سنجش از دور و GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال هشتم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۵
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.8, No. 3, Autumn 2016

۷۷-۹۰

ارزیابی کارآیی روش‌های درون‌یابی برای تخمین PH و EC خاک

(مطالعهٔ موردی: بخش درودزن در استان فارس)

الهام سلیمانی ساردو*[۱]، فاطمه مقصود[۲]، علی‌اکبر دماوندی[۳]

۱. دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد بیابانزدایی، دانشکدهٔ کویرشناسی، دانشگاه سمنان
۲. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس تهران
۳. عضو هیئت علمی مؤسسهٔ آموزش عالی علمی کاربردی جهاد کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۳/۱۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۹/۲۹

چکیده

انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی به‌منظور تخمین ویژگی‌های خاک منطقه نقش مهمی در استراتژی‌های آب و مدیریت کشاورزی ایفا می‌کند. همچنین ازآنجاکه ویژگی‌های خاک در زمان و مکان تغییر می‌کند، تحلیل متغیرهای فضایی خصوصیات خاک برای نشان‌دادن اکوسیستم‌های خاص اهمیت دارد. هدف از این تحقیق بررسی دقت پنج روش درون‌یابی فاصلهٔ وزنی معکوس، چندجمله‌ای عام، چندجمله‌ای موضعی، تابع شعاع محور و کریجینگ برای تخمین پارامترهای EC و PH خاک است. بدین منظور، ۴۸ پروفیل در ۱۵ دهستان موجود در بخش درودزن، واقع در استان فارس حفر شد. تمامی مقادیر EC و PH مربوط به عمق ۳۰-۰ سانتیمتر اول خاک است. برای بالابردن دقت مطالعه، روش‌های درون‌یابی در مدل‌ها و توان‌های گوناگون مقایسه شد. ترسیم نیم‌تغییرنما در GS+ نشان داد داده‌های PH و EC بهترین برازش را به‌ترتیب در مدل گوسن و کروی دارند. همچنین براساس مقادیر به‌دست‌آمده از معیارهای ارزیابی خطا شامل RMSE، MSE، MAE، R^2 و MBE بهترین روش درون‌یابی با کمترین خطا به‌منظور تهیهٔ نقشه‌های پراکنش مکانی پارامترهای EC و PH خاک انتخاب شد. نتایج برتریِ روش LPI با توان دو و روش IDW با توان یک برای فاکتور PH را نشان می‌دهد. همچنین روش کریجینگ در مدل گوسن و IDW با توان یک به‌ترتیب بیشترین دقت را برای پارامتر EC در منطقهٔ مورد مطالعه نشان دادند. افزون بر این، نتایج نشان داد دقت روش RBF و GPI به‌نسبت سایر روش‌ها پایین‌تر است.

کلیدواژه‌ها: زمین‌آمار، هدایت الکتریکی، PH، درون‌یابی.

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات: سمنان، میدان سعدی، دانشگاه سمنان، دانشکدهٔ کویرشناسی. تلفن: ۰۹۱۳۹۴۰۵۲۷۷

Email: Elham.solaimani67@gmail.com

۱- مقدمه

ارزیابی شوری خاک اقدامی مهم در استراتژی‌های آب و مدیریت کشاورزی محسوب می‌شود. درصورتی که آب شور برای آبیاری استفاده شود، این شوری به سه صورت خاک و گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نخست اینکه ذرات خاک را پخشیده می‌کند و سبب تخریب خاکدانه‌ها می‌شود. دوم، ازآنجایی‌که پتانسیل اسمتیک افزایش می‌یابد، قابلیت گیاه برای جذب آب را کاهش می‌دهد. اثر سوم تعادل یونی محلول خاک است که با کاهش جذب مواد غذایی نمود می‌یابد. نقشهٔ شوری خاک با نمونه‌برداری و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی قابل بررسی است (Kazemi Poshtmasari et al., 2012). نمونه‌برداری و دیده‌بانی اغلب هزینهٔ سنگینی بر دوش مطالعات زیست‌محیطی قرار می‌دهد. تکنیک‌هایی که بتوانند بینش ما را از توزیع زمانی و فضایی یک متغیر زیست‌محیطی، بدون افزایش میزان اندازه‌گیری توسعه دهند بسیار باارزش‌اند. ژئواستاتیک تکنیک‌های متفاوتی را برای بهینه‌سازی استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری‌شده به‌منظور میان‌یابی متغیرهای فضایی پیشنهاد می‌کند (Snepvangers et al., 2003). همچنین ژئواستاتیک می‌تواند برای مطالعات و پیش‌بینی ساختار ویژه متغیرهای زمین‌مرجع‌شده و تهیهٔ نقشهٔ ویژگی‌های خاک استفاده شود (Zandi et al., 2011). امروزه کاربرد روش‌های زمین‌آماری در مطالعهٔ ویژگی‌های هیدرولیکی و فیزیکی خاک در بسیاری از مطالعات به‌کار می‌رود (Sobieraj et al., 2004). روش‌های زمین‌آماری به‌علت درنظرگرفتن پیوستگی مکانی داده‌ها، در مقایسه با روش‌های معمول آماری در برآورد توزیع مکانی داده‌های اندازه‌گیری‌شده دقت بیشتری دارند. تهیهٔ نقشهٔ ویژگی‌های خاک نخستین گام مهم در جهت شناسایی مناطق مستعد کشاورزی به‌شمار می‌رود. نقشه‌های حاصل از کریجینگ[1] تعبیری ترسیمی از منطقه در اختیار ما قرار می‌دهد. در نهایت، این نقشه‌ها تغییرات فضایی را اندازه می‌گیرند و اصول کنترل آن را بهبود می‌بخشند. همچنین مدیریت خاک و اراضی برای بهینه‌سازی تولید گیاه و کاهش هدررفت حاصلخیزی خاک اهمیت دارند (Shifteh Some et al., 2011).

مطالعهٔ دادکرمی در دشت ارسنجان (۱۳۹۲) نشان داد بهترین مدل برای PH خاک، در فصل زمستان و بهار، کروی و در تابستان، مدل گوسی است و بهترین میانیابی برای PH خاک در زمستان روش IDW[2] محسوب می‌شود. دائم‌پناه و همکاران (۱۳۹۰) طی مطالعه‌ای در جنوب شهرستان مه‌ولات، نقشهٔ شوری و سدیمی خاک سطحی را با روش‌های دورسنجی و زمین‌آمار تهیه کردند. نتایج حاکی از آن بود که روش دورسنجی به‌دلیل ماهیت آن در ارتباط‌دادن بین میزان شوری و بازتاب امواج، برای پهنه‌بندی سطوح شور مطمئن‌تر از روش‌های زمین‌آمار است؛ بنابراین، فن دورسنجی از نظر دقت و هزینه بر روش‌های زمین‌آمار برتری دارد و می‌توان برای افزایش دقت در نقشه‌های به‌دست‌آمده از روش کریجینگ، تعداد نقاط بیشتری برداشت کرد. شکوری کتیگری و همکاران (۱۳۹۰)، در پژوهشی به‌منظور ارزیابی کارآیی تخمین‌گرهای مکانی IDW و کریجینگ (معمولی و لاگ نرمال کریجینگ) در برآورد کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری خاک، اراضی شالیزاری مؤسسهٔ تحقیقات برنج کشور واقع در شهرستان رشت را بررسی کردند. نتایج ارزیابی نشان داد که دقت تخمین به روش کریجینگ از تخمین IDWبیشتر است. همچنین کریجینگ معمولی برای کربن آلی و کریجینگ لگاریتمی برای جرم مخصوص ظاهری بهترین تخمین‌گر به‌شمار می‌رود. (Kazemi Poshtmasari et al., 2012)، طی مطالعه‌ای در شهرستان گلستان، مدل کروی روش کریجینگ را با بالاترین دقت و کمترین خطا برای تخمین PH مناسب دانستند و مدل نمایی کریجینگ را دارای بالاترین دقت برای ارزیابی EC خاک در این منطقه معرفی کردند. نتایج تحقیق نورزاده حداد[3] (۲۰۱۳) در دشت قم نشان

1. Kriging
2. Inverse Distance Weighting
3. Nourzadeh Haddad

داد روش کریجینگ معمولی بهتر از IDW برای EC نتیجه می‌دهد. از سوی دیگر، IDW برای PH متناسب‌تر از کریجینگ معمولی است. همچنین بیان کرده‌اند Spline، به‌دلیل دقت کمتر، روش خوبی برای درون‌یابی EC و PH نیست. همچنین ویلسون و همکاران[1] (۲۰۰۵) نیز مطالعه‌ای روی پارامتر هدایت حقیقی خاک (ECa) با مدل‌های OK[2]، IDW و RBF[3] انجام دادند. نتایج مؤید برتری روش‌های OK و IDW در مقایسه با RBF بود. رابینسون و مترنیخت[4] (۲۰۰۶) طی مطالعه‌ای با عنوان «آزمون کارآیی تکنیک‌های میانیابی ویژه برای نقشهٔ خصوصیات خاک» نشان دادند در خاک سطحی روش کریجینگ معمولی برای PH و روش کریجینگ معمولی لوگ نرمال برای EC بهترین پاسخ را خواهد داشت و به همین ترتیب، در خاک زیرسطحی، روش میانیابی IDW برای PH و روش Spline در مقایسه با کریجینگ و IDW برای میانیابی مواد آلی دقت بالاتری دارد. کاریاداس و همکاران[5] (۲۰۰۹) روش‌های میان‌یابی را برای پنج ویژگی عمومی خاک سطحی از جمله مادهٔ آلی،کربنات کلسیم کل، هدایت الکتریکی، مقدار آهن و مقدار رس در سیستم کشاورزی مدیترانه‌ای در جزیرهٔ کرت ارزیابی کردند. نتایج نشان داد روش IDW برای مواد آلی و مقدار آهن، روش RBF برای رس، و روش کریجینگ معمولی برای کربنات کلسیم کل بهترین نتیجه را به‌دست دادند. شی و همکاران[6] (۲۰۰۹) طی مطالعه‌ای برای مدل‌سازی PH خاک، افزون بر سه روش کلاسیک میانیابی شامل کریجینگ و IDW و Spline، از تکنیک مدل‌سازی با سطح بالای صحت نیز استفاده کردند. آن‌ها در نهایت ثابت کردند نقشه‌های حاصل از HASM[7] به‌نسبت سه روش کلاسیک میانیابی (کریجینگ، IDW و Spline) بهتر بوده؛ بنابراین، HASM می‌تواند روشی مناسب و صحیح به‌منظور میانیابی ویژگی‌های خاک باشد. زندی و همکاران[8] (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای برای تعیین تغییرات PH در دو عمق متفاوت خاک در یک باغ انگور واقع در زلاندنو، سه تکنیک IDW، RBF و کریجینگ معمولی را به‌کار گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد تکنیک کریجینگ معمولی به‌نسبت دو روش دیگر بیشترین صحت پیش‌بینی در هر دو عمق خاک را داراست. مهدی و همکاران[9] (۲۰۱۳) PH خاک سطحی شهرستان پنجاب در پاکستان را بررسی کردند و روش‌های میانیابی همچون کریجینگ، IDW، RBF و Spline را به‌کار بردند. نتایج برتری روش کریجینگ را بر سه روش دیگر نشان داد. نتایج تحقیق لیو و همکاران[10] (۲۰۱۳) به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ پهنه‌بندی PH خاک در چین نشان داد روش کریجینگ، با بیشترین دقت به‌نسبت روش‌های IDW و Spline، کارآیی بهتری دارد.

مطالعهٔ ویژگی‌های خاک برای اِعمال روش‌های صحیح مدیریت خاک‌ها و اراضی اهمیت خاصی دارد. ازاین‌رو، استفاده از روش‌های زمین‌آمار و بررسی تغییرات مکانی و نقشهٔ بحرانی در این مورد، به‌منظور چگونگی اجرای روش‌های مدیریتی بهینه و دستیابی به نتایج مطلوب، اطلاعات دقیقی را با صرف هزینه و زمان کمتر در مقیاس‌های منطقه‌ای و ناحیه‌ای در اختیار ما قرار می‌دهد (ثنایی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۹). تهیهٔ نقشهٔ ساختار مکانی خصوصیات خاک می‌تواند برنامه‌ریزان را در عرصه‌های گوناگون مدیریتی چون مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی عمرانی، مکانیابی اراضی مناسب برای توسعهٔ کشاورزی و برنامه‌ریزی زیست‌محیطی یاری کند.

نقشه‌های توزیعی ویژگی‌های خاک را برای تهیهٔ نقشه‌های شناسایی مناطق جداگانه‌ای که در محدودهٔ مطالعاتی ما قرار دارند، از لحاظ مدیریت می‌توانیم با

1. Wilson et al.
2. Ordinary Kriging
3. Radial Basis Functions
4. Robinson & Metternicht
5. Karyadas et al.
6. Shi et al.
7. High Accuracy Surface Modelling
8. Zandi et al.
9. Mehdi et al.
10. Liu et al.

اطمینان به‌کار ببریم. برداشت‌های پی‌درپی از پروفیل‌های خاک سبب بروز آسیب‌هایی در خاک می‌شود؛ بنابراین، تعیین صحت روش متناسب با خاک هر منطقه به تخمین ویژگی‌های دیگر نقاط منطقه کمک می‌کند و باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شود. در این مطالعه سعی شد با تمرکز بر مقایسهٔ توان‌ها و مدل‌های مربوط به روش‌های درون‌یابی گوناگون، کارآیی و تناسب این روش‌ها در نرم‌افزار ArcGIS برای تعیین پراکنش EC و PH خاک ارزیابی شود. از پنج روش (RBF، LPI[1]، GPI[2]، IDW و کریجینگ) برای یافتن مناسب‌ترین پیش‌بینی پارامترهای PH و EC خاک استفاده می‌شود. نوآوری انجام‌دادن تحقیق در منطقه و تمرکز بر مقایسهٔ توان‌ها و مدل‌های مربوط به روش‌های درون‌یابی گوناگون مطالعهٔ حاضر را از مطالعات مشابه متمایز می‌کند. بنابراین، نقشه‌های توزیعی ویژگی‌های خاک برای تهیهٔ نقشه‌های شناسایی مناطق جداگانه‌ای که در محدودهٔ مطالعاتی ما قرار دارند از لحاظ مدیریت مورد اطمینان‌اند. هدف از این مطالعه مقایسهٔ تکنیک‌های درون‌یابی برای تخمین توزیع فضایی فاکتورهای مورد بررسی در درودزن فارس و برآورد دقت و صحت این روش‌ها از طریق آماره‌های خطاست.

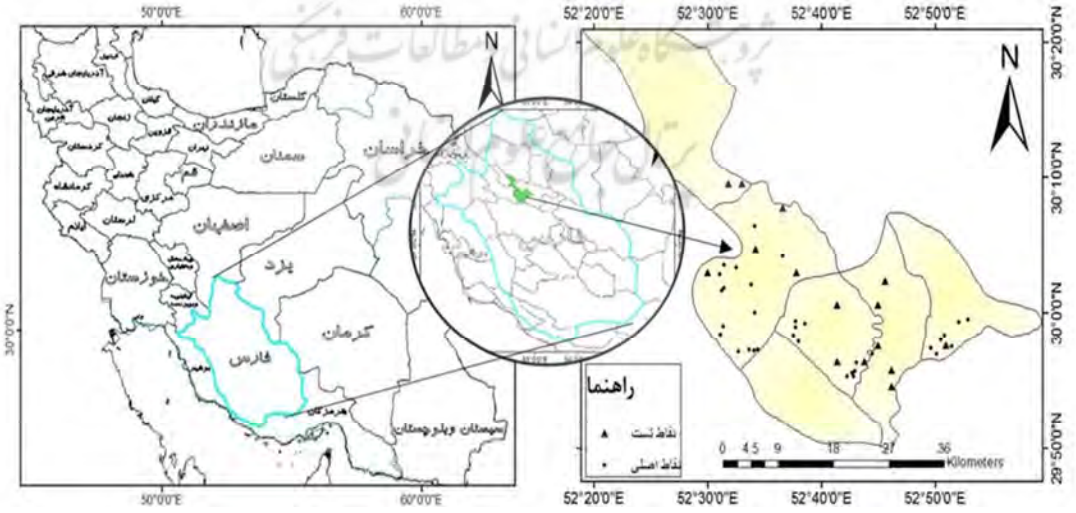
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

ناحیهٔ درودزن به وسعت ۱۲۳۸۴۶ هکتار منطقهٔ مورد مطالعه است که در استان فارس و در قسمت شمالی دشت رودخانهٔ کر و شمال مرودشت (۵۰ کیلومتری شمال‌شرق شیراز) قرار دارد. مرز شمالی این منطقه در امتداد کوه‌های شهرک- دشتک- حسین و سیوند است و از سمت شرق به رودخانهٔ سیوند و از غرب و جنوب‌غرب به کوه‌های کمرزرد-گند شتلو، کرونی با زهکش درودزن محدود می‌شود. این شبکه در دو محدودهٔ مطالعاتی مرودشت- خرامه و بیضا- زرقان واقع شده است. این دو محدوده بین طول‌های جغرافیایی ´۴ ° ۵۲ تا ´۲۷ ° ۵۳ شرقی و عرض جغرافیایی ´۱۸ ° ۲۹ تا ´۲۵ ° ۳۰ شمالی واقع شده‌اند. میانگین ارتفاع دشت از سطح دریا حدود ۱۵۰۰ متر است.

۲-۲- روش تحقیق

در منطقهٔ مطالعاتی، ۴۸ پروفیل حفر و پس از نمونه‌برداری از عمق ۳۰ سانتی‌متر اول پروفیل، اطلاعات PH خاک و قابلیت هدایت الکتریکی عصارهٔ



شکل ۱. موقعیت منطقه و پراکندگی پروفیل‌های مورد مطالعه

1. local polynomial interpolation
2. global polynomial interpolation

اشباع خاک اندازه‌گیری شد. هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه الکترو کنداکتیومتر روی عصارهٔ گل اشباع و PH نیز با استفاده از روش الکترود شیشه در گل اشباع به‌دست آمد. همچنین موقعیت پروفیل‌ها با استفاده از GPS و براساس مختصات نقاط روی نقشه‌های اولیه شناسایی شد. در مطالعهٔ حاضر، از گزارش‌های خاک‌شناسی و پروفیل‌های شاهد قدیم منطقه برای دقیق‌بودن اطلاعات استفاده شد.

داده‌های مربوط به هر پارامتر از نظر نرمال‌بودن در محیط SPSS بررسی شد. توزیع آماری داده‌های مربوط به هر پارامتر با آزمون چولگی-کشیدگی[1] تعیین و، با استفاده از آزمون کلموگراف- اسمیرنف[2]، نرمال‌بودن داده‌ها مشخص شد. سپس برای تعیین بهترین مدل با کمترین خطا، نیم‌تغییرنمای داده‌ها در محیط GS+ ترسیم شد (رابطه ۱) و اعتبار نیم‌تغییرنما با تست Cross Validation مورد آزمون قرار گرفت.

۲-۲-۱- روش‌های درون‌یابی

در این آزمایش از تابع نیم‌تغییرنما برای نشان‌دادن تغییرات یک متغیر، با درنظرگرفتن فاصله استفاده شد که معادلهٔ آن به صورت زیر است:

رابطه (۱)

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

در معادلهٔ نیم‌تغییرنما یا واریوگرام که با $\gamma(h)$ نشان داده شده است N (h) تعداد جفت نقاطی است که فاصلهٔ آن‌ها از هم به‌اندازهٔ h است. Z (X_i) و Z (X_i + h) متغیرهای ناحیه‌ای با فاصلهٔ h از یکدیگرند. هر تابع نیم‌تغییرنما با سه مؤلفهٔ اثر قطعه‌ای (C_0)، دامنهٔ تأثیر (a) و حد آستانه ($C + C_0$) مشخص می‌شود. مقدار نیم‌تغییرنما در مبدأ مختصات، یعنی به‌ازای h=0 را اثر قطعه‌ای (C_0) می‌نامند (واحدی و همکاران، ۱۳۹۲). در این پژوهش از مدل‌های کروی، نمایی، گوسی، خطی و خطی دارای سقف برای برازش نیم‌تغییرنما استفاده شد. در ادامه، چند روش درون‌یابی به‌اختصار شرح شده است:

روش چندجمله‌ای عام (GPI): این روش یک مدل رگرسیونی چندمتغیره براساس تمامی داده‌ها پدید می‌آورد و سپس یک سطح تفهیمی ایجاد می‌کند. این روش مدلی را بر نقاط نمونه‌برداری برازش می‌کند که می‌تواند یک سطح چندضلعی با توان یک، دو و یا چهار باشد (Johnston et al., 2013). در درون‌یابی همگانی، برای برآورد نقاط مجهول از داده‌های همهٔ نقاط اندازه‌گیری‌شده استفاده می‌شود.

روش چندجمله‌ای موضعی (LPI): این روش یک دامنهٔ کوتاه از تغییرات در داده‌های ورودی را در نظر می‌گیرد و به فاصله بین نقاط حساس است. از داده‌های همهٔ نقاط برداشت شده برای برآورد مقدار نقطهٔ مجهول استفاده نمی شود. در این روش، ممکن است تعداد نقاط محدودی در درون‌یابی به‌کار گرفته شود که تا نقطهٔ مورد نظر کمترین فاصله را دارند یا از داده‌هایی استفاده شود که تا نقطهٔ مورد نظر کمترین فاصله را دارند. به بیانی دیگر، در این روش نقاط همسایه براساس تعداد یا فاصله تعریف می‌شوند. اگر تغییرات مکانی متغیر زیاد باشد، مدل‌های محلی نتایج بهتری به‌دست می‌دهد. با این حال، تعداد نقاط همسایه که برای برآورد در یک نقطهٔ معین به‌کار گرفته می‌شوند در کیفیت نتایج تأثیر بسزایی دارند. در این روش نیز از توان‌های ۱ تا ۳ استفاده شد (Johnston et al., 2001).

روش تابع شعاع‌محور (RBF): این روش دارای پایهٔ ریاضیاتی بسیار قوی و برمبنای فرضیهٔ منظم‌سازی برای حل مسائل مشکل است (Asadi et al., 2013). RBF می‌تواند روی داده‌های نویزداری که به‌طور منظم در یک منطقه پخش شده‌اند اعمال شود و یک روش درون‌یابی چندمتغیرهٔ هموار روی داده‌ها انجام دهد. به عبارت دیگر، روش تابع شعاع‌محورْ تابعی را می‌یابد که مشابه ورقه‌ای نازک است که به‌طور هموار خم شده است و باید از تمامی داده‌ها بگذرد (وزارت نیرو).

1. Skewness-Kurtosis
2. Kolmogorov-Smirnov

کریجینگ: شرط استفاده از کریجینگ این است که متغیر z دارای توزیع نرمال باشد. در غیر این صورت، یا باید از کریجینگ غیرخطی استفاده کرد یا با تبدیل های مناسب، توزیع متغیر را به نرمال تبدیل کرد. تخمین‌های کریجینگ به‌صورت مجموع وزن‌دارشدهٔ غلظت نمونه‌های مجاور محاسبه می‌شود. در این روش، برای هریک از ایستگاه‌های درون و بیرون یک پهنه برحسب فاصله و موقعیت آن وزن آماری مشخصی در نظر گرفته می‌شود؛ به‌گونه‌ای که واریانس تخمین کمینه شود (Isaaks and Srinivasta, 1989).

این برآوردکننده چنین تعریف می‌شود:

$$Z^*(X_i) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(X_i)$$ رابطه (۲)

در این معادله، $Z^*(X_i)$ تخمین مقدار متغیر Z در نقطهٔ X و λ_i وزن آماری اختصاص‌یافته به مقادیر Z در نقطهٔ X_i است.

وزن‌دهی عکس فاصله (IDW): سطحی از نقاط اندازه‌گیری‌شده بر پایهٔ مسافت و همسانی را ایجاد می‌کند (Wilson et al., 2005). به عبارت دیگر، در این روش وزن نقاط نمونه روی نقطهٔ مجهول براساس فاصله‌ی بین نقاط معلوم و نقطهٔ مجهول محاسبه می‌شود. این اوزان با توان وزن‌دهی کنترل می‌شوند؛ به‌طوری‌که توان‌های بزرگ‌تر اثر نقاط دورتر از نقطه‌ی مورد تخمین را کاهش می‌دهند و توان های کوچک‌تر وزن‌ها را به طور یکنواخت‌تری بین نقاط همسایه توزیع می‌کنند. مقدار عامل وزنی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^{N} D_i^{-\alpha}}$$ رابطه (۳)

که در آن λ_i وزنِ نقطهٔ iاُم، D_i فاصلهٔ نقطهٔ iاُم تا نقطهٔ مجهول و α معادل توان وزن‌دهی است. البته باید توجه داشت که این روش، بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط، فقط فاصلهٔ آنها را در نظر می‌گیرد؛ یعنی نقاطی با فاصلهٔ یکسان از نقطهٔ تخمین دارای وزن یکسانی‌اند.

۲-۲-۲- معیار اعتبارسنجی

در نهایت با توجه به مقادیر مشاهده‌شده و برآوردشده، دقت هر روش با توجه به معیارهای آماری R^2، میانگین مطلق اشتباهات (MAE)[1]، میانگین اریبی اشتباهات (MBE)[2]، مجذور میانگین اشتباهات (MSE)[3] و ریشهٔ دوم میانگین مربع خطا (RMSE)[4] ارزیابی شد.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|z^*(x_i)-z(x_i)|}{n}$$ رابطه (۴)

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(z^*(x_i)-z(x_i))}{n}$$ رابطه (۵)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(z^*(x_i)-z(x_i))^2}{n}$$ رابطه (۶)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(z^*(x_i)-z(x_i))^2}{n}}$$ رابطه (۷)

که در آن $z^*(x_i)$ ، $z(x_i)$ و n به‌ترتیب مقدار برآوردشده، مقدار اندازه‌گیری‌شدهٔ متغیر مورد نظر و تعداد داده‌ها محسوب می‌شوند.

MAE، MSE، RMSE و MBE در حالت ایده‌آل باید برابر با صفر باشند. مقادیر مثبت یا منفی چشمگیر آنها به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ برآورد بیشتر یا کمتر از مقدار واقعی است. درواقع MAE معرف دقت روش و مقدار میانگین خطاست که هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت بیشتر است. MBE نشان‌دهندهٔ میانگین انحراف معیار مقدار برآوردی از مقدار مشاهده‌شده است که به‌طور قطع هرچه مقادیر این دو معیار MSE و RMSE کمتر باشد، صحت روش بیشتر است.

در پایان، روش مناسب میانیابی براساس کمترین مقدار MBE، MSE، MAE و RMSE و بیشترین مقدار R^2 مشخص شد و نقشهٔ پهنه‌بندی پارامتر مورد نظر در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.2 تهیه شد. همچنین در این تحقیق ۱۵ پروفیل در منطقهٔ مطالعاتی به‌منزلهٔ نقاط تست برای بررسی میزان دقت نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای EC و PH به‌کار رفت.

1. Mean Absolute Error
2. Mean Bias Error
3. Mean Square Error
4 Root Mean Square Error

۳- نتایج

شرط نرمال‌بودن داده‌ها در میانیابی با روش کریجینگ اهمیت فراوانی دارد (شعبانی، ۱۳۸۷). چنانچه مقدار Sig از ۵٪ کمتر باشد و چولگی و کشیدگی در بازه‌ی (۲ ، ۲-) نباشند، داده‌ها از توزیع نرمال بسیار دور است و باید پیش از هرگونه آزمونی که به برقراری فرض نرمال‌بودن داده‌ها نیاز دارد، اصلاح شوند. چنانچه داده‌ها از توزیع نرمال پیروی نکنند، با استفاده از یکی از روش‌های متفاوت نرمال‌سازی می‌توان داده‌ها را نرمال کرد. از روش‌های مرسوم نرمال‌سازی می‌شود به توابع لگاریتمی، تبدیل باکس کاکس، جذری و ... اشاره داشت. در این تحقیق از تبدیل لگاریتمی استفاده شد. در جدول‌های ۱ و ۲، نتایج توزیع آماری داده‌ها به‌ترتیب با آزمون‌های چولگی-کشیدگی و کلموگراف-اسمیرنف ارائه شده است.

نخستین گام در استفاده از روش کریجینگ بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌ها با آنالیز نیم‌تغییرنماست. بدین منظور، نیم‌تغییرنما با استفاده از داده‌های نرمال ترسیم شد. پس از تست مدل‌های متفاوت، مدل مناسب برای برازش روی نیم‌تغییرنمای تجربی انتخاب شد. وابستگی مکانی ویژگی‌های خاک از طریق نسبت اثر قطعه‌ای به حد آستانه + اثر قطعه‌ای بیان می‌شود. هرگاه این نسبت کمتر از ۲۵٪ باشد، نشان‌دهندهٔ وابستگی مکانی ضعیف است و هرگاه بین ۲۵ تا ۷۵٪ باشد، وابستگی مکانی متوسط و اگر بیش از ۷۵٪ باشد، وابستگی مکانی ویژگی‌های خاک قوی است (جلالی و همکاران، ۱۳۹۲). نتایج مربوط به بهترین مدل برازش‌یافته بر نیم‌تغییرنما و پارامترهای آن ارائه شده است (جدول ۳). بر این اساس، مدل گوسن با وابستگی ۵۰٪ برای پارمتر PH و مدل کروی با وابستگی ۶۵٪ برای فاکتور EC بهترین برازش را نشان می‌دهد.

جدول۱. توزیع آماری داده‌های مربوط به EC و PH

پارامتر	حداکثر	حداقل	میانگین	واریانس	چولگی	کشیدگی
PH	۸/۵	۷/۱۳	۷/۸	۰/۱۱۸	-۰/۵۰۹	-۰/۱۸۸
EC(ds/m)	۹/۷۹	۰/۳۴	۱/۹۷	۵/۰۸	۲/۳۱	۴/۹۴

جدول۲. آزمون نرمالیتهٔ داده‌های مربوط به EC و PH

پارامتر	Kolmogorov-Smirnov	
	آماره	Sig
PH	۰/۱۴۹	۰/۰۱
EC(ds/m)	۰/۲۶۵	۰/۰۰

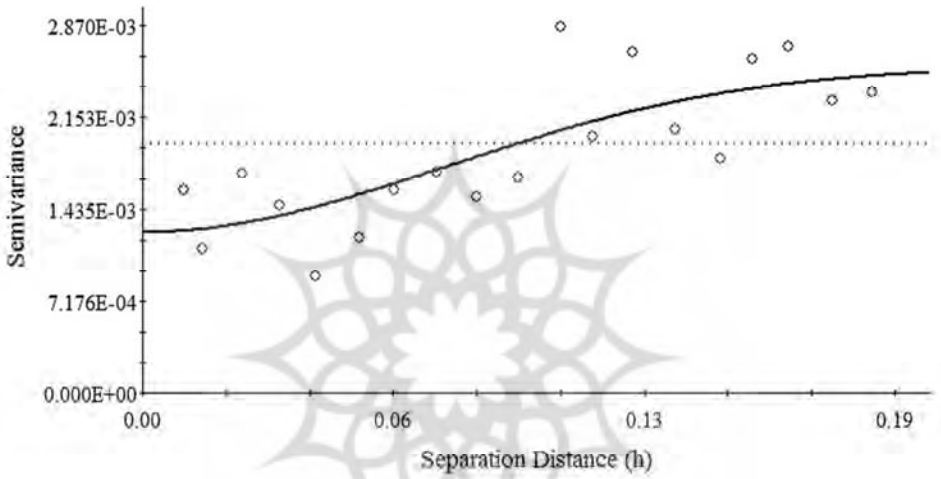
جدول ۳. مؤلفه‌های بهترین مدل نیم‌تغییرنمای برازش‌شده بر متغیرهای مورد مطالعه

پارامتر	مدل تغییرنما	دامنه تأثیر	اثر قطعه‌ای(co)	آستانه (co+c)	RSS	R^2	$\frac{c}{(co+c)}$
PH	گوسن	۰/۱۸۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۲/۲۳۱e-۰۶	۰/۶۱۱	۰/۵۰۸
EC	کروی	۰/۰۵۷	۰/۳۴	۰/۹۸۸	۱/۹۳	۰/۱۴۶	۰/۶۵۶

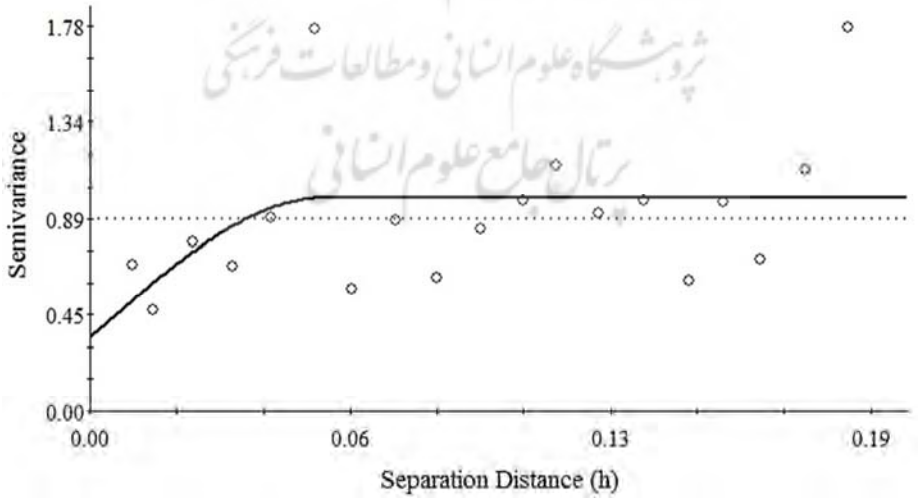
با توجه به نسبت اثر قطعه‌ای به (حد آستانه + اثر قطعه‌ای) ارائه‌شده در جدول ۳، وابستگی مکانی متوسط برای فاکتورهای PH و EC وجود دارد.

بهترین شبیه برازش‌شده به نیم‌تغییرنماها از نظر داشتن کمترین مجذور مربعات خطا (RSS)، و بیشترین ضریب همبستگی (R^2)، که با نرم‌افزار GS^+ (Robertson, 2000) به‌دست آمده ارائه شده است (شکل ۲ و ۳). براساس نتایج حاصل، ساختار مکانی PH و EC به‌ترتیب از شبیه گوسن و کروی تبعیت می‌کنند.

مقادیر معیارهای خطا RMSE، MSE، MAE، R^2 و MBE روش‌های مورد نظر برای پارامترهای EC و PH در منطقهٔ درودزن به‌صورت جدول ۴ ارائه شده است. برای افزایش دقت مطالعه، توان‌ها و مدل‌های مربوط به روش‌های درون‌یابی مورد مطالعه محاسبه و مقایسه شد. نتایج معیارهای خطا برای نقاط تست و پیش‌بینی‌شده نیز در انتهای جدول ۴ آمده است.



شکل ۲. نیم‌تغییرنمای تجربی PH



شکل ۳. نیم‌تغییرنمای تجربی EC

جدول ۴. مقادیر MAE، RMSE، MSE، R^2 و MBE شاخص‌های مورد مطالعه

Global Polynomial Interpolation (GPI)

EC				PH			
۳	۲	۱		۳	۲	۱	
۲/۳	۲/۰۳	۱/۸	MAE	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۷	MAE
۳/۰۹	۲/۸۳	۲/۵۲	RMSE	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۴	RMSE
۰/۲۹	-۰/۰۲	-۰/۰۰۲	R^2	۰/۵۱	۰/۴۲	۰/۰۸	R^2
۹/۵۷	۸/۰۴	۶/۴	MSE	۰/۱	۰/۱	۰/۱۲	MSE
۰/۴۸	۰/۴	۰/۴	MBE	۰	۰	۰	MBE

Kriging

EC					PH				
Gaussian	exponential	spherical	circular		Gaussian	exponential	Spherical	circular	
۱/۶	۱/۶۴	۱/۶۲	۱/۶۱	MAE	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۴	MAE
۲/۰۷	۲/۱۱	۲/۰۸	۲/۰۷	RMSE	۰/۳	۰/۳۱	۰/۳	۰/۳	RMSE
۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۴۲	R^2	۰/۴۴	۰/۴	۰/۴۶	۰/۴۷	R^2
۴/۳۱	۴/۴۷	۴/۳۵	۴/۲۹	MSE	۰/۰۹	۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۲	MSE
۰/۴۶	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۴۶	MBE	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۹	MBE

Inverse Distance Weighting (IDW)

EC					PH				
۴	۳	۲	۱		۴	۳	۲	۱	
۱/۵۷	۱/۵۲	۱/۴۷	۱/۴۵	MAE	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۴	MAE
۳/۳۸	۳/۱۱	۲/۴۵	۲/۰۸	RMSE	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۳	RMSE
۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۴	R^2	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۴۳	۰/۴۷	R^2
۱۱/۴	۹/۶	۶/۰۲	۴/۳۵	MSE	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱	۰/۰۹	MSE
۰/۵	۰/۴	۰/۳۹	۰/۳۵	MBE	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳	MBE

Radial Basis Functions (RBF)

EC						PH					
CRS	SWT	MQ	IM	TPS		CRS	SWT	MQ	IM	TPS	
۱/۵	۱/۵	۱/۶۷	۱/۵۸	۲/۲۵	MAE	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۳	MAE
۲/۲۱	۲/۲۱	۲/۹	۲/۲۱	۳/۸	RMSE	۰/۳۱	۰/۳	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۴	RMSE
۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۵۲	۰/۴۶	۰/۴۷	R^2	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۲	R^2
۴/۹	۴/۸	۸/۶۶	۴/۹۱	۱۵/۰	MSE	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱	۰/۱۸	MSE
۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۴۸	۰/۳۹	۰/۶	MBE	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	MBE

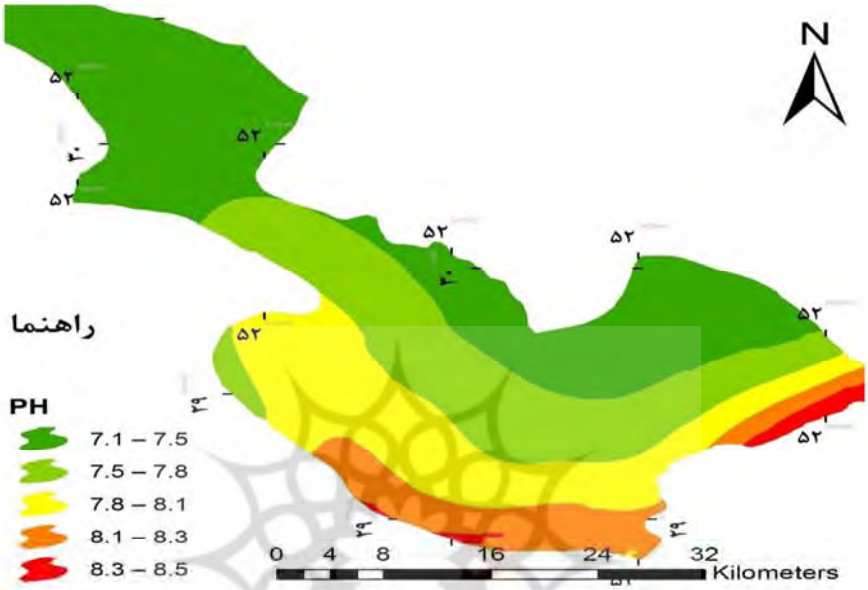
Local Polynomial Interpolation (LPI)

EC				PH			
۳	۲	۱		۳	۲	۱	
۱/۹۲	۱/۶۲	۱/۵۷	MAE	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	MAE
۲/۷۳	۲/۴۲	۲/۳۷	RMSE	۰/۳	۰/۲۹	۰/۲۹	RMSE
۰/۴۷	۰/۴۱	۰/۴۶	R^2	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۵۲	R^2
۷/۴	۵/۸	۵/۶	MSE	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۹	MSE
۰/۵۲	۰/۴	۰/۵۱	MBE	۰	۰	۰/۰۳	MBE

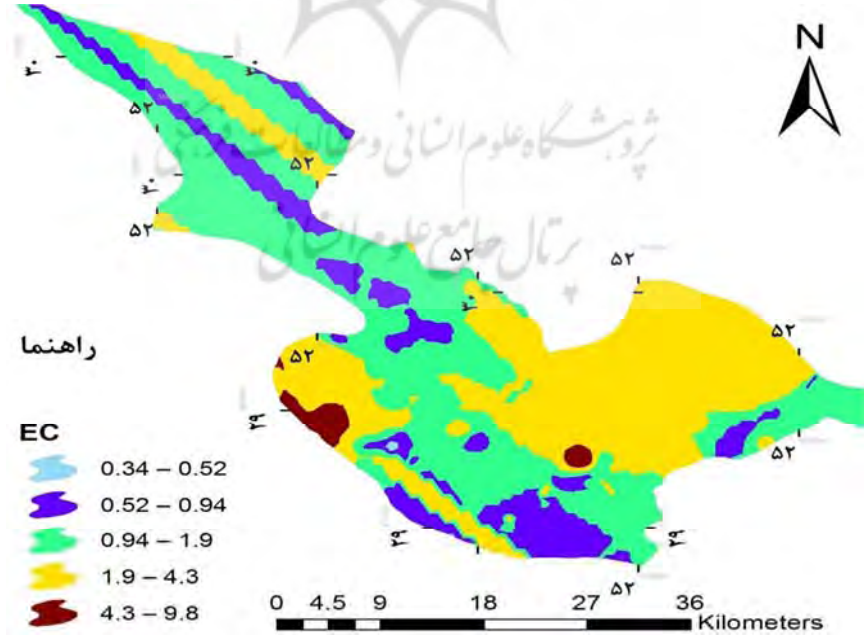
Test point

MBE	MSE	R^2	RMSE	MAE	
۰/۷۵	۲/۵۵	-۰/۰۱	۱/۶	۱/۳۶	EC
۰/۲۷	۰/۱۶	۰/۳۵	۰/۴	۰/۳۱	PH

نقشهٔ نهایی هر دو پارامتر با توجه به پایین‌بودن مقادیر خطا، به‌ترتیب در روش LPI با توان دو برای فاکتور PH و برای فاکتور EC در روش کریجینگ در مدل گوسن ترسیم شده است (شکل‌های ۴ و ۵). همچنین بررسی نتایج حاصل از به‌کارگیری نقاط تستْ صحت و دقت کار را تأیید می‌کند.



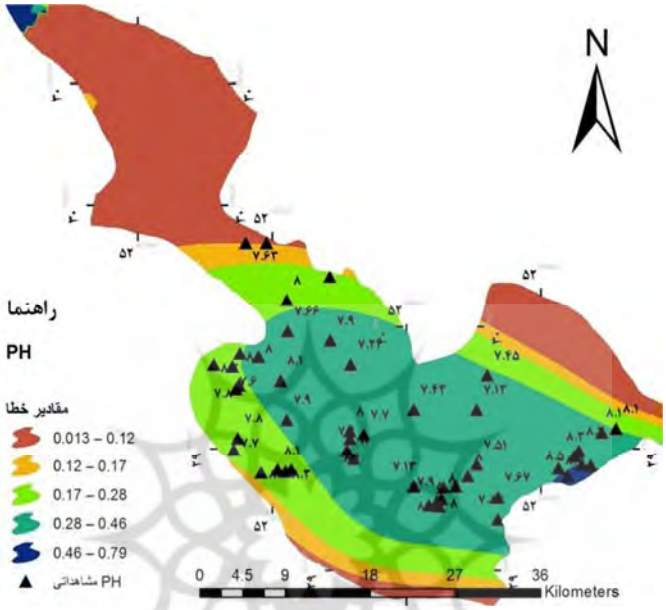
شکل ۴. نقشهٔ پهنه‌بندی PH طبق روش LPI در توان ۲



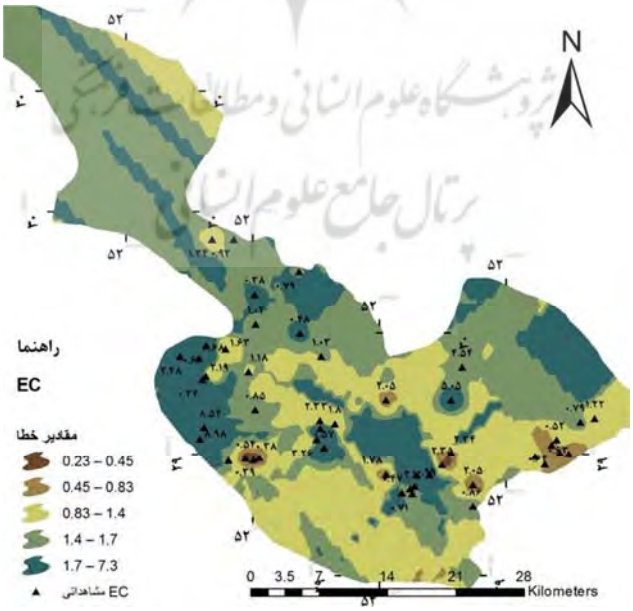
شکل ۵. نقشهٔ پهنه‌بندی EC در روش کریجینگ در گوسن

به‌منظور بررسی صحت روش مورد استفاده، نقشهٔ توزیعی خطای ماکسیمم فاکتورهای EC و PH تهیه شد (شکل ۶ و ۷).

محدوده‌های خطای کمتر و محدوده‌های خطای بیشتری طبق مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی ارائه شده است. ماکسیمم خطا در نقاط با مقادیر بالای EC و PH مشاهداتی رخ می‌دهد. می‌توان با حفر پروفیل‌های بیشتر به صحت و دقت بیشتری در نتایج دست یافت.



شکل ۶. نقشهٔ ماکسیمم خطای PH



شکل ۷. نقشهٔ ماکسیمم خطای EC

۴- بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف تهیهٔ نقشهٔ توزیعی صحیح از PH و EC خاک انجام شد. بررسی تغییرات مکانی پارامترهای PH و EC خاک منطقهٔ مورد مطالعه بیانگر پیوستگی مکانی متوسط و نسبتاً خوب آن‌ها در این منطقه است و ساختار مکانی آن‌ها به‌ترتیب از شبیه نیم‌تغییرنمای گوسن و کروی تبعیت می‌کند. در مطالعهٔ کاظمی و همکاران، آنالیز نیم تغییرنما بهترین برازش را برای EC و PH در مدل کروی نشان داد. نتایج حاصل از ارزیابی روش‌های GPI، IDW، RBF، LPI و کریجینگ با آماره‌های خطاسنجی در تحقیق حاضر حاکی از آن است که پارامتر PH بالاترین دقت را با MBE=0، MSE=0/08، MAE=0/23، R^2 = ۰/۵۳ و RMSE = ۰/۲۹ برای روش LPI با توان دو (شکل ۴) و برای توان یک در روش IDW نشان می‌دهد. همچنین نتایج مطالعه مبین برتری روش کریجینگ در مدل گوسن با MBE =۰/۴۶, MSE =۴/۳, MAE =۱/۶, R^2 =۰/۴۲ و RMSE =۲/۰۷ برای پراکنش EC است (شکل ۵). افزون بر این، روش IDW در توان یک بعد از روش کریجینگ مناسب‌ترین روش برای تعیین پراکنش EC در منطقهٔ مورد مطالعه خواهد بود. روش‌های GPI و RBF در مقایسه با دیگر روش‌ها بیشترین خطای تخمین EC و PH را دارند و به‌نظر می‌رسد برای متغیرهای PH و EC خاک منطقهٔ مورد مطالعه نتایج مناسبی به‌دست نمی‌دهند. بررسی خطای نقاط تست صحت و دقت نقاط پهنه‌بندی را تأیید می‌کند.

با توجه به مطالعات یادشده در بخش مقدمه، نتایج کاظمی پشت‌ماسری و همکاران (۲۰۱۲)، نورزاده حداد (۲۰۱۳)، ویلسون و همکاران (۲۰۰۵) و رابینسون و مترنیخت (۲۰۰۶) روش کریجینگ را برای فاکتور EC پیشنهاد می‌کنند. مطالعهٔ رابینسون و مترنیخت دقت بالای روش IDW را برای پارامتر PH نشان داد و چون در تحقیق حاضر روش IDW، پس از روش LPI و کریجینگ بیشترین صحت را داشت؛ بنابراین، نتایج این تحقیق تاحدودی با نتایج آنان هم‌خوانی دارد. همچنین زندی و همکاران (۲۰۱۲)، مهدی و همکاران (۲۰۱۳) و لیو و همکاران (۲۰۱۳) با توجه به روش‌هایی که برای فاکتورهای گوناگون به‌کار بردند، در نهایت روش کریجینگ را برای پارامتر PH در مطالعات بعدی پیشنهاد کردند. شایان ذکر است نتایج حاصل در منطقهٔ مورد مطالعه قابل استفاده است و نمی‌توان آن را به مناطق دیگر تعمیم داد.

برای افزایش کارآیی نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای خاک در توسعهٔ طرح‌های آب‌وخاک و درک بهتر تفاوت‌ها، پیشنهاد می‌شود نقشه‌های پارامترهای دیگری که همبستگی بالایی با نقشه‌های خاک دارند بررسی شود زیرا توزیع فضایی PH و EC خاک با دیگر فاکتورهای زیست‌محیطی در مقیاس فضایی متفاوت ــ همچون بارش، ارتفاع، عوارض زمین، نوع خاک و نوع پوشش سطحی و گیاهی ــ کنترل می‌شود. همچنین به‌منظور صرفه‌جویی در وقت و هزینه و تهیهٔ نقشه با دقت بیشتر، به‌ویژه در شرایطی که تعداد نقاط مطالعاتی محدود است، استفاده از روش‌های سنجش از دور نیز توصیه می‌شود.

۵- تقدیر و تشکر

از شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس کمال تشکر و قدردانی را داریم که در انجام‌دادن این مطالعه ما را یاری کردند.

۶- منابع

ثنایی‌نژاد، ح.، آستارایی، ع.ر.، قائمی، م.، سیابی، ن.، ۱۳۸۹، **بررسی تغییرات مکانی داده‌ها با استفاده از روش‌های تحلیلی زمین‌آمار برای مطالعات خاک‌شناسی**، اولین کنفرانس بین‌المللی مدلسازی گیاه، آب، خاک و هوا، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

جلالی ق.، طهرانی، م.م.، برومند، ن.، سنجری، ص.، ۱۳۹۲، **مقایسهٔ روش‌های زمین‌آمار در تهیهٔ نقشهٔ پراکنش مکانی برخی عناصر غذایی در شرق استان مازندران**، مجلهٔ پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، جلد ۲۷، شمارهٔ ۲، صص. ۲۰۴-۱۹۵.

حبشی، ه.، حسینی، م.، شنایی، ش.، محمدی، ج.، ۱۳۸۵، **ارزیابی دقت و صحت روش‌های درون-یابی در تخمین ازت کل خاک با استفاده از GIS**، سومین همایش سیستم‌های اطلاعات مکانی.

دادکرمی ع.، ۱۳۹۲، **ارزیابی تغییرپذیری مکانی و زمانی شوری خاک در دشت ارسنجان**، مؤسسهٔ تحقیقات خاک و آب.

دائم‌پناه، ر.، حق‌نیا، غ.ح.، علیزاده، ا.، کریمی کارویه، ع.ر.، ۱۳۹۰، **تهیهٔ نقشهٔ شوری و سدیمی خاک سطحی با روش‌های دورسنجی و زمین‌آماری در جنوب شهرستان مه‌ولات**، نشریهٔ آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۵، شمارهٔ ۳، صص. ۵۰۸-۳۶۸.

شعبانی، م.، ۱۳۸۷، **تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیهٔ نقشهٔ تغییرات PH و TDS آب‌های زیرزمینی، مطالعهٔ موردی: دشت ارسنجان**، مجلهٔ علمی پژوهشی مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مرودشت، دورهٔ اول، شمارهٔ اول، صص. ۲۴-۲۳.

شکوری کتیگری، م.، شعبانپور، م.، اسدی، ح.، دواتگر، ن.، بابازاده، ش.، ۱۳۹۰، **ارزیابی کارآیی روش‌های درون‌یابی مکانی در پهنه‌بندی کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری خاک‌های شالیزاری گیلان**، مجلهٔ پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۸، شمارهٔ ۲، صص. ۲۱۰-۱۹۵.

واحدی، س.، زارع ابیانه، ح.، طاهری، م.، بهمنی، ا.، ۱۳۹۲، **بررسی تغییرات مکانی برخی ویژگی‌های شیمیایی و هیدرولیکی اراضی حاشیهٔ رودخانهٔ قزل‌اوزن با روش‌های زمین‌آمار**. مجلهٔ پژوهش آب ایران، سال ۷، شمارهٔ ۱۲، صص. ۱۵۰-۱۴۱.

وزارت نیرو، ۱۳۹۰، **راهنمای روش‌های توزیع مکانی عوامل اقلیمی با استفاده از داده‌های نقطه‌ای**.

Asadi Nalivan, O., Haydari, F., Sour, A., Shahbazi, A., Kavandi, R. & Gheiasi, S., 2013, **Investigation of Groundwater Contamination Trend in Silveh Basin in Terms of Drinking Applications**, International Journal of Agronomy and Plant Production, 4(8), 1826–1834.

Isaak, H.E. & Srinivasta, R.M., 1989, **Applied Geostatistics**, Oxford University Press: Oxford.

Johnston, K., Ver Hoef, Krivoruchko, K. & Lucas, K, 2001, **Using ArcGIS Geostatistical Analyst**, ESRI.Redlands .CA.

Karydas, Ch.G., Gitas, I.Z., Koutsogiannaki, E., Lydakis-Simantiris, N., Silleos, G.N., 2009, **Evaluation of Spatial Interpolation Techniques for Mapping Agricultural Topsoil Properties in Crete**, EARSeL e proceedings, 8, 1.

Kazemi Poshtmasari, H., Tahmasebi Sarvestani, Z., Kamkar, B., Shataei, Sh. & Sadeghi, S., 2012, **Comparison of Interpolation Methods for Estimating PH and EC in Agricultural Fields of Golestan Province (North of Iran)**, International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 4(4), PP. 157–167.

Liu, Z.P., Shao, M.A. & Wang, Y.Q., 2013, **Large-scale Spatial Interpolation of Soil PH Across the Loess Plateau, China**, Environ Earth Sci., 69, 2731–2741.

Mehdi, S.M., Mian, S.M., Ghani, S., Khalid, M., Sheikh, A.A., Rasheed, S. & Iqbal, M.A.J., 2013**, Modeling of Surface Soil PH Using Geostatistical Methods in Punjab Province, Pakistan**, International Journal of Scientific and Engineering Research, 4(11).

Nourzadeh Haddad, M., 2013, **Testing the Performance of Spatial Interpolation Techniques for Mapping Electrical Conductivity and Acidity of Soils: A Case Study of Qom Plain, Iran**, International Journal of Agronomy and Plant Production, Vol. 4, PP. 2827–2832.

Robertson, G.P., 2000, **GS+: Geo Statistics for the Environment Sciences, GS+ Users Guide Version 5: Plainwell,** Gamma Design Software.

Robinson, T.P. & Metternicht, G., 2006**, Testing the Performance of Spatial Interpolation Techniques for Mapping Soil Properties**, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 50, PP. 97–108.

Shi, W., liu, J., Du, Z., Song, Y., Chen, C. & Yue, T., 2009, **Surface Modelling of Soil PH**, Geoderma**,** 150, PP. 113–119.

Shifteh Some'e, B., Hassanpour, F., Ezani, A., Miremadi, S. & Tabari, H., 2011, **Investigation of Spatial Variability and Pattern Analysis of Soil Properties in the Northwest of Iran**, Environ earth Sci., 64, PP. 1849–1864.

Snepvangers, J., Heuvelink, G. & Huisman, J., 2003, **Soil Water Content Interpolation Using Spatio-Temporal Kriging with External Drift**, Geoderma, 112, PP. 253–271.

Sobieraj, J., Elsenbeer, H. & Cameron, G., 2004, **Scale Dependency in Spatial Patterns of Saturated Hydraulic Conductivity**, Catena, 55, PP. 49–77.

Wenjiao, Sh., Jiyuan, L., Zhengping, D., Yinjun, S., Chuanfa, Ch. & Tianxiang, Y., 2009, **Surface Modelling of Soil PH**, Geoderma, Vol. 150, PP. 113–119.

Wilson, R.C., Freeland, R.S., Wilkerson, J.B. & Hart, W.E., 2005, **Interpolatin and Data Collection Error Sources for Electromagnetic Induction–soil Electrical Conductivity Mapping**, **American Society of Agricultural Engineers**, ISSN 0883–8542.

Zandi, S., Ghobakhlou, A. & Sallis, PH., 2011, **A Comparison of Spatial Interpolation Methods for Mapping Soil PH by Depths**, Geo-informatics Research Center, Auckland University of Technology New Zealand.