

مقدمه

فرسایش خاک یکی از مسایل و مشکلات جدی حوزه‌های آبخیز ایران محسوب می‌شود و می‌توان از آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موانع برای دستیابی به توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی نام برد [۲۴]. آگاهی از میزان خطر فرسایش در حوزه‌های آبخیز، امکان شناسایی نواحی بحرانی و اولویت‌بندی برنامه‌های مدیریتی و حفاظتی را فراهم می‌سازد. چون اطلاعات صحیح و قابل قبول از میزان کمی فرسایش در حوزه‌های آبخیز وجود ندارد، لذا قبل از تهیه نقشه کمی فرسایش، اغلب نیاز به برآورد حساسیت یا پتانسیل مناطق مختلف حوزه از نظر شدت فرسایش خاک و به‌عبارتی دیگر پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خاک می‌باشد [۱۵]. به‌دلیل وسعت زیاد اغلب حوزه‌های آبخیز در ایران، امکان اجرای طرح‌های حفاظتی و آبخیزداری در کل حوزه آبخیز وجود ندارد. لذا برای افزایش عملکرد طرح‌های آبخیزداری ابتدا باید مناطق بحرانی یک حوزه آبخیز از نظر پتانسیل فرسایش خاک، شناسایی و اولویت‌بندی شوند.

مدل کردن فرآیندهای فیزیکی و پویا مانند فرسایش خاک با مشکلات و خطاهایی همراه است. دردسترس نبودن منابع داده‌ای صحیح، کیفیت داده‌های مورد استفاده، مسئله مقیاس در مدل‌سازی، خطاهای اندازه‌گیری و پیچیدگی خود مدل از جمله مشکلاتی است که در مطالعات فرسایش خاک توسط بسیاری از پژوهشگران گزارش شده است [۳، ۱۶، ۲۸]. روش برآورد نزدیک به واقعیت مقدار کمی فرسایش خاک در مقیاس حوزه آبخیز به‌عنوان یک موضوع مهم مورد توجه پژوهشگران بوده است. در اکثر حوزه‌های آبخیز ایران، عدم وجود آمار دقیق از میزان کمی فرسایش، استفاده از مدل‌های برآورد فرسایش خاک را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. مدل‌های فیزیکی فرسایش خاک موجود، هم از نظر تعداد و هم از جنبه دقت زمانی و مکانی متغیرها دارای نیاز داده‌ای بالا می‌باشند. بنابراین فقدان و یا کمبود داده‌های ورودی موانعی را در کاربرد موفقیت‌آمیز مدل‌های فیزیکی فرسایش به‌وجود می‌آورد. از طرف دیگر، مدل‌های تجربی با نیاز داده‌ای کم، برای مناطق ویژه‌ای که کرت‌های فرسایشی در آنها قرار داده شده، طراحی شده‌اند و کاربرد آنها تنها به این مناطق محدود می‌شود [۱۳، ۱۶]. سایر جنبه‌های مهم که در بسیاری از مطالعات مربوط به ارزیابی خطر فرسایش خاک از آن چشم‌پوشی شده است، طبیعت خود عامل‌های ورودی کنترل‌کننده محیطی مدل است. این عامل‌ها در واقع فازی هستند. مدل‌های فیزیکی و تجربی موجود، هر عارضه و واحدهای مکانی در طبیعت که دارای مرزهای

تهیه نقشه خطر پتانسیل فرسایش خاک با استفاده از
منطق فازی در حوزه آبخیز قرناوه گلستان

مهدی عرفانیان^۱، پریسا قهرمانی^۲ و حسین سعادت^۳
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۰۵

چکیده

آگاهی از میزان خطر فرسایش در حوزه‌های آبخیز، امکان شناسایی نواحی بحرانی و اولویت‌بندی برنامه‌های مدیریتی و حفاظتی را فراهم می‌سازد. هدف از پژوهش حاضر، تهیه نقشه خطر فرسایش خاک به روش منطق فازی و با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در حوزه آبخیز قرناوه گلستان است. برای تهیه نقشه خطر پتانسیل فرسایش خاک از سه عامل اصلی موثر در فرسایش آبی خاک شامل شیب، فرساینده‌گی باران و فرسایش پذیری خاک به‌عنوان لایه‌های ورودی مدل فازی استفاده شد. نقشه رستری شیب با اندازه سلول ۳۰ متر از سنجنده ASTER، نقشه رستری عامل فرساینده‌گی باران (R) از درون‌یابی مقدار سالانه این عامل در ۱۴ ایستگاه ثبت باران و بر اساس روش زمین‌آماری کریجینگ معمولی و مدل گوسین تهیه شد. نقشه‌های مذکور با استفاده از توابع عضویت مناسب، فازی شده و سپس با اعمال قواعد فازی در نرم‌افزار MATLAB ترکیب شده و در نهایت نقشه خطر فرسایش خاک بدست آمد. همچنین از نقشه خطر مدل RUSLE برای اعتبارسنجی روش فازی استفاده شد. ضریب توافق کل (صحت کل) برابر ۵۸ درصد و ضریب کاپا برای طبقه خطر خیلی زیاد برابر ۰/۷۶ بدست آمد که بیانگر وجود تطابق بالا بین نقشه خطر مدل فازی و نقشه خطر مدل RUSLE در این طبقه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خطر فرسایش، منطق فازی، RUSLE، گلستان

۱- نویسنده مسئول، استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه،

ایمیل: Erfanian.ma@gmail.com

۲- دانش آموخته دوره ارشد رشته آبخیزداری دانشگاه ارومیه

۳- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران

مشخص می‌باشد را مورد توجه قرار می‌دهند [۱۷].

تاکنون در زمینه تهیه نقشه خطر فرسایش خاک بر اساس منطق فازی، پژوهش‌های جدی و قابل توجه در ایران انجام نشده است. مهمترین پژوهش‌های انجام شده در خارج و ایران شامل موارد زیر است: نیگل و همکاران [۱۶] با ترکیب لایه‌های فرساینده باران و پستی و بلندی (عامل LS)، کاربری اراضی، NDVI و خاک، نقشه خطر فرسایش خاک را تهیه کرده و از آن برای شناسایی و اولویت‌بندی مناطق با فرسایش بالا استفاده کردند. بوآزیزی و همکاران [۲] نقشه‌های پستی و بلندی، کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک و اقلیم را با هم ترکیب کرده و با وزن‌دهی نقشه‌های مذکور به‌عنوان عامل‌های کنترل‌کننده فرسایش خاک، نقشه کیفی خطر را برای منطقه‌ای در مرکز اتیوپی تهیه کردند. وو و همکاران [۳۰] ارزیابی خطر فرسایش خاک در ایالت شانخی چین را با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و مدل فازی و استفاده از داده‌های سنجش از دور در محیط GIS انجام دادند. در زمینه تولید نقشه کمی خطر فرسایش می‌توان به مطالعات سینگ و همکاران [۲۷]، مارتینز-کاساسنواس [۱۱]، کیگاردن [۲۰] و اسا [۶] اشاره کرد. هویوس [۹] مدل‌سازی مکانی پتانسیل فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز واقع در کشور کلمبیا را با استفاده از مدل RUSLE به‌صورت کیفی و کمی انجام داد. نتایج وی نشان داد که همبستگی بین میزان فرسایش خاک و عامل مقدار پوشش گیاهی بیشتر از ارتباط آن با عوامل دیگر مانند پستی و بلندی و فرساینده‌های باران می‌باشد. فهمی و عبدی‌نیا [۷] با استفاده از منطق فازی، نقشه پهنه‌بندی فرسایش حوزه آبخیز تجن واقع در استان مازندران را تهیه کرده و آن را با نقشه کیفی مدل PSIAQ مقایسه کردند. آنها بر اساس روش ترکیب ارزش پیکسل‌ها، نقشه پهنه‌بندی پیوسته فرسایش‌پذیری را بدست آوردند. به‌عقیده آنها وجود تغییرات جزئی در میزان فرسایش‌پذیری حتی در مناطق واقع در یک طبقه فرسایش معین، امکان‌پذیر است. فتحی‌ملک‌کیان و همکاران [۸] به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل فرسایش حوزه آبخیز دریانچای واقع در استان آذربایجان شرقی، از مدل PSIAQ و مدل تشخیص الگوی فازی مبتنی بر عامل‌های مدل PSIAQ استفاده کردند. آنها نشان دادند با وجود اینکه مقدار نمایه فرسایش در برخی عامل‌ها با استفاده از مدل فازی نسبت به مدل PSIAQ با تغییرات زیاد همراه است، ولی نتایج مشابه در روند کلی پتانسیل فرسایش‌پذیری در هر دو مدل دیده می‌شود. همچنین صادقی [۲۲] در حوزه برهموم استان مرکزی، ابتدا با استفاده از سه لایه حساسیت تشکیلات زمین‌شناسی به فرسایش، نقشه‌های تیپ اراضی و شیب، مناطق تاحدودی همگن را مشخص و از روش مدیریت اراضی ایالت متحده آمریکا (BLM) به‌منظور طبقه‌بندی انواع فرسایش خاک استفاده کرد. نتایج وی نشان داد که مناطق با فرسایش شدید در اراضی حساس به فرسایش و شیب بالا قرار گرفته است.

علی‌رغم استفاده پژوهشگران از مدل‌های فیزیکی و تجربی

موجود، مسئله عدم قطعیت نتایج این روش‌ها وجود دارد. چرا که صحت‌سنجی این مدل‌ها در شرایط مختلف اقلیمی ایران باید با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای نسبت رسوبدهی^۱ و میزان بار معلق انجام گیرد. مزیت‌های مدل فازی فرسایش شامل نیاز داده‌ای کم، انعطاف‌پذیری، قابلیت استفاده از آنها در مناطق جغرافیایی مختلف (مقیاس محلی و منطقه‌ای) و سهولت درک و کاربرد خروجی مدل در مقایسه با مدل‌های تجربی و فیزیکی می‌باشد [۱۲].

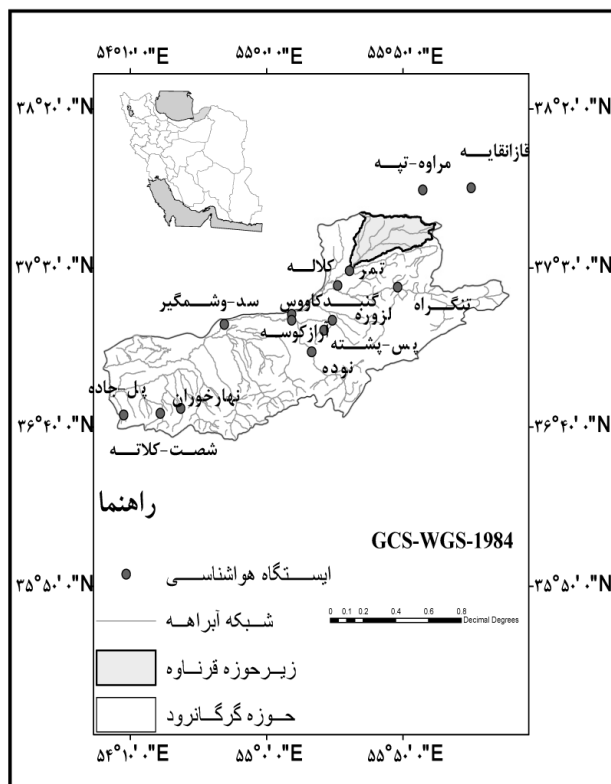
تهیه نقشه خطر پتانسیل فرسایش خاک، به‌عنوان یک روش سریع و کاربردی برای تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان حفاظت خاک در ایران بسیار اهمیت دارد. ارایه مدل‌های جدید با انعطاف‌پذیری و قابلیت اجرایی بالا در مناطق مختلف جغرافیایی ایران از جمله مواردی است که باید در پژوهش‌های فرسایش خاک مورد توجه قرار گیرد. لذا پژوهش حاضر با هدف معرفی یک روش جدید و سریع در تهیه نقشه خطر فرسایش خاک بر اساس منطق فازی و با استفاده از داده‌های سنجش از دور و GIS در زیرحوزه آبخیز قرناوه گلستان انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز قرناوه یکی از زیرحوزه‌های حوزه آبخیز گرگانرود با مساحت ۸۱۷/۱۰۵ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۳۴° ۵۵' تا ۵۶° ۰۱' و عرض جغرافیایی ۳۷° ۳۴' تا ۳۷° ۴۳' واقع شده است. متوسط ارتفاع این حوزه ۵۷۲ متر و شیب متوسط آن ۲۱ درصد می‌باشد که به سمت پایین دست حوزه از شیب آن کاسته شده و به ۲-۳ درصد می‌رسد. متوسط بارندگی در حوزه قرناوه ۴۱۸ میلی‌متر می‌باشد. قسمت‌های زیادی از حوزه به منظور کشت دیم تسطیح شده‌اند به‌طوری‌که کاربری کشت دیم مساحتی در حدود ۵۰ درصد حوزه را شامل می‌شود. حدود ۳۶ درصد آن شامل مراتع و بقیه نیز شامل اراضی جنگلی (حدود ۱۱ درصد) و مناطق مسکونی می‌باشد. از نظر سنگ‌شناسی، بیشتر حوزه از سنگ آهک و رسوبات آبرفتی تشکیل شده است. خاک آن سیلتی لومی و دارای سنگهای حساس به فرسایش بوده و اغلب مناطق آن در گروه آب‌شناختی B قرار داشته و خاصیت فرسایش‌پذیری بالایی دارد. رودخانه قرناوه بصورت یک گالی بزرگ و ناپایدار و در برخی نقاط با عمق زیاد (حدود ۹-۸ متر) و کاملاً فرسایشی است. لذا در پژوهش حاضر، زیرحوزه قرناوه گلستان به دلیل خاصیت فرسایش‌پذیری بالا، برای مدل‌سازی و تهیه نقشه خطر پتانسیل فرسایش خاک انتخاب گردید. عوامل موثر و عمده در ایجاد فرسایش و تولید رسوب در این حوزه شامل حساسیت زیاد سنگها به فرسایش، نحوه استفاده از اراضی و بافت ناپایدار خاک (بافت لسی) می‌باشد [۵]. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز قرناوه گلستان را نسبت به حوزه گرگانرود نشان می‌دهد.

1- Sediment Delivery Ratio (SDR)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز قرناوه گلستان تهیه نقشه رقومی عامل‌های فرسایش خاک

متوسط بارندگی ماهانه و سالانه) برای محاسبه عامل فرساینده‌گی (R) برای هر ایستگاه استفاده شد. رنارد و فریموند [۲۱] از پژوهش‌های ویشمایر [۲۹] و با استفاده از داده‌های بارندگی ماهانه و سالانه، عامل R را محاسبه کردند. طبق پژوهش‌های آنها رابطه بین R و نمایه فورنیه اصلاح شده (F) به صورت زیر است:

$$R = 0.7397F^{1.847}, \quad F < 5m \quad (۱) \text{ رابطه}$$

$$R = 95.77 - 6.081F + 0.477F^2, \quad F > 55mm \quad (۲) \text{ رابطه}$$

$$F = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{\bar{P}} \quad (۳) \text{ رابطه}$$

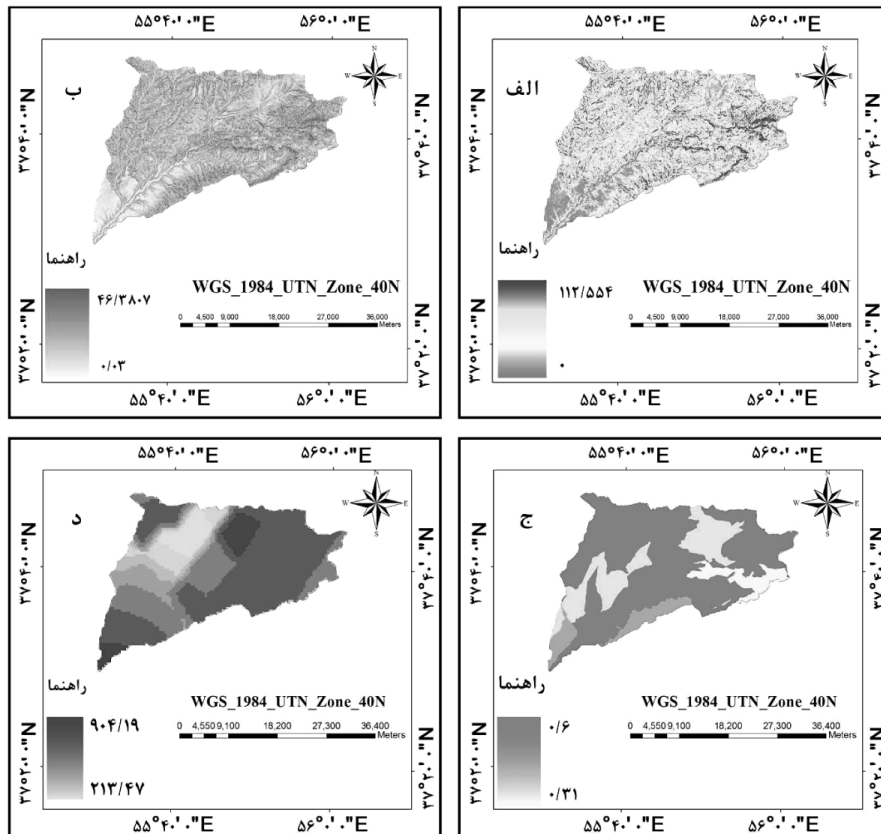
که در این روابط، F نمایه فورنیه اصلاح شده، P_i متوسط بارندگی ماه i ام (میلی‌متر) و \bar{P} متوسط بارندگی سالانه در دوره آماری ۱۲ ساله (میلی‌متر) و R عامل فرساینده‌گی سالانه بر حسب مگاژول میلی‌متر در هکتار در ساعت در سال می‌باشد. با استفاده از نقشه نقطه‌ای مقادیر R در ایستگاه‌های انتخابی، نقشه رستری عامل فرساینده‌گی باران با استفاده از روش زمین‌آماري کریجینگ معمولی و نیم‌تغییرنمای مدل گوسین (بدلیل RMSE کمتر) مطابق شکل (۲) تهیه شد. لازم به ذکر است که کلیه نقشه‌های ورودی و خروجی در پژوهش حاضر، با اندازه سلول ۵۰ متر می‌باشند. در شرایط فقدان داده‌های شدت رگبار، استفاده از روابط موجود بین نمایه فورنیه اصلاح شده و عامل فرساینده‌گی باران (مشابه رابطه ۳)، توسط پژوهشگران زیادی توصیه شده است [۱۰ و ۱۴].

۱- شیب: به منظور تهیه نقشه شیب از لایه رستری مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر سنجنده ASTER استفاده شد که در شکل (۲ الف) آورده شده است. عامل LS، تاثیر پستی و بلندی بر فرسایش خاک در یک منطقه را منعکس می‌کند. روش‌های مختلفی به منظور محاسبه عامل LS وجود دارد. در پژوهش حاضر، عامل LS با استفاده از معادله دزمت و گاورز [۴] و لایه‌های رستری مدل رقومی ارتفاع، شیب و تجمع جریان بدست آمد. نقشه مربوطه در شکل (۲ ب) نشان داده شده است.

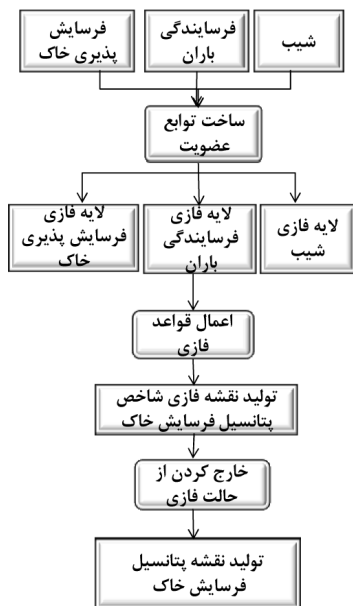
۲- فرسایش‌پذیری خاک (K): مقادیر فرسایش‌پذیری خاک برای هر یک از اجزای واحد اراضی با استفاده از رابطه ویشمایر و اسمیت [۲۵] توسط شرکت مهندسين مشاور لار [۵] در سال ۲۰۰۸ تهیه شده است که نقشه آن مطابق شکل (۲ ج) نشان داده شده است.

۳- فرساینده‌گی باران: با توجه به اینکه حوزه مورد مطالعه از نظر مساحت، کوچک بوده و فاقد هرگونه ایستگاه ثبت باران می‌باشد، لذا الگوی بارندگی با استفاده از ایستگاه‌های باران‌سنجی مجاور آن مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، از داده‌های بارندگی روزانه ۱۴ ایستگاه باران‌سنجی با دوره آماری مشترک ۱۲ ساله (۲۰۰۹-۱۹۹۸) مطابق جدول (۱) استفاده شد. به دلیل فقدان آمار کوتاه مدت (کمتر از یک‌ساعت) مربوط به شدت و مقدار رگبار در تمام ایستگاه‌های انتخابی، از روش رنارد و فریموند (رابطه‌ای مبتنی بر داده‌های

- 1- Soil Erodibility Factor
2- Rainfall Erosivity Factor



شکل ۲- عامل های ورودی: الف) درصد شیب، ب) LS، ج) فرسایش پذیری خاک (K) و د) فرسایش پذیری باران (R)



شکل ۳- نمودار جریانیه تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خاک

طبقه بندی شد (شکل ۴ ب). نقشه عامل فرسایش پذیری باران (R) نیز به سه طبقه کم، متوسط و زیاد طبقه بندی گردید (شکل ۴ ج). توابع عضویت فازی مورد استفاده برای تهیه نقشه فازی نمایه خطر پتانسیل فرسایش در شکل (۴ د) نشان داده شده است. با توجه به وجود پنج طبقه شیب، سه طبقه R و سه طبقه K، تعداد ۴۵ قاعده فازی تعریف شد. برای

تهیه نقشه خطر پتانسیل فرسایش خاک با مدل فازی

نمایه پتانسیل فرسایش خاک، بیانگر استعداد ذاتی خاک به فرسایش بدون در نظر گرفتن تاثیر هرگونه عامل حفاظتی مانند پوشش گیاهی و عملیات کاربری اراضی است. شکل (۳) نمودار جریانیه مراحل تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خاک را نشان می دهد. عامل فرسایش پذیری خاک (K)، عامل فرسایش پذیری باران (R) و درصد شیب (S) به عنوان لایه های ورودی مدل فازی می باشند. با استفاده از نرم افزار MATLAB، هر یک از نقشه های رستری مربوط به این عوامل با استفاده از توابع عضویت مناسب (شکل ۴) فازی شد و برای خروج از حالت فازی، از روش مرکز ثقل استفاده و در نهایت نقشه غیر فازی نمایه پتانسیل فرسایش خاک تهیه شد. با طبقه بندی مجدد این لایه رستری، نقشه خطر مدل فازی شامل ۵ طبقه خطر از بسیار کم تا بسیار زیاد بدست آمد. طبقه خطر بسیار کم و کم، کمترین مقدار فرسایش را شامل می شوند. طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد بیانگر فرسایش تشدید در زمین های تخریب یافته با تاثیرات مخرب در داخل حوزه^۱ و تاثیر مخرب بالقوه آن در خارج حوزه^۲ است [۱۷]. نقشه درصد شیب به پنج مجموعه فازی زبانی طبقه بندی شد (شکل ۴ الف). نقشه فازی عامل K به سه مجموعه فازی کم، متوسط و زیاد

- 1- Potential Erosion Risk Index(PERI)
- 2- On-site
- 3- Off-site

جدول ۱- ایستگاه‌های مورد استفاده برای تهیه نقشه رستری عامل فرساینده‌گی باران (R)

ردیف	ایستگاه	نوع ایستگاه	مختصات جغرافیایی (درجه اعشاری)		متوسط بارندگی سالانه (میلی متر)	نمایه اصلاح شده فورنیه	عامل فرساینده‌گی باران
			عرض	طول			
۱	گنبد	سینوپتیک	۳۷/۹	۵۵/۹۵	۴۴۹/۹۵	۴۲/۳۱	۷۴۶/۴۷
۲	گرگان- وشمگیر	سینوپتیک	۳۶/۸۵	۵۴/۲۷	۵۳۷/۷۲	۳۴/۴۷	۱۰۸۹/۵۷
۳	مراوه تپه	سینوپتیک	۳۷/۲۵	۵۵/۱۷	۳۵۲/۱۹	۵۱/۹۲	۵۱۱/۳۷
۴	کلاله	کلیماتولوژی	۳۷/۴۱	۵۵/۴۳	۵۳۶/۴۸	۲۱/۴۸	۱۰۴۳/۷۵
۵	مزارع نمونه	کلیماتولوژی	۳۷/۱۵	۵۴/۵۷	۲۵۰/۸۳	۲۴/۷۸	۲۱۳/۴۷
۶	دشت گل	کلیماتولوژی	۳۷/۲۸	۵۶/۰۲	۲۵۷/۰۳	۲۷/۷۶	۲۷۷/۹
۷	قازانقایه	بارانسنجی	۳۷/۹۲	۵۶/۲۵	۳۶۰/۲۶	۳۵/۹۲	۵۵۱/۷۸
۸	ترشکلی	بارانسنجی	۳۷/۶۹	۵۴/۸۱	۴۶۲/۹۲	۲۲/۴۴	۲۳۱/۳۸
۹	رامیان	بارانسنجی	۳۷/۰۲	۵۵/۱۴	۸۶۰/۱	۸۲/۲۵	۲۸۲۲/۵
۱۰	هوتن	بارانسنجی	۳۷/۹۵	۵۵/۵۲	۲۶۳/۴۵	۵۰/۷۲	۳۴۲/۸
۱۱	تمر	بارانسنجی	۳۷/۴۹	۵۵/۵۱	۵۵۴/۹۷	۵۲/۲۶	۱۰۸۰/۷۵
۱۲	آراز کوسه	بارانسنجی	۳۷/۲۳	۵۵/۱۵	۴۴۳/۳۶	۴۱/۸۵	۷۳۱/۸۱
۱۳	سد وشمگیر	بارانسنجی	۳۷/۲۱	۵۴/۷۴	۳۳۶/۱۵	۳۴/۲۰	۵۰۴/۰۶
۱۴	آق قلا	بارانسنجی	۳۷/۰۱	۵۴/۴۶	۳۷۳/۵۳	۳۶/۵۲	۵۶۹/۰۱

مثال در صورتی که مقدار فرساینده‌گی باران و فرسایش پذیری خاک کم و مقدار شیب بالا باشد، آنگاه مقدار پتانسیل فرسایش بالا خواهد بود. این نشان‌دهنده تاثیر بالای وضعیت پستی و بلندی بر خطر پتانسیل فرسایش خاک است. فازی‌سازی لایه‌های ورودی، ترکیب لایه‌های فازی و سامانه استنتاج فازی روش ممدانی برای تهیه نقشه نهایی نمایه پتانسیل فرسایش خاک (PERI) در نرم‌افزار MATLAB انجام شد که در قالب یک مثال، محاسبه مقدار PERI در مقیاس کیفی ۰ تا ۱۰۰ برای پیکسل فرضی در شکل (۵) نشان داده شده است. باید به این نکته توجه داشت که افزایش تعداد عامل‌های ورودی مدل فازی، باعث افزایش تعداد قواعد فازی و پیچیدگی تعریف آنها در سامانه استنتاج فازی می‌باشد.

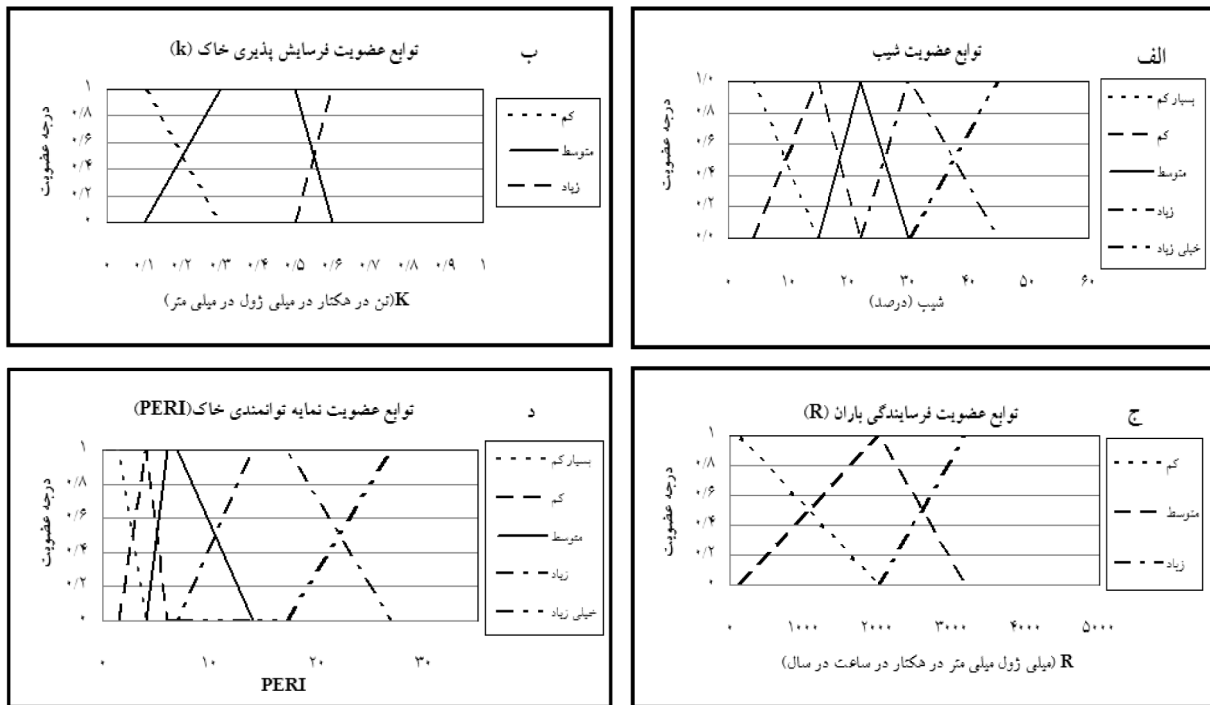
مثال در صورتی که مقدار فرساینده‌گی باران و فرسایش پذیری خاک کم و مقدار شیب بالا باشد، آنگاه مقدار پتانسیل فرسایش بالا خواهد بود. این نشان‌دهنده تاثیر بالای وضعیت پستی و بلندی بر خطر پتانسیل فرسایش خاک است. فازی‌سازی لایه‌های ورودی، ترکیب لایه‌های فازی و سامانه استنتاج فازی روش ممدانی برای تهیه نقشه نهایی نمایه پتانسیل فرسایش خاک (PERI) در نرم‌افزار MATLAB انجام شد که در قالب یک مثال، محاسبه مقدار PERI در مقیاس کیفی ۰ تا ۱۰۰ برای پیکسل فرضی در شکل (۵) نشان داده شده است. باید به این نکته توجه داشت که افزایش تعداد عامل‌های ورودی مدل فازی، باعث افزایش تعداد قواعد فازی و پیچیدگی تعریف آنها در سامانه استنتاج فازی می‌باشد.

ارزیابی صحت نقشه نمایه پتانسیل فرسایش خاک

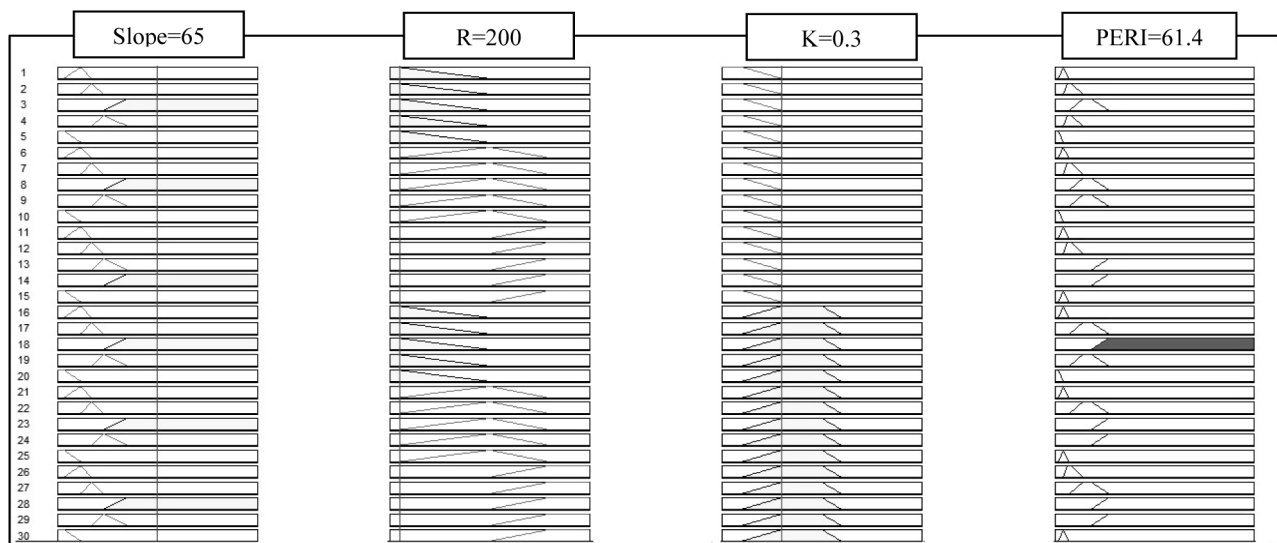
ارزیابی صحت یکی از مراحل مهم در ارزیابی نقشه‌های خطر فرسایش می‌باشد. به‌طورکلی، ارزیابی صحت به‌وسیله ماتریس خطا یا ماتریس درهمی انجام می‌گیرد که این ماتریس روابط بین داده‌های زمینی (مرجع) و داده‌های فازی را تعیین می‌کند [۱۷]. در پژوهش حاضر، به‌دلیل عدم وجود نقشه خطر بر اساس مشاهدات زمینی، از نقشه خطر مبتنی بر نقشه پتانسیل فرسایش خاک مدل RUSLE استفاده شد. مدل RUSLE به‌عنوان یک روش پرکاربرد برای مقایسه با نقشه خطر مدل فازی انتخاب گردید [۲۸]. ارزیابی صحت با استفاده از تهیه جدول درهمی یا ماتریس خطا و محاسبه ضریب توافق کاپا برای هر طبقه خطر و مقدار درصد صحت کل نقشه خطر مدل فازی انجام گرفته است.

تهیه نقشه خطر پتانسیل فرسایش خاک با مدل RUSLE

مدل RUSLE یک مدل تجربی است که به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی عوامل موثر در فرسایش آبی و برآورد هدررفت خاک در اثر فرسایش سطحی و شیب‌های حوزه‌های آبخیز زراعی استفاده می‌شود [۲۸، ۱۹]. با استفاده از این مدل، مقدار هدررفت خاک در مقیاس حوزه آبخیز کوچک یا دامنه با استفاده حاصل ضرب نقشه عوامل پنج‌گانه آن به صورت $E = R \times K \times LS \times C \times P$ برآورد زده می‌شود. در این مدل، مقدار $(R \times K \times LS)$ در واقع بیانگر پتانسیل هدررفت خاک می‌باشد. لذا در این پژوهش از این مفهوم برای تهیه نقشه پتانسیل فرسایش



شکل ۴- توابع عضویت فازی: الف) درصد شیب، ب) فرسایش پذیری خاک، ج) فرسایش پذیری باران و د) نمایه پتانسیل فرسایش خاک

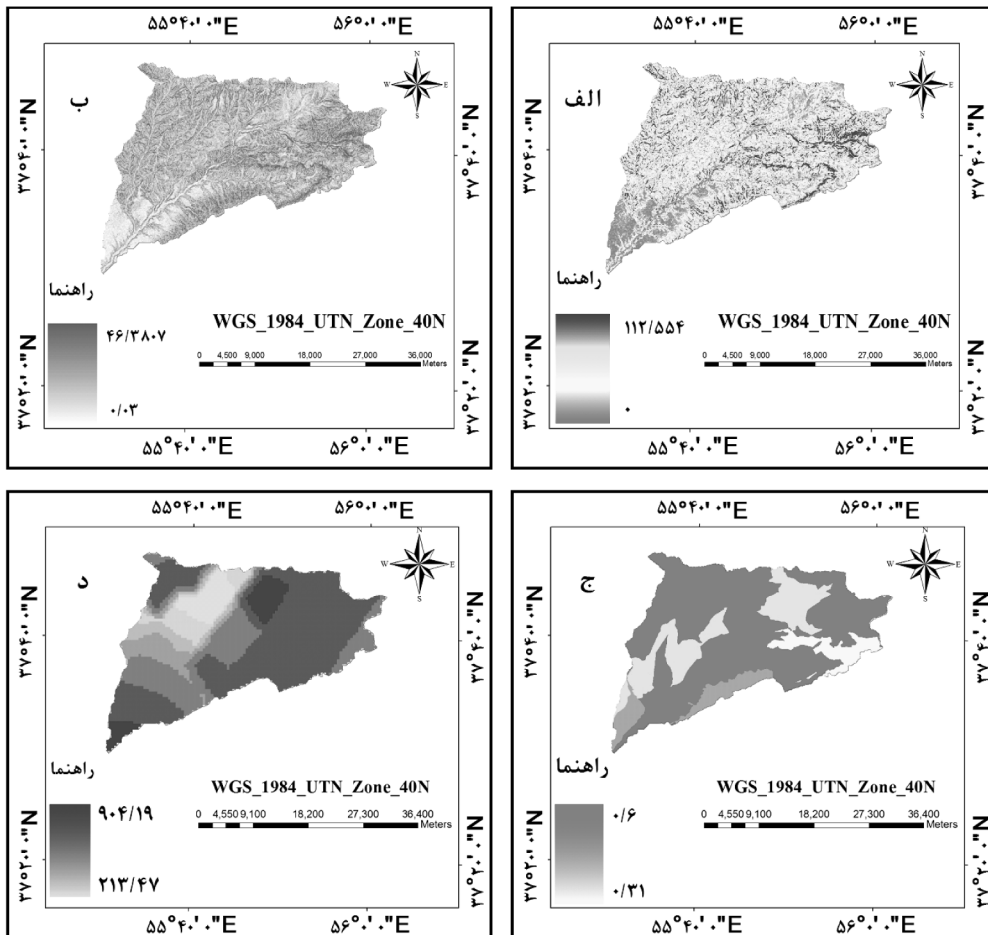


شکل ۵- محاسبه مقدار PERI برای یک پیکسل با مقادیر فرضی درصد شیب، عامل فرسایش پذیری باران و عامل فرسایش پذیری خاک در نرم افزار MATLAB (فقط ۳۰ قاعده فازی در شکل نشان داده شده است)

نتایج و بحث

که در نقشه LS نیز مقادیر کم را شامل می شوند. به دلیل اینکه بیشتر سطح حوزه شامل خاکهای لسی با حساسیت بالا به فرسایش می باشد [۵]، اکثر سطح حوزه درجه فرسایش پذیری بالایی در نقشه فرسایش پذیری خاک را به خود اختصاص داده اند. همانطور که ذکر شد، مقادیر عامل سالانه فرسایش پذیری در هر یک از ایستگاه های ثبت بارندگی به روش فورنیه اصلاح شده محاسبه و نقشه رستری با استفاده از روش زمین آماری تهیه شد. طبق پژوهش های انجام گرفته

سه عامل موثر در تهیه نقشه خطر توانمندی فرسایش خاک شامل نقشه شیب، نقشه فرسایش پذیری خاک و نقشه فرسایش پذیری باران تهیه شد. سپس هر یک از عوامل موثر بر اساس مطالعات و پیشینه پژوهش های انجام شده در حوزه مورد مطالعه و تعریف توابع عضویت فازی مناسب (شکل ۴)، به لایه های فازی تبدیل شدند. در نقشه شیب، قسمت خروجی حوزه در شیب های کمتر قرار گرفته اند



شکل ۶- نقشه‌های پتانسیل فرسایش خاک بر اساس مدل فازی (الف) و مدل RUSLE (ب) و نقشه‌های خطر پتانسیل فرسایش خاک بر اساس مدل فازی (ج) و مدل RUSLE (د)

خطر بسیار کم قرار گرفته است. با توجه به نقشه خطر فرسایش خاک مدل RUSLE، اکثر پیکسل‌های کلاس خطر بالای فرسایش در شیب‌های تند و کاربری‌های کشاورزی و مرتع واقع شده‌اند (شکل ۶ د). به عبارت دیگر این مناطق دارای پتانسیل بالای وقوع فرسایش می‌باشند.

جدول (۲)، جدول درهمی یا ماتریس خطا که برای محاسبه ضریب کاپا و درصد صحت کل مورد نیاز است را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، از مقادیر این جدول برای ارزیابی صحت نقشه خطر مدل فازی بر اساس نقشه خطر مدل RUSLE به عنوان نقشه مرجع (رفرنس) استفاده شده است. بر این اساس مقدار درصد صحت کل نقشه خطر مدل فازی برابر ۵۸/۲ درصد بدست آمد. همچنین مطابق جدول (۳) ضریب کاپا برای طبقه خطر خیلی زیاد برابر ۰/۷۶ می‌باشد. پایین بودن مقدار ضریب کاپا در طبقه زیاد را می‌توان به روش تهیه نقشه خطر مدل RUSLE مربوط دانست. همانطور که در شکل (۶ د) نشان داده شده است، حدود پایین و بالای طبقه خطر زیاد بر اساس میزان پتانسیل فرسایش خاک از ۲۸۰ تا ۳۵۰ تن در هکتار در سال تعریف شده است و مقادیر بالاتر از ۳۵۰ به عنوان خطر خیلی زیاد می‌باشد. لذا روش تهیه نقشه خطر در مدل RUSLE

توسط شریفان [۲۶] در ایستگاه سینوپتیک گرگان مقدار متوسط سالانه عامل فرساینده، حدود ۹۳۸/۱ مگاژول میلی‌متر در هکتار در ساعت در سال برآورد زده شد. مقدار عامل فرساینده سالانه ایستگاه گرگان در پژوهش حاضر با روش نمایه فورنیه اصلاح شده برابر ۱۰۸۹/۵ مگاژول میلی‌متر در ساعت در سال محاسبه شده که اختلاف چندانی بین این دو مقدار دیده نمی‌شود. در پژوهش‌هایی که توسط صادقی [۲۳] در ایران به منظور تهیه نقشه‌های فرساینده انجام شده است، به دلیل استفاده از ایستگاه‌های ثبت بارش محدود و اندک در یک منطقه وسیع، مقدار عامل فرساینده در سطح حوزه مورد نظر در مقیاس مکان و زمان ثابت و یکنواخت می‌باشد.

با تهیه نقشه‌های ورودی مدل فازی، نقشه نمایه پتانسیل فرسایش خاک تهیه شد. نقشه‌های فازی و نمایه PERI با استفاده از مدل فازی مطابق شکل ۶ (الف و ج) تهیه شد. همانطور که در نقشه خطر فرسایش خاک مدل فازی دیده می‌شود، اکثر سطح حوزه (حدود ۴۴ درصد) در طبقه خطر بسیار زیاد قرار می‌گیرند. همچنین طبقه خطر کم نیز با ۲۹ درصد به صورت پراکنده در سطح حوزه قابل مشاهده است. قسمت خروجی حوزه به دلیل شیب کمتر، در طبقه

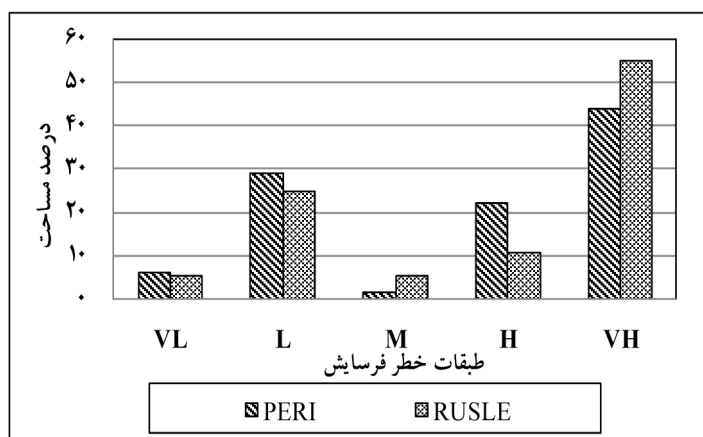
نیز می‌تواند به‌عنوان منبع خطا تلقی شود. شکل (۷) نشان می‌دهد که درصد مساحت مربوط به طبقات خطر خیلی کم، کم و خیلی زیاد بین نقشه‌های خطر استخراج شده از مدل‌های فازی و RUSLE در کل سطح حوزه تطابق بالایی دارند. این موضوع با نتایج فتحی‌ملک‌کیان [۸]، مبنی بر کارایی بالای روش فازی در تهیه نقشه فرسایش خاک مطابقت دارد هرچند که فازی سازی مدل PSIAC به دلیل نیاز داده‌ای بالای آن، زمان‌بر و گاهی همراه با بروز خطا می‌باشد.

نتیجه‌گیری

مقایسه نقشه خطر مدل فازی (PERI) با نقشه خطر مدل RUSLE نشان می‌دهد که قابلیت روش منطق فازی با ترکیب نقشه‌های درصد شیب، عامل فرساینده‌گی باران و فرسایش‌پذیری خاک بر اساس توابع عضویت و قواعد فازی، در تهیه نقشه خطر پتانسیل فرسایش خاک

قابل قبول می‌باشد. تطابق بالای طبقه خطر خیلی زیاد بین نقشه‌های خطر مبتنی بر مدل فازی و RUSLE نشان‌دهنده کارایی بالای مدل فازی در تشخیص مناطق با طبقه خطر خیلی زیاد (میزان درصد صحت ۷۶ درصد) می‌باشد. شناسایی و اولویت مناطق با پتانسیل بالای فرسایش می‌تواند برای مجریان، مدیران و تصمیم‌گیران طرح‌های آبخیزداری در اجرای سریع و مناسبتر برنامه‌های مدیریتی و آبخیزداری نقش بسزایی داشته باشد. به عبارتی دیگر، شناسایی و اولویت‌بندی مناطق بحرانی فرسایش می‌تواند در اجرای صحیح طرح‌ها و پروژه‌های مربوطه حائز اهمیت باشد.

مدل‌سازی فرسایش خاک با استفاده از منطق فازی در مقایسه با سایر مدل‌ها به علت سادگی و سرعت در محاسبه انعطاف‌پذیری بیشتری دارند. نیاز به متغیرهای ورودی کم و استفاده از نظرات کارشناسی در مورد انتخاب متغیرهای موثر و طراحی قواعد فازی،



شکل ۷- مقایسه درصد طبقات مختلف خطر کل حوزه بر اساس مدل‌های فازی و RUSLE

جدول ۲- درصد مساحت طبقات خطر فرسایش خاک در روش منطق فازی و مدل RUSLE

نقشه خطر مدل RUSLE						
جمع	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	بسیار کم	طبقه خطر
۴/۸	۰	۰	۰/۲	۲/۴	۲/۲	بسیار کم
۲۷/۸	۷/۴	۲	۱/۴	۱۴	۳	کم
۱/۸	۱	۰	۰/۲	۰/۶	۰	متوسط
۲۰/۶	۱۳/۶	۰/۸	۱/۴	۴/۸	۰	زیاد
۴۵	۴۱	۰/۴	۰/۸	۲/۸	۰	خیلی زیاد
۱۰۰	۶۳	۳/۲	۴	۲۴/۶	۵/۲	جمع

نقشه خطر PERI (مدل فازی)

جدول ۳- ضریب کاپای طبقات خطر فرسایش خاک

طبقه خطر	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
ضریب کاپا	۰/۴۳	۰/۳۴	۰/۷۴	۰/۰۰۷	۰/۷۶

8- Fathi Malek Kian, SH. Afshar, A. Moosavi, S.J. 2006. PSIAC based fuzzy pattern recognition methodology for watershed erodibility evaluation. Water & Watershed Consulting Engineers Research Development. 17(57): 59-71. (In Persian)

9- Hoyos, N. 2005. Spatial modeling of soil erosion potential in a tropical watershed of the Colombian Andes. Catena 63:85-108

10- Khorsandi, N., Mahdian, M.H., Pazira, E., Nikkami, D. 2010. Comparison of rainfall erosivity indices in runoff-sediment plots in northern Iran. World Applied Sciences Journal. 10(8): 975-979. (In Persian)

11- Martinez-Casasnovas, J.A. 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. CATENA 50 (2-4): 293-308.

12- Mendel J.M., (1995) Fuzzy Logic Systems for Engineering. Proceedings of IEEE 83(2): 345-377

13- Merritt, W. S., Letcher, R. A., and Jakeman, A. J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling & Software. 18: 761-799.

14- Moussavi Kiassari, E., Nikkami, D., Mahdian, M. H., Pazira, E. 2012. Investigating rainfall erosivity indices in arid and semiarid climates of Iran. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 36: 365-378

15- Naderi, F. Karimi, H. Naseri, B. 2010. Soil erosion potential zoning in Aseman Abad Watershed by Erosion Index. Watershed Management Researches Journal (Pajouhesh & Sazandegi) 89: 44-51. (In Persian)

16- Nigel, R., Rughooputh, S.D.D.V. 2010. Soil erosion risk mapping with new dataset: An improved prioritisation of high erosion risk area, Catena. 191-205

17- Oinam, B. 2011. Integrated Fuzzy-GIS approach for assessing regional soil erosion risks. University of Stuttgart, Germany. Ph.D. Thesis. 169.

18- Park, S. Oh, C. Joen, S. Jung, H., Choi, C. 2011. Soil erosion risk in Korean watershed, Assessed using the revised universal soil loss equation. Journal of Hydrology. 399: 263-273

19- Prasannakumar, V. Shiny, R. Geetha, N. Vijith, H.

امکان کاربرد مدل فازی خطر فرسایش خاک را در سایر نقاط ایران فراهم می‌سازد. مدل فازی ارائه شده در این پژوهش، با دخالت دادن موثرترین عوامل موثر در فرسایش خاک (انتخاب شده بر اساس تجربه و قضاوت کارشناسی و مطالعات فرسایش خاک) می‌تواند به‌طور سریع و دقیق، سناریوهای حفاظتی و مدیریتی به‌منظور شناسایی مناطق بحرانی از نظر خطر پتانسیل فرسایش را برای مدیران و برنامه‌ریزان ارائه دهد.

برای ارزیابی بیشتر مدل فازی ارائه شده در پژوهش حاضر، پیشنهاد می‌شود با تهیه نقشه خطر پتانسیل فرسایش خاک با استفاده از سایر روش‌ها مانند روش BLM، مدل‌سازی فازی در حوزه‌های آبخیز در مقیاسهای مکانی و در شرایط جغرافیایی و اقلیمی مختلف در سطح ایران انجام شود تا بتوان در مورد میزان اعتبار و کارایی آن بهتر قضاوت کرد. همچنین توصیه می‌شود مدل فازی با در نظر گرفتن سایر عوامل قابل فازی کردن مانند کاربری اراضی و پوشش گیاهی، توسعه یابد.

منابع

1- Asakereh, H. 2008. Kriging application in precipitation interpolation. A case study: Iran precipitation in 1996.12.16. Geography and Development. 6(12): 25-42. (In Persian)

2- Bouaziz, M. Leidig, M. Gloaguen, R. 2011. Optimal parameter selection for qualitative regional erosion risk monitoring: A remote sensing study of SE Ethiopia, Geoscience Frontiers. 2(2): 237-245

3- Dabral, P.P. Baithuri, N. Pandey, A. 2008. Soil erosion assesment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing. Water Resources Management. 22: 1783-1798

4- Desmet, P. J. J. & G. Govers. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of Soil and Water Conservation. 51(5): 427-433.

5- Final report of erosion and sediment. 2008. Lar Consulting Engineers Company. (In Persian)

6- Essa, S. 2004. GIS modeling of land degradation in Northern Jordan using Landsat imagery. Proceeding of the 20th ISPRS Congress. Istanbul, Turkey. 505-510.

7- Fahmi, H. Abdinia, A. D. 2006. Application of Fuzzy clustering in continuous classification: A case study. Iran-Water Resources Research. 2(1): 29-35. (In Persian)

- Watershed). *Journal of Applied RS & GIS Techniques in Natural Resource Science*. 2(2): 55-66. (In Persian)
- 26- Sharifan, H. 2008. Evaluation of equations erosivity index and parameters of rainfall in Gorgan. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(5): 207-215. (In Persian)
- 27- Singh, G, Babu, R, Narain, P, Bhushan, L.S, Abrol, I.P. 1992. Soil erosion rates in India. *Journal of Soil and Water Conservation*. 47(1): 97-99.
- 28- Ty, P.H. 2008. Soil erosion risk modeling within upland landscapes in Vietnam using remotely sensed data and the RUSLE model. Dalhousie university, Canada, Ph.D. Thesis. 87.
- 29- Wischmeier, W. and Smith, D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses . A Guide to Conservation Planning.
- 30- Wu, Q. Wang, M. 2007. A framework for risk assessment on soil erosion by water using an integrated and systematic approach. *Journal of Hydrology* 337: 11– 21
- (2011). Spatial prediction of soil erosion risk by remote sensing, GIS and RUSLE approach: a case study of Siruvani river watershed in Attapady valley, Kerala, India. *Environmental Earth Sciences*. 64: 965-972
- 20- Qygarden, L. 2003. Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway. *CATENA*. 50 (2-4): 217-242.
- 21- Renard, K. G, Freimund, J. R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*. 157: 287-306.
- 22- Sadegi, S. H. R. 2005. A semi-detailed technique for soil erosion mapping based on BLM and satellite image applications. *Journal of Agricultural Science and Technology (JAST)*. 7: 133-142
- 23- Sadeghi, S. H. R., Moatamednia, M., Behzadfar, M. 2011. Spatial and temporal variations in the rainfall erosivity factor in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology (JAST)*. 13: 451-464
- 24- Schwab, G. O. Fangmeper, D. D, Elliot, W.J, Frevert, R. K. 1993. *Soil and Water Conservation Engineering*, P,9-113.
- 25- Shabani, A. Matinfar, H.M. Arekhi, S. Rahimi Harabadi, S. 2011. Modeling rainfall erosivity factor using geostatistic techniques (Case study: Ilam Dam