

تهیه نقشه شاخص مناسب فرساینده گی باران کشور

داود نیک کامی^{۱*} و محمدحسین مهدیان^۲

^۱استاد، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و ^۲استاد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۵/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۰۱

چکیده

آگاهی از مقدار صحیح فرسایش آبی به دلیل نقش آن در توسعه تغییرات سطح زمین و تحت الشعاع قرار دادن پایداری فعالیت‌های کشاورزی در بلندمدت حائز اهمیت است. فرساینده گی باران به عنوان یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تاثیرگذار بر فرسایش آبی خاک مطرح است که در قالب شاخص‌هایی بیان می‌شود. برای کمی نمودن تاثیر عامل فرساینده گی باران در بررسی‌های مربوط به فرسایش و رسوب، شاخص‌های مختلفی بر مبنای خصوصیات باران از جمله مقدار، شدت، مدت، اندازه قطر قطره، انرژی جنبشی و یا ترکیبی از آن‌ها مد نظر قرار می‌گیرد. این عامل در بسیاری از روش‌های تجربی برآورد کمی و یا کیفی فرسایش خاک، به عنوان یکی از عوامل اصلی، مطرح است. لذا به منظور پرهیز از هرگونه دوباره کاری در تعیین عامل فرساینده گی باران، لازم است تا روشی مبتنی بر شرایط حاکم بر حوزه‌های آبخیز ایران تبیین شود. چنین اقدامی منجر به رفع ابهامات و اختلاف نظرها در نحوه تعیین این عامل در هر یک از مدل‌ها می‌شود. برای حصول اطمینان در محاسبه این عامل مهم، ضرورت دارد تا اقدام به ارزیابی روش‌های مختلف تعیین توان فرساینده گی باران در شرایط اقلیمی و آب و هوایی مختلف نمود. این پژوهش با هدف تعیین شاخص فرساینده گی مناسب در ایران و بسط این شاخص به کل کشور و تهیه نقشه فرساینده گی باران در مقیاس ملی انجام گرفت. در این تحقیق، ابتدا به منظور بررسی شاخص‌های فرساینده گی باران و انتخاب مناسب‌ترین آن‌ها، ۶۴ شاخص مختلف محاسبه شده و روابط همبستگی آن‌ها با تلفات خاک در هفت استان آذربایجان غربی، خراسان رضوی، زنجان، سمنان، مازندران، مرکزی و یزد و در قالب طرح ملی در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری بررسی و EI_{30} به عنوان مناسب‌ترین شاخص معرفی شد. در مرحله دوم، شاخص انتخابی برای ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک دارای باران‌نگار محاسبه شد و رابطه‌ای نیز بین شاخص یاد شده و تعدادی از شاخص‌های زودیاقت نظیر فورنیه، فورنیه اصلاح شده، بارندگی متوسط سالانه، حداکثر بارندگی روزانه برقرار شد. پس از تعیین فورنیه اصلاح شده به عنوان شاخص انتخابی برای ایستگاه‌های باران‌سنجی که فاقد باران‌نگار بودند، مقادیر EI_{30} در ایستگاه‌های فاقد آمار شدت بارندگی با ضرایب به دست آمده، محاسبه شد. بعد از نرمال کردن داده‌های EI_{30} ، نیم تغییرنمای آن ترسیم و مدل مناسب بر آن برازش داده شد. سپس، روش‌های میان‌یابی مختلف کلاسیک در سطح کشور انجام و هر یک از آن‌ها با روش‌های ارزیابی تقاطعی مورد مقایسه قرار گرفت که در نهایت روش اسپلاین جهت ترسیم نقشه انتخاب شد. نقشه خروجی وجود روند کاهشی شاخص فرساینده گی باران را از مناطق غربی و شمالی به مناطق شرقی و جنوبی کشور نشان می‌دهد و این الگو مطابق با الگوی تغییرات اقلیمی از مناطق مرطوب به مناطق نیمه خشک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اسپلاین، باران‌سنجی، روش‌های زمین‌آمار، شاخص فرساینده گی باران، فرسایش آبی

مقدمه

فرسایش خاک یک مشکل مهم اجتماعی و اقتصادی و یک عامل ضروری در ارزیابی سلامتی و کارکرد اکوسیستم است (Chmelova و Sarapatka, ۲۰۰۲). فرسایش خاک فرآیندی تدریجی است که هنگام برخورد عامل فرسایش‌دهنده، مانند آب یا باد، به سطح خاک اتفاق افتاده و باعث جدا شدن و حرکت ذرات خاک و در نهایت تخریب آن می‌شود. مسئله فرسایش خاک و به‌خصوص فرسایش آبی، مشکل عمده‌ای در سراسر دنیا است. برای مثال در اروپا، مهم‌ترین اثر فرسایش آبی از دست رفتن خاک سطحی است که اغلب به چشم نمی‌آید، ولی بسیار مخرب است. تلفات ۲۰ تا ۴۰ تن خاک در هکتار در سال، در اثر رگبارهای منفرد، هر دو یا سه سال در اروپا اتفاق می‌افتد که در کنار آن تلفات بیش از ۱۰۰ تن در هکتار، در اثر رگبارهای شدید هم گزارش شده است (Morgan, ۱۹۹۲).

در مراحل اولیه فرسایش آبی، نیروی فرساینده ناشی از برخورد قطرات باران با جدا نمودن ذرات خاک و ایجاد رواناب سطحی مهم‌ترین تاثیر را در پدیده فرسایش و بالاترین همبستگی را با آن دارد. فرساینده‌گی باران نیروی محرکه یا توان عامل فرسایش‌زا در جداسازی و انتقال ذرات خاک است (Lal و Elliot, ۱۹۹۴). قدرت فرساینده‌گی باران نقش زیادی در فرسایش خاک داشته و می‌تواند نشان‌دهنده پتانسیل فرسایش در مناطق مورد نظر باشد. این عامل معمولاً در قالب شاخص‌های فرساینده‌گی که مبتنی بر خصوصیات بارندگی هستند، بیان می‌شود. محققان مختلف با اندازه‌گیری هم‌زمان میزان پاشمان یا تلفات خاک و خصوصیات بارندگی و برقراری روابطی بین آن‌ها به شاخص‌هایی رسیده‌اند که مبتنی بر خصوصیات بارندگی است. تاکنون شاخص‌های مختلفی در دنیا ارائه شده‌اند که بسته به منطقه جغرافیایی، مقیاس، شرایط محلی و نوع اندازه‌گیری متفاوت از هم هستند.

شاخص‌هایی که انرژی جنبشی باران یعنی KE را مد نظر قرار می‌دهند از جمله Whischmeier و همکاران (۱۹۵۸)، Lal (۱۹۷۶)، Foster و Brown (۱۹۸۷)، Onaga و همکاران (۱۹۸۸)، Hudson

(۱۹۷۱) در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطابق نظر Rose (۱۹۶۰)، مومنتوم بارندگی نسبت به انرژی جنبشی، جدا شدن ذرات خاک را بهتر پیش‌بینی می‌کند اما Hudson (۱۹۶۵)، در ارتباط با باران‌های طبیعی مطرح کرد که مومنتوم و انرژی جنبشی روابط بسیار مشابهی را با شدت بارندگی نشان می‌دهند. افراد دیگری نیز به‌طور گسترده‌ای از شاخص‌هایی از فرساینده‌گی باران استفاده نمودند که شامل انرژی جنبشی بود. اما این حقیقت باید مدنظر قرار گیرد که استفاده از انرژی جنبشی، به‌تنهایی، فرساینده‌گی باران‌هایی با شدت کم را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند.

تلاش‌ها برای برطرف کردن این مشکل منجر به استفاده از یک مقدار آستانه برای شدت بارندگی (Hudson, ۱۹۶۵ و Morgan, ۱۹۷۸)، ضرب کردن انرژی جنبشی در اندازه قطره باران (Govers, ۱۹۹۱)، ضرب کردن انرژی جنبشی رگبار در حداکثر شدت بارندگی (Whischmeier و همکاران, ۱۹۵۸; Lal, ۱۹۷۶)، و گاهی در ترکیب با یک مقدار آستانه از عمق رگبار شد (Renard و همکاران, ۱۹۹۷). اگر این شاخص‌های اخیر مربوط به فرسایش‌های قابل‌توجهی باشند، شامل جدا شدن خاک و انتقال آن به‌وسیله رواناب نیز می‌شوند. منطقی که برای چنین توافقاتی وجود دارد این است که قطرات کوچک‌تر (با شدت بارندگی کم)، کارآیی کمتری در جدا کردن ذرات خاک دارند (Sharma و Gupta, ۱۹۸۹ و Salles و Poeson, ۲۰۰۰).

قدرت فرساینده‌گی باران، از نظر آماری بهترین رابطه را با حاصل‌ضرب انرژی کل رگبار در حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای آن دارد (Wischmeier, ۱۹۵۹). این ترکیب که حاصل اندازه‌گیری‌های مستقیم است، اثر قطره باران و جریان سطحی را برای بارندگی که منجر به فرسایش خاک می‌شود، بیان می‌کند (Romkens و همکاران, ۲۰۰۲).

سه مدل عمده ریاضی که انرژی جنبشی رگبار یعنی KE را به شدت بارندگی (I) ارتباط می‌دهد، شامل مدل لگاریتمی، مدل نمایی و مدل هادسون (Hudson, ۱۹۶۵) است. مدل‌ها از نظر ثابت‌هایشان با هم تفاوت دارند که این مسئله به تفاوت در

داده‌های باران‌نگار در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای از شش ایستگاه در منطقه Pulau Penang از شبه جزیره مالزی برای محاسبه شاخص فرساینده باران در معادله RUSLE توسط Shamshad و همکاران (۲۰۰۸)، استفاده شد. برای تخمین مقادیر ماهانه EI_{30} سه روش مختلف مدل‌سازی به کار برده شد. اول استفاده از داده‌های مربوط به مقدار بارندگی و مدت زمان بارندگی، دوم استفاده از مقادیر ماهانه بارندگی برای روزهایی با مقدار مساوی یا بیشتر از ۱۰ میلی‌متر و تعداد روزهایی با مقدار بارندگی مساوی یا بیشتر از ۱۰ میلی‌متر و سوم استفاده از شاخص فورنیه به‌عنوان متغیر مستقل.

بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که در خصوص شاخص فرساینده باران در ایران کارهای اساسی نادری وجود دارد و پژوهش‌های مرتبط با آن را می‌توان در دو دسته اصلی تقسیم‌بندی نمود. در دسته اول، عموماً به تبع مدل‌های خارجی به مطالعه شاخص خاصی اقدام شده است، در حالی که در دسته دوم به‌نوعی شاخص‌ها و عوامل دخیل در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نسبت به معرفی برخی به‌عنوان شاخص برتر اقدام شده است.

از نمونه‌های دسته اول می‌توان به کار Mokhtarzadeh (۱۹۸۸) اشاره نمود که مقدار شاخص فرساینده EI_{30} را بر اساس آمار بارش در چند ایستگاه محاسبه کرد و با استفاده از آن‌ها کشور را به چند ناحیه با فرساینده‌گی مختلف تقسیم کرد. مطابق نقشه ارائه شده بیش‌ترین مقدار فرساینده‌گی مربوط به ناحیه خزری است و پس از آن ناحیه ساحلی جنوب قرار دارد. مناطق کوهستانی البرز و زاگرس و مناطق خشک داخلی کم‌ترین مقادیر فرساینده‌گی را به خود اختصاص داده‌اند.

در قالب طرح سیمای فرسایش حوزه‌های آبخیز، Hakimkhani و همکاران (۲۰۰۵) آمار ۱۳۳۷ ایستگاه از مجموع ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک، کليماتولوژی، تبخیرسنجی و باران‌سنج معمولی که دارای بیش از ۲۰ سال آمار بودند را مورد تحلیل قرار داد. وی مقدار فرساینده‌گی هر ایستگاه را به‌روش Arnoldus محاسبه کرد و بعد از انتخاب روش میان‌یابی مناسب، نسبت به تبدیل داده‌های نقطه‌ای

خصوصیات باران و موقعیت جغرافیایی محل اندازه‌گیری نسبت داده می‌شود (VanDijk و همکاران، ۲۰۰۲ و Fornis و همکاران، ۲۰۰۵). تخمین واقعی شاخص فرساینده‌گی مبتنی بر شدت بارندگی، مانند شاخص EI_{30} نیاز به داده‌های باران‌نگار در دراز مدت و در فواصل زمانی کم دارد، در بسیاری از مناطق دنیا به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه پوشش مکانی این داده‌ها اغلب مشکل است (Yu و همکاران، ۲۰۰۱ و Cohen و همکاران، ۲۰۰۵).

علاوه بر این، در شدت‌های بالای بارندگی، اشباع خاک (حداقل در عمق‌های کم) شاید کارایی جدا شدن را افزایش می‌دهد (Torri و همکاران، ۱۹۹۷). علی‌رغم این پیچیدگی‌ها، انرژی جنبشی باران هنوز هم مقدار کل انرژی جنبشی قابل دسترس برای جدا کردن و انتقال ذرات خاک به‌وسیله باران را گزارش می‌کند (Laws و Parsons، ۱۹۴۳) و اغلب به‌عنوان شاخصی از فرساینده‌گی باران، یعنی توانایی باران در جدا کردن ذرات خاک بیان می‌شود (Van Dijk و همکاران، ۲۰۰۲). انرژی فرساینده رگبارها اولین عامل کنش خاک و یک فاکتور تعیین‌کننده در انتقال رسوب و ذرات فاسفر به آب‌های سطحی است (Davison و همکاران، ۲۰۰۵). بنابراین، توان تولیدی اراضی ارتباطی تنگاتنگ با نیروی فرساینده‌گی باران دارد.

از دیگر ترکیبات پارامترهای باران می‌توان به ترکیب مقدار و شدت بارندگی AI_m (Lal، ۱۹۷۶) و مقدار و مدت بارندگی P/\sqrt{t} (Onchev، ۱۹۸۵) اشاره کرد. فرساینده‌گی باران در ۱۵۵ نقطه از ایالت‌های آمریکا توسط Renard و Freimund (۱۹۹۴)، ارزیابی شد و ایشان روابطی را بین R و مقدار کل بارش سالیانه در هر نقطه و ضریب فورنیه اصلاح شده (Fournier، ۱۹۶۰ و Arnoldus، ۱۹۸۰) مبتنی بر مقادیر ماهانه بارندگی را ارائه دادند. با استفاده از داده‌های مربوط به ۴۰۸ ماه (یعنی ۴۰۸ شاخص فرساینده‌گی ماهانه) Diodato (۲۰۰۵)، یک رابطه رگرسیونی بین شاخص‌های فرساینده‌گی و پارامترهای مختلف بارندگی به‌دست آورد. این رابطه به‌صورت یک معادله توانی چند متغیره (رگرسیون چند متغیره از نوع توانی) می‌باشد.

با استفاده از آمار باران‌های تهران طی یک دوره ۲۰ ساله، Shamsaei و Ghadami Firouzabadi (۲۰۰۶)، انرژی جنبشی و سپس شاخص فرسایندهی هر باران را با استفاده از رابطه Whischmeier و Smith محاسبه نمودند. سپس، روابطی را بین شاخص فرسایندهی سالانه و پارامترهای بارندگی از جمله مقدار باران روزانه، حداکثر باران ۲۴ ساعته و باران متوسط شش ساعته به دست آوردند.

Moradi و همکاران (۲۰۰۶) به منظور بررسی ارتباط بین پارامترهای بارندگی و عامل فرسایندهی باران EI_{30} در سه ایستگاه هواشناسی در استان خوزستان و یک ایستگاه در هر یک از استان‌های بوشهر و کهگیلویه و بویراحمد مقادیر ضریب فرسایندهی را محاسبه نمودند. نتایج موید ارتباط بالای فرسایندهی با مقدار و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای باران بود. تحقیق دیگری در استان کرمانشاه و با هدف تعیین بهترین شاخص فرسایندهی باران توسط Hemmati و همکاران (۲۰۰۹)، صورت گرفته است و نتایج نشان داد که شاخص EI_{60} بالاترین مقدار همبستگی را با مقادیر تلفات خاک داشته است. در تحقیق دیگری Sharifan (۲۰۰۷) با استفاده از آمار ۱۰ دقیقه‌ای باران‌های موجود در ایستگاه سینوپتیک گرگان، شاخص فرسایندهی باران را با روش Whischmeier، در منطقه محاسبه نمود.

Moshashei (۲۰۱۰) EI_{30} را در مقایسه با شاخص‌های AI_m ، $KE > 1$ و P/\sqrt{t} در استان اصفهان با همبستگی ۸۰ درصد مناسب تشخیص داده و برای پهنه‌بندی آن به کمک شاخص فورنیه اصلاح شده به عنوان متغیر کمکی، روش کوکریجینگ را در مقایسه با روش‌های میانگین متحرک وزن دار، اسپلاین کششی و کریجینگ مناسب تشخیص داد.

Esmali و همکاران (۲۰۱۰) در بررسی روابط بین قدرت فرسایندهی باران با تولید رسوب در استان اردبیل با مقایسه ۱۱ شاخص مختلف، شاخص I_{60} را به عنوان شاخص مناسب فرسایندهی باران معرفی نمودند. به منظور تعیین مناسب‌ترین شاخص فرسایندهی در دو اقلیم نیمه‌خشک و خیلی مرطوب حوزه آبخیز خزر، Khorsandi و همکاران (۲۰۱۲) رابطه رگرسیونی بین شاخص EI_{30} و فورنیه اصلاح

فرسایندهی به سطح و نقشه اقدام نمود. در ادامه برای بررسی وضعیت فرسایندهی باران و پتانسیل فرسایش ناشی از آن در سطح کشور، نقشه حاصل در پنج طبقه فرسایندهی ناچیز (< 20)، کم ($20-40$)، متوسط ($40-60$)، زیاد ($60-90$) و خیلی زیاد (> 90) همه بر حسب میلی‌متر قرار گرفت.

بررسی نقشه ارائه شده نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقادیر فرسایندهی بعد از ناحیه ساحلی خزر بر ارتفاعات میانی زاگرس انطباق دارد. سایر بخش‌های زاگرس، قسمت‌هایی از ارتفاعات البرز و قسمت‌هایی از ناحیه ساحلی جنوب نیز در مرتبه اهمیت بعدی قرار گرفته است. کویرهای داخلی و مناطق محاط بر آن نیز کم‌ترین مقادیر فرسایندهی را در این نقشه به خود اختصاص داده‌اند.

به عنوان جدیدترین پژوهش در دسته اول می‌توان به تغییرات مکانی و زمانی فاکتور فرسایندهی باران (R) در ایران توسط Sadeghi و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد. برای این کار، داده‌های ۱۸ ایستگاه‌های باران‌نگاری سازمان هواشناسی مورد استفاده قرار گرفت و انرژی جنبشی هر رگبار به روش Wischmeier و Smith محاسبه و مقادیر ماهانه، فصلی و سالانه آن در مناطق مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده بیشینه $11/52$ و $4/26$ مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت به ترتیب در ایستگاه‌های انزلی و بابلسر و کمینه $0/20$ و $0/21$ مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت به ترتیب در ایستگاه‌های بم و سمنان بود.

در دسته دوم پژوهش‌های مرتبط با شاخص فرسایندهی باران می‌توان به کار Nikkami و همکاران (۲۰۰۵) اشاره کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که شاخص I^2 (مربع شدت متوسط رگبار) بالاترین مقدار همبستگی را با مقادیر تلفات خاک داشته است. طی یک مطالعه موردی در استان اصفهان، Yazdani و همکاران (۲۰۰۵) برای بررسی شاخص فرسایندهی باران، با توجه به کمبود ایستگاه‌های باران‌نگار، از آمار حداکثر بارش روزانه استفاده نموده و با استفاده از روش FAO و Whischmeier مقادیر حداکثر فرسایندهی بارش را در تداوم‌های زمانی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه محاسبه نمودند.

پس از این مرحله، در تعدادی از ایستگاه‌های هواشناسی مجهز به باران‌نگار در سطح هر یک از هفت استان، میانگین شاخص مناسب مبتنی بر شدت و تعدادی از شاخص‌های مبتنی بر مقدار، طی یک دوره آماری ۲۰ ساله معین محاسبه و با بررسی روابط رگرسیونی و ضرایب همبستگی بین آن‌ها، مناسب‌ترین رابطه تعیین شد. روابط مذکور اساس محاسبه شاخص مبتنی بر شدت در ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در سطح استان‌های هم اقلیم قرار گرفت (Diodato, ۲۰۰۵؛ Shamsad و همکاران؛ ۲۰۰۸، Moshashei, ۲۰۱۰؛ Khorsandi و همکاران، ۲۰۱۲؛ Kiasari و Moussavi و همکاران، ۲۰۱۲).

در مرحله آخر، به منظور پهنه‌بندی شاخص مناسب فرساینده‌گی باران در کل سطح حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه، روش‌های مختلف درون‌یابی شامل روش‌های کلاسیک و فازی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، مناسب‌ترین روش درون‌یابی برای هر یک از حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه انتخاب و در تهیه نقشه شاخص فرساینده‌گی باران مورد استفاده قرار گرفت. تا سال ۱۳۸۵ یعنی شروع این پروژه تحقیقاتی، جمعاً در شش ایستگاه تحقیقات خراسان رضوی، زنجان، سمنان، مازندران، مرکزی و کردستان، کرت‌های فرسایش ساخته و تجهیز شده بودند و تعداد دو ایستگاه نیز با شروع این تحقیق در استان‌های آذربایجان غربی و یزد ساخته شدند. با این حال، ایستگاه کردستان به دلیل نقص داده‌ها عملاً مورد استفاده قرار نگرفت.

آمار و اطلاعات مورد نیاز: آمار بلندمدت مربوط به مقادیر بارش در ایستگاه‌های باران‌سنجی مستقر در سطح هفت استان و آمار بلندمدت بارش مربوط به ایستگاه‌های باران‌نگاری استان‌ها (دارای مقادیر شدت) به وسیله سازمان هواشناسی کل کشور جمع‌آوری شد. لازم به توضیح است که انتخاب این ایستگاه‌ها پس از حذف ایستگاه‌های با آمار کمتر از ۲۰ سال، صورت گرفت.

شاخص‌های فرساینده‌گی باران: به منظور تهیه نقشه فرساینده‌گی باران در مرحله اول، تعیین مناسب‌ترین شاخص فرساینده‌گی در شرایط هر منطقه مطرح بود.

شده را در ۲۰ ایستگاه سینوپتیک به دست آورده و به کمک آن میزان EI_{30} را در ایستگاه‌های باران‌سنجی برآورد نمود. در تحقیق دیگری (Moussavi Kiasari و همکاران (۲۰۱۲) با مقایسه ۶۳ شاخص فرساینده‌گی باران در سه استان خراسان رضوی، سمنان و اصفهان به ترتیب شاخص‌های $\sqrt{P} \times I_{30}^2$ ، $\sqrt{P} \times I_{60}^2$ و $(P \times t)^2 \sqrt{d}$ همبستگی بالایی را با تلفات خاک کرت‌ها نشان داد و شاخص EI_{30} با ضریب همبستگی پایین‌تری در هر سه استان از شاخص‌های مورد اعتماد بودند.

به جز موارد معدودی نظیر پژوهش‌های مذکور، متأسفانه اقدامات انجام شده در کشور غالباً بر اساس استفاده مستقیم از شاخص EI_{30} و شاخص فورنیه بوده، در صورتی که به دفعات در تحقیقات مختلف اشاره شده که بررسی شاخص مناسب در شرایط اقلیمی متفاوت یکی از ضروریات است. لذا در تحقیق حاضر اقدام به مقایسه شاخص‌های مختلف فرساینده‌گی باران شده و سپس پهنه‌بندی شاخص مناسب با مقایسه روش‌های مختلف زمین‌آمار صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

به منظور رسیدن به اهداف این تحقیق، بررسی‌های اولیه نشان داد که وجود ایستگاه‌های تحقیقات فرسایش خاک مجهز به باران‌نگار و کرت‌های جمع‌آوری رواناب و رسوب ضروری است. لذا، این پروژه ملی در هفت استان آذربایجان غربی، خراسان رضوی، زنجان، سمنان، مازندران، مرکزی و یزد که این شرایط را دارا بوده و یا امکان احداث ایستگاه را در کوتاه‌ترین زمان ممکن دارا می‌باشند، انجام شد.

ابتدا، در هر یک از ایستگاه‌ها و طی یک دوره زمانی معین، بارش‌های منفرد منجر به رواناب و تلفات خاک، ثبت و سپس شاخص‌های مبتنی بر شدت بارش در طول مدت آماربرداری محاسبه شد. در مرحله بعد، با برقراری روابط رگرسیونی بین هر یک از شاخص‌ها و مقادیر تلفات خاک متناظر از کرت‌ها و بررسی ضرایب همبستگی، مناسب‌ترین شاخص مبتنی بر شدت در هر یک از ایستگاه‌های محل انجام طرح انتخاب شد.

بر شدت بارندگی و رسوب خروجی کرت‌های احداث شده در هر استان مورد بررسی قرار گرفت تا بر این اساس شاخص فرساینده‌گی مناسب تعیین شود. سپس، رابطه بین شاخص فرساینده‌گی مناسب و شاخص‌های مبتنی بر مقدار بارندگی بررسی شد و از این طریق مناسب‌ترین شاخص زودیافت مشخص شد.

به این منظور ۶۴ شاخص فرساینده‌گی (جدول ۱) از منابع موجود استخراج شد. روابط تعدادی از رایج‌ترین شاخص‌های فرساینده‌گی مبتنی بر انرژی جنبشی باران در جدول ۲ ملاحظه می‌شوند. پس از محاسبه شاخص‌های فرساینده‌گی مبتنی بر شدت بارندگی، رابطه همبستگی بین شاخص‌های فرساینده‌گی مبتنی

جدول ۱- شاخص‌های فرساینده‌گی باران

| ردیف | شاخص فرساینده‌گی | نماد |
|-------|--|--|
| ۱-۶ | حداکثر شدت ۵ الی ۱۲۰ دقیقه‌ای بارش (ماخذ $I_{max 30}$ و Whischmeier و Smith، ۱۹۷۸ و بقیه Nikkami و همکاران، ۲۰۱۰) | $I_{max 5}, I_{max 10}, I_{max 15}, I_{max 30}, I_{max 60}, I_{max 120}$ |
| ۷-۸ | شدت بارندگی، به ترتیب از چپ (Roose، ۱۹۷۷) و (Nearing و همکاران، ۱۹۸۹) انرژی جنبشی، به ترتیب از چپ KE_1 الی KE_6 (Salles و همکاران، ۲۰۰۲)، KE_9 (Rezaur و Jayawardena، ۲۰۰۰)، KE_{10} (Nyssen، ۲۰۰۵)، KE_{11} (Van Dijk و همکاران، ۲۰۰۲)، KE_{12} (Alizadeh، ۱۹۸۹)، KE_{13} (Salles و همکاران، ۲۰۰۲)، $KE > 25$ (Hudson، ۱۹۷۱) و $KE > 10$ (Morgan، ۱۹۹۵) | $I^{1.5}, I^2$ $KE_1, KE_2, KE_3, KE_4, KE_5, KE_6, KE_7, KE_8, KE_9, KE_{10}, KE_{11}, KE_{12}, KE_{13}, KE > 25, KE > 10$ |
| ۲۴-۲۹ | حاصل ضرب انرژی جنبشی در حداکثر شدت ۵ الی ۱۲۰ دقیقه‌ای (ماخذ EI_{30} ، Whischmeier و Smith، ۱۹۷۸ و بقیه Nikkami و همکاران، ۲۰۱۰) | $EI_5, EI_{10}, EI_{15}, EI_{30}, EI_{60}, EI_{120}$ |
| ۳۰ | مقدار بارندگی | A |
| ۳۱-۳۲ | زمان و شدت بارندگی (به ترتیب از چپ Onchev، ۱۹۸۵ و Lal، ۱۹۷۶) | $P / \sqrt{t}, AI_m$ |
| ۳۳-۳۵ | مقدار بارش به‌ازاء حداکثر شدت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه‌ای (Hemmati و همکاران، ۲۰۰۹) | P_{30}, P_{20}, P_{10} |
| ۳۶-۳۸ | Stanescu (Type I الی Type III) (Hemmati و همکاران، ۲۰۰۹) | R_{30}, R_{20}, R_{10} |
| ۳۹-۴۰ | Epema و Riezebosa (Type I و Type II) (۱۹۸۵) | $KE / d^2, KE / d$ |
| ۴۱-۴۳ | Hudson (Type I الی Type III)، Nikkami و همکاران، ۲۰۱۰ | $KE > 1, KE > 2.5, KE > 5$ |
| ۴۴ | جذر حاصل ضرب مقدار کل بارش در مدت زمان بارش (Nikkami و همکاران، ۲۰۱۰) | \sqrt{At} |
| ۴۵-۴۷ | حاصل ضرب مقدار کل بارش در حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای بارش (Nikkami و همکاران، ۲۰۱۰) | $AI_{30}^2, AI_{30}, A\sqrt{I_{30}}$ |
| ۴۸ | مربع مقدار کل انرژی جنبشی بارش (Nikkami و همکاران، ۲۰۱۰) | $\sum KE^2$ |
| ۴۹-۵۲ | حاصل ضرب مقدار کل انرژی جنبشی در قطر میانه ذرات بارش (Salles و همکاران، ۲۰۰۲) | $KE.d, KE.d^2, KE.\sqrt{d}, KE/\sqrt{d}$ |
| ۵۳ | مجموع حاصل ضرب مقادیر بارش‌های جزئی در شدت‌های مربوطه (Hemmati و همکاران، ۲۰۰۹) | $\sum (P.I)$ |
| ۵۴-۵۵ | حاصل ضرب قطر میانه ذرات در مقدار کل بارش (Hemmati و همکاران، ۲۰۰۹) | $d.P, (d)^2.P$ |
| ۵۶ | حاصل ضرب قطر میانه ذرات در شدت بارش (Hemmati و همکاران، ۲۰۰۹) | d.I |
| ۵۷ | حاصل ضرب قطر میانه ذرات در مجموع حاصل ضرب بارش‌ها در شدت‌ها (Hemmati و همکاران، ۲۰۰۹) | $(\sum (P.I)).d$ |
| ۵۸-۶۴ | حاصل ضرب مقدار بارش در حداکثر شدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه‌ای (Hemmati و همکاران، ۲۰۰۹) | $\sqrt{P}.I_{30}, \sqrt{P}.I_{30}^2, P.I_{60}, P.\sqrt{I_{60}}, \sqrt{P}.I_{60}, \sqrt{P}.I_{60}^2, P.I_{60}^2$ |

ایستگاه‌های دارای باران‌نگار هر استان تعیین شد. سپس، از روابط رگرسیونی به‌دست آمده، برای برآورد مقدار شاخص مناسب مبتنی بر شدت در ایستگاه‌های

در مرحله بعد، رابطه رگرسیونی بین شاخص مناسب مبتنی بر شدت به‌عنوان متغیر وابسته و شاخص زودیافت به‌عنوان متغیر مستقل در

دامنه یا شعاع تاثیر تعیین شدند. در این تحقیق به منظور تهیه نقشه شاخص فرسایندهای حوزه از روش‌های میان‌یابی کلاسیک شامل کریجینگ، کوکریجینگ، عکس فاصله وزن‌دار و توابع پایه شعاعی (اسپلاین کاملاً منظم^۱، اسپلاین با کشش^۲، چندجمله‌ای درجه دوم^۳، چندجمله‌ای درجه دوم معکوس^۴ و اسپلاین صفحه نازک^۵) و روش‌های برپایه منطق فازی (فازی کوکریجینگ، فازی کریجینگ، فازی اسپلاین و فازی عکس فاصله وزن‌دار) با استفاده از نرم‌افزار Matlab استفاده شد. در نهایت با مقایسه معیارهای سنجش خطا شامل میانگین مطلق خطا و میانگین انحراف خطا، روش میان‌یابی با کمترین میزان خطای برآورد تعیین شد. همچنین، تطابق توزیع مکانی شاخص فرسایندهای در نقشه‌های به‌دست آمده با فیزیک منطقه نیز مورد بررسی قرار گرفت.

باران‌سنجی هر استان استفاده شد و در واقع، نتایج ایستگاه‌های باران‌نگاری به کل ایستگاه‌های باران‌سنجی بسط داده شد. به منظور افزایش دقت مطالعه بر اساس عامل تاثیرگذار بر مقدار شاخص فرسایندهای باران، حوزه آبخیز به تعدادی مناطق همگن تقسیم شد. این امر از طریق آنالیز خوشه‌ای با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام گرفت.

به منظور بررسی آزمون همبستگی مکانی بین داده‌های شاخص فرسایندهای و بررسی چگونگی این همبستگی از نیم‌تغییرنا استفاده شد. ترسیم و بررسی نیم‌تغییرنا با استفاده از نرم‌افزار GS⁺ و ArcGIS انجام گرفت. در صورتی که نیم‌تغییرنا به آستانه یا سقف معینی برسد و در نتیجه دامنه تاثیر مشخصی داشته باشد، شرایط صدق فرضیه ساختار مکانی می‌تواند برقرار باشد. با برآزش مدل ثنوریک مناسب بر نیم‌تغییرنا، پارامترهای آن شامل آستانه، اثر قطعه‌ای و

جدول ۲- روابط تعدادی از رایج‌ترین شاخص‌های فرسایندهای مبتنی بر انرژی جنبشی باران

| رابطه | سال ارائه | ارائه دهنده | ردیف |
|---|-----------|----------------------|------|
| $KE = 8.95 + 8.44 \log I$ | ۱۹۴۸ | Marshal & Palmer | ۱ |
| $KE = 29.8 - (127.5 / I)$ | ۱۹۶۵ | Hudson | ۲ |
| $E = 11.87 + 8.73 \log_{10}(R)$ | ۱۹۷۸ | Wischmeier & Smith | ۳ |
| $KE = 9.81 + 11.25 \log(I)$ | ۱۹۸۰ | Zanchi & Torri | ۴ |
| $E = 29.22 [1 - 0.894e^{(-0.047R)}]$ | ۱۹۸۱ | Kinnell | ۵ |
| $E = \sum_{r=1}^k 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.05i_r)]$ | ۱۹۸۷ | Brown & Foster | ۶ |
| $KE = 9.81 + 10.6 \log I$ | ۱۹۸۸ | Onaga et al. | ۷ |
| $KE_B = 8.95 + 8.73 \log_{10} I$ | ۱۹۹۰ | Brandt | ۸ |
| $E = 35.9 [1 - 0.559e^{(-0.034R)}]$ | ۱۹۹۵ | Cutinho & Tomas | ۹ |
| $E = 38.4 [1 - 0.538e^{(-0.029R)}]$ | ۱۹۹۸ | Cerro et al. | ۱۰ |
| $E = 36.8 [1 - 0.691e^{(-0.038R)}]$ | ۲۰۰۰ | Jayawardena & Rezaur | ۱۱ |
| $KE = 10.2 + 8.9 \log(i)$ | ۲۰۰۲ | Alizadeh | ۱۲ |
| $E = 28.3(1 - 0.52^{-0.042I})$ | ۲۰۰۲ | Van Dijk et al. | ۱۳ |
| $EK_{vol} = 36.65(1 - 0.6/I)$ | ۲۰۰۵ | Nyssen | ۱۴ |

نتایج و بحث

شاخص فرسایندهای مناسب، از بررسی رابطه بین شاخص‌های فرسایندهای مبتنی بر شدت باران و تلفات

مقادیر متوسط ۶۴ شاخص فرسایندهای مبتنی بر شدت بارندگی مربوط به هفت ایستگاه مجهز به باران‌نگار و کرت‌های فرسایش و رسوب در استان‌های آذربایجان غربی، سمنان، خراسان رضوی، زنجان، مازندران، مرکزی و یزد محاسبه شد. به منظور تعیین

¹ Completely Regularized Spline

² Spline with Tension

³ Multiquadratic

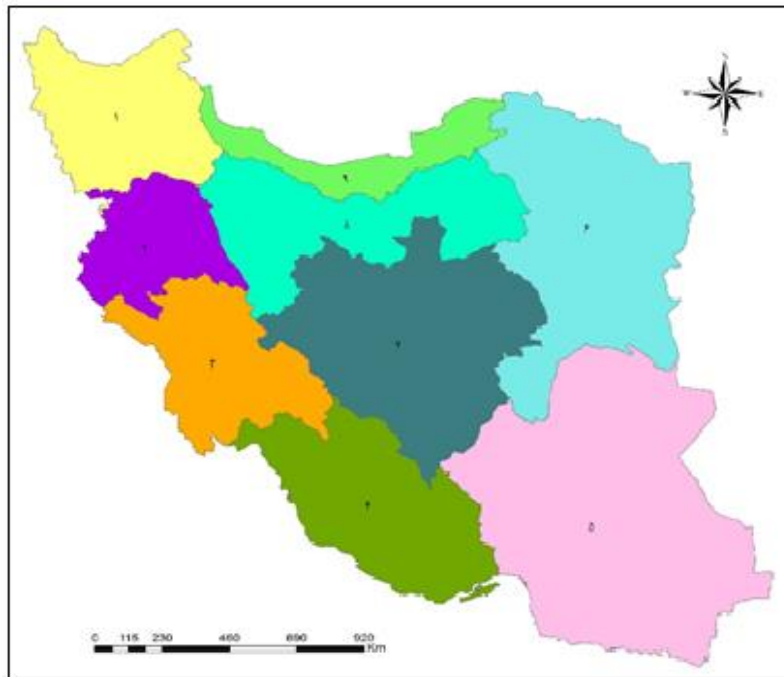
⁴ Inverse Multiquadratic

⁵ Thin Plate Spline

ایستگاه‌های هواشناسی پراکنده در کشور، آمار ۲۶۲ ایستگاه از نظر طول دوره آماری و کیفیت داده‌ها قابل استفاده تشخیص داده شد و از این تعداد تنها ۷۸ ایستگاه مجهز به دستگاه باران‌نگار بودند. با توجه به اینکه شاخص EI_{30} به‌عنوان شاخص فرساینده‌گی، مناسب تشخیص داده شد و این شاخص با شاخص فورنیه اصلاح شده از میان شاخص‌های زودپیافت، همبستگی معنی‌داری را نشان داده است، پس از تعیین روابط بین این دو شاخص در استان‌های هفت‌گانه حاوی کرت‌های فرسایش، با استفاده از نقشه اقلیمی کشور برای هر استان رابطه تبدیل شاخص زودپیافت به شاخص EI_{30} به‌دست آمد. شکل ۱، مناطق همگن اقلیمی را نشان می‌دهد.

خاک در کرت‌های احداث شده در هفت ایستگاه تحقیقاتی استفاده شد. بنابراین، در این مرحله روابط همبستگی بین شاخص‌های مبتنی بر شدت بارندگی هر رگبار و تلفات خاک کرت‌های فرسایش و رسوب هر رخداد بارندگی بررسی شد.

تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی بیش‌تر از ایستگاه‌های سینوپتیک است، اما این ایستگاه‌ها فاقد آمار شدت بارندگی می‌باشند. از آنجایی که برآورد میزان فرسایش در کشور با استفاده از مدل‌های فرسایشی نیازمند شاخص‌های مبتنی بر شدت بارندگی است، برآورد این شاخص‌ها از بررسی رابطه‌اشان با شاخص‌های زودپیافت حاصل از ایستگاه‌های باران‌سنجی میسر می‌شود. در میان



شکل ۱- مناطق همگن اقلیمی مورد استفاده در تهیه نقشه شاخص فرساینده‌گی باران

نسبت به سایر روش‌های برآورد شاخص فرساینده‌گی باران برخوردار است و پس از آن به‌ترتیب روش‌های اسپلین با تابع چندجمله‌ای درجه دوم، کریجینگ معمولی، یونیورسال کریجینگ و عکس فاصله وزن‌دار قرار دارند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، خطای مطلق در روش کوکریجینگ نسبت به روش اسپلین با تابع درجه دوم ۰/۶۷ درصد کاهش داشته است. اما مقدار انحراف در روش اسپلین با تابع درجه دوم معکوس ۷۸/۲ درصد کمتر از روش کوکریجینگ است.

به‌منظور نرمال‌سازی داده‌های شاخص فرساینده‌گی روش لوگ-نرمال با چولگی ۰/۰۱- و کشیدگی ۲/۰۶ مناسب‌ترین روش تشخیص داده شد. مقادیر خطای مطلق و انحراف روش‌های عکس فاصله وزن‌دار، کریجینگ، کوکریجینگ و اسپلین با تابع چندجمله‌ای درجه دوم در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، روش کوکریجینگ با کم‌ترین میزان خطای مطلق (۸۱/۴۱) و میانگین مربعات خطا (۱۲۹/۶۴) در منطقه از دقت بیش‌تری

کنار گذاشته شد. همچنین، مقادیر منفی MBE به دست آمده در روش یونیورسال کریجینگ نشان‌دهنده آن است که در کل این روش‌ها، روش‌های کم برآوردی در تخمین شاخص فرساینده‌گی باران کشور می‌باشند. در حالی که مقادیر مثبت MBE در روش‌های کوکریجینگ، عکس فاصله وزن دار و اسپلین بیش برآورد بودن این روش‌ها در تخمین شاخص فرساینده‌گی باران کشور را نشان می‌دهد.

با وجود چنین نتیجه‌ای و با در نظر گرفتن این مسئله که بر اساس نیم تغییرنمای شاخص فرساینده‌گی باران، میتوان چنین نتیجه گرفت که به دلیل شرایط مختلف اقلیمی و آب و هوایی در کشور، شرط ایستایی که از شروط استفاده از روش‌های زمین‌آماری شامل انواع کریجینگ و کوکریجینگ است، برقرار نمی‌باشد؛ بنابراین با وجود میانگین مطلق خطای کمتر در روش کوکریجینگ استفاده از این روش ملقا و این روش

جدول ۳- نتایج ارزیابی روش‌های مختلف میان‌یابی در برآورد شاخص فرساینده‌گی باران

| منطقه | خطاها | عکس فاصله وزن دار | کریجینگ معمولی | یونیورسال کریجینگ | کوکریجینگ | اسپلین با تابع درجه دو |
|-------|-------|-------------------|----------------|-------------------|-----------|------------------------|
| | MAE | ۹۰/۰۲ | ۸۲/۱۲ | ۸۵/۱۷ | ۸۱/۴۱ | ۸۱/۹۶ |
| ایران | MBE | ۱/۶۶ | ۲/۷۸ | -۹/۴۹ | ۲/۷۶ | ۰/۶ |
| | RMSE | ۱۴۷/۸۳ | ۱۲۹/۸۳ | ۱۳۶/۷۶ | ۱۲۹/۶۴ | ۱۳۳/۰۶ |

مختلف در مناطق سبب تولید نقشه‌هایی با روند تغییرات ناهمگن می‌شود که اصلاح این ناهماهنگی خطای قابل توجهی ایجاد می‌نماید و این افزایش خطا بیش از حالتی است که کل کشور به صورت یکپارچه مورد آزمون قرار گیرد.

بر اساس جدول ۴، زمانی که نقشه‌های تولید شده در هر منطقه به هم وصل شدند، میزان خطای برآورد از عدد ۱۰۲/۲۹ به ۱۳۴/۱۸ افزایش یافت و این میزان بیش از حالتی است که شاخص فرساینده‌گی در کل کشور به صورت یکپارچه و با روش اسپلین‌ها برآورد می‌شود. بنابراین تهیه نقشه شاخص فرساینده‌گی باران در کل کشور و به صورت یکپارچه با روش اسپلین به اجرا در آمد. شکل ۲، نقشه تهیه شده با این روش را نشان می‌دهد.

به منظور مقایسه عملکرد دو روش منطقه‌بندی و یکپارچه‌سازی مناطق، پس از محاسبه میانگین RMSE در کلیه مناطق در روش منطقه‌بندی، نسبت میانگین‌ها به ریشه میانگین مربعات محاسبه شد که حاصل این عمل، بیان‌گر این مطلب است که میزان خطا در روش مورد نظر نسبت به میانگین مشاهدات به چه میزان است. سپس با محاسبه نسبت میان میانگین مربعات خطا به میانگین مشاهدات در روش یکپارچه‌سازی جدول ۴ تهیه شد.

همان‌طور که در این جدول مشخص است، با منطقه‌بندی کشور به مناطق همگن، خطای برآورد کاهش می‌یابد. اما این کاهش قابل چشم‌پوشی است، زیرا نقشه‌های تولید شده در هر منطقه فاقد هم پوشانی با هم هستند. به علاوه، استفاده از چند روش

جدول ۴- ارزیابی عملکرد روش منطقه‌بندی و یکپارچه‌سازی مناطق در برآورد شاخص فرساینده‌گی باران

| روش | MEAN | RMSE | RMSE/ MEAN |
|----------------------------------|--------|--------|------------|
| منطقه‌بندی | ۳۳۶/۳۱ | ۱۰۲/۲۹ | ۰/۳ |
| یکپارچه‌سازی مناطق | ۳۰۷/۶۲ | ۱۳۳/۰۶ | ۰/۴ |
| نقشه اصلاح‌شده در روش منطقه‌بندی | ۳۳۶/۳۱ | ۱۳۴/۱۸ | ۰/۴ |

در هکتار در سال به دست آمد. همچنین حداقل میزان شاخص فرساینده‌گی باران مربوط به ایستگاه بم واقع در استان کرمان با مقدار ۲۵/۶۸ (مگاژول میلی‌متر در

این نتایج به طور تقریبی منطبق با شرایط اقلیمی ایران می‌باشد. به طوری که، میانگین برآورد شاخص فرساینده‌گی باران در کشور ۳۰۸/۲۳ مگاژول میلی‌متر

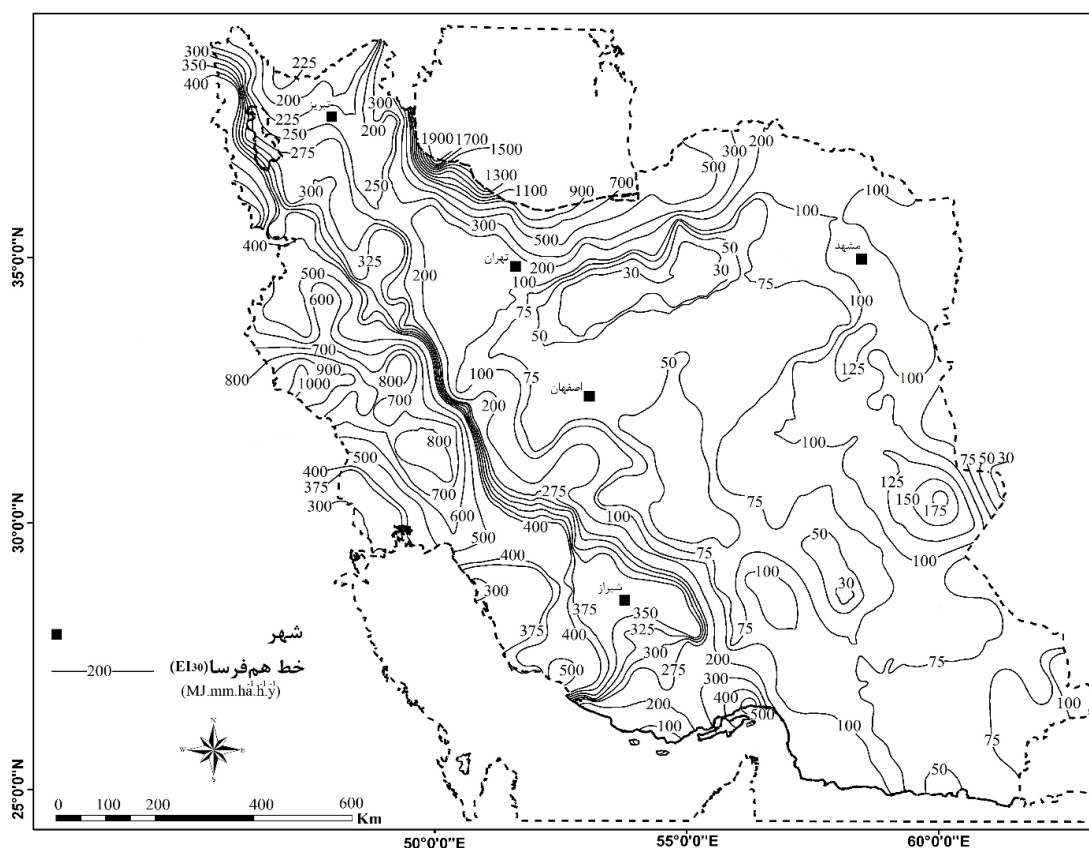
مگاژول میلی‌متر در هکتار در سال به ترتیب برای بم و سمنان اعلام نموده‌اند. مقادیر کمینه اعلام شده توسط ایشان با مقادیر متناظر در این تحقیق تفاوت معنی‌داری ندارند ولی در مقادیر بیشینه تفاوت زیاد است. علت این تفاوت را می‌شود در داده‌های استفاده شده ایستگاه‌های باران‌نگاری جستجو کرد.

در بررسی‌های به‌عمل آمده بر روی داده‌های این ایستگاه‌ها اختلاف فاحشی بین داده‌های ایستگاه‌های باران‌نگاری و باران‌سنجی هر ایستگاه هواشناسی از نظر جمع بارش هر واقعه ثبت شده ملاحظه شد. به‌طوری که داده‌های ایستگاه‌های باران‌نگاری تا میزان بالغ بر چهار برابر کمتر از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی را نشان می‌دادند که در این تحقیق اقدام به اصلاح این خطا شده است.

هکتار) و حداکثر میزان این شاخص برابر با ۲۰۱۰/۳۶ (مگاژول میلی‌متر در هکتار) در ایستگاه انزلی واقع در استان گیلان است.

شاخص فرساینده‌گی باران از عوامل متعددی متأثر می‌شود که از آن جمله دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان و نیز ارتفاعات می‌باشند (Mokhtarzadeh, ۱۹۸۸). Mokhtarzadeh (۱۹۸۸) دریافت که در برخی موارد این دو عامل به‌صورت مشترک عمل می‌کنند، به‌طوری که در شمال ایران هر دو عامل نزدیکی به دریا و ارتفاع مقادیر زیاد شاخص فرساینده‌گی را سبب شده‌اند.

Sadeghi و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی تغییرات مکانی و زمانی شاخص فرساینده‌گی مقادیر بیشینه ۱۱۵۲ و ۴۲۶ مگاژول میلی‌متر در هکتار در سال به ترتیب برای انزلی و بابلسر و مقادیر کمینه ۲۰ و ۲۱



شکل ۲- نقشه شاخص فرساینده‌گی باران ایران

بر شدت بارندگی، شاخص EI_{30} به‌طور مشترک هم‌بستگی بالایی را با رسوب خروجی نشان داد و شاخص فرساینده‌گی مناسب برای هفت استان

با توجه به مطالب ارائه شده، موارد زیر به‌طور مختصر در راستای جمع‌بندی نتایج تحقیق قابل استنتاج است. از بین شاخص‌های فرساینده‌گی مبتنی

کرت‌های کنترل شده بهبود داده شود به‌نحوی که بتوان کشور را به‌وسیله آن‌ها تحت پوشش قرار داد. همچنین، طول دوره آماربرداری از مقادیر شدت، مقدار بارندگی و رسوب خروجی متناظر آن‌ها نیز بیشتر شود، این امر می‌تواند نتایج دقیق‌تری را سبب شود. توصیه می‌شود تا امکان اندازه‌گیری سایر پارامترهای بارندگی از قبیل قطر و سرعت سقوط ذرات نیز فراهم شود تا به این طریق بتوان علاوه بر شاخص‌های فرساینده‌گی مبتنی بر شدت و مقدار بارندگی، شاخص‌های مبتنی بر قطر و سرعت سقوط ذرات را نیز مورد مطالعه قرار داد. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر تغییرات مکانی شاخص فرساینده‌گی باران مورد بررسی قرار گرفته است، توصیه می‌شود تغییرات زمانی آن نیز برای فصول مختلف مورد مطالعه قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مالی پژوهشکده حفاظت خاک و آب‌خیزداری و از زحمات سرکار خانم مهندس فانیذ حشمتی و سرکار خانم مهندس شیرین مرادی به‌ترتیب در ارائه خدمات آماری و GIS در این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

آذربایجان غربی، خراسان رضوی، زنجان، سمنان، مازندران، مرکزی و یزد محسوب شد. از آن‌جا که شاخص فورنیه اصلاح شده یا آرنولدس بیشترین همبستگی را با مناسب‌ترین شاخص فرساینده‌گی باران (EI_{30}) در هفت استان کشور نشان داد، از رابطه رگرسیونی به‌دست آمده بین آن‌ها به‌منظور تخمین شاخص EI_{30} در ایستگاه‌های فاقد آمار شدت بارندگی استفاده شد.

نتایج ارزیابی روش‌های میان‌یابی کلاسیک به منظور برآورد شاخص فرساینده‌گی باران در مناطق مورد مطالعه بیانگر آن است که روش اسپلاین با تابع چندجمله‌ای درجه دوم، با میانگین مطلق خطای، ریشه میانگین مربعات خطای و انحراف از خطای نسبت به سایر روش‌ها از دقت بالاتری برخوردار است. با توجه به نتایج به‌دست آمده و دستاوردهای کلی این تحقیق، موارد زیر برای تکمیل آن در آینده پیشنهاد می‌شود.

در این تحقیق، تعیین مناسب‌ترین شاخص فرساینده‌گی از طریق بررسی رابطه بین شاخص فرساینده‌گی با رسوب خروجی کرت‌های کنترل شده تنها در هفت استان در سطح کشور انجام شد. به‌منظور افزایش دقت تحقیق، توصیه می‌شود پراکنش

منابع مورد استفاده

1. Alizadeh, A. 1989. Soil erosion and conservation. Astane Ghods Razavi Publications, 255 pages.
2. Arnoldus, H.M. 1980. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In: De Boodt, M. and D. Gabriels (Eds.). Assessment of Erosion, John Wiley and Sons, Inc. Chichester, West Sussex, UK, PP. 127-132.
3. Brown, L.C. and G.R. Foster. 1987. Storm erosivity using idealized intensity distributions. T. Am. Soc. Agri. Eng., 30: 379-386.
4. Chmelova, R. and B. Sarapatka, 2002. Soil erosion by water: contemporary research methods and their use. Geographica, 37, 23-30.
5. Cohen, M.J., K.D. Shepherd and M.G. Walsh. 2005. Empirical formulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed. Geoderma, 124: 235-25.
6. Davison, P., M.G. Hutchins, S.G. Anthony, M. Betson, C. Johnson and E.I. Lord. 2005. The relationship between potentially erosive energy and daily rainfall quantity in England and Wales, Science of the Total environment 344: 15-25.
7. Diodato, N. and M. Ceccarelli. 2005. Interpolation processes using multivariate geostatistical for mapping of climatological precipitation in the Sennio mountains (Southern Italy). Earth Surface and Landform, 30: 259-268.
8. Esmali, A., M. Abedini, A. Kaviani and H. Saadati. 2010. Investigating the relation between rainfall erosivity with sediment yield using geostatistical method in Ardabil province. Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, 4(10):51-55.
9. Fournier, F. 1960. Climate and erosion. University of Paris, Paris.
10. Fornis, R.L., H.R. Vermeulen and J.D. Niewenhuis. 2005. Kinetic energy-rainfall intensity relationship for central Cebu, Philippines for soil erosion studies. Journal of Hydrology, 300: 20-32.

11. Ghadami Firouzabadi, A. and A. Shamsaei. 2006. Estimating erosivity index from the amount of daily rainfall, case study: Tehran. *Agricultural Science and Natural Recourses*, 13: 31-38.
12. Govers, G. 1991. Spatial and temporal variations in splash detachment: A field study. *Catena, Suppl.*, 20: 15-24.
13. Hakimkhani, S., M.H. Mahdian, M. Arabkhedri and D. Ghorbanpoor. 2005. Investigating rainfall erosivity in Iran. 3rd Erosion and Sediment National Conference, 28-31 August, Tehran, Iran.
14. Hemmati, M., D. Nikkami, H. Ahmadi, G. Zehtabian and M. Jafari. 2009. Determining appropriate rainfall erosivity index in a cold semi-arid region of Iran, case study: Kermanshah province. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 1(1): 21-31.
15. Hudson, N.W. 1965. The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion with particular reference to Southern Rhodesia. MSc thesis, University of Cape Town.
16. Hudson, N.W. 1971. Soil conservation. Cornell University Press, Ithaca, New York.
17. Jayawardena, A.W. and R.B. Rezaur. 2000. Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong. *Hydrol. Proc.*, 4: 1069-1082.
18. Khorsandi, N., M.H. Mahdian, E. Pazira, D. Nikkami, H. Chamheidar. 2012. Comparison of the different interpolation methods for investigating spatial variability of the index. *Polish Journal of Environmental Studies*, 21(6): 1659-1666.
19. Lal, R. 1976. Soil erosion on alfisols in western Nigeria, III, effects of rainfall characteristics. *Geoderma*, 16: 389-401.
20. Lal, R. and W. Elliot. 1994. Erodibility and erosivity. In: Lal, R. (Ed.), *Soil erosion: research methods. A soil and water conservation society publication*. St. Lucie Press, Delray Beach, FL., pp. 181-208.
21. Laws, J.O. and D.A. Parsons. 1943. The relation of raindrop-size to intensity. *Transactions American Geophysical Union*, 24: 452-460.
22. Mokhtarzadeh, M. 1988. Determining erosivity factor of Wischmeier equation for Iran. MSc thesis, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, 125 pages.
23. Moradi, H.R., M. Behzadfar, S.H.R. Sadeghi. 2006. Investigating the relation between rainfall parameters and rainfall erosivity factor in Khuzestan province. *Agricultural Science*, 29(4): 69-84.
24. Morgan, R.P.C. 1978. Field studies of rain splash erosion. *Earth Surface Processes and landforms*, 3: 295-299.
25. Morgan, R.P.C. 1992. Soil erosion in the northern countries of the European Community. EIW Workshop: Elaboration of a framework of a code of good agricultural practices. Brussels, 21-22 May, 1992.
26. Morgan, R.P.C. 1995. Soil erosion and conservation. Longman Group Limited, London.
27. Moshashei, S. 2010. Rainfall erosivity mapping by the best index using geostatistical methods, case study: Isfahan province. MSc thesis, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, 97 pages.
28. Mousavi Kiassari, E., D. Nikkami, M.H. Mahdian and E. Pazira. 2012. Investigating rainfall erosivity indices in arid and semi-arid climates of Iran. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36(3): 365-378.
29. Nearing, M.A., G.R. Foster, L.J. Lane and S.C. Finkner. 1989. A process-based soil erosion model for UDA-water erosion prediction project technology. *Transaction of the ASABE*, 32: 1587-1593.
30. Nikkami, D., P. Razmjoo, A. Jafari Ardakani and F. Bayat Movahed. 2005. Investigating rainfall erosivity index in drylands. 3rd Erosion and Sediment National Conference, 28-31 August, Tehran, Iran.
31. Nikkami, D., P. Razmjoo, and F. Bayat Movahed. 2010. Investigating and introducing some new rainfall erosivity indexes. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 2(2): 65-72.
32. Nyssen, J., H. Vandenreyken, J. Poessen, J. Deckers, M. Haile, C. Salles and G. Govers 2005. Rainfall erosivity and variability in the Northern Ethiopian Highlands. *Journal of Hydrology*, 311: 172-187.
33. Onaga, K., K. Shirai and A. Yoshinaga. 1988. Rainfall erosion and how to control its effects on farmland in Okinawa. In: Rimwanich, S. (Ed.), *Land Conservation for Future Generations*. Department of Land Development, Bangkok. pp. 627-639.
34. Onchev, N.G. 1985. Universal index for calculating rainfall erosivity. In: El-Swaify, S.A., W.C. Moldenhauer and A. Lo (Eds.), *Soil Erosion and Conservation*, Ankey, pp. 384-392.
35. Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool and D.C. Yoder. 1997. Predicting soil loss by water: a guide to conservation planning with the revised soil loss equation (RSULE). *Handbook*, Vol. 703, US Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
36. Renard, K.G. and J.R. Freimund. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157: 87-306.
37. Riezebos, H.T. and G.F. Epema. 1985. Drop shape and erosivity. Part II: Splash detachment, transport and erosivity indices. *Earth Surf. Proc. Land*, 10: 69-74.

38. Romkens, M.J.M., S.M. Dabney, G. Govers and J.M. Bradford. 2002. Soil erosion by water and tillage. In: Dane, J.H. and C.G. Topp (Ed.) *Methods of Soil Analysis, 4: Physical Methods*. Soil Sci. Soc. Am. Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1621-1662.
39. Roose, E.J. 1977. Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in West Africa. In: Greenland, D. J. and La1, R. (eds.), *Soil Conservation and management in the kid Tropics*, John Wiley and Sons, Ltd.
40. Rose, C.W. 1960. Soil detachment caused by rainfall. *Soil Sci.*, 89(1): 28-35.
41. Sadeghi, S.H.R., M. Moatamednia and M. Behzadfar. 2011. Spatial and Temporal Variations in the Rainfall Erosivity Factor in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13: 451-464.
42. Salles, C. and J. Poesen. 2000. Rain properties controlling soil splash detachment. *Hydrol. Process.* 14: 271-282.
43. Salles, C., J. Poesen and D. Sempere-Torres. 2002. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity. *Journal of Hydrology*, 257: 256-270.
44. Shamshad, A., M.N. Azhari, W.M.A.Wan and B.P. Parida. 2008. Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE EI30 index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular, Malaysia. *Catena*, 72: 423-432.
45. Sharifan, H. 2007. Investigating the relation between erosivity index and rainfall different parameters in Gorghon region. *Agricultural Science and Natural Recourses*, 4: 207-215.
46. Sharma P.P. and S.C. Gupta. 1989. Sand detachment by single raindrops of varying kinetic energy and momentum. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53: 1005-1010.
47. Torri, D., J. Poesen and L. Borselli. 1997. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset. *Catena*, 31: 1-22.
48. Yazdani, M.R., S. Chavoshi, K. Shirani and Z. Eskandari. 2005. Investigating rainfall erosivity index in USLE, case study: Isfahan province. 3rd Erosion and Sediment National Conference, 28-31 August, Tehran, Iran.
49. Yu, B., G.M. Hashim and Z. Eusof. 2001. Estimating R-factor with limited rainfall data: A case study from Peninsular Malaysia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 50(2): 101-105.
50. Van Dijk, A.I.J.M., L.A. Bruijnzeel and C.J. Rosewell. 2002. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*, 261: 1-23.
51. Wischmeier, W.H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 23: 246-249.
52. Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. USDA Handbook No. 537. Washington DC, 58 pp.
53. Wischmeier, W.H., D.D. Smith and R.E. Umland. 1958. Evaluation of factors in soil-loss equation. *Agric. Eng.*, 39: 458-469.

Rainfall erosivity mapping in Iran

Davood Nikkami^{*1} and Mohammad Hossein Mahdian²

¹ Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran and ² Professor, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Iran

Received: 20 February 2013

Accepted: 11 August 2013

Abstract

Rainfall erosivity as one of the major factors of soil erosion is expressed as indexes. The objective of this study is determining the appropriate rainfall erosivity index in Iran and generalizes it by its estimation from more readily available indexes to stations without rainfall intensity data and to determine the most accurate interpolation method for preparation of its map. For this reason, necessary data were collected from seven soil erosion research plots in Western Azerbyjan, Khorasan Razavi, Zanjan, Semnan, Mazandaran, Markazi, and Yazd provinces, respectively. The rainfall intensities were recorded, as was the sediment yield associated with storm events, and 64 different erosivity indices based on rainfall intensity were computed for these soil erosion research stations. Our founding shows that EI_{30} were the best correlated with sediment than other erosivity index. Further, rainfall erosivity indices, based on the amount of rainfall, were also computed for all soil erosion research plots and synoptic and climatic stations. The results showed that the modified Fournier index had a significant correlation with EI_{30} . After normalizing the primary EI_{30} data, semi-variograms were determined and the best model was obtained. Then, different interpolation methods were compared and spline was chosen for drawing the rainfall erosivity map. The output map showed a decreasing trend from west and north to east and south of the country and this trend was correlated with climatic change from humid to semiarid regions.

Key words: Climatic station, Geostatistical methods, Rainfall erosivity index, Spline, Water erosion

* Corresponding author: nikkami@msn.com