

توسعه داده شده در طبقه خیلی کم دارای تأثیر منفی و در طبقات متوسط، زیاد و خیلی زیاد دارای تأثیر مثبت بروی نقشه پیش‌بینی خطر فرسایش مدل PAP/RAC است؛ بنابراین با توجه به تأثیر عامل شیب در کل طبقات، جهت پیش‌بینی بهتر نیازمند دقت در طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری متناسب با منطقه است چراکه نتایج خروجی مدل تأثیرپذیری بالایی را نسبت به این عامل دارد. لذا بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان اعلام داشت مدل PAP/RAC با شرط دقت در تأثیرگذاری و طبقه‌بندی عامل‌های آن متناسب با کشور ایران، بهترین و ساده‌ترین مدل کیفی در جهت برآورد خطر فرسایش آبی حوزه‌های آبخیز فاقد یا با کمبود اطلاعات می‌باشد که با توجه به رویکرد توصیفی و رویکرد ادغام، ضمن پیش‌بینی خوب می‌تواند روند تغییرات حالت فرسایش را در هر طبقه نیز نشان دهد و ارائه راهبردهای مؤثر حفاظت آب‌و خاک در راستای کاهش روند و توسعه فرسایش خاک را میسر سازد و برای توسعه یک استراتژی جامع برای مدیریت پایدار حوضه استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های کیفی، میانگین‌گیری بیزین، معادله اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک، هدررفت خاک

مقدمه

فرسایش خاک از مهم‌ترین مسائل و مشکلاتی است که امروزه بشر با آن مواجه است [۲۰]. آن‌گونه که نرخ متوسط فرسایش خاک در جهان بین ۱۲ تا ۱۵ تن در هکتار در سال برآورد شده است و این نرخ در کشور ایران ۴/۳ برابر آن برآورد شده است [۱] و [۱۲]. درک توزیع مکانی فرسایش خاک مبنایی برای مدیریت مؤثر کاربری اراضی منطقه‌ای و پیشگیری از فرسایش خاک است [۱۳]. به‌طورکلی، برآورد میزان فرسایش خاک معمولاً از طریق آزمایش و مدل‌سازی بررسی می‌شود [۱۷]. مدل‌سازی فرسایش آبی و بادی برای درک فرآیندهای کنترل فرسایش خاک، پیش‌بینی میزان رواناب و فرسایش خاک و تعیین یا انتخاب اقدامات مناسب کنترل فرسایش، اهمیت بسزایی دارد [۳]. مدل‌ها با سازمان‌دهی اطلاعات مرتبط با فرآیند تصمیم‌گیری و شبیه‌سازی عوامل اثرگذار بر تصمیم و ارتباط آن‌ها و همچنین با ساده‌سازی روابط موجود در طبیعت، موجب درک و شناخت سامانه‌های طبیعی می‌شوند [۳۵]؛ اما از سویی یک چالش برای تصمیم‌گیرندگان مدیریت حوضه، شناسایی مدل‌هایی است که پیچیدگی فرآیندهای حوضه را با استفاده از

بررسی دقت نقشه پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش آبی و تعیین تأثیرگذاری عامل‌های ورودی مدل PAP/RAC در آبخیز قرناوه

سید پدram نی‌نوا^{۱*}، علی نجفی‌نژاد^۲، حبیب نظرنژاد^۳، آرش زارع‌گاریزی^۴

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۲/۰۵ تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۲/۳۰

DOI:10.22034/wmji.2024.2027259.1065

چکیده

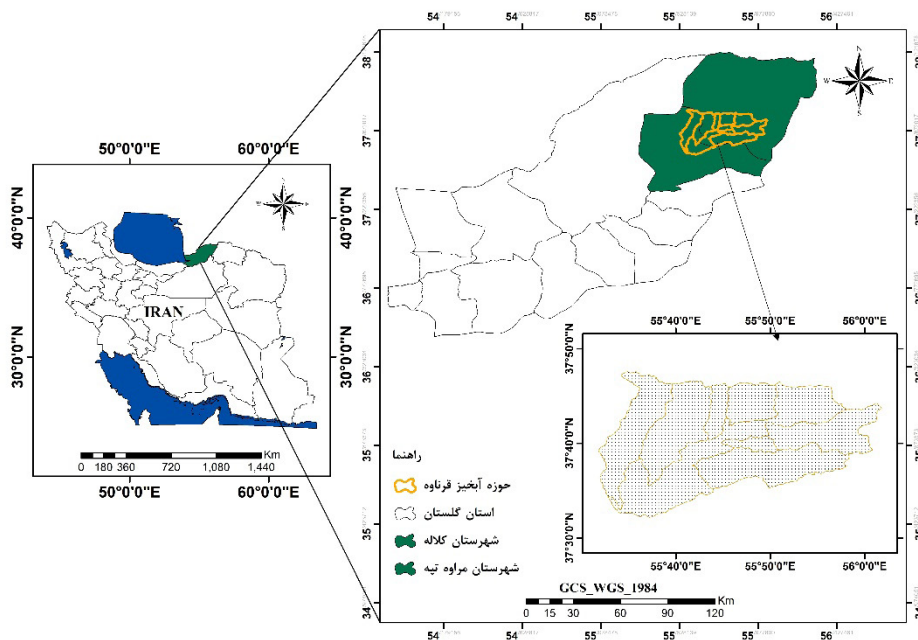
یکی از راهکارهای ارزیابی، مدل‌سازی با استفاده از مدل‌های کیفی است؛ اما عدم اطمینان در خصوص نتایج مدل‌های کیفی باعث شده است که کم‌تر به این مدل‌ها توجه شود. لذا این پژوهش به پیش‌بینی و تعیین وضعیت خطر فرسایش آبی حوزه آبخیز قرناوه با بهره‌گیری از رویکرد و مدل کیفی PAP/RAC و مقایسه نتایج آن با مدل RUSLE و همچنین تعیین عامل‌های تأثیرگذار در نتیجه پیش‌بینی این مدل با روش میانگین‌گیری بیزین (BMA) به منظور تعیین کارایی نتایج مدل مذکور در راستای ارزیابی، شناسایی و اولویت‌بندی بهتر نقاط در معرض خطر فرسایش آبی و ارائه راهبردهای مؤثر حفاظت آب‌و خاک پرداخته است. نتایج پژوهش در خصوص مقایسه کلی نتایج دو مدل، اختلاف پیش‌بینی آنان را ۲۰/۵۶ کیلومترمربع بیان نمود اما مقایسه دقیق مکانی نقشه پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش آبی حاصل از دو مدل PAP/RAC و RUSLE نشان داد که ۶۷/۷۴ درصد تشابه مکانی در پیش‌بینی آنان مربوط به طبقه خیلی زیاد می‌باشد. همچنین بررسی میزان تأثیرگذاری عامل‌های مدل (شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی) بروی نقشه پیش‌بینی خطر فرسایش با استفاده از رویکرد میانگین‌گیری بیزین، گویای این می‌باشد که شیب با بالاترین جرم در الگوهای برتر

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران و نویسنده مسئول
Email: pedram.nainava@gmail.com

۲- استاد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۳- دانشیار علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۴- استادیار علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی آبخیز قرناوه در استان گلستان و ایران

با استفاده از مدل‌های Fargas و BLM³ در حوزه آبخیز بندره در استان آذربایجان غربی پرداختند. نی‌نوا و پریچهره [۲۲] و نی‌نوا و پریچهره [۲۱] به استفاده از مدل^۴ ICONA و Fargas برای ارزیابی خطر فرسایش آبی در حوضه چهل‌گری استان کردستان پرداختند. لذا با توجه به کمبود اطلاعات اکثر حوزه‌های آبخیز ایران و عدم اطمینان در خصوص نتایج مدل‌های کیفی، به منظور حصول قابلیت اطمینان از نتیجه این دسته از مدل‌ها، هدف این پژوهش پیش‌بینی و تعیین وضعیت خطر فرسایش آبی حوزه آبخیز قرناوه با بهره‌گیری از رویکرد و مدل کیفی PAP/RAC و مقایسه نتایج آن با مدل^۵ RUSLE و همچنین تعیین عامل‌های تأثیرگذار در نتیجه پیش‌بینی این مدل با روش میانگین‌گیری بیزین^۶ به منظور تعیین کارایی نتایج مدل کیفی PAP/RAC در راستای ارزیابی، شناسایی و اولویت‌بندی بهتر نقاط در معرض خطر فرسایش آبی و ارائه راهبردهای مؤثر حفاظت آب و خاک می‌باشد.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز قرناوه در موقعیت جغرافیایی بین 30° تا 37° عرض شمالی و 55° تا 56° طول شرقی واقع شده است [۱۰]. حوضه قرناوه بروی سرشاخه‌های گرگان‌رود بسته شده است و مهم‌ترین رودخانه‌های این حوضه، قرناوه و شوردره هستند که پس از اتصال این انشعابات و پیوستن رودخانه‌های مادر سو و چهل‌چای در پایین‌دست حوضه، گرگان‌رود را تشکیل داده‌اند که

داده‌های موجود به‌طور دقیق شبیه‌سازی می‌کنند [۲۵]. چراکه مسئله اساسی مدل‌سازی فرسایش، قابلیت اطمینان نتیجه است و از سوی دیگر، استفاده از مدل‌ها به علت کمبود اطلاعات در اکثر حوزه‌های آبخیز جهت ارزیابی و یافتن راه‌حل‌های سریع و به‌موقع اجتناب‌ناپذیر است [۹]؛ بنابراین با توجه به فرآیند چهار مرحله‌ای مدل‌سازی مدیریت آبخیزها (ارزیابی وضع موجود، طرح‌ریزی، اجرا و ارزیابی تأثیر) [۴]، پس می‌توان بیان داشت که مدل‌سازی برای ارزیابی اولیه حوزه‌های آبخیز فاقد آمار یا با محدودیت آمار امری ضروری است. از میان روش‌های ارزیابی و پیش‌بینی، مدل‌های ارزیابی کیفی، مبتنی بر شناختی که بر عوامل مؤثر بر فرسایش تأثیر می‌گذارند نیز می‌توانند نقش مهمی در تعیین اولویت‌های مؤثر بر فرسایش و حساسیت به فرسایش داشته باشند [۹ و ۲۳]. از میان مدل‌های کیفی موجود، می‌توان به رویکرد و مدل^۱ PAP/RAC که نمونه‌ای از مدل‌های کیفی در زمینه ارزیابی خطر فرسایش است اشاره نمود. نیازمندی کم به داده و اطلاعات به جهت شناسایی مناطق خطر فرسایش در غیاب اطلاعات در حوزه‌های آبخیز از ویژگی بارز مدل‌های کیفی می‌باشد [۲۱]. این ویژگی از مدل‌های کیفی مطالعاتی زیادی را در داخل و خارج از کشور ایران به خود اختصاص داده است برای مثال: تهوریو همکاران [۳۶] به استفاده از مدل اصلاح‌شده PAP/RAC و GIS برای تهیه نقشه فرسایش آبی در حوزه آبخیز اسفالو در کشور مراکش پرداختند. البادوی و همکاران [۷] به ادغام مدل^۲ EPM و دستورالعمل‌های PAP/RAC جهت پهنه‌بندی فرسایش آبی و شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در مراکش پرداختند. نوجوان و همکاران [۲۶] به تعیین شدت فرسایش

3. Bureau of Land Management

4. Institute for the Conservation of the Nature

5. Revised Universal Soil Loss Equation

6. Bayesian model averaging (BMA)

1. Priority Actions Programme Regional Activity Centre

2. Erosion Potential Method

جدول ۱: الگوی طبقه‌بندی شیب و سنگ‌شناسی در مدل PAP/RAC [۲ و ۵].

نوع شیب (درصد)	ارزش طبقه	توصیف تأثیر در فرسایش طبقه	نوع واحد سنگی	ارزش طبقه	توصیف مقاومت
۰ - ۳	۱	خیلی کم	سنگ‌های فشرده غیر هوازده، کنگلومراهای بسیار سیمانی	۱	بسیار زیاد
۳ - ۱۲	۲	کم	سنگ یا خاک منسجم شکسته یا با هوازدگی متوسط	۲	زیاد
۱۲ - ۲۰	۳	متوسط	سنگ یا خاک رسوبی که کمی یا نسبتاً فشرده شده است (سنگ، شیل، مارن و غیره)	۳	متوسط
۲۰ - ۳۵	۴	زیاد	سنگ‌ها / یا خاک‌هایی با مقاومت ضعیف یا هوازدگی شدید (مارن، گچ، تخته‌سنگ رسی و غیره)	۴	کم
بیش‌تر از ۳۵	۵	شدید	رسوبات سست و غیرچسبنده یا خاک و مواد آواری	۵	خیلی کم

برای ارزیابی کیفی حساسیت به فرسایش آبی بر اساس پیوندها و وابستگی متقابل عوامل علی خطر و درک این پدیده است. ماهیت وابستگی متقابل این عوامل، مستلزم یک رویکرد کارتوگرافی برای چندین عملیات تلاقی، پردازش و تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌ها است [۳۰، ۳۱ و ۳۲]. ساختار اجرایی مدل PAP/RAC شامل سه رویکرد پیش‌بینی، توصیف و ادغام (یکپارچه‌سازی) است که به شرح ذیل می‌باشد:

رویکرد پیش‌بینی

شامل شناسایی، ارزیابی و ادغام کلیه پارامترهای فیزیکی به‌منظور تعیین فرضیه‌های اولیه و همچنین به دست آوردن اطلاعات در مورد وضعیت فعلی تخریب زمین با توجه به تأثیر بالقوه عوامل مختلفی است که فرسایش را کنترل می‌کنند [۳۶]. رویکرد پیش‌بینی بر اساس پردازش داده‌ها بر اساس یک توالی از هفت گام و دستورالعمل در ارزش‌گذاری نقشه‌های حاصل (جدول ۱ الی ۴) تهیه شده است:

- گام ۱ و ۲: تهیه نقشه شیب و سنگ‌شناسی.
- گام ۳: تهیه نقشه فرسایش‌پذیری حاصل از ادغام نقشه سنگ‌شناسی و نقشه شیب.
- گام ۴ و ۵: تهیه کاربری اراضی و نقشه تراکم پوشش گیاهی.
- گام ۶: تهیه نقشه حفاظت از خاک حاصل از ادغام نقشه کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی.
- گام ۷: تهیه نقشه وضعیت خطر فرسایش حاصل از ادغام نقشه فرسایش‌پذیری و حفاظت خاک

رویکرد توصیفی

این رویکرد بر اساس نقشه‌برداری واقعی فرسایش است. این رویکرد شامل توصیف و ارزیابی کیفی با تحدید نقشه‌کشی برای

درنهایت این رودخانه به دریاچه خزر تخلیه می‌شود [۳۴]. ایستگاه‌های هواشناسی حوضه نیز شامل: ایستگاه پیشکمر، کریم ایشان، قرقاق و گلیداغ و تمر است [۳۷]. حوضه قرناوه بخشی از زون گرگان-رشت بوده که بخش عمده این حوضه پوشیده از نهشته‌های لسی و آبرفتی است [۱۰]. کاربری عمده حوضه نیز شامل مرتع و زراعت است [۳۴]. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

رویکرد و مدل PAP/RAC

مرکز فعالیت منطقه‌ای / برنامه اقدامات اولویت‌دار (PAP/RAC) که در سال ۱۹۷۷ تأسیس شد، یکی از شش مرکز فعالیت منطقه‌ای برنامه اقدام مدیریتانه (MAP) است که خود بخشی از برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد (UNEP) است. بیست‌ویک کشور مدیریتانه‌ای و همچنین اتحادیه اروپا، MAP را تشکیل می‌دهند و هدف مشترک آن‌ها ایجاد محیط سالم‌تر مدیریتانه‌ای است که بر اصل توسعه پایدار تکیه دارد. حوزه اصلی فعالیت PAP/RAC حمایت از کشورهای مدیریتانه‌ای در بهبود مدیریت پایدار سواحل خود، به‌ویژه از طریق تصویب و اجرای پروتکل مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی در مدیریتانه است. در طول دهه ۱۹۹۰، بسیاری از سازمان‌ها مانند فائو (سازمان غذا و کشاورزی)، DGCONA^۳ (اداره کل حفاظت از طبیعت) و PAP/RAC برای توسعه یک روش ساده، انعطاف‌پذیر و سازگار با شرایط خاص منطقه مدیریتانه همکاری کردند [۲۸ و ۱۸]. درنهایت در سال ۱۹۹۸ مدل و رویکرد PAP/RAC ارائه و مورد استفاده قرار گرفت [۲۹]. مدل و رویکرد PAP/RAC حالت‌های فرسایشی، پویایی فرایندهای فرسایش آبی و ارزیابی روندهای خطر در مقیاس‌های مختلف حوزه آبخیز را ممکن می‌سازد [۳۶]. این مدل

1. Mediterranean Action Plan
2. UN Environment
3. General Directorate for the Conservation of the Nature

جدول ۲: الگوی طبقه‌بندی کاربری‌های اراضی و تراکم پوشش گیاهی در مدل PAP/RAC [۳۶، ۲ و ۵].

نوع کاربری اراضی	ارزش طبقه	حفاظت	تراکم پوشش گیاهی (درصد)	ارزش طبقه	توصیف تراکم طبقه
کشت در زمین خشک یا لخت، مرتع و خاک لخت	۱	خیلی کم	کم‌تر از ۲۵	۱	کم
درختکاری و احیای جنگل	۲	کم	۲۵ - ۵۰	۲	متوسط
کشت آبی	۳	متوسط	۵۰ - ۷۵	۳	زیاد
جنگل‌های طبیعی	۴	زیاد	بیش‌تر از ۷۵	۴	بسیار زیاد
بوته‌زار یا بیشه‌زار متراکم	۵	شدید			

جدول ۳: ماتریس ادغام نقشه سنگ‌شناسی و شیب، نقشه کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی و نقشه حفاظت خاک و فرسایش‌پذیری [۵ و ۱۵].

طبقه‌بندی شیب	طبقه‌بندی رخساره سنگی					طبقه‌بندی کاربری اراضی					طبقه‌بندی تراکم پوشش گیاهی			
	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴
۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۲	۱	۳	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۳	۲	۲	۳	۲	۴	۳	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۴	۳	۳	۴	۳	۵	۴	۵	۴	۴	۴	۴	۴	۴	۴
۵	۴	۴	۵	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵

طبقه‌بندی حفاظت خاک	طبقه‌بندی فرسایش‌پذیری				
	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۲	۳	۳	۳
۴	۲	۲	۳	۴	۴
۵	۲	۳	۴	۵	۵

جدول ۴: الگوی طبقه‌بندی نقشه فرسایش‌پذیری شیب، نقشه حفاظت خاک و وضعیت خطر فرسایش [۵ و ۱۵].

طبقه فرسایش‌پذیری	توصیف طبقه	طبقه حفاظت خاک	توصیف طبقه	طبقه خطر فرسایش	توصیف طبقه
۱	خیلی کم	۱	بسیار زیاد	۱	خیلی کم
۲	کم	۲	زیاد	۲	کم
۳	متوسط	۳	متوسط	۳	متوسط
۴	زیاد	۴	کم	۴	زیاد
۵	شدید	۵	خیلی کم	۵	شدید

فرآیندهای فرسایش غالب و شناسایی ویژگی‌های محیطی انجام می‌شود [۳۶].

رویکرد ادغام

نتیجه اصلی رویکرد ادغام، نقشه تخریب یا روند فرآیند فرسایش

هر شکل و فرآیند فرسایش در محل رخ می‌دهد [۳۶]. این بخش از رویکرد دو رویه ترکیبی استفاده می‌کند، یکی به مشاهدات میدانی و دوم، شناسایی فرآیندهای جاری و فعال؛ این رویکرد در سه عملیات مشخص کردن درجات خطر، شناسایی و توصیف

آبی است که با برهم‌نهی و ادغام اطلاعات کیفی از رویکرد پیش‌بینی و توصیفی به دست می‌آید [۳۶].

مدل RUSLE

معادله جهانی فرسایش خاک تجدیدنظر شده یک مدل برآورد فرسایش آبی است که با شش عامل، فرسایش خاک را تخمین می‌زند [۲۰]. رابطه (۱) معادله مدل RUSLE را نشان می‌دهد:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

در رابطه فوق: A میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن بر هکتار در سال)، R عامل فرساینده‌گی باران ($Mj \text{ mm ha}^{-1} h^{-1} y^{-1}$), K عامل فرسایش‌پذیری خاک ($Mj \text{ ha h ha}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), L عامل طول شیب، S عامل درجه شیب، C عامل عملیات مدیریتی و پوشش گیاهی، P عامل حفاظت خاک است [۱۴]. محاسبه عامل‌ها مدل بر اساس جدول ۵ در این پژوهش انجام شده است.

جدول ۵ روش محاسبه عامل‌های مدل RUSLE

منبع	روش محاسبه	نام عامل
[۱۹]	$R = 0.07397 \times F^{1.847} \rightarrow F < 55$	عامل فرساینده‌گی باران
[۲۰]	به‌وسیله نوع بافت و مواد آلی خاک	عامل فرسایش‌پذیری خاک
[۲۷]	SAGA Software	عامل توپوگرافی
[۱۶]	$C = \frac{1 - NDVI}{2}$	عامل پوشش گیاهی
[۳۸]	$P = 0.2 + 0.03 \times Slope$	عامل حفاظت خاک

تعیین نقاط تصادفی جهت بررسی تأثیرگذاری عامل‌های

ورودی مدل

طی این پژوهش با توجه به وسعت منطقه ابتدا نقاطی به جهت بررسی تأثیرگذاری عامل‌ها (شیب، سنگ‌شناسی، تراکم پوشش گیاهی و کاربری اراضی) به‌عنوان نمونه‌های تصادفی انتخاب شد. به جهت انتخاب نقاط نمونه از روش آماری کوکران^۱ استفاده شد. از فرمول کوکران برای محاسبه حجم مناسب نمونه بر اساس سطح موردنیاز دقت، سطح اطمینان و نسبت تخمینی ویژگی موجود در جامعه، استفاده می‌شود [۲۴]. به‌طورکلی از فرمول کوکران برای دو جامعه آماری معلوم (محدود) و نامعلوم (نامحدود) استفاده می‌شود. معادله کوکران برای جامعه نامحدود به شکل رابطه ۲ و معادله کوکران برای جامعه محدود به شکل رابطه ۳ بیان می‌گردد:

$$n_0 = \frac{Z^2 \times p \times q}{d^2} \quad (2)$$

که در آن n_0 حجم نمونه، Z^2 مساحت زیر ناحیه پذیرش در یک توزیع نرمال است $(1 - \alpha)$ ، d سطح ترجیحی دقت، p نسبت تخمینی یک ویژگی در جامعه و q هم $1 - p$ می‌باشد [۲۴].

$$n_0 = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0 - 1}{N}} \quad (3)$$

که در آن n_0 حجم نمونه و N حجم جامعه است.

روش میانگین‌گیری بیزی

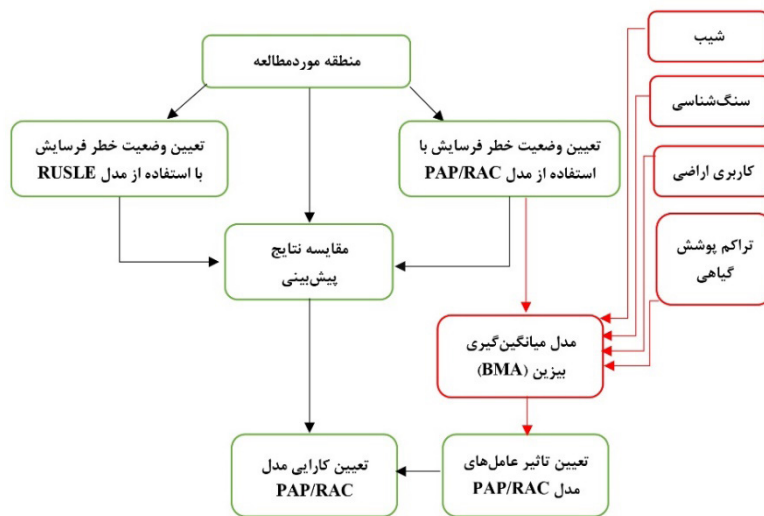
روش میانگین‌گیری بیزی رویکرد جامع برای حل عدم قطعیت مدل است و این توانایی را دارد که با محاسبه توزیع‌های بعدی برای ضرایب و مدل‌ها، مقاومت نتایج را در برابر مشخصات جایگزین ارزیابی کند. این روش به‌عنوان یک روش مفید در آمار از دهه ۱۹۹۰ شناخته شد و در زمینه اقتصادسنجی گسترش یافته است [۳۳ و ۶]. مدل‌سازی برای مدل‌های معمولی غیربیزی شامل انتخاب متغیرهای مستقل، توابع وابسته و تقریب بر اساس آزمون‌های واریانس است که هر ترکیب احتمالی از انتخاب‌های مختلف، مدل متفاوتی را با پاسخ‌های متفاوت تعریف می‌کند [۱۱]. لذا فقدان یک مدل قوی که نشان دهد کدام متغیرها باید در مدل وجود داشته باشند کاملاً آشکار به نظر می‌رسد. در میانگین‌گیری روش بیزی، دو مشکل انتخاب مدل (معیارهای جست‌وجوی مدل و انتخاب مدل) به‌طور طبیعی در میانگین‌گیری مدل ادغام شده است که ترکیبی از اطلاعات همه مدل‌ها را به‌جای استفاده از تنها یک مدل پیش‌بینی می‌کند [۱۱]؛ بنابراین این روش برای برآورد مدل‌ها، اطمینان از انتخاب متغیرها و مدل‌هایی که با وجود این متغیرها تعریف می‌شوند برخوردار است. به‌منظور اجرای مدل میانگین‌گیری بیزی از بسته BMS و BMA در محیط نرم‌افزار R استفاده شده است.

روش انجام پژوهش

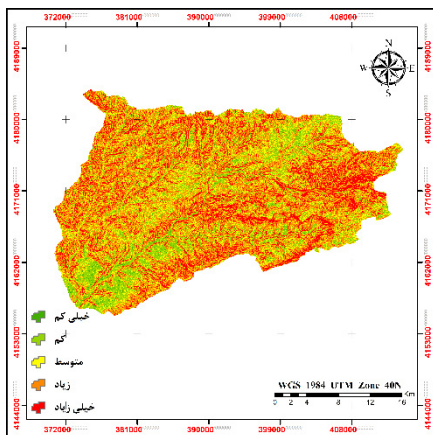
این پژوهش با دو هدف انجام می‌گیرد طی هدف اول این پژوهش، به جهت احقاق هدف اول (اجرای مدل PAP/RAC) در مرحله اول اجرای مدل (رویکرد پیش‌بینی) و گام اول آن، ابتدا نقشه شیب حوضه از مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری تهیه و بر اساس جدول ۱ ارزش‌گذاری و به پنج طبقه تقسیم شد. در گام دوم نقشه سنگ‌شناسی از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ استان گلستان (شیت کوه کورخود) تهیه و بر اساس جدول ۱ ارزش‌گذاری و به پنج طبقه تقسیم شد. در گام سوم نقشه فرسایش‌پذیری که حاصل برهم‌نهی (ادغام) نقشه سنگ‌شناسی و نقشه شیب است، مطابق جدول ۳ و ۴ ارزش‌گذاری و تهیه شد. در گام چهارم کاربری اراضی از طبقه‌بندی تصاویر مردادماه سال ۱۴۰۲ ماهواره سنتینل ۲ در محیط سامانه Google Earth Engine همراه با اطلاعات منطقه‌ای موجود تهیه و به چهار طبقه مسکونی، جنگل، مرتع و

RUSLE بر اساس روش‌های محاسبه عامل‌ها اجرایی آن (جدول ۵) در محیط سامانه Google Earth Engine برای منطقه در بازه زمانی اجرای مدل PAP/RAC (مرداد ۱۴۰۲) اجرا شد. سپس موقعیت مکانی طبقه‌بندی‌های دو مدل از نقشه‌های پیش‌بینی آنان استخراج و درصد تشابه و تفاوت پیش‌بینی مدل PAP/RAC نسبت به مدل RUSLE تعیین و مقایسه شد. در نهایت با در نظر گرفتن مساحت هر طبقه (هر هکتار) به‌عنوان حجم جامعه آماری و استفاده از رابطه ۲ و ۳، تعداد نقاط تصادفی تعیین و با استفاده از دستور Create Random points متناسب با محدوده طبقات فرسایشی، در نرم‌افزار ArcGIS نقاط تصادفی جانمایی شد و بر اساس ارزش هر نقطه در عامل‌های مدل (شیب، سنگ‌شناسی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی) با استفاده از روش میانگین‌گیری بیزین (BMA) میزان تأثیر هر عامل بروی نقشه پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش آبی مدل PAP/RAC، در محیط برنامه R مشخص شد. شکل ۲ مراحل انجام پژوهش را نمایش می‌دهد.

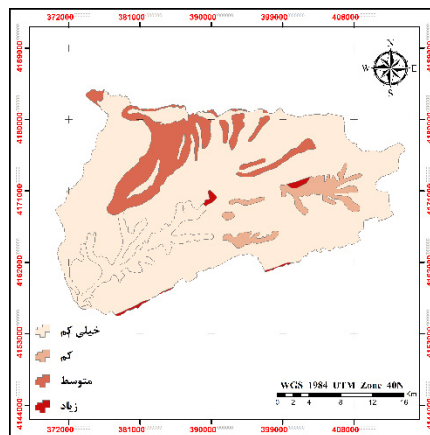
زراعت تقسیم‌بندی و مطابق جدول ۲ ارزش‌گذاری شد. در گام پنجم نقشه تراکم پوشش گیاهی با استفاده از شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI) برای بازه زمانی مردادماه سال ۱۴۰۲ در محیط سامانه Google Earth Engine محاسبه و مطابق جدول ۲ ارزش‌گذاری شد. در گام ششم نقشه حفاظت خاک از ادغام نقشه کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی مطابق جدول ۳ ایجاد شد. در گام هفتم نقشه وضعیت خطر فرسایش پیش‌بینی‌شده که تأثیر عوامل شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و پوشش زمین را در نظر می‌گیرد از ادغام نقشه فرسایش‌پذیری (ادغام شیب و سنگ‌شناسی) و نقشه حفاظت خاک مطابق جدول ۳ و ۴ ایجاد شد. پس از ایجاد نقشه وضعیت خطر فرسایش منطقه، با رجوع به منطقه و با استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای Google Earth، حالت‌های فرسایشی منطقه به جهت انجام رویکرد توصیفی مدل، برداشت و در نهایت با جانمایی حالت‌های فرسایشی برداشت‌شده بروی نقشه پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش، رویکرد ادغام مدل اجرا گردید. هم‌چنین به جهت احقاق هدف (دوم) تعیین کارایی رویکرد و مدل PAP/RAC در این پژوهش، ابتدا مدل



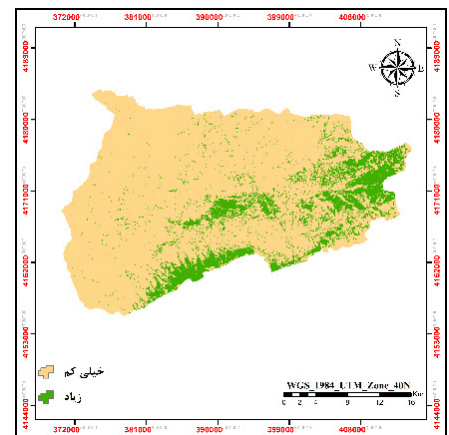
شکل ۲: مراحل انجام پژوهش حاضر



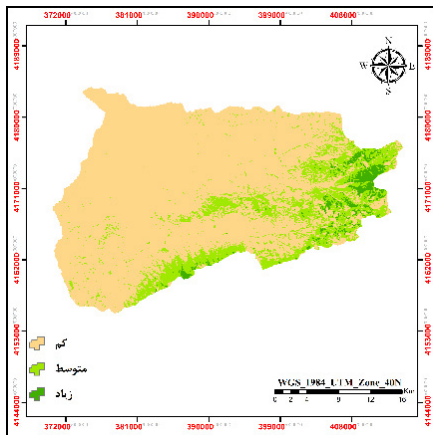
شکل ۳: شیب آبخیز قرناوه



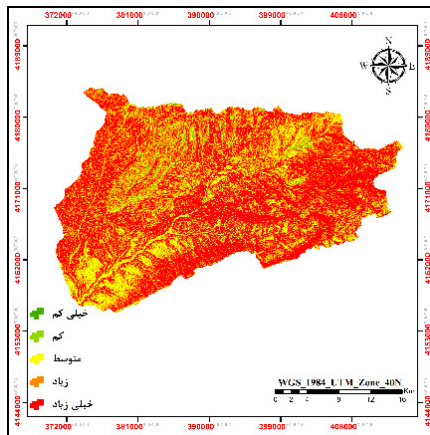
شکل ۴: واحدهای سنگی آبخیز قرناوه



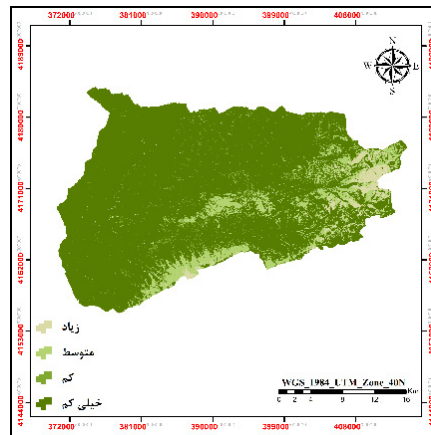
شکل ۵: کاربری اراضی آبخیز قرناوه



شکل ۶: تراکم پوشش گیاهی آبخیز قرناوه



شکل ۷: فرسایش پذیری آبخیز قرناوه

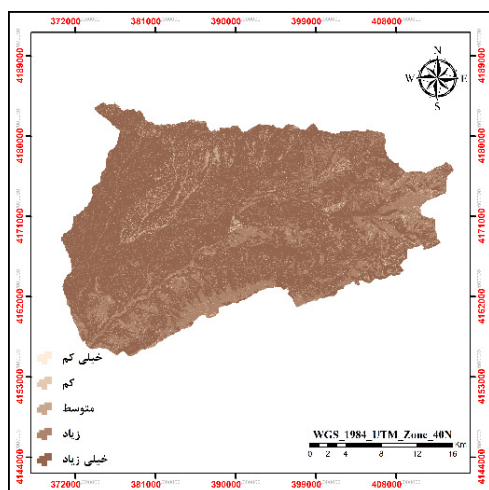


شکل ۸: حفاظت خاک آبخیز قرناوه

ادغام و سپس متناسب با جدول ۴ طبقه‌بندی شد. شکل ۹ نقشه وضعیت خطر فرسایش آبی حوضه را نشان می‌دهد. مساحت طبقه‌بندی‌های وضعیت فرسایش حوضه در جدول ۶ ارائه شده است. پس از ایجاد نقشه وضعیت خطر فرسایش، با رجوع به منطقه و با استفاده از عکس‌های هوایی، حالت‌های فرسایشی منطقه به جهت انجام مرحله دوم (رویکرد توصیفی) مدل، برداشت و در نهایت با جانمایی حالت‌های فرسایشی برداشت شده بروی نقشه پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش، مرحله سوم (رویکرد ادغام) مدل اجرا می‌گردد که در این پژوهش از آن صرفه نظر شد (شکل ۹).

جدول ۶: مساحت طبقات خطر فرسایش و رسوب‌زایی آبخیز قرناوه با توجه به مدل PAP/RAC

طبقه‌بندی	میزان خطر	مساحت (کیلومتر مربع)
۱	خیلی کم	۰/۱۹
۲	کم	۳/۳۴
۳	متوسط	۳۴/۹۴
۴	زیاد	۲۲۷/۲۸
۵	خیلی زیاد	۵۱۴/۵۳



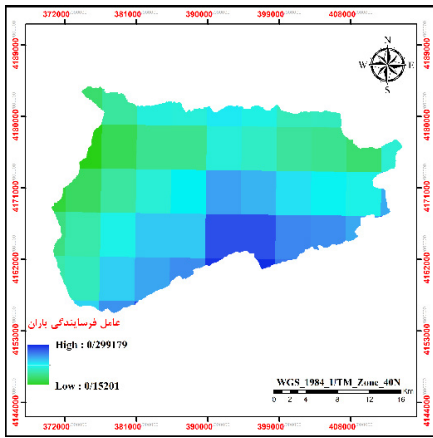
نتایج

نتایج مدل و رویکرد PAP/RAC

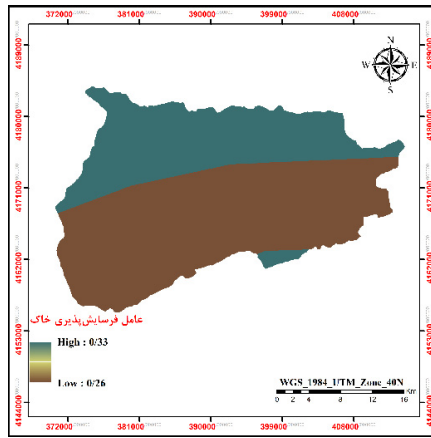
شکل ۳ الی ۸ عامل‌های شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی، حفاظت خاک و فرسایش‌پذیری مدل PAP/RAC پس از ارزش‌گذاری بر اساس دستورالعمل‌های جدول ۱ الی ۸ را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۳ آبخیز قرناوه، حداقل، حداکثر و میانگین شیب به ترتیب صفر، ۱۳۵/۶۲ و ۲۴/۲۵ درصد است که از مساحت کل این حوضه مطابق دستورالعمل دسته‌بندی مدل، ۹/۸۳، ۱۴۱/۳۰، ۱۸۲/۷۸، ۲۸۵/۵۵ و ۱۶۰/۸۳ کیلومتر مربع به ترتیب دارای شیب خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد است و مطابق شکل ۴ واحدهای سنگ‌شناسی آبخیز قرناوه، کم‌ترین و بیش‌ترین مساحت واحد سنگی با ۵/۲۴ و ۵۹۰/۱۱ کیلومتر مربع، به ترتیب مربوط به سنگ‌آهک و لس است که از مساحت کل آبخیز قرناوه مطابق دستورالعمل دسته‌بندی مدل، ۶۵۳/۵۰، ۳۴/۸۱، ۹۰/۷۳ و ۵/۲۴ کیلومتر مربع به ترتیب دارای مقاومت خیلی کم، کم، متوسط و زیاد است. شکل ۵ کاربری اراضی آبخیز قرناوه را نشان می‌دهد. کاربری‌های اراضی این حوضه شامل زراعت، باغات، مراتع، مسکونی و جنگل می‌باشد و مطابق با دستورالعمل دسته‌بندی مدل، ۶۶۰/۲۴ و ۱۲۳/۹۹ کیلومتر مربع به ترتیب دارای نقش حفاظتی خیلی کم و زیاد است. شکل ۶ تراکم پوشش گیاهی را نشان می‌دهد، دامنه تغییرات شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی در تابستان سال ۱۴۰۲، ۰/۲۹- تا ۰/۴۵ است که مطابق شرایط منطقه ۰/۲۹- تا ۰/۱۵ دسته کم، ۰/۱۵ تا ۰/۳۰ دسته متوسط و ۰/۳۰ تا ۰/۴۵ دسته زیاد در نظر گرفته شد که از مساحت کل آبخیز قرناوه مطابق دستورالعمل مدل، ۶۳۳/۷۵، ۱۳۲/۰۳ و ۲۰/۷۵ کیلومتر مربع به ترتیب دارای تراکم کم، متوسط و زیاد است.

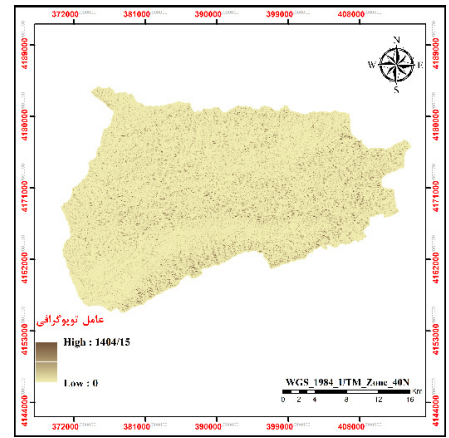
جهت تهیه نقشه وضعیت خطر فرسایش آبی آبخیز قرناوه، نقشه حفاظت خاک با نقشه فرسایش‌پذیری (تلفیق شیب با سنگ‌شناسی)



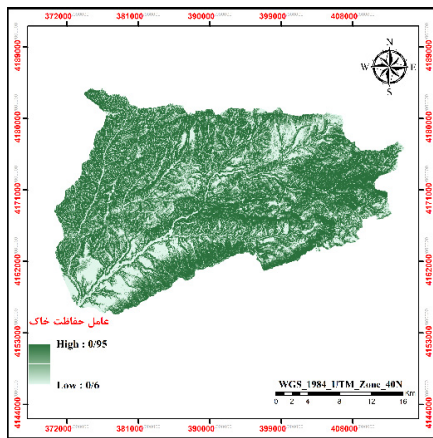
شکل ۱۰: عامل فرساینده‌گی باران آبخیز
قرناوه



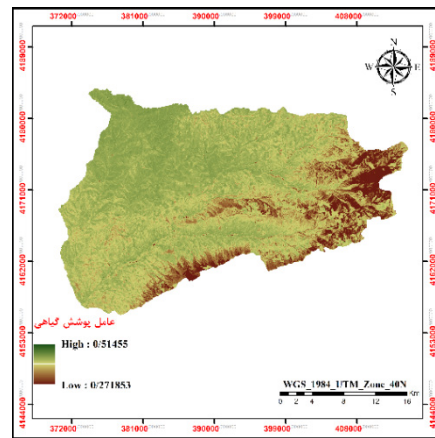
شکل ۱۱: عامل فرسایش‌پذیری خاک
آبخیز قرناوه



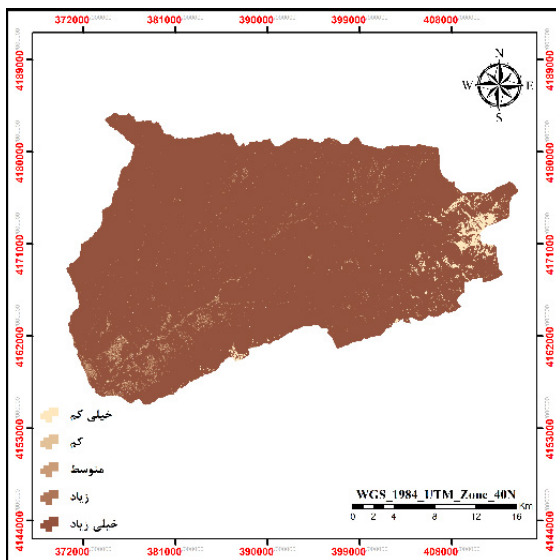
شکل ۱۲: عامل توپوگرافی آبخیز قرناوه



شکل ۱۳: عامل حفاظت خاک آبخیز قرناوه



شکل ۱۴: عامل پوشش گیاهی آبخیز قرناوه



شکل ۱۵: وضعیت خطر فرسایش آبی آبخیز قرناوه با توجه به
مدل RUSLE

۱۰ تن در هکتار در سال)، کم (۱۰ الی ۱۵ تن در هکتار در سال)، متوسط (۱۵ الی ۳۰ تن در هکتار در سال)، زیاد (۳۰ الی ۵۰ تن

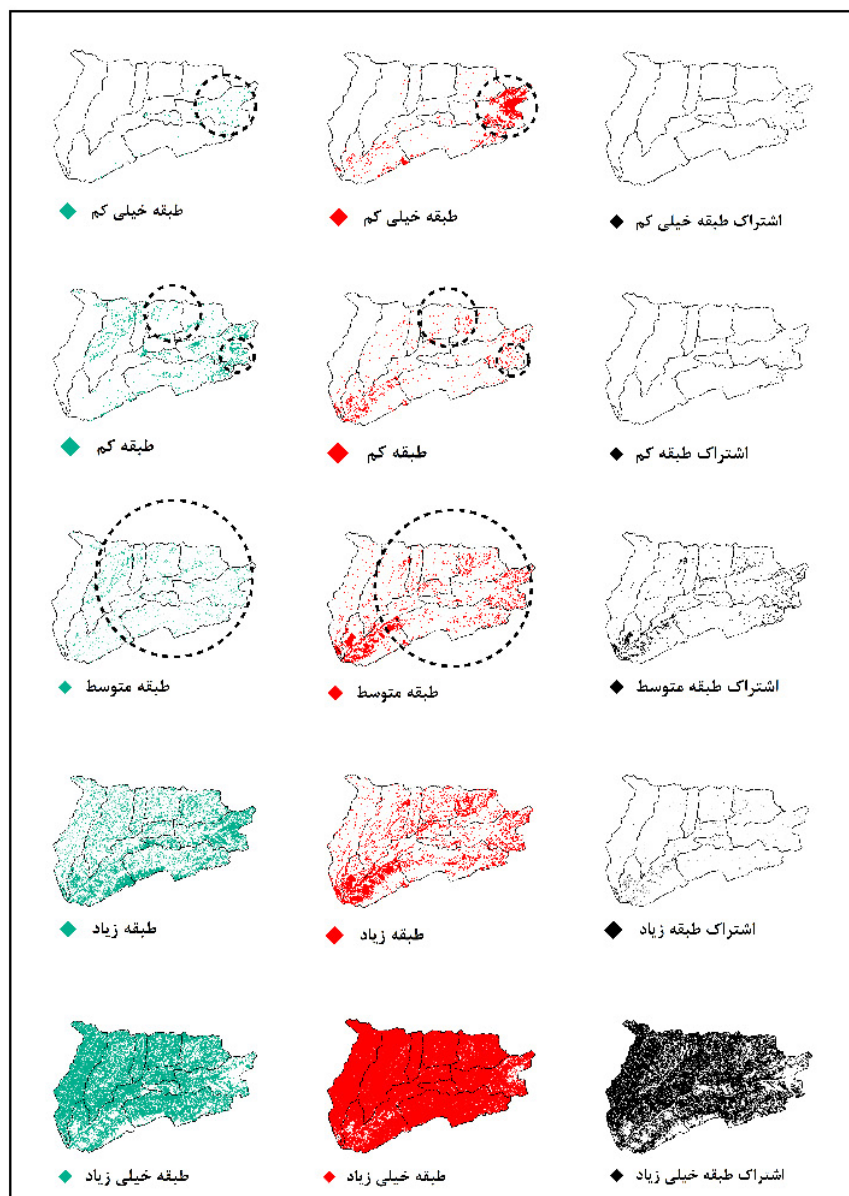
جدول ۷: مساحت طبقات خطر فرسایش و رسوب‌زایی آبخیز
قرناوه با توجه به مدل RUSLE

طبقه‌بندی	میزان خطر	مساحت (کیلومترمربع)
۱	خیلی کم	۱۲/۵۷
۲	کم	۱/۶۶
۳	متوسط	۷/۶۱
۴	زیاد	۱۳/۶۹
۵	خیلی زیاد	۷۴۸/۶۸

شکل ۹: وضعیت خطر فرسایش آبی آبخیز قرناوه با توجه به
مدل PAP/RAC

نتایج مدل RUSLE

شکل ۱۰ الی ۱۴ نقشه عامل‌های فرساینده‌گی باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی (طول و شیب)، پوشش گیاهی و عامل حفاظت خاک در مدل RUSLE را نشان می‌دهد. جهت تهیه نقشه وضعیت خطر فرسایش آبی آبخیز قرناوه، نقشه عامل‌های مذکور مطابق رابطه (۱) در هم ضرب شده و سپس به پنج طبقه خیلی کم (کم‌تر از



شکل ۱۶: طبقات پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش با توجه به مدل PAP/RAC و RUSLE

این می‌باشد بیش‌ترین تشابه پیش‌بینی مدل‌ها در موقعیت‌های مکانی مشترک، مربوط به دسته‌بندی خیلی زیاد می‌باشد. هم‌چنین شکل ۱۶ پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش آبی حاصل از دو مدل PAP/RAC و RUSLE و مساحت‌های مشترک در پیش‌بینی را با توجه به هر طبقه نشان می‌دهد.

شکل ۱۶ نتایج پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش آبی حاصل از دو مدل PAP/RAC و RUSLE را به تفکیک طبقات نشان می‌دهد. در شکل ۱۶، ستون اول نقشه‌ها، نتایج مدل PAP/RAC، ستون دوم نتایج مدل RUSLE و ستون سوم موقعیت‌های مکانی مشترک در پیش‌بینی است. نتایج بصری این نقشه‌ها فارغ از صحت پیش‌بینی، گویای پراکنش همسو و هم‌راستای پیش‌بینی دو مدل در طبقه‌بندی‌ها متناسب با موقعیت کلی زیرحوضه‌ها است. مطابق شکل ۱۶ دایره‌ها

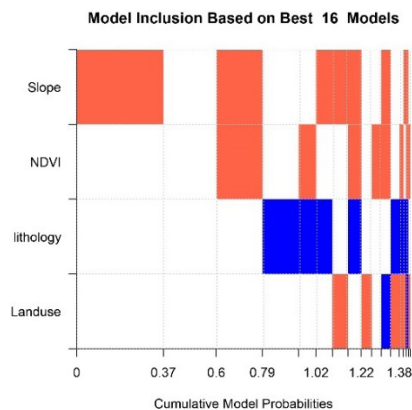
در هکتار در سال) و شدید (بیش‌تر از ۵۰ تن در هکتار در سال) دسته‌بندی شد. شکل ۱۵ نقشه وضعیت خطر فرسایش آبی حوضه را نشان می‌دهد. مساحت طبقه‌بندی‌های وضعیت فرسایش حوضه در جدول ۷ ارائه شده است.

مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل PAP/RAC و RUSLE

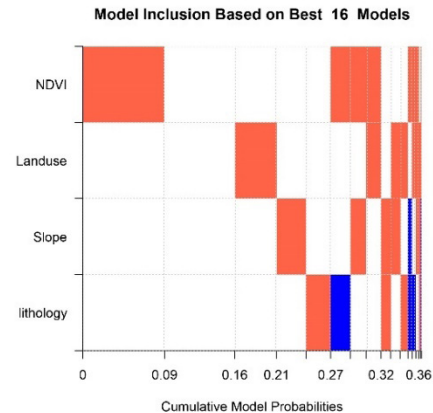
جدول ۸ نتایج مقایسه نقشه پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش آبی حاصل از دو مدل PAP/RAC و RUSLE می‌باشد. در جدول ۸، ستون اول در واقع دسته‌بندی‌های خطر فرسایش را نشان می‌دهد. ستون دوم، مجموع مساحت پیش‌بینی دو مدل در هر طبقه می‌باشد و ستون سوم، مقدار مساحت مشترکی است که دو مدل در طبقه مذکور با توجه به موقعیت مکانی برآورد نموده‌اند. نتایج جدول ۸ گویای

جدول ۸: مقایسه پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش با توجه به مدل PAP/RAC و RUSLE

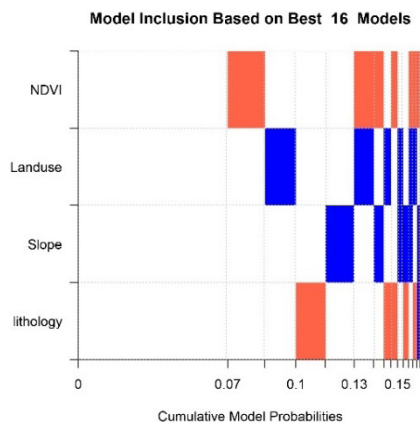
طبقات	مجموع مساحت پیش‌بینی در مدل‌های PAP/RAC و RUSLE (کیلومتر مربع)	مساحت تشابه در پیش‌بینی (کیلومتر مربع)	مساحت تفاوت در پیش‌بینی (کیلومتر مربع)
خیلی کم	۱۲/۷۲۲	۰/۰۴۱	۱۲/۶۸۱
کم	۴/۹۷۵	۰/۰۳۵	۴/۹۴
متوسط	۴۱/۵۰۸	۱/۰۵۶	۴۰/۴۵۲
زیاد	۲۳۲/۰۹۵	۸/۸۸۱	۲۲۳/۲۱۴
خیلی زیاد	۷۵۳/۰۴۲	۵۱۰/۱۸۰	۲۴۲/۸۶۲



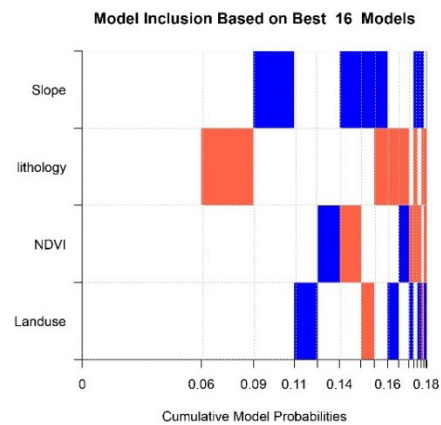
شکل ۱۷: نمودار چگالی احتمالی حضور در الگو عامل‌ها با توجه به دسته‌بندی وضعیت خطر فرسایش خیلی کم



شکل ۱۸: نمودار چگالی احتمالی حضور در الگو عامل‌ها با توجه به دسته‌بندی وضعیت خطر فرسایش کم



شکل ۱۹: نمودار چگالی احتمالی حضور در الگو عامل‌ها با توجه به دسته‌بندی وضعیت خطر فرسایش متوسط



شکل ۲۰: نمودار چگالی احتمالی حضور در الگو عامل‌ها با توجه به دسته‌بندی وضعیت خطر فرسایش زیاد

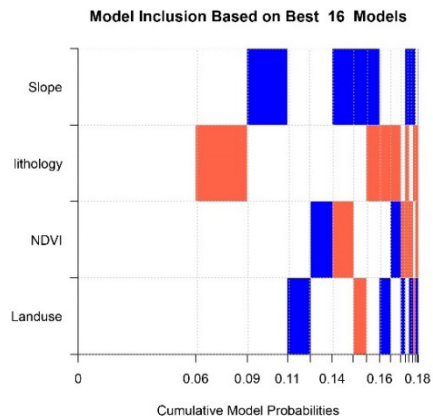
در الگوهای برتر را برای عامل‌های شیب، سنگ‌شناسی، تراکم پوشش گیاهی و کاربری اراضی در طبقه‌بندی‌های خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد نشان می‌دهد. تفسیر خروجی مدل میانگین‌گیری بیزین نیازمند درک بالایی می‌باشد چرا که تعداد و نحوه تعریف متغیرها می‌توانند بروی خروجی مدل تأثیرگذار باشد. در تفسیر خروجی مدل میانگین‌گیری بیزین (شکل ۱۷ تا ۲۱)، رنگ آبی نشان‌دهنده رابطه مثبت، رنگ قرمز نشان‌دهنده رابطه منفی و

در هر طبقه همسو بودن شناسایی را در هر زیرحوضه نشان می‌دهد.

بررسی عامل‌های تأثیرگذار بر نتیجه پیش‌بینی مدل PAP/RAC

در بررسی عدم قطعیت و تأثیر عامل‌های موثر بر نقشه پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش حاصل از مدل کیفی PAP/RAC، از مدل میانگین‌گیری بیزین استفاده شد. شکل ۱۷ تا ۲۱ احتمال حضور

رنگ سفید نشان‌دهنده عدم حضور و تأثیر در خروجی مدل است. در این شکل محور عمودی (Y) متغیرها و محور افقی (X) جرم مدل‌ها را نشان می‌دهد. در محور افقی قسمت‌ها اول بهترین مدل یا بیش‌ترین جرم (PMP)^۱ را نشان می‌دهد.



شکل ۲۱: نمودار چگالی احتمالی حضور در الگو عامل‌ها با توجه به دسته‌بندی وضعیت خطر فرسایش خیلی زیاد

شکل ۱۷ چگالی احتمالی حضور در الگوهای برتر را برای عامل‌های ورودی مدل PAP/RAC (شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی) با توجه به خروجی مدل یا به عبارت دیگر میزان تأثیر این عامل‌ها بر روی نقشه پیش‌بینی خطر فرسایش حاصل از مدل PAP/RAC در طبقه‌بندی خیلی کم را نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیش‌ترین جرم (PMP) برای عامل شیب است و در این شکل عامل شیب با رابطه و تأثیرگذاری منفی بر روی نقشه پیش‌بینی خطر فرسایش در طبقه خیلی کم معرفی شده است. به عبارت دیگر در مکان‌هایی که خطر فرسایش با طبقه‌بندی خیلی کم شناسایی شده است، شیب رابطه و تأثیرگذاری منفی بر این نتیجه داشته است. در مقابل سنگ‌شناسی دارای رابطه و تأثیر مثبتی (رنگ آبی) با نتیجه پیش‌بینی خطر فرسایش بوده است. هم‌چنین بایستی توجه نمود که تراکم پوشش گیاهی و کاربری اراضی نیز برخلاف رنگ قرمز، دارای رابطه و تأثیر مثبت در پیش‌بینی خطر فرسایش هستند اما به علت اینکه عدد ارزش‌گذاری آن در مدل PAP/RAC کاملاً عکس عدد ارزش‌گذاری نقشه پیش‌بینی خطر فرسایش است به همین دلیل مدل رابطه را منفی معرفی نموده است بنابراین بایستی در تحلیل توجه داشت که این دو عامل را در تحلیل به صورت عکس معرفی نمود تا نقش ارزش‌گذاری عکس آنان در خروجی مدل برطرف شود.

مطابق شکل ۱۸ بیش‌ترین جرم (PMP) برای عامل تراکم پوشش گیاهی معرفی (آزانتجایی که کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی به علت اینکه عدد ارزش‌گذاری آنان در مدل PAP/RAC کاملاً عکس عدد ارزش‌گذاری نقشه پیش‌بینی خطر فرسایش است به همین دلیل مدل رابطه را منفی معرفی نموده است بنابراین بایستی در تحلیل

1. Posterior Model Probabilities

توجه داشت که این دو عامل را در تحلیل به صورت عکس معرفی نمود تا نقش ارزش‌گذاری عکس در مدل برطرف شود) و رابطه و تأثیرگذاری مثبت بر این نتیجه داشته است. در مقابل سنگ‌شناسی و شیب دارای رابطه و تأثیر منفی (رنگ قرمز) با نتیجه پیش‌بینی خطر فرسایش می‌باشند.

مطابق شکل ۱۹ جرم (PMP) برای عامل‌های شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی تقریباً نزدیک به هم است. در این شکل عامل تراکم پوشش گیاهی و شیب با رابطه و تأثیرگذاری مثبت و سنگ‌شناسی و کاربری اراضی با رابطه و تأثیر منفی بر روی نقشه پیش‌بینی خطر فرسایش در طبقه متوسط معرفی شده است. مطابق شکل ۲۰ و ۲۱ بیش‌ترین جرم (PMP) برای عامل شیب و سنگ‌شناسی است در این شکل عامل شیب با رابطه و تأثیرگذاری مثبت و سنگ‌شناسی با رابطه و تأثیر منفی بر روی نقشه پیش‌بینی خطر فرسایش در طبقه زیاد و خیلی زیاد معرفی شده است.

جدول ۹ نیز نتایج مدل میانگین‌گیری بیزین در احتمال حضور عامل‌های شیب، سنگ‌شناسی، تراکم پوشش گیاهی و کاربری اراضی در الگوهای برتر را نشان می‌دهد. در این جدول ستون اول عامل‌های مدل PAP/RAC که مورد بررسی قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. ستون دوم احتمال حضور مدل (PIP) را نشان می‌دهد در این ستون مجموع احتمال مدل پسین (PMP) برای همه مدل‌هایی که بر پاسخ تأثیر می‌گذارند محاسبه می‌شود و نتیجه آن در قسمت PIP یا احتمال حضور مدل نشان داده می‌شود. ستون چهارم انحراف استاندارد توزیع خلفی و ستون پنجم علامت متغیرها یا نشانه اطمینان را نشان می‌دهد. نشان اطمینان عددی بین صفر و یک است که هرچه قدر به یک نزدیک‌تر باشد، احتمال مثبت بودن میانگین تعداد اعداد (در اکثر مدل‌ها مثبت) بیشتر است و از سوی دیگر هرچه قدر این عدد به صفر نزدیک‌تر باشد، بیشتر این احتمال وجود دارد که میانگین عدد به دست آمده PIP برای آن متغیر حداکثر مدل‌ها منفی باشد [۱۱]. بر اساس توضیحات فوق می‌توان اظهار داشت که نتایج جدول ۱۵ نیز همچون شکل ۱۷ تا ۲۱ گویای احتمال حضور و تأثیرگذاری بالای شیب در طبقه خیلی کم (۰/۵۷)، تراکم پوشش گیاهی در طبقه کم (۰/۴۲)، شب و سنگ‌شناسی در طبقه زیاد و خیلی زیاد (۰/۲ به بالا) است.

بحث

بررسی نتایج پیش‌بینی مدل PAP/RAC گویای این می‌باشد که ۷۴۱/۸۱ کیلومتر مربع از مساحت حوضه در معرض خطر فرسایش زیاد و خیلی زیاد می‌باشد هم‌چنین نتایج پیش‌بینی مدل RUSLE گویای این می‌باشد که ۷۶۲/۳۷ کیلومتر مربع از مساحت حوضه در معرض خطر فرسایش زیاد و خیلی زیاد می‌باشد؛ که با توجه به مقایسه کلی نتایج دو مدل، اختلاف پیش‌بینی آنان ۲۰/۵۶ کیلومتر مربع می‌باشد و هم‌چنین فارغ از دقیق بودن موقعیت مکانی، پراکنش پیش‌بینی مدل PAP/RAC دارای نتیجه و عملکرد همسویی

جدول ۹: احتمال حضور و تأثیرگذاری عامل‌های مدل PAP/RAC در نقشه پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش مدل PAP/RAC

نشان اطمینان	انحراف استاندارد توزیع خلفی	میانگین وزنی توزیع ضرایب پسین	احتمال حضور مدل	متغیرها	طبقه
۰	۰/۲۵۷	-۰/۲۳۷	۰/۵۷۸	شیب	خیلی کم
۰	۰/۱۷۶	-۰/۰۸۴	۰/۳۱۱	NDVI	
۱	۰/۱۸۷	۰/۰۸۴	۰/۳۰۲	سنگ‌شناسی	
۰/۲۱۵	۰/۰۸۱	-۰/۰۰۴	۰/۱۶۵	کاربری اراضی	
-	-	۲/۸۰۷	۱	Intercept	
۰/۰۶۸	۰/۱۲۹	-۰/۰۳۱	۰/۲۱۸	شیب	کم
۰	۰/۲۶۳	-۰/۱۶۳	۰/۴۲۴	NDVI	
۰/۳۹۳	۰/۱۶۸	۰/۰۰۰۹	۰/۲۱۴	سنگ‌شناسی	
۰	۰/۱۵۲	-۰/۰۴۹	۰/۲۴۶	کاربری اراضی	
-	-	۳/۴۰۲	۱	Intercept	
۰/۹۷۱	۰/۱۱۵	۰/۰۱۷	۰/۱۷۴	شیب	متوسط
۰	۰/۱۶۵	-۰/۰۶۲	۰/۲۴۸	NDVI	
۰/۰۶۹	۰/۱۰۴	-۰/۰۱۰	۰/۱۶۹	سنگ‌شناسی	
۱	۰/۱۴۲	۰/۰۴۳	۰/۲۱۴	کاربری اراضی	
-	-	۵/۰۸۶	۱	Intercept	
۱	۰/۲۵۱	۰/۱۰۶	۰/۲۹۰	شیب	زیاد
۰/۴۶۷	۰/۲۱۰	-۰/۰۴۲	۰/۱۹۹	NDVI	
۰	۰/۱۴۴	-۰/۰۶۲	۰/۲۷۸	سنگ‌شناسی	
۰/۷۴۰	۰/۱۷۱	-۰/۰۰۰۶	۰/۱۷۹	کاربری اراضی	
-	-	۱۳/۶۴۰	۱	Intercept	
۱	۰/۲۵۱	۰/۱۰۶	۰/۲۹۰	شیب	خیلی زیاد
۰/۴۶۷	۰/۲۱۰	-۰/۰۴۲	۰/۱۹۹	NDVI	
۰	۰/۱۴۴	-۰/۰۶۲	۰/۲۷۸	سنگ‌شناسی	
۰/۷۴۰	۰/۱۷۱	-۰/۰۰۰۶	۰/۱۷۹	کاربری اراضی	
-	-	۱۳/۶۴	۱	Intercept	

منفی و در طبقات متوسط، زیاد و خیلی زیاد دارای تأثیرگذاری مثبت بروی نقشه پیش‌بینی خطر فرسایش مدل PAP/RAC است. هم‌چنین در طبقه کم تراکم پوشش گیاهی با بیشترین جرم در الگوهای توسعه داده‌شده، دارای تأثیرگذاری مثبت بروی نقشه پیش‌بینی خطر فرسایش مدل PAP/RAC را دارد. نتیجه کلی مدل میانگین‌گیری بیزین و توجه به شکل ۱۶ به‌طورکلی اعلام می‌دارد که ارزش‌گذاری در زمینه عامل شیب با توجه به تأثیر آن در کل طبقات، جهت پیش‌بینی بهتر نیازمند دقت در طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری متناسب با منطقه است چراکه نتایج خروجی مدل تأثیرپذیری بالایی را نسبت به این عامل دارد. هم‌چنین مقایسه نتایج مدل PAP/RAC با مطالعه صابرچناری و

با پیش‌بینی مدل RUSLE در بیشتر طبقه‌بندی‌ها است؛ اما نتایج حاصل از مقایسه دقیق مکانی نقشه پیش‌بینی وضعیت خطر فرسایش آبی حاصل از دو مدل PAP/RAC و RUSLE نشان داد که ۶۷/۷۴ درصد تشابه مکانی در پیش‌بینی آنان مربوط به طبقه خیلی زیاد، ۳/۸۲ درصد تشابه مربوط به طبقه زیاد، ۲/۵۴ درصد تشابه مربوط به طبقه متوسط، ۰/۷ درصد تشابه مربوط به طبقه کم و ۰/۳۲ درصد تشابه مربوط به طبقه خیلی کم می‌باشد. هم‌چنین بررسی میزان تأثیر عامل‌های مدل (شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی) بروی نقشه پیش‌بینی خطر فرسایش با استفاده از رویکرد میانگین بیزین (BMA)، گویای این می‌باشد که شیب در طبقه خیلی کم با بالاترین جرم در الگوهای توسعه داده‌شده، دارای تأثیرگذاری

ضمنا پیشنهاد می‌گردد جهت بهبود کارایی مدل، با ارائه سناریوهای مختلف در خصوص اضافه نمودن عامل‌های ورودی جدید به مدل (رطوبت، جهت شیب و غیره) نتیجه و دقت آن در سایر مطالعات بررسی گردد.

منابع

- 1- Ashiagbor, G., Forkuo, E. K., Laari, P., and Aabeyir, R. 2013. Modeling soil erosion using RUSLE and GIS tools. *International Journal of Remote Sensing and Geoscience*. 2(4): 1-17.
- 2- Benchettouh, A., Jebari, S., Kouri, L., and Kherchi, F. 2022. Mapping of soil erosion using the PAP/RAC directive in the Seklafa catchment, Djebel Amour region (Saharan Atlas-Algeria). *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*. 8(2): 2419-2428
- 3- Blanco, H., and Lal, R. 2008. *Principles of soil conservation and management*. New York: Springer.
- 4- Davenport, T. E. 2002. *The watershed project management guide*. CRC Press.
- 5- Diani, K., Ettazarini, S., Hahou, Y., El Belrhiti, H., Allaoui, W., Mounir, K., and Gourfi, A. 2023. Identification of soil erosion sites in semiarid zones: Using GIS, remote sensing, and PAP/RAC model. In *Handbook of Hydroinformatics*. 169-183
- 6- Draper, D. 1995. Assessment and propagation of model uncertainty. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*. 57(1): 45-70.
- 7- Elbadaoui, K., Mansour, S., Ikirri, M., Abdelrahman, K., Abu-Alam, T., and Abioui, M. 2023. Integrating Erosion Potential Model (EPM) and PAP/RAC Guidelines for Water Erosion Mapping and Detection of Vulnerable Areas in the Toudgha River Watershed of the Central High Atlas, Morocco. *Land*. 12(4): 837.
- 8- Erfanian, M., Ghaharahmani Saatloo, P. and Saadat, H. 2015. Assessment of Soil Erosion Risk using a Fuzzy Model in Gharnaveh Watershed, Golestan. *Journal of Water and Soil Conservation*. 21(6): 135-154. (In Persian)
- 9- Esmaeili Gholzom, H., Ahmadi, H., Moeini, A.,

همکاران [۳۴] که ۶۸ درصد مساحت حوضه را در طبقه خطر زیاد و بسیار زیاد با مدل دمپستر-شفر برآورد نمودند، نشان می‌داد که تشابه بالایی در نتایج نهایی وجود دارد. مطالعه عرفانیان و همکاران [۸] در تهیه نقشه خطر پتانسیل فرسایش خاک با مدل RUSLE و استفاده از منطق فازی نشان داد با صحت ۷۶ درصدی آنان در اعلام خطر زیاد فرسایش، نتایج این مطالعه نیز همچون نتایج مدل آنان، تأکید بر خطر زیاد فرسایش می‌باشد. مطالعه تاجیکی و همکاران [۳۷] در بررسی اثربخشی اقدامات آبخیزداری بر فرسایش و رسوب‌دهی نیز بیانگر تأیید کارایی مدل در برآورد وضعیت فرسایش منطقه بود. اما بر اساس مطالعه البادوی و همکاران [۷] در ادغام مدل پتانسیل فرسایش (EPM) و دستورالعمل‌های PAP/RAC و بیان اینکه مدل EPM می‌تواند برای طراحی اقدامات مؤثر کنترل فرسایش استفاده شود و مدل PAP/RAC می‌تواند برای توسعه یک استراتژی جامع برای مدیریت پایدار حوضه استفاده شود. بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان اعلام داشت مدل PAP/RAC بهترین و ساده‌ترین مدل کیفی در جهت برآورد خطر فرسایش آبی حوزه‌های آبخیز فاقد یا با کمبود اطلاعات به‌منظور ارزیابی اولیه حوضه‌ها می‌باشد که جهت بهبود کارایی مدل، می‌توان به ارائه سناریوهای مختلف در خصوص اضافه نمودن عامل‌های ورودی جدید به مدل (رطوبت، جهت شیب و غیره)، نتیجه و دقت آن را توسعه داد.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با بهره‌گیری از رویکرد و مدل کیفی PAP/RAC به پیش‌بینی و تعیین وضعیت خطر فرسایش آبی آبخیز قرناوه و مقایسه نتایج آن با مدل RUSLE به‌منظور تعیین کارایی نتایج مدل کیفی PAP/RAC و هم‌چنین تعیین عامل‌های تأثیرگذار در نتیجه پیش‌بینی این مدل با روش میانگین‌گیری بیزین به جهت ارزیابی، شناسایی و اولویت‌بندی بهتر نقاط در معرض خطر فرسایش آبی پرداخته است. نتایج پژوهش بیانگر پتانسیل بالای این زیرحوضه در فرسایش و هدررفت خاک با توجه به عامل‌های مدل کیفی PAP/RAC و RUSLE می‌باشد و هم‌چنین مقایسه نتایج مدل کیفی PAP/RAC با مدل‌های RUSLE گویای عملکرد خوب و نیازمندی دقت به ارزش‌گذاری شیب در مدل با توجه به نتایج مدل میانگین‌گیری بیزین به‌منظور ارائه نتایج هم‌سوتر با مدل RUSLE است. لذا بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان اعلام داشت مدل PAP/RAC با شرط دقت در تأثیرگذاری و طبقه‌بندی عامل‌های آن متناسب با کشور ایران، بهترین و ساده‌ترین مدل کیفی در جهت برآورد خطر فرسایش آبی حوزه‌های آبخیز فاقد یا با کمبود اطلاعات می‌باشد که با توجه به رویکرد توصیفی و رویکرد ادغام، ضمن پیش‌بینی خوب می‌تواند روند تغییرات حالت فرسایش را در هر طبقه نیز نشان دهد و ارائه راهبردهای مؤثر حفاظت آب‌و خاک در راستای کاهش روند و توسعه فرسایش خاک را میسر سازد و برای توسعه یک استراتژی جامع برای مدیریت پایدار حوضه استفاده شود.

de l'érosion hydrique et des facteurs causaux, Cas de l'oued Sahla, Rif Central, Maroc. *Zeitschrift für Geomorphologie*. 59(4): 495-514

19- Mezösi, G., and Bata, T. 2016. Estimation of the changes in the rainfall erosivity in Hungary. *Journal of Environmental Geography*. 9(3-4): 43-48.

20- Mohammadi, S., Karimzadeh, H., and Alizadeh, M. 2018. Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Iranian Journal of Ecohydrology*. 5(2): 551-569. (In Persian)

21- Nainiva, S. P., and Parichereh, M. 2023. Erosion Hazard classification using the Fargas qualitative model in the Chehelgazi Sub-Watershed of Kurdistan province. *Integrated Watershed Management*. 3(1): 89-99 (In Persian).

22- Nainiva, S.P., and Parichereh, M. 2022. Evaluation and prioritization of the hazard of water erosion in Chehelgazi Sub-Watershed of Kurdistan province. *Amphibious Science and Technology*. 3(2): 1-13. (In Persian).

23- Najia, F., Bouchta, E., Mohamed, M., Benzougagh, B., and El Brahimi, M. 2021. Evaluation of water erosion by mapping and application of the PAP/RAC method in the perifer of ouazzane. *Ecology, Environnement and Conservation*, 12: 339-350.

24- Nanjundeswaraswamy, T. S., and Divakar, S. 2021. Determination of sample size and sampling methods in applied research. *Proceedings on Engineering Sciences*. 3(1): 25-32.

25- Nguyen, P., Shearer, E. J., Tran, H., Ombadi, M., Hayatbini, N., Palacios, T., Huynh, P., Braithwaite, D., Updegraff, G., and Hsu, K. 2019. The CHRS Data Portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Scientific data*. 6(1): 1-10.

26- Nojavan, M., Mohamadi, A.S., and Gholami, V. 2012. Determining the intensity of erosion using Fargas and BLM models. Case: Bandera watershed. *Geography and Development*. 10(29): 119-130 (In Persian)

27- Olaya, V., and Conrad, O. 2009. Geomorphometry in SAGA. *Developments in Soil Science*. 33: 293-308.

28- Ousmana, H., El Hmaid, A., Essahlaoui, A.,

and Motamed Vaziri, B. 2020. Erosion risk assessment and identification of susceptibility lands using the ICONA model and RS and GIS techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*: 1-18.

10- Hafezi Moghaddas, N., Nikudel, M., and Bahrami, K. 2011. Evaluation of collapsibility of loess deposits of Gharnaveh catchment in north of Kalale, Golestan province. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*. 4(1): 39-46. (In Persian)

11- Hatamerad, S., Haghghat, J., Asgharpur H., and Adrangi, B. 2022. Evaluation of macro factors affecting stock price index: Bayesian averaging approach. *Quarterly Journal of Fiscal and Economic Policies*. 10 (37): 73-111. (In Persian)

12- Heydarnejad, S., Ranjbar Fordoei, A., Mousavi, S. H., and Mirzaei, R. 2020. Estimation of soil erosion using SLEMSA model and OWA approach in Lorestan Province (Iran). *Environmental Resources Research*. 8(1): 11-24.

13- Irvem, A., Topaloğlu, F., and Uygur, V. 2007. Estimating spatial distribution of soil loss over Seyhan River Basin in Turkey. *Journal of Hydrology*. 336(1-2): 30-37.

14- Jokar Sarhangi, E., and Dehghan Chachkami, M. 2022. Efficiency Evaluation of RUSLE and ICONA models in erosion zoning of Baladeh watershed, Mazandaran province. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 11(34): 159-178. (In Persian).

15- Labbaci, A., Marghadi, S., Laaribya, S., and Moukrim, S. 2020. Integrating Sentinel-2 Data and PAPCAR Model to Map Water Erosion: Case of Beni Boufrah Watershed. *Rwanda Journal of Engineering, Science, Technology and Environment*. 3(1).

16- Lin, C. Y., Lin, W. T., and Chou, W. C. 2002. Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. *Soil and Tillage Research*. 68(2): 143-152.

17- Ma, X., Zhao, C., and Zhu, J. 2021. Aggravated risk of soil erosion with global warming—A global meta-analysis. *Catena*, 200,105129.

18- Mesrar, H., Sadiki, A., Navas, A., Faleh, A., Quijano, L., and Chaaouan, J. 2015. Modélisation

- 35- Sadoddin, A., Shahabi, M., and Bai, M. 2016. Assessment and comprehensive management of watersheds: Principles and approaches of modeling and decision-making, publications of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
- 36- Tahouri, J., Sadiki, A., Karrat, L. H., Johnson, V. C., weng Chan, N., Fei, Z., and Te Kung, H. 2022. Using a modified PAP/RAC model and GIS-for mapping water erosion and causal risk factors: Case study of the Asfalou watershed, Morocco. *International Soil and Water Conservation Research*. 10(2): 254-272.
- 37- Tajiki, M., Najafinejad, A., Gholipour, M., Siroosi, H., Sadodin, A., and Sheikh, V B. 2022. Efficiency of Watershed Management Measures on Erosion and Sedimentation of Qarnaveh watershed, Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research*. 13(26): 163-177. doi:10.52547/jwmr.13.26.163. (In Persian).
- 38- Wener, C.G. 1981. Soil conservation in Kenya, Nairobi, Ministry of Agriculture, Soil Conservation Extension Unit.
- 39- Tajiki, M., Najafinejad, A., Gholipour, M., Siroosi, H., Sadodin, A., and Sheikh, V B. 2022. Efficiency of Watershed Management Measures on Erosion and Sedimentation of Qarnaveh watershed, Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research*. 13(26): 163-177. doi:10.52547/jwmr.13.26.163. (In Persian).
- Bekri, H., and El Ouali, A. 2017. Modélisation et cartographie du risque de l'érosion hydrique par l'application des SIG et des directives PAP/CAR. Cas du bassin versant de l'Oued Zgane (Moyen Atlas tabulaire, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de La Terre*. 39: 103-119.
- 29- PAP/CAR. 1998a. Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. PAP-S/PP/GL.1.split, centre d'activités régionales pour le programme d'actions prioritaires (PAM/PNUE), en collaboration avec la FAO.
- 30- PAP/CAR. 1998b. Directives pour l'approche int_egr_ee au d_veloppement, _a la gestion et _a l'utilisation des ressources en eau, centre d'activit_es r_egionales pour le Programme d'actions prioritaires [rapport]. - [s.l.] : PAP-3/1998/G.1. Split, 1998a.
- 31- PAP/CAR. 1998c. Rapport de l'Atelier sur l'_etat de l'_erosion des sols par la pluie dans les zones c^oti_eres m_editerran_eennes, [Rapport]. - Murcie : PAP-8/W.1/1, 1998.
- 32- PAP/RAC. 2000. National reports on problems and practices of erosion control management in the mediterranean region [rapport]: PAP/RAC, split, 2000.
- 33- Raftery, A. E. 1995. Bayesian model selection in social research. *Sociological Methodology*. 111-163
- 34- Saber chenari, K., Bahreman, A., Sheikh, V B., and Komaki, C. B. 2016. Gully Erosion Hazard Zoning Using of Dempster-Shafer Model in The Gharnaveh Watershed, Golestan Province. *Iranian Journal of Ecohydrology*. 3(2): 219-231. (In Persian).



Abstract

Investigating the Accuracy of Predictive Mapping of Water Erosion Hazard and Determining the Impact of Input Factors in a Qharnaveh Watershed using the PAP/RAC Model

S. P. Nainiva^{1*}, A. Najafinejad², H. Nazarnejad³ and A. Zare Garizi⁴

Received: 2024/04/24 Accepted: 2024/05/19

Qualitative modeling is one of the methodologies employed for assessment. However, skepticism about the outcomes of such models has led to a reduction in their consideration. Consequently, this study employs the qualitative model approach of PAP/RAC to predict and determine the status of water erosion risk in the Qarnaveh watershed. This approach is juxtaposed with the RUSLE model, and influential factors are identified using Bayesian Model Averaging (BMA) to enhance evaluation, delineate vulnerable zones more effectively, and propose viable water and soil conservation strategies. Research findings revealed a 20.56 Km² difference in predictions between the two models. Nonetheless, a meticulous spatial examination of water erosion risk prediction maps from both PAP/RAC and RUSLE models demonstrates a spatial congruence of 67.74%, predominantly within the "very high" category. Furthermore, the analysis of influential factors (slope, lithology, land use, and vegetation cover density) on the erosion risk prediction map, employing the Bayesian averaging approach, underscores slope as the most significant determinant in the developed superior patterns. In the PAP/RAC model, it exhibits adverse effects in the "very low" category but exerts positive influence in the "moderate," "high," and "very high" categories. In view of the significant influence of slope across all categories, it is therefore necessary to carefully classify and assess regional characteristics for refined predictions. Consequently, based on research findings, the PAP/RAC model emerges as the most efficacious and straightforward qualitative model for estimating water erosion risk in data-deficient watersheds, with precise consideration of its influential factors aligned with Iranian context. This methodological approach, which integrates descriptive and integrative techniques, not only facilitates precise prediction, but also facilitates the formulation of effective water and soil conservation strategies, thereby contributing to the development of a comprehensive strategy for sustainable watershed management.

Keywords: Bayesian averaging model, RUSLE, Qualitative models, Soil erosion.

1. Ph.D. student of Watershed Science and Engineering, Faculty of Rengland and Watershed, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran; and corresponding author, Email: pedram.nainava@gmail.com
2. Professor of Watershed Science and Engineering, Faculty of Rengland and Watershed, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
3. Associate Professor of Watershed Science and Engineering, Faculty of Rengland and Watershed, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
4. Assistant Professor of Watershed Science and Engineering, Faculty of Rengland and Watershed, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.