



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

صفحه‌های ۲۴۱-۲۲۹

ارزیابی اثرهای آبیاری بلندمدت با پساب شهری بر توزیع مکانی پارامترهای شوری و سدیمی

فاطمه ساسانی^۱، هوشنگ قمرنیا^{۲*}، بهمن یارقلی^۳

۱. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲. استاد گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳. استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۹/۱۶

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۶/۱۰

چکیده

در این مطالعه، اثرهای استفاده بلندمدت از پساب شهری (دوره بیش از ۴۰ سال) روی محتوای نمک خاک و پارامترهای مرتبط با آن در اراضی جنوب تهران ارزیابی شده است. برای این تحلیل، روش‌های مختلف کریجینگ آزموده شد که مطابق با شاخص‌های مدل برتر، در نهایت برای پارامترهای pH، Clay، Na⁺، Mg²⁺ و SAR مدل کریجینگ معمولی (OK)، برای پارامترهای EC و Cl⁻ مدل کریجینگ لوگ نرمال (Log-normal K) و برای پارامتر Ca²⁺ مدل کریجینگ انفصالی (DK) انتخاب گردید. در این مطالعه، متغیرهای Na⁺، Cl⁻ و SAR با بیشترین نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه، بیش از سایر پارامترها تأثیرپذیری از عوامل برون‌ی (آبیاری بلندمدت با پساب شهری) را نشان دادند. همچنین با وجود استفاده از پساب‌های شهری، EC خاک‌ها کمتر (تا نصف) از حد بحرانی بود که می‌توان آن را به حجم زیاد و دسترسی دائمی به این آب‌ها نسبت داد که جزء آب‌شویی را به‌خوبی پوشش داده است؛ لیکن پارامترهای Na⁺ و SAR حدود بیش از حد بحرانی داشتند که نیازمند اقدام مدیریتی نظیر استفاده از گچ است. بافت سنگین منطقه، عاملی تقویت‌کننده در سدیمی شدن اراضی است که به علت درصد رس بیشتر از ۲۵ درصد برای کل اراضی، پدیده سدیمی شدن، کل منطقه مورد مطالعه را تهدید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: اثر قطعه‌ای به آستانه، بافت سنگین، عوامل برون‌ی، کریجینگ معمولی و انفصالی.

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک به علت کمبود منابع آبی، استفاده از پساب‌های شهری برای آبیاری اراضی کشاورزی اهمیت زیادی دارد. در چنین مناطقی، این آب‌ها مملو از عناصر غذایی و از سایر منابع آبی، ارزان‌تر و در دسترس‌ترند؛ به همین دلیل، کشاورزان بیشتر از آن استقبال می‌کنند (۲۹). استفاده از پساب در آبیاری از چند جنبه سودمند است: کاهش حجم‌های زیاد پساب‌های تولیدی بخش‌های مختلف با کاربرد آن‌ها در بخش کشاورزی، تأمین عناصر مغذی و بهبود رشد محصول در فصل‌های خشک (۳۶). استفاده و رهاسازی پساب در اراضی کشاورزی، گزینه دیگر اقتصادی و عملی‌تر در مدیریت آن است (۲۸). یکی دیگر از مزایای استفاده از پساب‌ها، وجود منبع تأمین آب پایدار و همیشگی برای همه فصول آبیاری است (۲۲).

دغدغه خاص در استفاده بلندمدت از پساب‌ها، پایش‌نکردن فرایندهای فیزیکی و شیمیایی است که به دلیل استفاده از این‌گونه آب‌ها در پروفیل خاک اتفاق می‌افتد؛ در حالی که این پایش، برای استفاده پایدار از پساب‌ها ضروری است (۲۲، ۵). یکی از اثرهای آبیاری با پساب، می‌تواند شورشدن خاک باشد. جلوگیری از شورشدن منطقه ریشه و تولید فراوان محصول، مستلزم کاربرد مقدار مناسب آب‌شویی حین استفاده از پساب‌ها است (۲۲). سدیمی شدن خاک و به تبع آن، تخریب ساختمان خاک، سلبندی سطح خاک و کاهش نفوذپذیری و در نتیجه، کاهش محصول می‌تواند از اثرهای استفاده از پساب‌های شهری برای کشاورزی باشد (۳۰، ۲۲، ۱۰). افزایش کلر محلول عصاره خاک نیز در اثر استفاده از پساب‌های شهری گزارش شده است (۲۳). پایش منظم شوری و سدیمی شدن خاک برای مدیریت کارآمد مناطق بحرانی ضروری است. کاربرد صحیح روش‌های کریجینگ در استخراج این مناطق کارآمد است (۴).

تغییرپذیری در مشخصه‌های خاک ممکن است چالش‌های مدیریتی را برای تولیدکنندگان مشخص کند (۳۲). تحلیل و تفسیر توزیع مکانی مشخصه‌های خاک برای مدیریت کارآمد اراضی کشاورزی بسیار حائز اهمیت است (۳۸). تغییرپذیری مشخصه‌ها و متغیرهای خاک، نتیجه عملکرد فرایندهای متعددی است که در مقیاس زمانی و مکانی به هم پیوسته، در تعامل با یکدیگر و ذاتاً به مقیاس وابسته‌اند. به علاوه، مشخصه‌های خاک، مکرر وابستگی مکانی را نشان می‌دهند؛ به گونه‌ای که نمونه‌های برداشت‌شده در فواصل کوتاه، شباهت بیشتری به نمونه‌هایی دارند که از فواصل دورتر برداشت شده‌اند. بنابراین، آمارهای پارامتریک برای تحلیل متغیرهای مکان محور کافی نیست؛ زیرا مبنای آن بر اساس این فرض است که مشاهدات اندازه‌گیری شده با وجود توزیع مکانی از یکدیگر مستقل‌اند (۶).

تلاش برای کشف و بررسی این تغییرپذیری با تعداد نقاط برداشت‌شده مشخص، سبب ورود به مقوله زمین آمار می‌شود که در سه بخش تشریح، تفسیر و کنترل تغییرات به صورت کارآمد و مؤثر عمل می‌کند (۲۷). تقسیم منطقه مورد مطالعه به مناطقی با توصیه‌های مدیریتی مناسب و مختص به خود (مکان‌محور)، از کارایی‌های بررسی روند تغییرات با استفاده از مدل‌های زمین‌آمار است (۹). ابزار زمین‌آمار و تحلیل‌های واریوگرام، میان تغییرات ناشی از ساختارهای مکانی و تغییرات بدون ساختار تمایز قائل می‌شود (۸). برآوردهای کریجینگ، ترکیبات خطی از داده‌های وزنی با لحاظ قید ناریبی داده‌ها و حداقل کردن خطای میانگین مربعات است. وزن‌های کریجینگ، از طریق برازش نیم‌واریوگرام تجربی بر مدل‌های تئوری یا از روش برآورد حداکثر درست‌نمایی تعیین می‌شود. نیم‌واریوگرام، هم‌بستگی مکانی را به صورت تابعی از فاصله بین نقاط داده‌ای اندازه‌گیری می‌کند (۱۶، ۲).

مدیریت آب و آبیاری

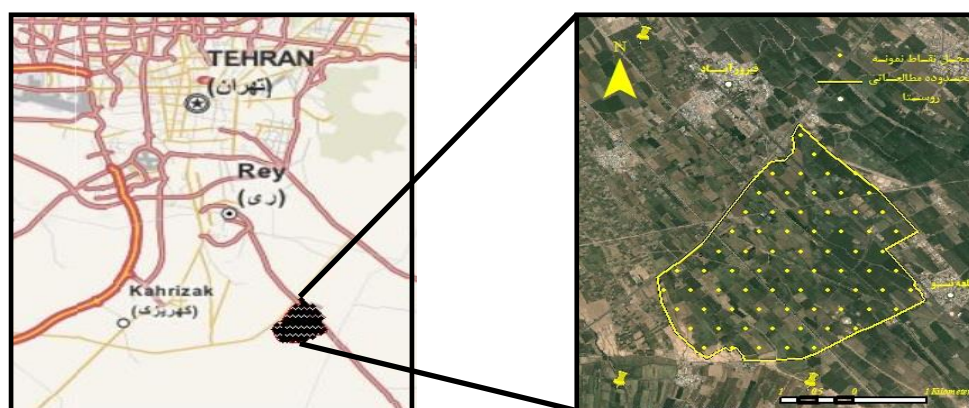
ماه‌های آبان تا اسفند ریزش می‌کند. بیش از ۴۰ سال است که بخشی از پساب‌های شهر تهران اعم از آب‌های سطحی همراه با پساب خانگی از طریق چند کانال به تبعیت از شیب غالب حوزه شهری تهران و حومه، به سمت جنوب حوزه و اراضی کشاورزی شهر ری هدایت می‌شود. منطقه مورد مطالعه بخشی از این اراضی است که انتقال پساب به آن از طریق کانال فیروزآباد صورت می‌گیرد. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک و محدودیت منابع آب این مناطق (اعم از سطحی و زیرزمینی) و اولویت استفاده از منابع برای تأمین آب شرب شهر تهران و حومه، استفاده از پساب‌های ورودی به منطقه برای کشاورزی به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای بقای کشاورزی منطقه و معیشت کشاورزان تبدیل شده است. روش آبیاری از نوع کرتی و زمان آبیاری مطابق با نوع محصول و شیوه آبیاری با دوره‌های مشخص آبیاری صورت می‌پذیرد. زهکشی منطقه از نوع طبیعی و مطابق شیب منطقه از شمال به جنوب است. کشت غالب منطقه گندم، جو، ذرت و برنج است.

اهداف این مطالعه عبارت است از: ۱. ارزیابی روش‌های مختلف کریجینگ در بررسی توزیع و روندهای احتمالی داده‌های پارامترهای شوری خاک منتج از آبیاری بلندمدت با پساب شهری؛ ۲. انتخاب مدل برتر نیم‌واریوگرام مطابق با شاخص ارزیابی دقت مدل‌ها؛ ۳. بررسی توزیع مکانی پارامترهای شوری خاک پس از آبیاری‌های بلندمدت با پساب شهری و شناخت مناطق مسئله‌دار در اراضی کشاورزی جنوب تهران.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در ۱۰ کیلومتری جنوب شهر ری در استان تهران، اراضی حفاصل روستاهای فیروزآباد و قلعه‌نو به وسعت ۸۶۱ هکتار است. این اراضی در مختصات عرض جغرافیایی $35^{\circ} 30' 5/8''$ تا $32^{\circ} 15/4''$ شمالی و طول جغرافیایی $51^{\circ} 28' 18/5''$ تا $50^{\circ} 5/5''$ شرقی قرار دارند. متوسط دمای سالانه منطقه $20/1$ درجه سانتی‌گراد و میزان بارندگی متوسط سالانه آن، $124/1$ میلی‌متر است که بیش از ۷۵ درصد آن بین



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

طرح نمونه برداری

در این تحقیق برای تعیین طرح نمونه برداری از نرم افزار طرح بصری نمونه^۱ (VSP) استفاده شد. این نرم افزار، یکی از ابزارهای انتخاب تعداد و موقعیت های صحیح نمونه برداری های زیست محیطی است که با اجرای آزمون های آماری روی نقشه محدوده مورد مطالعه، نقاط نمونه برداری را در حدود آماری قابل اعتماد به منظور تصمیم سازی ارائه می دهد (۲۰). نرم افزار طرح بصری نمونه از رویکرد برنامه ریزی مصوب آژانس حفاظت محیط زیست^۲ (EPA) برای جمع آوری داده و تصمیم گیری استفاده کرده است که از آن به فرایند اهداف کیفیتی داده^۳ (DQO) تعبیر می شود (۱۱). مطابق خروجی طرح نمونه برداری، ۷۱ نقطه توسط نرم افزار VSP بر روی محدوده مطالعاتی مشخص شد که پس از استخراج مختصات آنها، با استفاده از GPS، نمونه های خاک به روش ترکیبی از عمق ۰-۲۵ سانتی متری، پس از پایان دوره کشت تابستانه و در آغاز فصل زراعی جدید ۹۳-۹۴ برداشت شد. نمونه های خاک در مجاورت هوا خشک و به آرامی خرد شد و از الک ۲ میلی متری عبور داده شد. اسیدیته خاک (PH)، در نسبت ۱:۵ آب به خاک و با استفاده از دستگاه pH متر به دست آمد. قابلیت هدایت الکتریکی، با استفاده از دستگاه هدایت سنج الکتریکی در نسبت ۱:۵ آب به خاک سنجیده شد. میزان سدیم محلول خاک، با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر تعیین شد (۱۴). کلسیم و منیزیم محلول خاک به روش تیتراسیون به دست آمد. بافت خاک، به روش هیدرومتری و پس از پراکنش ذرات خاک با محلول ۵ درصد هگزا متا فسفات سدیم تعیین گردید. میزان کلر به روش تیتراسیون با استفاده از معرف کرومات پتاسیم و تیترا با نیترا نقره ۰/۰۱ نرمال به دست آمد (۱۴).

مقدار SAR (نسبت جذب سدیمی) از رابطه ۱ محاسبه

گردید:

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

در این رابطه، مقادیر Na^+ ، Ca^{2+} و Mg^{2+} برحسب meq/lit و SAR برحسب $(meq/lit)^{0.5}$ است.

تابع نیم تغییر نما^۴

این تابع، هم بستگی مکانی نقاط نمونه اندازه گیری شده را نشان می دهد و میزان هم بستگی را به عنوان تابعی از فاصله ارائه می دهد. تابع نیم تغییر نما به صورت زیر تعریف می شود:

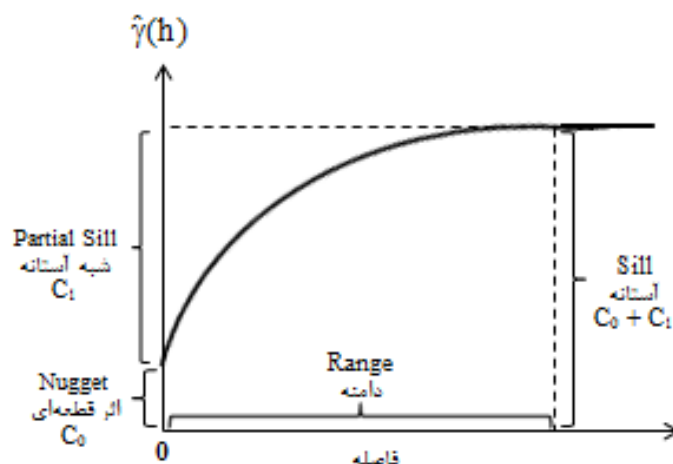
$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (2)$$

در این رابطه، $\hat{\gamma}(h)$ ، نیم تغییر گرام بین دو نقطه $Z(x_i + h)$ و $Z(x_i)$ با فاصله h از یکدیگر و N تعداد جفت مشاهده در فاصله h است. تابع نیم تغییر نما بر اساس سه پارامتر اثر قطعه ای،^۵ آستانه^۶ و دامنه^۷ توصیف می شود (شکل ۲).

اثر قطعه ای، به عنوان شاخصی از پیوستگی در فواصل نزدیک تعریف می شود. از نظر تئوری، در فاصله صفر بین دو نمونه، مقادیر تابع نیم تغییر نما باید صفر باشد. اما در اغلب موارد، در عمل در فواصل بسیار کوچک، اختلاف بین نمونه های اندازه گیری شده به صفر متمایل نیست که این موضوع، اثر قطعه ای نامیده می شود. اثر قطعه ای ممکن است به خطاهای اندازه گیری یا تغییرات مکانی در فواصل کوچک تر از فواصل نمونه برداری یا ترکیبی از هر دو نسبت داده شود و در واقع، عرض از مبدأ نمودار نیم تغییر نما است.

4. Semivariogram Function
5. Nugget effect
6. Sill
7. Range

1. Visual Sample Plan
2. Environmental Protection Agency
3. Data Quality Objectives



شکل ۲. مؤلفه‌های نمودار مدل نیم تغییرنما

نتایج و بحث

میانگین، میانه، بیشینه، کمینه، انحراف معیار و ضریب تغییرات هریک از پارامترهای شاخص شوری خاک، از آمار کلاسیک مبتنی بر فرض استقلال مکانی داده‌ها مطابق جدول ۱ محاسبه شد. EC با مقادیر کمتر از ۴ dS/m بیان‌کننده آن است که خاک منطقه غیرشور و ریسک شورشدن اراضی منطقه مورد مطالعه کم است. این نتیجه مشابه تحقیقات منطقه‌ای در شمال چین است که استفاده از پساب‌های شهری برای آبیاری، اثر معنی‌داری بر میزان شوری و pH نداشته است (۳۷).

در مطالعه دیگری، تأثیر آبیاری با پساب برای دوره‌های ۳ تا ۹ سال بر میزان EC خاک غیر معنی‌دار بود. این نتیجه به دلیل ارزان و در دسترس بودن پساب در منطقه، افزایش حجم آبیاری و انجام عملیات آب‌شویی است (۷). اگر خطر تجمع نمک و شورشدن از طریق پساب معنی‌دار باشد، می‌توان از گزینه آب‌شویی به‌عنوان ابزار مدیریتی بهره برد و نمک اضافی را از منطقه رشد ریشه آب‌شویی کرد و باعث افزایش کیفیت خاک و بهبود رشد شد (۲۵، ۲۱).

روی محور γ ها، حدی که نمودار تابع نیم‌تغییرنما به حالت افقی در می‌آید، آستانه نامیده می‌شود. پارامتر آستانه، مجموع اثر قطعه‌ای (واریانس تصادفی) و بخش شبه‌آستانه (واریانس مکانی) است (۱۵).

ضریب تغییرات نسبت انحراف معیار به میانگین است که تغییرپذیری را در فضای نمونه‌ای نشان می‌دهد:

$$CV = S / \bar{p} \quad (3)$$

$$\bar{P} = (\gamma/n) \sum_{i=1}^n P \quad (4)$$

در این رابطه، S ، انحراف معیار نمونه‌ها، \bar{P} میانگین نمونه‌ها و n تعداد نمونه‌ها است.

خطای جذر مربعات میانگین از رابطه (۵) محاسبه گردید:

$$RMSE = \sqrt{\frac{(Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}{n-1}} \quad (5)$$

در این رابطه، $Z^*(x_i)$ مقدار پیش‌بینی شده و $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده پارامتر موردنظر در موقعیت x_i است.

مدیریت آب و آبیاری

قیمت سبب ایجاد محدودیت در استفاده از آن می‌شود (۲۶،۱). تأثیر افزایش SAR خاک در نتیجه استفاده بلندمدت از پساب‌ها، ممکن است به تخریب مسیرهای جریان آب در لایه‌های خاک بینجامد و با کمبود موقت تهویه موردنیاز، به رشد محصول و عملکرد آسیب وارد کند (۱۷). شرایط اولیه خاک و کیفیت آب آبیاری، در شرایط ثانویه پایداری خاک و خاک دانه‌ها و حجم منافذ قابل زهکشی بسیار مؤثر است (۱۹)؛ به‌گونه‌ای که خطر تخریب خاک دانه‌ها و سدیمی شدن خاک در خاک‌هایی با درصد رس کمتر، اندک‌تر است؛ حتی اگر کیفیت پساب مورد استفاده کم باشد و میزان سدیم آن زیاد (۱۸،۱۳). البته از آنجا که میزان رس خاک منطقه زیاد و بین ۳۳/۴ تا ۴۰/۴ متغیر است، خطر توسعه سدیمی شدن نیز بیشتر است.

ضریب تغییرات که نسبت انحراف معیار به میانگین است، مبین درصد اندازه‌گیری مفید پارامتر مربوطه در تغییرپذیری کلی است (۳۱). ضریب تغییرات کمتر از ۱۰ درصد، مبین تغییرپذیری کم، بین ۱۰ تا ۱۰۰ درصد، بیانگر تغییرپذیری متوسط و بیش از ۱۰۰ درصد، تغییرپذیری فراوان را نشان می‌دهد (۳۳).

همچنین در نقاط مطالعه‌شده، پارامتر SAR به‌عنوان شاخص سدیمی‌بودن خاک، از سویی دارای دامنه ۳/۳۴ تا ۲۰/۰۸ و در نتیجه، میزان کمتر یون‌های کلسیم و منیزیم و از سوی دیگر مقادیر بسیاری یون سدیم است. این امر باعث شده است در ۲۹ درصد نقاط منطقه مورد مطالعه، میزان SAR از حد بحرانی (۱۳) خارج و مشکل سدیمی شدن را ایجاد کند. مناطق دارای SAR بیش از ۱۳، با همراهی مقادیر pH بیش از ۸/۵ در ۴۰ درصد این نقاط، وضعیت «ضعیف» را برای خاک‌های این نقاط ایجاد کرده است. در تیمارهای استفاده از پساب شهری در دوره‌های مختلف فصل رشد، تیمار استفاده از پساب در کل دوره فصل رشد به مقدار معنی داری سدیمی شدن و شاخص درصد سدیم قابل تبادل را بیشتر نشان داد (۱۲).

هنگام استفاده از پساب‌ها با درصد سدیم زیاد باید توجه داشت که این امر سبب زوال و تخریب خاک می‌شود. یون‌های سدیم باعث پراکنش ذرات خاک و سله‌بندی بعدی آن و بدین ترتیب، سبب کاهش نفوذ آب به خاک می‌شوند. در چنین شرایطی، استفاده از منابع کلسیم مانند گچ مؤثر است. اما، گاهی میزان دسترسی و

جدول ۱. آماره‌های توصیفی پارامترهای موردنظر خاک در منطقه مطالعاتی

پارامتر	بیشینه	کمینه	میانگین	میان	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)
EC (ds/m)	۲/۲	۰/۹۷	۱/۳۷	۱/۳۵	۰/۲۵	۱۸
pH	۸/۹	۶/۹	۷/۹۰	۷/۹۰	۰/۵۶	۷
Clay (%)	۴۰/۴	۳۳/۴	۳۷/۰۳	۳۷/۴	۱/۶۹	۵
Ca ²⁺ (meq/lit)	۱/۸۲	۰/۰۹	۰/۸۴	۰/۹۵	۰/۳۲	۳۹
Mg ²⁺ (meq/lit)	۱/۳۵	۰/۰۴	۰/۴۱	۰/۳۴	۰/۲۹	۷۱
Na ⁺ (meq/lit)	۱۲/۳۲	۳/۴۸	۸/۲۵	۸/۲۱	۲/۱۰	۲۵
SAR (meq ^{0.5} /lit ^{-0.5})	۲۰/۰۸	۳/۳۴	۱۰/۷۴	۱۰/۴۶	۳/۶۱	۳۳
Cl ⁻ (meq/lit)	۴/۶	۱/۰۲	۲/۹۵	۲/۹۰	۰/۷۲	۲۴

بررسی دقیق‌تر نرمال‌بودن داده‌ها از آزمون کای-اسکور^۱ (χ^2) در سطح احتمالاتی ۵ درصد استفاده شد که اثر چولگی و کشیدگی را توأمان در نظر می‌گیرد (۶). جدول ۲، نتایج آزمون نرمال‌بودن داده‌های مرتبط با پارامترهای شاخص در شوری خاک و در نهایت، انتخاب روش برتر کریجینگ را نشان می‌دهد.

با استفاده از تبدیل لوگ-نرمال، اثر نقاط پرت بر نیم‌واریوگرام‌ها به حداقل خود می‌رسد، چولگی داده‌ها کاهش می‌یابد و واریانس داده‌ها به حالت پایدار می‌رسد (۶).

براساس جدول ۱، پارامتر بافت خاک (رس) و pH با ضریب تغییرپذیری کمتر از ۱۰ درصد، تغییرپذیری کم و سایر پارامترهای مرتبط یا شاخص‌های شوری خاک در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ درصد، ضریب تغییرپذیری متوسط دارند.

انتخاب مدل مناسب درون‌یابی

در این مطالعه، هیستوگرام پارامترهای چولگی و کشیدگی از ماژول تحلیل زمین‌آمار ARCGIS ترسیم شد تا بدین‌وسیله، توزیع نرمال داده‌ها بررسی کلی شود. اگر چولگی نزدیک صفر و کشیدگی نزدیک به سه باشد، می‌توان گفت داده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. برای

جدول ۲. بررسی توزیع نرمال پارامترهای شاخص در شوری خاک با استفاده از آزمون χ^2 برای تعیین مدل درون‌یابی مناسب

پارامتر	توزیع نرمال	توزیع لوگ نرمال						توزیع نرمال					
		آزمون χ^2			چولگی کشیدگی			آزمون χ^2			چولگی کشیدگی		
		$\chi^2 - \text{crit}$	درجه آزادی	χ^2				$\chi^2 - \text{crit}$	درجه آزادی	χ^2			
EC	Log-normal K	لوگ نرمال	۹/۴۹	۸/۵۱	۴	۲/۹۳	۰/۳۹	۹/۴۹	۱۲/۰۲	۴	۴/۰۳	۰/۹۰	
pH	OK	نرمال	-	-	-	-	-	۵/۹۹	۴/۹۰	۲	۱/۸۰	-۰/۲۰	
Clay	OK	نرمال	-	-	-	-	-	۷/۸۱	۱/۴۶	۳	۲/۴۵	-۰/۱۷	
Na ⁺	OK	نرمال	-	-	-	-	-	۵/۹۹	۳/۸۸	۲	۲/۵۵	۰/۱۰	
Ca ²⁺	DK	غیر نرمال	۷/۸۱	۴۰/۷۰	۳	۶/۳۵	-۱/۹۷	۷/۸۱	۳۰/۲۱	۳	۳/۶۰	-۰/۵۵	
Mg ²⁺	OK	نرمال	-	-	-	-	-	۵/۹۹	۲/۶۲	۲	۳/۹۸	۱/۲۰	
SAR	OK	نرمال	-	-	-	-	-	۹/۴۹	۵/۹۸	۴	۲/۹۸	۰/۳۵	
Cl ⁻	Log-normal K	لوگ نرمال	۷/۸۱	۶/۹۲	۳	۲/۴۵	-۰/۰۵	۷/۸۱	۸/۴۶	۳	۴/۴۸	-۰/۸۴	

کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging-OK)، کریجینگ با توزیع لوگ نرمال (Log-normal K)، کریجینگ انفضالی (Disjunctive Kriging-DK)

نشان داد که تنها بر اساس مقادیر چولگی و کشیدگی نمی توان به صورت قاطع درباره نرمال بودن داده ها اظهار نظر کرد و استفاده از آزمون های دقیق تر در انتخاب مدل درون یابی مرحله بعدی مناسب مؤثر است.

انتخاب مدل بهینه نیم واریوگرام

انتخاب مدل بهینه نیم واریوگرام، بر اساس اصل حداقل خطای جذر مربعات میانگین (RMSE) مطابق جدول ۳ انتخاب شد.

مطابق با آزمون کای-اسکور، پارامتر مرتبط با بافت خاک (درصد رس)، pH، یون های سدیم، منیزیم و کلر دارای توزیع نرمال بودند. بنابراین، روش کریجینگ معمولی انتخاب شد. پارامترهای EC و یون کلر، توزیع لوگ نرمال و بدون روند داشتند که روش کریجینگ لوگ نرمال انتخاب گردید. با وجود تبدیل لوگ-نرمال و کاهش چولگی، پارامتر کلسیم به توزیع نرمال نرسید که نقشه احتمالاتی کمبود یا بیش بود این پارامتر با استفاده از روش کریجینگ انفصالی ترسیم شد (۲۴). آزمون کای-اسکور

جدول ۳. مدل واریوگرام مناسب برای پارامترهای شاخص در شوری خاک منطقه مورد مطالعه

پارامتر	خطای جذر مربعات میانگین هر تابع نیم واریوگرام		
	کروی	نمایی	گوسی
EC	۰/۲۱۲	۰/۲۱۱	۰/۲۱۲
pH	۰/۵۴۱	۰/۵۴۳	۰/۵۴۲
Clay	۱/۶۴۶	۱/۶۲۸	۱/۶۳۷
Na ⁺	۲/۱۴۳	۲/۱۴۴	۲/۱۴۷
Ca ²⁺	۰/۲۵۷	۰/۲۶۵	۰/۲۶۰
Mg ²⁺	۰/۲۸۴	۰/۲۸۶	۰/۲۸۳
SAR	۳/۵۶۷	۳/۴۷۸	۳/۶۲۵
Cl ⁻	۰/۷۲۲	۰/۷۱۸	۰/۷۳۱

توزیع مکانی پارامترهای شاخص نمک خاک
پارامترهای مدل بهینه نیم واریوگرام برای هر یک از متغیرهای مطالعه شده، در جدول ۴ نشان داده شده است. هر متغیر که اثر قطعه ای کمتری دارد، تغییرات ذاتی یا تصادفی آن، اثر کمتری بر محتوای متغیرهای مرتبط با شوری خاک گذاشته است. نسبت اثر قطعه ای به آستانه $(C_0/C_0 + C_1)$ ، بیانگر درجه هم بستگی در فضای متغیرهای نمک خاک یا وابستگی مکانی آنها است.

بر اساس جدول ۳، تابع نمایی دارای حداقل RMSE برای پارامترهای بافت خاک، EC، یون های سدیم و کلر و پارامتر نسبت جذبی سدیم است. بنابراین، این مدل برای این پارامترها انتخاب می شود. تابع کروی، مدل بهینه پارامتر pH و یون سدیم و تابع گوسی، مدل بهینه پارامتر یون منیزیم است.

جدول ۴. آماره‌های توصیفی پارامترهای موردنظر خاک در منطقه مطالعاتی

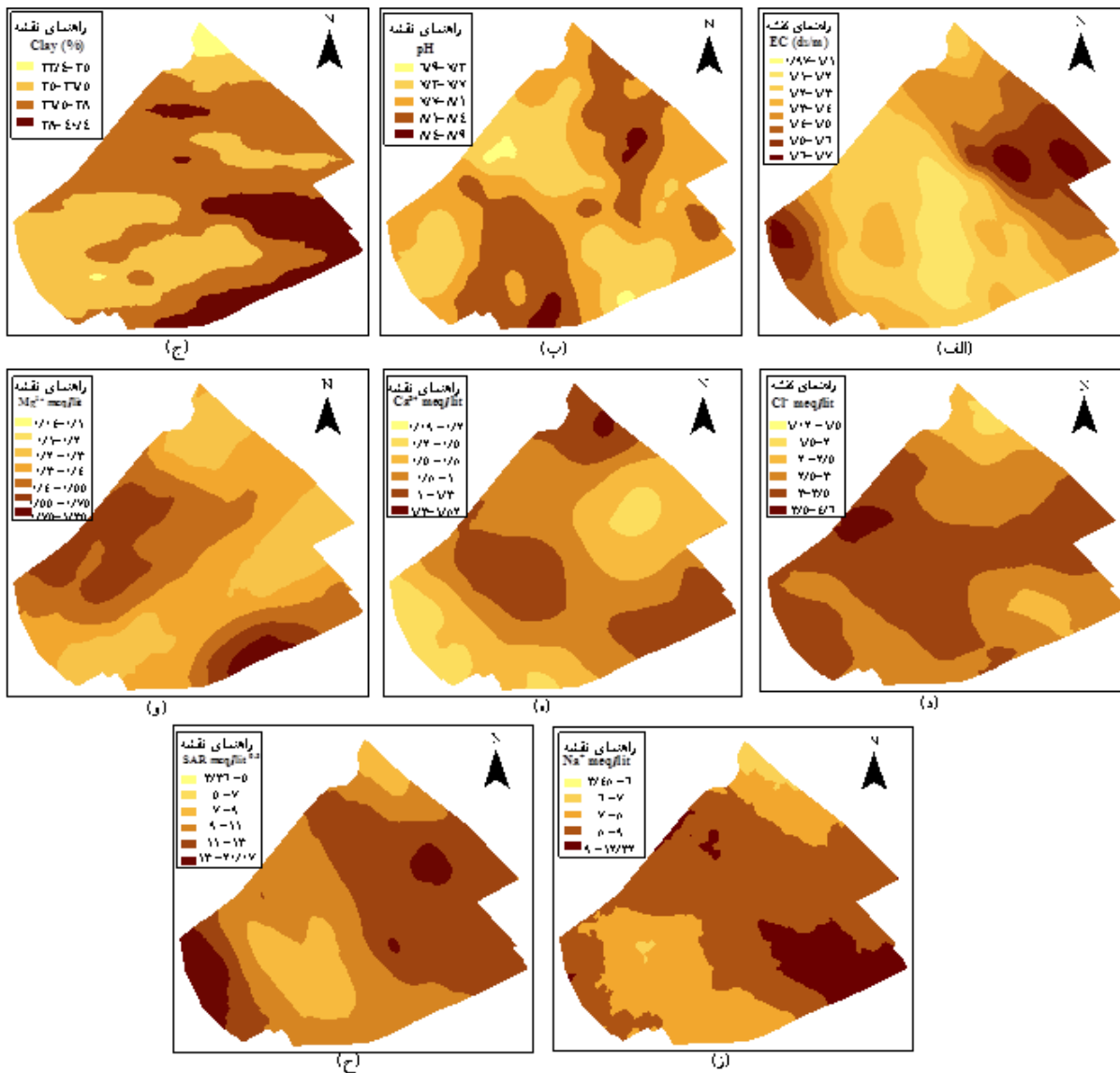
پارامتر	اثر قطعه‌ای C ₀	شبه‌آستانه C ₁	آستانه C ₀ + C ₁	C ₀ /C ₀ + C ₁
EC	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۲۹
pH	۰/۰۳	۰/۳۰	۰/۳۳	۰/۰۹
Clay	۰/۷۳	۲/۲۷	۳/۰۰	۰/۲۴
Ca ²⁺	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۱۰	۰/۳۰
Mg ²⁺	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۴۴
Na ⁺	۳/۰۷	۲/۰۲	۵/۰۹	۰/۶۰
SAR	۷/۳۶	۷/۳۷	۱۴/۷۳	۰/۵۰
Cl ⁻	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۴۴

به میزان کمتر از ۲۵ درصد این نسبت، بیان‌کننده هم‌بستگی مکانی قوی، بین ۲۵ درصد تا ۷۵ درصد نشانه هم‌بستگی متوسط است. بیشتر از ۷۵ درصد هم‌بستگی ضعیف را نشان می‌دهد (۳۴). پارامتر pH و مؤلفه رس بافت خاک دارای نسبت کمتر از ۲۵ درصد اثر قطعه‌ای به آستانه است. این موضوع بیان‌کننده آن است که این متغیرها وابستگی ساختاری مکانی دارند. در مورد سایر متغیرها با نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه در محدوده ۲۵-۷۵ درصد، تأثیرات ساختاری و فاکتورهای تصادفی به‌صورت توأم تأثیرگذارند.

نقشه‌های توزیع مکانی پارامترهای مرتبط با محتوای نمک خاک در ARCGIS بر اساس مدل نیم‌واریوگرام مناسب به‌دست‌آمده ترسیم شده است. نقشه‌های (الف) تا (ح) شکل ۳ مربوط به توزیع مکانی پارامترهای EC، pH، Clay، Ca²⁺، Mg²⁺، Na⁺، SAR، Cl⁻ است. همچنان که از نقشه EC بر می‌آید، مقادیر بیشتر این پارامتر در اراضی جنوب شرق منطقه تحت مطالعه مشاهده می‌شود. با اینکه مطابق جدول ۱، مقادیر بیشینه EC کمتر از حد بحرانی (< ۴ dS/m) هستند، می‌توان مکان‌های نزدیک به بحرانی را شناسایی کرد. از آنجا که این مناطق منطبق بر اراضی کشت غرقابی هستند، می‌توان ماندابی بودن این اراضی را دلیلی بر این موضوع قلمداد کرد. اصولاً بین ماندابی شدن اراضی و افزایش EC رابطه مستقیم وجود دارد. این حالت برای پارامتر یون سدیم و SAR نیز صادق است. مقادیر کمتر یون کلسیم و منیزیم در مناطق دارای حالت بحرانی SAR (> ۱۳) از نقشه‌های این متغیرها مشهود است. اقدام مدیریتی افزودن گچ نیز می‌تواند به‌عنوان راهکار عملیاتی مدنظر قرار گیرد (۲۱).

فاکتورهای ساختاری سبب افزایش هم‌بستگی مکانی خاک و فاکتورهای تصادفی (آبیاری، کود، خاک‌ورزی و سیستم‌های کشت) سبب هم‌بستگی مکانی ضعیف می‌شوند (۳۵). در تحلیل مشابهی، وابستگی مکانی قوی به فاکتورهای ذاتی مانند بافت و کانی‌های خاک و وابستگی مکانی ضعیف به‌وسیله فاکتورهای برون‌ی مانند حاصلخیزکننده‌ها یا اقدامات به‌زراعی و مدیریتی مانند خاک‌ورزی و زهکشی نسبت داده شده است (۳۱، ۶). در مطالعه حاضر، نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه یون سدیم و پس از آن SAR، یون کلر و یون منیزیم بیشترین است که

فاکتورهای ساختاری سبب افزایش هم‌بستگی مکانی خاک و فاکتورهای تصادفی (آبیاری، کود، خاک‌ورزی و سیستم‌های کشت) سبب هم‌بستگی مکانی ضعیف می‌شوند (۳۵). در تحلیل مشابهی، وابستگی مکانی قوی به فاکتورهای ذاتی مانند بافت و کانی‌های خاک و وابستگی مکانی ضعیف به‌وسیله فاکتورهای برون‌ی مانند حاصلخیزکننده‌ها یا اقدامات به‌زراعی و مدیریتی مانند خاک‌ورزی و زهکشی نسبت داده شده است (۳۱، ۶). در مطالعه حاضر، نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه یون سدیم و پس از آن SAR، یون کلر و یون منیزیم بیشترین است که



شکل ۳. توزیع مکانی پارامترهای مرتبط با محتوای نمک خاک در منطقه آبیاری شده با پساب شهری

نتیجه‌گیری

(SAR)، مدل کریجینگ لوگ نرمال برای پارامترهای EC و یون کلر و کریجینگ انفصالی برای پارامتر یون کلسیم انتخاب شدند. درک و بررسی تغییرپذیری این پارامترها، متضمن مدیریت مناسب و بهره‌وری پایدار است (۳). نتیجه بررسی استفاده از پساب شهری در اراضی کشاورزی جنوب تهران که بیش از ۴۰ سال تحت آبیاری با پساب شهری بوده است، نشان داد که به علت دسترسی کافی به

در این مطالعه، روش‌های مختلف کریجینگ مطابق با شاخص‌های انتخاب مدل برتر بررسی شد. نتایج انتخاب مدل برتر برای متغیرهای مختلف شوری خاک نشان داد که مطابق با شاخص‌های انتخاب مدل مناسب، مدل کریجینگ معمولی برای متغیرهای مرتبط با بافت خاک (درصد رس)، pH، یون‌های سدیم، منیزیم و شاخص نسبت جذبی سدیم

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

- Buckland GD, Bennett DR, Mikalson DE, De Jong E and Chang C (2002) Soil salinization and sodification from alternate irrigations with saline-sodic water and simulated rain. *Canadian Journal of Soil Science*. 82(3): 297-309.
- Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco, RF and Konopka AE (1994) Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America*. 58(5): 1501-1511
- Chen W, Lu S, Pan N, Wang Y and Wu L (2015) Impact of reclaimed water irrigation on soil health in urban green areas. *Chemosphere*. 119: 654-661.
- Cressie N (1993) *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, New York, 920 p.
- Doerge TA (1999) Management zone concepts. SSMG-2. In: *Site-specific Management Guidelines, Potash and Phosphate Institute, Atlanta, GA*. pp. 1-4.
- Emadi M, Baghernejad M and Maftoun M (2008) Assessment of some soil properties by spatial variability in saline and sodic soils in Arsanjan Plain, Southern Iran. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 11(2): 238-243.
- EPA (2006) *Guidance on Systematic Planning Using the Data Quality Objective Process*, EPA QA/G-4. Washington, DC, 121 p.
- Galavi M, Jalali A, Ramroodi M, Mousavi SR and Galavi H (2010) Effects of Treated Municipal Wastewater on Soil Chemical Properties and Heavy Metal Uptake by Sorghum (*Sorghum Bicolor L.*). *Agricultural Science*. 2(3): 235-241.
- García-Orenes F, Caravaca F, Morugán-Coronado A and Roldán A (2015) Prolonged irrigation with municipal wastewater promotes a persistent and active soil microbial community in a semiarid agroecosystem. *Agricultural Water Management*. 149: 115-122.

این منبع و امکان آب شویی، خطر شورشدن این اراضی مرتفع شده است؛ ولیکن در برخی مناطق، افزایش یون سدیم و مقادیر کمتر یون‌های کلسیم و منیزیم، خطر سدیمی شدن این اراضی را در پی داشته است که با توجه به درصد فراوان رس این اراضی، پیامدهای آتی آن شامل سله و کاهش نفوذپذیری کاملاً مشهود است. pH بیش از ۸/۵ در برخی مناطق همراه با SAR بیش از ۱۳، خطر سدیمی شدن و قلیابیت را در بر دارد.

پیشنهادها

پیشنهاد می‌شود توزیع پارامترهای شوری خاک در فواصل چندساله آتی نیز با همین روش بررسی شود. همچنین نوع کشت و روش آبیاری می‌تواند از عوامل تأثیرگذار بر گستره توزیع پارامترهای شوری و سدیمی باشد که می‌توان درباره آن به تحقیق پرداخت.

منابع

- Adamu GK (2013) Quality of irrigation water and soil characteristics of Watari Irrigation project. *American Journal of Engineering Research*. 2(3): 59-68.
- Ahmed S (2006) Application of geostatistics in hydrosciences. In: Thangarajan, M (Ed.), *Groundwater Resource Evaluation, Augmentation, Contamination, Restoration, Modeling and Management*, Capital Publishing Company, New Delhi. pp. 78-111.
- Al-Omran AM, Al-Wabel MI, El-Maghraby SE, Nadeem ME and Al-Sharani S (2013) Spatial variability for some properties of the wastewater irrigated soils. *Saudi Society of Agricultural Sciences*. 12(2): 167-175.
- Bilgili AK, Çullu MA, Aydemir S, Aydemir A and Almaca A (2013) Probability mapping of saline and sodic soils in the Harran plain using a non-linear kriging technique. *Eurasian Soil Science*. 2(2): 76-81.

14. ISRIC (1986) Procedure for Soil Analysis. Wageningen Agriculture University, Netherlands, 106 p.
15. Johnston K, Ver Hoef JM, Krivoruchko K and Lucas N (2001) Using ArcGIS Geostatistical Analyst. ESRI Press, Redlands, 300 p.
16. Kitanidis PK (1997) Introduction to geostatistics. Cambridge, Cambridge University Press, 249 p.
17. Levy GJ, Fine P, Goldstein D, Azenkot A, Zilberman A, Chazan A and Grinhut T (2014) Long term irrigation with treated wastewater (TWW) and soil sodification. Biosystems Engineering. 128: 4-10.
18. Levy GJ, Mamedov AI and Goldstein D (2003) Sodicity and water quality effects on slaking of aggregates from semiarid soils. Soil Science. 168(8): 552-562.
19. Mamedov AI (2014) Soil water retention and structure stability as affected by water quality. Eurasian Soil Science. 3(2): 89 – 94.
20. Matzke BD, Nuffer LL, Hathaway JE, Sego LH, Pulsipher BA, McKenna S, Wilson JE, Dowson ST, assig NL, Murray CJ and Roberts B (2010) Visual Sampling Plan Version 6.0 user's guide. United States Department of Energy, PNNL-19915, 255 p.
21. Mohammad Rusan MJ, Hinnawi S and Rousan L (2007) Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. Desalination. 215(1-3): 143-152.
22. Muyen Z, Moore GA and Wrigley RJ (2011) Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. Agricultural Water Management. 99(1): 33– 41.
23. Najafi P, Tabatabaei SH and Taheri-Sodejani H (2015) Long-term Effects of Different Irrigation Methods with Treated Wastewater on Soil Chemical Properties. Water and Soil. 29(1): 12-22.
24. Oliver MA and Webster R (1991) How geostatistics can help you. Soil Use and Management. 7(4): 206-217.
25. Porter GS, Delisle L, Valencía-Gica R and Yost R (2011) Use of Secondary-treated Wastewater on an Island Golf Course. Pacific Agriculture and Natural Resources. 3: 8-13.
26. Qadir M, Wichelns D, Raschid-Sally L, McCormick PG, Drechsel P, Bahri A and Minhas PS (2010) The challenges of wastewater irrigation in developing countries. Agricultural Water Management. 97(4): 561-568.
27. Robertson GP (2008) GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences. Gamma Design Software. Plainwell, Michigan, USA, 171 p.
28. Samaila KI, Marcus ND and Kukwi JI (2011) The influence of wastewater on soil chemical properties on irrigated fields in Kaduna South Township, North Central Nigeria. Sustainable Development in Africa. 13(6): 91-101.
29. Scott CA, Faruqi NI and Raschid-Sally L (2004) Wastewater use in irrigated agriculture: Management challenges in developing countries. In: Scott CA, Faruqi NI, Raschid-Sally L (Eds.), Wastewater Use in Irrigated Agriculture, Wallingford, CABI, pp. 1-10.
30. Singh PK, Deshbhratar PB, Ramteke DS (2012) Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. Agricultural Water Management. 103: 100-104.
31. Tagore GS, Bairagi GD, Sharma R and Verma PK (2014) Spatial variability of Soil Nutrients Using Geospatial Techniques: A case study in soils of Sanwer Tehsil of Indore district of Madhya Pradesh. Proceedings of ISPRS Technical Commission VIII Symposium, Hyderabad, India.
32. Trangmar BB, Yost RS and Uehara G (1985) Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy. 38(1): 45-94.

33. Wang SQ, Zhu SL and Zhou CH (2001) Characteristics of spatial variability of soil thickness in China. *Geographical Research*. 20(2): 161–167.
34. Webster R and Oliver MA (2001) *Geostatistics for Environmental Scientists*. Statistics in practice, Willy, Chichester, 265 p.
35. Wu W, Yin S, Liu H, Niu Y and Bao Z (2014) The geostatistic-based spatial distribution variations of soil salts under long-term wastewater irrigation. *Environmental Monitoring and Assessment*. 186(10): 6747–6756.
36. Yadav RK, Goyal B, Sharma RK, Dubey SK and Minhas PS (2002) Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and groundwater - A case study. *Environment International*. 28(6): 481-486.
37. Yao H, Zhang S, Xue X, Yang J, Hu K and Yu X (2013) Influence of the sewage irrigation on the agricultural soil properties in Tongliao City, China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 7(2): 273–280.
38. Yi-Ju C, Dar-Yuan L, Hoeng-Yuh G and Kun-Huang H (1997) Geostatistical analysis of soil properties of Mid-west Taiwan soils. *Soil Science*. 162(4): 291-298.