

برآورد شوری خاک با استفاده از داده‌های دورسنجی و آمار مکانی در منطقه سبزوار

امیر کرم- دانشیار ژئومورفولوژی گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه خوارزمی تهران.
طیبه کیانی- استادیار ژئومورفولوژی گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه خوارزمی تهران.
ابوالقاسم دادرسی سبزوار- استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی.
زهرا داورزنی*- دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه خوارزمی تهران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۱۸ تائید نهایی: ۱۳۹۷/۱۰/۰۷

چکیده

شوری خاک یکی از عوامل محدودکننده رشد گیاهان و تخریب اراضی است. هدف از این پژوهش، کاربردی ساختن و دسترسی به پایگاه‌های دور یا بیرون از دسترس شوری خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور است. در این پژوهش، ۴۸ نمونه خاک منطبق با نقشه واحد کاری (ژئومورفولوژی) از منطقه سبزوار در غرب استان خراسان رضوی برداشت شد، سپس به بررسی رابطه همبستگی بین مقادیر هدایت الکتریکی (EC) با متغیرهای به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای لندست شامل شاخص‌های شوری، شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص روشنایی، باندهای تصویرسازی TM, ETM+, OLI، شاخص مؤلفه‌های اصلی و شاخص انتقال طیفی، اقدام گردید. پی‌ریزی توابع تخمین شوری سطحی خاک با روش رگرسیون چندگانه در قالب ۵ روش رگرسیونی شامل رگرسیون چندگانه گام‌به‌گام، رگرسیون چندگانه پس‌حذف‌رو، رگرسیون چندگانه پیش‌رو، رگرسیون چندگانه وارد شونده، رگرسیون چندگانه عزل انجام گرفت. همبسته‌ترین متغیرها با محاسبه عامل تورم واریانس و ضریب پیرسون مشخص شدند. با استفاده از مدل‌های آمار مکانی، شاخص موران و خوشه‌بندی حداقل - حداکثر به بررسی رابطه همبستگی متغیرها پرداخته شد. نتایج حاصل از تحلیل داده‌های فضایی نشان می‌دهد، الگوی همبستگی فضایی در شاخص موران از الگوی خوشه‌ای و در شاخص حداقل - حداکثر از الگوی تصادفی تبعیت می‌کند. در شاخص موران مقدار آماری بالای $Z(4/171359)$ و مقدار پائین $P\text{-value}(+0.00030)$ نشان از همبستگی بالای این مدل دارد. بیشتر مدل‌های رگرسیونی دارای ضریب همبستگی پیرسون مناسب $+0.84$ و ضریب تبیین $+0.71$ می‌باشند. در این پژوهش، روش‌های دورسنجی و مدل‌های پیش‌بینی‌کننده از توانایی مناسبی برای تخمین شوری سطحی خاک برخوردارند.

واژگان کلیدی: شوری خاک، سنجش‌ازدور، شاخص‌های طیفی، منطقه سبزوار.

مقدمه

اهمیت خاک به دلیل رشد فزاینده جمعیت و بروز نیازهای جدید برای تأمین غذا جهت مصرف بی‌رویه جمعیت روبه رشد بیشتر مشخص می‌شود. در این راستا یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلاتی که در زمینه‌ی استفاده از خاک به وجود می‌آید، مسئله شوری آن است. شور شدن خاک‌ها و توسعه آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله مخاطرات محیطی است که در سال‌های اخیر مورد توجه واقع شده است و دامنه آن روبه‌روز در حال افزایش است. هرچند که شور شدن خاک مانند سایر مخاطرات محیطی اثرات سریع و آنی ندارد (مترنیچت و زینک^۱، ۲۰۱۳:۱) اما به دلیل عواقبی که در زندگی بشر دارد در دنیای امروز بسیار مورد توجه قرار گرفته و به‌عنوان یک مخاطره شدید مدنظر قرار می‌گیرد (یو^۲ و همکاران، ۲۰۱۰:۱۹۵۲). مخاطره شوری زایی از جمله، قدیمی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی بوده و به‌عنوان یکی از هفت عامل بیابان‌زایی محسوب می‌شود (UNEP^۳). بر طبق آمار، شوری ۸۰٪ علت بیابان‌زایی را شامل می‌شود.

بیابان‌زایی از جمله فرآیندهای تخریبی و کاهنده کارایی سرزمین است که حیات را در اغلب جلوه‌ها و مظاهر گوناگون متأثر، پایداری آن را تهدید و ابعاد چالشی گسترده‌ای دارد و امروزه بخش عظیمی از جهان با آن دست‌به‌گریبان است. تخریب منابع آب‌وخاک، باتلاقی شدن زمین‌ها، نابودی پوشش گیاهی، تهدید تنوع زیستی و کاهش گونه‌های گیاهی و جانوری، تغییرات اقلیمی، تعمیق فقر، تشدید آوارگی، فروپاشی نظام‌های اقتصادی اجتماعی، نابودی سیستم‌های بهره‌برداری سازگار با محیط‌های خشک و... را تنها می‌توان گوشه‌هایی از نتایج ملموس بیابان‌زایی دانست (شوباو کریشنان^۴، ۲۰۱۶:۳۴۳).

تهدید بیابان‌زایی و تسریع روند شور شدن اراضی در ایران، کشوری که ابعاد آسیب‌پذیری و ناپایداری عرصه‌های طبیعی‌اش از همیشه بحرانی‌تر به نظر می‌رسد، خطرناک است.

از ۱۶۵ میلیون هکتار سطح کشور، مساحتی در حدود ۲۳/۵ میلیون هکتار (۱۴/۲٪) به درجات مختلف با مسئله شوری همراه است. مطالعات یونسکو در سال ۲۰۰۳ به‌میزان ۲۳ میلیون هکتار معادل ۱۴ درصد اراضی شور اشاره می‌نماید. ضمن آن که بر اساس آخرین آمار منتشر شده، وسعت اراضی تحت تأثیر شوری را به بیش از ۱۵ درصد می‌داند که طبق مشاهدات عینی این رقم در هر سال افزایش می‌یابد. با توجه به ارقام متفاوت در مورد وسعت اراضی شور در ایران، مساحت زیاد این اراضی، تهدیدی جدی برای کشاورزی و منابع طبیعی محسوب می‌شود.

پراکنش مکانی و زمانی املاح و نمک‌ها در خاک، و وسعت بسیار بالای بیابان‌های ایران و شرایط نامناسب اقلیمی حاکم بر آن‌ها، تعیین دقیق پارامترها و اندازه‌گیری‌های میدانی را غیرعملی می‌سازد. چنانچه بتوان ارتباطی بین داده‌های رقومی ماهواره‌ای و شوری خاک برقرار نمود، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قادر خواهد بود، تخمین شوری خاک را در سطح منطقه تسهیل و دسترسی به نقاط دور یا خارج از دسترس را فراهم آورد. این پژوهش به دنبال یافتن این ارتباط است. داده‌های سنجش‌ازدور بر مبنای تباین زیاد بین خواص دی‌الکتریک آب‌وخاک خشک عمل می‌کند. دید گسترده، تصویربرداری منظم، رؤیت مناطق غیرقابل دسترس و سرعت بالای دسترسی به اطلاعات از ویژگی‌های مهم آن به شمار می‌آید. داده‌های دور سنجی، پتانسیل بالایی برای تخمین ناحیه‌ای شوری خاک، نسبت به اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای دارند (لگتس^۵، ۲۰۰۰: ۲۳۴-۲۳۵).

¹ Metternich and Zink

² Yu

³ United Nations Environment Programme

⁴ Shoba and Krishnan

⁵ Legates

پژوهش‌های با ارزشی در زمینه شوری خاک با استفاده از داده‌های دورسنجی در کشور انجام شده است و روش‌های متعددی ایجاد و بهبود یافته‌اند.

اژیرایی و همکاران در سال (۱۳۹۳) با مقادیر استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای به پهنه‌بندی شوری خاک در منطقه گرگان پرداختند. آنان با به‌کارگیری سنجنده ETM^+ سال (۲۰۱۲) و شاخص‌های $SI, NDSI, DVI, IPVI$ به بررسی همبستگی داده‌های به‌دست‌آمده از نمونه‌های خاک و مقادیر شاخص‌های تصاویر ماهواره‌ای اقدام نمودند. نتایج نشان داد که شاخص SI بیشترین همبستگی را با داده‌های زمینی دارد.

اسفندیاری و همکاران در سال (۱۳۹۴) به پایش نمکزارهای مناطق خشک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای $LISSIII$ ماهواره $IRS-P6$ در منطقه کاشان و مهارلو پرداختند. شاخص‌های نمکزار $RSC1, NDSC1$ بهترین تفکیک‌پذیری را در منطقه موردپژوهش داشته است.

اخضری و اسدی (۱۳۹۵) با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های سنجنده OLI و اطلاعات میدانی، نقشه شوری جنوب دشت ملایر را تهیه و برای پایش شوری خاک، شاخص‌های طیفی و خصوصیات شیمیایی خاک (کاتیون‌ها و آنیون‌های خاک) را مورد مطالعه قرار دادند. در تهیه نقشه پراکنش با استفاده از داده‌های میدانی و آزمایشگاهی، تکنیک درون‌یابی کریجینگ معمولی را اعمال نمودند. با استفاده از روش رگرسیون فضایی چند متغیره به بررسی ارتباط داده‌های میدانی و دورسنجی پرداختند. نتیجه پژوهش، کارایی بالای سنجنده OLI را در زمینه تهیه نقشه شوری خاک بازگو می‌نماید. آنان اذعان داشتند که فن دورسنجی سرعت و دقت دستیابی به اطلاعات را افزایش و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد.

مرادیان و همکاران (۱۳۹۶) برای پیش‌بینی شوری خاک منطقه قروه استان کردستان از داده‌های تصویر ETM^+ استفاده نمودند. پارامترهای سرزمین (شامل ۱۵ پارامتر) و شاخص شوری SI و شاخص گیاهی نرمال شده $NDVI$ را به ترتیب با استفاده از نرم‌افزار $SAGA$ و $ArcGIS$ محاسبه و استخراج نمودند. جهت ایجاد ارتباط بین شوری خاک و متغیرهای کمکی از مدل رگرسیون درختی و شبکه عصبی بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی با $(0/0, 83/0, 190/0, 36)$ به ترتیب برای ضریب تبیین، میانگین خطا و میانگین ریشه مربعات خطا دارای دقت بیشتری نسبت به رگرسیون درختی برای پیش‌بینی خاک می‌باشد.

پژوهشگران بسیاری در نقاط دنیا اقدام به تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، تکنیک‌های زمینی، رادیومتری بر اساس همبستگی بین انعکاس‌های مربوط به حضور نمک و شاخص‌های شوری خاک نمودند. آلبدوکومار^۱ (۲۰۱۴) باند ۳ تصاویر ماهواره‌ای $IKONOS$ را برای مطالعه در منطقه عربستان انتخاب نمودند. با استفاده از شاخص شوری (SI) و داده‌های زمینی، مدل رگرسیون ساده خطی را اجرا و همبستگی معناداری بین شوری سطحی خاک و شاخص شوری (SI) به دست آوردند.

ال هارتی و رشید^۲ (۲۰۱۶) با استفاده از تصاویر سنجنده TM و سنجنده OLI در دشت تادلا^۳ در مرکز مراکش اقدام به تهیه نقشه شوری خاک نمودند. آن‌ها یک بازه ۱۳ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ را مورد بررسی و با تهیه مقادیر هدایت الکتریکی خاک منطقه، مدل‌های رگرسیونی را اجرا نمودند. در مرحله اعتبارسنجی مدل‌ها، ضریب تبیین R^2 از ۰/۵۵ تا ۰/۷۷ و ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) بین $1/0, 2 ds/m$ تا $2/35 ds/m$ به دست آمد. نقشه‌های خروجی، کاهش شوری در بازه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

¹ Allbed and Kumar

² ELHarti and Rachid

³ Tadla plain

آسفا^۱ و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی رابطه بین مقادیر شاخص‌های طیفی تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مطالعات میدانی (EC) در منطقه اتیوپی پرداختند. نتایج نشان داد که داده‌های سنجش‌ازدور در تهیه مدل‌ها و نقشه‌های شوری خاک بسیار مناسب است.

ازبدفتری و سونار^۲ (۲۰۱۶) به مطالعه شوری خاک در فلات سهان کشور ترکیه اقدام نمودند و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و در نظر گرفتن ۲ شاخص شوری و ۴ شاخص پوشش گیاهی و مقادیر هدایت الکتریکی خاک به تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از دو مدل رگرسیون SLR, MLR پرداختند. براساس نتایج مدل‌ها، بیشترین وابستگی مربوط به ۲۱ مارس به دست آمد که بر اساس آن نقشه شوری منطقه تهیه گردید.

جورجیا^۳ و همکاران (۲۰۱۷) روند تغییرات شوری خاک دریاچه نمک توز^۴ ترکیه را در یک بازه زمانی ۲۵ ساله از ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵ با توجه به مقادیر هدایت الکتریکی و شاخص‌های شوری تصاویر ماهواره‌ای لندست مورد مطالعه قراردادند و دو مدل رگرسیونی خطی و میانگین‌گیری وزنی را بر روی داده‌های سال (۲۰۰۲) اعمال نمودند. نتایج باداده‌های مرجع، مقایسه و منجر به رابطه آماری قابل‌پذیرشی بین شوری خاک و متغیرهای مورد بررسی گردید. علاوه برآن شاخص شوری SII نتایج بهتری از R^2 با مقادیر $0.93/83$ را برای دو مدل میانگین‌گیری وزنی و رگرسیون خطی ارائه نموده است.

پنگ^۵ و همکاران (۲۰۱۸) به برآورد شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست OLI و مطالعات میدانی در استان زینگ‌جینگ^۶ چین اقدام نمودند. با به کارگیری مقادیر هدایت الکتریکی ۱۵۰ نمونه خاک به بررسی رابطه همبستگی با استفاده از مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی (PLSR) و مدل (Cubist) پرداختند. میزان R^2 , RMSE, MAE, RPD در مدل Cubist ($3/15$ ، $3/76 dSm^{-1}$ ، $0/591/18 dSm^{-1}$) در حالی که مقادیر آن‌ها در مدل PLSR ($1/56$ ، $1/21 dSm^{-1}$) مناسب‌تر می‌تواند نسبت به مدل PLSR پیش‌بینی نماید.

ویتنی و همکاران^۷ (۲۰۱۸) با انتخاب داده‌های سنجنده مودیس^۸ و شاخص‌های EVI, NDVI, CRSI به بررسی شوری خاک در مرکز کالیفرنیا پرداختند. نتایج نشان داد، استفاده از داده‌های مودیس و به کارگیری شاخص‌های منتخب برای تخمین شوری سطح خاک با دقت قابل قبولی امکان‌پذیر می‌باشد.

یوولیو^۹ در سال (۲۰۱۸) با استفاده از تصاویر سنجنده OLI لندست ۸ و الگوریتم PLSR به تهیه نقشه شوری خاک در غرب ایالت جیلین^{۱۰} چین پرداختند. آن‌ها متغیرهای محیطی PH و EC خاک را اندازه‌گیری نمودند. نتایج نشان می‌دهد که دقت نقشه‌های شوری خاک به واسطه باندهای انعکاسی و شاخص‌های طیفی بهبود یافته است و روش PLSR در مدل سازی تخمین میزان شوری خاک توانمند است.

¹ Asfa

² Azabdafari and Sunar

³ Gorji

⁴ Tuz Lake

⁵ Peng

⁶ Xing Jiang Province

⁷ Whitney and el

⁸ MODIS

⁹ Yu and Liu

¹⁰ Jilin Province

در بسیاری از پژوهش‌های گذشته، شاخص‌های به کار گرفته شده از شش شاخص کمتر بوده است. در پژوهش حاضر افزون بر استفاده توأم از ۷ نمایه طیفی از دو تکنیک پایش انتقال طیفی تسلدکپ^۱ و آنالیز مؤلفه‌های اصلی^۲ نیز هم‌زمان استفاده شده است. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و قابلیت‌های آن از جمله، تهیه هم‌زمان داده‌های آن با انجام عملیات نمونه‌برداری خاک، وجود فناوری پیشرفته این ماهواره نسبت به سایر ماهواره‌های سری خود، بهبود نسبت سیگنال به نویز^۳ و افزایش تعداد آشکارسازها، بهبود بخشی کیفیت تصویر، قابلیت تفکیک مکانی، زمانی و طیفی مناسب کالیبرا سیون، خصوصیات بهتر پوشش، ویژگی طیفی (دارابودن باندهای مجزا در محدوده مرئی و مادون قرمز که بهترین محدوده برای مطالعات زمین‌های شور است) و در دسترس بودن داده‌ها از دیگر ویژگی‌های این پژوهش است.

در علوم جغرافیا، از شاخه آمار مکانی در زمینه پارامترهای اقلیمی (بارش، دما، رطوبت) پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است (نادیان و همکاران، ۱۳۹۷) اما کاربرد این شاخص در ژئومورفولوژی محدود است. در بررسی منابع قابل دسترس در مباحث خاک‌شناسی نیز تنها تعداد محدودی تحقیق جدید و مرتبط در کشور وجود دارد (هیو^۴، ۲۰۱۲).

هدف از این پژوهش، یافتن روشی است تا بتواند سریع و کم‌هزینه، تخمین شوری سطحی خاک را با استفاده از تلفیق باندهای ماهواره‌ای، شاخص‌های طیفی، انتقال طیفی تسلدکپ و آنالیز مؤلفه‌های اصلی در قالب روش‌های آماری با به کارگیری مدل‌های رگرسیونی و آمارفضایی در منطقه‌ای با اقلیم خشک و نیمه‌خشک تسهیل نماید. از سویی شناسایی و بررسی تغییرات شوری در یک بازه ۲۳ ساله از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با دقتی مناسب، برای برنامه‌ریزی مدیریتی بیابان‌زدایی و مدیریت این خاک‌ها در منطقه، جهت توسعه پایدار و بهبود شرایط محیطی کمک شایانی می‌کند. بدین منظور منطقه سبزوار به صورت، مطالعه موردی انتخاب گردید.

منطقه مطالعاتی

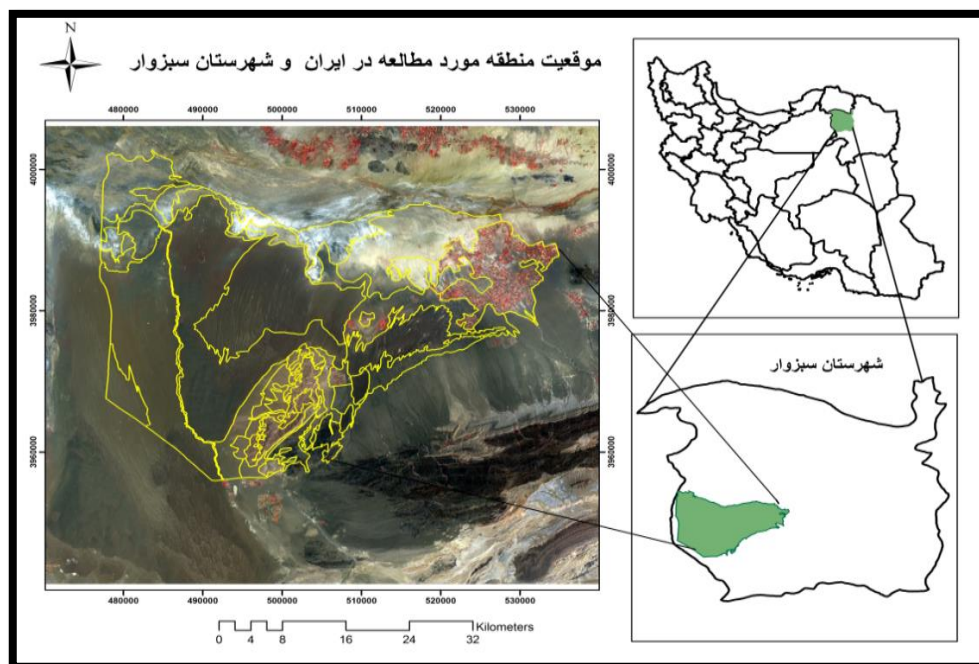
مساحت منطقه مورد مطالعه ۱۶۰۰۰۰ هکتار است که بین عرض شمالی ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه و ۷ ثانیه و ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه و ۴۹ ثانیه و طول شرقی ۵۷ درجه و ۲۳ دقیقه و ۱۵ ثانیه و ۵۶ درجه و ۴۵ دقیقه و ۱۵ ثانیه قرار دارد. از نظر تقسیمات سیاسی جزء استان خراسان رضوی و در غرب استان قرار دارد. متوسط بارندگی سالانه منطقه ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر متغیر است. دامنه تغییرات دما در منطقه انتخابی، بین ۱۵ تا ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد و دامنه تغییرات تبخیر از ۲۸۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌متر در سال متغیر است. بخش اعظم این منطقه در حوضه آبریز مرکزی واقع گردیده است. از نظر زمین‌شناسی منطقه عمدتاً شامل نهشته‌های دوران سوم و عصر حاضر می‌باشد که پلیوکواترن و کنگلومراهای باشیب کم را شامل می‌شود. براساس نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ منابع و قابلیت اراضی و نقشه ژئومورفولوژی، تپه‌های ما سه‌ای با وسعت ۵۳٪/۰۸ بیشترین سطح دشت را در بر گرفته‌اند.

^۱ Tassled Cap Transformation

^۲ Principal Components Analysis

^۳ Signal to Noise Ratio(SNR)

^۴ Huo



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد تحقیق

داده‌ها و روش تحقیق

پردازش اولیه داده‌های ماهواره‌ای

برای تهیه نقشه شوری خاک، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ سنجنده TM^۱ مربوط به ۳ آوریل ۱۹۹۵، داده‌های ماهواره‌ای لندست ۷ سنجنده ETM^{۲+} مربوط به ۲۷ می ۲۰۰۶ و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI^۳ در تاریخ ۱۹ نوامبر ۲۰۱۷ با مسیر ۱۶۱ و ردیف ۳۵ از سایت زمین‌شناسی ایالات متحده^۴ تهیه گردید. تصاویر هندسی بر روی تصاویر دو سنجنده TM,ETM⁺ در محیط نرم افزار ERDAS صورت پذیرفت. تصاویر رقومی سنجنده OLI لندست ۸، زمین مرجع^۵ بوده و نیازی به انجام تصحیح هندسی ندارند، ولی پردازش اولیه برای اصلاح مربوط به تغییر ولتاژ^۶ به DN^۷ برای تبدیل داده‌های رادیانس^۷، توسط فایل کالیبراسیون سنجنده و اصلاح رادیومتریک داده‌ها با استفاده از روش پهنه مسطح^۸ توسط ENVI5.1 صورت گرفت. درانجام پژوهش، از بسته‌های نرم‌افزاری ERDAS، GoogleEarth، ArcGIS 10.2.2، ENVI5.1^۹، IDRISI17، ENVI5.1، ERDAS، GoogleEarth، ArcGIS 10.2.2 متناسب با قابلیت هریک از آنها در هر مرحله استفاده

¹ Thematic Mapper(TM)

² Enhanced Thematic Mapper Plus(ETM⁺)

³ Operational Land Imager(OLI)

⁴ United State Geological Survey(USGS)

⁵ Geo Reference

⁶ Digital Numbers

⁷ Radiance

⁸ Flat Filed

⁹ Environment for visualizing images

گردید. برای انجام روش آماری به منظور تسهیل داده‌ها و پایگاه داده‌ها از نرم‌افزار Excel2010 و برای تحلیل آماری به روش آمار مکانی از نرم‌افزار ArcGIS10.2.2 و در آمار کلاسیک نرم افزار SPSS22 استفاده گردید.

پردازش ثانویه و استخراج خصوصیات طیفی تصاویر ماهواره‌ای

یک مجموعه باندی^۱ مجزا برای هر کدام از فرم‌های که تصحیحات اتمسفری، رادیومتری و هندسی بر روی آن‌ها انجام شده بود، ساخته شد و از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ برای تأیید مختصاتی آن‌ها استفاده گردید. در مرحله بعد، بارزسازی تصاویر با استفاده از نرم افزار ArcGIS10.2.2 با استفاده از تکنیک ترکیب رنگی کاذب^۲ انجام شد. از دو تکنیک پایش انتقال طیفی تسلدکپ و آنالیز مولفه‌های اصلی نیز هم‌زمان برای بارزسازی تصاویر استفاده شد. روش آنالیز مولفه‌های اصلی با همبستگی باندها، واریانس بین داده‌های اولیه را به حداقل می‌رساند و به چشم‌انداز یا مکان وقوع تصویر وابسته است. از آن‌جا که سه PC اولیه بخش زیادی از کل واریانس را تعریف می‌کنند و PC های بعدی نقش چشم‌گیری در توجیه واریانس ندارند در این پژوهش سه عامل اصلی اولیه (اول تا سوم) مدنظر قرار گرفت. مبانی تابع تبدیل تسلدکپ مشابه روش آنالیز مؤلفه اصلی است و برخلاف آنالیز مؤلفه اصلی مستقل از چشم‌انداز یا مکان وقوع تصویر است. این روش فراوانی داده‌های بین باندها را کاهش می‌دهد و بر اطلاعات مختلف در اجزای مشتق شده تاکید می‌کند. در این پژوهش پایش تغییرات بر اساس سه بخش روشی، سبزی‌نگی و رطوبت انجام گرفت.

فرآیند محاسبات شاخص‌های طیفی

تکنیک‌های سنجش از دور متعددی برای تخمین شوری خاک وجود دارد که شاخص‌های طیفی از جمله آن است. در پژوهش حاضر چهار شاخص شوری (EC, SI1, SI2, SI3)، سه شاخص پوشش گیاهی (SAVI, EVI, NDVI)، یک شاخص رو شنایی (BI)، سه مؤلفه اصلی (PCA1-PCA2-PCA3)، سه شاخص انتقال طیفی (Tasseledcap1-2-3) و باندهای (۴،۳،۲) سنجنده ETM⁺ و TM لندست ۵ و ۷، باند های (۵،۴،۳) سنجنده OLI تصاویر لندست ۸ استفاده شد. شاخص‌ها با استفاده از نرم افزار ENVI5.1 و با به‌کارگیری روابط تجربی که در جدول شماره (۱) آورده شده است، محاسبه و استخراج شدند. به‌طور کلی ۱۴ شاخص همراه خصوصیات طیفی ۹ باند تصاویر ماهواره‌ای همگی وارد مرحله تجزیه و تحلیل آماری شدند.

¹ Layerstack

² False Colour Composite

جدول ۱: شاخص‌ها، باندهای طیفی و نسبت‌گیری باندی مورد استفاده

منبع	نمایه	تعریف شاخص‌ها
<i>Electrical Conductivity</i>	<i>EC</i>	<i>Electrical Conductivity (ds/m)</i>
<i>Zarkotgadao and et(2005)</i>	<i>SI1</i>	<i>Salinity Index1 ($\sqrt{G} \times R$)</i>
<i>Zarkotgadao and et(2005)</i>	<i>SI2</i>	<i>Salinity Index2 ($\sqrt{G^2 + R^2 + NIR2}$)</i>
<i>Zarkotgadao and et(2005)</i>	<i>SI3</i>	<i>Salinity Index3 ($\sqrt{G^2 + R^2}$)</i>
<i>Gao(1996)</i>	<i>BI</i>	<i>Brightness Index ($\sqrt{R^2 + NIR2}$)</i>
<i>Rouse, J. WHass, R. HSchell, J. A(1973)</i>	<i>NDVI</i>	<i>Normalized Differential Vegetation Index ($NIR-R/NIR+R$)</i>
<i>Huete (1995)</i>	<i>SAVI</i>	<i>Soil Adjusted Vegetation Index ($NIR-R/NIR+R+L$)</i>
<i>Liu&Huete(1995)</i>	<i>EVI</i>	<i>Enhanced Vegetation Index EVI=(P*NIR-P*RED)/P*NIR+C1.P*RED-(C2.P*blue+L(1+L))</i>
<i>kari Pearson(1901)</i>	<i>PCA 1</i>	<i>Principal component 1 (دامنه بالاترین تغییرات)</i>
	<i>PCA 2</i>	<i>Principal component 2 (دامنه تغییرات بینابینی)</i>
	<i>PCA 3</i>	<i>Principal component 3 (دامنه پایین‌ترین تغییرات)</i>
<i>kauth&Thomas(1976)</i>	<i>TAS 1</i>	<i>TASSELED CAP1 (شفافیت خاک)</i>
	<i>TAS 2</i>	<i>(سبزی‌نگی پوشش گیاهی) CAP2 (Greenness, TASSELED)</i>
	<i>TAS 3</i>	<i>(روابط متقابل پوشش گیاهی و رطوبت خاک) TASSELED CAP3 (Wetness,</i>
<i>NASA (1995, 2006) Landsat 5 TM Landsat 7 ETM+</i>	<i>Band 2</i>	<i>۰/۵۲-۰/۶۰ (μm)</i>
	<i>Band 3</i>	<i>۰/۶۳-۰/۶۹ (μm)</i>
	<i>Band 4</i>	<i>۰/۷۵-۰/۹۰ (μm)</i>
<i>NASA (2017) Landsat 8 OLI</i>	<i>Band 3</i>	<i>۵۲۵-۶۰۰ (nm)</i>
	<i>Band 4</i>	<i>۶۳۰-۶۸۰ (nm)</i>
	<i>Band 5</i>	<i>۸۴۵-۸۸۵ (nm)</i>

در جدول NIR, Green, Red و Blue به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر هر پیکسل در بازتاب طول موج سبز، مادون قرمز نزدیک، قرمز و آبی می‌باشند (مأخذ: محمودآبادی و همکاران، ۱۳۹۶)

داده‌های زمینی

روش نمونه‌برداری صحرائی

پیمایش صحرائی و نمونه‌برداری از خاک منطبق با زمان اخذ تصاویر ماهواره‌ای (۱۹ نوامبر ۲۰۱۷) برداشت شد. در انتخاب نقاط نمونه برداری سعی بر این بود که این نقاط شاخص ویژگی‌های مورد مطالعه باشند لذا نقاط نمونه‌برداری در

واحدهای متفاوت ژئومورفولوژیک انتخاب گردید. انتخاب روش نمونه‌برداری در این مرحله نیز مورد توجه قرار گرفت. در این پژوهش با توجه به حجم و ماهیت داده‌ها، از روش نمونه‌برداری سامانمند استفاده شد. این روش مشمول دو مرحله است. ابتدا یک نمونه‌برداری تصادفی در شبکه‌های ۸۰۰ متری در داخل هر واحد کاری (نقشه ژئومورفولوژی) انجام شد. روش کار بدین صورت است که ابتدا به صورت تصادفی یک نقطه در داخل هرواحد مشخص گردید.

مختصات جغرافیایی نقطه موردنظر با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی^۱ ثبت شد، سپس این نقطه به‌عنوان مرکز یک دایره فرضی به شعاع ۳۰ متر لحاظ و در ۸ جهت متفاوت و به فاصله ۳۰ متری از نقطه مرکزی، مرکز دایره فرضی از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام شد. این نمونه‌ها در ۸ پیکسل اطراف نمونه اصلی بود. در مرحله آخر ۸ نمونه رابا نمونه مرکزی مخلوط کرده که وزنی به اندازه ۳-۲/۵ کیلوگرم از هر نقطه موردنظر برداشت شد. نمونه‌برداری با پراکنش مناسب در کل منطقه انجام گرفت. به‌طور کلی ۴۸ نمونه خاک تهیه و به آزمایشگاه خاک منتقل شد. در آزمایشگاه ابتدا نمونه‌ها کاملاً خشک و کوبیده شدند و پس از عبور از الک دو میلی‌متری هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع آن (EC) توسط دستگاه هدایت سنج اندازه‌گیری گردید، سپس ضرایب تصحیح حرارتی تعیین و نهایتاً هدایت الکتریکی نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$EC = Ect \times k \times Ft$$

EC: هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در درجه حرارت t و K = ضریب تصحیح الکتروود و Ft = ضریب تصحیح حرارتی می باشد.

طبقه‌بندی شوری خاک بر مبنای میزان قابلیت هدایت الکتریکی در این پژوهش منطبق با طبقه‌بندی استاندارد جهانی مندرج در جدول (۲) انجام پذیرفت.

جدول ۲: طبقه‌بندی شوری خاک بر مبنای واحدا اندازه گیری (EC)

دامنه EC (ds/m)	کلاس
0-2	فاقد شوری
2-4	شوری کم
4-8	شوری متوسط
8-16	شوری زیاد
16<	شوری بسیار زیاد

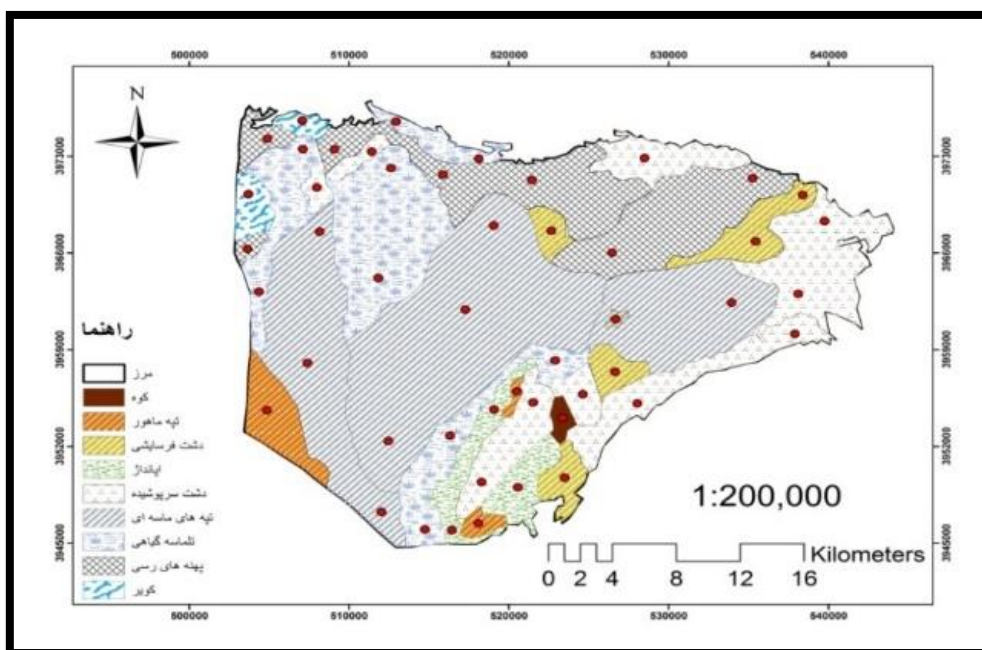
مأخذ: (از بدفتری و سونار، ۲۰۱۶)

نسبت جذب سدیمی (SAR) از فرمول زیر محاسبه گردید.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{Ca^{++} + Mg^{++}}/2}$$

که در این فرمول کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون و منیزیم محلول به روش شعله‌سنجی اندازه‌گیری و SAR محاسبه گردید. PH عصاره اشباع خاک با توجه به مزیت دستگاه PH متر نسبت به سایر روش‌ها از حیث سرعت و دقت، به روش الکترومتری و توسط PH متر دیجیتال تعیین گردید. کارهای آزمایشگاهی در موسسه تحقیقات آب و خاک سبزوار صورت گرفت.

¹ Global Position System(GPS)



شکل ۲: موقعیت نقاط نمونه برداری خاک سطحی در منطقه



شکل ۴: تصاویری از کارهای آزمایشگاهی در سبزوار



شکل ۳: نمای کلی از منطقه مورد مطالعه

جدول ۳: نتایج آنالیز نمونه‌های خاک

شماره نمونه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	EC	PH	S.A.R
۱	۰۳۵ ۴۸' ۵۲,۱۳"	۷۷", ۵۶ ۵۹' ۵۵	۰/۸۶	۷/۱۵	۶/۵
۲	۰۳۵ ۵۲' ۲۴,۸۵"	۰۵۷ ۰۲' ۳۱,۳۳"	۰/۸۹	۷/۲	۶/۷
۳	۰۳۵ ۵۰' ۲۳,۳۹"	۰۵۷ ۰۱' ۳۹,۳۹"	۰/۷۳	۷/۱	۵/۹
۴	۰۳۵ ۴۶' ۲۰,۱۷"	۰۵۷ ۰۷' ۰, ۲۵"	۰/۹۵	۷/۲۵	۶/۸
۵	۰۳۵ ۴۸' ۲۱,۷۳"	۰۵۷ ۰۸' ۴۳,۸۷"	۱/۰۵	۷/۳	۷/۷
۶	۰۳۵ ۴۷' ۵۱,۳۴"	۰۵۷ ۰۳' ۲۳,۱۰"	۱/۲۳	۷/۳۵	۷/۸
۷	۰۳۵ ۴۹' ۵۲,۹"	۰۵۷ ۱۲' ۵۸,۰۸"	۱/۸۹	۷/۵	۸/۴۵
۸	۰۳۵ ۵۱' ۲۴,۰۷"	۰۵۷ ۰۶' ۸,۴۴"	۲/۷۹	۷/۷	۸/۸۲
۹	۰۳۵ ۵۳' ۵۶,۸"	۰۵۷ ۰۷' ۵۲,۶۰"	۲/۷۵	۷/۶۵	۸/۵۰
۱۰	۰۳۵ ۴۵' ۱۹,۳۹"	۰۵۷ ۲۳' ۱۵"	۳/۵	۷/۸۵	۸/۸۰
۱۱	۰۳۵ ۴۵' ۴۹,۷۸"	۰۵۶ ۵۹' ۵۵,۷۷"	۱/۵۷	۷/۴	۸/۱
۱۲	۰۳۵ ۴۷' ۲۰,۹۵"	۰۵۷ ۰۰' ۴۷,۵۸"	۱/۹۲	۷/۵۵	۸/۳۷
۱۳	۰۳۵ ۵۶' ۲۸,۷۵"	۰۵۷ ۲۱' ۲۴,۰۸"	۲/۳۵	۷/۶	۸/۳۴
۱۴	۰۳۵ ۵۳' ۲۵,۶۳"	۰۵۷ ۱۴' ۳۹,۳۸"	۳/۳۸	۷/۸	۸/۷۳
۱۵	۰۳۵ ۵۹' ۳۱,۰۹"	۰۵۷ ۲۰' ۳۳,۴۸"	۳/۹	۷/۹۳	۹/۲۴
۱۶	۰۳۵ ۵۸' ۳۰,۳۱"	۰۵۷ ۲۲' ۱۴,۶۸"	۳/۸۲	۷/۹	۹/۱۱
۱۷	۰۳۵ ۴۶' ۵۰,۵۶"	۰۵۶ ۵۷' ۲۰,۳۴"	۴/۷۵	۸	۱۰
۱۸	۰۳۵ ۵۸' ۳۰,۳۱"	۰۵۷ ۱۷' ۱۱,۰۸"	۵/۸۳	۸/۳۵	۱۱
۱۹	۰۳۵ ۵۴' ۵۷,۵۸"	۰۵۷ ۱۹' ۴۲,۸۸"	۶/۳	۸/۲	۱۲/۱
۲۰	۰۳۵ ۵۷' ۵۹,۹۲"	۰۵۷ ۰۵' ۱۶,۶۳"	۴/۸۹	۸/۱	۱۲/۳
۲۱	۰۳۵ ۵۵' ۵۸,۳۶"	۰۵۷ ۱۸' ۵۲,۲۸"	۳/۷۶	۷/۸۸	۸/۹۰
۲۲	۰۳۵ ۵۱' ۵۴,۴۶"	۰۵۷ ۱۲' ۰۷,۴۸"	۴/۹۶	۸/۱۵	۹
۲۳	۰۳۶ ۰۳' ۴۴,۳۱"	۰۵۶ ۵۳' ۰۱,۲۹"	۵/۴۲	۸/۲	۹/۳۵
۲۴	۰۳۵ ۴۴' ۴۹	۰۵۷ ۱۰' ۲۶,۲۸"	۶/۰۴	۸/۳۱	۱۰/۲
۲۵	۰۳۶ ۰۱' ۱۲,۲۶"	۰۵۶ ۴۶' ۶,۸۱"	۴/۲۳	۷/۹۵	۸/۵۴
۲۶	۰۳۵ ۵۵' ۲۷,۹۷"	۰۵۷ ۱۸' ۰۱,۶۸"	۱/۶۳	۷/۴۵	۷/۲۰
۲۷	۰۳۵ ۵۳' ۲۶,۴۱"	۰۵۷ ۱۱' ۱۶,۸۸"	۱/۹۲	۷/۵۵	۷/۱۲
۲۸	۰۳۶ ۰۲' ۱۳,۰۴"	۰۵۶ ۴۹' ۳۴,۰۵"	۳/۴۱	۷/۸۲	۸/۷۸
۲۹	۰۳۵ ۴۷' ۲۰,۹۵"	۰۵۶ ۴۷' ۵۰,۴۳"	۳/۷۹	۷/۸۸	۸/۷۵
۳۰	۰۳۶ ۰۰' ۳۱,۸۷"	۰۵۶ ۵۸' ۱۲,۱۵"	۳/۸۳	۷/۹	۸/۹۷
۳۱	۰۳۵ ۵۳' ۵۶,۰۲"	۰۵۷ ۰۴' ۱۴,۸۲"	۳/۸۳	۷/۹	۸/۱۰
۳۲	۰۳۵ ۵۶' ۵۹,۱۴"	۰۵۷ ۱۳' ۴۸,۶۸"	۴/۷۸	۸/۰۵	۸/۹۶
۳۳	۰۳۵ ۵۲' ۵۵,۳۴"	۰۵۶ ۵۲' ۹,۴۸"	۴/۹۶	۸/۱۵	۹/۱۰
۳۴	۰۳۵ ۵۷' ۲۹,۵۳"	۰۵۷ ۱۵' ۲۹,۸۸"	۵/۴۳	۸/۲	۱۰/۱
۳۵	۰۳۵ ۵۴' ۲۷,۱۹"	۰۵۷ ۱۲' ۰۷,۴۸"	۶/۱۲	۸/۳۵	۱۱/۳۴
۳۶	۰۳۶ ۰۱' ۳۳,۶۵"	۰۵۶ ۴۸' ۴۲,۳۴"	۶/۲۴	۸/۴	۱۱/۳۷
۳۷	۰۳۶ ۰۵' ۱۵,۳۸"	۰۵۶ ۵۶' ۲۸,۵۳"	۶/۰۵	۸/۳	۹/۳۰
۳۸	۰۳۶ ۰۴' ۱۴,۶"	۰۵۶ ۵۹' ۰۳,۹۶"	۶/۳۴	۸/۴۵	۱۰/۱۲
۳۹	۰۳۵ ۴۹' ۲۲,۵۱"	۰۵۶ ۵۴' ۴۴,۹۱"	۵/۰۹	۸/۱۸	۹/۲
۴۰	۰۳۵ ۵۰' ۵۳,۶۸"	۰۵۶ ۵۵' ۳۶,۷۲"	۷/۲۴	۸/۵	۹/۵۰
۴۱	۰۳۵ ۵۹' ۰۰,۷"	۰۵۶ ۵۱' ۱۷,۶۷"	۱/۰۴ ۵	۶/۷	۸/۱۱
۴۲	۰۳۶ ۰۵' ۴۵,۷۷"	۰۵۶ ۵۰' ۲۵,۸۶"	۱/۰۸ ۸	۶/۵	۷/۲۲
۴۳	۰۳۶ ۱۰' ۰۷"	۰۵۶ ۴۵' ۱۵"	۲/۲۲ ۷	۶/۱	۷/۲۸
۴۴	۰۳۶ ۰۰' ۰۱,۴۸"	۰۵۷ ۱۱' ۱۶,۸۸"	۳۰/۱	۵/۸	۶/۵۹
۴۵	۰۳۶ ۰۲' ۴۳,۴۳"	۰۵۷ ۱۶' ۲۰,۴۸"	۳/۲۱ ۱	۵/۷	۶/۲
۴۶	۰۳۶ ۰۶' ۱۶,۱۶"	۰۵۷ ۰۹' ۳۵,۶۸"	۳۱/۴	۵/۱۵	۵/۸۵
۴۷	۰۳۶ ۰۴' ۴۴,۹۹"	۰۵۶ ۵۳' ۵۳,۱"	۳۲/۳	۵/۶	۶/۱
۴۸	۰۳۶ ۰۳' ۱۳,۸۲"	۰۵۶ ۴۶' ۵۸,۶۲"	۳۴	۵/۵	۶/۷۰

در منطقه مورد مطالعه، قابلیت هدایت الکتریکی بعضی از نقاط به بیش از ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر می‌رسد. PH خاک این منطقه دارای نوسان بسیار کم و عموماً مقدار آن بیشتر از ۷ است. نسبت جذب سدیمی (SAR) کمتر از ۱۳ است. بین PH و داده‌های سدیمی خاک رابطه مستقیمی وجود دارد (هر چه PH بزرگتر مقدار سدیم بیشتر می‌شود و بالا بودن مقدار سدیم باعث بالا رفتن مقدار SAR می‌گردد).

بحث و نتایج

جهت بررسی همبستگی داده‌های زمینی با داده‌های ماهواره‌ای، ارزش پیکسل‌های هر یک از باندهای تصاویر شاخص‌ها که متناظر با نقاط برداشت بودند میانگین‌گیری و ثبت شدند. به عبارتی دیگر جهت برازش مدل رگرسیونی نقاط نمونه برداری صحرائی بر روی تصاویر سه مؤلفه اصلی ($PC1, PC2, PC3$) حاصل از آنالیز مؤلفه اصلی و سه تابع تسلدکپ ($Tasseledcap1-2-3$)، تصاویر حاصل از سه شاخص شوری ($SI1, SI2, SI3$) و سه شاخص پوشش گیاهی ($SAVI, EVI, NDVI$) یک شاخص روشنایی (BI) مشخص گردید. مقادیر طیفی هر کدام بر اساس مختصات جغرافیایی هر نقطه در قالب جداول توصیفی استخراج و ذخیره شدند. جداول توصیفی منتج از مرحله قبل به محیط $EXCEL$ و سپس به محیط $SPSS$ منتقل گردید.

اعداد میانگین پیکسل‌ها برای مطالعه همبستگی و مدل سازی به‌عنوان متغیر مستقل (X) و مقادیر داده‌ها از زمین، مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی (EC) به‌عنوان متغیر وابسته (Y) در نظر گرفته شد. به عبارتی برای دستیابی به الگوریتمی که در مقایسه با مشاهدات میدانی و با توجه به دامنه پراکنش داده‌ها، از همبستگی و دقت بالاتری در تخمین شوری سطحی خاک برخوردار است، مقادیر محاسبه شده نمایه‌های طیفی منتخب در هر پیکسل به‌عنوان پارامترهای مستقل و مقادیر شوری سطحی خاک هر نقطه به‌عنوان پارامتر وابسته تعریف شدند. جهت بررسی شدت و ضعف وابستگی آماری و روابط بین شوری سطحی خاک (متغیر وابسته) با متغیرهای مستقل یا برآورد کننده پژوهش، از روش همبستگی چندگانه در شیوه کلاسیک استفاده شد و تغییرات متغیر وابسته از طریق متغیرهای مستقل برآورد و سهم هر یک از متغیرهای مستقل در بین متغیر وابسته، تعیین شد. در محیط $SPSS$ روش رگرسیون‌های چندگانه گام به گام ۱، پس حذف رو (پس‌رونده) ۲، پیش‌رو (پیش‌رونده) ۳، وارد شونده (اجباری) ۴ و عزل ۵، بر روی داده‌ها اعمال شد و بهترین مدل برازش یافته با بالاترین ضریب همبستگی و کمترین خطا انتخاب گردید. مدل‌های انتخابی از لحاظ اعتبار رگرسیونی، ضرایب رگرسیونی و ثابت بودن واریانس و نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها نیز در محیط $SPSS$ مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۴: برآورد میزان همبستگی شاخص‌های طیفی و (EC) خاک

شماره مدل	روش	ضریب همبستگی (R)	ضریب تبیین (R^2)	ضریب تبیین تعدیل شده (R^2)	مقدار آزمون (F)	سطح معناداری آزمون (sig)	جهت همبستگی
۱	Forward	۰/۴۸	۰/۲۳	۰/۲۱	۱۳/۹۶	۰/۰۰۱	مثبت
۲	Stepwise	۰/۴۸	۰/۲۳	۰/۲۱	۱۳/۹۶	۰/۰۰۱	مثبت
۳	Enter	۰/۸۴	۰/۷۱	۰/۶۲	۸/۱۲	۰	مثبت
۴	Remove	۰/۸۴	۰/۷۱	۰/۶۲	۸/۱۲	۰	مثبت
۵	Back ward	۰/۸۴	۰/۷۱	۰/۶۴	۱۰/۳۶	۰	مثبت

¹ Step wise

² Backward Elimination

³ Forward

⁴ Enter

⁵ Remove

همانطور که در جدول بالا ملاحظه می‌شود، ضرایب و نتایج مدل پیشرو مانند مدل گام‌به‌گام است. مقدار ضریب همبستگی پیرسون (R^1) در هر دو مدل برابر ۰/۴۸ است. مقدار R^2 برابر ۰/۲۳ است. این مقدار نسبتی از واریانس متغیر وابسته است که توسط متغیرهای مستقل تبیین شده است که مقدار چندان بالایی نیست. مقدار ضریب تبیین تعدیل شده برابر ۰/۲۱ است. میزان F دو مدل برابر ۱۳/۹۶ و احتمال معناداری آن‌ها برابر ۰/۰۰۱ است. مقادیر F نشان می‌دهد مدل رگرسیونی می‌تواند به‌طور معناداری تغییرات متغیر وابسته را پیش‌بینی کند.

در دو مدل وارد شونده و عزل نیز ضرایب و نتایج یکسان است. به‌طوری که ضریب همبستگی پیرسون در دومدل برابر ۰/۸۴ است و ضرایب تبیین و ضریب تبیین تعدیل شده آن‌ها برابر ۰/۷۱ و ۰/۶۲ است که رقم بالایی می‌باشد، مقدار آزمون F برابر ۱۳/۹۶ و سطح معناداری آن‌ها برابر صفر است که بیانگر معنادار بودن مدل رگرسیونی است. ضریب همبستگی پیرسون در مدل پس حذف رو ۰/۸۴ است که همبستگی بالایی را نشان می‌دهد. با توجه به این نکته که تنها توابعی جهت پیش‌بینی قابل اعتماد هستند که ضریب تبیین (R^2) مناسب و حداقل بالاتر از ۵۰ درصد داشته باشند. میزان ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل شده در این روش ۰/۷۱ و ۰/۶۴ است. مقادیر نشان می‌دهد که این مدل پیش‌بینی‌کننده خوبی برای متغیر وابسته است. میزان F مدل رگرسیون برابر ۱۰/۳۶ و احتمال معناداری (Sig^3) آن برابر صفر است. در بین ۵ مدل رگرسیونی مدل پس حذف نتایج بهتری را ارائه داده است.

جدول ۵: ضرایب رگرسیونی (وابسته‌ترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده‌ی متغیر پاسخ)

متغیرها	ضریب بتای استاندارد شده (β)	مقدار آزمون (t)	سطح معناداری (Sig)	ضریب تولرانس ($Tolerance$)	عامل تورم واریانس (VIF)
شاخص روشنایی	۰/۴۸	۳/۷۳	۰/۰۰۱	۱	۱
شاخص تسلدکپ ۲	۰/۵۱	۴/۰۹	۰	۰/۷۹	۱/۲۶

در جدول بالا نتایج نهایی مدل‌های آماری ارائه شده است. دو شاخص روشنایی و تابع تسلدکپ ۲ به‌عنوان موثرترین شاخص‌ها نسبت به دیگر متغیرها هستند که بیشترین رابطه را با متغیر وابسته دارند. ضریب بتای استاندارد شده، نشان‌دهنده تأثیرات خالص متغیرها بر متغیر وابسته است که در شاخص تسلدکپ ۲ مقدار آن ۰/۵۱ است که نسبت به شاخص روشنایی ۰/۴۸، مقدار آن بیشتر است. مقدار t و سطح معناداری آن نشان‌دهنده اهمیت نسبی حضور هر متغیر در مدل می‌باشد اگر قدر مطلق t بیشتر از ۲/۴۸۸ و سطح خطای آن کوچکتر از ۰/۰۱ و ۰/۰۵ باشد در نتیجه متغیر مورد نظر تأثیر آماری معناداری در تبیین تغییرات متغیر وابسته دارد که برای هر دو شاخص مقدار مناسبی را نشان می‌دهد. این دو شاخص طیفی، رابطه معناداری با EC خاک دارند. میزان ضریب تولرانس^۴، ۱ و ۰/۷۹ در این دو شاخص است که نشان از کم بودن هم‌خطی بین متغیرها دارد. عامل تورم واریانس^۵ که برای تعیین وجود هم‌راستایی چندگانه بین متغیرها استفاده می‌شود در محدوده ۱ است و نشان می‌دهد که هر متغیر پیش‌بینی‌کننده، به‌صورت خطی رابطه‌ای با سایر متغیرهای پیش‌بینی ندارد که در این پژوهش برای شاخص روشنایی ۱ و در تابع تسلدکپ ۲، ۱/۲۶ می‌باشد که مقادیر در هر دو شاخص در محدوده موردنظر قرار گرفته است.

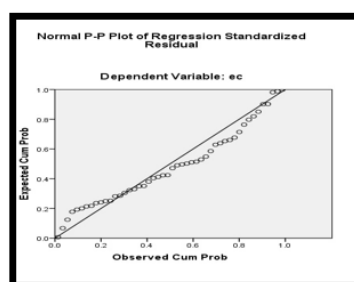
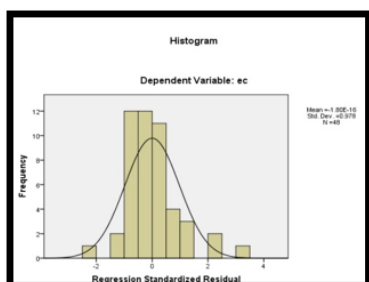
^۱ ضریب همبستگی پیرسون (R): هر چه قدر به ۱ و -۱ نزدیک تر باشد. شدت رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته شدیدتر است.

^۲ ضریب تبیین (R^2): هرچه ضریب تبیین به ۱ نزدیک تر باشد نشان‌دهنده موفقیت مدل در پیش‌بینی متغیر وابسته است.

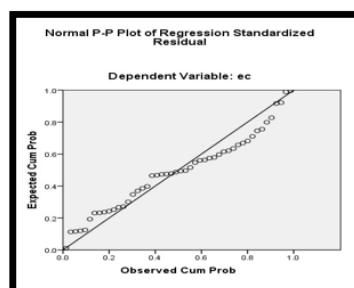
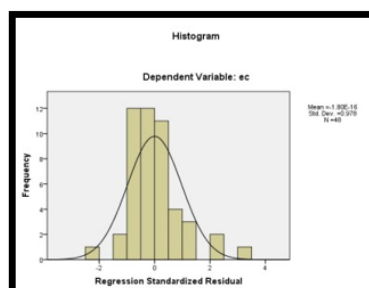
^۳ سطح معناداری (Sig) یا همان P-value: نشان‌دهنده معناداری رابطه بین دو متغیر است که اگر کمتر از ۰/۰۵ باشد. مدل رگرسیونی معنادار است.

^۴ ضریب تولرانس بین ۰ و ۱ در نوسان است بنابراین هر چه ضریب تولرانس به ۱ نزدیک باشد میزان هم‌خطی کمتر است.

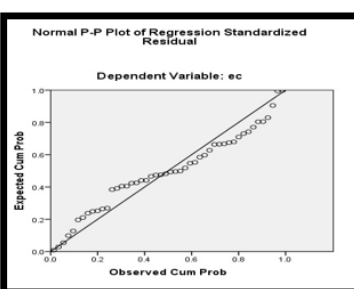
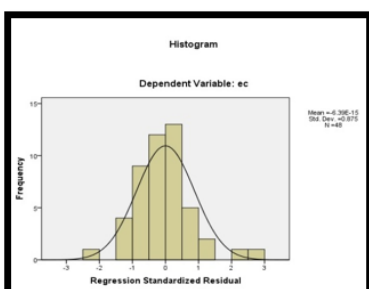
^۵ اگر عامل تورم واریانس بزرگتر از ۱۰ باشد نشانگر جدی بودن مشکل هم‌خطی است و این هم‌خطی اثر نامطلوبی بر تخمین‌گرها دارد به طوری که عامل، نباید داخل مدل رگرسیون قرار داده شود.



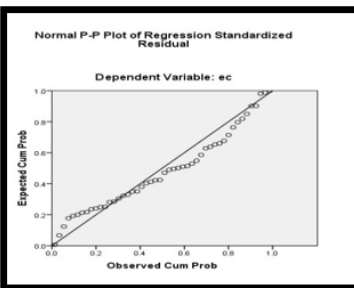
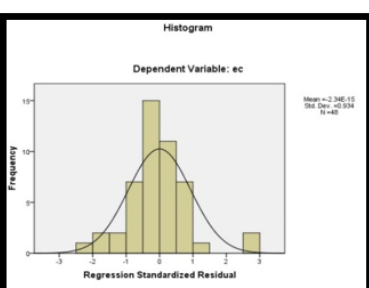
(روش پیشرو)



(روش گام به گام)



(روش وارد شونده)



(روش پس حذف رو)

شکل ۵: منحنی‌های برازش و هیستوگرام‌ها در هر مدل

در رگرسیون عزل^۱، در این مدل با توجه به ویژگی‌های این مدل، همه داده‌ها حذف شد و در این پژوهش، خروجی منحنی برازش و هیستوگرام ارائه نگردید.

¹ Remove

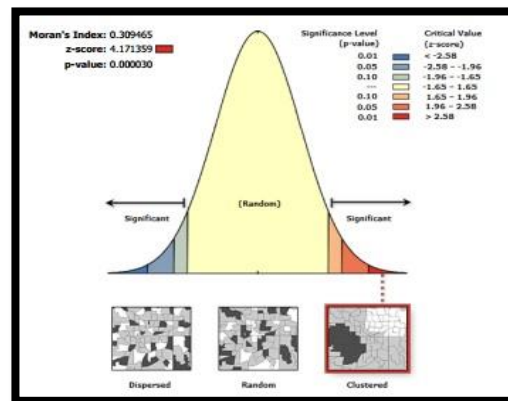
تحلیل فضایی داده‌ها

به‌منظور بررسی الگوی فضایی داده‌ها از همبستگی فضایی موران سراسری استفاده شده است. خروجی تحلیل خود همبستگی به دو صورت عددی و گرافیکی است. به‌طور کلی اگر ارزش شاخص موران در مورد الگوی فضایی هر متغیر نزدیک به ۱ مثبت باشد آن متغیر دارای خودهمبستگی فضایی و دارای الگوی خوشه‌ای است چنانچه ارزش شاخص موران نزدیک به یک منفی باشد آن گاه داده‌ها از هم گسسته و پراکنده هستند. (میتچل^۱، ۱۴:۲۰۰۵)، (ایلان^۲ و همکاران، ۱۸:۲۰۰۸) و (ویلر^۳ و همکاران، ۱۲:۲۰۰۹).

با مقدار (Z-Score) می‌توان درجه پراکنده بودن یا متمرکز بودن عوارض یا داده‌های فضایی را در فضا اندازه‌گیری نمود (عسگری، ۱۸:۱۳۹۰). به‌طور عمده همبستگی فضایی به مقادیر نمره Z بستگی دارد. در صورتی که مقادیر نمره Z مثبت و بالا به دست آید، خوشه‌بندی فضایی و دارای ارزش بالا هستند اما اگر نمره Z منفی و پایین به دست آید، خوشه‌بندی فضایی دارای ارزش پایین هستند (انسلین و همکاران^۴، ۷۴:۲۰۰۹). زمانی که مقدار P-Value بسیار کوچک و مقدار Z محاسبه شده (قدر مطلق آن) بسیار بزرگ باشد می‌توان فرضیه صفر را تأیید نکرد (عسگری، ۲۷:۱۳۹۰). در این پژوهش بررسی توزیع داده‌ها، درجه ارتباط و شدت همبستگی جغرافیایی (فاصله بین نقاط، طول مرز مشترک و گروه‌بندی جهت) میان مشاهداتی که در همسایگی هم قرار دارند با استفاده از شاخص موران^۵ و شاخص خوشه‌بندی حداقل - حداکثر در محیط Arc GIS 10.2.2 با فرآیند اقلیدوسی^۶ انجام شد (کتیس و آرد^۷، ۱۳۹۰).

جدول ۶: نتایج شاخص موران

0.309465	Moran's Index
-0.021277	Expect Index
0.006287	Variance
4.171359	Z-Score
0.000030	P-Value



شکل ۶: خروجی شاخص موران در مورد شدت همبستگی داده‌ها

¹ Mitchell

² Illian

³ Wheeler

⁴ Anselin et al

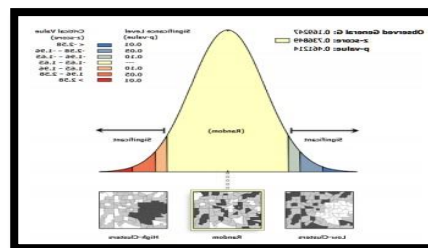
⁵ High/Low Clustering

⁶ Euclidean

⁷ Getis and Ord

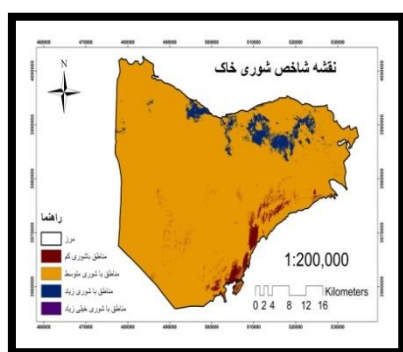
جدول ۷: نتایج روش حداقل- حداکثر

0.169247	High-Low clustering
0.149156	Expect General
0.000743	Variance
0.736849	Z-Score
0.461214	P-Value

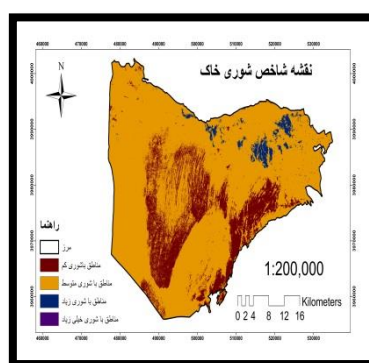


شکل ۷: خروجی روش حداقل- حداکثر در مورد شدت همبستگی مکانی داده‌ها

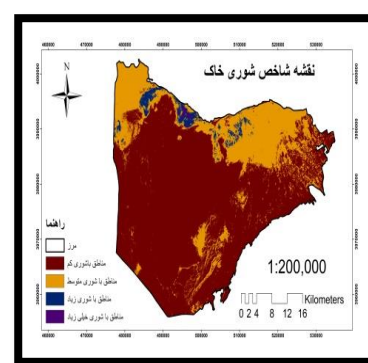
نتیجه بررسی همبستگی مکانی نقاط مشاهداتی در شکل (۷) و (۸) آورده شده است. شاخص موران برای توزیع فضایی داده‌ها $0/309465$ است که مقدار مناسبی را نشان می‌دهد. شاخص موران مورد انتظار $0/021277$ ، واریانس $0/006287$ ، آماره Z موران سراسری $4/171359$ و آماره P -Value $0/000030$ است. با توجه به مقدار بالای آماره Z^2 و ارزش P^2 بدست آمده که کمتر از $0/05$ است. همبستگی معناداری میان متغیرهای مستقل با وابسته در این روش وجود دارد. نتایج خروجی این شاخص، همبستگی مکانی و الگوی توزیع خوشه‌ای داده‌ها را تایید می‌کند از طرف دیگر با توجه به بزرگ بودن مقدار Z و کم بودن مقدار ارزشی P -Value می‌توان فرضیه نبود خود همبستگی فضایی را تأیید نکرد. ارزش شاخص حداکثر- حداقل برای توزیع فضایی داده‌ها $0/169247$ و شاخص حداقل- حداکثر مورد انتظار $0/149156$ ، واریانس $0/000743$ و آماره Z $0/736849$ و آماره P -Value $0/461214$ است. با توجه به پایین بودن مقدار Z و ارزش P به دست آمده که بیشتر از $0/05$ است. مدل به‌طور مناسبی قادر نیست، تغییرات متغیر وابسته را پیش‌بینی نماید. همان‌طور که در شکل (۸) در خروجی این شاخص دیده می‌شود. این روش، همبستگی مکانی و الگوی توزیع تصادفی بودن داده‌ها را نشان می‌دهد. در این پژوهش با استفاده از شاخص شوری، نقشه‌های طبقه بندی شده شوری خاک در سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۶، ۲۰۱۷ ارائه گردید.



(۲۰۱۷)



(۲۰۰۶)



(۱۹۹۵)

شکل ۸: نقشه شوری خاک در سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۶، ۲۰۱۷ در منطقه مورد مطالعه

^۱ بالا بودن مقدار Z نشان از همبستگی بالا دارد

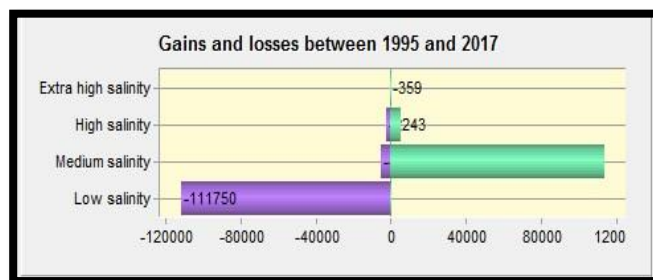
^۲ هر مقدار p -value کمتر از $0/05$ باشد میزان خطا کمتر و سطح اطمینان بالا است.

جدول ۸: مساحت طبقات شوری خاک از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷

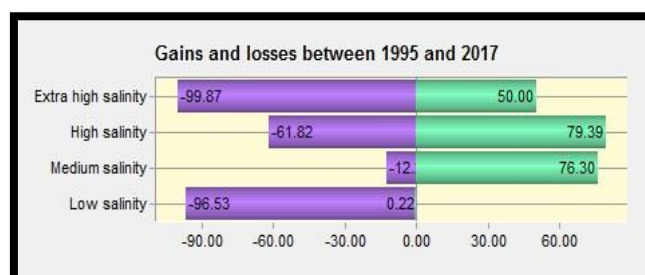
طبقات	سال ۱۹۹۵		سال ۲۰۰۶		سال ۲۰۱۷	
	مساحت هکتار	درصد	مساحت هکتار	درصد	مساحت هکتار	درصد
مناطق شوری کم با	۱۱۵۷۷۳/۰۶	۷۲/۳۵	۲۷۷۹۳/۴۲	۱۷/۳۷	۴۰۳۱/۹۹	۲/۵۱
مناطق شوری متوسط با	۴۰۳۱۶/۲۸	۲۵/۱۹	۱۲۸۴۵۱/۲۶	۸۰/۲۸	۱۴۹۳۲۵/۹۴	۹۳/۳۲
مناطق شوری بالا با	۳۶۲۷/۲۶	۲/۲۶	۳۸۳۳/۸۱	۲/۳۹	۶۷۱۹/۶۶	۴/۱۹
مناطق شوری بسیار بالا با	۳۵۹/۹۰	۰/۲۲	---	---	۰/۸۹	۰/۰۰۰۵

با استفاده از نرم افزار IDRISI17 مساحت شوری در هر دوره برآورد گردید. تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌ها به روشنی نشان می‌دهد، تغییرات شوری خاک از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ در منطقه مورد مطالعه، قابل توجه بوده است به نحوی که مساحت قابل توجهی از مناطقی با شوری کم که در گذشته بیشترین سطح منطقه را به خود اختصاص داده بودند، کاهش یافته و بر مساحت خاک‌های شور افزوده شده است. مناطقی با شوری کم در سال ۱۹۹۵ مساحت ۱۱۵۷۷۳/۰۶ هکتار معادل (۷۲/۳۵٪) از سطح منطقه را دارا بودند، در سال ۲۰۱۷ مساحت آن‌ها به ۴۰۳۱/۹۹ هکتار معادل (۲/۵۱٪) رسیده است. این امر نشان از کاهش قابل ملاحظه مساحت زمین‌های با شوری کم در حال حاضر دارد. مناطقی با شوری متوسط که در سال ۱۹۹۵ مساحت ۴۰۳۱۶/۲۸ هکتار معادل (۲۵/۱۹٪) را به خود اختصاص داده است، در سال ۲۰۱۷ به ۱۴۹۳۲۵/۹۴ هکتار معادل (۹۳/۳۲٪) را به خود اختصاص داده اند. هم‌چنین در سال ۱۹۹۵ مناطقی با شوری بالا که مساحت ۳۶۲۷/۲۶ هکتار معادل (۲/۲۶٪) از منطقه را در بر داشتند. در سال ۲۰۱۷ مساحت این مناطق به ۶۷۱۹/۶۶ هکتار معادل (۴/۱۹٪) رسیده است. نتایج نشان می‌دهد تقریباً کلیه خاک‌های منطقه مورد مطالعه دارای محدودیت شوری هستند اما مناطق بحرانی تهدید نمک در مرکز و به‌خصوص در نواحی غیرک شاورزی متمرکز است. مقایسه تصاویر ماهواره‌ای سال ۱۹۹۵ با سال ۲۰۱۷ و بازدیدهای میدانی افزایش سطح شوری در هر یک از واحدهای ژئومورفولوژیک منطقه را به‌وضوح نشان می‌دهد به نحوی که مخروط افکنه‌ها و پهنه‌های رسی که شرایط مناسبی در گذشته دارا بودند به دلیل گسترش شوری به‌خصوص در سال‌های اخیر از شرایط چندان مطلوبی برخوردار نیستند. محدوده پلایا (پهنه‌های رسی، نمکی) و گنبدهای نمکی منطقه که دارای شوری متوسط و گاهی بالایی در سال ۱۹۹۵ بوده‌اند. اکنون مساحت بیشتری از آن‌ها در طبقه‌ای با شوری بالا قرار گرفته است. روند شوری در بیشتر لندفرم‌های منطقه از شوری کم به متوسط و حتی شوری بالا تغییر نموده و سرعت تغییر نیز بسیار سریع بوده است. علاوه بر تهیه نقشه‌های شاخص شوری خاک، از ماژول LCM^۱ در نرم افزار IDRISI Selva برای نشان دادن افزایش و کاهش شوری نیز استفاده گردید.

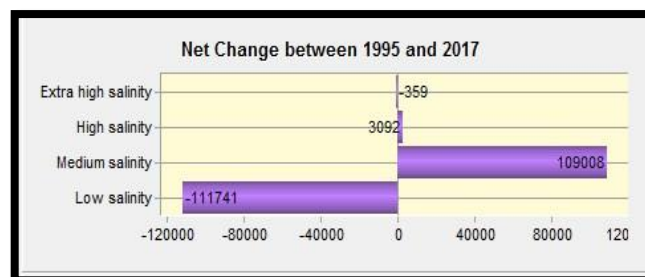
^۱ Land Change Modeler (LCM)



شکل ۹: نمودار افزایش/کاهش شوری طی سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۱۷ (درصد)



شکل ۱۰: نمودار افزایش/کاهش شوری طی سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۱۷ (هکتار)



شکل ۱۱: نمودار تغییرات خالص هر کلاس شوری (هکتار)

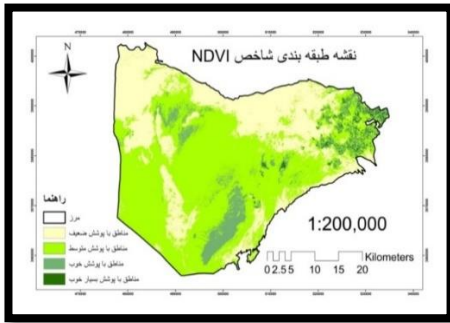
نمودارها روند افزایش، کاهش و تغییرات خالص شوری را به صورت (درصد و هکتار) به خوبی نشان می‌دهند. در سال ۱۹۹۵ بیش از ۷۰ درصد از مساحت منطقه دارای شوری کم بودند که در سال ۲۰۱۷ مساحت این اراضی به کمتر از ۱۰ درصد رسیده است. به طور کلی نتایج، کاهش ۱۱۱۷۴۱ هکتاری معادل (۹۶/۳۱٪) مناطق با شوری کم را نشان می‌دهد. افزایش ۱۰۹۰۰۸ هکتاری معادل (۶۴/۳٪) سطح شوری متوسط و افزایش ۳۰۹۲ هکتاری معادل (۱۷/۵۷٪) سطح شوری بالا، نشان از گسترش مناطق شور در بازه مورد مطالعه می‌دهد. از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ مناطقی با شوری بسیار بالا ۳۵۹ هکتار معادل ۴۶٪ کاهش داشته‌اند.

از آنجا که پوشش گیاهی هر منطقه تحت تاثیر شوری خاک قرار دارد و شوری بر نوع و تراکم پوشش گیاهی موثر است در این پژوهش، نقشه‌های سه شاخص مطرح پوشش گیاهی ($NDVI^1$, $SAVI^2$, EVI^3) نیز تهیه گردید.

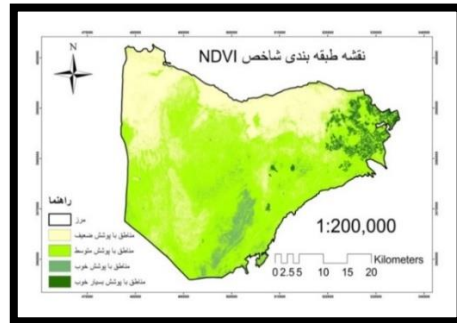
¹ Normalized DirfferentialVegetation Index

² Soil Adjusted Vegetation Index

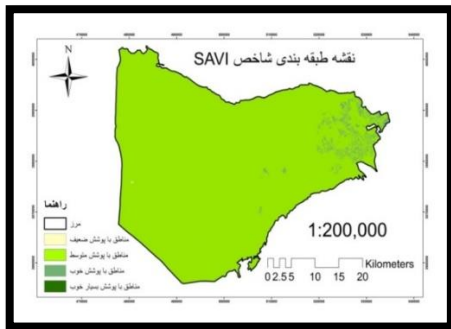
³ Enhanced Vegetation Index



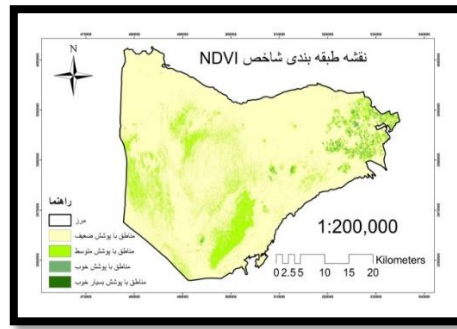
شکل ۱۳: نقشه طبقه‌بندی شاخص NDVI سال ۲۰۰۶



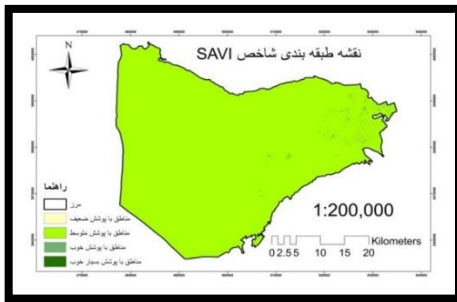
شکل ۱۲: نقشه طبقه‌بندی شاخص NDVI سال ۱۹۹۵



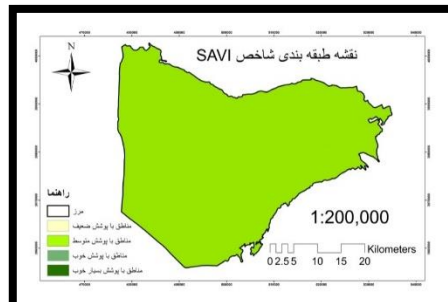
شکل ۱۵: نقشه طبقه‌بندی شاخص SAVI سال ۱۹۹۵



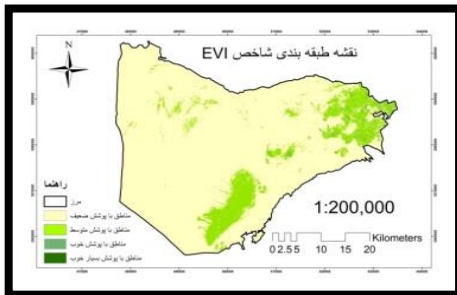
شکل ۱۴: نقشه طبقه‌بندی شاخص NDVI سال ۲۰۱۷



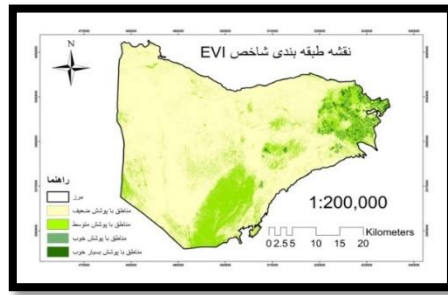
شکل ۱۷: نقشه طبقه‌بندی شاخص SAVI سال ۲۰۱۷



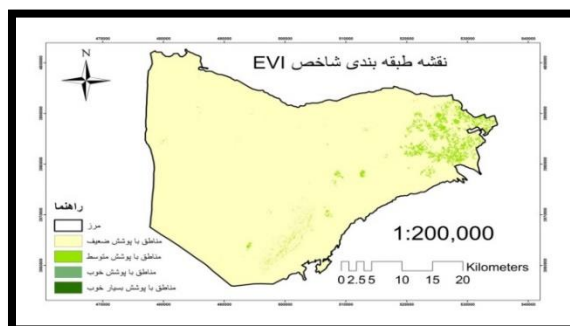
شکل ۱۶: نقشه طبقه‌بندی شاخص SAVI سال ۲۰۰۶



شکل ۱۹: نقشه طبقه‌بندی شاخص EVI سال ۲۰۰۶



شکل ۱۸: نقشه طبقه‌بندی شاخص EVI سال ۱۹۹۵



شکل ۲۰: نقشه طبقه‌بندی شاخص EVI سال ۲۰۱۷

نقشه‌های ارائه شده در سه شاخص پوشش گیاهی به‌خوبی روند کاهش پوشش گیاهی منطقه را از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ منعکس می‌نمایند. مقایسه بصری تصاویر شاخص پوشش گیاهی با تصاویر شاخص شوری نشان می‌دهد که در مناطق کاملاً شور، پوشش گیاهی بسیار ضعیف یا فاقد پوشش است و با افزایش شوری خاک از تراکم و میزان پوشش گیاهی نیز کاسته شده است.

نتیجه‌گیری

روش‌های مختلفی برای تخمین شوری خاک وجود دارد و تکنیک‌های متعدد دورسنجی در این زمینه گسترش یافته‌اند. این پژوهش به دنبال آن بود تا با یافتن ارتباطی بین داده‌های انعکاسی ماهواره لندست با شوری خاک، امکان تخمین شوری سطحی خاک را فراهم آورد. با استفاده از ۵ مدل رگرسیونی و ۱۴ شاخص به بررسی ضرایب همبستگی، ضرایب تبیین و سطح معناداری مدل‌ها پرداخته شد. نتایج مدل‌های آماری حاکی از آن است که تمامی مدل‌ها از واسنجی قابل‌پذیرشی برخوردار بودند. مطلوبیت مدل‌های معرفی شده را می‌توان ناشی از ضریب همبستگی مناسب از ۰/۴۸ تا ۰/۸۴ دانست. میزان (sig) به‌دست‌آمده در تمامی مدل‌ها کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد، لذا در سطح آماری، ۹۹/۹۵٪ همبستگی معناداری بین مقادیر (EC) و شاخص‌ها وجود دارد. ضریب همبستگی پیرسون در روش رگرسیون پس‌حذفی ۰/۸۴، ضریب تبیین و ضریب تبیین تعدیل شده آن ۰/۶۴ و ۰/۷۱ در صد و میزان آزمون (F) در این مدل ۱۰/۳۶ است. نتایج حاکی از مناسب بودن این روش نسبت به دیگر روش‌ها در این پژوهش است. شاخص روشنایی و تابع تسلدکپ ۲ با توجه به نتایج نهایی روابط رگرسیونی و مناسب بودن ضریب تولرانس در شاخص روشنایی (۱) و تابع تسلدکپ ۲ (۰/۷۹) و عامل تورم واریانس در شاخص روشنایی (۱) و تابع تسلدکپ ۲ (۱/۲۶) می‌باشد که این دو شاخص از دیگر شاخص‌ها، مطلوب‌تر هستند. در روش آمار مکانی، در خروجی‌های شاخص موران و شاخص حداقل-حداکثر، داده‌ها دارای خودهمبستگی فضایی هستند. نتیجه بررسی، توزیع نرمال بودن نقاط مشاهداتی و درجه همبستگی جغرافیایی بین آن‌ها و الگوی خوشه‌ای داده‌ها را در شاخص موران تایید می‌کند. نتایج با یافته‌های تحقیق، سلمان پور و همکاران (۱۳۹۴)، شورابه نادای زاده و همکاران (۱۳۹۷)، نادیان و همکاران (۱۳۹۷)، آلبد و کومار (۲۰۱۴)، جورجیا و همکاران (۲۰۱۷)، اسکودیرو و ویتنی (۲۰۱۸) همخوانی دارد.

نتایج تجزیه و تحلیل نقشه‌های شاخص‌های طیفی، افزایش مساحت خاک‌های شور را از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ طی ۲۳ سال گذشته نشان می‌دهند. از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷، ۱۱۱۷۴۱ هکتار (۹۶/۳۱٪) کاهش سطح شوری کم و ۱۰۹۰۰۸ هکتار (۶۴/۳٪) افزایش سطح شوری متوسط در منطقه رخ داده است.

نتایج این پژوهش امکان استفاده از داده‌های انعکاسی ماهواره لندست را به‌عنوان روشی غیرمستقیم و با دقت قابل‌قبول برای تخمین شوری خاک تایید می‌کند. در کنار کارآمدی رگرسیون چندگانه (کلاسیک) در این پژوهش، استفاده از

رگرسیون فضایی و رگرسیون وزن دار فضایی برای مطالعات آتی توصیه می‌شود. این مدل‌ها باتولید داده‌های فضایی این امکان را به وجود می‌آورند تا تغییر فضایی در روابط بین متغیرها، مورد بررسی قرار گیرد. بهره‌گیری از این رویکرد، می‌تواند گام نوینی در درک دقیق‌تر و علمی‌تر آن دسته از پدیده‌هایی که در بستر فضا رخ می‌دهند، باشد.

منابع

- اخضری، داود؛ می‌آبادی اسدی، احمد، ۱۳۹۵، تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از تحلیل طیفی داده‌های سنجنده *OLI* و داده های میدانی مطالعه موردی جنوب دشت ملایر، مجله سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال هفتم، شماره ۲، صص. ۸۷-۱۰۰.
- اژیرایی، رحیم؛ کامکار، بهنام؛ عبدی، امید، ۱۳۹۴، اثر شاخص‌های مختلف استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای لندست برای پهنه‌بندی شوری خاک در مزرعه نمونه ارتش گرگان، نشریه مدیریت خاک و توسعه پایدار، شماره ۱، صص. ۱۷۵-۱۸۰.
- اسفندیاری، فریبا؛ سرمستی، نادر؛ علوی‌پناه، کاظم، ۱۳۹۴، پایش نمک‌زارهای مناطق خشک با پردازش داده‌های ماهواره‌ای، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۴۰، صص. ۱۷۷-۱۵۱.
- تامس لیسلسند، مترجم المیریان، حمید، ۱۳۹۱، اصول و مبانی سنجش‌ازدور و تفسیر تصاویر هوایی و ماهواره‌ای، سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، تهران.
- رومیانی، مهدیه؛ کاظمی، آزاده؛ هادی‌پور، مهرداد؛ احمدی، حسن، ۱۳۹۶، بررسی شاخص‌های طیفی جهت مطالعه شوری خاک، کنفرانس ملی پژوهش‌های نوین در مهندسی کشاورزی، محیط‌زیست و منابع طبیعی، صص. ۱۰-۱۵.
- سلمان‌پور، آناهید، صالحی، محمدحسن؛ محمدی، جهانگرد، نادری، مهدی، ۱۳۹۵، کاربرد داده‌های ماهواره‌ای لندست در بررسی روند گسترش شوری اراضی کشاورزی حاشیه دریاچه بختگان استان فارس، نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، جلد ۶، شماره ۱، صص. ۱۷۷-۱۹۰.
- شورابه نادری زاده، سامان؛ کاکرودی عبداللهی، عطالله؛ سامانی، نجمه؛ مرادی‌پور، فاطمه، ۱۳۹۷، تحلیل تاثیر تغییرات دوره ای خطوط ساحلی در گسترش نمکزارهای حاشیه دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، صص. ۱۳-۲۹.
- عسگری، علی، ۱۳۹۰، تحلیل‌های آمار فضایی با *ArcGIS*، چاپ اول، انتشارات سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران.
- علوی‌پناه، سیدکاظم، ۱۳۹۴، اصول سنجش‌ازدور نوین و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.
- محمودآبادی، ابراهیم؛ کریمی، علیرضا؛ حق‌نیا، غلامحسین؛ عادل، سپهر، ۱۳۹۶، ارزیابی عملکرد رگرسیون چند متغیره، شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی ژن در تخمین برخی خصوصیات خاک، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، شماره ۲، صص. ۲۳-۴۴.
- مرادیان، شیرین، نبی‌اللهی، کمال؛ مهرجردی تقی زاده، روح‌الله، ۱۳۹۶، پیش‌بینی شوری خاک با استفاده از رگرسیون درختی و شبکه عصبی مصنوعی در منطقه قروه استان کردستان، نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، جلد ۷، شماره ۴، صص. ۱۱۵-۱۲۹.
- نادیان، مرضیه؛ میرزایی، روح اله، سلطانی محمدی، سعید، ۱۳۹۷، کاربرد شاخص خودهمبستگی فضایی موران در تحلیل فضایی - زمانی آلاینده‌ی (*PM2.5*) مطالعه موردی شهر تهران، مجله مهندسی بهداشت محیط، سال پنجم، شماره ۳، صص. ۱۹۷-۲۱۲.

- *Allbed, A., Kumar, L., Sinha, P., 2014. Mapping and modelling spatial variation in soil salinity in the Al Hassa oasis based on remote sensing indicators and regression techniques. n.11374-11574.*
- *Anselin, L., Syabri Kho, Y., 2009. GeoDa: an introduction to spatial data analysis. Geographical Analysis ISSN.0016-7363, united state.*
- *Asfaw, E. and Suryabagavan, K.v., Argaw, M., 2016. Soil salinity modeling and mapping using remote sensing and GIS: the case of Wonji sugar cane irrigation farm, Ethiopia, Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, pp. 1-22.*
- *Azabdaftari, A. and Sunar, F., 2016. Soil salinity mapping multitemporal land sat data, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, volume xl-B7, PP.809-813.*
- *Elhag, Mohamed., 2016. Evaluation of different soil salinity mapping using remote sensing techniques in arid ecosystem Saudi Arabia, J. Sens. 101155/2016/7596175, pp. 1-8.*
- *ELHarti, Abderrazak. and Lhissou, Rachid., Chokmani, Karem., Ouzemou, Jamal., Hassouna, Mohamed., Bachaoui, ELMostafa., Ghmari, Abderrahmene., 2016. Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla plain (Morocco) using satellite spectral indices, International Journal of Applied Earth – Observation and Geoinformation, volume 50. PP. 64-73.*
- *Getis, A., and Ord, J.K., 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics, geographical analysis vol: 24, Issue 3, pp. 189-206.*
- *Gorji, Taha., and Sertel Elif., Tanik, Aysegul., 2017. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions a case study from Turkey, Ecological Indicators, volume 74, pp. 384-391.*
- *Huo, X.N., and Lui, H., Sun, D.D., Zhou, L., Dand Li, B.G., 2012. Combination geostatistics with Moran's I analysis for mapping soil heavy metals in Beijing, China, International Journal of Environmental Research and Public Health, volume 9, Issue 3, PP.995-1017.*
- *Illian, J. and Penttinen Astoyan, H., Stoyan, D., 2008. Statistical analysis and modelling of spatial point pattern John Wiley and Sons, Chichester. Journal of Tropical Pediatrics. volume 55, Issue 1, Oxford University. pp. 1-69*
- *Jin, Pingbin. and Li, Pingheng., Wang, Quan., Pu, Zhi., 2015. Developing and applying novel spectral feature parameters for classifying soil salt types in arid land, Ecological Indicators, volume 54, pp. 116-123.*
- *Metternich, G. and Zinck, A., 2013. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. Journal Remote Sensing of Environment, volume 85, pp. 1-20.*
- *Periasamy, S. and Shanmugam, R.S., 2017. Multispectral and microwave remote sensing models to survey soil moisture and salinity. Land Degrad., 28, pp. 1412-1425.*
- *Mitchell, A., 2005. The ESRI guide to GIS analysis. vol 2, spatial measurements and statistics. ESRI: Redlands (CA), Amazon.*
- *Ping, Jie. and Biswas, Asim., Qingsong, Jiang., Ruiying, Zhao., Jie, Hu., Bifeng, Hu., Zhou, Shi., 2018. Estimating soil salinity from remote sensing and terrain data in southern Xinjiang province China, Geoderma. PP. 8-22.*
- *Rogerson, Peter. 2009. Statistical detection and surveillance of geographic clusters. C. Reprint, United State.*
- *Scudiero, Elia. and Skagges, Todd H., Corwin Dennis, L., 2018. Regional-Scale soil salinity assessment using Land sat ETM+ canopy reflectance, Journal Remote Sensing Environment, volume 169, pp. 335-343.*
- *Shoba, P. and Krishnan, Rama., 2016. Modeling the contributing factors of desertification and evaluating their relationships to the soil degradation process through geometric techniques, Soil Earth, 7, PP. 341-354.*

- Wheeler, Dand. and Paez,A., 2009. *Geographically weighted regression in fischer MM, Getis A(Eds)hand book of applied spatial analysis. heidelberg and NewYork. springer. Berlin, pp.461-486.*
- Whitney, Kristen. and Scudiero, Elia., El-Askary, Hesham., SkaggsTodd, H., Allali, Mohamed., Corwin Dennis, L., 2018. *Validating the use of MODIS time series fore salinity assessment over agricultural soils in California, USA, Ecological indicators, volume93, PP.889-898.*
- Wu, Weicheng. And Mhaimed, AhmadS., AlShafie Waleed, M., Ziadat, Feras, Dhehibi, Boubaker., Nangia, Vinay., pau, Eddy., 2014. *Mapping soil salinity changes using remote sensing in central Iraq.j geoderma Regional, volume 2-3, PP.21-31.*
- Yu,H, Liu, M,DuB. Wang Z, HuL, Zhang B, 2018. *Mapping soil salinity /sodicity by using land sat OLI imagery and PLSR algorithm over semi arid west Jilin province China, vloume 18(4).j sensore (Basel) pp.1-17*
- Yu, R.T. and Liu,Y., Xu,c., Zhu,Q., Zhang, Z.Qu., 2010. *Analysis of salinization dynamics by remote sessing in Hetao irrigation district of north china. Journal of Agricultural water management 97,pp.1952-1960.*