



## پهنه‌بندی رقومی قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری با استفاده از رگرسیون کریجینگ و اریوگرام محلی در منطقه اردکان

\* روح‌اله تقی‌زاده مهرجردی<sup>۱</sup>، فریدون سرمیدیان<sup>۲</sup>، محمدجواد روستا<sup>۳</sup>،

محمدحسن رحیمیان<sup>۴</sup>، محمود امید<sup>۵</sup> و نورایر تومانیان<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه اردکان، آستاد گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه تهران،  
<sup>۲</sup> استادیار مرکز ملی شوری یزد، <sup>۳</sup> مربی مرکز ملی شوری یزد، <sup>۴</sup> استاد گروه ماشین‌آلات کشاورزی، دانشگاه تهران،  
<sup>۵</sup> استادیار بخش آب و خاک، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان  
تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۲۶

### چکیده

اولین گام در استفاده از داده‌های نقطه‌ای در چارچوب کاری اسکورپن، تبدیل آن‌ها به داده‌های پیوسته می‌باشد. برای انجام این کار، روش‌های مختلف زمین‌آماری وجود دارد، که در این پژوهش روش‌های رگرسیون کریجینگ با اریوگرام محلی، کریجینگ و کوکریجینگ استفاده گردید. برای پهنه‌بندی رقومی قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری در منطقه‌ای به وسعت ۷۲۰۰۰ هکتار واقع در اردکان، تعداد ۷۰۰ قرائت در حالت افقی و عمودی توسط دستگاه القاگر الکترومغناطیس (EM) انجام گرفت. متغیرهای محیطی که در این مطالعه استفاده شدند عبارت از اجزای سرزمین (استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع)، داده‌های تصویر ETM<sup>+</sup> ماهواره لندست و نقشه سطوح ژئومورفولوژی بودند. در ابتدا، رابطه بین متغیرهای مستقل (داده‌های کمکی) و متغیر وابسته (هدایت الکتریکی ظاهری) به وسیله رگرسیون درختی محاسبه شد. سپس مقادیر باقی‌مانده به دست آمده از این معادله توسط مدل کریجینگ با اریوگرام محلی به نقشه تبدیل گردید. در نهایت با جمعیت نقشه‌های باقی‌مانده‌ها و هدایت الکتریکی ظاهری مستخرج از رگرسیون درختی، نقشه پیوسته پارامترهای مورد نظر به دست آمد. نتایج نشان داد که در تخمین قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری، پارامترهای کمکی از جمله شاخص خیزی، سطوح ژئومورفولوژی و مؤلفه اول تصویر ماهواره‌ای، دارای اهمیت بیش‌تری می‌باشند. همچنین نتایج قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری در حالت افقی دارای مقدار ضریب تبیین ۰/۴۸، جذر میانگین مربعات خطا ۲۹/۶۴ و میانگین خطا ۲/۲۳- می‌باشد.

\* مسئول مکاتبه: [rtaghizadeh@ardakan.ac.ir](mailto:rtaghizadeh@ardakan.ac.ir)

این نتایج، کارایی بالای مدل رگرسیون کریجینگ با واریوگرام محلی را تأیید می‌نماید، به طوری که مدل رگرسیون کریجینگ درصد خطای پیش‌بینی را در حالت افقی نسبت به کوکریجینگ و کریجینگ به ترتیب ۲۱ و ۲۸ درصد کاهش داده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که برای تهیه نقشه رقومی خصوصیات خاک از مدل‌های رگرسیون کریجینگ با واریوگرام محلی در مطالعات آینده استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** دستگاه القاگر الکترومغناطیس (EM)، نقشه‌برداری رقومی خاک، رگرسیون درختی

### مقدمه

برای به تصویر کشیدن تغییرات مکانی خاک‌ها با هزینه کم‌تر و در مدت زمان کوتاه‌تر، به گونه‌ای که نقشه‌ای قابل قبول از خاک ارایه شود، روش‌های کمی تخمین مکانی خاک با تأکید بر منابع داده‌های قابل دسترس ارایه شده‌اند (مک‌برانتی و همکاران، ۲۰۰۳). تاکنون مدل‌های مختلفی مانند سولیم<sup>۱</sup> و اسکورپن<sup>۲</sup> برای پهنه‌بندی رقومی خاک ارایه شده است. مدل اسکورپن برای اولین بار توسط مک‌برانتی و همکاران (۲۰۰۳) معرفی گردید. در این مدل (رابطه ۱) خصوصیات یا کلاس خاک با یک سری متغیرهای محیطی (متغیرهای کمکی) ارتباط داده می‌شود. به این صورت که در هر موقعیت مشاهده خاک، یک سری متغیرهای محیطی وجود دارد که همبستگی بالایی با خصوصیات یا کلاس‌های خاک دارند که یافتن این ارتباط و پیش‌بینی خصوصیات یا کلاس‌های خاک در نقاط دیگر، منجر به تهیه نقشه رقومی خاک در تمام منطقه مورد مطالعه می‌گردد.

$$S_{a,c} = f(s, c, r, p, a, n) + e \quad (1)$$

که در آن،  $S_a$ : خصوصیات،  $S_c$ : کلاس خاک،  $s$ : مربوط به اطلاعات خاک که از نقشه خاک یا پایگاه داده یا دانش کارشناس به دست می‌آید.  $c$ : اقلیم،  $O$ : موجودات زنده از جمله فعالیت انسانی،  $r$ : پستی و بلندی یا توپوگرافی،  $p$ : مواد مادری،  $a$ : زمان و  $n$ : موقعیت مکانی می‌باشد. تابع  $f$ ، یک طبقه‌بندی نظارت شده یا برنامه یادگیری نظارت شده را نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر، در مطالعات نقشه‌برداری رقومی خاک، از داده‌های محیطی (نماینده‌های عوامل خاکساز) با تأکید بیش‌تر بر روی خصوصیات خاک، بهره گرفته می‌شود (رینالد و همکاران، ۲۰۰۸؛

1- SoLIM: Soil Land Inference Model

2- SCORPAN

وو و همکاران، ۲۰۰۸؛ وولینگ و همکاران، ۲۰۰۸). به طوری که بیش تر فعالیت‌های نقشه‌برداری رقومی به این سمت، سو گرفته‌اند که بتوانند خصوصیات خاک را از روی دیگر خصوصیات خاک پیش‌بینی کنند. که در این راستا می‌توان از دستگاه‌های نوین در عملیات خاکشناسی بهره گرفته شود. به‌عنوان مثال در زمینه ارزیابی شوری خاک، در طی دو دهه اخیر بسیاری از تکنیک‌های جدید مانند آرایه ونر<sup>۱</sup> (رودز و اینوالسون، ۱۹۷۱)، پروب‌های قابلیت هدایت الکتریکی رودز (رودز، ۱۹۷۶)، روش انعکاس‌سنجی حوزه زمانی و روش القای الکترومغناطیسی (مکنیل، ۱۹۸۰) برای اندازه‌گیری شوری خاک در شرایط مزرعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در این میان، تکنیک القای الکترومغناطیسی به دلیل این‌که برای انجام اندازه‌گیری نیازی به نمونه‌برداری خاک ندارد، از سهولت بیش‌تری برخوردار است. ابزارهای مبتنی بر القای الکترومغناطیسی که قابلیت اندازه‌گیری هدایت الکتریکی ظاهری یک توده از خاک را دارند، در تعیین الگوی تغییرات مکانی درون مزرعه‌ای برخی خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک مانند شوری، درصد رس، درصد رطوبت و عمق خاک لایه سطحی، آن هم به صورت هم‌زمان با لحظه پیمایش، مفید هستند (تریتنافالیس و همکاران، ۲۰۰۱؛ لش و همکاران، ۲۰۰۵؛ تریتنافالیس و لش، ۲۰۰۵؛ تریتنافالیس و سانتوز، ۲۰۰۹). علاوه بر این‌ها دلایل متعدد دیگری مانند قابلیت حمل آسان، سهولت کار با آن، کاهش صرف وقت و همچنین تقلیل هزینه‌های نمونه‌برداری صحرائی نیز وجود دارد که آن را نسبت به سایر روش‌های متداول در این زمینه متمایز می‌نماید. از حس‌گر القاگر الکترومغناطیسی<sup>۲</sup> (به‌ویژه EM-38) می‌توان برای اندازه‌گیری شوری لایه سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) و یا عمقی‌تر (۹۰-۰ سانتی‌متر) استفاده کرد. این حس‌گر سبک می‌باشد و اگر همراه با موقعیت‌یاب جهانی استفاده شود می‌تواند نقشه شوری خاک را تعیین نماید (تریتنافالیس و همکاران، ۲۰۰۰؛ یاو و همکاران، ۲۰۰۷؛ شنگ و همکاران، ۲۰۱۰). اما اولین قدم در استفاده از داده‌های هدایت الکتریکی ظاهری تبدیل آن‌ها به نقشه‌های سلولی<sup>۳</sup> با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آماری<sup>۴</sup> می‌باشد تا بتوانند در چارچوب کاری اسکورپن قرار گیرند و در نهایت برای پیش‌بینی خصوصیات خاک استفاده شوند. مطالعات فراوانی نشان داده است که زمین‌آمار نقش مهمی در مطالعه توزیع مکانی ویژگی‌های خاک داشته و نتایج حاصله بیش‌تر بیانگر این است که

- 1- Wenner Array
- 2- Electromagnetic Induction
- 3- Raster Map
- 4- Geostatistics

تغییرات ویژگی‌های خاک می‌تواند در فواصل بسیار کوچک (در حد چند میلی‌متر) تا فواصل طولانی (چندین کیلومتر) صورت گیرد. در زمین‌آمار می‌توان بین مقادیر یک کمیت، فاصله و جهت قرار گرفتن نمونه‌ها نسبت به یکدیگر ارتباط برقرار کرد. بنابراین در این روش ابتدا به بررسی وجود یا نبود ساختار مکانی بین داده‌ها پرداخته می‌شود و در صورت وجود ساختار مکانی تحلیل داده‌ها انجام می‌شود. بنابراین تخمین زمین‌آمار شامل دو مرحله است: مرحله اول شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر است که به وسیله آنالیز واریوگرام قابل بررسی است و مرحله دوم تخمین متغیر مورد نظر توسط توابع زمین‌آمار از جمله کریجینگ، کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ می‌باشد (مک‌براتی و همکاران، ۲۰۰۳). از میان روش‌های زمین‌آمار، پژوهش‌گران کارایی بالای تکنیک رگرسیون کریجینگ را نسبت به سایر روش‌های زمین‌آمار تأیید کرده‌اند. به‌عنوان مثال، یان و همکاران (۲۰۰۷) مطالعه‌ای را برای کاهش تراکم نمونه‌برداری برای تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ در کشور چین انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های کمکی در روش کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ در تراکم‌های نمونه‌برداری مختلف بهتر از روش کریجینگ معمولی بودند. در مقایسه با روش کوکریجینگ، روش رگرسیون کریجینگ مقدار ریشه مربعات خطا را از  $41/5$  به  $23/6$  میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر کاهش داد، به این علت که در روش رگرسیون کریجینگ می‌تواند از داده‌های کمکی بیش‌تری استفاده کند. به‌طور مشابه، الدیری و گارسیا (۲۰۰۹) نیز قابلیت دو روش کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ را در تهیه نقشه شوری خاک مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها در این مطالعه، ترکیب باندهای مطلوب تصاویر لندست (متغیر کمکی) را برای پیش‌بینی شوری به‌کار بردند. نتایج نشان داد که روش رگرسیون کریجینگ در مقایسه با روش کوکریجینگ کارایی بالاتری داشته است؛ به‌طوری‌که این روش توانسته تغییرات موضعی کوچک در شوری خاک را نیز به خوبی پیش‌بینی نماید.

اما عدم کارایی روش‌های زمین‌آمار از جمله رگرسیون کریجینگ در بعضی از مناطق احتمالاً مربوط به تنوع زیاد خاک‌ها می‌باشد، به‌طوری‌که واریوگرام کلی نمی‌تواند پیوستگی مکانی بین داده‌های خاک را نشان دهد. ایسلا و همکاران (۲۰۰۳) تغییرات شوری خاک را در شش مزرعه مختلف با استفاده از دستگاه EM-38 اسپانیا مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که تفاوت در دامنه تأثیر در شش مزرعه بیانگر این موضوع می‌باشد که آنالیزهای محلی زمین‌آمار برای تهیه نقشه شوری خاک واقعی نیاز است. در سال‌های اخیر پژوهشگرانی از جمله سون و همکاران (۲۰۱۲)؛ کومار و همکاران

(۲۰۱۲)؛ سامپسون و همکاران (۲۰۱۳)؛ مرسدر و همکاران (۲۰۱۱) تمایل بیشتری را برای استفاده از واریوگرام‌های محلی به جای واریوگرام کلی نشان داده‌اند. به‌عنوان نمونه، سلیمان و همکاران (۲۰۱۳) از رگرسیون کریجینگ با واریوگرام محلی برای پیش‌بینی ماده آلی خاک در کشور اندونزی استفاده کردند.

با توجه به مطالعات انجام شده تاکنون، در این پژوهش، برای تهیه نقشه رقومی قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری (اندازه‌گیری شده با دستگاه القاگر الکترومغناطیس) در دو حالت افقی و عمودی، از تکنیک رگرسیون کریجینگ با واریوگرام محلی براساس چارچوب کاری اسکورپن استفاده می‌شود. در روش رگرسیون کریجینگ با واریوگرام محلی، واریوگرام جداگانه‌ای در هر موقعیت جغرافیایی با توجه به داده‌های قرار گرفته در آن مکان، محاسبه و از اطلاعات آن در برای پیش‌بینی پارامتر مورد نظر استفاده خواهد شد. همچنین نتایج مدل رگرسیون کریجینگ با مدل‌های کریجینگ و کوکریجینگ مقایسه گردید.

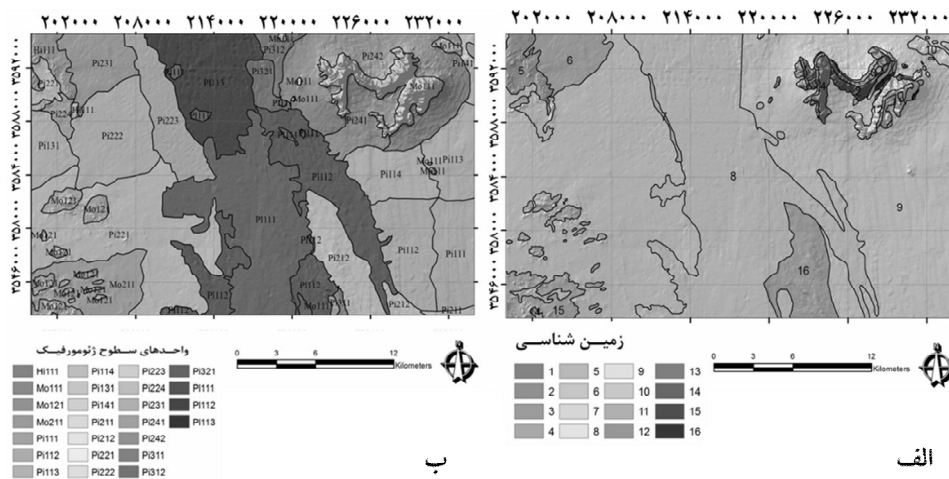
### مواد و روش‌ها

**تشریح محدوده مطالعاتی:** منطقه مورد مطالعه در ایران مرکزی واقع شده است و وسعتی برابر با ۷۲۰۰۰ هکتار از اراضی دشت یزد- اردکان را شامل می‌شود. این منطقه بین طول‌های جغرافیایی ۵۳ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۲۷ دقیقه شمالی در زون ۴۰ قرار دارد و دارای مشکلات شوری منابع آب و خاک است. منطقه مورد بحث از جنوب به شهر اردکان و از شرق به رشته‌کوه هرشت و از شمال به چاله سیاه‌کوه و از غرب به رشته‌کوه‌های شیرکوه منتهی می‌شود. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را بر روی تصویر ماهواره‌ای ETM<sup>+</sup> در استان یزد نشان می‌دهد. میانگین تبخیر و تعرق مرجع، دما و بارندگی سالیانه منطقه مورد مطالعه به ترتیب برابر ۳۴۸۳ میلی‌متر، ۱۸/۵ درجه سلسیوس و ۷۵ میلی‌متر است که محدود به بارش‌های زمستانه می‌باشد (سازمان هواشناسی کشور، ۲۰۱۳). بنابراین رژیم رطوبتی و حرارتی خاک به ترتیب اریدیک<sup>۱</sup> و ترمیک<sup>۲</sup> طبقه‌بندی می‌شود (بنایی، ۱۹۹۸). منطقه مورد مطالعه از نظر توپوگرافی بیش‌تر مسطح بوده و تنها رشته‌کوه‌هایی در شمال شرق منطقه دیده می‌شود، به‌طوری‌که

- 
- 1- Aridic
  - 2- Thermic



نقشه ژئومورفولوژی: برای تهیه نقشه ژئومورفولوژی، بر روی عکس‌های هوایی ۱/۵۵۰۰۰ منطقه روکش طلق‌مانندی کشیده شد تا خطوط سطوح ژئومورفیک روی آن‌ها ترسیم گردد. برای تفکیک واحدهای اراضی از سیستم استریوسکوپی برای تشخیص تفاوت‌ها استفاده گردید. در تفکیک واحدها از مفهوم خاکسازی استفاده و براساس دانش ژئومورفولوژی و شناخت فرآیندهای تکامل واحدهای اراضی و در نظر گرفتن تکامل خاک‌ها و همچنین خصوصیات منند تن، بافت و شکل عارضه‌ها در عکس هوایی، واحدها ترسیم و با ارتباط همراه با تأثیر دادن ویژگی‌های زمین‌شناسی (شکل ۲ و جدول ۱)، توپوگرافی و پوشش گیاهی یا کاربری اراضی، سطوح ژئومورفیک یکنواختی ترسیم گردید (زینک، ۱۹۹۰). سپس عکس‌های هوایی و روکش مربوطه اسکن شده و وارد محیط سامانه جغرافیایی (پی‌سی‌آی ژئوماتیکا) گردید. در مراحل بعد، عکس‌ها و روکش‌های وارد شده به سامانه جغرافیایی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به روش ارتوفوتوژئورفرنسینگ با دقت ۰/۵۰ (رزیتیر و هنگل، ۲۰۰۱) زمین مرجع شدند. با رقومی کردن مرزهای ترسیم شده بر روکش عکس‌ها، نقشه ژئومورفولوژی تهیه گردید (شکل ۲ و جدول ۲).



شکل ۲- نقشه واحدهای زمین‌شناسی (الف) و ژئومورفولوژی (ب).

جدول ۱- راهنمای کدهای زمین شناسی مربوط به شکل ۲ (الف).

کدهای زمین شناسی	توضیحات
۱	کنگلومرای قهوه‌ای رنگ ( $K^{c2}$ )
۲	سنگ آهک خاکستری شامل رودیست و اوربیتولین ( $KI_1$ )
۳	سنگ آهک تیره نازک لایه ( $KI_2$ )
۴	سنگ آهک ضخیم شامل رودیست و اوربیتولین ( $KI_3$ )
۵	مارن‌های گچ‌دار به رنگ قرمز رنگ ( $M^m$ )
۶	تراس‌های قدیمی و مخروط افکنه‌های بلند ( $Q^1$ )
۷	نهشت‌های رودخانه‌ای عهد حاضر ( $Q^a$ )
۸	اراضی رسی ( $Q^e$ )
۹	پادگانه‌ها و مخروط افکنه‌های جوان ( $Q^{t2}$ )
۱۰	کنگلومرای قرمز رنگ ( $K^{c1}$ )
۱۱	سنگ آهک ریفی کرم رنگ ( $K_r$ )
۱۲	سنگ آهک نازک لایه خاکستری رنگ ( $K_v$ )
۱۳	سنگ آهک خاکستری ( $K$ )
۱۴	گرانیت و دایک‌های گرانیتی (g)
۱۵	توف‌ها و گدازه‌های آندزیتی، داسیتی و ریوداسیتی به رنگ خاکستری تا سبز ( $E^v$ )
۱۶	لایه‌های مارن قرمز ژیبس‌دار ( $E^{gm}$ )

جدول ۲- راهنمای کدهای واحدهای ژئومورفولوژیکی مربوط به شکل ۲ (ب).

زمین‌نما	لندفرم	لیتولوژی	سطح ژئومرفیک	علامت
کوه	رخنمون بریده شده	سنگ آهک و دولومیت	سطح سنگی	Mo111
		آندزیت خاکستری تا سبز به همراه آهک	سطح سنگی	Mo121
	پدیمنت سنگی	آهک و شیل تیره	سطوح فرسوده	Mo211
تپه	رخنمون فرسایش یافته	گچ و ماسه سنگ	سیستم زهکشی شاخه درختی با ارتفاع به نسبت زیاد	Hi111
دامنه	فن بادبزنی شکل	آبرفت‌های سنگ‌های آهکی	فن فعال، قسمت بالایی	Pi111
			فن فعال، قسمت پایینی با شوری زیاد	Pi112
			فن فعال، قسمت بالایی، شبکه متراکم	Pi113
			زهکش، سنگفرش بیابانی	



علامت	سطح ژئومرفیک	لیتولوژی	لندفرم	زمین نما
Pi114	فن فعال، قسمت پایینی، شبکه متراکم زهکش، سنگفرش بیابانی			
Pi131	فن فعال، قسمت پایینی، شبکه متراکم زهکش، دارای شیب به نسبت زیاد			
Pi141	فن فعال، قسمت پایینی، دارای اراضی سنگلاخی			
Pi211	قسمت بالایی، شیب زیاد، شبکه زهکشی متراکم	آبرفت های سنگ های آهکی خاکستری با ماسه سنگ قرمز	فن های متصل	
Pi212	قسمت پایینی با شیب به نسبت زیاد			
Pi221	قسمت بالایی با ذرات درشت و شوری به نسبت زیاد			
Pi222	قسمت بالایی با شبکه زهکشی موازی			
Pi223	قسمت پایینی با آبرفت های جدید			
Pi224	باهادای کشت شده و شور			
Pi231	قسمت بالایی با ذرات درشت و شوری به نسبت زیاد	آبرفت های تپه های گچی		
Pi241	ذرات درشت و شوری به نسبت زیاد	آبرفت های سنگ های آهکی و دولومیتی		
Pi242	ذرات درشت با شبکه زهکشی متراکم			
Pi311	پستی و بلندی کم تر و تقریباً مسطح با ارتفاع کم	آبرفت های شیل و ماسه سنگ و گچ	فن های متصل قدیمی	
Pi312	پستی و بلندی بیش تر با آبراهه های عمیق			
Pi321	پستی و بلندی بیش تر با آبراهه های عمیق و ذرات درشت	آبرفت های گچی		
PI111	سطوح رسی هموار، کشت شده	آبرفت های دانه ریز و دانه درشت	گودی اردکان	پلایا
PI112	سطوح رسی با شبکه زهکشی متراکم و شور			
PI113	سطوح رسی پف کرده با شوری بسیار زیاد و مرطوب			

استخراج ویژگی‌های زمین‌نما: در این پژوهش از مدل رقومی ارتفاع موجود در سامانه نقشه‌برداری کشور (اندازه سلول ۱۰ متر) استفاده گردید. بعد از آماده کردن مدل ارتفاع رقومی و رفع اطلاعات زائد با استفاده از تئوری موجک<sup>۱</sup>، از آن برای استخراج اطلاعات کمکی استفاده گردید. ویژگی‌های زمین‌نما مانند شیب<sup>۲</sup>، ارتفاع<sup>۳</sup>، ارتفاع بالای شبکه زهکشی<sup>۴</sup>، مساحت حوزه‌های اصلاح شده<sup>۵</sup>، موقعیت میانی شیب<sup>۶</sup>، عمق دره<sup>۷</sup>، شاخص خیسی<sup>۸</sup>، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا<sup>۹</sup>، شاخص بالای پشته با درجه تفکیک بالا<sup>۱۰</sup> و شیب حوزه<sup>۱۱</sup> در محیط سامانه جغرافیایی ساگا<sup>۱۲</sup> محاسبه و استخراج گردید. روش استخراج تمام ویژگی‌های مزبور در روش ارایه شده توسط هنگل و همکاران (۲۰۰۴) تشریح گردیده است.

تصاویر ماهواره‌ای: بیش‌تر منطقه مطالعاتی، بدون پوشش گیاهی بوده، بنابراین تغییرات خصوصیات و نوع خاک توسط اطلاعات ماهواره‌ای قابل تشخیص می‌باشد (مترینخ و زینک، ۲۰۰۳). در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای سنجد  $ETM^+$  استفاده گردید. تصاویر این سنجد مربوط به تابستان ۱۳۸۵ می‌باشند. این تصویر از ۶ باند (باند ۱: ۰/۵۲-۰/۶۰ میکرومتر، باند ۲: ۰/۵۲-۰/۶۰ میکرومتر، باند ۳: ۰/۶۳-۰/۶۹ میکرومتر، باند ۴: ۰/۷۶-۰/۹۰ میکرومتر، باند ۵: ۱/۵۵-۱/۷۵ میکرومتر، باند ۷: ۲/۰۸-۲/۳۵ میکرومتر) تشکیل شده است. تفکیک مکانی باندهای مرئی و مادون قرمز انعکاسی ۲۸/۵ متر، باند حرارتی ۶۰ متر و باند پانکروماتیک ۱۴/۲۵ متر می‌باشد. فایل نقشه توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردید. تطابق هندسی تصاویر با استفاده از نرم‌افزار ERDAS با استفاده از نقاط کنترل زمینی به روش تصویر به نقشه انجام شد، که در این روش برداشت مختصات نقاط معلوم (تقاطع جاده‌ها، ...) از روی نقشه توپوگرافی با مقیاس

- 1- Wavelet
- 2- Slope
- 3- Elevation
- 4- Altitude Above Channel Network
- 5- Modified Catchments Area
- 6- Mid-Slope Position
- 7- Valley Depth
- 8- Wetness Index
- 9- Multi-Resolution Index of Valley Bottom Flatness (MrVBF)
- 10- Multi-Resolution Ridge-Top Flatness Index (MrRTF)
- 11- Catchment Slope
- 12- SAGA

۱:۲۵۰۰۰ صورت پذیرفت. تعداد ۳۰ نقطه کنترلی برای تصویر  $ETM^+$  انتخاب گردید و میزان RMSE نهایی معادل ۰/۴۲ به دست آمد. عمل نمونه‌گیری مجدد به طریق نزدیک‌ترین همسایه برای باندهای اصلی صورت گرفت. همچنین، برای کاهش دادن تعداد داده‌های خام (تعداد باندها) تصویر ماهواره‌ای از یک تجزیه به مؤلفه‌های اصلی براساس ماتریس همبستگی استفاده گردید. براساس عوامل خاکسازي در منطقه یک‌سری شاخص‌هایی مانند شاخص گیاهی نرمال‌شده<sup>۱</sup> (نشان‌دهنده وضعیت پوشش گیاهی)، شاخص رس<sup>۲</sup>، شاخص کربنات<sup>۳</sup>، شاخص گچ<sup>۴</sup>، شاخص شوری<sup>۵</sup> و شاخص روشنایی<sup>۶</sup> (نشان‌دهنده ترکیبات زمین‌شناسی مواد سطحی) محاسبه گردید.

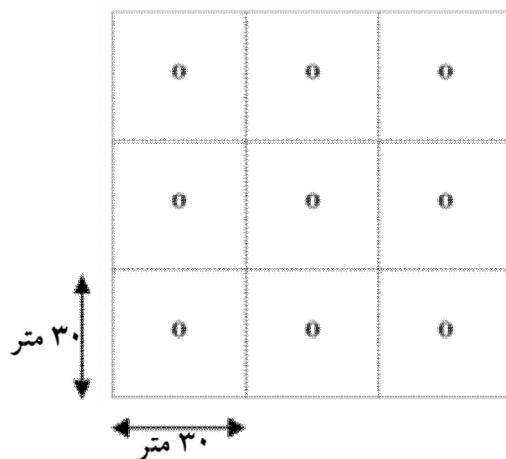
**قرائت‌های دستگاه الفاکر الکترومغناطیس:** دستگاه مورد نظر طوری طراحی شده که می‌تواند در سطوح وسیع با سرعت بالا و بدون نیاز به تماس الکترودها با زمین به کار برده شود (شکل ۳). انجام قرائت با این دستگاه بسیار سریع است و حتی در صورت امکان می‌توان آن را به همراه یک ارابه در پشت یک وسیله نقلیه نصب و پیمایش‌ها را به صورت پیوسته انجام داد. این دستگاه از اصول القای الکترومغناطیسی استفاده کرده و می‌تواند قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری یک حجم مشخص از خاک را اندازه‌گیری نماید. عمق و حجم مؤثر دستگاه وابسته به ارتفاع قرارگیری آن نسبت به سطح زمین و همچنین وضعیت قرار گرفتن آن (افقی یا عمودی) در هنگام انجام قرائت‌ها است. در این پژوهش، پس از مراجعه به محل‌هایی که توسط مدل مربع لاتین انتخاب شده بودند (۱۷۳ نقطه)، اقدام به قرائت دستگاه EM-38 در دو وضعیت قرارگیری افقی<sup>۷</sup> (۷۵- سانتی‌متر) و عمودی<sup>۸</sup> (۱۵۰- سانتی‌متر) شد. علاوه بر این نقاط، به منظور افزایش تراکم نمونه‌برداری EM-38 در منطقه مطالعاتی، در تعدادی نقاط دیگر (۳۱۱ نقطه) با فاصله تقریبی ۱۵۰۰ متر نیز قرائت‌های افقی و عمودی انجام شد. همچنین در این مطالعه برای بررسی تغییرات در فواصل کوتاه‌تر، قرائت‌هایی در ۲۴ محل، به فاصله ۳۰ متر در یک شبکه فرضی به ابعاد ۹۰ متر در ۹۰ متر صورت پذیرفت (۲۱۶ نقطه). این روش را می‌توان قرائت

- 1- Normalized Difference Vegetation Index
- 2- Clay Index
- 3- Carbonate Index
- 4- Gypsum Index
- 5- Salinity Index
- 6- Brightness Index
- 7- EMh
- 8- EMv

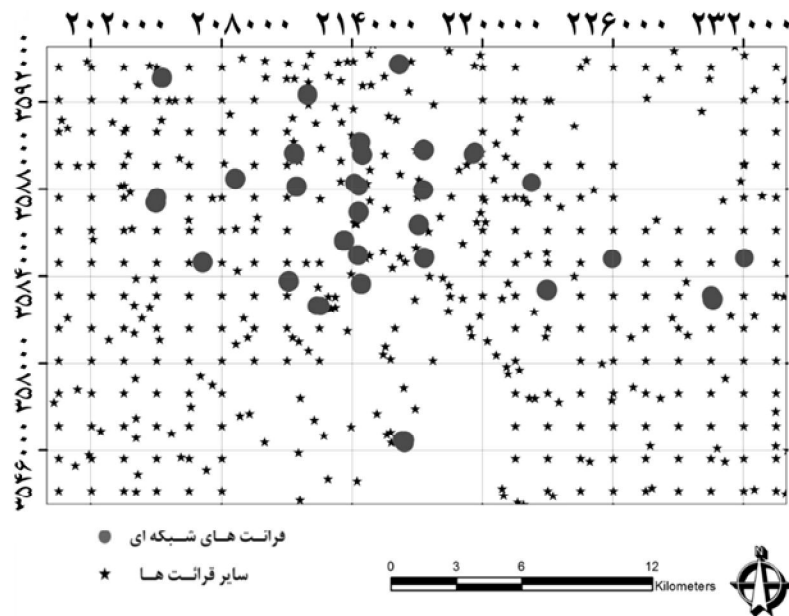
شبکه‌ای دستگاه القاگر الکترومغناطیس نامید که در شکل ۴ نشان داده شده است. روی هم‌رفته ۷۰۰ قرائت EM-38 در دو وضعیت افقی و عمودی در منطقه مورد مطالعه انجام گرفت که پراکنش جغرافیایی آن‌ها را می‌توان در شکل ۵ دید.



شکل ۳- نمایی از دستگاه القاگر الکترومغناطیس از نوع EM-38 و ساخت شرکت ژئونیکس کانادا.



شکل ۴- نحوه داده‌برداری توسط دستگاه EM-38 در درون محدوده مطالعاتی (قرائت‌های شبکه‌ای).



شکل ۵- پراکنش مکانی نقاطی که قرائت آن‌ها توسط دستگاه القاگر الکترومغناطیس انجام گرفته است (در شکل محل قرائت‌هایی که به صورت شبکه‌ای با فواصل ۳۰ متر نیز برداشت شده مشخص است).

آماده‌سازی داده‌ها برای مدل‌سازی: برای پهنه‌بندی، داده‌های قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند. همچنین، تمام لایه‌های اطلاعاتی یا کمکی (جدول ۳) به فرمت پیوسته با اندازه سلولی ۳۰ متری تهیه شدند. این اطلاعات به‌عنوان متغیرهای وابسته در مدل اسکورپن (مک‌براتنی و همکاران، ۲۰۰۳) شناخته می‌شوند. تمامی اطلاعات (داده‌های قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری و متغیرهای محیطی) به‌صورت نهایی txt تبدیل شده و برای انجام فرآیند مدل‌سازی در نرم‌افزارهای مربوطه (R و ArcGIS) آماده شدند.

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار جلد (۴)، شماره (۴) ۱۳۹۳

جدول ۳- پارامترهای کمی مورد استفاده برای پهنه‌بندی شوری خاک.

داده‌های کمی	پارامترهای مستخرج‌شده	تعریف	منبع	فاکتورهای خاک‌سازی
	ارتفاع	ارتفاع بالای سطح دریای آزاد (متر)	مدل رقومی ارتفاع	توپوگرافی
	ارتفاع بالای شبکه زهکشی	ارتفاع بالای آبراهه	اولایا (۲۰۰۴)	توپوگرافی
	مساحت حوزه‌های اصلاح‌شده	تجمعات جریان آب و پارامترهای مربوطه مقدار تشابه هر نقطه را	اولایا (۲۰۰۴)	توپوگرافی
	موقعیت شیب میانی	نسبت به قسمت پایین و بالا با رنج ۱۰۰-۰ محاسبه می‌کند	بوهرنر و آنتونیک (۲۰۰۹)	توپوگرافی
پارامترهای سرزمین	شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا	میزان همواری و پایین بودن را محاسبه می‌کند	اولایا (۲۰۰۴)	توپوگرافی
	شاخص همواری قله با درجه تفکیک بالا	میزان همواری و بالا بودن را محاسبه می‌کند	اولایا (۲۰۰۴)	توپوگرافی
	عمق دره	متر وضعیت پیکسل‌ها را	اولایا (۲۰۰۴)	توپوگرافی
	شاخص خیسی	در مورد نگاه‌داشت رطوبت بیان می‌کند.	اولایا (۲۰۰۴)	توپوگرافی و اقلیم
	شیب حوزه	میزان گرادیان بالای مسیر حرکت	اولایا (۲۰۰۴)	توپوگرافی و اقلیم
	تجزیه به مولفه‌های اصلی ۶ بانده	سه مولفه اصلی	نیل و همکاران (۲۰۰۷)	مواد مادری، خاک و زمان
	شاخص گیاهی نرمال‌شده	$(B_4 - B_3) / (B_4 + B_3)$	بوتینگر و همکاران (۲۰۰۸)	پوشش گیاهی
داده‌های ماهواره‌ای	شاخص رس	$B_6 / B_7$	بوتینگر و همکاران (۲۰۰۸)	مواد مادری و خاک
	شاخص گچ	$(B_6 - B_4) / (B_6 + B_4)$	نیل و همکاران (۲۰۰۷)	مواد مادری و خاک
	شاخص شوری	$(B_7 - B_4) / (B_7 + B_4)$	مترینیخ و زینک (۲۰۰۳)	مواد مادری و خاک
	شاخص روشنایی	$((B_7)_r + (B_4)_r) \cdot 0.5$	مترینیخ و زینک (۲۰۰۳)	مواد مادری و خاک
	شاخص کربناته	$B_7 / B_6$	بوتینگر و همکاران (۲۰۰۸)	مواد مادری و خاک
نقشه ژئومورفولوژی	واحدهای ژئومورفولوژی	سطوح ژئومورفیک	زینک (۱۹۹۰)	مواد مادری، توپوگرافی و خاک

## مدل‌سازی

رگرسیون کریجینگ: رگرسیون کریجینگ یا کریجینگ بعد از حذف روند، یک روش هیبریدی است که شامل یک مدل رگرسیون و کریجینگ ساده می‌باشد. در این پژوهش برای پهنه‌بندی قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری خاک از مدل رگرسیون کریجینگ با واریوگرام محلی<sup>۱</sup> استفاده گردید. بدین منظور در ابتدا تمام لایه‌های اطلاعاتی به صورت سلولی تبدیل گردید. سپس یک رابطه رگرسیون درختی بین پارامترهای کمکی و داده‌های هدایت الکتریکی ظاهری ایجاد و از مقادیر باقی‌مانده برای تهیه نقشه پیوسته خطا با استفاده از واریوگرام محلی<sup>۲</sup> استفاده گردید (حذف روند). اجرای واریوگرام محلی شامل ۴ مرحله می‌باشد: (۱) پیدا کردن نزدیک کردن نقاط همسایه نسبت به نقطه‌ای که پیش‌بینی در آن صورت می‌گیرد (۲) ایجاد واریوگرام تجربی با استفاده از نقاط همسایه (۳) برازش مدل مناسب به واریوگرام تجربی (۴) پیش‌بینی مقدار شوری در نقطه مورد نظر. باید دقت شود که در واریوگرام عام<sup>۳</sup> تنها یک واریوگرام برای کل منطقه محاسبه می‌شود. در سال‌های اخیر، پژوهشگران به‌طور وسیعی از واریوگرام محلی در مطالعات نقشه‌برداری رقومی خاک استفاده می‌کنند (سون و همکاران (۲۰۱۲)؛ کومار و همکاران (۲۰۱۲)؛ سامپسون و همکاران (۲۰۱۳)؛ مرسلر و همکاران (۲۰۱۱)؛ سلیمان و همکاران (۲۰۱۳)). در نهایت نقشه خطایی که به دست آمده را با نقشه به دست آمده از مدل درختی (کیونلان، ۲۰۰۱) با هم تلفیق کرده تا نقشه نهایی هدایت الکتریکی ظاهری در دو حالت افقی و عمودی به دست بیاید.

کریجینگ: کریجینگ عبارت از یک روش تخمین زمین‌آماری است که بر پایه میانگین متحرک وزن‌دار استوار می‌باشد. به طوری که می‌توان گفت این روش بهترین تخمینگر خطی نااریب<sup>۴</sup> می‌باشد. این تخمینگر به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

که در آن،  $Z^*(x_i)$ : عیار تخمینی،  $\lambda_i$ : وزن یا اهمیت کمیت وابسته به نمونه  $i$  ام و  $z(x_i)$ : مقدار متغیر اندازه‌گیری شده می‌باشد (مک‌براتی و همکاران، ۲۰۰۳).

- 
- 1- Local Variogram
  - 2- Local Variogram
  - 3- Global Variogram
  - 4- Best Linear Unbiased Estimator (B.L.U.E)

روش کوکریجینگ: همان طور که در آمار کلاسیک نیز روش های چندمتغیره وجود دارد، در زمین آمار نیز می توان از روش کوکریجینگ و براساس همبستگی بین متغیرهای مختلف، برای تخمین استفاده کرد. معادله کوکریجینگ به شرح زیر می باشد (مک براتی و همکاران، ۲۰۰۳).

$$Z^*(x_i) = \sum_{e'=1}^n \lambda_{e'} \cdot x_i \cdot \sum_{k=1}^n \lambda_k \cdot y(x_k) \quad (3)$$

که در آن،  $Z^*(x_i)$ : مقدار تخمین زده شده برای نقطه  $x_i$  می باشد،  $\lambda_i$ : وزن مربوط به متغیر  $Z$ ،  $\lambda_k$ : وزن مربوط به متغیر کمکی  $y$ ،  $Z(x_i)$ : مقدار مشاهده شده متغیر اصلی و  $y(x_k)$ : مقدار مشاهده شده متغیر کمکی است. برای تخمین با این روش و برای محاسبه اوزان مربوطه، نیاز به محاسبه واریوگرام متقابل به صورت زیر می باشد:

$$\gamma(z_y)h = \frac{1}{n} [z(x_i + h) - z(x_i)] \times [y(x_k) - y(x_k)] \quad (4)$$

که در آن،  $\gamma(z_y)h$ : واریوگرام متقابل بین متغیر  $Y$  و  $Z$ ،  $Z(x_i)$ : متغیر مشاهده شده و  $y(x_k)$ : متغیر کمکی می باشد.

بررسی عملکرد مدل نقشه برداری رقومی: برای بررسی عملکرد مدل در برآورد متغیرهای وابسته (حالت افقی و عمودی) از یک سری معیارهایی استفاده گردید. معیارهایی که برای بررسی دقت مدل استفاده شدند شامل جذر میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup>، ضریب تبیین<sup>۲</sup> و میانگین خطا<sup>۳</sup> بودند (رابطه های ۵، ۶ و ۷). لازم به ذکر می باشد که برای بررسی دقت مدل ها برای تخمین قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری، داده ها به دو دسته آموزش (۸۰ درصد از داده های نمونه برداری شده) و آزمون (۲۰ درصد از داده های نمونه برداری شده) به طور تصادفی تقسیم شدند.

$$RMSE = \left[ \frac{\sum (X_o - X_e)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

1- Root Mean Square Root Error (RMSE)

2- Coefficient of Determination (R2)

3- Mean Error (ME)



$$R^v = \left[ \frac{\sum ((X_e - \bar{X}_e)(X_o - \bar{X}_o))}{\sqrt{\sum ((X_e - \bar{X}_e)^2 (X_o - \bar{X}_o)^2)}} \right]^2 \quad (6)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_o - X_e) \quad (7)$$

که در آن،  $X_e$  و  $X_o$  به ترتیب شوری مشاهداتی و تخمین زده شده،  $\bar{X}_e$  و  $\bar{X}_o$  به ترتیب میانگین شوری مشاهداتی و تخمین زده شده و  $n$ : تعداد داده‌ها می‌باشد.

### نتایج و بحث

خلاصه آماری قابلیت هدایت الکتریکی و قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری: در جدول ۴ خلاصه آماری داده‌های قابلیت هدایت الکتریکی در چهار عمق و قرائت‌های قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری در دو حالت عمودی<sup>۱</sup> و افقی<sup>۲</sup> آمده است. در این جدول حداکثر، حداقل، میانگین، انحراف استاندارد، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی متغیرها مشخص شده است. همان‌طور که نتایج آماری نشان می‌دهد به‌عنوان مثال هدایت الکتریکی در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری دارای حداقل یک و حداکثر ۲۴۵ با میانگین ۵۵/۹۰ دسی‌زیمنس بر متر است، که بیانگر وضعیت خیلی نامطلوب جامعه مورد بررسی از نظر شوری است. این مقادیر شوری بسیار زیاد در منطقه مورد مطالعه، توسط پژوهشگرانی دیگر مانند خرسندی و یزدی (۲۰۱۱) نیز گزارش شده است. ولی باید به این نکته توجه نمود که در مورد متغیرهای پیوسته‌ای همانند شوری خاک، میانگین نمی‌تواند شاخص مناسبی از وضعیت متغیر مورد مطالعه باشد. انحراف استاندارد، از جمله ابزارهای آماری هستند که انحراف داده‌ها از میانگین را بیان می‌کنند. بنابراین، از این ابزارها می‌توان برای بررسی تناسب میانگین به‌عنوان شاخص متغیر مورد مطالعه استفاده نمود. انحراف استاندارد بالا بیانگر انحراف شدید داده‌ها از میانگین جامعه می‌باشد. به‌عنوان مثال در مورد هدایت الکتریکی عصاره اشباع در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری انحراف استاندارد ۶۶/۰۰ دسی‌زیمنس بر متر است می‌باشد و به دلیل این که انحراف معیار از میانگین جامعه زیاد است، نمی‌توان میانگین را به‌عنوان تخمینی از متغیر مورد بررسی در جامعه مورد مطالعه به‌کار برد. انحراف

1- Vertical Mode (ECav)

2- Horizontal Mode (ECah)

استاندارد گرچه میزان تغییرات یک متغیر را بیان می‌کند ولی به تنهایی نمی‌توان از آن جهت مقایسه دو متغیر استفاده نمود. ضریب تغییرات معیار آماری است که برای مقایسه بزرگی تغییرات در دو توزیع می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. این معیار به دلیل این که مستقل از میانگین بوده و واحد ندارد به سادگی می‌توان آن را در دو توزیع مقایسه نمود. به عبارت دیگر انحراف استاندارد تحت تأثیر بزرگی میانگین می‌باشد. در حقیقت ضریب تغییرات هدایت الکتریکی در عصاره اشباع بسیار بالا بوده و گستره‌ای در حدود ۹۷-۱۱۸ را دارند. به طور مشابه، ضریب تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه نیز در هر دو حالت بسیار زیاد بود (۹۲-۸۵). اما این مقادیر ضریب تغییرات در مقایسه با مورد مشابه در قابلیت هدایت الکتریکی خاک، کم‌تر می‌باشند. این مسأله را می‌توان به این شکل توجیه کرد که دستگاه القاگر الکترومغناطیس، قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری خاک را در حجم بزرگ‌تری (ابعاد  $1/5 \times 2 \times 1$ ) از خاک اندازه می‌گیرد در حالی که اعداد شوری مربوط به حجم کوچک‌تری از خاک (نمونه‌های تقریباً ۲ کیلوگرمی خاک) می‌باشند. چولگی، انحراف میانگین از میانه را نمایش می‌دهد. داده‌های مورد بررسی، مانند اکثر خصوصیات خاک، دارای چولگی مثبت می‌باشند. افراستگی، حالت تخت یا مرتفع بودن منحنی توزیع را بیان می‌کند. با توجه به این که مدل درخت تصمیم هیچ پیش‌نیازی در مورد توزیع داده‌ها را لازم ندارد، در این مطالعه هیچ تبدیلی بر روی داده‌ها اعمال نگردید.

جدول ۴- پارامترهای آماری مربوط به مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی و هدایت الکتریکی ظاهری.

لایه (سانتی متر)	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	افراستگی	میانه
$ECe$ (۰-۱۵)	۱	۲۴۵/۴	۵۵/۹	۶۶/۰	۱۱۸/۰	۱/۳۸	۰/۸۶	۳۰/۲
$ECe$ (۱۵-۳۰)	۱/۳	۲۳۸/۶	۶۴/۲	۶۶/۸	۱۰۴/۰	۰/۸۸	-۰/۵۴	۳۳/۸
$ECe$ (۳۰-۶۰)	۱	۲۱۰/۰	۵۷/۳	۵۵/۹	۹۷/۴	۰/۸۹	-۰/۳۱	۴۰
$ECe$ (۶۰-۱۰۰)	۱	۲۳۱/۹	۴۰/۷	۴۱/۱	۱۰۰/۹	۲/۰۸	۵/۹۴	۳۰/۴
$ECah$ (۰-۷۵)	۱	۲۵۴	۵۶/۲	۵۱/۷	۹۲/۰	۱/۴۷	۱/۶۹	۳۶/۵
$ECav$ (۰-۱۵۰)	۳	۳۴۰	۸۰/۱	۶۸/۷	۸۵/۷	۱/۲۹	۱/۱۸	۵۶/۵

تصاویر ماهواره‌ای: دومین فاکتور محیطی مورد استفاده در این پژوهش تصویر ماهواره‌ای ETM<sup>+</sup> می‌باشد. در این مطالعه از مؤلفه‌های اصلی به جای باندهای ۱ تا ۶ تصویر استفاده گردید. نتایج مؤلفه‌های اصلی در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد سه مؤلفه اول ۹۹ درصد تغییرات را شامل می‌شود؛ بنابراین سه مؤلفه اول به‌عنوان ورودی مدل انتخاب شدند. اولین مؤلفه ۸۹/۸۱ درصد تغییرات باندهای تصویر را در بر می‌گیرد و بالاترین مقدار ویژه متعلق به باند ۲ و کم‌ترین آن مربوط به باند ۴ می‌باشد.

جدول ۵- مؤلفه‌های اصلی به همراه پارامترهای مربوطه.

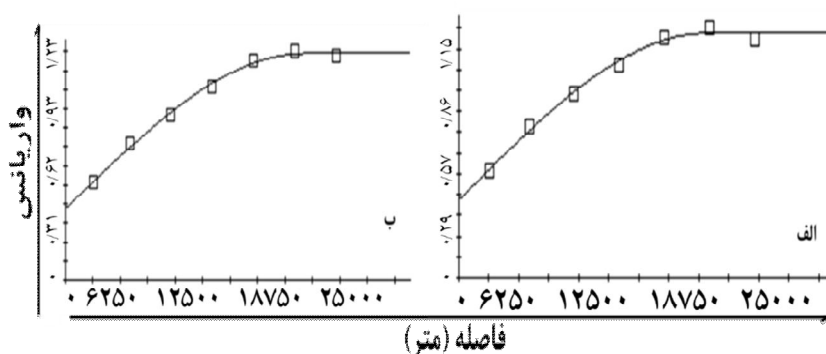
عامل‌ها	مقادیر ویژه	درصد واریانس
۱	۵/۳۸	۸۹/۸۱
۲	۰/۳۱	۹۵/۰۵
۳	۰/۲۵	۹۹/۳۳
۴	۰/۰۳	۹۹/۸۶
۵	۰/۰۰	۹۹/۹۷
۶	۰/۰۰	۱۰۰

#### تهیه نقشه رقومی قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری

کریجینگ: اولین گام در استفاده از روش کریجینگ بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌ها توسط آنالیز واریوگرام می‌باشد، بدین منظور اقدام به ترسیم واریوگرام با استفاده از داده‌های نرمال گردید. شکل ۶ واریوگرام مربوط به روش کریجینگ را نشان می‌دهد. مدل کروی<sup>۱</sup> به‌ازای فواصل کم بین زوج نقاط در نزدیکی مبدا رفتار خطی دارد. اما در فاصله‌های بزرگ‌تر، شیب آن کاهش می‌یابد. شیب کم نیم‌تغییرنما در نزدیکی مبدأ دلالت بر وجود پیوستگی متغیر مکانی دارد. بخش پرش نیم‌تغییرنما که قسمت میانی نیم‌تغییرنما می‌باشد، تا حدودی دلالت بر درجه همگنی محیط دارد. هرچه شیب این منحنی بیش‌تر باشد، محیط ناهمگن‌تر است و در فاصله کم‌تری به سقف می‌رسد. از طرف دیگر یکی از شرایط اساسی برای استفاده از روش‌های زمین‌آماری ایستا بودن داده‌ها است. نیم‌تغییرنما پارامتر شوری به سقف معینی می‌رسد که نشان‌دهنده پایایی است. پس از

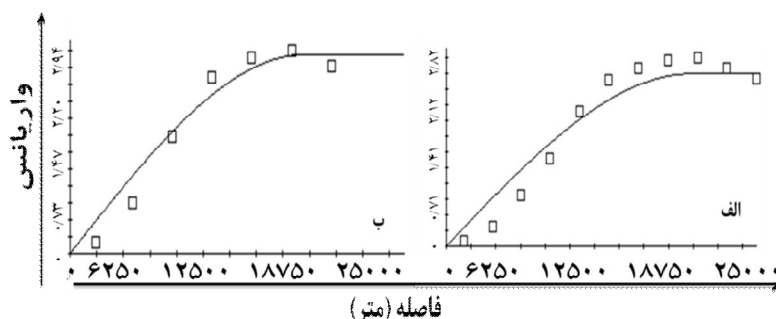
1- Exponential

مشخص شدن واریوگرام، مدل کریجینگ برای حالت‌های افقی و عمودی اجرا گردید که به ترتیب جذر میانگین مربعات خطا  $37/93$  و  $48/30$ ، میانگین خطا  $1/87$  و  $2/13$ - و ضریب تبیین قابل قبول  $0/37$  و  $0/40$  به دست آمد.



شکل ۶- واریوگرام‌های مربوط به هدایت الکتریکی ظاهری با توجه به روش کریجینگ (قرائت‌های افقی (الف) و عمودی (ب)).

**کوکریجینگ:** در روش کوکریجینگ، از پارامتری به عنوان متغیر کمکی استفاده شد که دارای بیشترین ضریب همبستگی با متغیر مورد نظر را دارا می‌باشد. بنابراین مطابق با نتایج همبستگی برای برآورد هدایت الکتریکی ظاهری در دو حالت شاخص خیزی (ضریب همبستگی  $0/62$ ) به عنوان متغیر کمکی استفاده گردید. واریوگرام‌های متقابل مربوطه در شکل ۷ ارائه شده است. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه را می‌توان برای ارزیابی ساختار مکانی داده‌ها مورد بررسی قرار داد. وقتی این نسبت کم‌تر از  $0/25$  باشد متغیر مورد نظر دارای ساختار مکانی قوی می‌باشد، بین  $0/25$  -  $0/75$  ساختار مکانی متوسط بوده و هنگامی که بزرگ‌تر از  $0/75$  باشد ساختار مکانی ضعیف می‌باشد. واریوگرام‌های هدایت الکتریکی ظاهری در دو حالت دارای نسبت کم‌تر  $0/25$  می‌باشد. پس از مشخص شدن واریوگرام، مدل کوکریجینگ برای حالت‌های افقی و عمودی اجرا گردید که به ترتیب جذر میانگین مربعات خطا  $35/84$  و  $45/66$ ، میانگین خطا  $2/21$  و  $1/76$ - و ضریب تبیین قابل قبول  $0/45$  و  $0/46$  به دست آمد.



شکل ۷- واریوگرام‌های متقابل مربوط به هدایت الکتریکی ظاهری با توجه به روش کوکریجینگ (قرائت‌های افقی (الف) و عمودی (ب)).

رگرسیون کریجینگ: برای تهیه نقشه رقومی از قرائت‌های دستگاه EM-38 از رگرسیون کریجینگ با واریوگرام ناحیه‌ای استفاده گردید. بدین ترتیب که در ابتدا بین داده‌های محیطی و قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری یک رگرسیون درختی تشکیل گردید. نتایج مدل درختی نشان داد که ویژگی‌های اصلی برای تخمین مکانی قابلیت هدایت الکتریکی در حالت افقی، شاخص خیسی (۸۷ درصد)، سطوح ژئومورفولوژی (۶۲ درصد)، مؤلفه اول تصویر ماهواره‌ای (۵۹ درصد)، جهت حوضه (۱۸ درصد) و عمق دره<sup>۱</sup> (۱۶ درصد) و برای حالت عمودی شاخص خیسی (۶۳ درصد)، سطوح ژئومورفولوژی (۵۴ درصد)، مؤلفه اول تصویر ماهواره‌ای (۳۴ درصد)، جهت حوضه (۱۸ درصد) و عمق دره (۱۵ درصد) می‌باشند (شکل ۸). مور و همکاران (۱۹۹۱) ارتباط قوی بین شوری و شاخص خیسی را گزارش دادند. نتایج همچنین اهمیت نسبی سطوح ژئومورفولوژی را در پیش‌بینی شوری خاک نشان می‌دهد که احتمالاً مربوط به این می‌شود که سطوح ژئومورفولوژی اخیراً تشکیل شده و ارتباط خوبی با خصوصیات خاک‌های مناطق خشک دارند. به‌طور مشابه، جعفری و همکاران (۲۰۱۲) و اسکال و همکاران (۲۰۰۵) مهم‌ترین متغیر کمکی را در فرآیند نقشه‌برداری رقومی مناطق خشک، سطوح ژئومورفولوژی معرفی کردند. با این وجود، اکرم‌خاموف و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که اجزای سرزمین<sup>۲</sup> کم‌ترین همبستگی را با داده‌های قابلیت هدایت الکتریکی و قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری دارند و علت را مربوط به هموار بودن منطقه مورد مطالعه دانستند. به‌علاوه نتایج این پژوهش

1- Valley Depth

2- Terrain Parameters

نشان می‌دهد که تجزیه به مؤلفه اصلی تصاویر ماهواره یکی از مهم‌ترین پارامترهای کمکی می‌باشند. زیرا بیش‌تر منطقه مورد مطالعه بدون پوشش گیاهی می‌باشد، بنابراین حضور و تجمع نمک در سطح خاک به راحتی توسط مؤلفه‌های اصلی تصویر ماهواره‌ای  $ETM^+$  شناسایی می‌شوند. مترنیخ و زینک (۲۰۰۳) و دیوادی و اسرینیواس (۱۹۹۸) اثبات کردند که مؤلفه‌های اصلی برای شناسایی خاک‌های شور بسیار کاربردی می‌باشند. همچنین دهنی و لوئیس (۲۰۱۲) کارایی بالای تصاویر  $ETM^+$  را در تهیه نقشه شوری تأیید کردند.



شکل ۸- نتایج اهمیت متغیرهای محیطی در تخمین قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری (قراءت‌های افقی (الف) و عمودی (ب)).

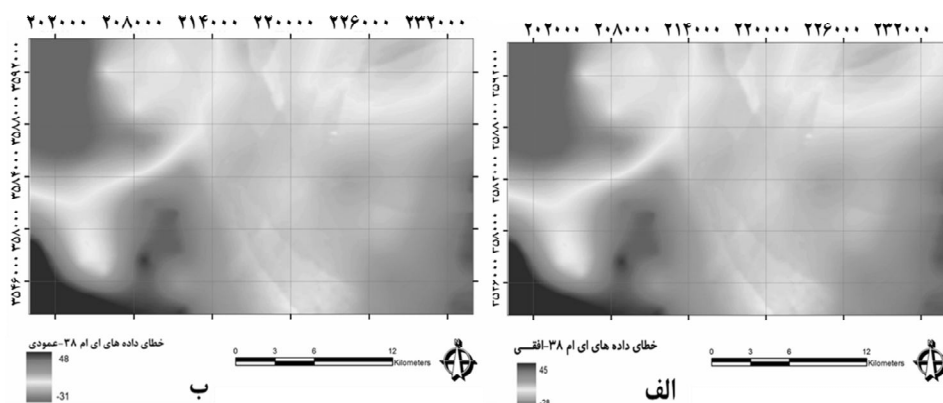
پس از مشخص شدن پارامترهای اصلی، مدل رگرسیون درختی و سپس مقادیر باقی‌مانده داده‌های آموزش محاسبه و با استفاده از کریجینگ با واریوگرام ناحیه‌ای تبدیل به نقشه پیوسته واریانس خطا گردید (شکل ۹). نتایج مدل‌های رگرسیون کریجینگ براساس داده‌های آموزش (۸۰ درصد) و داده‌های آزمون (۲۰ درصد) در جدول ۶ ارائه شده است. هر دو مدل، فرآیند تخمین را برای حالت افق و عمودی به ترتیب با جذر میانگین مربعات خطا  $29/64$  و  $37/74$ ، میانگین خطا  $-2/23$  و  $-1/07$  و ضریب تبیین قابل قبول  $0/48$  و  $0/49$  براساس داده‌های آزمون انجام داده‌اند. رایان و همکاران (۲۰۰۰)، فلورنسکی و همکاران (۲۰۰۲) و ملانو و همکاران (۲۰۰۹) نتایج مشابه‌ای از ضریب تبیین را گزارش

داده‌اند. برای بحث نقشه‌برداری رقومی این نتایج قابل قبول می‌باشد، به طوری که ضریب تبیین بالاتر  $0/70$ ، کم‌تر و ضریب تبیین پایین‌تر از  $0/50$ ، بیش‌تر معمول می‌باشد (ملانو و همکاران، ۲۰۰۹). چون هنوز تکنیک‌های ارایه شده در نقشه‌برداری رقومی خاک نتوانسته کاملاً با سطح اطمینان بالایی خصوصیات خاک را پیش‌بینی کند و همیشه یک سری پارامترهای ناشناخته‌ای وجود دارند که پایین آوردن دقت مدل نهایی تأثیرگذار هستند. به هر حال در مبحث نقشه‌برداری رقومی خاک این نتایج قابل اتکا می‌باشند. ملانو و همکاران (۲۰۰۹) و ادگرز و همکاران (۲۰۱۲) نیز از تکنیک مشابه برای بررسی تغییرات مکانی و عمقی کربن آلی خاک در استرالیا استفاده کردند و نتایج مشابه‌ای را به دست آوردند. همچنین مدل رگرسیون کریجینگ برای حالت افقی توانسته در مقایسه با مدل‌های کریجینگ و کوکریجینگ خطای پیش‌بینی را ۲۸ و ۲۱ درصد کاهش دهد، که این مسأله نیز کارایی مدل رگرسیون کریجینگ را تأیید می‌کند. سایر پژوهشگران نیز کارایی بالای روش هیبرید را تأیید کرده‌اند. به‌عنوان مثال اوده و انس (۲۰۰۸) تغییرات مکانی شوری و قلیائیت خاک و پایداری ساختمان خاک را با استفاده از سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و زمین‌آمار در یک منطقه نیمه‌خشک در کشور استرالیا مطالعه نمودند. آن‌ها روش‌های رگرسیون کریجینگ و کوکریجینگ شاخص را بررسی نمودند و نتایج آن‌ها نشان داد که روش رگرسیون کریجینگ، بهترین تخمین را از تغییرات مکانی شوری و سدیمی خاک تهیه نمود. الدیری و گارسیا (۲۰۰۹) نیز قابلیت دو روش کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ را در تهیه نقشه شوری خاک مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که روش رگرسیون کریجینگ در مقایسه با روش کوکریجینگ کارایی بالاتری داشته است؛ به طوری که این روش توانسته تغییرات موضعی کوچک در شوری خاک را نیز به خوبی پیش‌بینی کند. یان و همکاران (۲۰۰۷) ضمن تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ در کشور چین، نشان دادند که استفاده از داده‌های کمکی در روش کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ در تراکم‌های نمونه‌برداری مختلف، بهتر از روش کریجینگ معمولی بودند. در مقایسه با روش کوکریجینگ، روش رگرسیون کریجینگ، مقدار ریشه مربعات خطا را بیش‌تر کاهش داد. به این علت که در روش رگرسیون کریجینگ می‌توان از داده‌های کمکی بیش‌تری استفاده کرد. در انتها نقشه واریانس خطا با نقشه‌ای که با مدل رگرسیون درختی تهیه شده بود تلفیق گردید و نقشه‌های نهایی قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری در دو حالت افقی و عمودی تهیه شدند (شکل ۱۰).

جدول ۶- نتایج معیارهای ارزیابی برای پیش‌بینی قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری (افقی و عمودی).

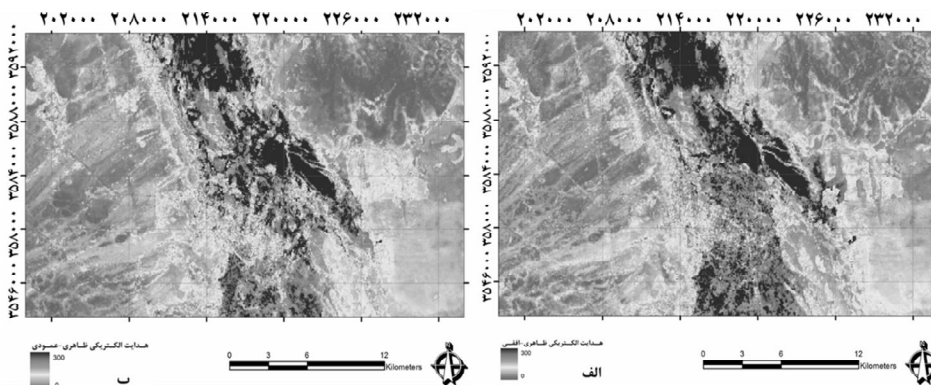
میانگین خطا	جذر میانگین مربعات خطا	ضریب تبیین
آموزش (۵۶۰ داده)		
-۰/۱۲	۲۴/۹۵	۰/۶۹
قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری (افقی)		
-۱/۰۳	۳۰/۷۸	۰/۷۵
قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری (عمودی)		
آزمون (۱۴۰ داده)		
-۲/۲۳	۲۹/۶۴	۰/۴۸
قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری (افقی)		
-۱/۰۷	۳۷/۷۴	۰/۴۹
قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری (عمودی)		

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است بیش‌ترین مقدار قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری در مناطق شمالی و میانی منطقه قرار گرفته است و در مقابل، کم‌ترین میزان آن در مناطق مرتفع‌تر (شمال شرقی) قرار دارد. از نظر ژئومورفولوژی بیش‌ترین شوری خاک در واحد پلایا دیده می‌شود. این مسأله احتمالاً به‌خاطر دریافت رسوبات بیش‌تر و در نتیجه تجمع املاح شور در این نواحی می‌باشد. علاوه‌بر این، شکل مقعر منطقه می‌تواند به حرکت آب زیرزمینی در جهت شمال کمک کند، درست در جایی که بیش‌ترین شوری‌ها مشاهده می‌شود. در شمال منطقه بافت خاک سنگین‌تری وجود دارد که حضور رس باعث حرکت کاپیلاری آب و تجمع نمک در سطح خاک می‌شود.



شکل ۹- پهنه‌بندی مقادیر باقی‌مانده با استفاده از روش کریجینگ و واریوگرام محلی (قراءت‌های افقی (الف) و عمودی (ب)).





شکل ۱۰- نقشه رقومی قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری با استفاده از رگرسیون کریجینگ (قرائت‌های افقی (الف) و عمودی (ب)).

### نتیجه گیری

ارزیابی تناسب اراضی برای بیش تر گیاهان زراعی که در مناطق خشک کشت می‌شوند، نیاز به اطلاعات دقیق از خاک به‌ویژه شوری خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری دارد. بنابراین به‌نظر می‌رسد راه عملی و کاربردی برای مدل‌سازی سه‌بعدی (تغییرات سطحی و عمق) خاک استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکترومغناطیس باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که رگرسیون کریجینگ با واریوگرام محلی به‌عنوان مدل پیش‌بینی‌کننده، ابزاری قدرتمند در جهت برآورد شوری خاک به‌صورت سطحی و عمقی می‌باشد. به‌طوری‌که مدل رگرسیون کریجینگ درصد خطای پیش‌بینی را در حالت افقی نسبت به کوکریجینگ و کریجینگ به‌ترتیب ۲۱ و ۲۸ درصد کاهش داده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که برای تهیه نقشه رقومی خصوصیات خاک از مدل‌های رگرسیون کریجینگ با واریوگرام محلی در مطالعات آینده استفاده شود. همچنین پیشنهاد می‌گردد که با توجه به رابطه داده‌های هدایت الکتریکی ظاهری با دیگر خصوصیات خاک، مطالعات مشابه‌ای جهت ارزیابی آن پارامترها نیز انجام گیرد.

## منابع

1. Akramkhanov, A., and Vlek, P.L.G. 2012. The assessment of spatial distribution of soil salinity risk using neural network. *Environ. Mon. Assess.* 184: 2475-2485.
2. Banaei, M.H. 1998. Soil moisture and temperature regime map of Iran. Soil and Water Research Institute. Ministry of Agriculture, Tehran, Iran.
3. Boettinger, J.L., Ramsey, R.D., Bodily, J.M., Cole, N.J., Kienast-Brown, S., Nield, S.J., Saunders, A.M., and Stum, A.K. 2008. Landsat Spectral Data for Digital Soil Mapping, P 193-203. In: Hartemink, A.E., A.B. McBratney and M.L. Mendonca-Santos (eds.), *Digital Soil Mapping with Limited Data*. Springer Science, Australia.
4. Bohner, J., and Antonic, O. 2009. Land-surface parameters specific to topoclimatology, P 192-226. In: Hengl, T., and H.I. Reuter (eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, Elsevier, Amsterdam, Netherland.
5. Dehni, A., and Lounis, M. 2012. Remote sensing techniques for salt affected soil mapping: application to the Oran region of Algeria. *Pro. Engi.* 33: 188-198.
6. Dwivedi, R.S., and Sreenivas, K. 1998. Delineation of salt-affected soils and waterlogged areas in the Indo-Gangetic plains using IRS-1C LISS-III data. *I. J. Rem. Sens.* 14: 2739-2751.
7. Eldeiry, A., and Garcia, L. 2009. Spatial modeling of soil salinity using remote sensing, GIS and field data. VDM, Lightning Source UK Ltd., Milton Keynes UK, London. 98p.
8. Florinsky, I.V., Eilers, R.G., Manning, G.R., and Fuller, L.G. 2002. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environ. Modell. Soft.* 17: 295-311.
9. Hengl, T., Huvelink, G.B.M., and Stein, A. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma.* 120: 75-93.
10. I.R. of Iran Meteorological Organization. 2013. [www.weather.ir](http://www.weather.ir).
11. Isla, R., Aragues, R., and Royo, A. 2003. Spatial variability of salt-affected soils in the middle Ebro Valley (Spain) and implications in plant breeding for increased productivity. *Euphytica.* 134: 325-334.
12. Jafari, A., Finke, P.A., de Wauw, J.V., Ayoubi, S., and Khademi, H. 2012. Spatial prediction of USDA-great soil groups in the arid Zarand region, Iran: Comparing logistic regression approaches to predict diagnostic horizons and soil types. *E. J. Soil Sci.* 63: 284-298.
13. Khorsandi, F., and Yazdi, F.A. 2011. Estimation of Saturated Paste Extracts' Electrical Conductivity from 1:5 Soil/Water Suspension and Gypsum. *Comm. Soil Sci. Plant Ana.* 42: 315-321.
14. Kumar, S., Lal, R., and Liu, D. 2012. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock. *Geoderma.* 189: 627-634.

15. Lesch, S.M., Corwin, D.L., and Robinson, D.A. 2005. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. *Com. Elec. Agr.* 46: 351-378.
16. Malone, B.P., McBratney, A.B., Minasny, B., and Laslett, G.M. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*. 154: 138-152.
17. McBratney, A.B., Mendonça-Santos, M.L., and Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*. 117: 3-52.
18. Mcneill, J.D. 1980. Electrical conductivity of soil and rocks. Technical note TN-5 Geonics Ltd. Mississauga, Ontario, Canada, Pp: 10-15.
19. Mercer, L.D., Szpiro, A.A., Sheppard, L., Lindström, J., Adar, S.D., Allen, R.W., Avol, E.L., Oron, A.P., Larson, T., Sally, L.J., and Kaufman, J. 2011. Comparing universal kriging and land-use regression for predicting concentrations of gaseous oxides of nitrogen for the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis and Air Pollution (MESA Air). *Atm. Environ.* 45: 4412-4420.
20. Metternicht, G., and Zinck, J.A. 2003. Remote Sensing of Soil Salinity: Potentials and Constraints. *Rem. Sens. Environ.* 85: 1-20.
21. Nield, S.J., Boettger, J.L., and Ramsey, R.D. 2007. Digitally mapping Gypsic and nitric soil areas using Landsat ETM data. *SSSJA*. 71: 245-252.
22. Odeh, I.O.A., and Onus, A. 2008, Spatial Analysis of Soil Salinity and Soil Structural Stability in a Semiarid Region of New South Wales, Australia. *Environ. Man.* 42: 265-278.
23. Odgers, N.P., Libohova, Z., and Thompson, J.A. 2012. Equal-area spline functions applied to a legacy soil database to create weighted-means maps of soil organic carbon at a continental scale. *Geoderma*. 189: 153-163.
24. Olaya, V.F. 2004. A gentle introduction to Saga GIS. The SAGA User Group, Göttingen, Germany. 148p.
25. Quinlan, J.R. 2001. Cubist: An Informal Tutorial. <http://www.rulequest.com>.
26. Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., and Tan, C.S. 2008. Optimal soil physical quality inferred through structured regression and parameter interactions. *Geoderma*. 146: 466-474.
27. Rhoades, J.D. 1976. Measuring, mapping and monitoring field salinity and water depths with soil resistance measurements. *FAO Soils Bulletin*. 31: 69-109.
28. Rhoades, J.D., and Ingvalson, R.D. 1971. Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. *SSSJA*. 35: 54-60.
29. Rossiter, D.G., and Hengl, T. 2001. Technical note: Creating geometrically-correct photo-interpretation, photo-mosaics, and base maps for a projects GIS. <http://www.itc.nl/rossiter>.
30. Ryan, P.J., McKenzie, N.J., O'Connell, D., Loughhead, A.N., Leppert, P.M., Jacquier, D., and Ashton, L. 2000. Integrating forest soils information across scales: spatial prediction of soil properties under Australian forests. *For. Eco. Manag.* 138: 139-157.

31. Sampson, D., Richards, M., Szpiro, A.A., Bergen, S., Sheppard, L., Larson, T.V., and Kaufman, J.D. 2013. A regionalized national universal kriging model using Partial Least Squares regression for estimating annual PM2.5 concentrations in epidemiology. *Atm. Environ.* 75: 383-392.
32. Scull, P., Franklin, J., and Chadwick, O.A. 2005. The application of classification of tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. *Eco. Model.* 181: 1-15.
33. Sheng, J., Ma, L., Jiang, P., Li, B., Huang, F., and Wu, H. 2010. Digital soil mapping to enable classification of salt-affected soils in desert agro-ecological zones. *Agr. Water Manag.* 97: 1944-1951.
34. Sulaeman, Y., Sarwani, M., Minasny, B., McBratney, A.B., Sutandi, A., and Barus, B. 2013. Soil-landscape models to predict soil pH variation in the Subang region of West Java, Indonesia, P 317-325. In: Minasny, B., B.P. Malone and A. McBratney (eds.), *Digital Soil Assessment and Beyond*, Taylor and Francis Group, London, England.
35. Sun, W., Minasny, B., and McBratney, A. 2012. Analysis and prediction of soil properties using local regression-kriging. *Geoderma.* 171: 16-23.
36. Triantafilis, J., and Lesch, S.M. 2005. Mapping clay content variation using electromagnetic induction techniques. *Com. Elec. Agr.* 46: 203-237.
37. Triantafilis, J., and Santos, F.A. 2009. 2-dimensional soil and vadose-zone representation using an EM38 and EM34 and a laterally constrained inversion model. *Aus. J. Soil Res.* 47: 809-920.
38. Triantafilis, J., Laslett, G.M., and Mcbratney, A.B. 2000. Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity in soil under irrigated cotton. *SSSJA.* 64: 1009-1017.
39. Triantafilis, J., Odeh, I.O.A., and McBratney, A.B. 2001. Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. *SSSJA.* 65: 869-878.
40. Wöhling, T., Vrugt, J.A., and Barkle, G.F. 2008. Comparison of three multiobjective optimization algorithms for inverse modeling of vadose zone hydraulic properties. *SSSJA.* 72: 305-319.
41. Wu, C., Wu, J., Luo, Y., Zhang, H., and Teng, Y. 2008. Statistical and geostatistical characterization of heavy metal concentrations in a contaminated area taking into account soil map units. *Geoderma.* 144: 171-179.
42. Yan, L., Shi, Z., Wu, C., Li, H., and Li, F. 2007. Improved Prediction and Reduction of Sampling Density for Soil Salinity by Different Geostatistical Methods. *Agr. Sci. China.* 6: 832-841.
43. Yao, R.J., Yang, J.S., and Jiang, L. 2007. Study on spatial variability and profile distribution characteristics of soil salinity by Kriging with an electromagnetic induction. *J. Zhejiang Univ.* 33: 207-216.
44. Zinck, J.A. 1990. *Physiography and Soils. Lecture-notes for soil students.* Soil Science Division. Soil survey courses subject matter: K6 ITC, Enscheda, The Netherlands. 185p.



## **Digital mapping of apparent electrical conductivity using regression kriging and local variogram in Ardakan region**

**\*R. Taghizadeh-Mehrjardi<sup>1</sup>, F. Sarmadian<sup>2</sup>, M.J. Rousta<sup>3</sup>,  
M.H. Rahimian<sup>4</sup>, M. Omid<sup>5</sup> and N. Toomanian<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept of Arid Land and Desert Management, University of Ardakan,  
<sup>2</sup>Professor, Dept. of Soil Science, University of Tehran, <sup>3</sup>Assistant Prof., National Soil  
Salinity Center, Yazd, <sup>4</sup>Lecturer, National Soil Salinity Center, Yazd, <sup>5</sup>Professor,  
Dept. of Agricultural Machinery, University of Tehran, <sup>6</sup>Assistant Prof., Dept. of  
Soil and Water, Agricultural and Natural Resource Research Station, Isfahan

Received: 09/18/2013; Accepted: 02/15/2014

### **Abstract**

Converting point data to continuous one is the first step in order to use them in scorpan flowchart. For this purpose, different geostatistic methods are available which at present research regression kriging with local variogram, kriging and co-kriging was applied. For mapping apparent electrical conductivity at the area covering 72000ha located in Ardakan region, 700 readings in horizontal and vertical modes were carried out by electromagnetic induction. Auxiliary data used in this study to represent predictive soil forming factors were terrain attributes, Landsat 7 ETM<sup>+</sup> data and a geomorphologic surfaces map. At first, the relationship between independent variables (i.e. auxiliary data) and dependent variable (i.e. apparent electrical conductivity) was calculated by regression tree. Then, the residuals, derived from regression tree, were mapped by using kriging with local variogram. Finally, the residual and ECa maps were aggregated in order to produce the final maps. Results showed some auxiliary variables had more influence on predictive apparent electrical conductivity model which included: wetness index, geomorphology map and the first principal component analysis. Also, results showed that model predicted ECa with determination of coefficient, root mean square error and mean error were 0.48, 29.64 and -2/23, respectively. This founding confirmed that regression kriging with local variogram had high performance; however, RK decreases the error of prediction in comparison with OK and CK up to 21% and 28%. Thus, using of regression kriging with local variogram for digital mapping of soil properties in future studies is suggested.

**Keywords:** Electromagnetic induction, Digital soil mapping, Regression tree

---

\* Corresponding Authors; Email: [rtaghizadeh@ardakan.ac.ir](mailto:rtaghizadeh@ardakan.ac.ir)

