند؛ مانند پژوهش حاضر که کمترین سهم در روش ارزش اطلاعات و تراکم سطح به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۰۳ درصد دارد و متعلق به طبقه فرسایش خیلی زیاد است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

به طور کلی فرسایش آب‌کندی در مقایسه با سایر انواع فرسایش آبی، از عوامل مهم و تهدیدکننده‌ی تعادل در منابع زیست محیطی و ناپایداری آن به شمار می‌رود و یکی از مهم‌ترین رخداد‌های مؤثر در نابودی خاک، تغییر منظر زمین و منابع آب و پسرفت اراضی است. توسعه‌ی آب‌کندها به از دست رفتن خاک زیادی منجر می‌شود و می‌تواند یکی از علل اصلی تخریب محیط‌زیست باشد. باتوجه به نتایج الگوریتم‌های داده‌کاوی، متغیرهای فاصله از جاده، سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، شاخص قدرت جریان، شاخص انتقال رسوب و شاخص رطوبت توپوگرافی مهم‌ترین عوامل وقوع فرسایش آب‌کندی است. هر چند عواملی همچون سنگ‌شناسی، شیب زمین، جهت شیب و شاخص‌های ثانویه‌ی توپوگرافی (شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص انتقال رسوب و شاخص قدرت جریان) - که به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در گسترش آب‌کندی در پژوهش حاضر شناسایی شدند - جزو عوامل طبیعی دسته‌بندی می‌شوند، اما می‌توانند تحت تأثیر عوامل انسانی قرار گیرند؛ از این رو، باید به حساسیت واحدهای سنگ‌شناسی نیز توجه شود.

همچنین کنترل جریان آبراهه‌ها، اجرای برنامه‌های مدیریتی لازم به‌خصوص در شیب‌های کم و احیای پوشش گیاهی - که به افزایش ضریب زبری سطح، اصلاح خاک و افزایش ماده آلی آن و کاهش سرعت رواناب کمک بسیاری می‌کند و از جمله اقدامات مؤثر در کنترل فرسایش آب‌کندی به شمار می‌رود - لازم و ضروری به نظر می‌رسد. در مناطق حساس به فرسایش آب‌کندی، باید از صدور هرگونه مجوز بهره‌برداری و چرای بی‌رویه جلوگیری و از جاده‌سازی در مناطق مستعد به فرسایش خودداری کرد. با توجه به نقشه‌ی پهنه‌بندی به‌دست آمده و وزن کلاس‌های هر یک از پارامترها، شیب صفر تا پنج درجه، جهات شمال شرقی و جنوب شرقی، فاصله‌ی بیش از ۲۰۰ متر از جاده و گسل، فاصله‌ی صفر تا ۳۰۰ متری از آبراهه، کلاس ماسه سنگ گلوکونیتی در لایه‌ی سنگ‌شناسی و طبقات با مقادیر بالای شاخص‌های ثانویه توپوگرافی، بیشترین وزن و تأثیر را در وقوع فرسایش آب‌کندی در منطقه‌ی مورد مطالعه دارند. در مورد پهنه‌بندی با دو روش ارزش اطلاعات و تراکم سطح، چنین بر می‌آید که روش ارزش اطلاعاتی مناسب‌تر از روش تراکم سطح است.

منابع

1. Arabqashqae, Z.; Nikkani, D.; Shadfar, S.; & A. Moeini, 2011. Gully erosion zoning in the Firouzkouh Torud watershed, *Geographic Journal of territories*, 8(31), 107-119. (In Persian).
2. Ahmadi, H., 2009. Applied geomorphology, Water Erosion, Tehran University Publications, Vol. 1. 688 p. (In Persian).
3. Abbasi, M., 2008. Evaluation of Factors affecting gully erosion (Case Study: Rahjerd basin, Qom Province), *Journal of Environmental Erosion Researchs*, 17(66), 32. (In Persian).
4. Breiman, L., 2001. Random forests, *Machine learning*, 45(1), 5-32.

5. Beven, K. J., & M. J., Kirkby, (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal*. 24(1), 43-69.
6. Conoscenti, C.; Agnesi, V.; Angileri, S.; Cappadonia, C.; Rotigliano, E.; & M. Marker, 2013. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy, *Environmental earth sciences*, 70(3), 1179-1195.
7. Conforti, M.; Aucelli, P. P.; Robustelli, G.; & F. Scarciglia, 2011. Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy), *Natural hazards*, 56(3), 881-898.
8. Chung, C. J. F., & A .G. Fabbri, (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping , *Natural Hazards* , 30(3), 451-472.
9. Dube, F.; Nhapi, I.; Murwira, A.; Gumindoga, W.; Goldin, J.; & D. A., Mashauri, 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.
10. Entezari, M.; Maleki, A.; Moradi, K. h.; & S. Olfati, 2013. Zoning of Gully Erosion in Catchment of Dyreh by Analytical Hierarchy Process (AHP), *Journal of Spatial Planning*, 17(4), 63-68. (In Persion).
11. Ezochi, J. I., 2000. The influence of runoff, litology and water table on the dimensions and rate of gulying processes in Eastern, Nigeria, Elsiver, Catena Verlag, Cermalingen,
12. Farajzadeh, M.; Afzali, A.; Khalili, Y.; & A. Ghelichi, 2012. Gully Erosion Susceptibility Assessment using Multivariate Regression Model (Case Study: Southern Mazandaran Province, Kiasar), *Journal of Environmental Erosion Researchs*, 2(2), 42-57. (In Persion).
13. Fayyad, U.; Piatetsky-Shapiro, G.; & P. Smyth, 1996. From data mining to knowledge discovery in databases, *Artificial Intelligence magazine*, 17(3), 37-54.
14. Ghorbani nejad, S.; Rahmati, O.; & F. Noormohammadi, 2017. Modeling the Potential of Gully Erosion Occurrence Applying Shannon Entropy and Statistical Index Models in Seymareh Region, *Quarterly journal of Environmental Erosion Research*, 7(1), 69-89. (In Persion).
15. Ismaili, R., & R. Shokati, (2015). Sensitivity evaluation of gully erosion by using logistic regression (Case Study: Salavat Abad basin, Kurdistan Province), *Arid regions Geographic Studies*, 5(20), 91-104. (In Persion).
16. Ismaili, R.; Jokar Sarhangi, E.; & R. Shokati, 2012. Assessment of sensitivity to gully erosion in Bijar region, Kurdistan province, *Earth Knowledge Researchs*, 3(11), 1-14. (In Persion).
17. Lee, S., & B. Pradhan, (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models, *Landslides*, 4(1), 33-41.
18. Maqsoodi, M.; Shadfar, S.; & M. Abbasi, 2012. Zoning of land sensitivity to gully erosion (Case study: Zavvarian Watershed, Qom Province), *Journal of quantitative geomorphological researches*, 1(2), 35-52. (In Persion).
19. Menhaj, M. B., 1998. Foundations of Neural Networks, Computational intelligence. Tehran, Professor Hesbi Publishing Center, Vol. 1. (In Persion).
20. Moore, I. D.; Gessler, P. E.; Nielsen, G. A.; & G. A. Peterson, 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis, *Soil Science Society of America Journal*, 57(2), 443-452.
21. Moore, ID., & RB. Grayson, (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*. 5(1), 3-30.
22. Pourghasemi, H. R.; Moradi, H. R.; & M. Mohammadi, 2014. Land slide Susceptibility Zoning Using Weight of Evidence Probabilistic Model, *Journal of Geospatial Information Technology*, 1 (2), 69-80. (In Persion).
23. Shit, P. K.; Paira, R.; Bhunia, G.; & R. Maiti, 2015. Modeling of potential gully erosion hazard using geo-spatial technology at Garbheta block, West Bengal in India, *Modeling Earth Systems and Environment* , 1(1-2), 1-16.

24. Shadfar, S., 2015. Application of Fuzzy Logic operators for investigation of gully erosion using GIS (Case Study: Troud basin), *Journal of Geographical Information*, 23(92), 35-42. (In Persion).
25. Saniee abadeh, M.; Mahmoodi, S.; & M. Taherpoor, 2012. Applied data mining. Publications of need knowledge of Tehran , 1nd ed , 520 p. (In Persion).
26. Saghafi, M., & R. Ismaili, (2009). Morphometric analysis of the factors of the formation and evolution of gullies (Case Study: Shakhen Basin, South Khorasan Province). *Quarterly of Geography and development*. 7(15), 150-133. (In Persion).
27. Wilson, J. P., & J. C. Gallant, 2000. Digital terrain analysis. *Terrain analysis: Principles and applications*. 6(12), 1-27.
28. Yamani, M.; Zamanzadeh, S. M.; & M. Ahmadi, 2013. Analysis of Factors Affecting the Formation and Development of Gully Erosion (Case Study: Kahoor Plain watershed in Fars Province), *Explore the Geographic magazine desert regions*, 1(1), 53-84. (In Persion).

Application of Data-Mining Algorithms in the Sensitivity Analysis and Zoning of Areas Prone to Gully Erosion in the Indicator Watersheds of Khorasan Razavi Province

Maryam Akbari: M.Sc in Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Torbat Heydarieh

Mehdi Bashiri*: Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Torbat Heydarieh

Abdossaleh Rangavar: Assistant Professor, Agriculture & Natural resources Research Center of Khorasan Razavi

Article History (Received: 13/02/2017 Accepted: 21/10/2017)

Extended abstract

1- Introduction

Gully erosion is one of the most important sources of sediment in the watersheds and a common phenomenon in semi-arid climate that affects vast areas with different morphological, soil and climatic conditions. This type of erosion is very dangerous due to the transfer of fertile soil horizons, and the reduction of water holding capacity also is a factor for soil instability and erosion creating problems for the functioning of agricultural machines. Hence, the identification of effective factors in the formation and development of gully, plays an important role in the watershed management and prevention of land degradation in the direction of sustainable development. There are few studies regarding the application of different data mining methods to determine the effective variables in the occurrence of gullies and most studies are based on the other statistical methods. Data mining is called as knowledge discovery in databases and is a way to discover new and potential beneficial information through lots of information. Some of the most important data mining algorithms include the decision tree, random forest, boosting aggregate demand, support vector machine, logistic regression and neural network algorithms. Given that the data mining extracts useful information from large volumes of data and has shown a good performance, therefore, the aim of the present study is the prioritization of environmental factors affecting the occurrence of gully erosion including the altitude, slope, aspect, climate, land use, land capability, lithology, flood zones, evaporation, rainfall, temperature, distance from road, distance from fault, distance from river, topographic wetness index, sediment transport index and stream power index using data mining algorithms and zoning its sensitivity using bivariate statistical models of information value and area density in five Shekarkalat, Qarehtikan, Komajkhoore Dargaz, Sabzevar Kaloots and Mooshak-Kashmar watersheds in the Khorasan Razavi province.

2- Methodology

The present study aimed at investigating the factors affecting the occurrence of gully erosion and its zoning in the five Shekarkalat, Qarehtikan, Komajkhoore Dargaz, Sabzevar Kaloots and Mooshak-Kashmar watersheds in the Khorasan-Razavi province. Within these five watersheds, 15 representative gullies were selected and subsequently, the distribution map of gullies in these watersheds were prepared. Then, each of the factors affecting the occurrence of gully erosion in the study areas consisting of 17 information layers including altitude, slope, aspect, climate, land use, land capability, lithology, flood zones, evaporation, rainfall, temperature, distance from road, distance from fault, distance from river, topographic wetness index, sediment transport index and stream power index were prepared and digitized using the

* Corresponding Author: m.bashiri@torbath.ac.ir

ArcGIS10.3 software. By using data mining algorithms in the R software, the factors affecting the gully formation were introduced. Finally, the gully erosion hazard zonation in the GIS was done using bivariate statistical models.

3- Results

The results of data mining algorithms showed that the distance from road, lithology, slope, aspect, stream power index, sediment transport index and topographic wetness index variables were the most important factors in the occurrence of gully erosion. According to the obtained zoning map and also the weight of classes for each parameter, the slope between 0 to 5 degrees, the northeast and southeast directions, a distance more than 2000 m from roads, glauconite sandstone class in the lithology layer and classes with high levels of the secondary topographic indicators had the highest weight and effect on the occurrence of gully erosion in the study areas. The evaluation results of the zoning map using the information value and area density methods based on the weighted quantitative amounts showed that in the information value method, 98.08 % and 1.92% of the gullies were located at the medium and high hazard zones, respectively and in the area density method, 100% of the gullies were located at the very low hazard zone. The results indicated that the areas prone to gully erosion were not detected in high accuracy but the information value method was more favorable than the density area method.

4- Discussion and Conclusions

According to the results of this research, the distance from road, lithology, slope, aspect, stream power index, sediment transport index and topographic wetness index variables considered as the most important factors in the occurrence of gully erosion. Although the factors such as lithology, slope, aspect and the secondary topographic indicators (topographic wetness index, sediment transport index and stream power index), which were identified as the most important factors influencing the development of gully in this research, were classified as natural factors, they could be influenced by human factors. Therefore, the sensitivity of the lithological units should well noted. Also, controlling the stream flows, implementing of management plans especially in low slopes and vegetation regeneration, which increase the surface roughness coefficient and decrease the runoff velocity and ultimately control the gully erosion, is essential. In case of zoning with the two methods of information value and area density, it follows that the information value method is more appropriate than the area density method.

Keywords: Area Density, Data Mining, Hazard Zonation, Information Value, Water Erosion