

پهنه‌بندی رقومی شوری خاک سطحی در استان خوزستان با استفاده از روش رگرسیون کریجینگ

زهرا سواری^۱، سعید حجتی^{۱*} و روح‌الله تقی‌زاده مهرجردی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۴)

چکیده

شوری خاک و شور شدن اراضی یکی از معضلات کشاورزی است که بایستی با تدبیر و مدیریت صحیح علمی این روند مهار شود. اولین گام در این راه شناسایی مناطق شور و تهیه نقشه شوری خاک است. امروزه با توجه به مشکلات موجود در تهیه نقشه‌های سنتی، استفاده از داده‌های کمکی در نقشه‌برداری رقومی به‌طور روز افزون در حال افزایش است. این تحقیق با هدف پهنه‌بندی شوری خاک با استفاده از روش رگرسیون کریجینگ (RK)، شناسایی مناطق دارای شوری زیاد و بررسی ارتباط شوری خاک با فاکتورهای خاکساز انجام شد. به این منظور تعداد ۲۹۱ نمونه خاک سطحی (۱۰-۰ سانتی متر) در فروردین ۱۳۹۳ به صورت تصادفی برداشت شد. متغیرهای کمکی یا فاکتورهای خاکساز مورد استفاده در این مطالعه شامل پارامترهای سرزمین (مانند شیب، حوزه آبخیز و شاخص خیزی)، داده‌های تصاویر OLI و TIRS ماهواره لندست ۸ و نقشه‌های کاتگوری (مانند نقشه خاک، کاربری اراضی و زمین‌شناسی) بودند. همچنین از روش کریجینگ عام به‌منظور مقایسه با روش رگرسیون کریجینگ استفاده شد. نتایج نشان داد که روش رگرسیون کریجینگ دقت بیشتری نسبت به روش کریجینگ عام دارد به طوری که در این روش ضریب تبیین، میانگین قدر مطلق خطا و مجذور میانگین مربعات خطا به ترتیب برابر ۰/۸۴، ۰/۴۱ و ۶/۲۱ برآورد شد. همچنین روش رگرسیون درختی به‌خوبی توانست ارتباط قوی بین شوری خاک و متغیرهای کمکی برقرار کند. به‌علاوه، نتایج نشان داد که مهم‌ترین متغیرهای کمکی در پیش‌بینی شوری خاک باندهای ۲، ۴، ۵ و ۷ تصاویر ماهواره لندست ۸، شاخص روشنایی، شاخص خیزی، شاخص همواری سطح دره با درجه تفکیک بالا، سطح مبنای شبکه زهکشی، نقشه خاک، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده هستند. با استفاده از قوانین به‌دست آمده نقشه رقومی شوری خاک تهیه و سپس با تلفیق آن با نقشه واریانس خطا نقشه نهایی شوری خاک تهیه شد. نتایج این مطالعه حاکی از این است که تغییرات شوری خاک در استان از شمال به جنوب روند افزایشی دارد و نشان‌دهنده مشکل شوری در نواحی جنوب استان است. از دلایل عمده شوری خاک در این مناطق می‌توان به بالا بودن آب زیرزمینی، تفاوت در پستی و بلندی، حرکت موئینگی املاح به سطح خاک، تفاوت در نوع کاربری اراضی در نواحی مختلف استان و همچنین کیفیت آب زیرزمینی و آب آبیاری اشاره کرد که تحت تأثیر استفاده مکرر از کودهای حیوانی و پساب فاضلاب‌ها تغییر می‌کند.

واژه‌های کلیدی: نقشه‌های رقومی، درخت تصمیم، تغییرات مکانی، شوری

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اردکان، یزد ایران

* مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: s.hojati@scu.ac.ir

مقدمه

به‌طور کلی شوری خاک را می‌توان به دو گروه شوری اولیه که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد و شوری ثانویه که عامل انسانی دارد، تقسیم‌بندی کرد (۱). هر دو نوع شوری خاک شایع بوده و از آنجایی که رشد گیاه را به تأخیر انداخته و میزان تولید را تحت تأثیر قرار می‌دهد، همواره به‌عنوان یکی از مشکلات بخش کشاورزی به‌ویژه در استان خوزستان محسوب می‌شود. از این‌رو مدیریت خاک‌های شور حائز اهمیت بوده و به اطلاعات دقیق و قابل اطمینان در رابطه با توزیع مکانی شوری خاک نیاز است (۱۴).

اولین مرحله در برنامه‌های مدیریت اراضی نقشه‌برداری خاک است. روش‌های نقشه‌برداری مختلفی برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی خصوصیات خاک وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش نمونه‌برداری صحرائی، روش‌های زمین‌آماری (۲۵) و نقشه‌برداری رقومی که به‌تازگی در مطالعات خاکشناسی مورد توجه قرار گرفته است اشاره کرد. تهیه نقشه خاک با استفاده از روش‌های مرسوم مبتنی بر جمع‌آوری و تحلیل داده‌های نمونه‌برداری برای پهنه‌بندی مناطق وسیع، به‌دلیل مشکلاتی مانند عدم دسترسی به تمامی نقاط نمونه‌برداری، تقریباً نشدنی یا بسیار هزینه‌بر است.

برخی تکنیک‌های رقومی نقشه‌برداری خاک قادر به تهیه توزیع مکانی قابل اعتماد از کلاس‌های خاک در منطقه هستند (۱۸). نقشه‌برداری رقومی خاک در واقع توسعه یک مدل عددی یا آماری از رابطه بین متغیرهای محیطی و خصوصیات خاک است که برای داده‌های جغرافیایی زیادی به‌منظور تولید نقشه رقومی به‌کار می‌رود (۱۵). پایه و اساس نقشه‌برداری نوین مبتنی بر معادله اسکورپن (۱۲) است (معادله ۱). در این معادله خصوصیت یا کلاس خاک با یک سری متغیرهای محیطی (متغیرهای کمکی) ارتباط داده می‌شود؛ به این صورت که در هر موقعیت مشاهده‌ای 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 نقشه‌های رقومی خاک در تمام منطقه مورد مطالعه می‌شود.

$$s_{c,a} = f(s, c, o, r, p, a, n) \quad (1)$$

در این معادله S_a خصوصیات خاک، S_c کلاس خاک، s اطلاعات خاک که از نقشه خاک یا پایگاه داده یا دانش کارشناس به‌دست 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 است.

روش‌های زمین‌آماری مانند کریجینگ ساده و کریجینگ معمولی و همچنین روش‌هایی از قبیل رگرسیون خطی و معکوس فاصله از مفاهیم کریجینگ یا رگرسیون به‌تنهایی استفاده می‌کنند. ولی رگرسیون کریجینگ به‌عنوان یک روش هیبرید شناخته می‌شود؛ به‌طوری که از یک رگرسیون خطی و کریجینگ معمولی تشکیل شده است (۴). در رگرسیون کریجینگ تغییرات محلی و روند منطقه‌ای هر دو محاسبه می‌شود. در این روش بین متغیر اصلی و متغیرهای کمکی مدل رگرسیونی برقرار می‌شود و سپس با استفاده از کریجینگ، باقیمانده‌های این مدل رگرسیونی پهنه‌بندی شده و در نهایت با ترکیب این دو مقدار، پارامتر مورد نظر در نقاط مختلف برآورد می‌شود (۲۳). معرفی اطلاعات کمکی که همبستگی زیادی با شوری خاک دارند و دقت مکانی را افزایش دهند، می‌توانند نقشه‌برداری شوری خاک را بهبود دهند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که پردازش تصاویر ماهواره‌ای به‌خصوص در دامنه نور مرئی، اطلاعات زیادی، که همبستگی زیادی با شوری سطحی دارند، فراهم می‌کنند (۸ و ۲۲). نیلند و همکاران (۱۷) با استفاده از داده‌های مربوط به سنجنده ETM^+ نقشه رقومی خاک‌های گچی و شور- سدیمی را در منطقه سان‌رافائل واقع در ایالت کلرادو تهیه کردند. طبق نتایج به‌دست آمده مناطق دارای خاک‌های گچی را می‌توان با استفاده از مدل نسبت اختلاف نرمال (NDR) باندهای ۵ و ۷ شناسایی کرد. دقت این شناسایی با

طول جغرافیایی $40^{\circ} 47'$ تا $33^{\circ} 50'$ شرقی و عرض جغرافیایی $57^{\circ} 29'$ تا $33^{\circ} 00'$ شمالی از نصف‌النهار گرینویچ در جنوب غربی کشور واقع شده است. استان خوزستان جزء دشت‌های ساحلی خلیج فارس و جزء مناطق گرم و خشک جنوب با منطقه رویشی خلیجی است. از نظر آب و هوایی می‌توان استان خوزستان را به سه ناحیه سردسیر (ارتفاعات شمالی و شمال شرقی)، گرم و خشک (جلگه‌ها و دشت‌های جنوب و جنوب غرب) و معتدل (نواحی کوهپایه‌ای و جلگه‌های به نسبت مرتفع شمال شرقی) تقسیم کرد. متوسط بارندگی استان 150 میلی‌متر برآورد شده است. با وجود اینکه رطوبت هوا در خوزستان به طور متوسط به 50 درصد می‌رسد، اما به واسطه بارندگی کم قسمت اعظم دشت خوزستان خشک و لم یزرع است. متوسط حرارت سالیانه $24-28$ دجه سانتی‌گراد است. میزان تبخیر سالیانه بالغ بر 2000 میلی‌متر برآورد می‌شود (سازمان هواشناسی کشور، 1391).

نمونه‌برداری خاک

در این مطالعه به دلیل وسعت زیاد منطقه و زمانبر بودن روش نمونه‌برداری شبکه‌ای منظم، از روش نمونه‌برداری تصادفی استفاده شد. یکی دیگر از دلایل عدم انتخاب روش نمونه‌برداری منظم، وجود موانع طبیعی در نقاطی بود که در نمونه‌برداری به صورت شبکه‌بندی منظم دسترسی به آنها امکان‌پذیر نبود و باید از نقطه دیگری نمونه‌برداری می‌شد. زمان جمع‌آوری نمونه‌ها در فروردین ماه سال 1393 بود. به این منظور تعداد 292 نمونه خاک مرکب به صورت نامنظم و از عمق سطحی ($10-0$ سانتی‌متر) با استفاده از GPS برداشت شد (شکل ۱). در نمونه‌های یاد شده پس از هواخشک کردن، هدایت الکتریکی در عصاره اشباع و با استفاده از دستگاه هدایت سنج الکتریکی رومیزی مدل Starter 3100 اندازه‌گیری شد.

کمک ارزیابی مزرعه‌ای حدود 87 درصد برای خاک‌های گچی و 50 درصد برای خاک‌های سدیمی تعیین شد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که مدل نسبت اختلاف نرمال را می‌توان برای تهیه نقشه رقومی شده خاک در مناطقی که به دلیل وجود عوارض مختلف دارای بازتابش‌های متفاوتی است، به سهولت به کار برد. همچنین تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (24) به منظور پهنه‌بندی رقومی قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری از روش‌های رگرسیون کریجینگ با واریوگرام محلی، کریجینگ و کوکریجینگ استفاده کردند. داده‌های کمکی به کار رفته شامل اجزای سرزمین استخراج شده از DEM، داده‌های ETM^+ ماهواره لندست و نقشه سطوح ژئومورفولوژی است. نتایج نشان داد که در تخمین قابلیت هدایت الکتریکی ظاهری، پارامترهای کمکی از جمله شاخص خیسی، سطوح ژئومورفولوژی و مؤلفه اول تصویر ماهواره‌ای، دارای اهمیت بیشتری هستند.

با توجه به اینکه در استان خوزستان مسئله شوری خاک از مهم‌ترین مشکلات اراضی است، بنابراین جمع‌آوری اطلاعات در رابطه با روند تغییرات شوری خاک در سطح منطقه می‌تواند در تصمیم‌گیری دقیق، سریع و با هزینه کمتر برای اصلاح و مدیریت خاک‌ها کمک کند. روش رگرسیون کریجینگ به دلیل دقت بیشتر و صرف هزینه کمتر نسبت به روش‌های سنتی به طور گسترده در فعالیتهای کشاورزی از جمله شناسایی اراضی شور، استفاده می‌شوند. این مطالعه با هدف بررسی همبستگی بین شوری خاک و داده‌های کمکی از جمله تصاویر ماهواره‌ای و مشتقات داده‌های رقومی ارتفاعی، پهنه‌بندی شوری خاک با استفاده از روش رگرسیون کریجینگ بر پایه مدل اسکورپن، شناسایی مناطق دارای شوری زیاد و مقایسه روش رگرسیون کریجینگ و کریجینگ عام در پیش‌بینی شوری خاک است.

مواد و روش‌ها

تشریح منطقه مورد مطالعه

استان خوزستان با مساحتی حدود $4/6$ میلیون هکتار بین

تهیه داده‌های محیطی یا کمکی

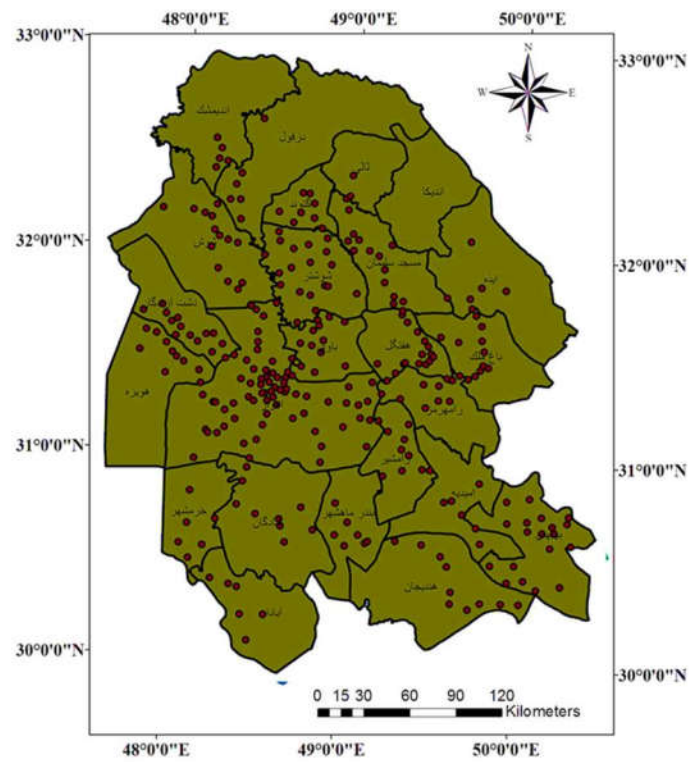
در نقشه‌برداری رقومی پیش‌بینی کلاس‌ها و خصوصیات خاک بر اساس رابطه بین خاک‌ها، متغیرها و فرایندهای خاکساز (به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی) انجام می‌شود و در معادله ینی (۱۹۴۱) به‌عنوان فاکتورهای خاکساز آورده می‌شوند (۷). در این مطالعه نیز از فاکتورهای خاکساز به‌عنوان داده‌های کمکی استفاده شد. این داده‌ها شامل نقشه‌های کاتگوری (مانند پوشش گیاهی و زمین‌شناسی)، پارامترهای اراضی (شاخص خیزی و انحنا کلی) و تصاویر ماهواره‌ای (باندهای تصاویر سنجنده-های OLI و TIRS ماهواره لندست ۸) هستند. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به نقشه پوشش گیاهی، کاربری اراضی، زمین-شناسی و نقشه خاک استان خوزستان در محیط GIS رقومی شده و مورد استفاده قرار گرفتند.

تهیه پارامترهای اراضی

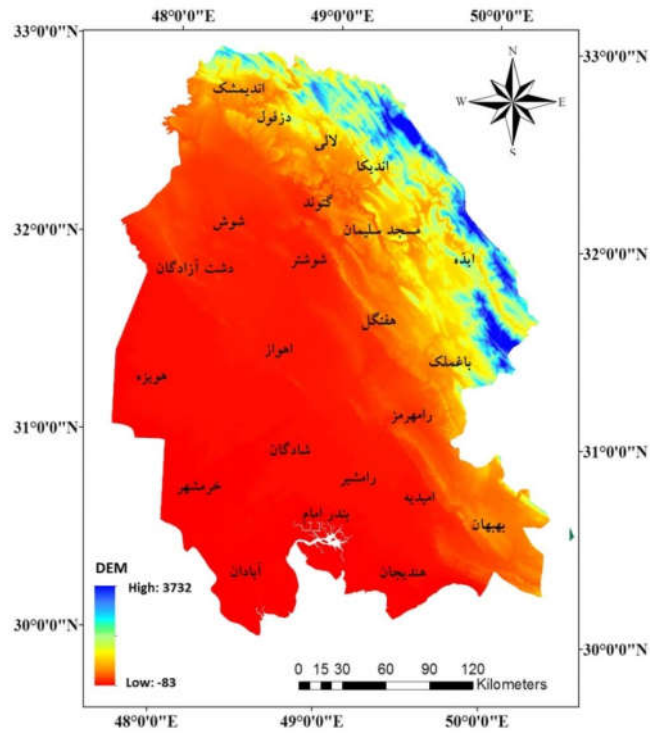
از نظر توپوگرافی استان خوزستان از دو بخش کوهستانی در شمال و شمال شرق و بخش جلگه‌ای در جنوب تشکیل شده است که بلندترین ارتفاعات منطقه در شمال شرق با ارتفاع ۳۷۳۹ متر از سطح دریای آزاد و کم‌ارتفاع‌ترین بخش منطقه در نواحی جنوبی با ارتفاع ۸۳- متر است. برای استنتاج واحد-های کمی فرایندهای خاکساز از نقشه DEM (مدل ارتفاعی رقومی) استفاده می‌شود که تحت عنوان پارامترهای زمین‌نما نامیده می‌شوند. این فرایند در واقع توصیف کمی سیمای اراضی است که از الگوریتم‌های مختلف از جمله خصوصیات مورفولوژیکی، اکولوژیکی، هیدرولوژیکی و دیگر خصوصیات سیمای سرزمین استفاده می‌کند. به‌منظور استخراج شاخص-های زمین‌نما از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) سازمان زمین‌شناسی آمریکا (قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر) استفاده شد (شکل ۲). این شاخص‌ها مطابق با روش ارائه شده توسط هنگل و همکاران (۵) با استفاده از نرم افزار ساگا (SAGA) تهیه شد که شامل شیب، سطح حوزه آبخیز، فاکتور طول

شیب، سطح مبنای شبکه زهکشی (Channel Network Base Level)، نسبت فاصله عمودی به شبکه آبراهه‌ها (Vertical Valley)، عمق دره (Distance to Channel Network)، شاخص همگرایی (Convergence Index)، ارتفاع جریان هوای مؤثر (Effective Air Flow Heights)، شاخص تعادل جرم (Mass Balance Index)، منحنی بخش قطعه‌ای (Cross-Sectional Curvature)، حداکثر انحنا (Maximum Curvature)، حداقل انحنا (Minimum Curvature)، شاخص حفاظت (Protection Index)، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا (Multiresolution index of Valley Bottom Flatness (MrVBF)، مساحت (Surface Area)، ارتفاع شیب (Slope Height)، انحنا کلی (General Curvature) انحنا نیم‌رخ (Profile Curvature)، انحنا تانژانت (Tangential Curvature)، انحنا طولی (Longitudinal Curvature)، انحنا خط جریان (Flow Line Curvature) و شاخص خیزی (Wetness Index) است.

با توجه به همبستگی بالای بین میزان بازتاب طیفی در تصاویر ماهواره‌ای با خصوصیات سطحی خاک از جمله شوری خاک، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان یکی دیگر از فاکتورهای محیطی در مطالعات خاکشناسی در دستور کار قرار گرفت. در این مطالعه به‌منظور محاسبه همبستگی بین شوری خاک و بازتاب طیفی از تصاویر سنجنده‌های OLI و TIRS ماهواره لندست ۸ استفاده شد. باندهای طیفی این ماهواره شامل ۹ باند OLI و ۲ باند TIRS است (جدول ۱). زمان برداشت تصاویر سنجنده مربوط به زمان نمونه‌برداری خاک، در بهار ۱۳۹۳ (اواخر فروردین تا اوایل اردیبهشت) بود. بعد از تهیه تصاویر، تمام تصحیحات مربوط به تصاویر ماهواره‌ای شامل تصحیح اتمسفری، رادیومتری و هندسی در محیط ENVI 5.1 روی تمام باندها انجام شد. لازم به توضیح است که برای انجام تصحیحات



شکل ۱. نقشه موقعیت نقاط نمونه‌برداری در استان خوزستان



شکل ۲. مدل رقومی ارتفاع (DEM) استان خوزستان

داده‌های متغیر وابسته و داده‌های کمکی به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. تمام لایه‌های اطلاعاتی کمکی پس از کدگذاری به فرمت رستر و با اندازه پیکسل ۹۰ متر (مطابق با پروژه خاک جهانی) تهیه شدند. برای ورود داده‌ها به نرم‌افزار ساگا ابتدا داده‌های کمکی به فرمت IMG تبدیل و از تمام لایه‌های ورودی (داده‌های خاک، متغیرهای کمکی و شاخص‌های زمین‌نما) خروجی گرفته شد. در نهایت اطلاعات داده‌های خاک و متغیرهای محیطی با فرمت TXT ذخیره شد.

مدل‌سازی خاک

اساس کار در نقشه‌برداری رقومی ارتباط بین متغیرهای محیطی و خصوصیات خاک است، که این ارتباط به‌صورت یک مدل عددی یا آماری است. از جمله این مدل‌ها، مدل رگرسیون کریجینگ است که تنها برای پیش‌بینی متغیر کمی (شوری خاک) مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۳). در مطالعه حاضر برای پهنه‌بندی قابلیت هدایت الکتریکی خاک از مدل درخت تصمیم و مدل رگرسیون کریجینگ استفاده شد.

کریجینگ

ساده‌ترین و معمول‌ترین روش تخمین در زمین‌آمار کریجینگ است که بر منطق میانگین متحرک وزنی استوار است. کریجینگ یک تخمین‌گر نارایب با کمترین واریانس تخمین است. شرط نارایب بودن در دیگر روش‌های تخمین مانند چندجمله‌ای مکانی و وزن‌دهی عکس فاصله نیز اعمال می‌شود ولی ویژگی کریجینگ در آن است که ضرایب (λ_i) را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که در عین نارایب بودن، واریانس تخمین نیز حداقل باشد.

در این روش برای تخمین مقدار یک متغیر در نقطه‌ای که اطلاعات آن اندازه‌گیری نشده است با استفاده از یک متوسط‌گیری متحرک وزنی خطی مقادیر اندازه‌گیری شده در همسایگی نقطه مورد نظر، به‌کار می‌رود (۱۱). این روش از طریق معادله خطی (۹) محاسبه می‌شود:

هندسی، از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۵۰۰۰۰:۱ تهیه شده از سازمان جغرافیایی استفاده شد. تصحیح هندسی تصاویر با میزان خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) ۰/۳ پیکسل ثبت شد و با رویهم‌گذاری لایه‌های خطی رودخانه‌ها روی تصویر تطابق یافته، دقت بالای عمل تطابق هندسی مورد تأیید قرار گرفت. برای تصحیح رادیومتریک و به‌منظور کاهش اثرات پخش اتمسفری از روش تصحیح رادیومتریک نسبی استفاده شد.

سپس تمام تصاویر مربوط به استان زمین مرجع شده و از آن موزائیک تهیه شد و در مرحله بعد تصاویر موزائیک شده وارد محیط نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۳ شد و در ادامه محدوده منطقه مطالعاتی با استفاده از نقشه‌برداری مرز استان به‌روش Extraction برش داده شد. از جمله داده‌های کمکی در نقشه‌برداری رقومی استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای است که در این مطالعه از شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص پوشش گیاهی پیشرفته (EVI)، شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده (SAVI)، شاخص نسبت پوشش گیاهی (RVI)، شاخص شوری نرمال شده (NDSI)، شاخص روشنایی (BI) و شاخص شوری (SI) استفاده شد. روش محاسبه شاخص‌های به‌کار رفته به‌شرح زیر است:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

$$SAVI = \left(\frac{NIR - R}{NIR + R + L} \right) \times (1 + L) \quad (3)$$

$$RVI = \frac{NIR}{R} \quad (4)$$

$$NDSI = \frac{R - NIR}{R + NIR} \quad (5)$$

$$BI = \sqrt{R^2 + NIR^2} \quad (6)$$

$$SI1 = \sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2} \quad (7)$$

$$SI2 = \sqrt{Blue \times R} \quad (8)$$

آماده‌سازی داده‌ها برای مدل‌سازی

در مدل اسکورپن داده‌های هدایت الکتریکی خاک به‌عنوان

جدول ۱. باندهای طیفی OLI و TIRS در ماهواره لندست ۸

نام باند	عرض باند (میکرومتر)	عرض تصویربرداری (کیلومتر)	قدرت تفکیک (متر)
باند ۱- ساحلی/گردوغبار	۰/۴۳۳-۰/۴۵۳	۱۸۵	۳۰
باند ۲- آبی	۰/۴۵۰-۰/۵۱۵	۱۸۵	۳۰
باند ۳- سبز	۰/۵۲۵-۰/۶۰۰	۱۸۵	۳۰
باند ۴- قرمز	۰/۶۳۰-۰/۶۸۰	۱۸۵	۳۰
باند ۵- مادون قرمز نزدیک	۰/۸۴۵-۰/۸۸۵	۱۸۵	۳۰
باند ۶ - مادون قرمز طول موج کوتاه	۱/۵۶۰-۱/۶۶۰	۱۸۵	۳۰
باند ۷- مادون قرمز طول موج کوتاه	۲/۱۰۰-۲/۳۰۰	۱۸۵	۳۰
باند ۸- پانکروماتیک	۰/۵۰۰-۰/۶۸۰	۱۸۵	۱۵
باند ۹- سیروس	۱/۳۶۰-۱/۳۹۰	۱۸۵	۳۰
باند ۱۰- مادون قرمز حرارتی	۱۰/۳۰-۱۱/۳۰	۱۸۵	۱۰۰
باند ۱۱- مادون قرمز حرارتی	۱۱/۵۰-۱۲/۵۰	۱۸۵	۱۰۰

روش هیبریدی است که شامل یک مدل رگرسیون و کریجینگ ساده است. به این منظور در ابتدا تمام لایه‌های اطلاعاتی به صورت سلولی تبدیل می‌شود. سپس یک رابطه رگرسیون درختی بین پارامترهای کمکی و داده‌های هدایت الکتریکی خاک در نرم‌افزار کویست با مدل مکانی M5 ایجاد می‌شود. خروجی این نرم‌افزار به فرمت نقطه‌ای بوده و در محیط GIS به فرمت رستر تبدیل می‌شود. فایل رستری ایجاد شده نقشه رگرسیونی را تشکیل می‌دهد.

معیارهای ارزیابی دقت مدل

به منظور برآورد کیفیت نقشه‌های تهیه شده از پارامترهای آماری مانند میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین R^2 استفاده می‌شود. میانگین قدر مطلق خطا کمیتی همواره مثبت بوده و

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (9)$$

که در این معادله $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر در مکان (x_i) ، $Z(x_0)$ مقدار تخمین زده شده متغیر در نقطه (x_0) ، λ_i وزن داده شده به متغیر x در نقطه i و n تعداد کل مشاهدات است. از مقادیر باقیمانده (اختلاف مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده) برای تهیه نقشه پیوسته خطا به کریجینگ ساده استفاده می‌شود (حذف روند). در نهایت نقشه خطایی که به دست آمده را با نقشه حاصل از مدل درختی (۲۰) در محیط GIS با هم تلفیق کرده تا نقشه نهایی هدایت الکتریکی خاک به دست آید.

رگرسیون کریجینگ

رگرسیون کریجینگ یا کریجینگ بعد از حذف روند، یک

دارای تغییرات زیاد قرار می‌گیرد. ضریب تغییرپذیری در ویژگی‌های خاک را می‌توان نتیجه تغییر در محیط‌های رسوبگذاری و یا اختلاف در شکل‌های اراضی مختلف است (۱۶). فروغی‌فر و همکاران (۳) گزارش دادند که ضریب تغییرات زیاد می‌تواند ناشی از اثر ترکیبی عوامل مدیریتی مانند مصرف کود و کاربری‌های مختلف اراضی و عوامل ذاتی مانند پستی و بلندی، تغییر شدید بافتی و وضعیت زهکشی است.

طبق جدول (۲) مقادیر میانگین و میانه داده‌های شوری خاک با هم متفاوت بوده و میزان کشیدگی و چولگی زیاد است. چولگی دلالت بر غیرنرمال بودن توزیع داده‌ها دارد و مقدار آن بیانگر غیریکنواخت بودن واریانس، وجود جوامع فرعی یا داده‌های پرت است (۲۱). نتایج آماری و همچنین نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف غیرنرمال بودن توزیع داده‌ها را تأیید می‌کند. از آنجا که زیاد بودن انحراف از توزیع نرمال در تجزیه و تحلیل آماری و همچنین درون‌یابی تأثیر نامطلوب دارد، لذا با استفاده از روش لگاریتمی داده‌های مورد استفاده نرمال‌سازی شدند. آمار توصیفی داده‌ها پس از نرمال‌سازی نیز در جدول (۲) ارائه شده است. در مطالعه‌ای مشابه دلبری و جهانی (۲) برای نرمال کردن داده‌های شوری و سدیمی خاک‌های منطقه چات (استان) گلستان از روش لگاریتمی استفاده کردند. پیسینی و همکاران (۱۹) نیز از داده‌های نرمال شده به روش لگاریتمی برای پهنه‌بندی خطر آلودگی نیترات استفاده کردند.

پهنه‌بندی رقوم هدایت الکتریکی خاک

الف- روش کریجینگ

اولین گام در استفاده از روش کریجینگ بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌ها توسط آنالیز واریوگرام است، بدین منظور اقدام به ترسیم واریوگرام با استفاده از داده‌های نرمال شد. شکل (۳) نیم تغییرنمای مدل نمایی مربوط به روش کریجینگ را نشان می‌دهد. مدل نمایی از مبدأ مختصات شروع شده و در نزدیکی مبدأ رفتاری خطی دارد ولی آهنگ

مقدار اریب را نشان می‌دهد. بر این اساس هرچه مقدار MAE به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقیق‌تر بودن روش مورد نظر است. مجذور میانگین مربعات خطا نیز هر قدر به صفر نزدیک باشد نشان‌دهنده خطای کمتر است. به علاوه، مقدار R^2 نشان‌دهنده همبستگی بین داده‌ها است و هر قدر این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده همبستگی بیشتر بین داده‌ها است (۶). نحوه محاسبه هر کدام از پارامترهای فوق به صورت روابط (۱۰ و ۱۱) است:

$$MAE = \left(\frac{1}{n} \right) \sum [Z^*(Xi) - Z(Xi)] \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum [Z^*(Xi) - Z(Xi)]^2}{n}} \quad (11)$$

که در معادلات فوق n تعداد نقاط مشاهده‌ای، $Z^*(xi)$ مقدار برآورد متغیر در نقطه λ_m و $Z(xi)$ مقدار مشاهده شده متغیر در نقطه λ_m است

نتایج و بحث

نتایج آماری هدایت الکتریکی خاک‌ها

خلاصه آماری داده‌های اولیه و داده‌های تبدیل شده شوری خاک در جدول (۲) ارائه شده است. مطابق با نتایج به‌دست آمده، میانگین هدایت الکتریکی در استان برابر ۱۸/۸۷ دسی زیمنس بر متر است که مطابق با طبقه‌بندی آزمایشگاه شوری وزارت کشاورزی ایالات متحده اغلب خاک‌های استان خوزستان در طبقه خاک‌های با شوری زیاد قرار دارند. دامنه تغییرات شوری خاک بین ۰/۳۲ تا ۱۱۴/۸۳ دسی زیمنس بر متر است. به‌طور کلی بر پایه گروه‌بندی ویل‌دینگ و درس (۲۷) متغیرهای با ضریب تغییرات کمتر از ۱۵ درصد دارای تغییرات کم، متغیرهای با ضریب تغییرات ۱۵-۳۵ درصد دارای تغییرات متوسط و متغیرهای با ضریب تغییرات بیش از ۳۵ درصد دارای تغییرات زیاد هستند. بر پایه این گروه‌بندی، شوری خاک که در کلاس

جدول ۲. آمار توصیفی داده‌های شوری خاک قبل و بعد از نرمال‌سازی

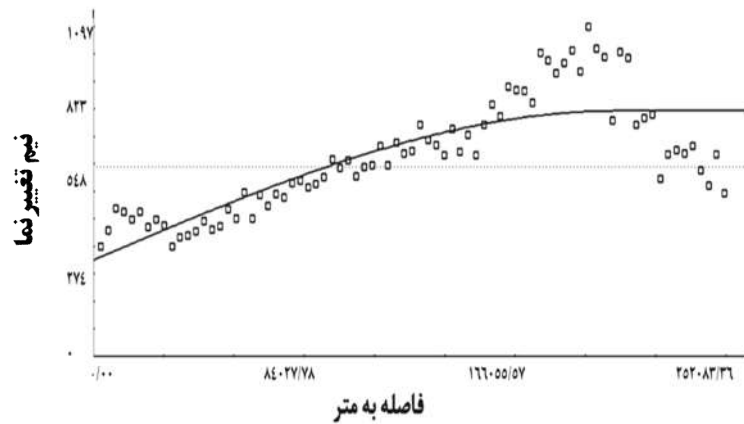
توزیع داده‌ها	داده‌های خام	داده‌های تبدیل شده
تعداد	۲۹۱	۲۹۱
حداقل	۰/۳۲	-۰/۴۹
حداکثر	۱۱۴/۸۳	۲/۰۶
میانگین	۱۸/۸۷	۰/۸۱
میانه	۴/۷۹	۰/۶۸
مد	۲/۲۴	۰/۳۵
چولگی	۱/۵۹	۰/۰۸
کشیدگی	۱/۸۵	-۱/۲۳
ضریب تغییرات	۱۳۲/۹۷	۲/۵۶
انحراف معیار	۲۵/۰۹	۰/۶۹
دامنه تغییرات	۱۱۴/۵۱	۸۶/۳۶
Kolmogorov-Smirnov Z	۱/۷۴	۱/۲۳
Asymp. Sig. (2-tailed)	۰	۰/۰۵۱

لندست ۸ استفاده شد. به‌همراه این اطلاعات لایه رستری داده‌های شوری خاک وارد مدل‌سازی شدند. به این منظور در مرحله اول یک رابطه رگرسیونی بین داده‌های شوری خاک و متغیرهای محیطی به‌روش رگرسیون درختی، بر اساس درجه اهمیت آنها در تخمین شوری خاک تشکیل شد. شکل (۴) نتایج مدل درختی مبنی بر اهمیت متغیرهای محیطی در پیش‌بینی شوری خاک را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج رگرسیون درختی متغیرهای محیطی اصلی برای پیش‌بینی شوری خاک منطقه مطالعاتی شامل شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا (۲۱ درصد)، باند ۲ (۴۰ درصد)، باند ۴ (۹۶ درصد)، باند ۵ (۶۷ درصد)، باند ۷ (۶۱ درصد)، شاخص خیسی (۴۰ درصد)، سطح مبنای شبکه زهکشی (۱۰۰ درصد)، نقشه خاک استان خوزستان (۹۶ درصد)، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (۶۹ درصد)، شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده (۶۹ درصد) و شاخص روشنایی (۹۶ درصد) هستند. در مطالعه‌ای مشابه تقی‌زاده و همکاران (۲۴) در پهنه‌بندی رقومی شوری خاک اردکان با استفاده از روش رگرسیون کریجینگ با واریوگرام محلی

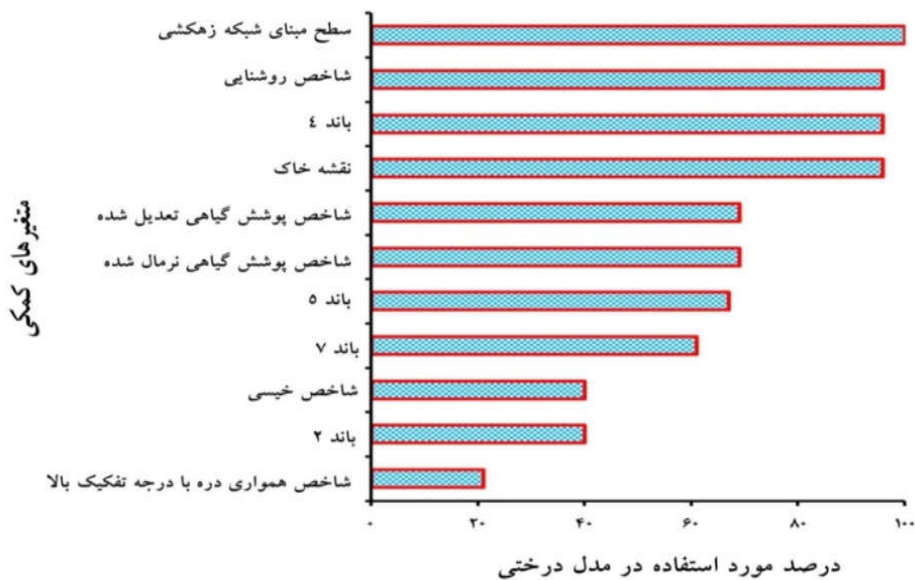
صعود آن آرام‌تراست و در عمل هیچ‌گاه به حد آستانه‌ای یا سقف معینی نمی‌رسد. علت پیدایش داده‌هایی با چنین مدلی می‌تواند وجود روند در محدوده مورد بررسی و بزرگی قابل ملاحظه دامنه تأثیر نسبت به ابعاد محدوده تحت پوشش نمونه‌برداری باشد. پرش نیم تغییرنا که قسمت میانی نیم تغییرنا است، تا حدودی دلالت بر درجه همگنی محیط دارد. هرچه شیب این منحنی بیشتر باشد، محیط ناهمگن‌تر است و در فاصله کمتری به سقف می‌رسد. پس از مشخص شدن واریوگرام، مدل کریجینگ برای هدایت الکتریکی سطحی خاک اجرا شد که به ترتیب مقدار میانگین قدر مطلق خطا، مجذور میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین ۲/۶۷، ۲۰/۲۶ و ۰/۴۵ به‌دست آمد.

ب- رگرسیون کریجینگ

برای تهیه نقشه شوری خاک از روش رگرسیون کریجینگ با واریوگرام ناحیه‌ای استفاده شد. به این منظور از داده‌های کمکی از جمله پارامترهای سرزمین، نقشه‌های کاتگوری و تصاویر ماهواره



شکل ۳. نیم تغییرنمای تجربی داده‌های شوری خاک



شکل ۴. نتایج اهمیت متغیرهای محیطی در تخمین شوری خاک

همبستگی بالایی داشت درحالی که مناطق غیرشور بیشتر روی دشت‌های دارای یخ واقع شده بودند. ایشان همچنین گزارش دادند که استفاده از این نوع روابط در تحلیل مکانی و مدل‌سازی، منجر به تشخیص مکانی بهتر شوری خاک می‌شود.

پس از تعیین متغیرهای محیطی اصلی، با محاسبه روابط رگرسیونی بین داده‌های هدایت الکتریکی و مهم‌ترین متغیرهای کمی، مدل رگرسیون درختی بر اساس قوانین حاصل از روش رگرسیون تهیه شد (جدول ۳). سپس مقادیر باقیمانده داده‌های آموزش محاسبه و با استفاده از روش کریجینگ با واریوگرام

از متغیرهای محیطی شامل پارامترهای سرزمین، داده‌های تصاویر ماهواره‌ای و نقشه سطوح مورفولوژیکی استفاده کردند. نتایج نشان داد که برای تخمین شوری خاک متغیرهای شاخص خیزی، نقشه ژئومورفولوژی، مؤلفه اول تصاویر ماهواره‌ای، برای حوزه و عمق دره بیشترین همبستگی را با شوری نشان می‌دهند. مترنیخت و زینک (۱۳) از ترکیب اطلاعات شکل زمین با داده‌های شوری برای تخمین شوری در منطقه کوچوبامبای بولیوی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مناطق به‌شدت شور و قلیایی با موقعیت‌های خاصی از شکل زمین به‌ویژه با موقعیت پلایا و اراضی مسطح

جدول ۳. قوانین استفاده شده برای پیش‌بینی شوری خاک

Model:

Rule 1: [95 cases, mean 2.3245, range 0.325 to 18.38, est err 1.3456]

if
Channel Network Base Level > 30.53392
SoilMap in 2, 3, 5, 6, 9, 11, 12, 14, 15, 19, 23, 24, 29, 30, 31, 32, 34
then
Predict = -4.304 + 536 SAVI - 801 NDVI - 0.056 b7 + 0.037 b5 + 0.023 BI - 0.029 b4 + 0.023 b1 + 0.24 Wetness Index

Rule 2: [18 cases, mean 16.0853, range 1.19 to 44.2, est err 13.2374]

if
Channel Network Base Level > 30.53392
SoilMap in 1, 7, 8, 18, 20
then
Predict = 7.3369 + 517 SAVI - 773 NDVI + 0.022 BI - 0.028 b4

Rule 3: [49 cases, mean 21.6560, range 0.846 to 94.7, est err 16.6267]

if
Channel Network Base Level <= 30.53392
SoilMap in 1, 2, 7, 15, 21, 25, 29
then
Predict = 35.2114 + 8562 SAVI - 12793 NDVI - 0.569 Channel Network Base Level - 0.746 b4 + 0.512 BI
+ 1.6 MRVBF - 0.068 b7

Rule 4: [52 cases, mean 32.4042, range 1.334 to 85.6, est err 18.8359]

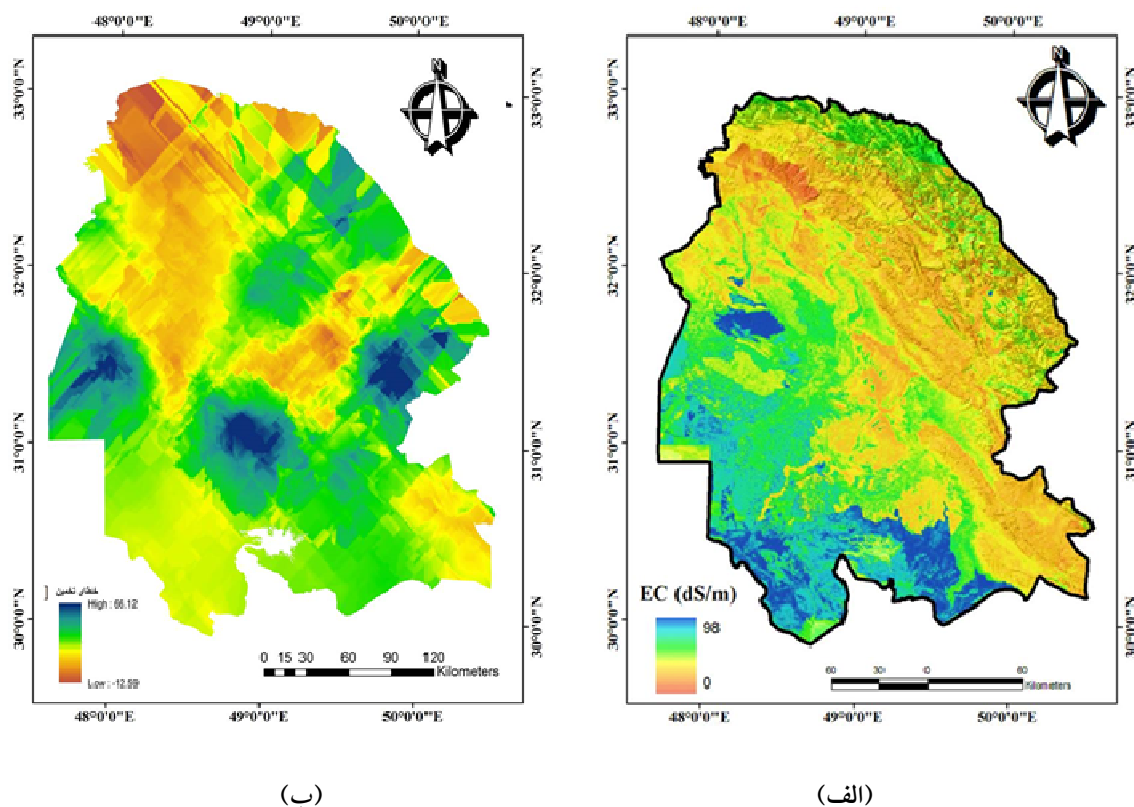
if
b5 <= 209
Channel Network Base Level > 4.445711
Channel Network Base Level <= 30.53392
SoilMap in 8, 9, 16, 17, 18, 20, 22, 24, 27
then
Predict = 91.952 - 1.408 Channel Network Base Level - 0.393 b4 + 0.205 b5 - 0.039 BI

Rule 5: [11 cases, mean 53.6053, range 0.348 to 114.5, est err 26.0911]

if
b5 > 209
Channel Network Base Level <= 30.53392
SoilMap in 8, 9, 16, 17, 18, 20, 22, 24, 27
then
Predict = 189.926 - 0.765 Channel Network Base Level - 0.772 b4 + 0.314 b5 - 0.117 BI

Rule 6: [10 cases, mean 71.9400, range 29 to 106.1, est err 18.7418]

if
Channel Network Base Level <= 4.445711
then
Predict = 24.895 + 14.69 Channel Network Base Level



شکل ۵. نقشه شوری حاصل از روش: الف) رگرسیون درختی و ب) مقادیر باقیمانده

جدول ۴. نتایج معیارهای ارزیابی خطا بر اساس روش رگرسیون کریجینگ

متغیر	RMSE	MAE	R ²	R
داده‌های آموزش	۶/۲۱	۰/۴۱	۰/۸۴	۰/۹۲
داده‌های آزمون	۸/۳۸	۱/۱	۰/۷۹	۰/۸۹

RMSE و MAE برای داده‌های آموزشی و آزمون به ترتیب ۶/۲۱، ۰/۴۱ و ۸/۳۸، ۱/۱ به دست آمد. یان و همکاران (۲۸) نیز به منظور کاهش تراکم نمونه برداری برای تهیه نقشه شوری خاک در چین از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های کمکی در روش کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ در تراکم‌های نمونه برداری مختلف بهتر از روش کریجینگ معمولی بودند. همچنین در مقایسه با روش

ناحیه‌ای تبدیل به نقشه پیوسته واریانس خطا شد (شکل ۵). در نهایت نقشه واریانس خطا با نقشه حاصل از مدل رگرسیون درختی تلفیق شد و نقشه نهایی هدایت الکتریکی تهیه شد. نتایج مدل رگرسیون کریجینگ بر اساس داده‌های آموزش (۸۰ درصد) و داده‌های آزمون (۲۰ درصد) در جدول (۴) ارائه شده است. بر اساس نتایج ارزیابی دقت، مقدار ضریب تبیین برای داده‌های آموزشی و آزمون به ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۷۹ برآورد شده است. همچنین مقدار پارامترهای خطا،

نیز به صورت یک مسئله جدی درآمده است. عملیات مختلف مانند مدیریت نادرست اراضی کشاورزی، عدم شستشوی نمک‌ها، بی‌توجهی به تناوب و انتخاب گیاه، عدم رعایت آیش و استفاده نامتعادل از کودهای شیمیایی و فاضلاب‌های شهری از جمله عواملی هستند که موجب افزایش شوری خاک می‌شوند. کیفیت آب زیرزمینی و آب آبیاری اراضی کشاورزی نیز در افزایش هدایت الکتریکی خاک‌ها نقش اساسی دارند. در این مورد استفاده از انواع کودها به خصوص کود حیوانی در اراضی کشاورزی به همراه استفاده از فاضلاب‌های شهری بر صنعتی در کیفیت آب‌ها تأثیر می‌گذارند. نتایج نشان داده که استفاده مکرر از کودهای آلی می‌تواند شور شدن خاک را به دنبال داشته باشد (۲۹). این مسئله بیشتر مناطق نیمه جنوبی استان را شامل می‌شود. به این دلیل که نواحی شمالی استان از نظر دما و نزولات جوی شرایط بهتری دارند که در نتیجه آن میزان آبشویی خاک بیشتر شده و به دلیل بیشتر بودن مواد آلی نیاز به کوددهی کاهش یافته است. همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود اراضی کشاورزی در نواحی شمالی نسبت به اراضی کشاورزی نواحی جنوبی از مقدار شوری کمتری برخوردارند. علاوه بر تأثیر واحدهای شکل اراضی و عوامل انسانی در تجمع املاح، نوع کاربری اراضی نیز در تجمع املاح مؤثر است. والتر و همکاران (۲۶) مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقدار شوری در خاک‌های الجزایر را نوع کاربری اراضی، توپوگرافی و کیفیت آب آبیاری معرفی کردند. لش و همکاران (۹) در بررسی شوری اراضی کشاورزی بخش‌هایی از آمریکا تغییرپذیری مکانی زیادی را در شوری مشاهده کردند. آنها گزارش دادند که این موضوع را می‌توان به وسعت زیاد منطقه، تفاوت در عمق آب زیرزمینی در نقاط مختلف، پستی و بلندی اراضی و وجود کانال‌های زهکشی در برخی مناطق نسبت داد.

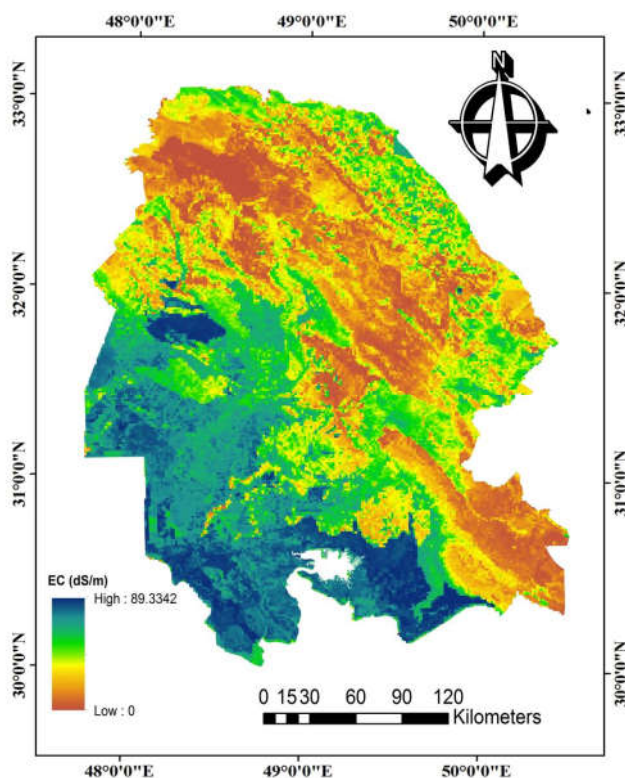
نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه با استفاده از داده‌های رقومی استخراج شده از نقشه DEM و اطلاعات طیفی تصاویر سنجنده‌های OLI

کوکر جینگ، روش رگرسیون کریجینگ به دلیل استفاده از داده‌های کمکی بیشتر مقدار ریشه مربعات خطا را از $41/5$ به $23/6$ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر کاهش داد. لی (۱۰) به منظور بررسی تغییرات مکانی کربن آلی خاک در چین از روش‌های کریجینگ معمولی، یونیورسال کریجینگ و رگرسیون کریجینگ استفاده کرد. در روش رگرسیون کریجینگ متغیرهای محیطی شامل داده‌های تصاویر ماهواره‌ای، پارامترهای زمین‌نما مانند شیب، ارتفاع، شاخص خیزی و انحنای پروفیل و نقشه‌های کاتگوری مانند نقشه خاک و پوشش گیاهی است. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های کمکی باعث افزایش دقت تخمین در روش رگرسیون کریجینگ شده است.

شکل ۶ نقشه نهایی تغییرات مکانی شوری خاک با استفاده از روش رگرسیون کریجینگ را نشان می‌دهد. بر این اساس تغییرات شوری خاک در استان خوزستان از شمال به جنوب افزایش می‌یابد. توزیع مکانی شوری نیز نشان می‌دهد که بیشترین میزان شوری در جنوب و غرب قرار دارد. اراضی دارای شوری بالا در واحد اراضی پست و دشت واقع شده است که از لحاظ ارتفاعی نسبت به دیگر واحدها در ارتفاع پایین‌تری قرار دارند. در نتیجه بر اساس شیب موجود کلیه رواناب حاصله، املاح و مواد دانه‌ریز به این نواحی انتقال یافته و به دنبال آن در اثر تبخیر آب، املاح در سطح خاک باقی می‌مانند. همچنین بالا بودن سطح آب زیرزمینی و حرکت موئینگی باعث تجمع املاح در این خاک‌ها می‌شود. علاوه بر این نواحی جنوبی استان خوزستان به دلیل نزدیکی به خلیج فارس و همچنین نوع تشکیلات زمین‌شناسی و مواد مادری به طور طبیعی استعداد شوری دارند (۳۰). نزدیکی این اراضی به دریا موجب شده است که پدیده نفوذ آب شور دریا به سمت دشت اتفاق بیفتد. در واحدهای کوهستانی، تپه‌ها و دشت دامنه‌ای آبرفتی نواحی شمال و شرق استان به علت وجود رس کمتر و شن بیشتر در افق‌های سطحی خاک، شستشوی املاح بیشتر انجام شده و احتمالاً سبب تجمع آنها در خاک زیرسطحی یا خروج آنها از پروفیل خاک شده است.

در استان خوزستان شور شدن خاک در اثر فعالیت‌های انسانی



شکل ۶. نقشه نهایی شوری خاک به روش رگرسیون کریجینگ

املاح به سطح خاک، تفاوت در نوع کاربری اراضی در نواحی مختلف استان و همچنین کیفیت آب زیرزمینی و آب آبیاری اشاره کرد که تحت تأثیر استفاده مکرر از کودهای حیوانی و پساب فاضلاب‌ها تغییر می‌کند. با توجه به دقت قابل قبول روش رگرسیون درختی، پیشنهاد می‌شود در سایر مطالعات خاکشناسی برای پهنه‌بندی و نقشه‌برداری خصوصیات مختلف خاک از این روش استفاده شود. به علاوه، توصیه می‌شود که با توجه به تغییرپذیری مکانی زیاد شوری خاک در مطالعات بعدی از تصاویر ماهواره‌های با قدرت تفکیک مکانی بیشتر در پهنه‌بندی شوری استفاده شود تا دقت نقشه‌های تولید شده افزایش یابد.

و TIRS ماهواره لندست ۸ نقشه شوری خاک‌های سطحی استان خوزستان با بهره‌مندی از روش کریجینگ رگرسیون تهیه شد. نتایج نشان داد که باندهای ۲، ۴، ۵ و ۷ تصاویر ماهواره لندست ۸ شاخص روشنایی، شاخص خیسی، شاخص همواری سطح دره با درجه تفکیک بالا، سطح مبنای شبکه زهکشی، نقشه خاک، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده مهم‌ترین پارامترهای انتخاب شده توسط مدل رگرسیونی درختی برای پهنه‌بندی شوری خاک در استان خوزستان هستند. تغییرات شوری خاک در استان خوزستان از شمال به جنوب و از شرق به غرب روند افزایشی دارد. از دلایل عمده شوری خاک در این مناطق می‌توان به بالا بودن آب زیرزمینی، تفاوت در پستی و بلندی، حرکت موئینگی

منابع مورد استفاده

1. Allbed, A. and L. Kumar. 2013. Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: A review. *Advances in Remote Sensing* 2: 373-385.
2. Delbari, M., S. Jahani. 2014. Spatial variability analysis of soil salinity and alkalinity in chat region, Golestan Province. *Iranian Journal of Soil Research* 28(2): 433-446.
3. Foroughifar, H., A. A. Jafarzadeh, H. Torabi Golsefidi, N. Aliasgharzadeh, N. Toomanian and N. Davatgar. 2011. Spatial variations of surface soil physical and chemical properties on different landforms of Tabriz Plain. *Water and Soil Science* 21(3): 1-21.
4. Hengl, T., Huvelink, G.B M., and Rossiter, D.G., 2007. About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers and Geosciences* 33: 1301-1315.
5. Hengl, T., G. B. M. Huvelink and A. Stein. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 120: 75- 93.
6. Isaaks, E. H. and R. M. Serivastava. 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York.
7. Jenny, H. 1941. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. McGraw-Hill, New York.
8. Khan, N. M., V. V. Rastoskuev, E. Shalina and Y. Sato. 2001. Mapping salt-affected soil using remote sensing indicators. A Simple approach with the use of GIS Idrisi. Proceedings of 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Singapore.
9. Lesch, S. M., D. L. Corwin and D. A. Robinson. 2005. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 351-378.
10. Li, Y. 2010. Can the spatial prediction of soil organic matter contents at various sampling scales be improved by using regression kriging with auxiliary information? *Geoderma* 159: 63-75.
11. Liu, X., J. Peterson, Z. Zhang and S. Chandra. 2005. Improving soil salinity prediction with high resolution DEM derived from LIDAR data. The 9th International Symposium on Physical Measurements and Signature in Remote Sensing, China.
12. McBratney, A. B., M. L. Mendonça-Santos and B. Minasny. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117: 3-52.
13. Metternicht, G. and J. A. Zinck. 1997. Spatial discrimination of salt- and sodium-affected soil surfaces. *International Journal of Remote Sensing* 18(12): 2571-2586.
14. Michot, D., C. Walter, I. Adam and Y. Guéro. 2013. Digital assessment of soil-salinity dynamics after a major flood in the Niger River valley. *Geoderma* 207-208: 193-204.
15. Minasny, B., A. B. McBratney and A. E. Hartemink. 2010. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma* 155: 132-139.
16. Momtaz, H. R., A. A. Jafarzadah, H. Torabi, S. Oustan, A. Samadi, N. Davatgar and R. J. Gilkes. 2009. An assessment of the variation in soil properties within and between landforms in Amol region, Iran. *Geoderma* 149: 10-18.
17. Nield, S. J., J. L. Boettinger and R. D. Ramsey. 2007. Digitally mapping gypsic and natric soil areas using landsat ETM data. *Soil Science Society of America Journal* 71: 245-255.
18. Odgers, N., A. McBratney and B. Minasny. 2015. Digital soil property mapping and uncertainty estimation using soil class probability rasters. *Geoderma* 237-238: 190-198.
19. Piccini, C., A. Marchetti, R. Farina and R. Francaviglia. 2012. Application of indicator kriging to evaluate the probability of exceeding nitrate contamination thresholds. *International Journal of Environmental Research* 6(4): 853-862.
20. Quinlan, J. R. 2001. Cubist: An Informal Tutorial. Available at <http://www.rulequest.com>. (visited 10 October 2014).
21. Shakouri, M., M. Shabanpour and H. Asadi, N. Davatgar and S. Babazadeh. 2011. Evaluation efficiency spatial interpolation techniques in mapping organic carbon and bulk density paddy soils of Guilan. *Journal of Water and Soil Conservation* 18(2): 195-209.
22. Shrestha, R. P., 2006. Relating soil electrical conductivity to remote sensing and other soil properties for assessing soil salinity in northeast Thailand. *Land Degradation and Development* 17: 677-689.
23. Taghizadeh Mehrjerdi, R. A., F. Sarmadian, M. Omid, Gh. Savagheb, M. J. Roustia and M. H. Rahimian. 2013. Mapping soil salinity using geostatistic and electromagnetic induction methods in Ardkan. *Iranian Journal of Soil Research* 26(4): 369-380.
24. Taghizadeh Mehrjerdi, R. A., F. Sarmadian, M. J. Roustia, M. H. Rahimian, M. Omid and N. Toomanian. 2015. Digital mapping of apparent electrical conductivity using regression kriging and local variogram in Ardakan region. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 4(4): 1-29.
25. Triantafyllis, J. I., O. A. Odeh and A. B. Mc Bratney. 2001. Five geostatistical methods to predict soil salinity from

- electromagnetic induction data across irrigated cotton. *Soil Science Society of America Journal* 65: 869-878.
26. Walter, C., A. B. McBratney, D. Abdelkader and B. Minansny. 2001. Spatial prediction of topsoil salinity in the Chelif valley, Algeria, using local ordinary kriging with local variograms versus whole area variogram. *Australian Journal of Soil Research* 39: 259-272.
27. Wilding, L. P. and L. R. Dress. 1983. Spatial variability and pedology. PP. 83-116. *In: Wilding, L.P., N. E. Smeckand and G. F. Hall, (Eds.), Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions. Elsevier Science Pub.*
28. Yan, L., Z. Shi, C. Wu, H. Li and F. Li. 2007. Improved prediction and reduction of sampling density for soil salinity by different geostatistical methods. *Agriculture Sciences in China* 6(7): 832-841.
29. Yazdani Nejhad, F. and H. Torabi. 2013. Study of spatial variability and mapping of soil salinity in agricultural lands using kriging and GIS in south of Tehran. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 44(3): 255-262.
30. Zaman, M., S. A. Shahid and L. Heng. 2018. Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques. Springer, Switzerland.

Digital Mapping of Surface Soil Salinity in Khuzestan Province, Using Regression Kriging

Z. Savari¹, S. Hojati^{1*} and R. Taghizadeh-Mehrjardi²

(Received: October 5-2020; Accepted: January 13-2021)

Abstract

Soil salinity and its development are the main problems that should be prevented by correct management methods. Recognition of saline districts and the preparation of salinity maps are the first steps in this way. Nowadays, the application of auxiliary data in digital soil mapping is increasing due to the current associated problems in the preparation of traditional maps. The objectives of this study were to map soil salinity by the Regression Kriging (RK) method, to identify areas with high salinity, and to investigate the relationship between soil salinity and soil-forming factors in Khuzestan Province. For this purpose, 291 surface soil samples (0-10 cm) were randomly collected in April 2014. Auxiliary variables or soil-forming factors were included in the land parameters such as slope, watershed and wetness index, OLI and TIRS images of Landsat 8, and the category maps (soil, land use, and geological maps). Also, kriging approaches were used to compare the precision of different mapping methods. The results indicated that the Regression Kriging method has a higher precision compared with other methods so that the coefficient of determination, Mean Absolute Error (MAE), and Root Mean Square Error (RMSE) were estimated as 0.84, 0.41, and 6.21, respectively. The Decision Tree Regression method could also create a good relationship between soil salinity and auxiliary variables. The results showed that some auxiliary variables were more effective on the prediction of soil salinity including 2, 4, 5, and 7 bands of Landsat 8, Brightness Index, Wetness Index, Multiresolution index of Valley Bottom Flatness (MrVBF), Channel Network Base Level (CNBL), NDVI, SAVI and soil map. A Digital map of soil salinity was prepared by the obtained rules, and then it was assimilated with the map of error of variance to prepare the final soil salinity map. Accordingly, soil salinity was found to have an increasing trend from north to south in Khuzestan Province which indicates a salinity problem in the south of the Province. The main reasons for the high salinity in the south and southwestern parts of the area could be attributed to the high water table levels, differences in topography, capillary movement of salt to the soil surface, the difference in the type of land uses, and also groundwater quality and irrigation water which is altered by the frequent application of wastewaters and animal manures.

Keywords: Digital maps, Decision tree, Spatial distribution, Salinity

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan, Iran.

2. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ardakan University, Yazd, Iran.

*: Corresponding author, Email: s.hojati@scu.ac.ir