



فصلنامه علوم محیطی، دوره چهاردهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵

۱۳۱-۱۴۶

ارزیابی آلودگی خاک‌های شالیزاری استان گیلان با کادمیم با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و GIS

صفورا اسدی کپورچال^{۱*}، مهدی همایی^۲ و حسن رمضان‌پور^۱

^۱ گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت
^۲ گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۹

اسدی کپورچال، ص.، م. همایی و ح. رمضان‌پور. ۱۳۹۵. ارزیابی آلودگی خاک‌های شالیزاری استان گیلان با کادمیم با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و GIS. فصلنامه علوم محیطی. ۱۴(۳): ۱۳۱-۱۴۶.

سابقه و هدف: تجمع عناصر سنگین در خاک در بسیاری از نقاط دنیا مشکلات زیست‌محیطی فراوانی را به وجود آورده‌اند. غلظت زیاد این عناصر در خاک ممکن است به مقداری زیاد به وسیله گیاه جذب شود و این مهم‌ترین راه ورود عناصر سنگین به زنجیره غذایی انسان و دام و چرخه‌های بیولوژیک است. بنابراین بررسی چگونگی انباشت این عناصر به منظور جلوگیری از آلودگی خاک و زیست‌بوم ضروری است. در میان عناصر سنگین، کادمیم به دلیل تحرک بالا در سیستم‌های بیولوژیک و توانایی تجمع در گیاهان بدون ایجاد هر گونه نشانه‌های قابل‌رؤیت به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین عناصر سنگین در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه کادمیم در خاک‌های اسیدی در محدوده pH ۴/۵ تا ۵/۵ متحرک بوده و برنج نیز در خاک‌های اسیدی بهترین رشد را دارد و نیز با توجه به نقش برنج در سلامت جامعه، این تحقیق با هدف بررسی آلودگی خاک شالیزارهای استان گیلان به کادمیم انجام شد.

مواد و روش‌ها: بدین منظور تعداد ۱۰۰ نمونه خاک از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری به طور تصادفی و با استفاده از دستگاه GPS پیش از کوددهی و کشت و پس از برداشت محصول از شالیزارهای مختلف استان تهیه شد. برای تجزیه خاک، نمونه‌های خاک برداشت‌شده پس از خشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. غلظت کادمیم کل و نیز برخی ویژگی‌های خاک شامل بافت خاک، هدایت الکتریکی، واکنش خاک، جرم ویژه ظاهری و حقیقی و ماده آلی خاک اندازه‌گیری شد. توزیع مکانی و پراکنش فلز سنگین کادمیم با استفاده از روش‌های مختلف زمین‌آمار شامل IDW، Spline و Kriging در محیط GIS بررسی شد.

نتایج و بحث: نتایج حاصل از تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داد که متوسط pH خاک‌های مورد آزمایش ۶/۴۸ و شوری عصاره اشباع ۱/۵۹ دسی‌زیمنس بر متر بوده که این مقدار شوری برای کشت گیاه برنج مشکلی ایجاد نمی‌کند. درصد شن نمونه‌های خاک بین ۴ الی ۳۵، سیلت بین ۲۸ الی ۴۹ و رس بین ۳۹ الی ۶۵ درصد بوده که بدین ترتیب بافت خاک‌ها در محدوده Clay Loam، Silty Clay و Clay بوده که حاکی نسبتاً سنگین تا سنگین و برای کشت گیاه برنج مناسب است. مقدار ماده آلی به‌طور متوسط ۱/۷۸ و دامنه تغییرات کادمیم کل خاک نیز پیش از کشت و پس از برداشت محصول به ترتیب با کمینه ۰/۶۵ و ۱/۹۷ و بیشینه ۱/۴۰ و ۱۱/۰۵ بود. از میان روش‌های زمین‌آمار بررسی‌شده برای توزیع مکانی و پراکنش کادمیم روش کریجینگ معمولی با مدل کروی به‌عنوان بهترین روش انتخاب شد.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج به‌دست‌آمده بخشی از منطقه مورد بررسی پس از برداشت محصول طبق شاخص Kelly آلوده بوده که می‌تواند بیانگر تأثیر استفاده از کودهای شیمیایی و مدیریت غیراصولی اراضی باشد و باید استفاده از این کودها با احتیاط بیشتری انجام شود. نقشه

* Corresponding Author. E-mail Address: safooraasadi@guilan.ac.ir

حاصل می‌تواند برای بررسی و مدیریت استفاده صحیح کودهای شیمیایی برای حاصلخیزی زمین‌های شالیزاری استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: تغییرات مکانی، زمین‌آمار، شالیزار، کادمیم، کریجینگ، GIS.

مقدمه

آلودگی خاک، ناشی از فرآیند انتقال و انباشتگی مواد و ترکیبات خطرناک در آن بوده و این دو فرآیند نیز از برهمکنش ترکیبات موجود در خاک ناشی می‌شوند. از میان آلاینده‌ها، فلزات سنگین ($>5 \text{ gt/cm}^3$ جرم حجمی) به دلیل آثار بازدارنده‌ای که بر رشد گیاهان و عملکرد کیفیت تولیدات کشاورزی دارند از طریق زنجیره غذایی سلامت موجودات زنده را به خطر می‌اندازد (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). آلودگی خاک به عناصر سنگین از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در بسیاری از نقاط جهان است (Salt et al., 1995). بعضی از فلزات سنگین مانند مس، روی، آهن و مولیبدن در کشاورزی عناصر کم‌مصرف نامیده می‌شوند. همین نام‌گذاری روشنگر این واقعیت است که اولاً جذب این عناصر توسط گیاه از خاک به مقدار کم بوده و ثانیاً مقدار کمی از آن برای رشد گیاه ضروری است. برخی از عناصر مانند مس و روی در غلظت کم ضروری و در غلظت زیاد سمی هستند. در منحنی‌های پاسخ گیاه به غلظت عناصر در خاک، مرز کمبود و سمی بودن این عناصر بسیار نزدیک بوده و بنابراین در افزودن کودهای دارای این عناصر باید احتیاط شود (Malakouti and Homaei, 2004). در میان عناصر سنگین، کادمیم به دلیل تحرک بالا در سیستم‌های بیولوژیک و توانایی تجمع در گیاهان بدون ایجاد هر نوع نشانه قابل‌رؤیت به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین عناصر سنگین در نظر گرفته شده است (Sheppard et al., 2009). تحقیقات بسیاری درباره توان بیش‌اندوزی گیاهان خوراکی و سبزیجات در تجمع بیش از حد فلزات سنگین از جمله سرب و کادمیم در بافت‌هایشان انجام شده که استفاده این گیاهان و ورود آنها در زنجیره غذایی سلامت انسان و سایر موجودات زنده را به خطر می‌اندازد (Alipour et al., 2015; Asadi Kapourchal et al., 2009; Asadi Kapourchal et al., 2011; Dalalian and Homaei, 2011; Davari and Homaei, 2010, 2012; Jafarnejadi et al., 2011; Mohamadipour and Asadi Kapourchal, 2012; Khodaverdiloo and Homaei, 2008).

در پژوهشی با هدف بررسی توزیع مکانی کادمیم در منطقه مرکزی ایران واقع در استان اصفهان، بررسی نتایج آمار توصیفی کادمیم کل و مقایسه آن با مقادیر پیشنهادی استانداردهای مجاز دیگر نشان داد که خاک منطقه از لحاظ

مقدار کادمیم موجود در آن دارای آلودگی غیرمجاز است و در منطقه کشاورزی مقدار آلودگی بالا و توزیع مکانی کادمیم با غلظت $2/5$ تا $3/6 \text{ ppm}$ برابر با 15594 هکتار و توزیع مکانی کادمیم با غلظت 2 تا $2/5 \text{ ppm}$ برابر با 445129 هکتار است و جذب بالا در محصولات غده‌ای و سبزیجات این منطقه سبب می‌شود تا این عنصر سریع‌تر وارد زنجیره غذایی شده و سلامتی انسان را در معرض خطر قرار دهد (Matkan et al., 2009). آلودگی کادمیم توسط کودهای شیمیایی فسفاتی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع افزایش آن در کشاورزی مدرن به شمار می‌رود که با افزایش سطح کادمیم خاک مقدار آن در محصولات برداشت‌شده نیز افزایش می‌یابد (Lado et al., 2008; Thomas et al., 2012).

در یک بررسی که در 800 هکتار از منطقه کشاورزی غرب شیراز (بیضا) در استان فارس با 19 نمونه تصادفی انجام شد، نقشه آلودگی خاک به کادمیم با استفاده از مدل کریجینگ ترسیم شد و نتایج نشان داد که بیشتر منطقه به جز بخش شمالی به درجات مختلف آلوده به کادمیم است. همچنین بر اساس نتایج این پژوهش احتمالاً منشأ اصلی کادمیم خاک انسان‌زاد بوده و فعالیت‌های کشاورزی عامل اصلی آلودگی خاک‌های منطقه مورد بررسی بوده است (Kasraeian et al., 2014). روش‌های مختلفی برای مدیریت زمین‌های کشاورزی غنی از کادمیم به‌علت تجمع زیاد کادمیم در خاک در حال بررسی است. این روش‌ها بر پایه افزایش pH و ظرفیت تبادل کاتیونی استوار است. گرچه با آهک‌دهی و افزایش pH خاک، جذب کادمیم کاهش می‌یابد لیکن این روش برای تمام خاک‌ها و گیاهان مؤثر نیست. به‌طور معمول کادمیم در خاک‌های اسیدی در محدوده pH $4/5$ تا $5/5$ متحرک بوده درحالی‌که در خاک‌های قلیایی نسبتاً غیرمتحرک است که این امر احتمالاً ناشی از رقابت یون‌های کلسیم و منیزیم است. این یافته‌ها دلالت مهمی در توسعه تکنیک اصلاح واقع‌بینانه برای مدیریت خاک‌های غنی از کادمیم دارد (Christensen and Haug, 1999). در ایران، به دلیل ارزان بودن کودهای شیمیایی، مصرف آنها به‌صورت بهینه و اصولی صورت نگرفته و در نتیجه سبب آلودگی جدی زیست‌بوم به آلاینده‌های ناشی از کودهای

منطقی تهیه کرد. در حقیقت با ایجاد نقشه‌های توزیع مکانی غلظت عناصر از طریق روش‌های درون‌یابی و نیز بررسی غلظت آنها از طریق کلاسه‌بندی این مقادیر با توجه به استانداردهای مورد قبول، می‌توان به مدیریت کشت و کار صحیح و اصولی دست پیدا کرد. تکنیک‌های درون‌یابی نظیر روش وزن‌دهی عکس فاصله و کریجینگ به‌طور گسترده در تحقیقات خاک و تولید نقشه آلودگی استفاده می‌شود. روش‌های درون‌یابی همگی یک اثر نرم‌کنندگی دارند، که سبب کم شدن مقادیر بالای واقعی و زیاد شدن مقادیر پایین واقعی می‌شود. این اثر نرم‌کنندگی منجر به انحراف در برآورد آلودگی خاک می‌شود و در نتیجه تصمیم‌گیری‌های زیست‌محیطی مربوطه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Goovaerts, 2000). برای به حداقل رساندن خطا در برآورد آلودگی ناشی از روش‌های درون‌یابی، از معیارهای ارزیابی و مقایسه روش‌های درون‌یابی استفاده می‌شود (Yunfeng et al., 2011). در نهایت روشی که کمترین خطا را در مقایسه با روش‌های دیگر، بر اساس معیارهای ارزیابی، داشته باشد به‌عنوان بهترین روش انتخاب شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نخستین تجربه‌های استفاده از زمین‌آمار در علوم خاک، بررسی تغییرات مکانی pH و میزان شن خاک توسط Campbell (1978) بود. در ایران اولین بار Hajrasuliha et al. (1980) به منظور بررسی تغییرات مکانی شوری خاک از این روش استفاده کردند.

از جمله تحقیقات انجام‌شده درباره توزیع مکانی عناصر می‌توان به تحقیق (McGrath et al., 2004) اشاره کرد. وی توزیع مکانی غلظت سرب را در سایت استخراج معادن نقره در ایرلند با استفاده از روش کریجینگ معمولی برای ارزیابی خطر و کمک به تصمیم‌گیران، بررسی کرد. در پژوهشی دیگر (Sarmadian et al., 2014) با استفاده از ۷۷ نمونه خاک در ۱۰۰۰ هکتار از منطقه قزوین و روش رگرسیون-کریجینگ نقشه رقومی فسفر خاک را تهیه و صحت پیش‌بینی‌ها، با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل، ارزیابی کرد. (et al., 2010) Taghipour تغییرات مکانی غلظت کل نیکل و مس در خاک‌های سطحی اطراف همدان را به روش کریجینگ بررسی کردند و در این بررسی از ۲۶۳ نمونه مرکب خاک سطحی از منطقه مورد بررسی به وسعت ۱۶۰۰۰۰ هکتار استفاده شد. (Hani et al., 2014) از روش‌های زمین‌آمار

شیمیایی و به‌طور خاص، آلودگی فلزات سنگین می‌شود. نتایج یافته‌های (Jazaeri et al., 2015) نشان داد سوپر فسفات تریپل وارداتی با غلظت ۱۷/۷۵ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم کود نزدیک به ۵ برابر آلودگی کادمیمی بیشتری نسبت به خاک فسفات داخلی با غلظت کادمیم ۳/۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم داشت. کود سوپر فسفات تریپل وارداتی به دلیل آلودگی کادمیمی بالا، باعث افزایش ۱۰/۵ درصدی غلظت کادمیم اندام هوایی نهال پسته نسبت به خاک فسفات داخلی شد. (Chater et al., 1993) در پژوهشی نشان دادند کودهای سوپرفسفات تریپل، مونوآمونیم فسفات و دی‌آمونیم فسفات عرضه‌شده در آیووا حاوی غلظت‌های مختلفی از فلزات کم‌مصرف و عناصر سنگین بودند. (et al., 2008) Milinović با بررسی غلظت کادمیم در ۱۶ کود وارداتی بیان کردند که در محلول عصاره‌گیر اسید استیک در pH برابر با ۴/۵ کودهای مجارستان و یونان با مقادیر ۸/۵ و ۱۱/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کودهای روسیه و اتریش با مقادیر ۰/۲ و ۳/۷۶ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم به ترتیب کمترین و بیشترین غلظت کادمیم را در میان کودهای مورد بررسی داشتند. بررسی‌های متعددی نشان داده‌اند که فلزات سنگین موجود در کودهای فسفاتی پس از مصرف می‌توانند در خاک تجمع یافته و به آسانی به فرم‌های قابل‌دسترس گیاهان تبدیل شوند. شواهد غیرمستقیم نیز بیانگر حضور فلزات سنگین در برخی از خاک‌های کشاورزی به دلیل استفاده طولانی مدت از کودهای فسفاتی معدنی است (Ebong et al., 2008; Oyedele et al., 2006). اولین بار (Schroeder and Balassa (1963) نقش کودها را در افزایش غلظت فلزات سنگین از جمله کادمیم و سرب در محصولات غذایی عنوان کردند.

ایجاد یک پایگاه داده از وضعیت خاک‌های منطقه از لحاظ غلظت عناصر سنگین و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و نیز آگاهی از نحوه توزیع مکانی این عناصر در خاک‌های کشاورزی و به دنبال آن توصیه‌های کودی بر اساس مقادیر موجود در زمین‌های کشاورزی گامی مؤثر در پیش‌گیری از آلودگی زمین‌های کشاورزی با هدف مدیریت زراعی بهتر و تولید محصولات کشاورزی سالم‌تر است. با توجه به اینکه تهیه داده‌ها هزینه‌بر و مشکل است، جمع‌آوری داده‌ها برای تهیه نقشه‌های مورد نیاز کشاورزی دقیق مقرون به صرفه نخواهد بود. لذا توسعه تکنیک‌های جدید نظیر درون‌یابی تا حدودی سبب حل این مشکل شده و می‌توان با جمع‌آوری داده‌های کمتر نقشه‌هایی با دقت

دانه بالا بوده و کادمیم قابلیت تحرک بالایی در برنج دارد. تحقیقات نشان داده است که کادمیم پس از جذب، در گیاه متحرک بوده و به راحتی به اندام‌های هوایی می‌رسد. با توجه به اهمیت برنج در جیره غذایی خانوارهای ایرانی و نیز استفاده بیش از حد کودهای فسفره در کشاورزی، که حاوی مقادیر زیادی کادمیم (۷/۱۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) هستند انتظار می‌رود که میزان کادمیم قابل دسترس گیاه افزایش یافته و در نتیجه میزان جذب کادمیم به وسیله گیاه زیاد شود. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی آلودگی خاک‌های شالیزاری استان گیلان به کادمیم و تهیه نقشه پهنه‌بندی کادمیم در این خاک‌ها با استفاده از روش‌های درون‌یابی زمین‌آمار در محیط GIS و در نهایت بررسی وضعیت آلودگی خاک‌های منطقه در جهت مدیریت هرچه بهتر خاک‌ها است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی بخشی از استان گیلان بوده که با استفاده از نقشه منطقه و دستگاه GPS تعداد ۱۰۰ نمونه خاک به‌طور کاملاً تصادفی از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری شالیزارهای مختلف و با اطلاع از زمان کاربرد کودهای مصرفی، در دو مرحله پیش از کشت و کوددهی و پس از برداشت محصول تهیه شد. شکل ۱ نمایی از موقعیت منطقه مورد بررسی را نشان می‌دهد. برای تجزیه خاک، نمونه‌های خاک برداشت‌شده پس از خشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. از هر کدام از خاک‌هایی که به این ترتیب الک شده بودند، یک نمونه تهیه و برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی مورد نظر به آزمایشگاه منتقل شد. برخی تجزیه‌های آزمایشگاهی شامل pH گل اشباع با دستگاه pH متر، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه هدایت سنج، فراوانی نسبی ذرات شن، سیلت و رس بر پایه قانون استوکز و به روش هیدرومتری، ماده آلی به روش والکی-بلک، جرم ویژه ظاهری و حقیقی به ترتیب به روش کلوخه و پارافین و روش پیکنومتری (Klute, 1986) و همچنین مقدار فلز سنگین کادمیم در خاک نیز به روش اکسیداسیون با اسید نیتریک (Sposito *et al.*, 1982; Page *et al.*, 1982) و با استفاده از دستگاه جذب اتمی تعیین شد.

برای تعیین توزیع مکانی فلزات کادمیم و سرب در خاک‌های سطحی اهواز استفاده کرده و از میان آنها توابع پایه شعاعی بهترین روش درون‌یابی انتخاب شد.

در تحقیقی دیگر Rahimpour and Abbaspour

(2014) پهنه‌بندی آلودگی فلزات سنگین خاک با استفاده از روش‌های کریجینگ و توابع پایه شعاعی در شهرستان هریس را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که هر دو روش از دقت خوبی برخوردار بوده لیکن بر اساس ملاک ارزیابی، برای فلزات منیزیم و مس، روش کریجینگ با مدل نمایی، برای فلز روی، روش کریجینگ با مدل کروی و برای فلز آهن، روش RBF با تابع مالتی کوادریک انتخاب شد. در پژوهشی دیگر برای بررسی توزیع مکانی کادمیم در شالیزارهای جنوب غربی اصفهان با استفاده از زمین‌آمار و GIS، تخمین مکانی داده‌ها از طریق روش‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی و کریجینگ بلوکی و با استفاده از GIS انجام شد. نتایج آنالیزهای زمین‌آمار نشان داد که بهترین مدل تغییرنا برای داده‌های غلظت کادمیم کل و قابل جذب، به ترتیب نمایی و کروی بودند (Rahimi and Charkhabi, 2014a).

Taheri *et al.* (2014) برای بررسی تغییرات مکانی غلظت فلزات در رسوبات سطحی جنگل‌های مانگرو، از ۷ روش مختلف زمین‌آمار و وزن‌دهی فاصله‌ای معکوس، کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، کریجینگ جامع، توابع پایه شعاعی، درون‌یابی چندجمله‌ای موضعی و عمومی در محیط GIS استفاده کردند. در نهایت روش کریجینگ ساده به علت داشتن پایین‌ترین مقادیر $RMSE$ و MAE و نزدیکی بسیار زیاد آماره MBE به صفر، بهترین روش برای مدل‌سازی الگوی توزیع و پراکنش فلزات سرب، کادمیم و جیوه به ترتیب با مدل‌های نمایی، دایره‌ای و گوسین انتخاب شد. محققان دیگر نیز به همین ترتیب از روش‌های زمین‌آمار برای تولید نقشه‌های پهنه‌بندی استفاده کردند (Amini *et al.*, 2005). در بررسی (Rahimi and Charkhabi 2014b) غلظت کادمیم در ریشه، ساقه و دانه‌های برنج را در اراضی شالیزاری منطقه لنجان استان اصفهان به ترتیب ۶/۱، ۱/۱ و ۱/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم به دست آوردند که بسیار بالاتر از حد مجاز بود. میزان فاکتور انتقال برای کادمیم در هر سه قسمت ریشه، ساقه و



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد بررسی.

Fig. 1- The local map of the study area.

نرمال فرض کرد. در غیر این صورت، نمی توان گفت که توزیع داده ها نرمال است.

آنالیز مکانی

برای بررسی توزیع مکانی کادمیم از روش های مختلف درون یابی شامل روش وزن دهی فاصله ای معکوس، Spline و کریجینگ (ساده، معمولی و جهانی یا عمومی) استفاده شد که توضیح کلی هر کدام از این روش ها به شرح زیر است.

روش وزن دهی فاصله ای معکوس (IDW)^۹

روش IDW از جمله روش های درون یابی است که در آن برآورد بر اساس مقادیر نقاط نزدیک به نقطه برآورد که بنا بر عکس فاصله وزن دهی می شوند، انجام می گیرد. به عبارت دیگر، به نقاط نزدیک به نقطه برآورد وزن بیشتری داده می شود تا به نقاط دورتر و فاصله نقش عمده را در این روش دارد. در بررسی روش IDW، توان بهینه از طریق محاسبه RMS^{۱۰} مشخص می شود (بهترین توان، کمترین خطا را ایجاد می کند). برای انتخاب کمترین خطا در این روش توان های مختلف (از جمله توان بهینه، ۱، ۲، ۳ و ۴) بررسی شد. رابطه مورد استفاده برای بیان آماری این روش به صورت زیر است (Mohammadi, 2006):

$$Z(x_0) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (1)$$

که در آن $Z(x_0)$ مقدار تخمینی متغیر مورد نظر در نقطه x_0 ، d_i وزن (فاصله) بین نقطه تخمین تا هر کدام از نقاط واقع در همسایگی آن و $Z(x_i)$ مقدار اندازه گیری شده در نقطه i ام است.

آنالیز آماری

نخستین گام برای انجام آنالیزهای آماری بررسی نرمال بودن داده ها است (Mohammadi, 2006). برخی روش های بررسی توزیع نرمال داده ها شامل پارامترهای آماری چولگی و کشیدگی و نیز آزمون های آماری مانند شاپیرو ویلک^۷ و کولموگروف-اسمیرنف^۸ است (Hasani Pak, 1998). برای بررسی نرمال بودن داده ها در این پژوهش هر دو روش فوق استفاده شد. ابتدا چولگی^۵ و کشیدگی^۶ داده ها در نرم افزار SPSS آزمون شد. چولگی برابر با گشتاور سوم نرمال شده است. چولگی در حقیقت معیاری از وجود یا عدم تقارن تابع توزیع است. برای یک توزیع کاملاً متقارن چولگی صفر و برای یک توزیع نامتقارن با کشیدگی به سمت بالاتر چولگی مثبت و برای توزیع نامتقارن با کشیدگی به سمت مقادیر کوچک تر مقدار چولگی منفی است. کشیدگی نیز نشان دهنده قله مندی یک توزیع است. مقدار کشیدگی را با گشتاور چهارم نرمال برآورد کرده اند، به عبارت دیگر کشیدگی معیاری از تیزی منحنی در نقطه ماکزیمم است. کشیدگی مثبت یعنی قله توزیع مورد نظر از توزیع نرمال بالاتر و کشیدگی منفی نشانه پایین تر بودن قله از توزیع نرمال است. در حالت کلی معمولاً چنانچه چولگی و کشیدگی در بازه (۲، -۲) نباشند داده ها از توزیع نرمال بسیار دور بوده و باید پیش از هر نوع آزمونی که برای انجامشان فرض نرمال بودن داده ها نیاز است، اصلاح شوند.

پس از بررسی عادی یا نرمال بودن کشیدگی و یا چولگی توزیع داده ها، آزمون شاپیرو ویلک و کولموگروف-اسمیرنف تست شد. به طور معمول چنانچه سطح معنی داری در این آزمون ها که در جدول با sig. نمایش داده می شود بیشتر از ۰/۰۵ باشد می توان داده ها را با اطمینان بالایی

روش Spline

این روش درون‌یابی بهترین روش برای سطوحی است که تغییرات آنها تدریجی است (مانند ارتفاع، عمق آب). اگر تغییرات زیادی در فاصله افقی کم باشد Spline روش مناسبی برای درون‌یابی نیست چرا که مقادیر تخمین‌زده را بیش از مقدار واقعی نشان می‌دهد (Mahdian et al., 2001).

روش کریجینگ (Kriging)

کریجینگ از روش‌های زمین‌آمار بوده و یکی از تکنیک‌های بسیار مناسب و پیشرفته برای تحلیل فضایی و توزیع منطقی‌های داده‌های مکانی بوده و یک روش برآورد بهینه است که متغیرهای استفاده‌شده در آن تا حدودی تصادفی است و از تابع هندسی مشخصی تبعیت نمی‌کند. کریجینگ یک روش تخمین استوار بر منطق میانگین متحرک وزن دار بوده که بهترین تخمین‌گر خطی ناریب با کمترین پراش تخمین بوده و اختلالات ناشی از تمرکز زیاد نقاط اندازه‌گیری را به‌طور خودکار رفع می‌کند.

از مهم‌ترین ویژگی‌های این روش آن است که به ازای هر تخمینی خطای مرتبط با آن قابل محاسبه است. بنابراین برای هر مقدار تخمین‌زده‌شده می‌توان دامنه اطمینان آن تخمین را محاسبه کرد درحالی‌که در روش‌های کلاسیک چنین نبوده و روش‌های تخمین کلاسیک قادر به در نظر گرفتن ساختار فضایی نیستند. در روش کریجینگ برای هر تخمینی، پراش تخمین که نشانگر گسترش توزیع خطای تخمین حول میانگین است قابل محاسبه است. در این روش مانند روش وزن‌دهی معکوس فاصله‌ای (IDW) که در آن نزدیکی به نقاط نمونه به‌عنوان وزن محسوب می‌شود، پراش فضایی یا واریانس فضایی تابعی از فاصله شناخته می‌شود و مقادیر مجهول با استفاده از مقادیر معلوم و یک نیم تغییرنما برآورد می‌شود. نیم تغییرنما (γ) با استفاده از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است (Mohammadi, 2006).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (Z(x+h) - Z(x))^2 \quad (2)$$

که در آن، $\gamma(h)$ نیم تغییرنما، $n(h)$ تعداد جفت نمونه‌ها که به فاصله h از هم جدا می‌شوند، $Z(x)$ مقدار متغیر در نقطه‌ای با مختصات X و $Z(x+h)$ مقدار متغیر در نقطه‌ای با مختصات $(x+h)$ است. تعداد جفت نقاط تابع h است و معمولاً با افزایش h تعداد جفت نقاط کم می‌شود.

با افزایش h ، تا فاصله معینی بر مقدار نیم تغییرنما افزوده می‌شود لیکن، پس از آن به حدی ثابت رسیده که به آن حد آستانه (Sill) گویند و برابر با واریانس کل نمونه‌هایی است که در محاسبه نیم تغییرنما به کار رفته‌اند. فاصله بین نمونه‌ها که پس از آن با افزایش فاصله مقدار نیم تغییرنما تفاوت معنی‌داری نداشته و به حالت خط افقی نزدیک شده به‌طوری که تغییرات مکانی داده‌ها در محاسبه برآورد نقاط نامعلوم تاثیری نداشته باشد شعاع تاثیر^{۱۱} و مقدار نیم تغییرنما در مبداء مختصات (به ازاء $h=0$) اثر قطعه‌ای^{۱۲} نام دارد. اثر قطعه‌ای یا واریانس بدون ساختار در حقیقت بیانگر جز تصادفی (غیر ساختاردار) متغیر بوده که در شرایط ایده‌آل باید صفر باشد، لیکن در بیشتر مواقع بزرگ‌تر از صفر است. واریانس ساختاردار (واریانس فضایی) هم حاصل تفاضل مقدار آستانه و اثر قطعه‌ای بوده و بیانگر تغییراتی است که علت آن را می‌توان در ویژگی‌های خود متغیر مکانی یافت. روش عمومی محاسبه کریجینگ بر اساس معادله زیر است (Goovaerts, 1997):

$$Z^* = \sum_{i=1}^n W_i Z(x_i) \quad (3)$$

که در آن، Z^* مقدار برآوردشده متغیر Z در نقطه مجهول، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده‌شده متغیر Z در نقطه‌ای با مختصات x_i ، n تعداد مشاهدات و W_i برابر با وزن نسبت‌داده‌شده به متغیر Z در نقطه x_i هستند. کریجینگ معمولی با برازش مدل‌های کروی، دایره‌ای، نمایی و گوسی نیم تغییرنما بر داده‌های حاضر بررسی شد.

تغییرنمای دایره‌ای^{۱۳}:

فرمول ریاضی این مدل به صورت زیر است:

$$y(h) = C_0 + C \left(1 - \frac{2}{\mu} \cos^{-1} \left(\frac{h}{a} \right) + \sqrt{1 - \frac{h^2}{a^2}} \right) \quad 0 < h \leq a \quad (4)$$

$$y(h) = C_0 + C \quad h > a \quad (5)$$

که در آن، C سقف واریوگرام، C_0+C حد آستانه، C_0 اثر قطعه‌ای و a دامنه تاثیر است.

تغییرنمای کروی^{۱۴}:

این مدل از مبداء مختصات شروع شده و در نزدیکی مبداء رفتار خطی دارد با افزایش h منحنی به‌سرعت به سمت مقادیر بیشتر $y(h)$ صعود می‌کند. آنگاه به تدریج از شیب آن کاسته می‌شود و در فاصله معینی که دامنه تاثیر

بالا تری برخوردار است. همچنین دو آماره RMS و ASE^{۱۹} نیز بررسی شد که در انتخاب مدل مناسب RMS کمترین مقدار و ASE (میانگین خطای استاندارد) نزدیک به RMS است.

نتایج و بحث

در این پژوهش برای بررسی میزان آلاینده‌ی کادمیم در خاک‌های شالیزاری و تهیه نقشه‌های مرتبط، از طریق تجزیه اجزاء خاک، مقدار کادمیم کل در خاک مشخص شد. نتایج حاصل از تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داد که متوسط pH خاک‌های مورد آزمایش ۶/۴۸ و شوری عصاره اشباع ۱/۵۹ دسی‌زیمنس بر متر بوده که این مقدار شوری برای کشت گیاه برنج مشکلی ایجاد نمی‌کند. درصد شن نمونه‌های خاک بین ۴ الی ۳۵، سیلت بین ۲۸ الی ۴۹ و رس بین ۳۹ الی ۶۵ درصد بوده که به این ترتیب بافت خاک‌ها در محدوده Clay Loam، Silty Clay و Clay بوده که خاکی نسبتاً سنگین تا سنگین است و برای کشت گیاه برنج مناسب است. مقدار ماده آلی به‌طور متوسط ۱/۷۸ و دامنه تغییرات کادمیم کل خاک نیز پیش از کوددهی و کشت و پس از برداشت محصول به ترتیب با کمینه ۰/۶۵ و ۱/۹۷ و بیشینه ۱/۴۰ و ۱۱/۰۵ بود.

توصیف آماری داده‌ها

توصیف آماری غلظت کادمیم در نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۱ دیده می‌شود. همانطور که مشخص است کشیدگی و چولگی مربوط به داده‌های پیش از کشت در بازه قابل قبول است و مقدار میانه و میانگین داده‌ها نیز تقریباً نزدیک به هم است. کشیدگی داده‌های اولیه پس از برداشت محصول تا حدی زیاد بوده و فاصله میانگین تا میانه هم بیشتر از حالت پیش از کشت است. با توجه به جدول ۲ و مقادیر سطح معنی‌داری برای متغیر کادمیم می‌توان گفت که توزیع متغیر پیش از کشت نزدیک نرمال بوده لیکن توزیع متغیر پس از برداشت محصول کمی از حالت نرمال دور بوده که سطح معنی‌داری کولموگروف-اسمیرنوف نیز نتیجه حاصله را تایید می‌کند. به‌منظور نرمال کردن داده‌ها با استفاده از توابع موجود (باکس-کاکس، لگاریتمی، آرک‌سینوس) در نرم‌افزار Arc Map داده‌ها به توزیع نرمال تبدیل شدند. با توجه به مقدار کشیدگی و چولگی مربوط به توابع فوق، در این پژوهش تابع لگاریتمی برای نرمال کردن داده‌ها استفاده شد.

نامیده می‌شود، به سقف خود رسیده و در همین مقدار باقی می‌ماند. فرمول ریاضی این مدل به صورت زیر است:

$$y(h) = CO + C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) \quad 0 < h \leq a \quad (6)$$

$$y(h) = c_0 + c \quad h > a \quad (7)$$

تغییرنمای نمایی^{۱۵}:

این مدل نیز مانند مدل کروی از مبدا مختصات شروع شده و در نزدیکی مبدا رفتار خطی دارد لیکن آهنگ صعود آن آرام‌تر از مدل کروی است و در عمل هیچ‌گاه به حد آستانه‌ای یا سقف معینی نمی‌رسد. به این دلیل دامنه تاثیر آن نامعلوم است. علت پیدایش داده‌هایی با چنین مدلی می‌تواند وجود روند در محدوده مورد بررسی و یا بزرگی قابل‌ملاحظه دامنه تاثیر نسبت به ابعاد محدوده تحت پوشش نمونه‌برداری باشد. فرمول ریاضی این مدل به صورت زیر است:

$$y(h) = c_0 + c \left(1 - \exp\left[-\frac{h}{r}\right] \right) \quad h > a \quad (8)$$

تغییرنمای گوسی^{۱۶}:

این مدل از مبدا مختصات گذشته ولی در نزدیکی مبدا به جای رفتار خطی، برخلاف مدل‌های کروی و نمایی رفتار سهمی‌گون دارد. این مدل معرف درجه پیوستگی بالای متغیر ناحیه‌ای است. معادله این مدل به صورت زیر است:

$$y(h) = c_0 + c \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{r^2}\right) \right] \quad h > 0 \quad (9)$$

دقت بالای تخمین نیز از طریق محاسبه میانگین خطای استاندارد تخمین (MS^{۱۷}) و میانگین مجذور خطای کاهش‌یافته (RMSS^{۱۸}) (روابط ۱۰ و ۱۱) محاسبه شد (Kasraeian et al., 2014).

$$MS = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i)) / \hat{\delta}(s_i)}{n} \quad (10)$$

$$RMSS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i))^2}{n}} \quad (11)$$

که در آن $\hat{Z}(s_i)$ مقدار پیش‌بینی از ارزیابی متقابل، $z(s_i)$ مقدار مشاهده‌شده و $\hat{\delta}(s_i)$ مقدار خطای استاندارد کریجینگ برای موقعیت s_i است. هرچه مقدار MS به صفر و مقدار RMSS به یک نزدیک‌تر شود تخمین از دقت

جدول ۱- آمار توصیفی مربوط به مقدار کادمیم پیش از کشت (a) و پس از برداشت محصول (b) در منطقه مورد بررسی.

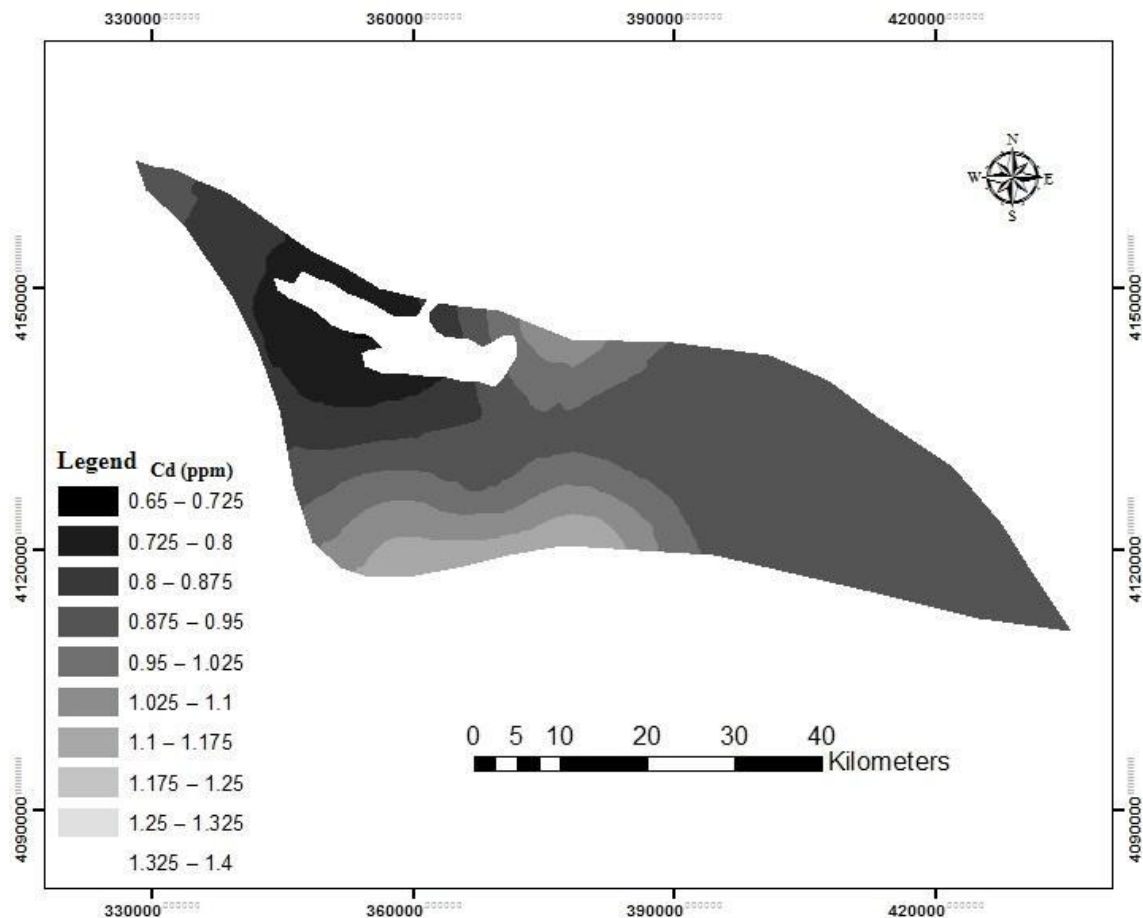
Table 1. Descriptive statistics of cadmium concentration before cropping (a) and after harvest (b) in the study area.

تیمار Treatment	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	میانه Median	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis
پیش از کشت Before cropping	0.65	1.40	0.96	0.94	0.81	0.73
پس از برداشت محصول After harvest	1.97	11.05	7.01	7.80	-0.40	-1.46

جدول ۲- بررسی توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک و کولموگروف-اسمیرنوف.

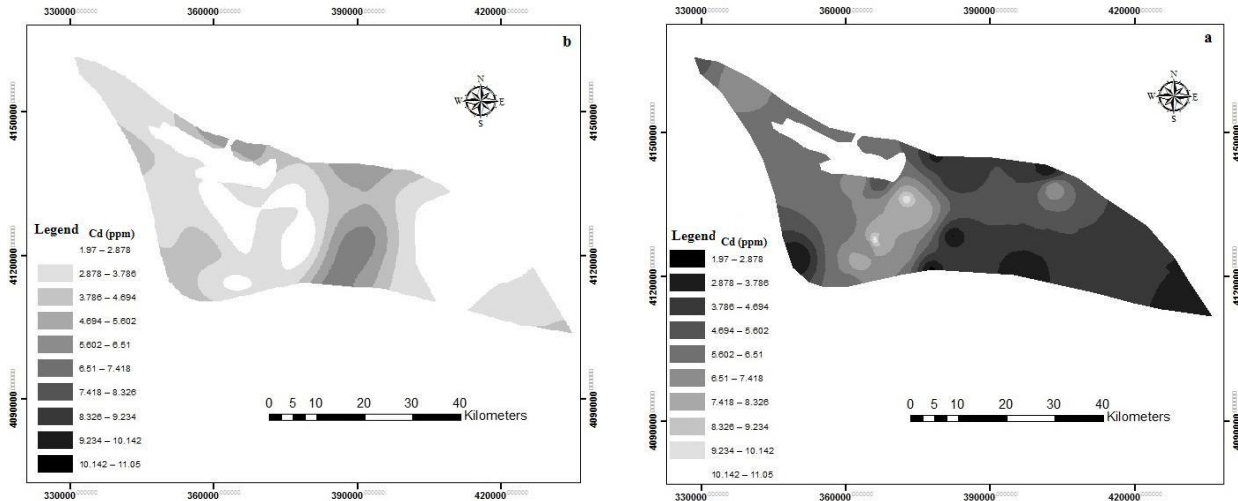
Table 1. Data analysis using the Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov test.

تیمار Treatment	کولموگروف-اسمیرنوف Kolmogorov-Smirnov			شاپیرو-ویلک Shapiro-Wilk		
	K-Sp	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
پیش از کشت Before cropping	0.12	50	0.2	0.94	50	0.07
پس از برداشت After harvest	0.18	50	0.03	0.96	50	0.41



شکل ۲- پراکنش کادمیم کل در منطقه پیش از کشت با استفاده از روش کریجینگ معمولی.

Fig. 2- The obtained cadmium distribution in the study area before cropping by using ordinary Kriging method.



شکل ۳- پراکنش کادمیم کل در منطقه پس از برداشت محصول با استفاده از روش IDW با توان بهینه (a) و Spline (b).
 Fig. 3- The obtained total cadmium distribution in the region after harvest by using IDW method with optimized power (a) and Spline method (b).

روش Spline برای بررسی توزیع مکانی فلزات سنگین در خاک کارایی چندانی نداشته و خیلی استفاده نمی‌شود.

روش‌های کریجینگ به‌منظور تخمین توزیع مکانی فلزات سنگین در خاک از پتانسیل بالایی برخوردار هستند و به‌عنوان روشی مناسب برای درون‌یابی و تهیه نقشه‌های پراکنش آلاینده‌ها پیشنهاد شده‌اند (Morton-Bermea *et al.*, 2001; Juang *et al.*, 2010). پس از ارزیابی روش‌های مختلف کریجینگ (ساده^{۲۰}، معمولی^{۲۱} و جهانی^{۲۲} یا عمومی)، مدل کریجینگ معمولی با کمترین مقدار خطا مناسب‌ترین روش برای درون‌یابی انتخاب شد (جدول ۴). از میان مدل‌های مختلف (گوسی^{۲۳}، نمایی^{۲۴}، کروی^{۲۵} و دایره‌ای^{۲۶}) برازش داده شده به نیم‌تغییرنمای کادمیم مدل کروی به‌عنوان مناسب‌ترین مدل در نظر گرفته شد که با نتایج (Dayani *et al.*, 2009) در مطالعات زمین‌آماري غلظت سرب، روی و کادمیم در جنوب اصفهان که مدل کروی را به‌عنوان بهترین مدل برازش داده شده به نیم‌تغییرنمای این عناصر معرفی کردند همخوانی دارد. همچنین در بررسی مشابه (Amini *et al.*, 2005) نیز مدل کروی را بر پراکنش آلودگی سرب و کادمیم برازش دادند. نتایج پیش‌بینی توزیع مکانی کادمیم به روش کریجینگ در شکل ۴ نشان داده شده است.

بررسی روش‌های درون‌یابی و انتخاب بهترین روش برای توزیع مکانی کادمیم

پهنه‌بندی توزیع مکانی کادمیم پیش از زمان کوددهی و کشت محصول به روش کریجینگ معمولی با کمترین مقدار خطا به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای درون‌یابی در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای بررسی روش‌های درون‌یابی و انتخاب بهترین روش برای توزیع مکانی کادمیم پس از برداشت محصول در روش IDW، توان بهینه از طریق محاسبه RMS مشخص شد. همانطور که مشاهده می‌شود بهترین توان، کمترین خطا را ایجاد می‌کند (جدول ۳).

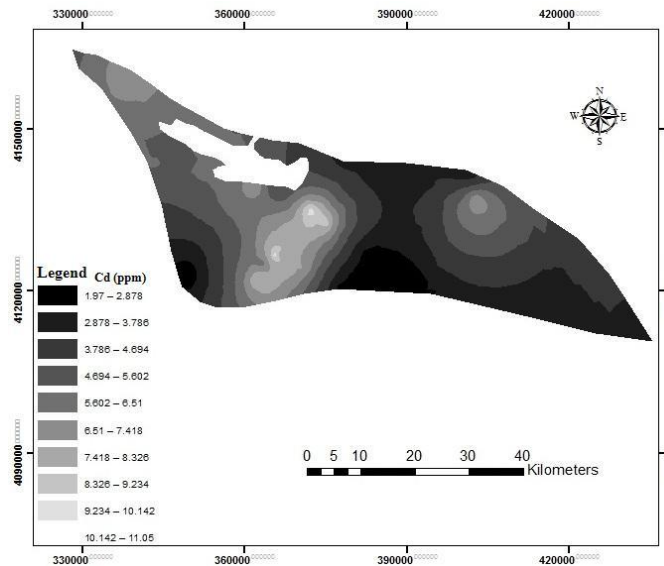
جدول ۳- RMS ایجادشده با توان‌های مختلف در روش IDW.
 Table 2. The Obtained RMS with various powers in IDW method.

توان Power				
4	3	2	1	بهینه Optimal
3.07	3.09	3.05	2.95	2.85

نقشه پراکنش کادمیم کل در منطقه مورد بررسی پس از برداشت محصول با استفاده از روش IDW با توان بهینه و روش Spline به ترتیب در شکل ۳ (a, b) نشان داده شده است. بر اساس تحقیقات انجام‌شده

جدول ۴- مقایسه تخمین‌های حاصل از روش‌های مختلف کریجینگ و دقت آنها برای مقدار کادمیم.
Table 4. Comparison of estimates and accuracy of different Kriging methods for cadmium concentration.

MS	ASE	RMS	RMS	روش درونیابی Interpolation method
0.28	2.48	1.06	2.76	کریجینگ ساده Simple Kriging
0.09	2.47	1.23	2.69	کریجینگ معمولی Ordinary Kriging
0.10	2.44	1.27	2.70	کریجینگ جهانی (عمومی) Universal Kriging



شکل ۴- پراکنش کادمیم کل در منطقه پس از برداشت محصول با استفاده از روش کریجینگ معمولی.
Fig. 4- The obtained cadmium distribution in the study area after harvest by using ordinary Kriging method.

ارزیابی زیست محیطی آلودگی فلز سنگین کادمیم در خاک‌های منطقه مورد بررسی

به‌منظور تعیین میزان آلودگی خاک به فلزات سنگین، باید غلظت عناصر مورد نظر در منطقه با استانداردهای ملی یا بین‌المللی معتبر مقایسه شود. در کشور ما، به دلیل عدم وجود استانداردی خاص برای درجه آلودگی خاک، از استانداردهای موجود در دیگر کشورها یا استانداردهای جهانی استفاده می‌شود (Garavand et al., 2013). Pirzadeh et al. (2012) با اندازه‌گیری غلظت کادمیم در خاک‌های شالیزاری استان فارس و اصفهان و بخش خوراکی برنج مشاهده کردند که در استان فارس و اصفهان به ترتیب ۴ و ۱۲ درصد از دانه‌های برنج دارای غلظت بیشتر از حد مجاز کادمیم بودند که علت این امر را می‌توان به مصرف بالای لجن فاضلاب و کمپوست و همچنین مصرف بیش از حد کودهای فسفره مربوط دانست (Amini et al., 2005). ورود سالیانه کادمیم به زمین‌های کشاورزی در استان اصفهان را در اثر استفاده از کودهای حیوانی ۱/۲ تا ۳/۵ گرم در هکتار در سال، از طریق کودهای فسفات ۱/۴ تا ۱۵ گرم در هکتار در سال و از طریق لجن فاضلاب ۰/۱۲ تا ۱/۳۵ گرم در هکتار در سال

در بررسی گسترش آلودگی خاک به فلزات سنگین و مقایسه روش کریجینگ معمولی با کریجینگ رگرسیون بیان داشتند که روش کریجینگ رگرسیون از صحت بالاتری نسبت به روش کریجینگ معمولی برخوردار نیست. Shi et al. (2007) نیز تغییرات مکانی برخی فلزات سنگین را توسط علم زمین‌آمار و GIS بررسی و روش کریجینگ معمولی را برای تهیه نقشه‌های توزیع مکانی استفاده کردند که با روش انتخاب شده در تحقیق حاضر همخوانی دارد. Khodakarami et al. (2012) در پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین کروم، کبالت و نیکل در خاک‌های سه زیرحوضه استان همدان از روش کریجینگ معمولی استفاده کردند. همچنین، در پژوهشی که توسط Dayani et al. (2009) به‌منظور بررسی اثر آلودگی‌های نقطه‌ای حاصل از فعالیت‌های معدن انجام شد روش کریجینگ معمولی به‌عنوان بهترین روش برای پیش‌بینی گسترش آلاینده معرفی شد. در پژوهشی دیگر برای پهنه‌بندی آلودگی کادمیم در بخشی از زمین‌های کشاورزی غرب شیراز از میان روش‌های مختلف زمین‌آمار روش کریجینگ معمولی به‌عنوان مناسب‌ترین روش شناخته شد (Kasraeian et al., 2014).

پیش از کشت ۰/۹۶ میلی گرم در کیلوگرم خاک بوده که طبق شاخص کلی آلوده نبوده لیکن مقدار میانگین کادمیم پس از برداشت محصول ۷/۰۱ میلی گرم در کیلوگرم خاک بوده که بر اساس مقادیر این جدول بیشتر از حد بیشینه مجاز است. همانطور که در نقشه پیش‌بینی کریجینگ هم مشاهده می‌شود بخش‌هایی از منطقه آلوده به کادمیم است (شکل ۳) و این گسترش و پهنه آلودگی از روند خاصی پیروی نکرده که نشان‌دهنده غیرنقطه‌ای بودن منبع آلاینده است.

به‌دست آوردند. فراتر رفتن غلظت فلزات سنگین در خاک‌های استان مازندران (شمال ایران) از حد مجاز و نیز در برج رقم طارم که با آب آلوده آبیاری شده بود توسط Shokrzadeh *et al.* (2013) گزارش شده است. جدول ۵ شاخص کلی (Kelly, 1980)، مقادیر زمینه، حد بیشینه مجاز و حد آستانه خاک را برای برخی عناصر نشان می‌دهد (Beyer, 1990; Kabata-Pendias and Pendias, 2001; Atanassov, 2007) بر اساس نتایج به‌دست آمده مقدار میانگین کادمیم در خاک‌های منطقه

جدول ۵- شاخص آلودگی خاک از (Kelly, 1980) و مقادیر زمینه، حد بیشینه مجاز و حد آستانه از (Beyer, 1990; Kabata-Pendias and Pendias, 2001; Atanassov, 2007) اعداد داخل پرانتز در ستون‌های مقادیر زمینه، حد بیشینه مجاز و حد آستانه از (Atanassov, 2007).

Table 5. The soil contamination index from (Kelly, 1980) and the background, maximum allowable and threshold values (Beyer, 1990; Kabata-Pendias and Pendias, 2001; Atanassov, 2007), values in bracket (Atanassov, 2007).

حد آستانه threshold value	حد بیشینه مجاز maximum allowable value	مقادیر زمینه background value	شاخص آلودگی Kelly (1980) contamination index Kelly (1980)				نوع فلز Metal	
			خیلی خطرناک Very hazardous	بسیار آلوده Very contaminant	آلوده contaminant	اندکی آلوده Slightly contaminant		غیر آلوده Uncontaminant
100000	70000	40000	NR	NR	NR	NR	Fe	
450	150	70	2500<	500-2500	200-500	100-200	0-100	V
800 (550)	250 (250)	100 (65)	2500<	500-2500	200-500	100-200	0-100	Cr
500 (300)	100 (80)	50 (46)	1000<	200-1000	50-200	20-50	0-20	Ni
300	50	20 (20)	NR	NR	NR	NR	NR	Co
500 (500)	100 (170)	50 (34)	2500<	500-2500	200-500	100-200	0-100	Cu
600 (500)	150 (130)	50 (26)	5000<	1000-5000	500-1000	200-500	0-200	Pb
50 (90)	30 (30)	20 (10)	500<	100-500	50-100	30-50	0-30	As
200	40	10	NR	NR	NR	NR	NR	Mo
20 (12)	5 (2.5)	1 (0.4)	50<	10-50	3-10	1-3	0-1	Cd

NR: ثبت نشده است.
همه مقادیر به ppm است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی پراکنش فلز سنگین کادمیم در بخشی از زمین‌های شالیزاری استان گیلان انجام شد. برای تهیه نقشه تغییرات مکانی کادمیم در خاک‌های منطقه مورد نظر از میان روش‌های زمین‌آماری بررسی شده روش کریجینگ معمولی با مدل کروی به‌عنوان بهترین روش انتخاب شد. نقشه حاصل می‌تواند برای بررسی و مدیریت استفاده صحیح کودهای شیمیایی به‌منظور حاصلخیزی زمین‌های شالیزاری استفاده شود. همچنین بر اساس نتایج به‌دست‌آمده بخشی از منطقه مورد بررسی پس از برداشت محصول بر اساس شاخص کلی (۱۹۸۰) آلوده بوده که می‌تواند بیانگر تأثیر استفاده از کودهای شیمیایی و مدیریت غیراصولی اراضی باشد و بنابراین توجه ویژه‌ای می‌طلبد و باید استفاده از این کودها با احتیاط بیشتری انجام شود.

پی‌نوشت‌ها

- Geographic Information System
- Root Mean Square Error

تحرک فلزات سنگین از جمله کادمیم تا حد زیادی تحت تأثیر شیوه‌های کشت و مدیریت اراضی است. با توجه به شرایط زمین‌های شالیزاری که غرقابی بوده، میزان آب‌شویی افزایش یافته و کادمیم به‌راحتی حل شده و کادمیم محلول و تبادل‌پذیر از طریق زهکشی منتقل می‌شوند و بنابراین مقدار کادمیم قابل جذب در خاک‌های شالیزاری با توجه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه و به‌خاطر تلفات کادمیم محلول، از طریق فرآیندهای زهکشی متفاوت است (Wong *et al.*, 2002). مدیریت غیراصولی و استفاده بیش از حد کودهای شیمیایی به ویژه کودهای فسفاته که حاوی مقادیر زیادی کادمیم هستند در درازمدت یکی از دلایل مهم تفاوت مقدار کادمیم در خاک‌های منطقه مورد بررسی است. در پژوهشی که توسط Giorgio *et al.* (1999) انجام شده است نیز احتمال تأثیر نهاده‌های کشاورزی به‌ویژه کودهای شیمیایی در آلودگی خاک‌ها ثابت شد. همچنین (Khodakarami *et al.*, 2012) به‌منظور پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین در بخشی از استان همدان نقش کاربری اراضی کشاورزی و نیز فعالیت‌های کشاورزی را در آلوده کردن خاک‌ها در کنار تأثیر مواد مادری مهم دانستند.

- ¹⁵ Exponential Variogram
¹⁶ Gaussian Variogram
¹⁷ Mean Standardized
¹⁸ Root Mean Square Standardized
¹⁹ Average Standard Error
²⁰ Simple
²¹ Ordinary
²² Universal
²³ Gaussian
²⁴ Exponential
²⁵ Spherical
²⁶ Circular
- ³ Mean Absolute Error
⁴ Mean Bias Error
⁵ Skewness
⁶ Kurtosis
⁷ Shapiro-Wilk
⁸ Kolmogotov-Smirnov
⁹ Inverse Distance Weighted
¹⁰ Root Mean Square
¹¹ Range of Influence
¹² Nugget Effect
¹³ Circular Variogram
¹⁴ Spherical Variogram

منابع

- Alipour, N., Homaei, M., Asadi Kapourchal, S. and Mazhari, M., 2015. Assessing *chenopodium album* L. to tolerate and phytoextract lead from heavy metal contaminated soils. Environmental Sciences. 13, 105-112. (In Persian with English abstract).
- Amini, M., Afyuni, M., Khademi, H., Abbaspour, K.C. and Schulin, R., 2005. Mapping risk of cadmium and lead contamination to human health in soils of central Iran. Science of the Total Environment. 347, 64-77.
- Asadi Kapourchal, S., Pazira, E. and Homaei, M., 2009. Assessing radish (*raphanus sativus* L.) potential for phytoremediation of lead- contaminated soils resulting from air pollution. Soil Plant and Environment Journal. 55, 202-206.
- Asadi Kapourchal, S., eisazadeh, S. and Homaei, M., 2011. Phytoremediation of cadmium polluted soils resulting from use of phosphorus fertilizers. In Proceeding of European Biotechnology Thematic Network Association congress. 28th September, Istanbul, Turkey. p.S37.
- Atanassov, I., 2007. New Bulgarian soil pollution standards. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 14, 68-75.
- Beyer, W.N., 1990. Evaluating soil contamination. Fish and Wildlife Service. U.S. Department of the Interior. Biological Report 90(2).
- Campbell, J.B., 1978. Spatial Variation of sand content and pH within single contiguous delineation of two soil mapping units. Soil Science Society of America Journal. 42, 460-464.
- Charter, R.A., Tabatabai, M.A. and Schafe, J.W. 1993. Metal contents of fertilizers marketed in Iowa. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 24, 961-972.
- Christensen, T.H. and Haug, P.M., 1999. Solid phase cadmium and the reaction of aqueous cadmium with soil surfaces. In: McLaughlin, M.J. and Singh, B.R. (Eds.), Cadmium in Soils and Plants. Kluwer Academic Publishers, London, pp. 65-96.
- Dalalian, M. and Homaei, M., 2011. Simulating of phytoremediation time of cadmium and copper spiked soils by *Salvia sclarea*. Water and Soil Science Journal. 20, 129-141. (In Persian with English abstract).
- Davari, M. and Homaei, M., 2010. Modeling phytoremediation of Ni and Cd from contaminated soils using macroscopic transpiration reduction functions. Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. Water and Soil science Journal. 14, 75-84. (In Persian with English abstract).
- Davari, M. and Homaei, M., 2012. A new yield multiplicative model for simultaneous phytoextraction of Ni and Cd from contaminated soils. Water and Soil Journal. 25, 1333-1343. (In Persian with English abstract).
- Dayani, M., Mohammadi, J. and Naderi, M., 2009. Geostatistical analysis of Pb, Zn and Cd concentration in soil of Sepahanshahr suburb (south of Esfahan). Journal of Water and Soil. 23, 67-76. (In Persian with English abstract).
- Ebong, G.A., Akpan, M.M. and Mkpene, V.N., 2008. Heavy metal contents of municipal and rural dumpsite soils and rate of accumulation by *Carica papaya* and *Talinum triangulare* in Uyo, Nigeria. Journal of Chemistry. 5, 281-290.
- Garavand, M., Ghasemi, H. and Hafezi Moghddas, N., 2013. Geochemical and environmental assessment of the heavy metals in the soils derived from the Gorgan schists. Scientific Quarterly Journal, Geosciences. 22, 35-47. (In Persian with English abstract).
- Giorgio, S., Senesi, G., Baldassarre, A., Snesi, A. and Radina, B., 1999. Trace element inputs into soils by anthropogenic activities and implications for human

- health. *Chemosphere*. 39, 343-377.
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Goovaerts, P., 2000. Estimation or simulation of soil properties, An optimization problem with conflicting criteria. *Geoderma*. 97, 165-186.
- Hajrasuliha, S., Baniabbassi, N., Metthey, J. and Nielsen, D.R., 1980. Spatial variability of soil sampling for salinity studies in southwest Iran. *Irrigation Science*. 1, 197-208.
- Hani, A., Sinaei, N. and Gholami, A., 2014. Spatial Variability of heavy metals in the soils of Ahwaz using geostatistical methods. *Environmental Science and Development*. 5, 294-298.
- Hasani Pak, A.A., 1998. *Spatial Statistical (Geostatistic)*. University of Tehran publishing, Tehran, Iran.
- Jafarnejadi, A.R., Homaei, M. and Sayyad, Gh.A. 2011. Large scale spatial variability of accumulated cadmium in the wheat farm grains. *Soil and Sediment Contamination Journal*. 20, 93-99.
- Jazaeri, M.S., Akhgar, A.R. and Sarcheshmehpour, M., 2015. Comparison of the native phosphate rock and imported triple superphosphate treated with sulfur and thiobacillus in transferring lead and cadmium into pistachio seedling. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*. 5, 25-44. (In Persian with English abstract).
- Juang, K.W., Lee, D.Y. and Ellsworth, T.R., 2001. Using rank-order geostatistics for special interpolation of highly skewed data in heavy metal contaminated site. *Journal of Environmental Quality*. 30, 894-903.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H., 2001. *Trace elements in soils and plants*, third ed. CRC Press, Boca Raton, London, New York.
- Kasraeian, A., Karimian, N. and Ghafouri, V., 2014. Evaluation of spatial distribution of soil cadmium and cadmium hot points in a part of an arable lands in west of Shiraz in Fars province by kriging method. *Journal of Water and Wastewater (Ab va Fazilab)*. 25, 44-50. (In Persian with English abstract).
- Kelly Indices (former Creater London Council), 1980. *Site investigation and materials problems*, In Proceedings Conference on Reclamation of Contaminated Land, 22th-25th October, Eastbourne, England, (Society of the Chemical Industry).
- Khodaverdiloo, H. and Homaei, M., 2008. Modeling phytoremediation of soils polluted with cadmium and lead. *Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science Journal*. 11, 417-426. (In Persian with English abstract).
- Khodakarami, L., Soffianian, A., Mirghafari, N., Afyuni, M. and Golshahi, A., 2012. Concentration zoning of chromium, cobalt and nickel in the soils of three sub-basin of the Hamadan province using GIS technology and the geostatistics. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*. 15, 243-254.
- Klute, A., 1986. *Methods of Soil Analysis, part I, physical and Mineralogical Methods*, Second edition, Soil Science Society of America INC, Wisconsin, USA.
- Lado, L.R., Hengl, T. and Reuter, H.I., 2008. Heavy metal in European soils: A geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. *Geoderma*. 148, 189-199.
- Mahdian, M.H., Matin, M., Ghiasi, N.gh., Akhbari, T. and Mokhtari Hesari, A., 2001. Investigation of spatial interpolation methods to determine the minimum error of estimation: Case study, temperature and evaporation. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 2, 63-78. (In Persian with English abstract).
- Malakouti, M.J. and Homaei, M., 2004. Soil fertility in arid and semi arid regions (problems and solutions). Tarbiat Modares University Publishing, Tehran, Iran.
- Matkan, A.A., Kazemi, A., Gilly, M.R. and Ashourloo, D., 2009. Using RS and GIS for considering cadmium distribution and polluted vegetation in Esfahan province. *Environmental Sciences*. 6, 65-76. (In Persian with English abstract).
- McGrath, D., Zhang, C. and Carton, O.T., 2004. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland. *Environmental Pollution*. 127, 239-248.
- Milinović, J., Lukić, V., Nikolić-Mandić, S. and Stojanović, D., 2008. Concentrations of heavy metals in NPK fertilizers imported in serbia. *Pestic Fitomed. (Beograd)*. 23, 195-200.
- Mohammadi, J., 2006. *Pedometrics (Spatial statistical)*. Pelk Publishing, Tehran, Iran.
- Mohamadipour, F. and Asadi Kapourchal, S., 2012. Assessing land cress potential for phytoextraction of cadmium from Cd contaminated soils. *Water and Soil Resources Conservation*. 2, 25-35. (In Persian with English abstract).

- Morton-Bermea, O., Hernandez-Alvarez, E., Guzman-Morales, R.L.J. and Martinez, G., 2010. Spatial distribution of heavy metals in top soils around the industrial facilities of cromatos de Mexico, Tultitlan Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 85, 520-524.
- Oyedele, D.J., Asonugho, C. and Awotoye, O.O., 2006. Heavy metals in soil and accumulation by edible vegetable after phosphate fertilizer application. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*. 5, 35-42.
- Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R., 1982. *Methods of soil analysis part 2 chemical and microbiological properties*, second ed. Agronomy Monograph No.9. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Pirzadeh, M., Afyuni, M. and Khoshgoftarmansh, A.H., 2012. Status of zinc and cadmium in paddy soils and rice in Isfahan, Fars and Khuzestan provinces and their effect on food security. *Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*. 16, 81-93. (In Persian with English abstract).
- Rahimi, Gh. and Charkhabi, A., 2014a. Spatial distribution of cadmium in paddy soils southwest of Isfahan using geostatistics and GIS. *Journal of Water and Soil*. 28, 754-765. (In Persian with English abstract).
- Rahimi, Gh. and Charkhabi, A., 2014b. Assessment of some heavy metals in paddy soils and their accumulation in the organs of rice in the Lenjan area of Isfahan province. *Water and Soil Science*. 24, 107-120. (In Persian with English abstract).
- Rahimpour, F. and Abbaspour, R.A., 2014. Mapping concentrations of heavy metals in soils using Kriging and RBF Case study: Harris township. *Scientific - Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*. 23, 55-67. (In Persian with English abstract).
- Salt, D.E., Blaylock, M., Kumar, N.P.B.A., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Chet, I. and Raskin, I., 1995. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*. 13, 468-474.
- Sarmadian, F., Keshavarzi, A., Rooien, A., Iqbal, M., Zahedi, G. and Javadikia, H., 2014. Digital mapping of soil phosphorus using multivariate geostatistics and topographic information. *Australian Journal of Crop Science*. 8, 1216-1223.
- Schroeder, H.A. and Balassa, J.J., 1963. Cadmium: Uptake by vegetables from superphosphate in soil. *Science*. 140, 819-820.
- Shokrzadeh, M., Rokni, M.A. and Gastvan. 2013. Lead, cadmium, and chromium concentrations in irrigation supply of/and Tarom rice in central cities of mazandaran province-Iran. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*. 23, 234-242. (In Persian with English abstract).
- Sheppard, S.C., Grant, C.A., Sheppard, M.I., De Jong, R. and Long, J., 2009. Risk indicator for agricultural inputs of trace elements to Canadian soils. *Journal of Environmental Quality*. 38, 919-932.
- Shi, J., Wang, H., Xu, J., Wu, J., Liu, X., Zhu, H. and Yu, Ch., 2007. Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China. *Environmental Geology*. 52, 1-10.
- Sposito, G., Lund, J. and Chang, A.C., 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Science Society of America Journal*. 46, 260-264.
- Taghipour, M., Ayoubi, Sh. and Khademi, H., 2010. Spatial variability of total Ni and Cu concentration in surface soils surrounding the Hamadan city using geostatistic technique. *Journal of Water and Soil Conservation*. 17, 69-87. (In Persian with English abstract).
- Taheri, M., Riahi Bakhtiari, A.R., Naimi, B. and Gholamalifard, M., 2014. The concentration and spatial distribution of mercury, lead, and cadmium in surface sediments of mangrove forests using geostatistics in GIS environment. *Journal of Environmental Studies*. 40, 297-310. (In Persian with English abstract).
- Thomas, E.Y., Omueti, J.A.I. and Ogundayomi, O., 2012. The effect of phosphate fertilizer on heavy metal in soils and amaranthus caudatus. *Agriculture and Biology Journal of North America*. 3, 145-149.
- Wong, S.C., Li, X.D., Zhang, S.H.Q. and Min, Y.S., 2002. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China. *Environmental Pollution*. 119, 33-44.
- Yunfeng, X., Tong-bin, C., Mei, L., Jun, Y., Qingjun, G., Bo, S. and Xiao-yong, Z., 2011. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. *Chemosphere*. 82, 468-476.



Assessing paddy soils contaminated by cadmium in Guilan province using geostatistical methods and GIS

Safoora Asadi Kapourchal^{1*}, Mehdi Homae² and Hassan Ramezani¹

¹ Department. of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Iran

² Department Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Iran

Received: February 28, 2016

Accepted: November 11, 2016

Citation: Asadi Kapourchal, S., Homae, M, and Ramezani, H., 2016. Assessing paddy soils contaminated by cadmium in Guilan province using geostatistical methods and GIS. *Environmental Sciences*. 14(3), 131-146.

Introduction: Accumulation of heavy metals in soil has resulted in several environmental problems in different parts of the world. High concentrations of these elements in soils may lead to high absorption by plants and this is the main route into the human food chain and animal and biological cycles. Consequently, investigations are necessary to find out how accumulation of these elements can be prevented that creates soil and ecosystem contamination. Among heavy metals, cadmium is one of the most dangerous due to its high mobility in biological systems and ability to accumulate in plant tissues without causing any visible symptoms. Considering the high mobility of Cd in acid soils and the optimal growth of rice in such soils, and according to the role of rice in public health, this study was conducted to assess of the contamination of paddy soils with Cd in Guilan Province.

Materials and methods: For this purpose, 100 soil samples were randomly taken from 0-20 cm depths using GPS devices from different paddy farms. The soil samples were then passed through a 2-mm sieve after drying. The total cadmium concentration and some soil characteristics such as EC, pH, bulk density, particle density and soil organic matter were then measured. The spatial distribution of cadmium was investigated using different geo-statistical methods including IDW, Spline, and Kriging with a GIS software.

Results and discussion: The results of the soil physical and chemical analyses showed that the average pH of the soils and saturated electrical conductivity were 6.48 and 1.59 ds/m, respectively, indicating no salinity hazard for rice production. The sand, silt and clay contents of soil samples were between 4 to 35, 28 to 49 and 39 to 65, respectively, so the soil textures were in the range of clay loam, silty clay and clay. These soil textures were moderately heavy to heavy and so are suitable for rice cultivation. The average amount of organic matter was 1.78 and the total Cd concentration before cropping varied between 0.65 to 1.40 and, after harvest, was 1.97 to 11.05. From the geo-statistical methods studied, the ordinary Kriging with spherical model was selected as the best method.

Conclusion: According to the results obtained, part of the study area becomes contaminated after harvesting, based on the Kelly index which can show the effect of chemical fertilizers use and incorrect land management, and so the use of these fertilizers should be carried out with care.

Keywords: Cadmium, Geostatistic, GIS, Kriging, Paddy soils, Spatial variability.

* Corresponding Author. *E-mail Address:* safooraasadi@guilan.ac.ir

