

بررسی تغییرات مکانی برخی شاخص‌های فرساینده‌گی باران

با استفاده از زمین‌آمار در استان خوزستان

- ❖ حسین اسلامی*؛ دانش‌آموخته‌ی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه آبخیزداری، تهران، ایران
- ❖ علی سلاجقه؛ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
- ❖ شهرام خلیقی سیگارودی؛ دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
- ❖ حسن احمدی؛ استاد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه آبخیزداری، تهران، ایران
- ❖ شمس‌الله ایوبی؛ دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

فرساینده‌گی باران توانایی باران برای جداسازی ذرات خاک است. هدف از این تحقیق تهیه نقشه فرساینده‌گی باران در استان خوزستان با استفاده از بهترین شاخص فرساینده‌گی باران است. بدین منظور، اطلاعات نقطه‌ای شاخص‌های EI_{30} ، AI_m ، هادسون، و اونچو در ۷۴ ایستگاه باران‌نگاری و باران‌سنجی با استفاده از روش‌های میان‌یابی قطعی عکس فاصله وزن‌دار و توابع شعاعی پایه و روش‌های زمین‌آمار کوریجینگ و کوکریجینگ به اطلاعات ناحیه‌ای تبدیل شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که روش کوکریجینگ دارای کمترین خطا و بیشترین همبستگی در میان‌یابی شاخص‌های EI_{30} ، AI_m ، هادسون، و اونچو با ضرایب تبیین ۰/۸۹، ۰/۸۹، ۰/۴۸، و ۰/۴۹ است. بر اساس ضریب همبستگی بین متوسط شاخص‌های EI_{30} ، AI_m ، هادسون، و اونچو در حوضه‌های بالادست ایستگاه‌های رسوب‌سنجی با میزان رسوب‌دهی ویژه این حوضه‌ها، شاخص EI_{30} با ضریب همبستگی ۰/۹۸ بهترین شاخص فرساینده‌گی باران انتخاب شد. بر اساس نقشه تهیه‌شده با استفاده از شاخص EI_{30} با روش میان‌یابی کوکریجینگ و متغیر کمکی حداکثر بارندگی متوسط ماهانه، بیشترین مقادیر فرساینده‌گی باران در شرق و شمال خوزستان دیده می‌شود و کمترین مقادیر فرساینده‌گی در جنوب و غرب استان خوزستان وجود دارد. این مقادیر از ۴۰۴ تا $2414 (Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1})$ متغیر است.

واژگان کلیدی: زمین‌آمار، فرساینده‌گی باران، کوکریجینگ، میان‌یابی.

مقدمه

فرسایش فرایند پیچیده‌ای است که از اثر متقابل خاک، اقلیم، توپوگرافی، پوشش سطحی، و کاربری زمین حاصل می‌شود. اثر اقلیم، فرساینده‌گی شناخته می‌شود و عموماً در رابطه با شدت و مقدار بارندگی بیان می‌شود که این دو پتانسیل فرسایش را تعیین می‌کنند [۱۰]. فرساینده‌گی باران توانایی بالقوه باران در جداسازی و انتقال ذرات خاک است [۲۲].

فرساینده‌گی باران را می‌توان از دو روش تعیین نمود: اندازه‌گیری مستقیم؛ استفاده از شاخص‌ها [۱۴]. به دلیل دشواری روش مستقیم، برخی محققان 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 [۱۱، ۱۳، ۱۹، ۲۵].

به طور کلی، شاخص‌های فرساینده‌گی باران را می‌توان در قالب دو گروه تقسیم کرد: شاخص‌های مبتنی بر انرژی جنبشی یا شدت بارندگی و شاخص‌های مبتنی بر آمار سهل‌الوصول بارندگی [۶]. در دسته اول به شکلی از شدت بارندگی یا انرژی جنبشی یا هر دوی آن‌ها در ارائه شاخص فرساینده‌گی استفاده می‌شود. از این گروه می‌توان به شاخص‌های EI_{30} [۲۵]، AI_m [۱۳]، $KE > 1$ [۱۱]، و p/\sqrt{t} [۱۷] اشاره کرد. یکی از مشکلات این دسته از شاخص‌ها نیاز به آمار طولانی‌مدت شدت بارندگی و ایستگاه‌های مجهز به باران‌نگار است - که چنین شرایطی در بیشتر نقاط دنیا وجود ندارد. از این رو، محققان با استفاده از آمار سهل‌الوصول بارندگی، که به‌سادگی در ایستگاه‌های باران‌سنجی قابل تهیه‌اند، شاخص‌های ساده‌تری ارائه کرده‌اند. این شاخص‌ها یا از تحلیل منطقه‌ای تولید رسوب یا از طریق برقراری همبستگی و رابطه با شاخص EI_{30} به‌دست آمده‌اند. از معروف‌ترین شاخص‌های این گروه

می‌توان به شاخص فورنیه و شاخص فورنیه اصلاح‌شده [۱] اشاره کرد.

با انتخاب شاخص مناسب و محاسبه مقادیر شاخص‌ها به صورت نقطه‌ای و تبدیل این داده‌ها به اطلاعات ناحیه‌ای با استفاده از روش میان‌یابی مناسب می‌توان نقشه فرساینده‌گی باران را تهیه کرد. نقشه‌های فرساینده‌گی باران، به عنوان منبع مهمی از اطلاعات، می‌توانند به آبخیزداران و کارشناسان منابع طبیعی در ارائه طرح‌های حفاظت خاک، کنترل فرسایش، و مدیریت اراضی کمک شایانی بکنند [۶].

روش‌های مختلفی برای میان‌یابی داده‌ها وجود دارد. در روش‌های میان‌یابی کلاسیک، نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری نمونه‌ها مستقل از موقعیت فضایی آن‌ها تحلیل و بررسی می‌شوند. در حالی که در زمین‌آمار، علاوه بر مقدار یک کمیّت معین در یک نمونه، به موقعیت فضایی نمونه نیز توجه می‌شود. به عبارت دیگر، باید بتوان بین مقادیر مختلف یک کمیّت در جامعه نمونه‌ها و فاصله و جهت قرارگیری نمونه‌ها نسبت به هم ارتباطی برقرار کرد [۷].

محقق، به منظور استفاده از ارتفاع برای کمک به نقشه‌برداری زمین‌آمار فرساینده‌گی باران در منطقه آگراوی پرتقال، نقشه فرساینده‌گی ماهانه و سالانه را با مدل رقومی ارتفاع در هم آمیخت. وی از روش‌های کریجینگ ساده، کریجینگ با یک روند خارجی، و کوکریجینگ برای میان‌یابی استفاده کرد؛ بهترین نتایج از روش کوکریجینگ، که اطلاعات ثانویه را به طور مستقیم در محاسبه فرساینده‌گی باران در هم می‌آمیزد، به‌دست آمد [۴]. در مطالعه‌ای نقشه فرساینده‌گی باران برای برزیل با استفاده از شاخص ویشمایر-اسمیت به‌دست آمد. در این تحقیق از GIS برای میان‌یابی و تولید نقشه استفاده شد [۲۲]. محققان دیگری تغییرات و وجود روند را در مقادیر شاخص فرساینده‌گی EI_{30} بررسی کردند. در این

فارس، از اقلیم متنوع تشکیل یافته است؛ وسعت عمده‌ای از آن در نواحی از اقلیم بیابانی و خشک و نیمه‌خشک تشکیل شده و در ارتفاعات به شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ضعیف و نیمه‌مرطوب تغییر می‌کند. میانگین بارندگی در جنوب غربی استان کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر است، ناحیه اهواز بیش از ۲۰۰ میلی‌متر، دامنه‌های شمالی مانند دزفول، گتوند، و مسجد سلیمان بیش از ۳۰۰ میلی‌متر، محل سد دز و سد شهید عباس‌پور بیش از ۵۰۰ میلی‌متر، و به طرف ارتفاعات شمال شرقی استان به تدریج افزایش می‌یابد تا به ۱۰۰۰ میلی‌متر می‌رسد. خوزستان از نظر دمایی گرم است. میانگین درجه حرارت آن در تیرماه حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد و در دی‌ماه حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد است [۸].

داده‌های مورد استفاده

این پژوهش بر اساس آمار و اطلاعات بارندگی در ایستگاه‌های باران‌سنجی و همچنین برگه‌های باران‌نگاری در ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنج ثبات انجام یافته است. با در نظر گرفتن دوره آماری ۲۱ سال (۱۳۸۰ - ۱۳۶۰)، ۶۵ ایستگاه باران‌سنجی، ۹ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنج ثبات، و ۵ ایستگاه رسوب‌سنجی انتخاب شد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌نگاری و باران‌سنجی استان خوزستان را نشان می‌دهد.

داده‌های روزانه بارندگی از اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی و داده‌های شدت بارندگی با فاصله زمانی ۱، ۱۰، و ۱۵ دقیقه‌ای از ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی و ایستگاه‌های باران‌سنجی ثبات وزارت نیرو استخراج شد. نواقص آماری ایستگاه‌ها با استفاده از روش همبستگی برطرف گردید. همگنی آمار با استفاده از روش جرم مضاعف بررسی شد.

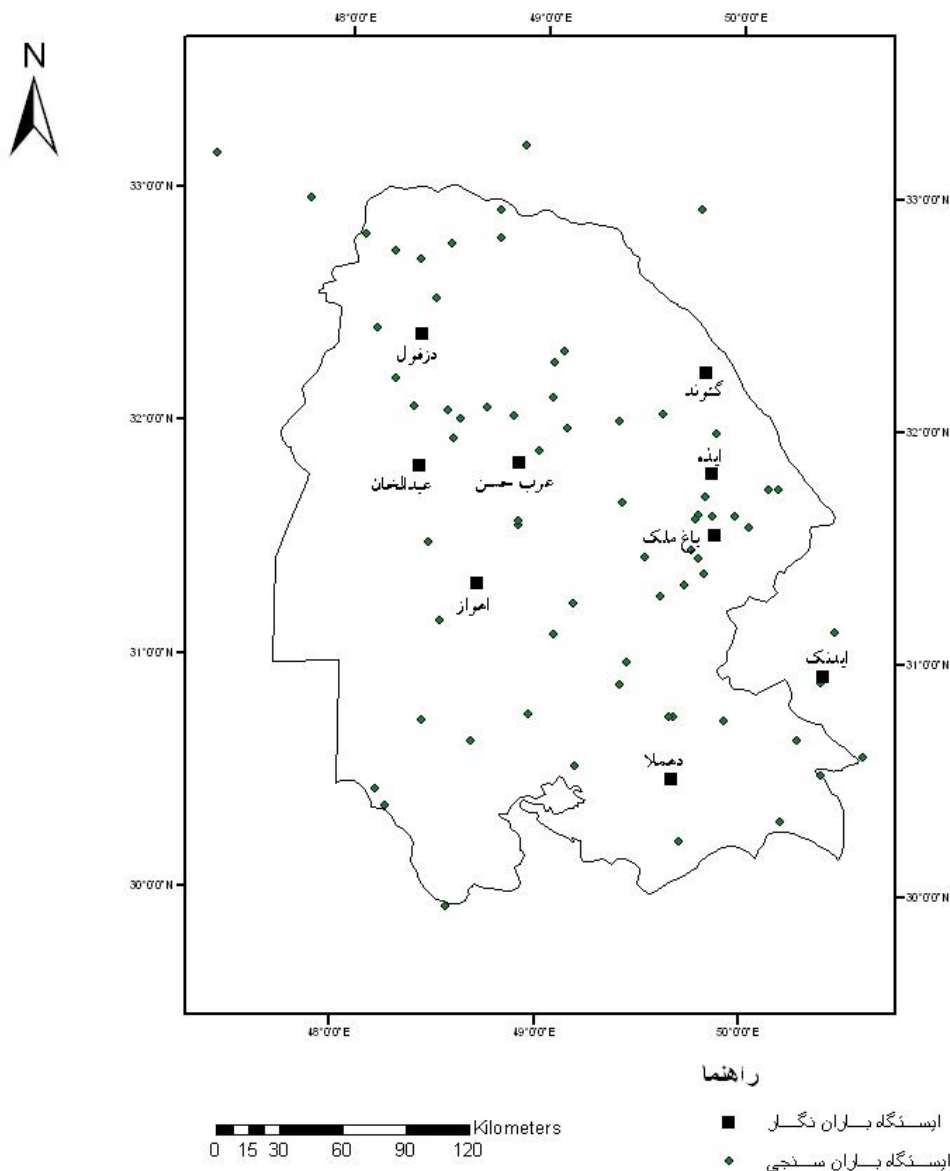
تحقیق از بارش روزانه برای برآورد EI_{30} استفاده شد [۲]. در تحقیقی با استفاده از شاخص فورنیه و روش میان‌یابی کریجینگ نقشه فرساینده‌گی باران برای کل کشور ایران با استفاده از داده‌های بارندگی ۹۰ ایستگاه هواشناسی به دست آمد [۱۵]. محققانی، با بررسی روش‌های مختلف میان‌یابی و شاخص‌های فرساینده‌گی باران، نقشه فرساینده‌گی باران را بر اساس شاخص ویشمایر-اسمیت و روش میان‌یابی فازی کریجینگ ارائه دادند [۲۳]. بررسی منابع فوق نشان می‌دهد که انتخاب شاخص مناسب فرساینده‌گی باران و روش مناسب میان‌یابی به متغیر مورد بررسی و شرایط اقلیمی و توپوگرافی وابسته است.

این تحقیق به منظور بررسی شاخص‌های مختلف فرساینده‌گی باران و تخمین مکانی آن‌ها به روش‌های مختلف زمین‌آمار و غیر زمین‌آمار و تهیه نقشه فرساینده‌گی باران در استان خوزستان صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

استان خوزستان در جنوب غرب کشور در محدوده جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۲ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۲ دقیقه طول شرقی واقع شده است. مساحت این استان بیش از ۶۷۰۰۰ کیلومتر مربع است. دامنه تغییرات ارتفاع استان از صفر تا نزدیک ۴۰۰۰ متر نوسان دارد و استان را به دو بخش جلگه‌ای به مساحت حدود ۴۱۰۰۰ کیلومتر مربع و کوهستانی به مساحت بیش از ۲۶۰۰۰ کیلومتر مربع تقسیم کرده است.

استان خوزستان از نظر منابع آب به سه بخش تقسیم شده است: حوضه کرخه؛ حوضه دز-کارون؛ حوضه مارون-زهره. استان خوزستان، به علت وجود اختلاف ارتفاع زیاد، مناطق مختلف، و وجود خلیج



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌نگاری و باران‌سنجی در استان خوزستان

انرژی جنبشی یا شدت بارندگی در ایستگاه‌های باران‌سنجی برآورد گردید؛ بدین نحو که، با ایجاد معادلات همبستگی دوگانه و چندگانه بین دو دسته از شاخص‌ها در ایستگاه‌های باران‌نگاری، شاخص‌های مبتنی بر انرژی جنبشی در ایستگاه‌های باران‌سنجی برآورد شد. سپس، با استفاده از روش‌های میان‌یابی، این شاخص‌ها در همه ایستگاه‌ها میان‌یابی گردید. در نهایت، با ارزیابی روش‌های مختلف میان‌یابی و

در این تحقیق، برای بررسی تغییرات مکانی فرساینده‌گی باران در استان خوزستان و ارائه نقشه هم‌فرساینده‌گی استان خوزستان، نخست شاخص‌های مبتنی بر انرژی جنبشی یا شدت بارندگی در ایستگاه‌های باران‌نگاری محاسبه شد. سپس، شاخص‌ها و خصوصیات سهل‌الوصول بارندگی در ایستگاه‌های باران‌سنجی و باران‌نگاری محاسبه شد. در مرحله بعد، شاخص‌های فرساینده‌گی مبتنی بر

طبق روشی که برای EI_{30} گفته شد محاسبه می‌شود؛ با این تفاوت که انرژی جنبشی یک بارندگی برای فواصل زمانی با شدت بیش از یک اینچ در ساعت محاسبه می‌شود و انرژی جنبشی برای فواصل زمانی با شدت کمتر از یک اینچ در ساعت حذف می‌شود [۱۶]. رابطه تجربی برآورد انرژی جنبشی در این شاخص عبارت است از:

(رابطه ۳)

$$KE = 29.8 - \frac{127.5}{I}$$

KE انرژی جنبشی برای فاصله زمانی t_r م بر حسب ژول بر میلی متر بر متر مربع ($J.m^{-2}.mm^{-1}$) است و I_r شدت بارندگی در فاصله زمانی t_r (میلی متر بر ساعت).

شاخص سوم AI_m است که در آن A مقدار بارندگی هر باران بر حسب سانتی متر است و I_m حداکثر شدت بارندگی ۱۰ دقیقه‌ای بارندگی مربوطه بر حسب سانتی متر در ساعت [۱۳].

شاخص چهارم $Onchev (p/\sqrt{t})$ است که در این شاخص p مقدار بارندگی برابر یا بیش از ۹.۵ میلی متر با شدت بارندگی برابر یا بیش از ۰.۱۸ میلی متر در دقیقه است و t مدت بارندگی با شدت برابر یا بیش از ۰.۱۸ میلی متر در دقیقه. مقدار متوسط سالانه (p/\sqrt{t}) از جمع شاخص‌ها برای همه وقایع بارندگی حاصل می‌شود [۱۷].

شاخص‌های سهل الوصول بارندگی

شاخص فورنیه و فورنیة اصلاح شده

$$F = \frac{P_m^2}{P} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$MF = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن F شاخص فورنیه (میلی متر) است، p_m مقدار بارندگی در مرطوب‌ترین ماه سال یا متوسط حداکثر بارندگی ماهانه در سال، p متوسط مقدار

انتخاب بهترین روش میان یابی و بر اساس تحلیل منطقه‌ای رسوب (همبستگی بهتر شاخص‌های فرساینده‌ی باران با رسوب دهی ویژه)، بهترین شاخص فرساینده‌ی انتخاب و نقشه هم‌فرساینده استان خوزستان تهیه شد.

شاخص‌های مبتنی بر انرژی جنبشی یا شدت بارندگی

حاصل ضرب انرژی جنبشی یک بارندگی (KE) در حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای (I_{30}) آن را شاخص EI_{30} می‌نامند. برای محاسبه انرژی جنبشی یک بارندگی از روابط تجربی استفاده می‌شود که عبارت‌اند از:

(رابطه ۱)

$$I_r = \frac{\Delta V_r}{\Delta t_r}$$

(رابطه ۲)

$$KE = 11.87 + 8.73 \log I_r$$

KE انرژی جنبشی برای فاصله زمانی t_r م بر حسب ژول بر میلی متر بارش بر متر مربع ($J.m^{-2}.mm^{-1}$) است، I_r شدت بارندگی در فاصله زمانی t_r (میلی متر بر ساعت)، ΔV_r مقدار بارندگی در فاصله زمانی t_r (میلی متر)، Δt_r فاصله زمانی (ساعت). انرژی جنبشی کل از جمع مقادیر حاصل ضرب‌های انرژی‌های محاسبه‌شده در مقدار بارندگی فواصل زمانی مربوط به دست می‌آید. بنابراین، برای تعیین شاخص EI_{30} ، انرژی جنبشی کل هر بارش باید در حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای همان بارش ضرب شود. این شاخص برای همه بارندگی‌های رخ داده در یک سال محاسبه شد و متوسط آن‌ها به عنوان میزان EI_{30} سال مربوطه قرار گرفت. برای تعیین EI_{30} متوسط سالانه برای یک دوره آماری، EI_{30} ‌های سال‌های آماری با هم جمع و متوسط‌گیری می‌شود [۱۶].

شاخص دیگر شاخص هادسون ($KE > 1$) است که KE انرژی جنبشی یک واقعه بارندگی است و

استوار است. این تخمین گر بهترین تخمین گر خطی ناریب^۱ شناخته می شود. اساس تخمین گر کریجینگ^۲ بر تعریف نیم تغییرنا استوار است. تغییر واریانس بین نقاطی به فاصله^h از یکدیگر می تواند همبستگی متقابل بین مقدار متغیر بین این نقاط را نشان دهد. این واریانس وابسته به فاصله را نیم تغییرنا می نامند که با $\gamma(h)$ نشان می دهند و به شکل زیر تعریف می شود:

(رابطه ۷)

$$2\gamma(h) = 1/n \sum_{i=1}^n [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2$$

که در آن $Z(x_i)$ و $Z(x_i+h)$ مقدار متغیر در نقاط x و x_i+h و n تعداد جفت نمونه های به کاررفته به ازای هر فاصله h است. هر تغییرنا با پارامترهای آن، یعنی اثر قطعه ای، دامنه تأثیر یا شعاع تأثیر، و سقف، مشخص می شود. پس از محاسبه تغییرناهای تجربی و قبل از عملیات تخمین، از طریق برآزش توابع ریاضی مناسب به واریوگرام تجربی می توان مدل مناسب تئوری را انتخاب کرد [۷]. از نقطه نظر تئوری، روش کوکریجینگ با روش کریجینگ اختلاف چندانی ندارد. در این روش می توان با در نظر گرفتن متغیر کمکی، که داده های کافی از آن وجود دارد، و بر اساس همبستگی متقابل بین متغیرهای اصلی و ثانویه فرایند تخمین را انجام داد. معادله کوکریجینگ برای برآورد نقاط مجهول به شرح زیر است:

(رابطه ۸)

$$Z^*(x_i) = \sum \lambda_i \cdot Z(x_i) + \sum \lambda_k \cdot y(x_k)$$

که در آن $Z^*(x_i)$ مقدار تخمین زده شده برای نقطه x_i ، λ_k وزن مربوط به متغیر Z ، λ_i وزن مربوط به متغیر کمکی $Z(x_i)$ ، مقدار مشاهده شده متغیر اصلی، و $y(x_k)$ مقدار مشاهده شده متغیر کمکی است. در جدول ۱ روش های میان یابی مورد استفاده در این تحقیق و علامت اختصاری آن ها معرفی شده است.

بارندگی سالانه، MF شاخص فورنیه اصلاح شده (میلی متر)، P_i متوسط بارندگی برای ماه i ام (میلی متر) [۱۸]. این دو شاخص با استفاده از آمار دوره ۲۱ ساله محاسبه می شود و محاسبه سالانه صورت نمی گیرد. شاخص $p\delta$ نیز از دیگر شاخص های این گروه است. این شاخص از طریق تحلیل منطقه ای رسوب در ایتالیا توسط سیکاکی و همکاران در سال ۱۹۷۷ به دست آمده است که در آن P بارندگی متوسط سالانه (میلی متر) و δ انحراف معیار بارندگی های ماهانه (میلی متر) است [۵]. این شاخص با استفاده از آمار کل دوره زمانی محاسبه می شود.

میان یابی

روش های میان یابی به دو دسته کلی تقسیم می شوند: قطعی؛ زمین آماری. از هر دسته چند روش برای درون یابی انتخاب گردید. در روش توابع شعاعی پایه از توابع ریاضی برای حداقل سازی انحنای و نوسانات سطحی متغیر استفاده می شود. پارامترهای توابع ریاضی مورد استفاده به نحوی تنظیم می شوند که سطح کلی برآورد شده با دارا بودن حداقل انحنای از نقاط اندازه گیری شده عبور کند. در روش عکس فاصله وزن دار و وزن تابعی از عکس فاصله است و نقاط نزدیک تر تأثیر بیشتری در برآورد نقطه مجهول دارند. فرمول کلی روش عکس فاصله وزن دار به صورت زیر تعریف می شود:

(رابطه ۶)

$$Z^*(x_i) = \sum \lambda_i \cdot Z(x_i)$$

$Z^*(x_i)$ مقدار تخمینی متغیر، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر، n تعداد مشاهدات، و λ_i وزن یا اهمیت نمونه i ام است. در روش کریجینگ نیز از رابطه ۶ برای تخمین استفاده می شود، ولی به طور کلی بهترین تخمین روشی است که بهترین شیوه وزن را برای متغیر $Z(x_i)$ پیدا نماید. کریجینگ روش تخمینی است که بر منطق میانگین متحرک وزن دار

جدول ۱. روش‌های میان‌یابی مورد استفاده در تحقیق

علامت اختصاری		روش میان‌یابی
CRS	Completely Regularized Spline	توابع شعاعی پایه
SP	Spline with Tension	
MQ	Multiquadratic	
IMQ	Inverse Multiquadratic	
TPS	Thin Plate Spline	
IDW1	P=1 توان	روش‌های قطعی
IDW2	P=2 توان	عکس فاصله وزن دار
IDW3	P=3 توان	
OK	Ordinary Kriging	کریجینگ معمولی
CK	Co-Kriging	کوکریجینگ

خطای انحراف که نشان دهنده میانگین انحراف معیار مقدار برآوردی از مقدار مشاهده است. پیشنهاد شده که MAE می‌تواند به عنوان معیاری که هر دو ویژگی دقت روش و انحراف را در بر دارد برای مقایسه دقت روش‌ها به کار رود [۱۲]. RMSE ریشه دوم میانگین مربع خطا، $Z^*(x_i)$ مقادیر برآورد شده متغیر x در نقطه i ، $Z(x_i)$ مقادیر مشاهده شده متغیر x در نقطه i ، و n تعداد متغیر مشاهده شده است که هر قدر این معیارها به صفر نزدیک‌تر باشند نشان‌دهنده اختلاف کمتر مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای است.

نتایج

نتایج ارزیابی روش‌های مختلف میان‌یابی برای شاخص‌های فرساینده‌گی باران در جداول ۲ تا ۵ ارائه شده است. نتایج این جداول نشان می‌دهد که روش میان‌یابی کوکریجینگ بهترین نتایج را در بین روش‌های میان‌یابی دارد.

برای انتخاب مناسب‌ترین روش میان‌یابی از روش ارزیابی متقابل^۱ استفاده می‌شود. در این روش در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف و با استفاده از بقیه نقاط مشاهده‌ای آن نقطه برآورد می‌شود. برای ارزیابی میزان دقت و خطا از معیارهای MBE، MAE، RMSE، و ضریب تبیین استفاده می‌شود [۴] که عبارت‌اند از:

(رابطه ۹)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad (رابطه ۱۰)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad (رابطه ۱۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2}{n}}$$

MAE میانگین قدر مطلق خطا که معرف دقت روش و مقدار متوسط خطاست، MBE میانگین

جدول ۲. نتایج ارزیابی روش‌های میان‌یابی با استفاده از شاخص فرساینده EI_{30}

R ²	RMSE	MAE	MBE	روش میان‌یابی
۰/۸۹	۱۸۴	۱۴۰	-۱/۸۶	Cokriging
۰/۶۹	۳۱۲	۲۱۹	۰/۷۱	Ordinary kriging
۰/۶۸	۳۱۳	۲۰۷/۸	-۱/۸	Completely regularized spline
۰/۶۸	۳۱۳	۲۰۷/۶	-۱/۸۱	Spline with tension
۰/۶۹	۳۱۱	۲۱۱/۶	۳/۳۴	Multiquadratic
۰/۶۶	۳۲۵	۲۱۷	-۱/۲۴	Inverse Multi quadratic
۰/۵۶	۳۸۵	۲۶۰	۶/۴	Thin plate spline
۰/۶۸	۳۱۶	۲۱۶	-۰/۴	IDW1
۰/۶۹	۳۰۷/۵	۲۱۱	۰/۳۷	IDW2
۰/۶۸	۳۱۴	۲۱۷	۱/۰	IDW3

جدول ۳. نتایج ارزیابی روش‌های میان‌یابی با استفاده از شاخص فرساینده AI_m

R ²	RMSE	MAE	MBE	روش میان‌یابی
۰/۸۹	۱۴۶۵	۱۱۱۹	۱/۷۴	Cokriging
۰/۶۷	۲۵۴۳	۱۷۵۱	۰/۹	Ordinary kriging
۰/۶۸	۲۴۸۳	۱۸۰۷	-۴۱/۱	Completely regularized spline
۰/۶۸	۲۴۸۴	۱۸۱۰	-۴۱/۷	Spline with tension
۰/۶۷	۲۵۲۶	۱۷۶۳	-۱۶/۶	Multiquadratic
۰/۶۶	۲۵۳۹	۱۸۳۷	-۴۷/۰	Inverse Multi quadratic
۰/۶۱	۲۸۳۹	۱۹۸۳	-۹۶/۳	Thin plate spline
۰/۷۰	۲۴۰۶	۱۶۹۵	۰/۵۶	IDW1
۰/۷۰	۲۴۰۴	۱۶۷۸	-۰/۲۹	IDW2
۰/۶۹	۲۴۶۵	۱۷۲۱	۰/۳۴	IDW3

جدول ۴. نتایج ارزیابی روش‌های میان‌یابی با استفاده از شاخص $KE > 1$

R2	RMSE	MAE	MBE	روش میان‌یابی
۰/۴۸	۲۲۲	۱۴۱	۱/۳۲	Cokriging
۰/۲۲	۲۷۳	۱۸۷	۴/۲	Ordinary kriging
۰/۲۱	۲۷۳/۴	۱۸۶	-۲/۲	Completely regularized spline
۰/۲۱	۲۷۳/۳	۱۸۶/۹	۲/۲۹	Spline with tension
۰/۱۹	۲۹۰	۲۰۱	۵/۲۳	Multiquadratic
۰/۲۴	۲۶۷/۲	۱۸۳/۳	-۳/۶	Inverse Multi quadratic
۰/۱۵	۳۴۷	۲۴۴	۲۱/۳	Thin plate spline
۰/۲۶	۱۷۸	۲۶۴	۰/۳۱	IDW1
۰/۲۹	۱۷۸	۲۶۱	۰/۱۳	IDW2
۰/۲۹	۱۸۴	۲۶۸	۰/۶	IDW3

جدول ۵. نتایج ارزیابی روش‌های میان‌یابی با استفاده از شاخص فرساینده‌ی p/\sqrt{t}

R ²	RMSE	MAE	MBE	روش میان‌یابی
۰٫۴۹	۲٫۰۳۷	۱٫۵۷	-۰٫۰۱	Cokriging
۰٫۱۸	۲٫۶۸	۲٫۱۶	-۰٫۰۲۶	Ordinary kriging
۰٫۲۰	۲٫۵۶	۲٫۰۷	۰٫۰۰۰۵۲	Completely regularized spline
۰٫۲۰	۲٫۵۵	۲٫۰۷	۰٫۰۰۱۷	Spline with tension
۰٫۱۵	۲٫۸۸	۲٫۳۶	۰٫۰۶۹	Multiquadratic
۰٫۱۹	۲٫۵۷	۲٫۰۵۲	۰٫۰۱۳	Inverse Multi quadratic
۰٫۱۰	۳٫۴۹	۲٫۸۲	-۰٫۲۷	Thin plate spline
۰٫۲۵	۲٫۴۷	۱٫۹	-۰٫۰۴۲	IDW1
۰٫۲۳	۲٫۵۸	۲٫۱۱	-۰٫۱۱	IDW2
۰٫۱۹	۲٫۷۸	۲٫۳	-۰٫۱۸۲	IDW3

فرساینده‌ی باران، متغیرهایی که همبستگی بیشتری داشتند بررسی شدند و از متغیرهای حداکثر بارندگی متوسط ماهانه و حداکثر بارندگی روزانه در میان‌یابی شاخص‌های EI_{30} و p/\sqrt{t} و ارتفاع ایستگاه برای میان‌یابی شاخص‌های AI_m و $KE > 1$ به عنوان متغیر کمکی استفاده شد. اطلاعات ارتفاع و داده‌های بارندگی سهل‌الوصول به راحتی و با دقت مناسب در دسترس هستند و از آن‌ها می‌توان در میان‌یابی به عنوان متغیر کمکی به شکل مؤثری استفاده کرد.

مدل برازش داده‌شده بر تغییرنماهای تجربی و مشخصات آن‌ها در روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ در جداول ۶ تا ۹ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جداول، مدل برازش داده‌شده از نوع کروی است.

با بررسی همسان‌گردی و ناهمسان‌گردی مشخص شد که فقط شاخص EI_{30} در زاویه ۱۳۵ درجه دارای ناهمسان‌گردی است و بقیه شاخص‌ها همسان‌گردند. در روش کوکریجینگ، با توجه به همبستگی متغیرهای مختلف با شاخص‌های

جدول ۶. مشخصات مدل برازش داده‌شده بر داده‌های شاخص EI_{30}

اثر قطعه‌ای ($Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}$) ²	آستانه ($Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}$) ²	شعاع تأثیر (متر)		مدل برازش یافته	روش میان‌یابی
		شعاع کوچک	شعاع بزرگ		
۱۹۰۰	۴۰۸۰۲۰	۱۲۰۰۰۰	۳۱۴۰۰۰	کروی	کوکریجینگ
۱۲۱۷۸	۴۴۱۲۵۰	۱۶۱۰۰۰	۳۴۳۰۰۰	کروی	کریجینگ

جدول ۷. مشخصات مدل برازش داده‌شده بر داده‌های شاخص AI_m

اثر قطعه‌ای (mm^2/h) ²	آستانه (mm^2/h) ²	شعاع تأثیر (متر)	مدل برازش یافته	روش میان‌یابی
۱۰۰۰۰۰۰	۲۰۰۰۰۰۰۰	۱۲۵۰۰۰	کروی	کریجینگ

جدول ۸. مشخصات مدل برازش داده شده بر داده‌های شاخص $KE>1$

روش میان‌یابی	مدل برازش یافته	شعاع تأثیر (متر)	آستانه ($J.m^{-2}.y^{-1}$) ²	اثر قطعه‌ای ($J.m^{-2}.y^{-1}$) ²
کوکریجینگ	کروی	۱۱۲۰۶۴	۵۵۷۸۵	۴۶۶۰۴
کریجینگ	کروی	۶۲۹۵	۹۹۰۷۵	۰

جدول ۹. مشخصات مدل برازش داده شده بر داده‌های شاخص p/\sqrt{t}

روش میان‌یابی	مدل برازش یافته	شعاع تأثیر (متر)	آستانه (mm/h) ²	اثر قطعه‌ای (mm/h) ²
کوکریجینگ	کروی	۹۵۸۶۳	۵٫۳۹	۳٫۳۴
کریجینگ	کروی	۹۸۴۴۶	۵٫۶۷	۳٫۱۸

رسوب‌دهی ویژه این حوضه‌ها برقرار گردید (جدول ۱۱). مقادیر رسوب‌دهی ویژه ایستگاه‌های رسوب‌سنجی از نتایج مطالعات حسینی زارع و سعادت [۹] استخراج شده است.

به منظور انتخاب شاخص مناسب فرساینده‌گی باران، متوسط شاخص‌های فرساینده‌گی در حوضه‌های بالادست ایستگاه‌های رسوب‌سنجی استخراج شد (جدول ۱۰). سپس، رابطه همبستگی بین متوسط شاخص‌های AI_m ، EI_{30} ، هادسون، و اونچو با میزان

جدول ۱۰. رسوب‌دهی ویژه و مقادیر متوسط شاخص‌های فرساینده‌گی در بالادست حوضه‌های ایستگاه‌های رسوب‌سنجی

نام ایستگاه	رسوب‌دهی ویژه ($T/km^2/yr$)	EI_{30} ($Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}$)	AI_m (mm^2/h)	$KE>1$ ($J.m^{-2}.y^{-1}$)	p/\sqrt{t} (mm/h)
اهواز	۲۰۶٫۴۶	۱۳۶۷	۱۰۱۲۲	۹۷۴	۳٫۹۶
پل شالو	۵۳۰٫۴۶	۱۵۴۵	۱۲۵۲۰	۱۰۸۴	۳٫۶۷
پای پل	۳۶۲	۱۳۸۲	۹۹۳۷	۹۸۷	۴٫۸۷
ایدنک	۲۰۸۰	۲۵۲۴	۱۸۹۶۰	۱۳۴۵	۰٫۵۱۹
تله زنگ	۸۷۵	۱۵۴۳	۱۱۷۷۶	۱۰۲۸	۳٫۲۱

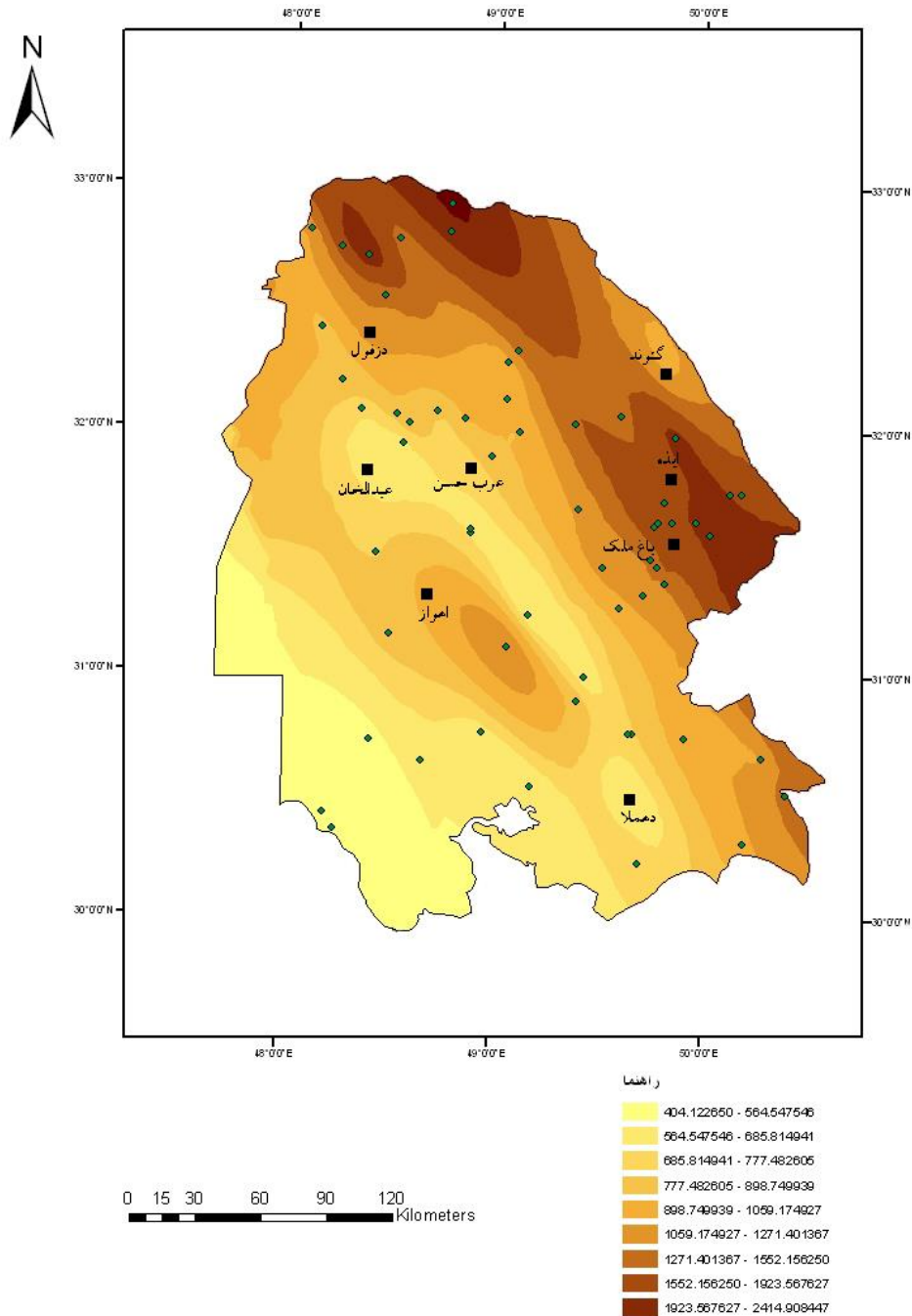
جدول ۱۱. ضرایب همبستگی شاخص‌های فرساینده‌گی با رسوب‌دهی ویژه حوضه‌های بالادست ایستگاه‌های رسوب‌سنجی

متغیر	EI_{30} ($Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}$)	AI_m (mm^2/h)	$KE>1$ ($J.m^{-2}.y^{-1}$)	p/\sqrt{t} (mm/h)
رسوب‌دهی ویژه (تن بر کیلومتر مربع در سال)	۰٫۹۸**	۰٫۹۷**	۰٫۹۶**	۰٫۹۴**

** معنی‌دار در سطح یک درصد

این تحقیق برای تهیه نقشه فرساینده‌گی باران استفاده می‌شود. شکل ۲ نقشه فرساینده‌گی باران (EI_{30}) را برای استان خوزستان نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج جدول ۷، می‌توان نتیجه گرفت که شاخص EI_{30} بهترین شاخص برای بررسی فرساینده‌گی باران در منطقه مورد مطالعه است و در



شکل ۲. نقشه فرساینده‌گی باران با استفاده از شاخص EI_{30} در استان خوزستان با روش میان‌یابی کوکریجینگ

بحث و نتیجه گیری

با توجه به اینکه شاخص EI_{30} بالاترین همبستگی را با رسوب دهی ویژه ایستگاه های رسوب سنجی (۰/۹۸) نشان داده است، به عنوان بهترین شاخص و مناسب ترین شاخص فرساینده گی باران در استان خوزستان انتخاب شد و نقشه هم فرساینده استان خوزستان بر اساس این شاخص تهیه شد؛ هر چند که نتایج حاصل از شاخص AI_m هم به این شاخص بسیار نزدیک است. بنابراین، این دو شاخص برای منطقه مورد مطالعه توصیه می شوند. محققان مختلف از شاخص EI_{30} برای تهیه نقشه های فرساینده گی باران استفاده نموده اند [۲، ۳، ۲۱، ۲۳].

از بین روش های میان یابی زمین آماری و قطعی استفاده شده در این تحقیق، روش کوکریجینگ، به دلیل استفاده از متغیر کمکی - که همبستگی بالایی با متغیر اصلی دارد - و اینکه داده ها از ساختار مکانی خوبی برخوردارند، از دقت بیشتری نسبت به سایر روش های میان یابی برخوردار است؛ چنان که در میان یابی شاخص های EI_{30} ، AI_m ، $KE > 1$ ، و p/\sqrt{t} به ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۸۹، ۰/۸۹، ۰/۴۸، و ۰/۴۹ بهترین نتایج به دست آمد. نتایج حاصل از این تحقیق تأیید کننده اهمیت استفاده از روش های مناسب میان یابی است. استفاده از متغیر کمکی در روش کوکریجینگ در کشور ما، که در آن کمبود اطلاعات و تراکم نمونه ها فاکتوری محدود کننده در دقت و کیفیت میان یابی بسیاری از متغیرهای محیطی عمل می کند، مهم و اثرگذار است. نتایج این تحقیق با نتایج

محققان دیگر [۴، ۲۱، ۲۳] هم سویی دارد. این محققان نیز، با بررسی روش های مختلف میان یابی، روش کوکریجینگ را مناسب تشخیص دادند. برای بررسی ساختار مکانی در این تحقیق، در هر چهار شاخص مورد بررسی مدل کروی برازش یافت. محقق دیگری هم در بررسی ساختار مکانی شاخص EI_{30} بهترین مدل را کروی انتخاب نمود [۴]، در حالی که محقق مدلی نمایی [۲۳] و محققانی هم مدل گوسی [۲۱، ۲۴] را بهترین مدل برای بررسی ساختار مکانی شاخص EI_{30} انتخاب کردند؛ این تفاوت ممکن است به دلیل تنوع و پیچیدگی اقلیمی و تغییرات ناگهانی متغیر یا بزرگی دامنه تأثیر نسبت به ابعاد محدوده تحت پوشش نمونه برداری باشد.

با توجه به نقشه فرساینده گی باران تهیه شده از روش کوکریجینگ، بیشترین مقادیر فرساینده گی باران (شاخص EI_{30}) در شرق و شمال خوزستان دیده می شود و کمترین مقادیر فرساینده گی در جنوب و غرب استان خوزستان وجود دارد. این مقادیر از ۴۰۴ تا $2414 \text{ (Mj.mm.ha}^{-1}\text{.h}^{-1}\text{)}$ متغیر است. به طور کلی، هر چه از غرب و جنوب به سمت شرق و شمال استان خوزستان برویم مقدار شاخص فرساینده گی باران با افزایش ارتفاع و متعاقب آن با افزایش بارندگی زیاد می شود، به طوری که در مناطق پست و جلگه ای مقدار شاخص فرساینده گی کم و در مناطق مرتفع و کوهستانی شاخص فرساینده گی باران زیاد است.

References

- [1] Arnoldus, H.M.J. (1980). An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. In: de Boodt, M., Gabriels, D. (Eds.), *Assessment of erosion*, Wiley, New York, 127-132.
- [2] Capolongo, D., Diodato, N., Mannaerts, C.M., Piccarreta, M. and Strobl, R.O. (2008). Analyzing temporal changes in climate erosivity using a simplified rainfall erosivity model in Basilicata (southern Italy). *Journal of Hydrology*, 356, 119-130.
- [3] Ceglar, A., Crepinsek, Z., Zupanc, V. and Kajfez-Bogataj, L. (2008). A comparative Study of rainfall erosivity for eastern and western Slovenia. *Acta Agriculturae Slovenica*, 91(2), 331-341.
- [4] Goovaerts, P. (1999). Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity. *Catena*, 34, 227-242.
- [5] Hadley, R.F., Lal, R., Onstad, C.A., Walling, D.E. and Yair, A. (1985). *Recent developments in erosion and sediment yield studies*. UNESCO, Paris, 127p.
- [6] Hakimkhani, Sh., Mahdian, M.H., Arab Khedri, M. and Ghorbanpour, D. (2005). Investigating rain erosivity using Modified Fournier for Iran. *Third National Conference of Erosion and Sediment*, Tehran, 281-288.
- [7] Hasani Pak, A. (1998). *Geostatistics*. Tehran University Press, 314p.
- [8] Hoghoughi, M. (1995). Khuzestan and its development capacities, *Water and Development Journal*, 4, 17-25.
- [9] Hosini Zare, N. and Saadati, N. (2005). Estimating of erosion and sediment using of sedimentology data and computation of suspended load in Khuzestan Province rivers catchments. *Third National Conference of Erosion and Sediment*, Tehran, 273-280.
- [10] Hoyos, N., Waylen, P.R. and Jaramillo, A. (2005). Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. *Journal of Hydrology*, 314, 177-191.
- [11] Hudson, N. (1971). *Soil conservation*. Billing & Sons Ltd, Great Britain, 320p.
- [12] Isaaks, E.H. and Serivastava, R.M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press, 561p.
- [13] Lal, R. (1976). Soil erosion problems on Alfisols in western Nigeria. Effects of rainfall characteristics. *Geoderma*, 16, 389-401.
- [14] Lal, R. and Elliot, W. (1994). Erodibility and erosivity. In Lal, R. (ed), *Soil erosion research methods*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, 181-208.
- [15] Mohammadi, J. (1998). Rain erosivity map providing for Iran using Fournier Index and Kriging method. *Agricultural Science and Natural Resources Journal*, 3&4, 35-44.
- [16] Morgan, R.P.C. (1986). *Soil erosion and conservation*. Logman Group Limited, Hong-London, 210p.
- [17] Onchev, N.G. (1985). Universal index for calculating rainfall erosivity. In: El-Swafify, S.A., Moldenhauer, W.C and Lo, A. (eds), *Soil Erosion and Conservation*, Soil Conservation Society of America, Ankeny, IO, 242-431.
- [18] Renard, k. and Freimund, J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157, 287-306.
- [19] Salles, C. and Poesen, J. (2000). Rain properties controlling soil splash detachment. *Hydrological Process*, 14, 271-282.
- [20] Salako, F.K., Ghuman, B.S. and Lal, R. (1995). Rainfall erosivity in south-central Nigeria. *Soil Technology*, 7, 279-296.

- [21] Shesh Angosht, S., Alimohammadi, A. and Soltani, M.J. (2005). Geostatistics models evaluation in GIS for erosivity map providing in Latian watershed. *Geographical Information System Conference*, National Cartographic Center of Iran, 113-123.
- [22] Silva, A.M. (2004). Rainfall erosivity map for Brazil. *Catena*, 57, 251-259.
- [23] Taj Ali Pour, Z., Mahdian, M.H., Pazira, A. and Heidarizadeh, M. (2009). Spatial variations investigation of erosivity index in Daryacheh Namak watershed. *11th Soil Science Conference of Iran, Gorgan*, 43-47.
- [24] Wang, G., Gertner, G., Singh, V., Shinkareva, S., Parysow, P. and Anderson, A. (2002). Spatial and temporal prediction and uncertainty of soil loss using the revised universal soil loss equation: a case study of the rainfall-runoff erosivity R factor. *Ecological Modelling*, 153, 143-155.
- [25] Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. USDA, Agriculture Handbook No. 537. Government printing office, Washington, DC, 58p.