

نقش تغییر روش‌های درون‌یابی برای تولید عامل R در برآورد فرسایش خاک حوضه‌های آبریز به روش RUSLE (مطالعه موردی: حوضه آبریز بالارود)

داود مختاری* - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.
خلیل ولیزاده کامران - استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.
احسان مرادی مطلق - کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۰۸/۲۴

چکیده

به کارگیری فن‌های نو برای شناخت عوامل مؤثر در فرسایش به‌ویژه فرسایش آبی و اندازه‌گیری مقدار آن در حوضه‌های آبریز جهت بهره‌گیری از آن در توسعه پایدار امری ضروری است. در این پژوهش از مدل تجربی RUSLE برای برآورد فرسایش استفاده شده است. هدف از این پژوهش بررسی نقش روش‌های درون‌یابی جبری (رگرسیون خطی) و زمین‌آمار (کریجینگ معمولی) برای تولید عامل R و نتایج آن در برآورد فرسایش و رسوب حوضه آبریز رودخانه بالارود واقع در استان خوزستان به روش RUSLE است. یکی از عوامل تأثیرگذار در این مدل، عامل فرساینده باران (R) است که از داده‌های ۱۲ ایستگاه هواشناسی تهیه شده است. با استفاده از روش‌های درون‌یابی مختلفی می‌توان این عامل را برای منطقه مورد مطالعه محاسبه نمود. روش‌شناسی این پژوهش بر مبنای استفاده از روش درون‌یابی رگرسیونی (جبری) و کریجینگ معمولی برای تعیین عامل R است. نتایج این پژوهش نشان داد که عامل R درون‌یابی شده از هر دو روش درون‌یابی جبری و کریجینگ معمولی دارای ضریب تعیین خودهمبستگی به ترتیب $R^2=0/985$ و $R^2=0/964$ هستند و گرچه اختلاف کمی در ضریب تعیین خودهمبستگی مکانی دارند اما استفاده از عامل R درون‌یابی شده توسط روش جبری منجر به بیش برآورد فرسایش $(19315/135 \text{ t.ha}^{-1}\text{.yr}^{-1})$ می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که هر دو نقشه فرسایش برآورد شده کم‌ترین و بیش‌ترین رابطه همبستگی را به ترتیب با عامل‌های R و LS خود دارند.

واژگان کلیدی: عامل R RUSLE، روش‌های درون‌یابی، رودخانه بالارود، جنوب غرب ایران

مقدمه

مواد حاصل از تخریب سنگ‌ها، مخلوط با مواد آلی پوسیده و نیوسیده، موجودات زنده، هوا و آب، خاک مادر یا خاک را تشکیل می‌دهند، بنابراین خاک، قسمت سطحی پوسته زمین است که بر اثر عوامل مختلف فیزیکی، شیمیایی و حیاتی به وجود می‌آید (کردوانی، ۱۳۸۵). خاک یکی از منابع و شاید مهم‌ترین زیربنای تمدن در هر کشور است و در واقع مسیر و پیشرفت یا سیر قهقراپی هر جامعه را اصول و چگونگی بهره‌برداری از خاک تعیین می‌کند و بنا بر قولی، ارزش خاک هنگامی معلوم می‌شود که مانند آزادی به مخاطره افتد (وراوی‌پور، ۱۳۹۰). انسان برای ادامه حیات خود به مواد غذایی نیاز دارد که در اثر وجود آب‌و خاک به دست می‌آید. عاملی که وجود آب‌و خاک را به خطر می‌اندازد فرسایش^۱ است که همواره برای از بین بردن آن عمل می‌کند. به همین علت است که مبارزه با فرسایش در سطح جهان مورد توجه قرار گرفته است. فرسایش خاک به فرآیندی گفته می‌شود که طی آن ذرات و اجزاء خاک توسط یک عامل فرساینده از بستر اصلی خود جدا شده و به مکان دیگری منتقل می‌شوند (کردوانی، ۱۳۹۳). به منظور اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و تعیین روش‌های مبارزه با فرسایش و کاهش رسوب‌زدایی، همچنین محاسبه و طراحی دقیق حجم سد در احداث سدهای مخزنی، ضرورت دارد حجم کل میزان تولید فرسایش و رسوب سالانه در یک حوضه آبریز نیز ارزیابی و برآورد گردد؛ اما به دلیل نبود اطلاعات آماری دقیق از دبی آب و رسوب در بسیاری از حوضه‌های آبریز، کاربرد روش‌های تجربی مناسب را برای برآورد شدت فرسایش خاک و رسوب‌زدایی الزامی می‌نماید. مدل‌های مختلفی جهت برآورد فرسایش و رسوب در حوضه‌های آبریز وجود دارد که از آن جمله می‌توان مدل تجربی^۲ RUSLE اشاره نمود (رفاهی، ۱۳۹۳).

اولین تلاش برای توسعه یک معادله برای فرسایش خاک نواحی از قبیل دامنه‌ها و کشتزارها توسط زینگ^۳ (۱۹۴۰) ارائه شد. او فرسایش را به تندی و طول شیب ارتباط داد. بعدها ما سگریو^۴ (۱۹۴۷)، عامل آب‌وهوا را بر اساس بی‌شینه بارش کل ۳۰ دقیقه‌ای با دوره بازگشت دو سال به آن افزود. اسمیت^۵ (۱۹۵۸)، فاکتور محصول برای محاسبه اثر حفاظت محصولان مختلف، فاکتور حفاظت و فاکتور فرسایش‌پذیری خاک را نیز به آن اضافه کرد. با تغییر فاکتور آب‌وهوا به شاخص فرسایشی بارش توسط ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) در نهایت معادله فرسایش جهانی خاک (USLE) به دست آمد. با توجه به اینکه بعدها پژوهشگران مختلف برای به دست آوردن عامل‌های مؤثر در این معادله روش‌های دیگری را ارائه دادند، در نهایت آن را معادله فرسایش جهانی خاک اصلاح شده (RUSLE) نامیدند (Morgan, 2005). نسخه نهایی و راهنمای استفاده از مدل RUSLE توسط وزارت کشاورزی آمریکا در سال ۱۹۹۷ منتشر شده است (Renard, 1997).

یکی از عوامل مهمی که در این مدل دخالت دارد عامل فرساینده باران (R) است که نشان‌دهنده تغییرات محلی در فرساینده باران (+۵٪) است و می‌توان آن را از داده‌های شدت بارش در مکان‌های مشخص محاسبه نمود. با این حال، این یک فرآیند بسیار زمان‌بر و پراکار است که نیاز به محاسبه شاخص فرساینده برای هر رخداد طوفان بزرگ‌تر از ۰/۵ اینچ در هر باران‌سنج در طول یک سال دارد (عثمان‌خان^۶، ۲۰۱۴). روابط متعددی برای تهیه عامل R با استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی در حوضه‌های آبریز وجود دارد (کمال‌الدین^۷ و همکاران، ۲۰۱۳ و نیکولوا^۸، ۲۰۱۶). با استفاده از

^۱ Erosion^۲ معادله فرسایش جهانی خاک اصلاح شده^۳ Zingg^۴ Musgrave^۵ Smith^۶ Osman Khan^۷ Kamaludin^۸ Nikolova

روش‌های مختلف درون‌یابی می‌توان مقدار این عامل را برای محدوده مورد مطالعه تخمین زد. روش‌های مختلفی نیز برای تخمین عامل R در نقاط مجهول وجود دارد که از میان آن‌ها می‌توان به روش‌های جبری مانند روش رگرسیونی و IDW^۱ و زمین‌آماری مانند کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده و... اشاره نمود. برخی پژوهشگران برای تخمین عامل R، روش درون‌یابی کریجینگ معمولی (من^۲ و همکاران، ۲۰۰۹، مرادی مطلق، ۱۳۹۶ و شعبانی، ۱۳۹۰)، رگرسیون-کریجینگ (د ملو^۳ و همکاران، ۲۰۱۵)، کوکریجینگ (خرسندی^۴ و همکاران، ۲۰۱۲)، الگوریتم چندجمله‌ای محلی^۵ (هویوس^۶ و همکاران، ۲۰۰۵)، کریجینگ جداسازنده (زانگ^۷ و همکاران، ۲۰۰۹) و رگرسیونی (مرادی مطلق، ۱۳۹۶ و شرکت مهندسی مشاور سازآب پردازان، ۱۳۷۰) را به کار برده‌اند. برخی از پژوهشگران به جای استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، از تصاویر ماهواره TRMM برای تولید عامل R استفاده کرده (کومارداس^۸ و همکاران، ۲۰۱۶ و زو^۹ و همکاران، ۲۰۱۱) و برخی نیز به طور همزمان، داده‌های باران‌سنجی و داده‌های ماهواره TRMM را در روش کوکریجینگ برای درون‌یابی این عامل به کار بردند (تنگ^{۱۰}، ۲۰۱۷). با توجه به اینکه در برخی مناطق کوهستانی موجود حوضه‌های آبریز کوچک، مانند حوضه آبریز مورد مطالعه در این پژوهش، دره‌های عمیق وجود دارد، روش درون‌یابی رگرسیونی خطی (جبری) عامل R، برای این دره‌ها مقادیر پایین و برای مناطق مرتفع مشرف و نزدیک به این دره‌ها مقادیر بالایی را برآورد می‌کند در حالی که در هنگام بارندگی‌های فراگیر به یک اندازه بارش بر بالای مناطق مرتفع و دره‌ها صورت می‌گیرد؛ اما در انواع روش‌های درون‌یابی کریجینگ این مشکل برطرف شده و انتظار می‌رود پیش‌بینی‌ها به واقعیت نزدیک‌تر باشد؛ بنابراین هدف از این پژوهش بررسی نقش تغییر روش‌های درون‌یابی به روش جبری (رگرسیون خطی) و زمین‌آمار برای تولید عامل R و تأثیر آن در برآورد فرسایش حوضه آبریز بالارود به روش RUSLE است.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه بالارود (شکل (۱)) با مساحت ۸۷۲/۳۷۲ کیلومتر مربع، محیط ۱۵۰/۰۱ کیلومتر و ارتفاع متوسط ۷۱۶/۷۵ متر در شمال استان خوزستان و در محدوده بخش الوار گرمسیری و بخش مرکزی شهرستان اندیمشک قرار دارد اما قسمت شمالی آن در محدوده استان لرستان و شهرستان پلدختر جای گرفته است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در سیستم مختصات UTM بین ۳۶۰۱۷۷۰/۵۸۲۸۶۰ m و ۳۶۵۴۳۷۷/۰۵۶۴۸۹ m شمالی و نیز ۲۳۵۵۷۶/۳۲۸۳۴۲ m و ۲۶۰۷۴۶/۵۳۴۷۲۱ m شرقی است. اقلیم منطقه بر اساس اقلیم‌نمای آمبرژه از نوع سرد و خشک و بر اساس روش طبقه‌بندی دوماتن، نیمه‌خشک است. میانگین دمای سالانه آن، ۲۳/۱۱ درجه سانتی‌گراد، میانگین بارندگی سالانه آن، ۳۰/۴۱۵ میلی‌متر و مجموع بارندگی سالانه آن، ۳۷۸/۶۶۷ میلی‌متر است (مرادی مطلق، ۱۳۹۶).

^۱ Inverse Distance Weighted

^۲ Men

^۳ De Mello

^۴ Khorsandi

^۵ LPI

^۶ Hoyos

^۷ Zhang

^۸ Kumar

^۹ Zhu

^{۱۰} Teng

مدل فرسایش خاک RUSLE

معادله جهانی هدر رفت خاک^۱ برای نخستین بار توسط وی‌شمایر و اسمیت^۲ ارائه شد. این مدل با رابطه (۱) به برآورد فرسایش می‌پردازد:

$$E=R \times K \times L \times S \times C \times P$$

رابطه ۱.

که در آن، E: مقدار خاک فرسایش یافته برحسب جرم در واحد سطح و در واحد زمان است که در سیستم متریک برحسب تن بر هکتار در سال است. R: عامل بارندگی است که قدرت فرسایش باران را نشان می‌دهد. یکای این عامل مگا ژول میلی‌متر در هکتار در ساعت در سال ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$) است. K: ضریب فرسایش‌پذیری خاک است. عددی است که حساسیت ذاتی خاک را مشخص می‌کند. یکای این عامل $\text{ton} \cdot \text{ha} \cdot \text{h} (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha})^{-1}$ است و از جدول (۱) برآورد می‌شود. L: عامل طول شیب است و عبارت است از نسبت فرسایش در طول شیب به مقدار فرسایش در همان زمین و همان شیب ولی با طول ۷۲/۶ فوت (۲۲/۱ متر). S: عامل طول شیب است و عبارت است از نسبت فرسایش در شیب موجود در زمین به مقدار فرسایش در همان زمین و همان طول ولی با شیب ۹ درصد (۵ درجه). P: عامل عملیات حفاظت خاک، عبارت است از نسبت فرسایش حفاظت شده به مقدار فرسایش همان زمین که هیچ‌گونه عملیات حفاظتی در آن انجام نگرفته است یعنی کشت و کار در امتداد ردیف‌های شیب است و از جدول (۲) برآورد می‌شود (رفاهی، ۱۳۹۳). عامل C مربوط به عملیات زراعی و رسوبات تولید شده در منطقه‌ای با پوشش گیاهی مشخص نسبت به پلات استاندارد است. مورگان ضریب C را منحصر به پوشش گیاهی دانسته و مقادیر آن در جدول (۳) بیان شده است (احمدی، ۱۳۸۸). پرکاربردترین روش‌ها برای برآورد عامل C استفاده از NDVI است. عامل مدیریت پوشش (C) در بازه صفر تا یک قرار دارد پس با استفاده از رابطه (۲) می‌توان NDVI را بین بازه ۰-۱ قرار داد.

$$C = \frac{1 - \text{NDVI}}{2}$$

رابطه ۲.

جدول ۱. ضریب فرسایش‌پذیری (K)، (احمدی، ۱۳۸۸)

K	وضعیت خاک	K	وضعیت خاک
۰/۱	اراضی مقاوم به فرسایش	۰/۵	خاک سطحی با پوشش سنگریزه‌ای
۰/۴۲	خاک‌های ماسه‌ای نرم	۰/۱۶	خاک‌های ماسه‌ای
۰/۴۲	خاک‌های لومی با ماسه بسیار ریز	۰/۱۲	خاک‌های لومی شنی
۰/۳۷	خاک‌های لومی	۰/۴۸	خاک‌های سیلت لومی
۰/۳۷	خاک‌های لومی رسی	۰/۲۵	خاک‌های سیلتی رسی

^۱ Universal Soil Loss Equation

^۲ Whishmeier and Smith

جدول ۲. ارزش P برای کاربری و پوشش اراضی مختلف (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹)

ارزش عددی P	کلاس کاربری/پوشش اراضی
۱	اراضی بایر
۰/۱۲	نیشکر
۰/۱	گندم
۰/۸	جنگل تنک
۱	اراضی آیش
۰/۸	جنگل با تراکم متوسط
۰/۸	جنگل باز
۱	بستر رودخانه

جدول ۳. تعیین ضریب C از روی پوشش گیاهی در معادله جهانی فرسایش خاک (احمدی، ۱۳۸۸)

میزان وضعیت پوشش گیاهی	میزان وضعیت پوشش گیاهی
۰/۲۵ فقیر	۰/۰۴ خیلی خوب
۰/۳۳ بسیار فقیر	۰/۰۹ خوب
۰/۴۵ فاقد پوشش گیاهی	۰/۱۵ نسبتاً خوب
-	۰/۲۰ نسبتاً فقیر

محاسبه عامل R برای داده‌های هر ایستگاه

R، عامل بارندگی است که قدرت فرسایش باران را نشان می‌دهد و برای محاسبه آن از روابط رنارد و فریموند (۱۹۹۴) استفاده شده است (رابطه‌های (۳، ۴ و ۵)). این روابط زمانی استفاده می‌شوند که آمار شدت و مدت بارش در ایستگاه‌های انتخابی وجود نداشته باشند.

$$R = \frac{(-0.7397 \times F^{1/847})}{17/2} \quad \text{if } F < 55m \quad \text{رابطه ۳.}$$

$$R = \frac{(95/77 - 6/0.81 \times F + 0/477 \times F^2)}{17/2} \quad \text{if } F \geq 55m \quad \text{رابطه ۴.}$$

که در دو رابطه بالا F (شاخص فورنیه^۱) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^2}{P} \quad \text{رابطه ۵.}$$

که در آن، P_i برحسب میلی‌متر میانگین بارندگی ماهانه در ماه i ام، P برحسب میلی‌متر میانگین بارندگی سالانه و F شاخص فورنیه (برحسب میلی‌متر) است. اگر مقادیر بارندگی‌ها برحسب میلی‌متر باشد آنگاه یکای R متریک یعنی مگاژول میلی‌متر در هکتار در ساعت در سال ($\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{yr}^{-1}$) خواهد بود. برای تهیه عامل R از آمار ۱۵ ساله ۱۲ ایستگاه سینوپتیک مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ میلادی استفاده شده است. جدول (۵) موقعیت، میانگین‌های دما، بارش و مجموع بارش سالانه را در طول دوره آماری نشان می‌دهد.

محاسبه عامل LS

LS: عامل توپوگرافی است؛ که در آن L عامل طول شیب است که از نسبت خاک از دست‌رفته از منطقه شیب‌دار به خاک از دست‌رفته از کرت‌های آزمایشی در شرایطی که نوع خاک و درجه شیب مشابه باشند به دست می‌آید. این عامل با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

رابطه ۶ Moore and Wilson (1992)

$$LS = \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^{0.4} \left(\frac{\sin \theta}{0.0896} \right)^{1.3}$$

که در آن، θ لایه شیب به درجه و A_s هم از رابطه زیر به دست می‌آید:
رابطه ۷. مساحت دامنه بالادست در واحد عرض خطوط توپوگرافی (A_s)

$$A_s = \text{Flow Accumulation} \times \text{Cell Size}$$

که در آن، منظور از Cell Size اندازه سلول یا پیکسل DEM حوزه آبریز مورد مطالعه است.
 A_s ، مساحت دامنه بالادست در واحد عرض خطوط توپوگرافی است (کمانگر و همکاران، ۱۳۹۴) که به آن سطح ویژه حوضه نیز گفته می‌شود و برحسب مترمربع بر متر (m^2m^{-1}) است (رخبین و همکاران، ۱۳۹۳).
بعد از محاسبه عامل R در هر ایستگاه، برای تهیه لایه عامل R در حوضه آبریز مورد مطالعه باید از روش‌های درون‌یابی استفاده گردد. در این پژوهش برای تهیه لایه عامل R ، دو نوع درون‌یابی به نام‌های درون‌یابی جبری (رگرسیون) و درون‌یابی به روش کریجینگ معمولی استفاده شده است که اولی یک درون‌یابی غیراحتمالی است و به علت استفاده رایج در این گونه مطالعات و دومی یک درون‌یابی احتمالی است و به علت کم‌ترین خطا در پیش‌بینی داده‌های مجهول (RMSE) از بین سایر روش‌های درون‌یابی کریجینگ انتخاب گردیده است. در ادامه به اختصار هر درون‌یابی شرح داده شده است.

درون‌یابی به روش جبری (رگرسیون خطی)

این درون‌یابی فرض می‌کند که تخمین پدیده مورد نظر قطعی انجام می‌شود و با خطا مواجه نیست، بنابراین درون‌یابی جبری یک درون‌یابی غیر احتمالی است. در این نوع درون‌یابی یک رابطه رگرسیونی (خطی) بین دو متغیر (دما و ارتفاع یا عامل بارندگی و ارتفاع) فرض می‌شود. در این پژوهش بین عامل فرساینده‌گی باران (R) و مدل رقومی ارتفاع (DEM) رابطه رگرسیونی محاسبه شده و مطابق با این رابطه در محیط نرم‌افزاری GIS درون‌یابی جبری انجام گرفته است.

^۱ Fournier index

درون‌یابی به روش کریجینگ

روش درون‌یابی کریجینگ به خودهمبستگی مکانی داده‌ها وابسته است بدین معنی که نقاط نزدیک به هم دارای مقادیر مشابهی هستند (خسروی و عباسی، ۱۳۹۵) در این صورت با محاسبه خودهمبستگی فضایی می‌توان به جهت تغییر ارزش‌ها نیز پی برد.

کریجینگ روش درون‌یابی پیشرفته‌ای است که برای داده‌هایی که دارای روندهای موضعی تعریف شده‌ای باشند، مناسب است و با کم‌ترین واریانس تخمین، درون‌یابی می‌کند که میزان خطای آن تابع مشخصات واریوگرام (ساختار فضایی) است. اگر مطالعات مربوط به واریوگرافی و تشخیص مدل واریوگرام با دقت کافی انجام شود درون‌یابی به روش کریجینگ، با دقت بالایی همراه خواهد بود (بلیانی، ۱۳۹۳). کریجینگ انواع مختلف دارد اما همه آن‌ها از رابطه (۸) سرچشمه می‌گیرند.

$$\hat{Z}(x_0) - \mu = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i) - \mu(x_0)] \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن، μ میانگین بدون تغییر معلومی است که فرض می‌شود در طول دامنه ثابت است و همانند میانگین داده‌ها محاسبه می‌شود. پارامتر λ_i وزن کریجینگ، پارامتر n تعداد نقاط نمونه‌برداری شده است که برای برآورد استفاده شده و به اندازه پنجره جستجو وابسته است و در نهایت، $\mu(x_0)$ میانگین نمونه‌ها در میان پنجره جستجو است. وزن کریجینگ با به حداقل رساندن واریانس برآورد می‌شود، به شرح رابطه (۹):

$$\begin{aligned} \text{var}[\hat{Z}(x_0)] &= E\{\hat{Z}(x_0) - Z(x_0)\}^2 = [(\hat{Z}(x_0))^2 + (Z(x_0))^2 - 2\hat{Z}(x_0)Z(x_0)] \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) + C(x_0 - x_0) - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_0) \end{aligned}$$

که در آن، $Z(x_0)$ ارزش حقیقی مورد انتظار در نقطه x_0 ، n تعداد مشاهداتی است که در برآورد وارد می‌شود و $C(x_i - x_j) = \text{Cov}(Z(x_i), Z(x_j))$ است (لی و هیپ ۲۰۰۸).

یکی از روش‌های کریجینگ، کریجینگ معمولی است که به صورت رابطه (۱۰) فرض می‌شود:

$$Z(s) = \mu + \varepsilon(s) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در آن، μ یک مقدار ثابت مجهول است. این مدل فرض می‌کند که میانگین ضریب مدل ثابت و قابل قبول است. این مدل به عنوان روش پیش‌بینی ساده، قابلیت انعطاف زیادی دارد (بلیانی، ۱۳۹۳).

۵.۲. نیم‌تغییرنما (سمی‌واریوگرام) و کاربرد آن در انتخاب بهترین عامل R درون‌یابی شده

تحقیقات زیادی کارایی نیم‌تغییرنگار را در تحلیل‌های مکانی و مطالعات محیطی اثبات کرده است (اخوان و همکاران، ۱۳۸۷، اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۳، باقری و همکاران، ۱۳۹۳، معروفی و همکاران، ۱۳۹۴ و پیری‌صحرآگرد و همکاران، ۱۳۹۵). برای برآورد خودهمبستگی مکانی از رابطه نیم‌تغییرنما^۱ (رابطه ۱۱) با مدل‌های مختلف استفاده می‌شود (کروی، گوسی، خطی، نمایی و دایره‌ای).

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در آن، h فاصله در جهت مشخص بین موقعیت $x+h$ و x ؛ $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌ها به فاصله h از یکدیگر؛ $\gamma(h)$ مقدار تغییرنما برای فاصله h ؛ $Z(x)$ مقدار نمونه در نقطه x و $Z(x+h)$ مقدار نمونه در نقطه $x+h$ است (خسروی و عباسی، ۱۳۹۵).

^۱ Semivariogram

نیم‌تغییرنما دو نوع همه‌جهته^۱ و جهتی^۲ دارد. با توجه به این که این پژوهش به دنبال جهت خاصی در تغییرات ارزش‌های عامل R نیست، لذا از نیم‌تغییرنمای همه‌جهته با بالاترین ضریب تعیین در خودهمبستگی فضایی استفاده می‌شود. برای بیان روش استفاده از نیم‌تغییرنگار در انتخاب بهترین عامل R درون‌یابی شده شرح مختصری از اجزای نیم‌تغییرنگار آورده شده است. با توجه به شکل (۳) این اجزاء از این‌قرارند (خسروی و عباسی، ۱۳۹۵).

اثر قطعه‌ای^۳ (C0):

اثر قطعه‌ای در حقیقت عرض از مبدأ منحنی نیم‌تغییرنما است و بسیاری از محققان آن را مؤلفه بی‌نظمی می‌خوانند. هر چه اثر قطعه‌ای به صفر نزدیک‌تر باشد مدل بهینه‌تر است.

مقدار آستانه^۴ (C0+C):

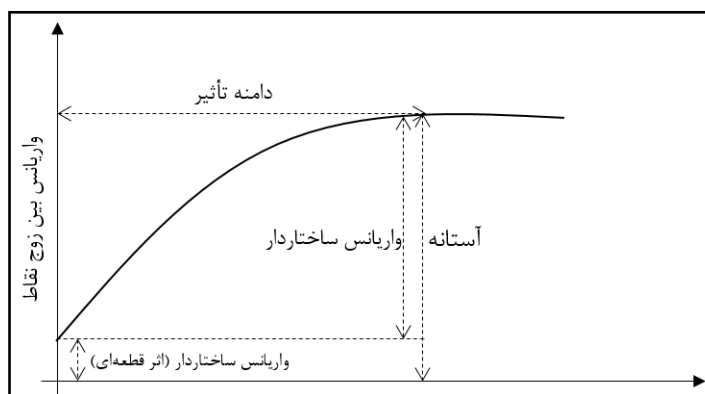
با افزایش فاصله، مقدار نیم‌تغییرنما افزایش می‌یابد و به سمت حد ثابتی میل می‌کند. در بسیاری از نیم‌تغییرنما، پس از رسیدن به این حد ثابت، با افزایش فاصله، تغییری در مقدار نیم‌تغییرنما ایجاد نمی‌شود این مقدار نسبتاً ثابت، آستانه نام دارد.

مقدار دامنه (A0)

این مؤلفه چنین بیان می‌دارد که داده‌ها تا چه فاصله‌ای باهم همبستگی مکانی دارند که حدود دو سوم از داده‌های محدوده به‌عنوان دامنه پیشنهاد می‌گردد. دامنه تأثیر، فاصله‌ای مکانی بین نمونه‌ها است که در بیرون از آن، متغیر ناحیه‌ای در نقاط مجاور هم تأثیر چندانی بر یکدیگر ندارند و با افزایش فاصله، نیم‌تغییرنما تغییر چندانی نمی‌کند و به حالت افقی درمی‌آید.

همبستگی مکانی یا (Proportion) $(C / (C0+C))$

برای بیان استحکام ساختار فضایی یک متغیر می‌توان از نسبت $C/C0$ استفاده کرد که برابر است با نسبت بزرگی مؤلفه ساختاردار به مؤلفه بدون ساختار واریوگرام. نسبت دیگری نیز بدین منظور وجود دارد و آن $(\frac{C_0}{C_0+C})$ است. در واقع معرف آن است که چه مقدار از کل تغییرپذیری را اثر قطعه‌ای توجیه می‌کند. در صورتی که $\frac{C}{sill} \geq \frac{1}{2}$ باشد، نقش مؤلفه ساختاردار از مؤلفه بی‌ساختار کم‌تر است و در نتیجه می‌توان گفت که متغیر مورد بررسی ساختار فضایی ضعیفی دارد. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تحت عنوان اثر قطعه‌ای نسبی و برحسب درصد بیان می‌شود.



^۱ Isotropic

^۲ Anisotropic

^۳ Nugget

^۴ Sill

شکل ۳: اجزای تشکیل دهنده واریوگرام

ضریب تعیین (R^2)

ضریب همبستگی، اندازه همبستگی بین دو متغیر را نشان می‌دهد، اما درباره ماهیت این همبستگی اطلاعات زیادی به ما نمی‌دهد. آنچه این نمایه مشخص می‌کند وجود همبستگی بالا یا پایین و نسبی بودن آن است (بلیانی، ۱۳۹۳). هر چه میزان ضریب همبستگی بین داده‌ها بیش‌تر باشد و به سمت یک میل نماید دقت مدل بالاتر بوده و می‌توان مدل بهینه برای برازش را تعیین نمود. این پارامتر یکی از مهم‌ترین پارامترها در انتخاب و تعیین بهترین مدل جهت برازش داده‌ها است (خسروی و عباسی، ۱۳۹۵).

ضریب همبستگی پیرسون

عموماً متداول‌ترین نمایه برای بیان همبستگی یک متغیر در طول زمان و مکان یا ارتباط بین دو متغیر از نظر زمانی و مکانی - فضایی، استفاده از ضریب همبستگی پیرسون است. این نمایه جهت و درجه همبستگی را نمایش می‌دهد. فرمولی که به این ترتیب به دست می‌آید، نمایه آماری ضریب همبستگی است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x,y)}{S_x S_y} \quad \text{رابطه ۱۲. ضریب همبستگی پیرسون}$$

این نمایه از نوع فاصله‌ای نسبی است. اگر این رابطه را بسط دهیم، رابطه محاسبه ضریب همبستگی از راه انحراف معیار و به شرح زیر به دست می‌آید:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{رابطه ۱۳. محاسبه ضریب همبستگی از راه انحراف معیار}$$

اگر در رابطه ۱۴ به جای مقادیر مشخص شده، نمره استاندارد را جایگزین کنیم، فرمول به دست می‌آید:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n z_x z_y}{n} \quad \text{رابطه ۱۴ ضریب همبستگی از روش استاندارد}$$

نمایه عدد ۱ برای ضریب همبستگی، بالاترین ضریبی است که امکان دارد به دست آید و نشان‌دهنده همبستگی کامل بین متغیرهای مورد مطالعه است. ضریب همبستگی -۱ نشان‌دهنده همبستگی کامل و منفی است. به این معنی که بین دو متغیر رابطه وارون (معکوس) وجود دارد. تعبیر ساده ضریب همبستگی این است که تغییر یک انحراف معیار در x ، به میزان r_{xy} انحراف معیار y هم‌تغییر است. این مفهوم به معنای هم‌تغییری دو متغیر است. اگر $r_{xy} = 0$ باشد دلیل بر اینکه بین x و y رابطه وجود ندارد نیست، ضریب همبستگی فقط رابطه خطی را نشان می‌دهد، پس ممکن است بین آن‌ها رابطه غیرخطی وجود داشته باشد (بلیانی و حکیم دوست، ۱۳۹۳).

منابع داده

در این پژوهش از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای تولید عامل LS، از تصویر سنجنده ASTER ماهواره ترا با مسیر ۱۶۶ و ردیف ۱۳۷ و با تاریخ ۹ مارس ۲۰۰۲ برای تولید عامل‌های C و P، نقشه خاک‌شناسی منطقه مورد مطالعه برای تولید عامل K به روش مورگان (احمدی، ۱۳۸۸) و داده‌های بارش ۱۲ ایستگاه هواشناسی برای تولید عامل R (جدول (۵)) استفاده شده است.

جدول ۴. داده‌ها، منابع و نرم‌افزارهای مورد استفاده در این پژوهش

هدف	نرم‌افزار	نوع پردازش	منبع	داده
عامل LS	ArcMap 10.5	تولید DEM و Slope	سازمان نقشه‌برداری کشور	نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰
عامل C	eCognition9	تهیه تصویر NDVI	ماهواره ترا با مسیر ۱۶۶ و ردیف ۱۳۷ و با تاریخ ۹ مارس ۲۰۰۲	تصویر سنجنده ASTER
عامل P	ArcMap 10.5	طبقه‌بندی شیء‌گرای تصویر برای ایجاد نقشه کاربری/پوشش اراضی		
عامل K	ArcMap 10.5	اختصاص ارزش K به هر نوع خاک	وزارت جهاد کشاورزی	نقشه خاک‌شناسی
عامل R	ArcMap 10.5	محاسبه عامل R برای هر ایستگاه و درون-یابی به روش جبری و کریجینگ معمولی	سازمان هواشناسی کشور	داده‌های بارش ۱۲ ایستگاه هواشناسی
نمودار نیم‌تغییر نما و ضریب تعیین برای هر روش درون‌یابی	GS ⁺	تحلیل نیم‌تغییر نما		

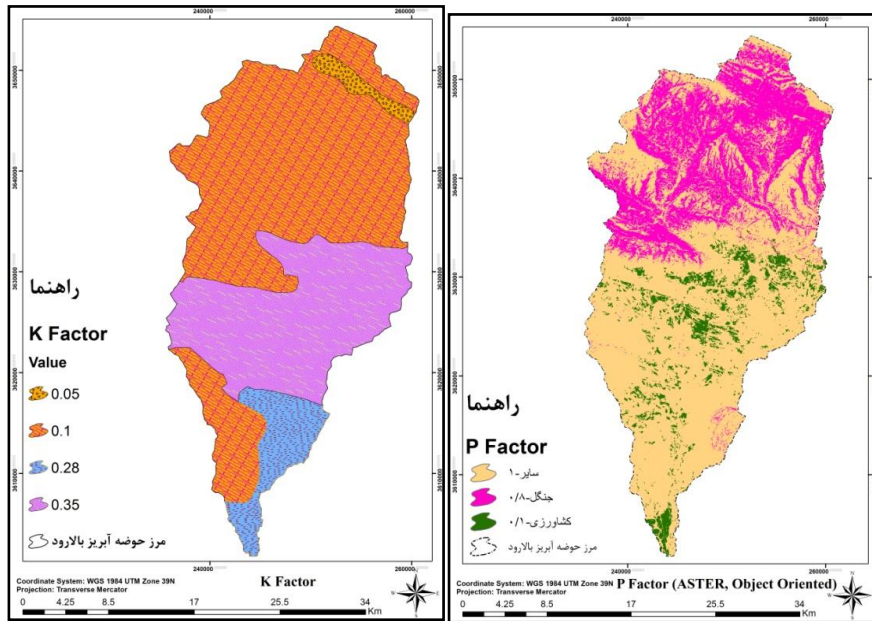
جدول ۵. موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه و آمار میانگین دما (درجه سانتی‌گراد) بارش و مجموع بارش سالانه (میلی‌متر)

نام ایستگاه	Y (m N)	X (m E)	میانگین دمای ۱۵ سال	میانگین بارش ۱۵ سال (P)	میانگین مجموع بارش ۱۵ سال
اهواز	۳۴۶۸۸۹۶/۰۷۴	۲۷۷۹۹۶/۱۰۵	۲۶/۳۸	۱۵/۹۹	۱۹۱/۸۶
ایذه	۳۵۲۴۳۶۹/۱۷۷	۳۹۲۷۷۳/۶۰۸	۲۳/۵۸	۴۹/۲۸	۵۹۱/۳۰
بستان	۳۵۱۲۹۴۶/۰۷۴	۲۱۵۷۰۷/۵۲۳	۲۴/۹۸	۱۵/۲۹	۱۸۳/۴۳
پلدختر	۳۶۷۲۷۱۷/۹	۱۹۳۷۳۶/۸۸۳	۲۳/۲۷	۳۱/۰۲	۳۷۲/۲۹
خرم‌آباد	۳۷۰۲۶۲۸/۴۹	۲۴۷۴۳۰/۶۳۹	۱۷/۱۹	۳۶/۱۷	۴۳۳/۹۹

۲۹۱/۴۳	۲۴/۲۹	۲۴/۸۰	۲۵۳۸۸۴/۱۳۶	۳۵۸۷۷۸۶/۶۹۶	دزفول
۶۲۰/۱۳	۵۱/۶۸	۱۶/۸۳	۳۲۰۳۷۳/۷۸۸	۳۷۰۶۵۴۳/۶۷۶	دورود
۲۳۴/۶۶	۱۹/۵۶	۲۶/۷۲	۱۴۹۹۰۳/۰۸۵	۳۶۲۲۳۴۶/۵۹۲	دهلران
۲۵۹/۹۶	۲۱/۶۶	۲۷/۹۰	۳۶۶۷۱۴/۷۲	۳۴۶۰۰۰۱/۲۱۶	رامهرمز
۲۸۶/۸۹	۲۳/۹۱	۲۸/۰۱	۲۹۵۴۳۶/۳۹۹	۳۵۴۸۰۳۰/۹۲۶	شوشتر
۳۸۰/۵۵	۳۱/۷۱	۱۶/۶۷	۱۸۷۳۳۵/۱۴۵	۳۷۱۵۴۹۲/۸۹۶	کوه‌دشت
۳۶۵/۲۱	۳۰/۴۳	۲۵/۶۶	۳۳۷۷۲۳/۶۳۵	۳۵۳۴۳۳۲/۲۶	مسجدسلیمان

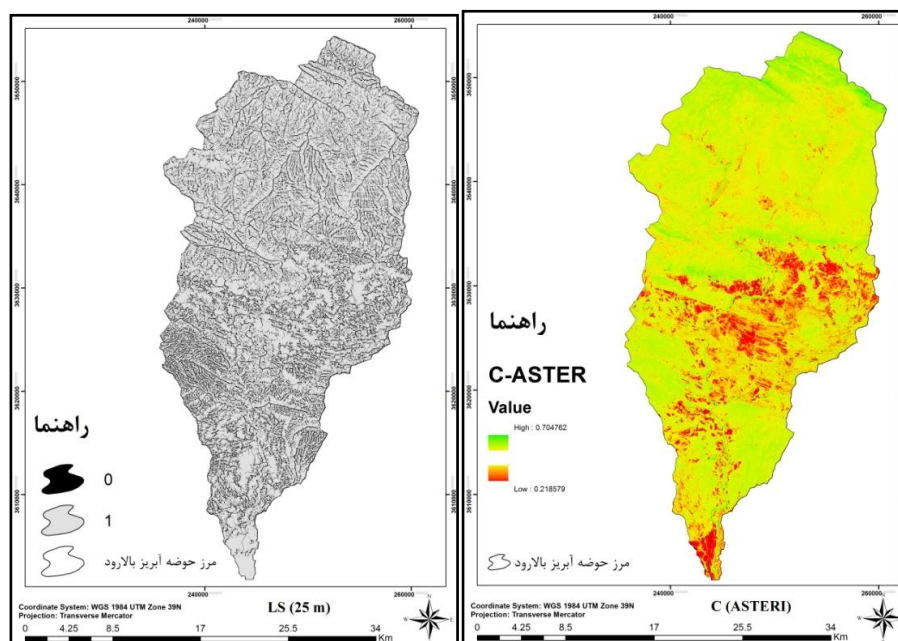
بحث و یافته‌ها

شکل‌های ۴ تا ۷ به ترتیب لایه‌های عوامل K, P, LS و C ایجاد شده را نشان می‌دهند. تمامی لایه‌های ایجاد شده از نوع رستر با اندازه سلول ۲۵ متر هستند.



شکل ۵. عامل K

شکل ۴. عامل P



شکل ۷. عامل C

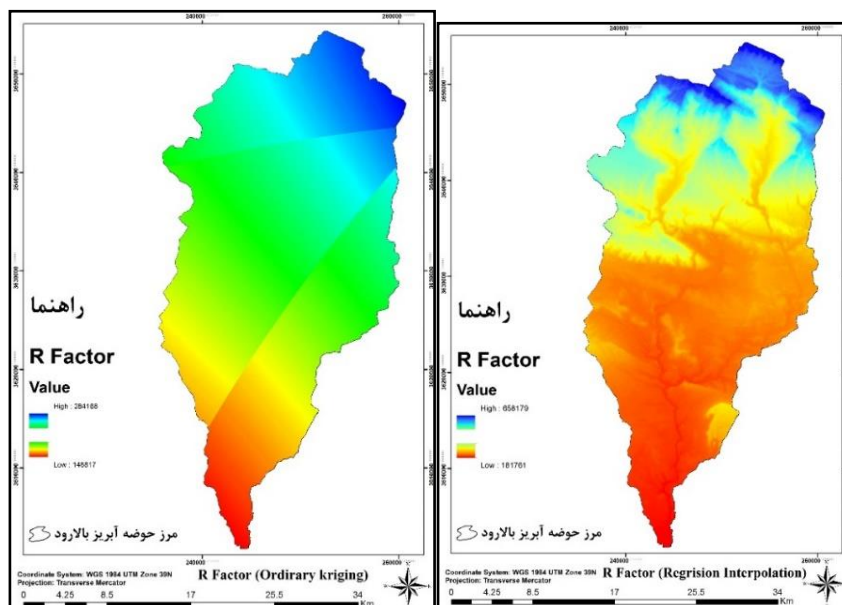
شکل ۶. عامل LS

نقشه‌های تولیدشده برای عامل R حاصل از درون‌یابی‌های جبری و کریجینگ معمولی در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. برای این لایه نیز اندازه سلول ۲۵ متر انتخاب شده است. برخی آمارهای مربوط به دو لایه عامل R در جدول (۷) آمده است. دلیل استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ معمولی با نوع تبدیل لگاریتمی بر روی داده‌های عامل R، مقدار RMS^1 کم‌تر آن (۱۳۶۴۴۱) نسبت به سایر انواع درون‌یابی کریجینگ و نیز درون‌یابی IDW^2 مطابق جدول (۶) است. جهت تهیه نقشه کاربری/پوشش اراضی و در نهایت تهیه عامل P، روش طبقه‌بندی شیء‌گرا بر روی تصویر سنجنده ASTER به کار رفته است. در این روش طبقه‌بندی علاوه بر باندهای طیفی از بافت، شیب، مدل رقومی ارتفاع و شیب حاصل از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور، شاخص‌های پوشش گیاهی^۳ و نمک^۴ نیز استفاده شده است. تحقیقات زیادی به بررسی طبقه‌بندی شیء‌گرا پرداخته (Blaschke, 2010, Magnini and Bettineschi, 2019) و بالاتر بودن دقت کلی و ضریب کاپای روش طبقه‌بندی شیء‌گرا را نسبت به انواع روش‌های پیکسل‌پایه نشان داده‌اند (فیضی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹، امیدپور و همکاران، ۱۳۹۲، مرادی‌مطلق و همکاران، ۱۳۹۵ و Wang et al., 2011)، لذا در این پژوهش از روش طبقه‌بندی شیء‌گرا در محیط نرم‌افزار eCognition9 با دقت کلی و ضریب کاپای 93/65 و 0/92 استفاده گردید.

^۱ Root Mean Square^۲ Inverse Distance Weighted^۳ NDVI^۴ $SI = \sqrt{Red\ band \times Blue\ band}$

جدول ۶. مقایسه RMS انواع درون‌یابی کریجینگ و IDW

Sector Type				نوع درون‌یابی	نوع تبدیل
۱*	۴x	۴+	۱۰		
RMS					
۱۵۹۱۶۴/۳	۱۵۷۹۷۹/۹	۱۵۸۱۰۶/۷	۱۷۳۹۰۹/۴	بدون تبدیل	کریجینگ معمولی
۱۳۶۴۴۱	۱۳۹۵۲۵/۵	۱۳۹۹۲۶	۱۴۳۳۷۷/۳	لگاریتمی	
۱۵۹۱۶۴/۴	۱۵۷۹۸۰	۱۵۸۱۰۶/۸	۱۷۳۹۰۹/۵	Box-Cox	
۱۷۶۶۹۸/۶	۱۷۶۸۴۸	۱۷۶۷۹۵/۷	۱۷۶۵۶۴/۱	بدون تبدیل	کریجینگ ساده
۱۶۸۶۴۶	۱۶۹۱۶۵/۶	۱۶۸۹۶۵/۳	۱۶۸۹۸۰/۳	لگاریتمی	
۱۷۶۶۹۸/۶	۱۷۶۸۴۸/۱	۱۷۶۷۹۵/۷	۱۷۶۵۶۴/۱	Box-Cox	
۱۷۲۹۱۳/۹	۱۷۲۵۷۰/۶	۱۷۲۴۹۷/۸	۱۸۱۸۸۷/۸	بدون تبدیل	کریجینگ همگانی
۱۶۳۷۰۲/۵	۱۶۳۷۴۴/۲	۱۶۳۷۷۸/۸	۱۷۱۶۳۴/۸	لگاریتمی	
۱۷۲۵۷۰/۶	۱۷۲۵۷۰/۶	۱۷۲۴۹۷/۸	۱۸۱۸۸۷/۸	Box-Cox	
۱۷۶۶۹۸/۶	۱۷۶۸۴۸	۱۷۶۷۹۵/۷	۱۷۶۵۶۴/۱	بدون تبدیل	کریجینگ جداسازنده
۱۶۸۶۴۶	۱۶۹۱۶۵/۶	۱۶۸۹۶۵/۳	۱۶۸۹۸۰/۳	لگاریتمی	
۱۷۶۶۹۸/۶	۱۷۶۸۴۸/۱	۱۷۶۷۹۵/۷	۱۷۶۵۶۴/۱	Box-Cox	
۱۸۰۳۰۵/۲	۱۸۰۳۰۵/۲	۱۸۰۳۰۵/۲	۱۷۹۷۹۹/۸	بدون تبدیل	IDW



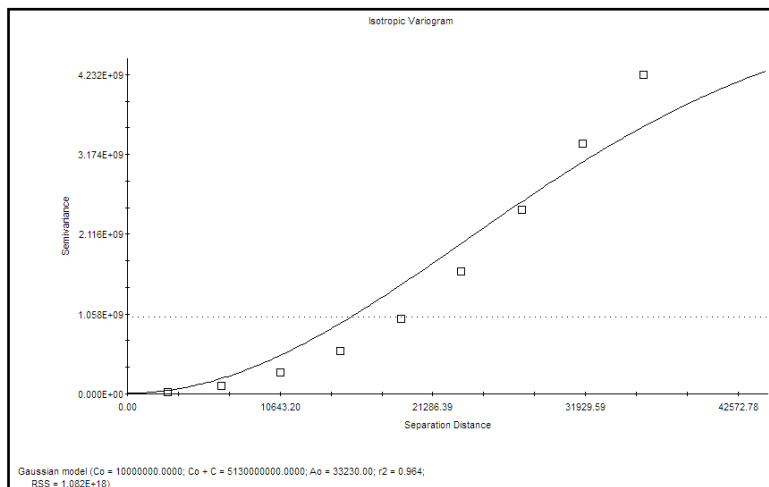
شکل ۹. عامل R (روش کریجینگ معمولی)

شکل ۸. عامل R (رگرسیون خطی)

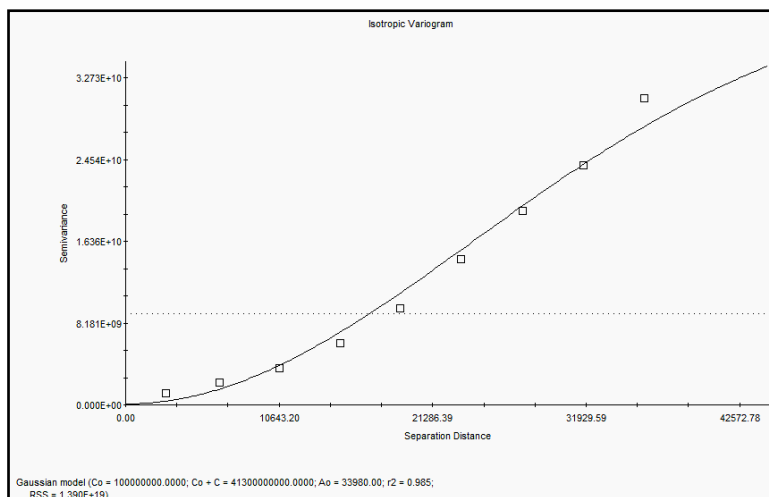
جدول ۷. میانگین، بیشینه و کمینه عامل‌های R

کمینه	بیشینه	میانگین	عامل R حاصل از درون‌یابی به روش
۱۸۱۷۶۰/۶۴۱	۶۵۸۱۷۸/۸۱۳	۳۰۹۸۷۵/۶۳۱	جبری (رگرسیون خطی)
۲۸۴۱۶۷/۷۵۰	۱۴۶۸۱۶/۸۴۴	۲۱۵۴۶۲/۴۷۷	کریجینگ معمولی

شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نمودار نیم‌تغییرنمای عامل R درون‌یابی شده به روش‌های کریجینگ معمولی و رگرسیونی را نشان می‌دهند. روش نمونه‌برداری برای تهیه این نیم‌تغییرنماها، تصادفی باقاعده در سراسر محدوده مورد مطالعه با فاصله نمونه‌برداری ۱۰۰ متر است. مطابق جدول (۸)، گرچه درون‌یابی جبری برای عامل R دارای ضریب تعیین بیشتری نسبت به کریجینگ معمولی است اما در نسبت $C/(C0+C)$ با هم برابر هستند.



شکل ۱۰. واریوگرام ایزوتروپیک (همه‌جهته) عامل R درون‌یابی شده توسط روش کریجینگ معمولی



شکل ۱۱. واریوگرام ایزوتروپیک (همه‌جهته) عامل R درون‌یابی شده توسط روش رگرسیون

جدول ۸. مشخصات واریوگرام‌های همه‌جهته (ایزوتروپیک) عامل‌های R

Interpolation Type	Semivariogram Model	Isotropic/ anisotropic	C/ (C ₀ +C)	R ^۲
Ordinary Kriging	Gaussian	Isotropic	۰/۹۹۸	۰/۹۶۴
Regrision	Gaussian	Isotropic	۰/۹۹۸	۰/۹۸۵

مطابق رابطه (۱) با در هم ضرب کردن لایه‌های عوامل تأثیرگذار در مدل RUSLE، مقدار فرسایش در هر حالت درون‌یابی برای عامل R محاسبه شده است. شکل‌های (۱۲ و ۱۳) به ترتیب نقشه فرسایش را وقتی که عامل R به روش جبری و کریجینگ معمولی محاسبه شده است را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول (۹) آمده است مقادیر میانگین

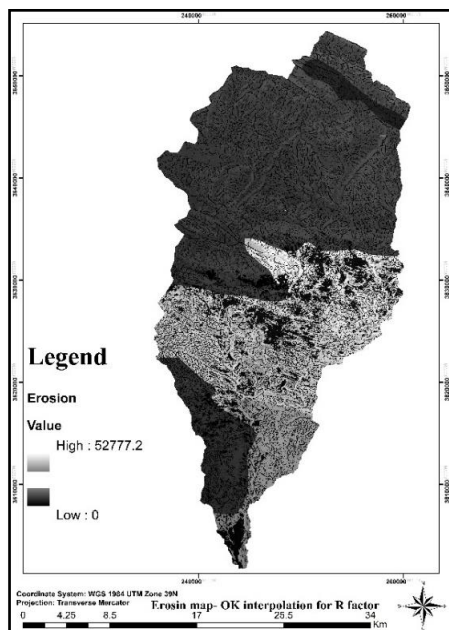
فرسایش وقتی که از درون‌یابی جبری برای عامل R استفاده می‌شود بیش‌تر است. هر فرسایش برآورد شده می‌تواند با هر یک از عوامل تأثیر گذار خود رابطه همبستگی داشته باشد که در جدول (۱۰) آمده است. مطابق با جدول (۱۰) رابطه همبستگی بین هر دو فرسایش برآورد شده با عوامل R آن‌ها خیلی نزدیک به هم است و کمترین اختلاف را با هم دارند.

جدول ۹. مقادیر میانگین فرسایش برآورد شده برای تصویر سنجنده ASTER (برحسب تن بر هکتار بر سال) در این جدول، OK مخفف Ordinary Kriging و Reg مخفف Regression است.

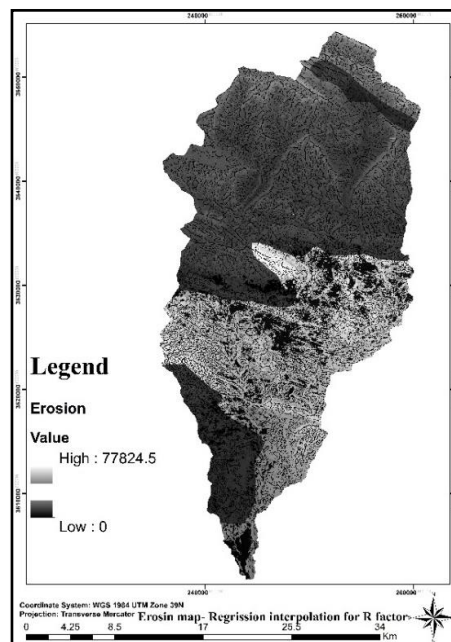
R factor interpolation method	R (Reg)	R (OK)
Erosion (t.ha ⁻¹ .yr ⁻¹)	۱۹۳۱۵/۱۳۵	۱۴۲۲۳/۷۲۶
اختلاف با پژوهش قبلی	۱۶۵۱/۸۶۵	۶۷۴۳/۲۷۴

جدول ۱۰. رابطه همبستگی بین فرسایش‌های برآورد شده و عوامل آن‌ها

عامل P	عامل K	عامل LS	عامل C	عامل R	فرسایش ۱
0/786	0/832	0/834	0/755	0/727	به روش رگرسیون خطی
0/814	0/820	0/866	0/789	0/724	به روش کریجینگ معمولی



شکل ۱۳. نقشه فرسایش با استفاده از عامل R درون-یابی شده به روش کریجینگ معمولی



شکل ۱۴. نقشه فرسایش با استفاده از عامل R درون-یابی شده به روش جبری

نتیجه‌گیری

عامل فرساینده‌گی باران (R) نقش مهمی در فرسایش و رسوب به‌ویژه در رشته‌کوه زاگرس دارد. در مدل فرسایش RUSLE برای محاسبه عامل R به علت فقدان آمار مربوط به حداکثر شدت باران‌های ۳۰ دقیقه‌ای نمی‌توان از شاخص فرسایش ویشمایر (شاخص EI.۳) استفاده نمود؛ بنابراین جهت محاسبه این عامل از روابط رنارد و فریموند (۱۹۹۴) برای ۱۲ ایستگاه هواشناسی اطراف منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. این پژوهش با هدف بررسی نقش درون‌یابی‌های جبری و زمین‌آمار (رگرسیون خطی و کریجینگ معمولی) برای تولید عامل R و تأثیر آن در برآورد فرسایش حوضه آبریز بالا رود به روش RUSLE و در نهایت انتخاب بهینه‌ترین نقشه فرسایش انجام شد. نتایج نشان داد که عامل R درون‌یابی شده به روش رگرسیونی دارای خودهمبستگی بیشتری ($R^2=0/985$) نسبت به عامل R درون‌یابی شده به روش کریجینگ معمولی ($R^2=0/964$) است و این امر می‌تواند استفاده از درون‌یابی به روش رگرسیون خطی را در تهیه عامل R توجیه کند. میانگین عامل R درون‌یابی شده توسط روش رگرسیون خطی بیش‌تر از میانگین عامل R درون‌یابی شده توسط روش کریجینگ معمولی است. علت این افزایش این است که روش رگرسیون خطی به ارتفاعات بالا و توپوگرافی منطقه مورد مطالعه وابستگی کامل دارد، در نتیجه ارتفاعات بالای حوضه آبریز بالا رود باعث بیش برآورد عامل R شده است.

بررسی نقشه خطر فرسایش خاک نشان می‌دهد هنگامی که از روش درون‌یابی رگرسیون خطی برای تهیه عامل R استفاده می‌شود میزان خطر فرسایش خاک در سطح حوضه برحسب تن در هکتار در سال از صفر تا 77824/5 و برای روش درون‌یابی کریجینگ معمولی از صفر تا 52777/2 است. میانگین فرسایش سالانه هنگامی که از درون‌یابی‌های جبری و کریجینگ معمولی استفاده می‌شود به ترتیب $19315/135 \text{ t.ha}^{-1}.\text{yr}^{-1}$ و $14223/726 \text{ t.ha}^{-1}.\text{yr}^{-1}$ برآورد شده است که نشان می‌دهد استفاده از روش درون‌یابی رگرسیون خطی در تهیه لایه عامل R، هم باعث برآورد بیش‌تر این عامل و در نهایت موجب برآورد بیش‌تر فرسایش توسط مدل تجربی RUSLE می‌شود. مقدار فرسایش برآورد شده با استفاده از عامل R درون‌یابی شده به روش رگرسیون خطی (جبری) اختلاف کم‌تری ($1651/865 \text{ t.ha}^{-1}.\text{yr}^{-1}$) نیز با مقدار فرسایش برآورد شده در پژوهش قبلی (شرکت مهندسی مشاور سازآب‌پردازان، ۱۳۷۰) دارد. مقایسه فرسایش‌های برآورد شده با هر کدام از عامل‌های تأثیر گذار در آن‌ها نیز نشان می‌دهد که هر دو فرسایش برآورد شده کم‌ترین و بیش‌ترین رابطه همبستگی را به ترتیب با عامل‌های R و LS خود دارند.

سپاسگزاری

از دکتر فرخ اسدزاده استادیار دانشگاه ارومیه به خاطر رهنمودهای ارزشمندشان کمال تشکر را داریم.

منابع

- احمدی، حسن، ۱۳۸۸، ژئومورفولوژی کاربردی، جلد ۱، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- اخوان، رضا؛ کلاین، کریستوف، ۱۳۸۷، کارایی کریجینگ در برآورد و نقشه‌سازی موجودی جنگل‌کاری‌ها (مطالعه موردی: جنگل‌کاری بنشکی رامسر)، تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، دوره ۱۷، شماره ۲، صص ۱۶۱-۳۱۸.
- اسدزاده، فرخ؛ میرزایی، سلمان؛ طیبی، محبوبه، ۱۳۹۳، تعیین مناسب‌ترین ابعاد سلولی مدل رقومی ارتفاع برای محاسبه عامل توپوگرافی در مدل RUSLE، نشریه تحقیقات آب‌و خاک ایران، دوره ۴۵، شماره ۳، ۱۳۹۳، صص ۳۲۵-۳۳۲.
- آرخی، صالح؛ نیازی، یعقوب، ۱۳۸۹، بررسی کاربرد RS و GIS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوضه بالادست سد ایلام)، پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، جلد ۱۷، شماره ۲، صص ۱-۲۷.
- امیدپور، رضا؛ مرادی، حمیدرضا؛ آرخی، صالح، ۱۳۹۲، مقایسه روش‌های طبقه‌بندی پیکسل پایه و شیء‌گرا در تهیه نقشه کاربری اراضی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، سنجش از دور و GIS ایران، دوره ۵، شماره ۳، صص ۹۹-۹۹.

۱۱۰.

- باقری، علیرضا؛ راشد محصل، محمدحسن؛ رضوانی‌مقدم، پرویز، ۱۳۹۳، اثر تناوب بر پویایی مکانی علف‌های هرز شاه‌تره ایرانی و علف هفت بند، پژوهش‌های زراعی ایران، دوره ۱۲، شماره ۲، صص ۱۷۸-۱۸۸.
- بلیانی، یدالله؛ حکیم‌دوست، سیدناصر، ۱۳۹۳، پردازش داده‌های مکانی (فضایی) با استفاده از روش‌های تحلیل فضایی، انتشارات آزادپیما، تهران.
- پیری‌صحراگرد، حسین؛ پیری، جمشید، ۱۳۹۵، تحلیل ساختار مکانی برخی از خصوصیات خاک با استفاده از روش زمین‌آمار (مطالعه موردی: مراتع غرب تفتان، شهرستان خاش)، مرتع، دوره ۱۰، شماره، صص ۲۲۴-۲۳۶.
- خسروی، یونس؛ عباسی، اسماعیل، ۱۳۹۵، تحلیل فضایی داده‌های محیطی با زمین‌آمار، انتشارات آذرکلک، زنجان.
- رخبین، معصومه؛ نوحه‌گر، احمد؛ کمالی، علیرضا؛ حبیب‌اللهیان، محمود، ۱۳۹۳، برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبخیز لاور فین (استان هرمزگان) با استفاده از سنجش‌ازدور (RS)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل تجربی RUSLE، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۲۹، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۳، صص ۸۹-۱۰۴.
- رفاهی، حسینقلی، ۱۳۹۳، فرسایش آبی و کنترل آن، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- شرکت مهندسی مشاور سازآب‌پردازان، ۱۳۷۰، گزارش فیزیوگرافی مطالعات مرحله توجیهی طرح آبریزداری حوضه آبریز بالارود، سازمان جهاد سازندگی استان خوزستان، مدیریت آبخیزداری و امور زیربنایی، اهواز.
- شعبانی، محمد، ۱۳۹۰، ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در تهیه نقشه فرسایش‌داری باران استان فارس، مهندسی و مدیریت آبخیز، سال سوم، شماره ۳، صص ۱۶۸-۱۷۶.
- فیضی‌زاده، بختیار؛ هلالی، حسین، ۱۳۸۹، طبقه‌بندی پوشش اراضی/کاربری اراضی بر اساس تکنیک شی‌گرا و تصاویر ماهواره‌ای، مطالعه موردی: استان آذربایجان غربی، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۲، شماره ۷۱، صص ۷۳-۸۴.
- کردوانی، پرویز، ۱۳۸۵، جغرافیای خاک‌ها، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- کردوانی، پرویز، ۱۳۹۳، حفاظت خاک، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- کمانگر، محمد؛ فرج‌زاده؛ منوچهر، بداغی، مرضیه؛ کرمی، پیمان، ۱۳۹۴، واسنجی معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده (RUSLE) با سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور (مطالعه موردی: حوضه آبریز سیخوران هرمزگان)، فضای جغرافیایی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، صص ۱۹۱-۲۰۷.
- مرادی‌مطلق، احسان، ۱۳۹۶، نقش تغییر منابع سنجش‌ازدور و فن‌های GIS در نتایج برآورد فرسایش و رسوب حوضه آبریز رودخانه بالارود به روش RUSLE، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مختاری، داود؛ ولیزاده‌کامران، خلیل، سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز، تبریز.
- مرادی‌مطلق، احسان؛ ولیزاده‌کامران، خلیل، ۱۳۹۵، ارزیابی روش‌های پیکسل پایه و شی‌گرا در طبقه‌بندی پوشش/کاربری اراضی شهر اندیمشک با استفاده از تصویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸، چهارمین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
- معروفی، صفر؛ سقایی، صفا؛ ارشادفتح، فرناز، ۱۳۹۴، بررسی توزیع مکانی سرعت باد با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و کلاسه‌بندی آن بر اساس روش تحلیل خوشه‌ای، علوم و مهندسی آبیاری، دوره ۴۰، شماره ۱، صص ۴۹-۵۹.
- وراوی‌پور، مریم، ۱۳۹۰، خاک‌شناسی عمومی، انتشارات دانشگاه پیام‌نور، صص ۲۳۳.
- De Mello, C.R, Viola, M.R, Owens, P.R, de Mello, J.M, Beskow, S., ۲۰۱۵. Interpolation Methods for Improving the RUSLE R-Factor Mapping in Brazil. *Soil and Water Conservation*, ۷۰(۳), pp. ۱۸۲-۱۹۷.
- Hoyos, N. Waylena, P. R. Jaramillo, Á., ۲۰۰۵. Seasonal and Spatial Patterns of Erosivity in a Tropical Watershed of the Colombian Andes. *Journal of Hydrology*, ۳۱۴, ۱۷۷-۱۹۱.

- Kamaludin, H. Lihan, T. Ali Rahman, Z. Mustapha, M.A. Idris, W.M.R. Rahim, S.A., ۲۰۱۳. *Integration of remote sensing, RUSLE and GIS to model potential soil loss and sediment yield (SY)*. *Hydrology and Earth System Sciences*, DOI: ۱۰.۵۱۹۴/hessd-۱۰-۴۵۶۷-۲۰۱۳.
- Khorsandi, N. Mahdian, M.H. Pazira, E. Nikami, D. Chamheadar, H., ۲۰۱۲. *Comparison of Different Interpolation Methods for Investigating Spatial Variability of Rainfall Erosivity Index*. *Pol. J. Environ. Stud*, ۲۱(۶), pp. ۱۶۵۹-۱۶۶۶.
- Kumar Das, and G. Guchait, R., ۲۰۱۶. *Modeling of Risk of Soil Erosion in Kharkai Watershed using RUSLE and TRMM Data: A Geospatial Approach*. *International Journal of Science and Research*, ۵(۱۰), pp. ۱-۱۰.
- Li, J.D. and Heap, A., ۲۰۰۸. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. *Geoscience Australia, Australia*.
- Men, M.Yu. and Zhenrong, X.H., ۲۰۰۹. *Study on the spatial pattern of rainfall erosivity based on geostatistics in Hebei Province, China*. *Frontiers of Agriculture in China*, ۲(۲), pp. ۲۸۱-۲۸۹.
- Moore, Ian D. and Wilson, John P., ۱۹۹۲. *Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation*. *Soil and Water Conservation* ۴۷(۵), pp. ۴۲۳-۴۲۸.
- Morgan, R. P. C., 2005. *Soil Erosion and Conservation*. Blackwell Publication, Malden, Massachusetts, USA.
- Nikolova, E., ۲۰۱۶. *Soil Erosion Modeling Using RUSLE and GIS in the Republic of Macedonia*. Master Thesis, Environmental and Geomatic Engineering Faculty, Politecnico Di Milano, Italy.
- Osman Khan, T., ۲۰۱۶. *Soil Degradation, Conservation and Remediation*. Springer, New York, USA.
- Renard, K.G. and Freimund, J.R., ۱۹۹۴. *Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R factor in the Revised USLE*. *J. Hydrol* (۱۵۷), pp. ۲۸۷-۳۰۶.
- Renard, K.G, Foster, G.R, Weesies, G.A, McCool, D.K, Yoder, D.C (۱۹۹۷), *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, United States Department of Agriculture, Washington, USA.
- Teng, H. Ma, Z. Chappell, A. Shi, Z. Liang, Z. Yu, W., ۲۰۱۷. *Improving Rainfall Erosivity Estimates Using Merged TRMM and Gauge Data*. *Remote Sensing*, ۹(۱۱), pp. ۱۱۳۴, DOI: ۱۰.۳۳۹۰/rs۹۱۱۱۱۳۴.
- Whishmeier, W.H. and Smith, D.D., ۱۹۷۸. *Predicting rainfall erosion losses- a guide to soil conservation planning*. U.S Department of Agriculture, Agriculture handbook NO. ۵۳۷.
- Zhang, K. Hong, W. Wu, C.Z. Ding, X., ۲۰۰۹. *Study on the Spatial Pattern of Rainfall Erosivity Based on Geostatistics and GIS of Fujian Province* *Journal of Mountain Science*. ۲۷(۵), pp. ۵۳۸.
- Zhu, Q. Chen, X.W. Fan, Q.X. Jin, H.P. Li, J. R., ۲۰۱۱. *A New Procedure to Estimate the Rainfall Erosivity Factor Based on Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Data*. *Science China Technological Sciences*, ۵۴(۹), pp. ۲۴۳۷-۲۴۴۵, DOI: org/۱۰.۱۰۰۷/s ۱۱۴۳۱-۰۱۱-۴۴۶۸-z.