

تحلیل روش‌های زمین‌آماری در پایش مکانی وضعیت شوری و سدیمی خاک‌های تحت آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری

فاطمه کاراندیش^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۹)

چکیده

عدم مدیریت صحیح در استفاده از منابع طبیعی همچون خاک می‌تواند باعث تخریب خصوصیات کیفی آن و متعاقباً کاهش حاصلخیزی خاک شود. این مسئله، لزوم پایش مکانی این خواص در راستای ارائه راهکارهای مطلوب مدیریتی جهت حفظ حاصلخیزی آن را نشان می‌دهد. به همین منظور، در این پژوهش، به پایش مکانی خصوصیات کیفی خاک در لایه سطحی در اراضی آبیاری شده با پساب شهری با قدمتی طولانی بر اساس روش‌های زمین‌آماری و ارزیابی آن بر اساس محدوده استاندارد جهانی پرداخته شد. بدین منظور خصوصیات کیفی خاک شامل نسبت جذب سدیم (SAR)، درصد سدیم تبادل (ESP)، هدایت الکتریکی (EC) و واکنش خاک (pH) از منطقه‌ای با وسعت ۱۹۰ هکتار و در پیکسل‌هایی با ابعاد ۱۵۰ در ۱۵۰ متر برداشت شد و امکان تهیه نقشه‌های رستری با روش‌های میانگین متحرک وزنی (WMA)، کریجینگ و کوکریجینگ فراهم گردید. نتایج نشان داد روش کریجینگ برای پارامتر ESP و روش WMA برای سایر پارامترها، کمترین خطای تخمین بر اساس معیارهای ارزیابی را به همراه داشت. همچنین استفاده از متغیر کمکی تأثیر مثبتی در افزایش شعاع تأثیر و افزایش دقت درون‌یابی نداشت. مقایسه نقشه‌های رستری تهیه‌شده بر اساس روش‌های منتخب با حدود استاندارد اداره شوری ایالات متحده آمریکا نشان داد، مصرف بدون مدیریت منابع آب نامتعارف در این منطقه باعث شور شدن بیش از ۹۷ درصد از کل منطقه شده است. همچنین خطر وجود سدیم در بیش از ۹۴ درصد از کل منطقه مشکلات خاک‌های منطقه را دوچندان کرده است. این امر می‌تواند با تخریب ساختمان خاک، خسارات جبران‌ناپذیری را در شرایط بحران شدید آب به همراه داشته باشد. لذا کشاورزی پایدار و امنیت غذایی در منطقه مطالعاتی مستلزم ارائه راهکارهای مدیریتی جهت اصلاح خاک همچون آبشویی در فصل غیر کشت و یا آبیاری ترکیبی با آب سالم در جهت حفظ منافع اقتصادی و محیط‌زیست طبیعی است.

واژه‌های کلیدی: پایش مکانی، خاک شور، خاک سدیمی، کشاورزی پایدار

۱- استادیار دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل (مکاتبه کننده)

پست الکترونیک: Karandish_h@yahoo.com

مقدمه

خاک بستر اصلی رشد گیاه است و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن، از پارامترهای موثر در رشد گیاه محسوب می‌گردد. این خصوصیات هم چون، میزان عناصر غذایی، وضعیت شوری و سدیمی بودن آن و میزان مواد آلی، حاصل‌خیزی خاک‌ها را تعیین می‌کند و تغییر در آن‌ها اثرات متفاوتی بر رشد و عملکرد گیاه خواهد داشت. ویژگی‌های ذاتی سنگ‌بستر در برخی مراحل شکل‌گیری خاک و فعالیت‌های مدیریتی اعمال‌شده در طول فصل رشد گیاه، از جمله مهم‌ترین عوامل موثر بر میزان تغییر خصوصیات خاک است (McGraw, 1994). با این وجود، فعالیت‌های مدیریتی از اهمیت بیش‌تری برخوردار بوده و می‌تواند محدوده وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را متاثر سازد. یکی از مهم‌ترین عوامل مدیریتی اثرگذار بر تغییر کیفیت خاک، استفاده از منابع آبی نامتعارف در بخش کشاورزی است که می‌تواند میزان هدایت، سدیم قابل تبادل (Ivan et al., 2010)، اسیدیته، میزان عناصر مغذی در محدوده ریشه، نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی (Vinten et al., 1983) و میزان عناصر سنگین تجمع یافته در لایه‌های سطحی خاک (Ghanbari et al., 2007; Feizi et al., 2001) را تحت تأثیر قرار دهد. از طرفی کمبود جهانی آب، استفاده از چنین منابعی در بخش کشاورزی به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین را اجتناب‌ناپذیر نموده است. با این وجود، افزایش روزافزون جمعیت و رسیدن آن به ۹/۲ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ (Mekennon & Hoekstra, 2012)، لزوم رعایت استانداردهای لازم در استفاده از منابع آب نامتعارف به منظور حفظ توان تولیدی خاک و عملکرد گیاه در حد مطلوب را امری مهم در راستای نیل به امنیت غذایی نموده است. در این راستا، تعیین پراکنش مکانی ویژگی‌های خاک در یک سطح مشخص می‌تواند راه‌کار مناسبی برای ارزیابی توان تولید و بهینه‌سازی تناسب اراضی، پایداری و حفاظت محیط زیست محسوب شود (Ozgoz et al., 2012). از طرفی انتخاب یک روش درون-یابی مناسب می‌تواند کارشناسان را در جهت نیل به اهداف مذکور کمک نماید. از بین روش‌های متعدد درون-یابی، روش‌های زمین‌آماري به دلیل در نظر گرفتن همبستگی و ساختار مکانی داده‌ها از اهمیت بالاتری در مقایسه با آمار کلاسیک برخوردار بوده و در طول دهه

گذشته به طور گسترده در تعیین برخی ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گرفته است (Karandish & Shahnazari, 2013). نقشه‌های رستری تهیه‌شده برای ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در استرالیا (McBratney, 2000)، منطقه زاگرس (Neal et al., 2004) و فلات اردوس (Cheng et al., 2006) کارایی روش‌های زمین‌آماري در این مناطق در برآورد ویژگی‌های مذکور نشان می‌دهد. تناسب روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ در تعیین تغییرپذیری برخی ویژگی‌های خاک در مطالعات پیشین گزارش شده است (Amini et al., 2002; Douaouni et al., 2006; Dueffera et al., 2006; Babazadeh et al., 2012; Sun et al., 2003; Ozgoz et al., 2012; Karandish & Shahnazari, 2014). علی‌رغم مزیت روش‌های زمین‌آماري، تناسب این روش‌ها برای یک خصوصیت خاص در تمام مکان‌ها ثابت نبوده و تعیین بهترین روش با کم‌ترین خطای تخمین مستلزم ارزیابی منطقه‌ای آن‌ها می‌باشد (Karandish & Shahnazari, 2014). همچنین فعالیت‌های زراعی همچون استفاده از منابع آبی نامتعارف می‌تواند کارایی این روش‌ها را تغییر دهد. لذا از آنجایی که تعیین نقشه‌های رستری ویژگی‌های کیفی خاک در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب، به دلیل دشواری نمونه‌برداری و هزینه‌های سنگین آزمایش‌های لازم، کمتر مورد توجه محققان بوده است. در این پژوهش، ضمن تعیین بهترین روش در تعیین پراکنش مکانی ویژگی‌های کیفی خاک، به بررسی تغییرپذیری آن‌ها در نتیجه‌ی استعمال بلندمدت فاضلاب تصفیه‌شده در ۱۹۰ هکتار از اراضی مجاور تصفیه‌خانه فاضلاب زابل پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی، ۱۹۰ هکتار از گندم‌زارهای تحت پوشش تصفیه‌خانه شهری زابل می‌باشد که با قدمتی فراتر از ۱۰ سال با فاضلاب تصفیه‌شده آبیاری می‌شود. روش تصفیه از نوع برکه‌های تثبیت بوده و آبیاری با استفاده از پساب خروجی در آخرین مرحله تصفیه صورت می‌گیرد. شهرستان زابل، با میانگین بلندمدت بارش سالانه، دمای حداقل و حداکثر به ترتیب برابر با ۵/۹- و ۶/۵۹ میلی‌متر، و ۴۹ درجه سانتی‌گراد، دارای اقلیم خشک و بیابانی تابستان‌های گرم و خشک بر اساس طبقه‌بندی کوپن می‌باشد. بافت غالب خاک در محدوده عمقی ۳۰-۰

میزان COD به عنوان میزان اکسیژن مورد نیاز برای تجزیه مواد و تبدیل آن‌ها به H_2O و CO_2 ، یکی دیگر از شاخص‌های تعیین قدرت آلاینده‌گی فاضلاب بوده و مقدار آن فراتر از مقادیر توصیه‌شده در استانداردهای مختلف می‌باشد. میزان عناصر مغذی همچون نیتروژن نیتراتی، نیتريت و فسفر فسفاتی نیز در فاضلاب تصفیه شده نیز بیش‌تر از مقدار مجاز آن بر اساس استانداردهای مورد بررسی بود. حضور کلیفرم‌های بیماری‌زا و نماتدهای انگلی در آب آبیاری بیش‌ازحد مجاز می‌تواند با تجمع در لایه های سطحی خاک و اندام هوایی گیاه، مخاطرات زیست محیطی را به همراه داشته باشد. جدول ۱ نشان می‌دهد میزان کلیفرم‌های گوارشی، کلیفرم کل و نماتدهای انگلی در فاضلاب تصفیه‌شده به خوبی در محدوده مقادیر توصیه‌شده قرار دارد. به این ترتیب نتایج آنالیز کیفیت پساب تصفیه‌شده، محدودیت کاربرد آن در آبیاری و لزوم رعایت ملاحظات زیست‌محیطی به منظور کاهش اثرات منفی آن در درازمدت را نشان می‌دهد.

سانتی‌متری از نوع لومرسی می‌باشد. برخی ویژگی‌های فاضلاب تصفیه‌شده در جدول ۱ ارائه شد. بر اساس این جدول، بسیاری از شاخص‌های مورد ارزیابی در پساب تصفیه‌شده بالاتر از محدوده استاندارد بودند. فراتر بودن میزان هدایت الکتریکی و SAR از مقادیر استاندارد، می‌تواند زمینه شور و سدیمی شدن خاک و در نهایت مسموم شدن گیاه را فراهم آورد. حد آستانه شوری قابل تحمل به‌وسیله گیاه گندم به منظور جلوگیری از کاهش عملکرد، $4/5 \text{ dS m}^{-1}$ می‌باشد. اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD_5) یکی از مهم‌ترین شاخص‌های آلودگی آب است. این شاخص نشان‌دهنده‌ی میزان اکسیژن مورد نیاز باکتری‌ها برای تثبیت مواد آلی قابل تجزیه تحت شرایط هوازی می‌باشد. مقدار آن در پساب تصفیه‌شده در محدوده مجاز استانداردهای زیست‌محیطی ایران قرار داشته و در حد کمی بالاتر از مقدار آن از حد استاندارد انجمن محیط زیست آمریکا (EPA) بود. اغلب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب قادرند میزان BOD_5 را تا ۹۰ درصد کاهش دهند. علاوه بر این شاخص،

جدول ۱- خصوصیات کیفی پساب تصفیه‌شده

Table 1- Qualitative properties of treated wastewater

استانداردها*				پساب تصفیه‌شده	واحد	پارامتر
Standards				Refined Waste	Unit	Parameters
FAO	EPA	WHO	**IRNDOE	Water		
6.5-8.5	6-8.5	6-8.5	8.6-8.7	8.6-8.7		PH
0.7	0.7	-	6-8	6-8	(dS m^{-1})	EC
3	3	-	12-15	12-15		SAR
-	-	100	50-70	50-70	mg l^{-1}	BOD_5
-	-	200	200-260	200-260	mg l^{-1}	COD
5	-	-	12.8-15	12.8-15	mg l^{-1}	فسفر فسفاتی (Phosphorus)
-	5	-	10-30	10-30	mg l^{-1}	نیتروژن نیتراتی (Nitrogen)
-	-	-	2-2.5	2-2.5	mg l^{-1}	نیتريت (Nitrite)
-	1000	1000	85-400	85-400	MPN 100ml^{-1}	کلی‌فرم کل (Total Coliform)
1000	1000	400	10	10	MPN 100ml^{-1}	کلی‌فرم گوارشی (Digested Coliform)

* برگرفته از مروی بر استانداردها و تجارب استفاده از پساب، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

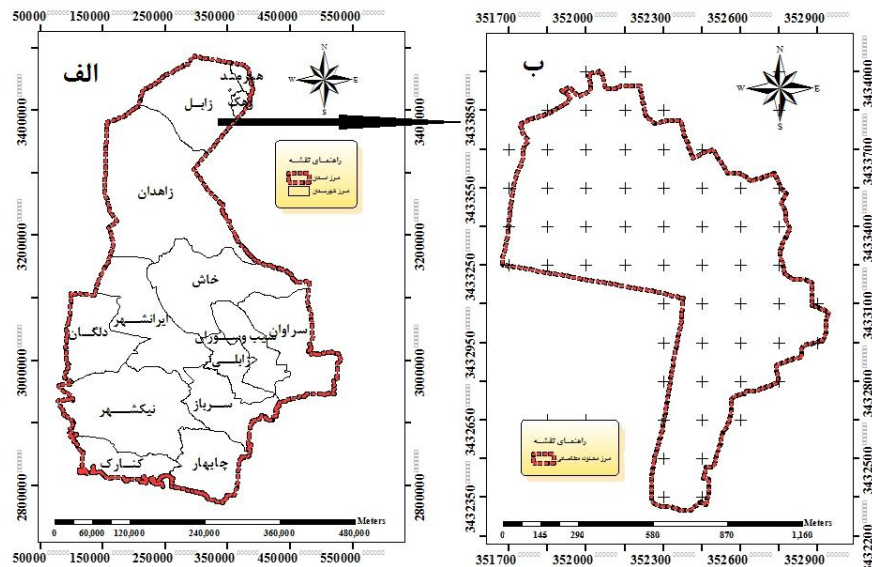
Extracted by review of standards and experience using of waste water, International committee of irrigation and drainage of Iran

** IRNDOE: سازمان حفاظت محیط زیست ایران

Iranian Department of Environment

انتقال به آزمایشگاه، مقادیر درصد شن، رس، سیلت، بافت خاک، هدایت الکتریکی اشباع، واکنش خاک، سدیم و پتاسیم تبادلی، کلسیم، منیزیم و چگالی ظاهری نمونه‌های خاک تعیین شد.

پس از تعیین محدوده مطالعاتی با استفاده از GPS، کل منطقه در محیط GIS به پیکسل‌هایی با ابعاد ۱۵۰ در ۱۵۰ مترمربع تقسیم (شکل ۱) و با نمونه‌برداری از محدوده عمقی ۳۰-۰ سانتی‌متری در مرکز هر پیکسل و



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی در استان سیستان و بلوچستان (الف) و موقعیت نقاط نمونه‌برداری (ب)

Fig. 1- The location of study area in Sistan and Blouchestan Province (a) and the location of sampling points (b)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAE = ABS\left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i - P_i}{n}\right) \quad (3)$$

که در آن‌ها، O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و برآوردشده با روش مورد نظر، Q_i میانگین تمام مقادیر مشاهده‌ای و n تعداد داده‌ها می‌باشد. مقادیر کم‌تر و نزدیک به صفر برای معیارهای مذکور نشان‌دهنده برتری مدل خواهد بود.

نتایج و بحث

تحلیل داده‌ها و واریوگرام

نظر به اهمیت شرط نرمال بودن داده‌ها در استفاده از روش کریجینگ و با توجه به عدم نرمال بودن داده‌های SAR، ESP، EC و pH، قبل از تحلیل واریوگرام، بر

پس از جمع‌آوری داده‌های مشاهده‌ای، امکان پهنه‌بندی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر اساس روش‌های زمین‌آماري میانگین متحرک وزنی با توان‌های ۲، ۴ و ۶ کریجینگ و کوکریجینگ با استفاده از متغیرهای کمکی مناسب مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، پس از نرمال‌سازی داده‌ها، وجود پیوستگی مکانی بین داده‌ها بر اساس نیم‌تغییرنمای تجربی بررسی و با استفاده از فن ارزیابی تقاطعی به ارزیابی روش‌های مذکور در تعیین مقادیر متغیرها در نقاط مجهول پرداخته شد. مقایسه روش‌های مختلف بر اساس سه معیار میانگین خطای انحراف^۱، جذر مجموع مربعات باقیمانده خطا^۲ و دقت^۳ به شرح روابط زیر صورت گرفت (Ghorbani-Dashtaki *et al.*, 2009; Nash and Sutcliffe, 1970; Parchami-Araghi *et al.*, 2013).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - P_i}{n} \quad (1)$$

1. Mean bias error (MBE)
2. Root mean square error (RMSE)
3. Mean absolute error (MAE)

اساس دو معیار چولگی و کشیدگی، متغیرهای مورد بررسی با استفاده از روش لگاریتم، نرمال شد و میزان معیارهای ارزیابی مذکور به کمتر از یک کاهش داده شد. جدول ۲ ویژگی‌های مهم آماری پارامترهای منتخب خاک قبل و بعد از نرمال‌سازی را نشان می‌دهد. بر اساس طبقه‌بندی ویل‌دینگ و درس (Wilding & Dress 1983)، متغیرهایی با ضریب تغییرات کم‌تر از ۰/۱۵ دارای تغییرات کم، بین ۰/۱۵ تا ۰/۳۵ دارای تغییرات متوسط و فراتر از ۰/۳۵ دارای تغییرات شدید هستند. بر این اساس، قبل از نرمال ساختن داده‌ها، کلیه متغیرها به جز pH دارای تغییرات زیاد بود. تغییرات محدود pH خاک در پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده (Yost et al., 1982;).

جدول ۲- پارامترهای آماری برای متغیرهای هدایت الکتریکی (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR)، واکنش خاک (pH) و درصد سدیم تبادل (ESP) قبل و بعد از نرمال‌سازی

Table 2- Statistical parameters for electrical conductivity (EC), sodium adsorption ratio (SAR), acidity (pH) and exchangeable sodium percentage (ESP)

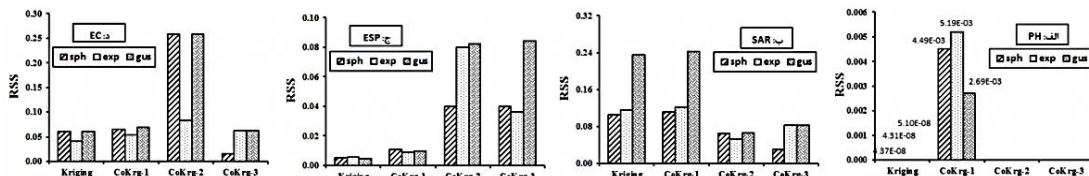
معیار		Criteria					متغیر*
کشیدگی	چولگی	ضریب تغییرات	خطای استاندارد	میانگین	حداکثر	حداقل	Variable
Kurtosis	Skewness	Coefficient of variation	Standard Error	Average	Maximum	Minimum	
6.81	2.69	1.69	8.63	7.50	41	0.18	EC1
1.28	0.91	0.01	0.69	1.85	3.74	0.17	EC2
8.61	3.05	20.57	31.09	24.53	147.3	0.70	SAR1
1.24	0.86	0.01	0.71	3.00	5.01	1.36	SAR2
3.38	1.87	4.62	14.73	21.24	68.35	0.0	ESP1
1.48	0.85	0.002	0.31	3.67	4.48	3.0	ESP2
-0.66	-0.07	0.001	0.25	8.47	8.90	7.9	pH

* ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به قبل و بعد از نرمال‌سازی می‌باشد.

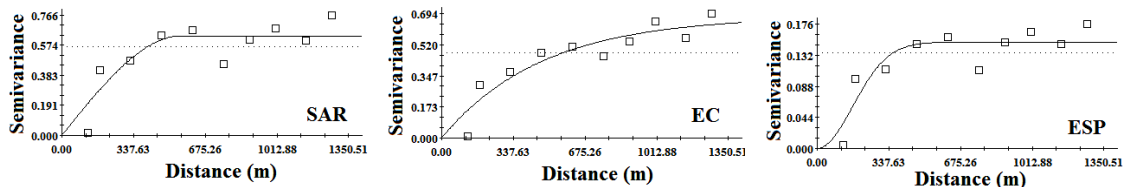
* 1 and 2 is related to before and after normalization, respectively

مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است (Babazadeh et al., 2012; Sun et al., 2003). شکل ۳ واریوگرام‌های تئوری و جدول ۳ ویژگی‌های آن‌ها را نشان می‌دهد. نتایج، حاکی از وجود اثر قطعه‌ای برای تمام واریوگرام‌ها بوده که می‌تواند به علت خطای نمونه‌برداری، تغییرات محدود دامنه، تغییرات تصادفی و یا ذاتی باشد (Sun et al., 2003). با این وجود، مقدار این پارامتر برای pH خاک، به دلیل تغییرات محدودتر، از مقادیر کمتری برخوردار بود.

ضرایب همبستگی پیرسون در ماتریس کوواریانس نشان داد بر اساس فرمول پیرسون ارتباط مثبت و معنی‌داری در سطح پنج درصد بین متغیر EC با Na، SAR، و pH، بین ESP با EC، SAR، و pH، بین SAR با EC، و pH با ارتفاع محل وجود دارد. لذا از آن‌ها به عنوان متغیر کمکی در روش کوکریجینگ استفاده شد. ارزیابی مدل‌های مختلف واریوگرام بر اساس معیار مجذور مربعات خطا نشان داد، مدل گوسی بهترین برازش را بر مقادیر ESP داشته و برای سایر واریوگرام‌های مستقل در روش کریجینگ و واریوگرام‌های متقابل در روش کوکریجینگ، کمترین خطا در برازش مدل‌های سهمی و کروی بر مقادیر واقعی به دست آمد (شکل ۲). کارایی این مدل‌ها در



شکل ۲- مقادیر مجذور مربعات خطا (RSS) برای مدل‌های مختلف در روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ
 Fig. 2- Root sum squared (RSS) of different models in Kriging and Co-kriging methods



شکل ۳- واریوگرام‌های تئوری هدایت الکتریکی (EC)، نسبت جذبی سدیم (SAR) و سدیم قابل تبادل (ESP)
 Fig. 3- Theoretical variogram of electrical conductivity (EC), sodium adsorption ratio (SAR) and exchangeable sodium percentage (ESP)

جدول ۳- ویژگی‌های واریوگرام‌های تئوری و واریوگرام‌های متقابل
 Table 3- Characteristics of theoretical and cross variograms

Co/(Co+C)	R (m)	Co+C	Co	مدل Model	روش Method	متغیر کمکی Auxiliary variable	پارامتر Parameter
0.99	1032	0.68	0.001	سه‌مشی Sagittal	Kriging	-	EC
0.99	523	0.66	0.001	سه‌مشی Sagittal	CoKrg-1	Na	
0.74	1200	0.62	0.16	سه‌مشی Sagittal	CoKrg-2	SAR	
0.72	1300	0.29	0.08	کروی Spherical	CoKrg-3	ESP	
0.75	565	0.64	0.001	کروی Spherical	Kriging	-	SAR
0.99	563	0.64	0.001	کروی Spherical	CoKrg-1	Na	
0.99	508	0.65	0.001	سه‌مشی Sagittal	CoKrg-2	EC	
0.75	700	0.28	0.07	کروی Spherical	CoKrg-3	ESP	ESP
0.99	236	0.15	0.0001	گوسین Gaussian	Kriging	-	
0.99	456	0.27	0.000	سه‌مشی Sagittal	CoKrg-1	EC	
0.72	1300	0.32	0.088	کروی Spherical	CoKrg-2	SAR	
0.74	600	0.35	0.089	سه‌مشی Sagittal	CoKrg-3	Na	pH
0.74	2862	0.0013	0.0003	سه‌مشی Sagittal	Kriging	-	
0.99	3110	0.2922	0.0001	کروی Spherical	CoKrg-1	Elevation	

اساس، متغیرهای EC و ESP از ساختار مکانی ضعیف و پارامترهای SAR و pH از ساختار مکانی متوسط برخوردار بود. نتایج پژوهش دوانگر و همکاران (Davatgar *et al.*, 2001) و سان و همکاران (Sun *et al.*, 2003) به ترتیب وجود یا ساختار مکانی متوسط و قوی را برای ویژگی‌های خاک نشان می‌دهد. ویژگی‌های ذاتی سنگ‌بستر در شکل-گیری خاک و فعالیت‌های مدیریتی اعمال‌شده در طول

شدت وابستگی مکانی ویژگی‌های خاک را می‌توان از معیار کامباردلا و همکاران (Cambardella *et al.*, 1994) تعیین نمود. این شاخص، به صورت نسبت اثر قطعه‌ای به سقف بوده و مقادیر کمتر از ۲۵ درصد برای آن، نشان‌دهنده ساختار مکانی قوی، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد نشان‌دهنده ساختار مکانی متوسط و بیش‌تر از ۷۵ درصد نشان‌دهنده ساختار مکانی ضعیف می‌باشد. بر این

تبادلی و اسیدیته خاک بر اساس معیارهای ارزیابی در جدول ۴ ارائه شده است با در نظر گرفتن وزن یکسان برای معیارهای ارزیابی، روش‌های میانگین متحرک وزنی با توان ۴، میانگین متحرک وزنی با توان ۲، میانگین متحرک وزنی با توان ۵ و کریجینگ، بیش‌ترین انطباق بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را به ترتیب برای پارامترهای EC، pH، SAR و ESP منتج شدند. برای پارامتر ESP، مقادیر میانگین خطای تخمین نزدیک به صفر (۰/۴) بیانگر نارایب بودن تخمین‌ها در روش کریجینگ بوده و صحت تخمین را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۴، به جز روش کوکریجینگ با متغیر ارتفاع در برآورد EC، افزودن متغیر کمکی اغلب به دلیل افزایش شعاع تأثیر، باعث افزایش دقت تخمین در مقایسه با روش کریجینگ شد. لکن، استفاده از روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ در برآورد پارامترهای EC، pH و SAR میزان خطای تخمین را بین ۱/۱۴ تا ۵/۶ درصد در مقایسه با روش منتخب افزایش می‌دهد. علیرغم برتری این روش‌ها در پژوهش‌های پیشین (Amini et al., 2002; Neal et al., 2004; Duffera et al., 2006)، لکن همان‌گونه که در فرضیات این پژوهش ذکر شد، برتری روش میانگین متحرک وزنی نسبت به دو روش مذکور در تخمین مقادیر EC، SAR و pH نشان می‌دهد که تناسب این روش‌ها برای مناطق مختلف مطلق نبوده و مستلزم انجام ارزیابی‌های منطقه‌ای می‌باشد.

شکل ۴، تغییرات مکانی متغیرهای EC، pH، SAR و ESP را بر اساس روش منتخب نشان می‌دهد. وجود یک ساختار و تغییرات مکانی مشابه برآورد شده با روش زمین-آماری منتخب، سطح اعتماد بالای این روش‌ها در تخمین مقادیر ویژگی‌های مورد نظر در نقاط مجهول را به اثبات می‌رساند. در نواحی مرکزی، مقادیر پارامترها از حداکثر مقدار خود برخوردار بوده و در نواحی شمالی مقدار آن‌ها کاهش می‌یابد.

تحلیل کیفی وضعیت شوری و سدیمی خاک بر اساس روش منتخب زمین‌آماری از نظر تناسب برای کاشت گیاه گندم

پس از تهیه نقشه‌های رستری برای خصوصیات EC، SAR و ESP با استفاده از روش‌های منتخب، طبقه‌بندی آن‌ها بر اساس معیار طبقه‌بندی خاک‌های شور و سدیمی آمریکا

فصل رشد گیاه، از جمله مهم‌ترین عوامل موثر بر میزان تغییرپذیری ویژگی‌های خاک و متعاقباً پیوستگی مکانی آن‌ها می‌باشد (McGraw, 1994). کوئین و ژانگ (Quine & Zhang 2002)، تأثیر غالب ویژگی‌های ذاتی خاک بر ویژگی‌های مورد بررسی خاک را دلیل اصلی ساختار مکانی قوی و تأثیر غالب عوامل مدیریتی همچون عملیات خاک‌ورزی و کود دهی را مهم‌ترین علت ساختار مکانی ضعیف معرفی نمودند. کاهش ساختار مکانی میزان پتاسیم در خاک در نتیجه‌ی کود دهی در نتایج پژوهش چینگ و همکاران (Cheng et al., 2006) به اثبات رسیده است. با این وجود، جدول ۳ نشان می‌دهد میزان ساختار مکانی برای متغیر EC با استفاده از متغیرهای SAR و ESP و برای متغیر ESP با استفاده از متغیرهای SAR و Na افزایش یافته است که تأثیر مثبت استفاده از متغیرهای کمکی مذکور در افزایش پیوستگی را نشان می‌دهد. این نتیجه با یافته‌های تحقیقات پیشین مطابقت دارد (Duffera et al., 2006; Douaoui et al., 2006).

میزان شعاع تأثیر فراتر از فواصل نمونه‌برداری، امکان استفاده از روش‌های زمین‌آماری در برآورد ویژگی‌های خاک در نقاط مجهول را فراهم می‌سازد. کم‌ترین و بیش‌ترین شعاع همبستگی به ترتیب مربوط به پارامترهای درصد سدیم قابل تبادل (۲۳۶ متر) و میزان واکنش خاک (۲۸۶۲ متر) بود. استفاده از متغیرهای کمکی میزان شعاع تأثیر را بین ۸/۷ تا ۴۵۰ درصد افزایش داده و بیش‌ترین تأثیر را بر تقویت ساختار مکانی پارامتر ESP داشت. همچنین، افزایش شعاع تأثیر با متغیر کمکی ارتفاع می‌تواند به دلیل یکسان بودن سایر عوامل اثرگذار بر شعاع تأثیر همچون کاربری، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های سنگ‌بستر در منطقه باشد. با این وجود، استفاده از متغیر کمکی Na در واریوگرام متقابل برای پارامتر EC و متغیر کمکی Na و EC برای SAR باعث کاهش میزان شعاع تأثیر شد. به طور کلی، کم بودن شعاع تأثیر را می‌توان تأثیر نامناسب استفاده از فاضلاب با هدایت الکتریکی و سدیم فراتر از حد استاندارد و کیفیت نامناسب آن برای بخش کشاورزی نسبت داد.

پهنه‌بندی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

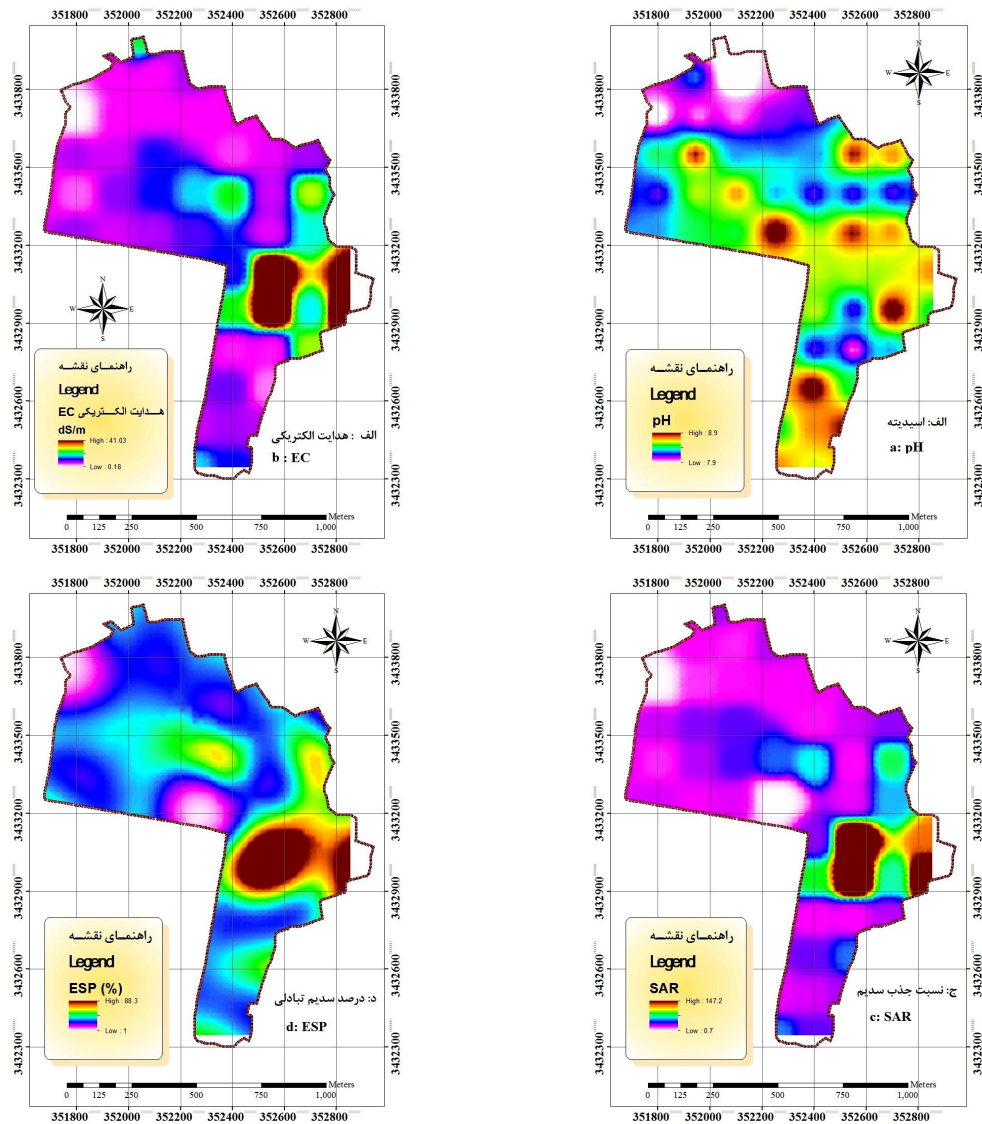
نتایج ارزیابی روش‌های مختلف زمین‌آماری در برآورد مقادیر هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، درصد سدیم

میزان عملکرد محصول شود. در حقیقت، افزایش میزان هدایت الکتریکی حین فرآیند تصفیه و استعمال طولانی-مدت و بدون مدیریت آن، زمینه شور شدن خاک در منطقه را فراهم آورده است. هدایت الکتریکی یکی از ویژگی‌های پایه موثر بر بهره‌وری و حاصلخیزی ذاتی خاک می‌باشد (Babazadeh *et al.*, 2012). افزایش این پارامتر فراتر از حد مجاز، با افزایش فشار اسمزی باعث کاهش جذب آب و عملکرد محصول شده و می‌تواند اثرات اقتصادی زیادی را به همراه داشته باشد.

(Soil survey manual, 1993) به شرح جدول ۵، صورت گرفت. شکل ۵، پراکنش مکانی کلاس‌های موجود در جدول ۵ در سطح منطقه و شکل ۶، میزان فراوانی هر کلاس را نشان می‌دهد. کم‌تر از ۳ درصد از کل منطقه دارای هدایت الکتریکی کمتر از 2 dS m^{-1} بوده و در گروه خاک غیر شور قرار دارد. بیش‌ترین فراوانی‌ها برای این پارامتر به ترتیب در کلاس‌های $2-4 \text{ dS m}^{-1}$ (۳/۴۰ درصد) و $4-8 \text{ dS m}^{-1}$ (۶/۳۲ درصد) مشاهده شد که مشتمل بر گروه خاک‌های کمی شور تا تقریباً شور می‌باشد. همچنین بیش‌از ۲۴ درصد از منطقه، دارای خاک شور بوده و عدم اصلاح آن می‌تواند باعث کاهش معنی‌دار

جدول ۴- ارزیابی روش‌های مختلف زمین‌آمار در برآورد خصوصیات خاک
Table 4- Evaluating different geostatistical methods in estimating soil properties

روش Method								معیار Criteria	پارامتر Parameter
CoKrg-3	CoKrg-2	CoKrg-1	Kriging	WMA-5	WMA-4	WMA-3	WMA-2		
ESP	SAR	Na							
1.15	1.15	1.15	1.20	1.22	1.38	1.54	1.66	MBE	EC
4.22	4.22	4.22	4.23	4.18	4.02	4.03	4.05	MAE	
7.81	7.81	7.82	7.83	7.57	7.49	7.49	7.62	RMSE	
3	3	4	5	2	1	6	7	Rank	
-	-	Elevation							
-	-	0.001	-0.001	0.004	0.001	-0.002	-0.005	MBE	pH
-	-	0.187	0.179	0.177	0.176	0.177	0.177	MAE	
-	-	0.225	0.219	0.215	0.214	0.214	0.215	RMSE	
-	-	5	5	4	3	2	1	Rank	
ESP	EC	Na							
4.62	4.62	4.58	4.48	4.23	4.80	5.37	5.81	MBE	SAR
14.15	14.15	14.13	14.29	13.91	13.48	13.39	13.58	MAE	
27.46	27.45	27.45	27.79	27.14	27.14	27.49	28.18	RMSE	
4	4	3	6	1	2	5	7	Rank	
Na	SAR	EC							
1.20	1.25	1.28	0.40	0.97	1.16	1.36	1.48	MBE	ESP
8.77	8.77	8.68	8.52	8.40	8.29	8.37	8.43	MAE	
12.34	12.34	12.24	11.43	12.05	12.06	12.21	12.53	RMSE	
6	7	5	1	2	3	4	8	Rank	

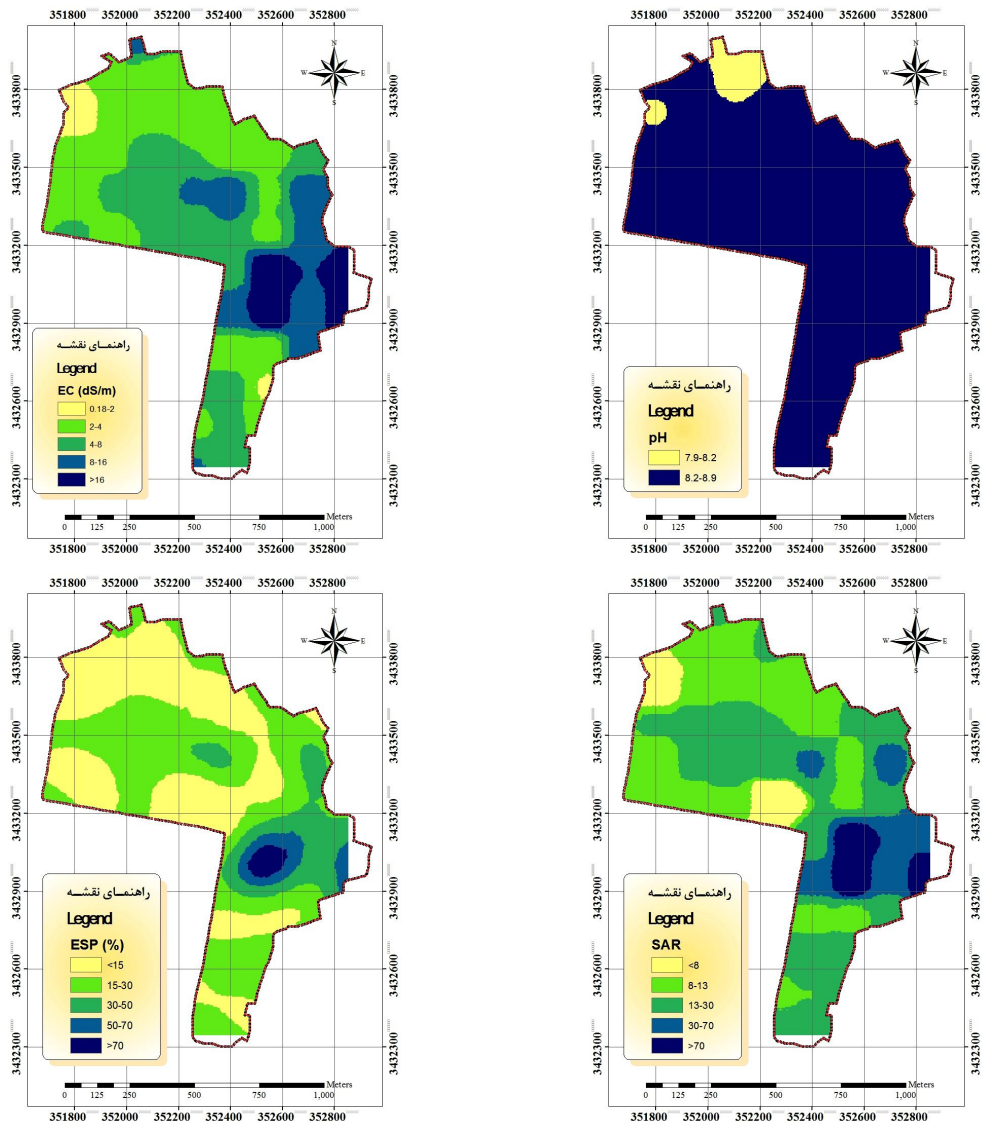


شکل ۴- تغییرات مکانی شاخص‌های pH (الف)، EC (ب)، SAR (ج) و ESP (د)
 Fig. 4- Spatial variation of pH (a), EC (b), SAR (c) and ESP (d)

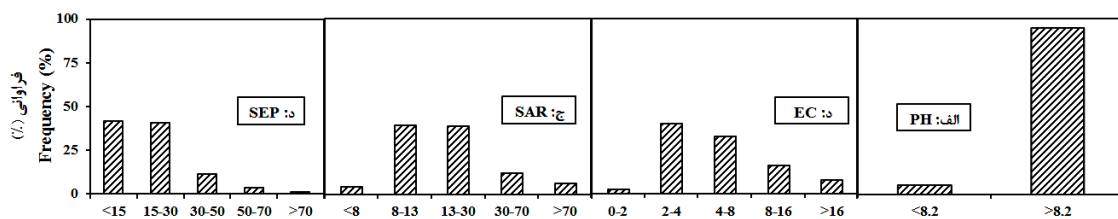
جدول ۵- گروه‌بندی خاک‌های شور و سدیمی بر اساس معیار طبقه‌بندی آمریکا (Soil Survey Manual, 1993)

Table 5- Classifying salty and sodic soil based on American classifying index (Soil Survey Manual, 1993)

خطر سدیم Sodium hazard	درصد سدیم تبادل (ESP) Exchangeable sodium percentage	نسبت جذب سدیم Sodium absorption ratio	خطر شوری Salinity hazard	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity (dS m ⁻¹)
Non sodic	<15	<8	Non saline	0-2
Slightly sodic	15-30	8-13	Slightly saline	2-4
Moderately sodic	30-50	13-30	Moderately saline	4-8
Strongly sodic	50-70	30-70	Strongly saline	8-16
Very Strongly sodic	>70	>70	Very Strongly saline	>16



شکل ۵- طبقه‌بندی مکانی شاخص‌های pH (الف)، EC (ب)، SAR (ج) و ESP (د) بر اساس استاندارد آمریکا
 Fig. 5- Spatial classification of pH (a), EC (b), SAR (c) and ESP (d) indices based on American Standard



شکل ۶- هیستوگرام طبقات مختلف پارامترهای pH (الف)، EC (ب)، SAR (ج) و ESP (د) بر اساس استاندارد آمریکا
 Fig. 6- Histogram of different classes of pH (a), EC (b), SAR (c) and ESP (d) parameters based on American Standard

استفاده از منابع آب نامتعارف همچون پساب‌های تصفیه‌خانه می‌تواند اثرات منفی بر رشد گیاه بگذارد

علاوه بر اثرات منفی شوری خاک، ایجاد مسمومیت به‌وسیله یون‌هایی همچون سدیم، کلر و بر در نتیجه‌ی

برای شناسایی نوع مشکل ایجاد شده در خاک باشد. بر این اساس، پس از تهیه نقشه‌های پراکنش مکانی EC و ESP، با روی هم گذاری نقشه‌های تهیه‌شده در محیط GIS، کل منطقه از نظر شور و سدیمی بودن بر اساس معیار آزمایشگاه شوری خاک آمریکا به چهار کلاس غیرشور-غیرسدیمی، غیرشور-سدیمی، شور-غیرسدیمی و شور-سدیمی تقسیم شد. نتایج نشان می‌دهد که کم‌ترین و بیش‌ترین فراوانی برای گروه‌های خاک به ترتیب به گروه‌های خاک غیرشور-غیرسدیمی (۱۷/۹ درصد) و خاک شور-سدیمی (۳۲/۱ درصد) تعلق داشت. هر یک از گروه خاک‌های شور-غیرسدیمی و غیرشور-سدیمی ۲۵ درصد از کل منطقه مطالعاتی را به خود اختصاص دادند. به این ترتیب، فراتر رفتن میزان پارامترهای EC، SAR، ESP و pH از حد استاندارد، لزوم اصلاح خاک در جهت حفظ منافع اقتصادی و محیط زیست طبیعی در منطقه‌ی مطالعاتی را به اثبات می‌رساند.

نتیجه‌گیری کلی

برتری روش میانگین متحرک وزنی در مقایسه با روش کریجینگ در تخمین متغیرهای متغیرهای pH، SAR و EC (به استثنای ESP)، ضرورت انجام واسنجی‌های منطقه‌ای قبل از استعمال این روش‌ها را نشان می‌دهد. مقایسه با استانداردهای موجود نشان می‌دهد که استعمال بدون مدیریت فاضلاب تصفیه‌شده باعث تخریب خاک و شور و سدیمی شدن آن در بخش وسیعی از منطقه مطالعاتی شد. این مسئله همراه با محدودیت شدید منابع آبی و لزوم استفاده از منابع آب نامتعارف در منطقه مطالعاتی، اهمیت کاربرد راهکارهای مدیریتی همچون آبشویی‌های لازم در فصول غیرکشت و یا ترکیب آب سالم با فاضلاب تصفیه‌شده جهت اصلاح خاک و به منظور حفظ کشاورزی پایدار و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی را به اثبات می‌رساند.

(Barzegar, 2012). بر اساس پارامتر ESP خطر سدیم در بیش از ۴۱ درصد از منطقه در کلاس کم تا متوسط قرار داشته و بیش از ۱۶ درصد از کل منطقه داری خطر سدیم متوسط تا خیلی زیاد می‌باشد. همچنین معیار SAR نیز خطر وجود سدیم را در وسعتی معادل ۵۶/۴ درصد از کل منطقه در کلاس متوسط تا خیلی زیاد ارزیابی می‌کند. در برخی مطالعات پیشین نیز، افزایش میزان سدیم و شور شدن خاک در نتیجه‌ی استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده گزارش شده است (Ivan *et al.*, 2010). تجمع سدیم در خاک می‌تواند با تخریب و شکستن ساختمان خاک (Emdad *et al.*, 2003)، پراکندگی کلونیدها و ذرات رس و تورم آن‌ها و در نتیجه کاهش پایداری ساختمان خاک (Hadas & Frenkel, 1982) و تضعیف شرایط فیزیکی آن (Nayebloei & Ebrahimi, 2008) موجب کاهش نفوذپذیری و تضعیف راندمان آبیاری شود. علاوه بر آن، در خاک‌های سدیمی، ایجاد مسمومیت در نتیجه‌ی افزایش اسیدیته خاک می‌تواند باعث بروز واکنش‌های منفی گیاه به تغییرات محیطی شده و خسارات اقتصادی بسیاری را به همراه بیاورد.

یکی از ویژگی‌های متمایز خاک‌های شور و خاک‌های سدیمی، حد اسیدیته در خاک می‌باشد. خاک‌های شور اغلب واکنش خاک کمتر از ۸/۲ و خاک‌های سدیمی دارای واکنش خاک بیش‌تر از ۸/۲ می‌باشد (Barzegar, 2008). پس از تهیه نقشه پراکنش مکانی و میزان واکنش خاک در محیط GIS معلوم شد که میزان واکنش خاک در کم‌تر از شش درصد از منطقه کم‌تر از ۸/۲ و در باقی مناطق بیش‌تر از ۸/۲ می‌باشد (شکل ۵). بر این اساس، در بیش‌تر از ۹۴ درصد از منطقه، خطر سدیم بر شوری غالب بوده و شرایط خاک را به سمت سدیمی سوق می‌دهد (شکل‌های ۵ و ۶). یکی از مهم‌ترین دلایل افزایش میزان اسیدیته خاک را می‌توان به حضور پتاسیم در فاضلاب تصفیه‌شده و ورود تدریجی آن به خاک نسبت داد (Sun *et al.*, 2003). طبقه‌بندی وضعیت شور و سدیمی بودن خاک بر اساس معیارهای موجود می‌تواند ملاک بهتری

References

- Alizadeh A. 2011. New drainage (planning, desining and manageming the drainage systems). 5th edition. Publication of Astan Ghods Razavi, 496 p. (In Persian).
- Amini M, Khademi H and Fathianpour N. 2002. Comparing kriging and kokriging in estimating chloride concentration in soil. *Iranian journal of agricultural science*, 33(4): 741-747. (In Persian).
- Babazadeh S, Davatgar N, Darigh-Goftar F and Peykan M. 2012. Spatial variation of some soil properties related to fertility in rice fields in Guilan Province. *Soil Management for Sustainable Agriculture*, 2(1): 127- 139. (In Persian).
- Barzegar A. 2008. Salt-affected soil: diagnosis and productivity. 2nd edition. Shahid Chamran University Press. 355p. (In Persian).
- Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF and Konopka AE. 1994. Field-scale variability of soil proerties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 1501-1511.
- Cheng X, Chen J and Li B. 2006. Spatial relationships among species above-ground biomass, N, P in degraded grassland in Ordos plateau. *Journal of Arid Environments*, 30: 75-88.
- Davatgar N, Neyshabouri MR and Moghadam M. 2001. The analysis of information obtained from soil variables map by Use of Semivariogram Models. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 31: 725-735. (In Persian).
- Douaoui AE, Nicolas H and Walter C. 2006. Detecting salinity hazard within a semi-arid context by means of combining soil and remote – sensing data. *Geoderama*, 134: 217-230.
- Duffera M, White JG and Weisz R. 2006. Spatial variability of southwestern U.S. Coastal plain soil physical properties. *Geoderama*, 128: 121-133.
- Feizi M. 2001. Effect of treated wastewater on accumulation of heavy metals in plants and soil. ICID International Workshop on Wastewater Reuse Management. Seoul, Korea, pp: 137-146.
- Ghanbari A, Abedi Koupai J and Taie-Semiromi J. 2007. Effect of municipal wastewater irrigation on yield and quality of wheat and some soil properties in Sistan zone. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 10(4): 59-74. (In Persian).
- Ghorbani-Dashtaki Sh, Homaei M and Mahdian MH. 2009. Estimating the infiltration parameters using neural network. *Journal of Soil and Water Conservation*, 23(1): 185-198. (In Persian).
- Karandish F and Shahnazari A. 2013. Zone classification of soil salinity in maize root zone under different irrigation treatments using geostatistical methods. *Water and Soil Science*, 24(2): 243-256. (In Persian).
- Karandish F and Shahnazari A. 2014. Appraisal of the geostatistical methods to estimate Mazandaran coastal ground water quality. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 12(1): 129-146.
- Mekonnen MM and Hoekstra AY. 2012. Water footprint benchmarks for crop production. UNESCO-IHE. Research paper series, No.64. 25p.
- Nash JE and Sutcliffe JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282-290.
- Neal M, Khademi H and Hajabbasi AM. 2004. Response of soil quality indicators and their spatial variability to land degradation in central Iran. *Applied Soil Ecology*, 27: 221-232.
- Ozgoz E, Gunal H, Acir N, Gokmen F, Birol M and Budak M. 2011. Soil quality and spatial variability assessment of land use effects in a Typic Haplustoll. *Land Degradation and Development*, 26: 1115-1126.
- Parchami-Araghi F, Mirlatifi SM, Ghorbani dashtaki S and Mahdian MH. 2013. Point estimation of soil water infiltration process using artificial neural networks for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 481: 35-47.
- Quine TA and Zhang Y. 2002. An investigation of spatial variation in soil erosion, soil properties and crop production within an agricultural field in Devon, UK. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57: 50-60.
- Sun B, Zhou Sh and Zhao Q. 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 115: 85-99.
- Vinten AJA, Mingelgrin U and Yaron B. 1983. The effect of suspended solids in wastewater on soil hydraulic conductivity: II. Vertical distribution of suspended solids. *Soil Science Society of America Journal*, 47: 408-412.

- Wilding LP and Dress LR. 1983. Spatial variability and pedology. In: Wilding LP, Smeckand NE, Hall GF, (ed.). Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions. Elsevier Science Publication, pp: 83-116.
- Yost RS, Uehara G and Fox RL. 1982. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas: I. Semivariograms. Soil Science Society of America Journal, 46: 1028–1032.
- Zhou HZ, Gong ZT and Lamp J. 1996. Study on soil spatial variability. Acta Pedologica Sinica, 33: 232–241.

Analyzing the Geostatistical Methods in Spatial Monitoring of Saline and Sodic Condition of Soils under Treated - Wastewater Irrigation

Fatemeh Karandish¹

(Received: October 2014 Accepted: January 2015)

ABSTRACT

Unmanaged use of natural resources such as soil would lead to deterioration of its quality and fertility. Consequently, spatial monitoring of these properties is necessary to find the optimal management options to protect soil fertility. Thus, in this study, the long-term effects of treated wastewater irrigation on qualitative properties of surface soil layer were spatially monitored using geostatistical methods and were compared with worldwide standards. Consequently, the soil qualitative properties including sodium adsorption ratio (SAR), exchangeable sodium percentage (ESP), electrical conductivity (EC) and acidity (pH) was analyzed in pixels with 150×105 meter dimension and the possibility of extracting raster maps using weighting moving average (WMA), kriging and co-kriging methods was investigated. Results showed that kriging and WMA had the least estimation error for ESP and the other parameters, respectively, based on the evaluating indices. Also using covariates does not have positive effect on increasing range of influence and interpolation accuracy. Comparing the prepared raster maps by the selected method with the standard values of Soil Survey Manual of USA showed that unmanaged use of unconventional water caused more than 97% of the study area to have saline soils. Also, hazard of sodium in the soils dominated to salinity problem in more than 94% of the study area. These could have irreparable damages under water crisis through degrading soil structure. In conclusion, for sustainable agriculture and food security in the study area it is necessary to offer management options for soil improvement such as leaching in uncultivated seasons or combined irrigation with fresh water to protect economic and environmental issues

Keywords: Spatial monitoring, Saline soil, Sodic soil, Sustainable agriculture

1- Assistant Professor, Department of Water Engineer, Faculty of Soil and Water, Zabol University, Iran. (Corresponding author)
Email: Karandish_h@yahoo.com