



تعیین و مقایسه پراکنش مکانی میزان فرسایش خاک به دو روش پیش‌گویی و شبیه‌سازی زمین‌آماری (مطالعه موردی: زیرحوضه‌های زوجی کچیک استان گلستان)

* محسن حسینعلی‌زاده^۱، حسن احمدی^۲، سادات فیض‌نیا^۳، فیروزه ریواز^۴ و محمد ناصری^۵
استادیار گروه آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، آستاد گروه
آبخیزداری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، آستاد گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی،
دانشگاه تهران، آستادیار گروه آمار، دانشگاه شهید بهشتی،^۵ مربی پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی
تاریخ دریافت: ۹۱/۷/۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۲

چکیده

فرسایش تشدیدی خاک عواقب زیادی را در برداشته و با توجه به اهمیت اندازه‌گیری آن و استفاده از ^{137}Cs در مطالعات فرسایش خاک، یکی از موارد مهم در این زمینه نحوه تهیه نقشه است. در این مطالعه که در زیرحوضه‌های زوجی استان گلستان صورت گرفت، بعد از طیف‌سنجی ۶۰ موقعیت در هر زیرحوضه توسط آشکارساز بالا خالص ژرمانیوم قابل حمل و استفاده از مدل تبدیل تعادل جرمی III، نرخ جابه‌جایی ذرات خاک در هر موقعیت تعیین شد. متوسط فرسایش خاک در مکان‌های طیف‌سنجی در زیرحوضه‌های شاهد و نمونه به ترتیب برابر ۱۰/۱۲ و ۱۰/۹۳ تن در هکتار در سال مشخص شد. تهیه نقشه جابه‌جایی ذرات خاک در هر زیرحوضه به صورت پیش‌گویی (کریگینگ) و شبیه‌سازی زمین‌آماری با استفاده از بسته‌های تخصصی در نرم‌افزار R انجام شد. مدل نیم‌تغییرنما در هر دو زیرحوضه از نوع گاوسی با دامنه تأثیر ۳۸۰ متر بوده و متوسط فرسایش خاک براساس روش کریگینگ در زیرحوضه‌های شاهد و نمونه به ترتیب معادل ۹/۹۳ و ۱۱/۲۲ تن در هکتار در سال تعیین شد. با استفاده از شبیه‌سازی گاوسی دنباله‌ای، متوسط فرسایش خاک در زیرحوضه‌های شاهد و نمونه به ترتیب معادل ۱۰/۰۳ و ۱۱/۰۸ تن در هکتار در سال به دست آمد. کم‌ترین و بیش‌ترین عدم قطعیت

* مسئول مکاتبه: mhalizadeh@gau.ac.ir

فراموضعی در زیرحوضه نمونه معادل ۱۰/۷۰ و ۱۱/۴۵ تن در هکتار در سال مشخص شد. کم‌ترین و بیش‌ترین عدم قطعیت موضعی در زیرحوضه شاهد معادل ۱۰/۰۲ و ۱۱/۵۵ تن در هکتار در سال تعیین شد که این مناطق با فاصله‌ای معادل ۷۲۰ متر از یکدیگر واقع شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: ^{137}Cs ، شبیه‌سازی زمین‌آماری، کریگینگ، زیرحوضه‌های زوجی کچیک، استان گلستان

مقدمه

فرسایش تشدیدی خاک یکی از مشکلات اساسی است که با توجه به حضور انسان و رفع نیازهای او از طبیعت رخ داده و روز به روز به شدت آن افزوده می‌شود. بنابراین، آگاهی از مقدار و تغییرات مکانی آن در هر محدوده‌ای به منظور اعمال مدیریت‌های پایدار اهمیت بسیاری دارد. اندازه‌گیری فرسایش خاک با استفاده از رادیونوکلوئیدهای ریزشی به خصوص ^{137}Cs در سال‌های اخیر توجه پژوهش‌گران زیادی را به خود جلب کرده است (ریتچی و ریتچی، ۲۰۰۸؛ پورتو و همکاران، ۲۰۰۹؛ افشار و همکاران، ۲۰۱۰؛ گاسپر و همکاران، ۲۰۱۱). به علت این‌که ^{137}Cs در مکان‌های محدودی اندازه‌گیری می‌شود، برای تعمیم آن به محدوده مورد مطالعه، تهیه نقشه باید صورت گیرد که در این خصوص ابهاماتی وجود دارد. یکی از دقیق‌ترین روش‌های تهیه نقشه که تاکنون در مورد ^{137}Cs مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از تخمین‌گر زمین‌آماری (کریگینگ) با تأکید بر کاهش واریانس خطا است (افشار و همکاران، ۲۰۱۰؛ میت و برنارد، ۲۰۰۷؛ چیل، ۱۹۹۸). اما این روش با محدودیت‌هایی همراه است که عمده‌ترین آن‌ها هموارسازی (پیرایش) بیش از حد متغیر مورد مطالعه (بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی) است که به چیدمان موضعی مکان‌های نمونه‌برداری بستگی دارد. این خاصیت که اریبی انتخاب^۱ نامیده می‌شود در مورد متغیرهایی که مقادیر حدی آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار بوده یا تغییرات مکانی آن‌ها در محدوده مورد مطالعه بسیار بالاست، از اهمیت به‌سزایی برخوردار است (گووئرتز، ۱۹۹۷). بنابراین، هدف از کریگینگ، پیش‌گویی متغیر مورد مطالعه در مکان‌های بدون نمونه‌برداری است که تا حد امکان، نزدیک و مشابه مقدار واقعی متغیر در همان مکان باشد. بنابراین، ضرورت و دلیلی برای پیش‌گوها به منظور بازتولید تغییرات مکانی مقادیر واقعی وجود ندارد. از سوی دیگر، در شبیه‌سازی تصادفی^۲، هدف کاهش واریانس خطای موضعی نبوده و تمرکز

1- Selective Bias

2- Stochastic Simulation

بر روی تولید آماره‌های فراموضعی^۱ مانند هیستوگرام و نیم‌تغییرنما است (گووآرتز، ۱۹۹۷) که تبیین و تعیین ویژگی‌های مهم و اصلی پراکندگی مقادیر واقعی متغیر مورد مطالعه را به‌دنبال دارد. به‌عبارت دیگر، مقدار شبیه‌سازی شده در هر مکان، الزاماً و ضرورتاً بهترین پیش‌گویی ممکن نخواهد بود. به همین دلیل، واریانس پیش‌گویی توسط رویکرد شبیه‌سازی (شرطی)، به مراتب بیش‌تر از واریانس پیش‌گویی توسط روش کریجینگ است (محمدی، ۲۰۰۶). بنابراین یک نقشه شبیه‌سازی شده که تحقیقی^۲ از یک مدل میدان تصادفی^۳ است، نسبت به یک نقشه پیش‌گویی واقعی‌تر است، چون تغییرات مکانی ناشی از متغیر را مدل‌سازی کرده و در مواردی که تغییرات مکانی متغیر مورد مطالعه باید در نظر گرفته شود نسبت به پیش‌گویی ترجیح داده می‌شود (محمدی، ۲۰۰۶؛ اسریواستاوا، ۱۹۹۶). از طرف دیگر در پیش‌گویی فقط یک نقشه با حداقل واریانس خطا تهیه شده، اما در شبیه‌سازی تصادفی، تحقیق‌ها یا نقشه‌های زیادی تولید می‌شود که همگی آن‌ها دارای احتمال یکسانی^۴ بوده و آماره‌های تقریباً یکسانی را شامل می‌شوند. بنابراین از این طریق می‌توان به ارزیابی عدم قطعیت متغیر موردنظر و سناریوهای مختلف پرداخته (گووآرتز، ۱۹۹۷) و همچنین تکثیر خطا^۵ از طریق GIS را تحلیل کرد. به‌طورکلی، شرطی‌سازی (مشروط ساختن) شبیه‌سازی به داده‌های تجربی (نمونه‌برداری شده) عبارت از این است که از میان تعداد بی‌نهایت پیامد یک تابع تصادفی مانند $Z(S)$ شبیه‌سازی‌هایی انتخاب می‌شوند که مقادیر داده‌های تجربی را در موقعیت‌های واقعی داده‌ها، در نظر داشته باشند. بنابراین، این نوع شبیه‌سازی از نوع شرطی بوده و از نظر کمی و کیفی بر شبیه‌سازی‌های غیرشرطی ترجیح داده می‌شود. از نظر کیفی، این نوع شبیه‌سازی‌ها قادر به ارائه تصاویر واقعی از تغییرپذیری مکانی هستند. از نظر کمی، نیز شبیه‌سازی‌های شرطی را می‌توان به‌عنوان مهم‌ترین ابزار برای ارزیابی عدم قطعیت همراه با داده‌ها و مدل‌های پردازش تغییرات مکانی مختلف قلمداد نمود. شبیه‌سازی تصادفی در مورد جابه‌جایی ذرات خاک در داخل و خارج از کشور تاکنون انجام نشده است و فقط در چندین مورد تغییرات مکانی آن به‌صورت پیش‌گویی انجام شده است که در این مورد می‌توان به پژوهش‌های (مارسل و همکاران، ۲۰۰۲؛ مبیث و همکاران، ۲۰۰۸؛ افشار و همکاران، ۲۰۱۰) اشاره کرد.

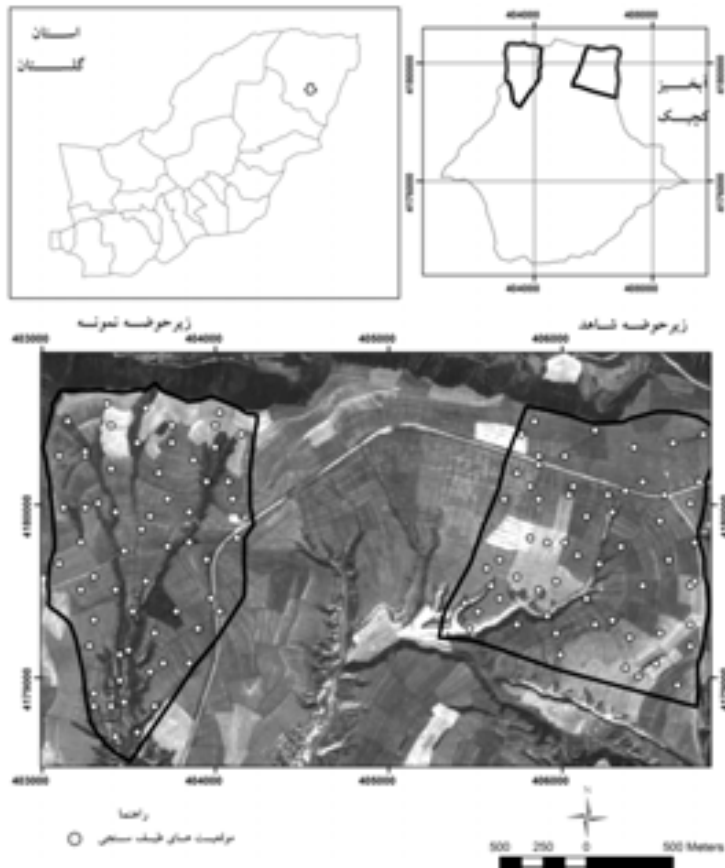
- 1- Global Statistics
- 2- Realization
- 3- Random Field
- 4- Equiprobable
- 5- Error Propagation

با توجه به رویکردهای (۱) شبیه‌سازی زمین‌آماری مانند: آگاهی از رفتار مکانی و عدم قطعیت‌های موضعی و فراموضعی و (۲) پایین بودن خطای پیش‌گویی (کریگینگ) در فرسایش خاک، از آن‌جا که اهداف این دو رویکرد قابل تطابق و جمع شدن با یکدیگر نیستند، هر دو رویکرد در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفتند. از طرفی نرخ جابه‌جایی خاک در نهشته‌های لسی که به‌شدت تحت تغییر کاربری قرار گرفته و به کاربری کشاورزی تبدیل شده‌اند بسیار بالاست. بنابراین با توجه به اهمیت تهیه نقشه (پیش‌گویی در مقابل شبیه‌سازی) انجام چنین مطالعه‌ای در سازندهای لسی با حاصل‌خیزی بالا و حساس به فرسایش، در قالب زیرحوضه‌های زوجی (زیرحوضه شاهد^۱ و زیرحوضه نمونه^۲) از اهمیت بالایی برخوردار است که در این پژوهش به آن پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: زیرحوضه‌های زوجی کچیک استان گلستان یکی از زیرحوضه‌های زوجی مهم کشور محسوب می‌شوند که در آب‌خیز کچیک، از زیرحوضه‌های چندگانه آب‌خیز گرگان‌رود واقع شده و در انتهای شمال‌شرق استان گلستان قرار دارند. طبق تقسیم‌بندی اقلیمی آمبرژه، منطقه با میانگین بارش سالانه ۴۸۲ میلی‌متر، اقلیم نیمه‌خشک معتدل تا سرد را به خود اختصاص می‌دهد. موقعیت محدوده مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. هر دو زیرحوضه کاملاً از نهشته‌های لسی پوشیده شده‌اند و به‌شدت تحت کاربری کشاورزی واقع شده‌اند. برخی از ویژگی‌ها به‌ترتیب در مورد زیرحوضه‌های شاهد و نمونه (زوجی) عبارت از: متوسط شیب (درصد): ۱۸/۴ و ۱۵/۸. دامنه ارتفاعی (متر): ۷۰۰-۹۰۰ و ۷۵۵-۸۵۰. مساحت (هکتار): ۱۹۱ و ۱۹۶. درصد پوشش گیاهی (درصد): ۵۲/۹ و ۹۵/۲ می‌باشد.

- ۱- Testifier Sub-catchment: در واقع جنبه ترویجی و آموزشی داشته، عملیات آب‌خیزداری را شامل شده و برای بررسی روند گرایش حوضه معرف مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- ۲- Sample Sub-catchment: برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری میزان فرسایش و رسوب و رواناب استفاده شده و مساحتی کم‌تر از ۵۰۰ هکتار را به خود اختصاص می‌دهند.



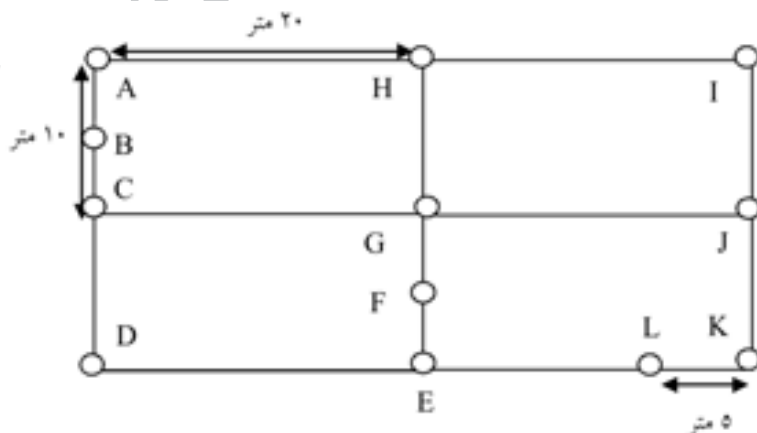
شکل ۱- نقشه موقعیت محدوده‌های مورد مطالعه.

طیف‌سنجی و استفاده از مدل‌های تبدیل: بعد از تعیین ۶۰ موقعیت طیف‌سنجی و نحوه پراکنش آن‌ها در هر زیرحوضه با استفاده از روش نمونه‌برداری مدل مبنا مبتنی بر پیشینه درست‌نمایی، طیف‌سنجی در هر موقعیت توسط آشکارساز ژرمانیوم بالا خالص قابل حمل^۱ صورت گرفت (شکل ۱). برای این منظور بعد از کالیبراسیون دستگاه در یک دوره زمانی ۴۵ روزه که در ۲ مرحله انجام شده و شامل ۱) کالیبراسیون انرژی با استفاده از چشمه‌های ^{241}Am ، ^{152}Eu ، ^{137}Cs ، ^{60}Co و ^{228}Th و ۲) کالیبراسیون بازدهی و استخراج توابع بازدهی (رابطه بین شدت خطوط طیف و میزان فعالیت هسته پرتوزا)

1- Portable High Pure Germanium

می‌باشد، آشکارساز در هر موقعیت موردنظر به مدت ۵۴۰۰ ثانیه بر روی سه پایه مناسب به ارتفاع ۵۰ سانتی متری مستقر شده و طیف‌سنجی توسط یک تیم متخصص در عرصه انجام شد. نمونه‌برداری خاک (۱۰۸ نمونه خاک) از منطقه مرجع (منطقه‌ای که برای مدت زمان طولانی بکر مانده و در حدود ۷ کیلومتری محدوده‌های کاری واقع شده بود) برای ۱۲ محل از عمق‌های مختلف (۱۰-۰ سانتی متری "نمونه" و ۳۰-۱۰ سانتی متری "نمونه ۴") (شکل ۲) توسط دستگاه صفحه خراشنده با سطح مقطع ۱۰۰۰ سانتی متر مربع (۲۰×۵۰ سانتی متری) در آذر ۱۳۸۸ انجام شد و طیف‌سنجی ^{137}Cs در آزمایشگاه انستیتو فیزیک دانشگاه مالک اشتر به صورت زیر انجام شد:

ابتدا نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در هوای آزاد و ۲۴ ساعت در آون خشک شدند. سپس با استفاده از آسیاب فکی با توجه به نمونه استاندارد استفاده شده در کالیبراسیون بازدهی آشکارسازها، تمامی نمونه‌ها از الک شماره ۵۰ (۰/۲ میلی‌متر)، عبور داده شده و برای مرحله وزن کردن و آماده کردن نمونه‌ها آماده شدند. در این مرحله با توجه به استانداردهای خاکی ساخته شده، ۹۵۰ گرم از نمونه‌های الک شده درون ظروف مارینلی ریخته شده و برای طیف‌سنجی به آزمایشگاه طیف‌نگاری منتقل شدند. حضور قله ۶۶۱/۶۶ کیلو الکترون ولت نمایان‌گر حضور ^{137}Cs بوده و آن را می‌توان با استفاده از همین قله تحلیل کرد. بنابراین برای طیف‌گیری از نمونه‌های جمع‌آوری شده از دو HPGe هم‌محور از نوع P با بازدهی نسبی ۳۸/۵ و ۵۵ درصد استفاده شده که نرخ شمارش زمینه این سیستم‌ها، با توجه به حفاظ‌های سربی آن‌ها به ترتیب ۲/۹ و ۲/۵ شمارش در ثانیه می‌باشد.



شکل ۲- تصویر نحوه نمونه‌برداری در منطقه مرجع.

با توجه به این که همه موقعیت‌های طیف‌سنجی در زمین‌های کشاورزی واقع شده است، تبدیل موجودی ^{137}Cs به نرخ جابه‌جایی ذرات خاک بر حسب تن در هکتار در سال، توسط مدل تبدیل تعادل جرمی *II* (والینگ و همکاران، ۲۰۰۷) انجام شد.

$$CPI = \sum_{i=1}^N C_i B_i D_i \times 10^2 \quad (1)$$

که در آن، *CPI*: میزان موجودی رادیونوکلوئید در خاک (بکرل بر مترمربع) *C_i*: فعالیت رادیونوکلوئید در خاک (بکرل بر کیلوگرم)، *B_i*: وزن مخصوص خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و *D_i*: عمق نمونه‌برداری (متر)، عمق معادل نفوذ رادیونوکلوئید در *HPGe* با در نظر گرفتن وزن مخصوص خاک و *TVL*. آمار توصیفی: آمار توصیفی نرخ جابه‌جایی ذرات خاک با استفاده از نرم‌افزار *R* (تیم مرکزی توسعه *R*، ۲۰۱۱) و بسته تخصصی *Rcmdr*^۱ (فاکس، ۲۰۰۵) صورت گرفت. برای آگاهی از در نظر گرفتن مقادیر حدی در پیش‌گویی و شبیه‌سازی و نرمال شدن داده‌ها: در زیرحوضه نمونه، بیش‌ترین مقدار فرسایش سالانه خاک که با استفاده از طیف‌سنجی ^{137}Cs در محل‌های تعیین شده و تبدیل آن به نرخ جابه‌جایی ذرات خاک انجام شد، معادل ۳۹/۱۴ تن در هکتار به‌دست آمد که در مجاورت نهال‌کاری واقع شده بود و از ادامه محاسبه‌ها حذف شده و در زیرحوضه شاهد: بیش‌ترین مقدار فرسایش سالانه خاک معادل ۴۱/۳۸ تن در هکتار که در حاشیه جاده واقع شده بود، در محاسبه‌ها منظور شد.

آمار مکانی: آمار مکانی نرخ جابه‌جایی ذرات خاک از جمله پیش‌گویی و شبیه‌سازی شرطی با استفاده از بسته‌های تخصصی *SP* (پسما و بیوند، ۲۰۰۵)، *maptools* (نیکولاس و همکاران، ۲۰۱۲)، *gstat* (پسما، ۲۰۰۴) در محیط نرم‌افزار *R* صورت گرفت. به‌منظور شبیه‌سازی شرطی، هر زیرحوضه به شبکه‌ای منظم با ۱۰۰۰ موقعیت تقسیم‌بندی شد. سپس در این موقعیت‌ها ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی برای هر زیرحوضه انجام شد و نقشه‌های مربوطه تهیه شد. تنها تفاوت اجرای پیش‌گویی و شبیه‌سازی با استفاده از بسته‌های تخصصی مربوطه در تعداد نقشه‌های تعیین شده است (عدد ۱ برای پیش‌گویی و عدد بیش‌تر از ۱ برای شبیه‌سازی). برای آگاهی از نحوه اجرای شبیه‌سازی شرطی (شبیه‌سازی به شرط داده‌های اندازه‌گیری شده) به (دویچ و جرنل، ۱۹۹۸) مراجعه شود.

نتایج

آمار توصیفی: خلاصه آماری نرخ جابه‌جایی ذرات خاک در زیرحوضه‌های زوجی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خلاصه آمار توصیفی نرخ جابه‌جایی ذرات خاک در موقعیت‌های طیف‌سنجی زیرحوضه‌ها.

آماره	کمینه	چارک اول	میانه	میانگین	چارک سوم	بیشینه
نمونه	-۲۷/۹۶	-۱۵/۹۶	-۱۱/۰۵	-۱۰/۹۳	-۴/۶۴	۳/۰۲
شاهد	-۴۱/۶۸	-۱۳/۷۶	-۹/۵۵	-۱۰/۱۲	-۵/۴۶	۶/۲۰

علامت‌های منفی و مثبت، به ترتیب مقادیر فرسایش و رسوب سالانه خاک (تن در هکتار) را نشان می‌دهند.

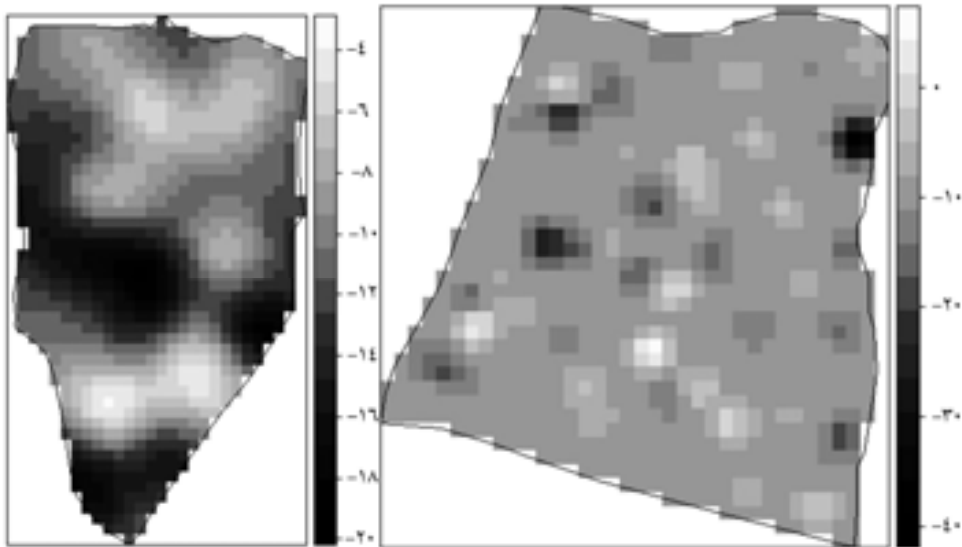
آمار مکانی: بهترین مدل نیم‌تغییرنما برای هر دو زیرحوضه در مورد نرخ جابه‌جایی ذرات خاک، با توجه به معیارهای ارزیابی مدل، از نوع مدل گاوسی بوده که برآورد پارامترهای این مدل مانند آستانه، اثر قطعه‌ای و دامنه تأثیر توسط روش حداقل مجموع مربعات درست‌نمایی انجام گرفت که به ترتیب معادل ۶۰، ۳۵ و ۳۸۰ متر بود. این مورد (برازش بهترین مدل نیم‌تغییرنما) در دو رویکرد پیش‌گویی و شبیه‌سازی یکسان بوده است.

پیش‌گویی (کریگینگ): بعد از تعیین بهترین مدل نیم‌تغییرنما در مورد نرخ جابه‌جایی ذرات خاک در هر دو زیرحوضه، نقشه پیش‌گویی این متغیر در هر زیرحوضه تعیین شد که خلاصه آن در جدول ۲ آورده شده است. در این شکل‌ها تیرگی و روشنی رنگ‌ها به ترتیب نشان‌دهنده شدت فرسایش و رسوب هستند (شکل ۳).

جدول ۲- خلاصه آمار توصیفی نرخ جابه‌جایی ذرات خاک (پیش‌گویی) در زیرحوضه‌های زوجی.

آماره	کمینه	چارک اول	میانه	میانگین	چارک سوم	بیشینه
نمونه	-۲۲/۳۹	-۱۳/۴۰	-۱۰/۸۰	-۱۱/۲۲	-۸/۵۲	-۳/۹۰
شاهد	-۳۸/۹۸	-۱۰/۴۲	-۹/۸۳	-۹/۹۳	-۹/۱۹	۴/۲۸

علامت‌های منفی و مثبت، به ترتیب مقادیر فرسایش و رسوب سالانه خاک (تن در هکتار) را نشان می‌دهند.



شکل ۳- نقشه‌ها پیش‌گویی نرخ جابه‌جایی ذرات خاک در زیرحوضه‌های شاهد (راست) و نمونه (چپ).

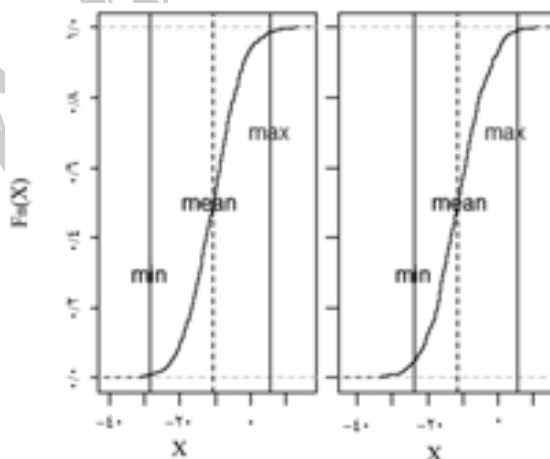
شبیه‌سازی: خلاصه آماری ۱۰۰۰ سلول^۱ در ۱۰۰۰ مرتبه شبیه‌سازی (زیرحوضه نمونه) در جدول ۳ آورده شده است. تابع توزیع تجمعی تجربی نقشه‌های شبیه‌سازی با کمینه و بیشینه عدم قطعیت فراموضعی (کمینه و بیشینه نرخ جابه‌جایی ذرات خاک) در این زیرحوضه نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. کمینه و بیشینه نرخ جابه‌جایی ذرات خاک در این شکل معادل میانگین نرخ جابه‌جایی ذرات خاک به‌علاوه و منهای ۲ برابر انحراف معیار آن‌ها با حدود اطمینان ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است که به‌ترتیب برابر با $(۲۳/۷۶-)$ و $(۵/۵۹)$ و $(۲۸/۴-)$ و $(۵/۵۹)$ تن در هکتار در سال تعیین شد (مقادیر منفی و مثبت به‌ترتیب معادل فرسایش و رسوب هستند).

1- Pixel

جدول ۳- خلاصه آماری نرخ جابه‌جایی ذرات خاک (شبیه‌سازی) در زیرحوضه نمونه (نقشه پایه).

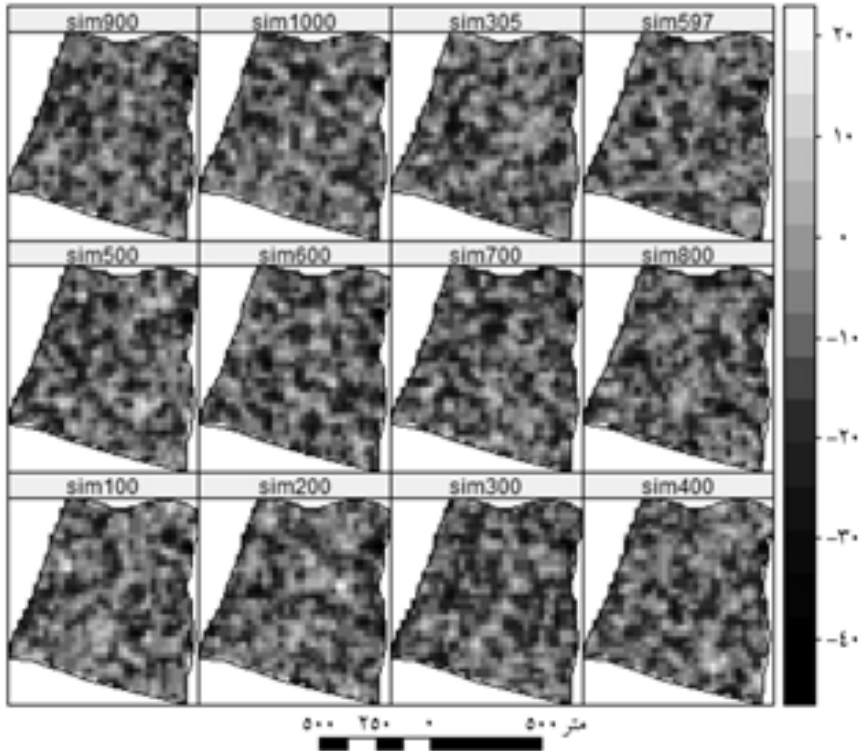
شبهه‌سازی	آماره	کمینه	چارک اول	میانه	میانگین	چارک سوم	بیشینه
	کمینه	-۴۵/۳۵	-۳۶/۲۲	-۳۴/۴۸	-۳۴/۶۴	-۳۲/۷۲	-۲۸/۲۸
۱۰۰۰ مرتبه شبیه‌سازی	میانگین	-۱۳/۷۲	-۱۱/۶۰	-۱۱/۰۵	-۱۱/۰۸	-۱۰/۵۶	-۸/۵۴
	بیشینه	۴/۴۹	۱۰/۱۷	۱۱/۶۲	۱۱/۹۳	۱۳/۵۷	۲۲/۵۱
	بیشینه عدم قطعیت (شبیه‌سازی ۲۶۶ ام)	-۳۸/۲۷	-۱۷/۱۱	-۱۰/۹۳	-۱۱/۴۵	-۵/۴۱	۱۳/۴۱
	کمینه عدم قطعیت (شبیه‌سازی ۸۱۵ ام)	-۳۴/۶۳	-۱۴/۹۷	۱۰/۹۴	۱۰/۷۰	-۶/۳۵	۱۰/۰۵
	شبیه‌سازی ۱۰۰ ام	-۳۵/۳۸	-۱۷/۳۷	-۱۲/۹۱	-۱۲/۶۱	-۷/۹۹	۷/۴۵
	شبیه‌سازی ۲۰۰ ام	-۳۱/۴۶	-۱۵/۲۶	-۱۰/۹۳	-۱۰/۹۰	-۶/۲۹	۱۰/۲۹
	شبیه‌سازی ۳۰۰ ام	-۳۲/۰۲	-۱۴/۳۵	-۹/۸۴	-۹/۶۶	-۵/۲۴	۱۳/۵۳
	شبیه‌سازی ۴۰۰ ام	-۳۸/۷۸	-۱۶/۲۱	-۱۱/۵۹	-۱۱/۵۵	-۶/۴۶	۸/۱۰
	شبیه‌سازی ۵۰۰ ام	-۳۸/۶۴	-۱۷/۱۹	-۱۱/۶۷	-۱۱/۹۰	-۶/۸۵	۱۲/۳۱
	شبیه‌سازی ۶۰۰ ام	-۳۶/۰۶	-۱۶/۸۲	-۱۱/۵۹	-۱۱/۵۰	-۶/۱۹	۱۲/۴۹
	شبیه‌سازی ۷۰۰ ام	-۳۳/۷۷	-۱۶/۵۵	-۱۱/۴۷	-۱۱/۵۸	-۶/۵۲	۱۴/۷۷
	شبیه‌سازی ۸۰۰ ام	-۳۳/۷۹	-۱۵/۵۵	-۹/۸۵	-۱۰/۱۶	-۴/۹۴	۱۲/۵۰
	شبیه‌سازی ۹۰۰ ام	-۳۵/۱۹	-۱۵/۳۹	-۱۰/۴۸	-۱۰/۵۹	-۶/۰۴	۹/۵۸
	شبیه‌سازی ۱۰۰۰ ام	-۳۲/۶۵	-۱۴/۷۳	-۹/۷۵	-۹/۸۷	-۵/۱۴	۹/۸۷

علامت‌های منفی و مثبت، به ترتیب مقادیر فرسایش و رسوب سالانه خاک (تن در هکتار) را نشان می‌دهند.



شکل ۴- تابع توزیع تجمعی تجربی نقشه‌های شبیه‌سازی با کمینه و بیشینه عدم قطعیت فراموضعی (زیرحوضه نمونه).

برخی از شبیه‌سازی‌ها در مورد زیرحوضه شاهد به همراه نقشه‌های کمینه (شبیه‌سازی ۳۰۵ م) و بیشینه (شبیه‌سازی ۵۹۷ م) عدم قطعیت شبیه‌سازی در شکل ۵ نشان داده شده است.



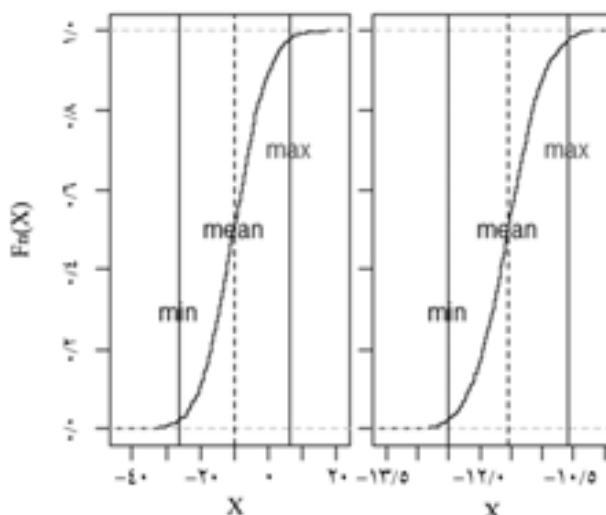
شکل ۵- برخی از شبیه‌سازی‌ها به همراه نقشه‌های کمینه و بیشینه عدم قطعیت شبیه‌سازی (زیرحوضه شاهد).

خلاصه آمار توصیفی نرخ جابه‌جایی ذرات خاک (شبیه‌سازی) در زیرحوضه شاهد به صورت سلول پایه در جدول ۴ آورده شده است. تابع توزیع تجمعی تجربی سلول‌های شبیه‌سازی با کمینه و بیشینه عدم قطعیت نیز در شکل ۶ آورده شده که بیشینه و کمینه نرخ جابه‌جایی ذرات خاک آن به ترتیب برابر با (۲۶/۲۴- و ۶/۲۱) و (۱۲/۵۰- و ۱۰/۴۵-) تن در هکتار در سال است.

جدول ۴- خلاصه آمار توصیفی نرخ جابه‌جایی ذرات خاک (شبیه‌سازی) در زیرحوضه شاهد (سلول پایه).

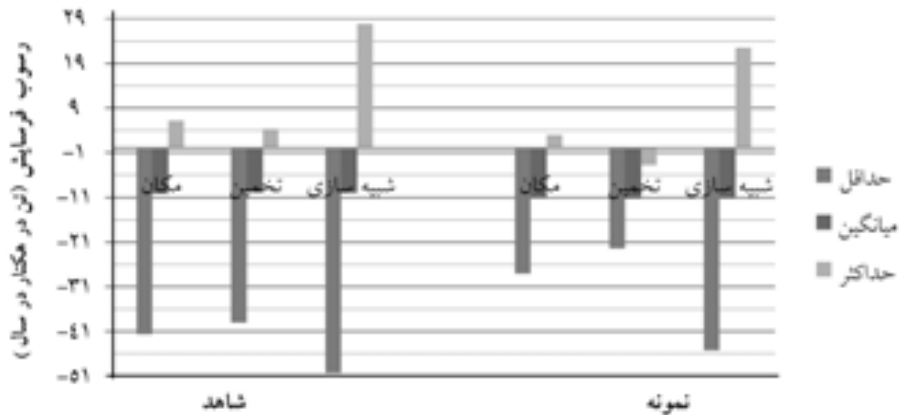
شبه‌سازی سلول پایه	آماره	کمینه	چارک اول	میانه	میانگین	چارک سوم	بیشینه
	کمینه	-۵۰/۱۹	-۳۵/۰۸	-۳۳/۰۶	-۳۱/۹۱	-۳۰/۰۸	-۵/۷۰
۱۰۰۰ شبه‌سازی	میانگین	-۳۹/۰۰	-۱۰/۴۹	-۹/۹۹	-۱۰/۰۳	-۹/۲۳	۴/۴۱
	بیشینه	-۲۹/۴۷	۱۰/۴۸	۱۳/۰۲	۱۲/۰۶	۱۵/۵۱	۲۷/۷۹
بیشینه عدم قطعیت (سلول شماره ۴۸۰ م)		-۳۹/۳۱	-۱۵/۵۷	-۱۰/۱۴	-۱۰/۰۲	-۴/۵۷	۱۷/۰۰
کمینه عدم قطعیت (شبیه‌سازی ۹۲۲ م)		-۱۳/۳۲	-۱۱/۸۷	-۱۱/۵۵	-۱۱/۵۵	-۱۱/۲۳	-۱۰/۲۵

علامت‌های منفی و مثبت، به ترتیب مقادیر فرسایش و رسوب سالانه خاک (تن در هکتار) را نشان می‌دهند.



شکل ۶- تابع توزیع تجمعی تجربی سلول‌های شبه‌سازی با کمینه و بیشینه عدم قطعیت موضعی (زیرحوضه شاهد).

مقایسه برخی از خصوصیات آماری نرخ جابه‌جایی ذرات خاک در حالت‌های مختلف از جمله اندازه‌گیری در محل‌های طیف‌سنجی، شبیه‌سازی و پیش‌گویی زمین‌آماري در زیرحوضه‌های زوجی در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۷- برخی از خصوصیات آماری نرخ جابه‌جایی ذرات خاک در حالت‌های مختلف در زیرحوضه‌های زوجی.

بحث و نتیجه‌گیری

متوسط نرخ جابه‌جایی ذرات خاک در مکان‌های طیف‌سنجی در هر دو زیرحوضه به صورت فرسایشی است و در زیرحوضه شاهد و نمونه به ترتیب برابر با ۱۰/۱۲ و ۱۰/۹۳ تن در هکتار در سال تعیین شده است. این مقادیر در این زیرحوضه‌ها با استفاده از پیش‌گویی زمین‌آماری به ترتیب ۹/۹۳ و ۱۱/۲۲ تن در هکتار در سال تعیین شده است که در زیرحوضه نمونه با توجه به جدول‌های ۱ و ۲ و شکل ۷ خاصیت پیرایشی داشته و در زیرحوضه شاهد به واقعیت نزدیک‌تر بوده است. میانگین نرخ جابه‌جایی ذرات خاک در زیرحوضه نمونه نسبت به شاهد بیشتر است که ناشی از انجام اقدامات حفاظتی و جابه‌جایی خاک در هنگام انجام این عملیات است. میانگین نرخ جابه‌جایی ذرات خاک با استفاده از شبیه‌سازی زمین‌آماری در زیرحوضه شاهد و نمونه به صورت فرسایشی بوده و به ترتیب معادل ۱۰/۰۳ و ۱۱/۰۸ تن در هکتار در سال تعیین شده است که این میانگین‌ها در مقایسه با میانگین‌های به دست آمده از پیش‌گویی زمین‌آماری تفاوت بسیار اندکی دارد. در زیرحوضه شاهد با توجه به پیش‌گویی، نرخ جابه‌جایی سالانه ذرات خاک از ۴/۲۸ تن در هکتار رسوب تا ۳۹/۹۸ تن در هکتار فرسایش خاک در تغییر است که این موارد با توجه به شبیه‌سازی زمین‌آماری از ۲۷/۷۹ تن در هکتار (رسوب) تا ۵۰/۱۹ تن در هکتار (فرسایش خاک) در تغییر است که اختلاف بسیار چشم‌گیری را در این دو رویکرد به خود اختصاص داده است. علاوه بر این، در این زیرحوضه با توجه به عدم

قطعیت موضعی، تفاوت بسیار چشم‌گیری بین مقادیر کمینه و بیشینه عدم قطعیت فرسایش و رسوب وجود دارد. با توجه به این‌که در این زیرحوضه، مقدار فرسایش حدی $41/68$ (بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی خاک اندازه‌گیری شده) در محاسبه‌ها در نظر گرفته شده بود، مقادیر نرخ جابه‌جایی خاک ناشی از پیش‌گویی در بین محدوده اندازه‌گیری شده واقع شده (خاصیت هموارسازی پیش‌گویی) و مقادیر جابه‌جایی خاک ناشی از شبیه‌سازی، محدوده‌ای فراتر از محدوده اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در زیرحوضه نمونه با استفاده از پیش‌گویی، فرسایش خاک بین $22/39$ - $3/90$ تن در هکتار در سال در تغییر بوده است که با توجه به شبیه‌سازی، جابه‌جایی خاک بین $22/51$ تن رسوب در هکتار تا $45/35$ تن فرسایش خاک در هکتار در تغییر بوده و اختلاف این دو رویکرد مانند زیرحوضه شاهد بسیار چشم‌گیر است. به عبارتی در رویکرد شبیه‌سازی، $22/5$ تن رسوب جایگزین $3/9$ تن فرسایش در رویکرد پیش‌گویی شده است که حدود 26 تن اختلاف جابه‌جایی ذرات خاک را در این دو رویکرد نشان می‌دهد. بنابراین استفاده از هر دو رویکرد را می‌توان در مطالعات فرسایش و رسوب پیشنهاد داد. با توجه به این‌که دو رویکرد پیش‌گویی و شبیه‌سازی در برآورد میانگین متغیر مورد مطالعه عملکرد مشابهی دارند و در مقادیر حدی متفاوت هستند و هدف این مطالعه استفاده از هر کدام از این رویکردها را تعیین می‌کند، خاصیت هموارسازی در پیش‌گویی بیانگر این است که مدیریت‌های اعمال شده براساس پیش‌گویی زمین‌آماري با ریسک بالایی همراه هستند. از طرفی در نقشه‌های ناشی از شبیه‌سازی، می‌توان با سناریوهای مختلف مدیریتی الگوی تغییرات مکانی را در محدوده موردنظر کاملاً در نظر گرفت. قابل ذکر است که با توجه به عدم قطعیت فراموضعی می‌توان درصدی از محدوده مورد مطالعه که فرسایشی بیشتر یا کم‌تر از یک حد مشخص را متحمل شده‌اند را تعیین کرده و برنامه مدیریتی برای آن محدوده پیشنهاد داد.

منابع

1. Afshar, F.A., Ayoubi, S., and Jalalian, A. 2010. Soil redistribution rate and its relationship with soil organic carbon and total nitrogen using ^{137}Cs technique in a cultivated complex hillslope in western Iran. *J. Environ. Radioactivity*. 101: 606-614.
2. Chappell, A. 1998. Using remote sensing and geostatistics to map Cs-137-derived net soil flux in south-west Niger. *J. Arid Environ*. 39: 441-455.
3. Deutsch, C.V., and Journel, A.G. 1998. *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*. New York Oxford University Press, 340p.

4. Gaspar, L., Navas, A., Walling, D.E., Machín, J., and Gómez Arozamena, J. 2011. Using ^{137}Cs and ^{210}Pb ex to assess soil redistribution on slopes at different temporal scales. *Catena* in Press, Corrected Proof.
5. Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation* New York: Oxford University Press, 477p.
6. Mabit, L., and Bernard, C. 2007. Assessment of spatial distribution of fallout radionuclides through geostatistics concept. *J. Environ. Radioactivity*. 97: 206-219.
7. Mabit, L., Bernard, C., Makhlof, M., and Laverdiere, M.R. 2008. Spatial variability of erosion and soil organic matter content estimated from Cs-131 measurements and geostatistics. *Geoderma*. 145: 245-251.
8. Marcel, P., Slávik, O., and Fulajtár, E. 2002. Assessment of Spatial Variation of Cesium-137 in Small Catchments. *J. Environ. Quality*. 31: 1930-1939.
9. Mohammadi, J. 2006. *Spatial Simulation*. Tehran: Pelk Press, 270p.
10. Nicholas, J., Koh, L., and Bivand, R. 2012. *maptools: Tools for reading and handling spatial objects*. <http://CRAN.R-project.org/package=maptools>.
11. Pebesma, E., and Bivand, R. 2005. S. Classes and methods for spatial data in R. *R News*, 5: 2.
12. Pebesma, E.J. 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers and Geosciences*. 30: 683-691.
13. Porto, P., Walling, D.E., Callegari, G., and Capra, A. 2009. Using caesium-137 and unsupported lead-210 measurements to explore the relationship between sediment mobilisation, sediment delivery and sediment yield for a Calabrian catchment. *Marine and Freshwater Research*, 60: 680-689.
14. R Development Core Team. 2011. *R: A Language and Environment for Statistical Computin*.
15. Ritchie, J.C., and Ritchie, C.A. 2008. Bibliography of publications of ^{137}Cs studies related to erosion and sediment deposition. <http://www.ars.usda.gov/Main/docs.htm?docid=17939>.
16. Srivastava, M.R. 1996. An overview of stochastic spatial simulation. In: *Spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences: second international symposium* (Mowrer HT, C.R., Hamre RH, ed). P 13-22, US Department of Agriculture, Forest Service, Fort Collins.
17. Walling, D.E., Zhang, Y., and He, Q. 2007. Models for Converting Measurements of Environmental Radionuclide Inventories (^{137}Cs , Excess ^{210}Pb , and ^7Be) to Estimates of Soil Erosion and Deposition Rates. (Including Software for Model Implementation)



Determination and comparison of soil redistribution rate by geostatistical simulation and prediction (Case Study: Kachik sub-catchments of Golestan Province)

***M. Hosseinalizadeh¹, H. Ahmadi², S. Feiznia³, F. Rivaz⁴ and M. Naseri⁵**

¹Assistant Prof., Dept. of Watershed and Arid Zone Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, ²Professor, Dept. of Watershed, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran, ³Professor, Dept. of Range and Watershed Management, University of Tehran, ⁴Assistant Prof., Dept. of Statistics, Shahid Beheshti University, ⁵Research Instructor, Shahid Beheshti University

Received: 09/29/2012; Accepted: 02/20/2013

Abstract

Soil erosion as a human-induced phenomenon has bad side effects. Therefore measuring soil erosion using ¹³⁷Cs and preparing maps are important. In this study which has been performed in paired-sub-catchments of Golestan Province, spectrometry of 60 sites in every sub-catchment was performed using portable High Pure Germanium Detector and then conversion model of Mass Balance II was used to obtain soil redistribution rate. Average of soil erosion in all 60 sites in sample and testifier sub-catchments was 10.93 and 10.12 Mg ha⁻¹yr⁻¹, respectively. Geostatistical simulation and prediction (Kriging) of soil redistribution rate was performed using some packages with R software. Gaussian semivariogram model with effective range of 380 m was determined for both sub-catchments. Average soil erosion by geostatistical simulation are (10.3 and 18.08 Mg ha⁻¹yr⁻¹) and for prediction (9.93 and 11.22 Mg ha⁻¹yr⁻¹) for testifier and sample sub-catchments, respectively. The highest and the lowest global uncertainty in sample sub-catchment were 10.70 and 11.45 Mg ha⁻¹yr⁻¹. The highest and the lowest local uncertainty in Testifier sub-catchment was 10.02 and 11.55 Mg ha⁻¹yr⁻¹ that these areas are 720 m far from each other.

Keywords: ¹³⁷Cs, Geostatistical simulation, Kriging, Paired-sub-catchments of Kachik, Golestan Province

* Corresponding Author; Email: mhalizadeh@gau.ac.ir