



برآورد شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های آزمایشگاهی منطقه موردی: شهرستان برخوار استان اصفهان

صیاد اصغری سراسکانرود^{۱*}، احسان توکلی^۲، بتول زینالی^۳، شیوا صفری^۴، الهام ملانوری^۵، ابوذر صادقی^۶

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲ دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

چکیده

شور شدن خاک‌ها و توسعه آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله مخاطرات محیطی است. هدف از پژوهش حاضر برآورد شوری خاک در یک دوره مشخص با استفاده از سنگش ازدور و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به سال‌های ۲۰۲۰ - ۲۰۱۴ و سنتینل ۲ مرتبط با سال ۲۰۲۰ در شهرستان برخوار استان اصفهان می‌باشد. پس از دانلود تصاویر و انجام تصحیحات لازم روی آن‌ها،

صیاد اصغری سراسکانرود^۱ (✉)، بتول زینالی^۲، احسان توکلی^۳، الهام ملانوری^۴، ابوذر صادقی^۵

۱. استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲. کارشناسی ارشد سنگش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۴. کارشناسی ارشد سنگش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

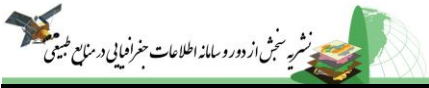
۵. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیلی، اردبیل، ایران

۶. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

Doi: 10.82447/girs.2025.902996

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: S.asghari@uma.ac.ir

شاخص‌های شوری ($NDSI$, SI_1 , SI , SI_2 , SI_3). شاخص پوشش گیاهی ($NDVI$)، شاخص روشنایی (BI) و شاخص‌های انتقال طیفی اجرا و نقشه‌های طبقه‌بندی در دو کلاس شوری و غیر شور با پیاده سازی الگوریتم SVM استخراج شدند. همچنین پیاده سازی شاخص‌های شوری به روش آستانه‌گذاری و انتخاب آستانه مناسب از طریق تکرار فرایند آستانه‌گذاری و نمودار هیستوگرام نیز صورت گرفت. طبق نتایج صحت سنجی، شاخص SI_3 اعمال شده بر روی تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰ و لندست ۸ سال ۲۰۱۴ به ترتیب با مقادیر ضریب کاپای ۰/۹۴، ۰/۹۶ و ۰/۸۷ نسبت به سایر شاخص‌ها دقت بیشتری را نشان داد؛ از طرفی نقشه‌های شوری استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ از دقت بالاتری نسبت به نقشه‌های به دست آمده از تصاویر لندست ۸ برخوردار بوده که می‌تواند به دلیل تفاوت در قدرت تفکیک مکانی دو سنجنده باشد. در این پژوهش ۳۴ نمونه خاک نیز جهت بررسی نرمال بودن با آزمون‌های آماری در محیط نرم‌افزار $SPSS$ بررسی شد و با استفاده از روش کوکریجینگ، درون‌یابی صورت گرفت. با مقایسه نتایج روش آستانه‌گذاری شاخص‌ها، مشخص شد شاخص‌ها با مقادیر بیشینه و کمینه $EC(dS/m)$ ۴۱/۳ و $EC(dS/m)$ ۲/۲۸ با نتایج زمین آمار همخوانی دارند و از دقت کافی جهت برآورد شوری خاک برخوردارند. بررسی شوری



خاک در منطقه مورد مطالعه طی بازه زمانی نشان می‌دهد شوری خاک روندی افزایشی داشته؛ که حدود ۳۶ درصد از اراضی فاقد شوری، دچار شوری شده است. بیشترین تغییر در میزان شوری مربوط به اراضی دارای شوری شدید بوده است. به‌طوری‌که حدود ۱۰۶۷ هکتار طی بازه زمانی مورد مطالعه دچار شوری شدید شده‌اند.

چکیده مبسوط

طرح مسئله: خاک برای زندگی ضروری است و برای حل چالش‌های زیست‌محیطی جهانی مثل غذا و امنیت آب، کاهش تغییرات آب و هوا و سازگاری و حفاظت از تنوع زیستی پایش ویژگی‌های خاک حیاتی است. انباشت نمک روی سطح خاک و یا در ناحیه ریشه موجب از دست رفتن باروری خاک می‌شود و خواص فیزیکی و شیمیایی خاک را تغییر می‌دهد. همچنین تأثیرات منفی بر عملکرد اکولوژیکی خاک می‌گذارد. در نتیجه غلظت بیش از حد نمک در خاک ممکن است منجر به رها کردن زمین‌های کشاورزی شود. به‌طورکلی شوری خاک از جمله قدیمی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی بوده و به عنوان یکی از هفت عامل اصلی بیابان‌زایی محسوب می‌گردد. افزایش روند شور شدن اراضی و تهدید بیابان‌زایی در ایران، کشوری که ابعاد آسیب‌پذیری آن بالا می‌باشد، خطرناک است. شناسایی دوره‌ای، بررسی و ارزیابی دقیق گستره و شدت شوری خاک برای مدیریت طرح‌های کشاورزی و بیابان‌زدایی بسیار حائز اهمیت است. مطالعات آزمایشگاهی متداول در مورد بررسی شوری خاک، نمونه‌های میدانی جمع‌آوری شده و آنالیز می‌شوند در نتیجه بسیار زمان‌بر و پرهزینه هستند. شوری خاک حتی در فواصل کوتاه بسیار متغیر است. بنابراین نمونه‌های خاک زیادی برای به ثبت تغییرات فضایی شوری خاک در یک منطقه وسیع مورد نیاز هستند. در چند دهه‌ی اخیر، از روش‌های زمین‌آمار و داده‌های سنجش از دور برای اندازه‌گیری و بررسی روند شوری خاک استفاده می‌شود. تصاویر ماهواره‌ای قابلیت ویژه‌ای در دستیابی اطلاعات از پهنه‌های مختلف حتی مناطق صعب‌العبور و توانایی بررسی تغییرات شوری در یک بازه زمانی دارد. از بزرگترین مزایای استفاده از این روش امکان بررسی مناطق دور دست می‌باشد.

هدف: اهداف اصلی این پژوهش برآورد شوری خاک با استفاده سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. و همچنین هدف دیگر

پژوهش بررسی روند تغییرات شوری خاک در بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۴ می‌باشد.

روش تحقیق: منطقه مورد مطالعه با وسعتی بالغ بر ۱۰۱۱۳ هکتار که با توجه به آخرین تقسیمات سیاسی استان اصفهان در دو شهرستان اصفهان و برخوار قرار گرفته است و در ۳۵ کیلومتری شرق شهر اصفهان قرار دارد. موقعیت منطقه در طول جغرافیایی ۲۹° و ۵۶' و ۵۱° تا ۳۰° و ۷' و ۵۲° شرقی و عرض جغرافیایی ۵۰° و ۲۳' و ۳۲° تا ۱۸° و ۵۵' و ۳۲° شمالی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر برای تخمین شوری خاک، ابتدا شاخص‌های شوری $NDSI$ ، SI_1 ، SI_2 ، SI_3 ، شاخص پوشش گیاهی ($NDVI$)، شاخص روشنایی (BI) و شاخص‌های انتقال طیفی با استفاده از نرم افزار $Envi 5.3$ و با به کارگیری روابط تجربی محاسبه و استخراج شدند. سپس کلیه شاخص‌ها به روش الگوریتم SVM طبقه‌بندی شدند و با اعمال صحت سنجی و ضریب کاپا بر کلیه طبقه‌بندی‌های صورت گرفته، بهترین شاخص در برآورد شوری خاک، مشخص شد. همچنین در این پژوهش ۳۴ نمونه خاک جهت بررسی نرمال بودن با آزمون‌های آماری در محیط نرم $SPSS$ بررسی شد سپس با استفاده از روش کوکریجینگ در نرم افزار $GIS10.5$ درونیابی صورت گرفت. سپس بهترین شاخص‌ها در برآورد شوری خاک به روش آستانه‌گذاری طبقه‌بندی شدند و با نقشه درونیابی تهیه شده، مقایسه شد. در نهایت با ارزیابی و تحلیل نقشه‌های طبقه‌بندی SVM بهترین شاخص‌ها و نقشه طبقه‌بندی بهترین شاخص‌ها به روش آستانه‌گذاری در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۴، روند شوری خاک طی بازه زمانی مورد مطالعه مشخص شد.

نتایج و بحث: ارزیابی نقشه‌های طبقه‌بندی شاخص‌های طیفی نشان می‌دهد که شاخص‌های SI_3 اعمال شده بر تصاویر لندست ۸، سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰ و لندست ۸ سال ۲۰۱۴ به ترتیب با مقدار ضریب کاپا ۰.۹۴۸۱، ۰.۹۶۰۵ و ۰.۸۷۸۳، دقیق‌ترین شاخص طیفی جهت برآورد شوری خاک می‌باشد در نتیجه شاخص SI_3 بهترین شاخص در برآورد شوری خاک در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۴ می‌باشد که دلیل آن استفاده این شاخص از دو باند سبز و قرمز می‌باشد زیرا در محدوده باند قرمز، پوشش گیاهی کمترین بازتاب را دارد و شوری دارای بیشترین بازتاب می‌باشد و به طور کلی خاک‌های شور در محدوده مرئی دارای بازتاب بالایی می‌باشند و همچنین نقشه‌های شوری استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ از دقت بالاتری نسبت

به نقشه‌های به دست آمده از تصاویر لندست ۸ می‌باشد. شاخص شوری SI_3 مربوط به ماهواره سنتینل ۲ به عنوان بهترین شاخص در برآورد شوری خاک در سال ۲۰۲۰، دارای مقدار ضریب کاپا ۰.۹۶۰۵ می‌باشند؛ در نتیجه ماهواره سنتینل ۲ به دلیل داشتن مقدار ضریب کاپا بالاتری نسبت به ماهواره لندست ۸ از دقت بالاتری در برآورد شوری خاک برخوردار می‌باشد البته دارای اختلافات جزئی می‌باشند که دلیل آن می‌تواند تفاوت در قدرت تفکیک مکانی این دو ماهواره باشد. با مقایسه نقشه طبقه‌بندی به دست آمده به روش آستانه‌گذاری شاخص‌ها، مشخص شد که شاخص‌ها با نتایج زمین آمار همخوانی دارد و شاخص‌ها از دقت کافی برای برآورد شوری خاک برخوردارند؛ بررسی نقشه طبقه‌بندی شاخص‌ها و بررسی نقشه درون یابی نشان داد بیشترین میزان درجه شوری خاک در بخش‌های میانی منطقه مورد مطالعه و کمترین میزان درجه شوری خاک در قسمت‌های جنوبی منطقه می‌باشد، همچنین خاک غیر شور در نواحی شمال شرقی و شرق منطقه می‌باشد. در نهایت طی بازه زمانی مورد مطالعه، حدود ۵۵۲ هکتار از اراضی فاقد شوری منطقه دچار شوری خاک شده‌اند و بیشترین تغییر در میزان شوری نیز مربوط به اراضی دارای شوری شدید بوده به طوری که حدود ۱۰۶۷ هکتار طی بازه

زمانی مورد مطالعه دچار شوری شدید شده‌اند. به‌طورکلی حدود ۳۶ درصد از اراضی فاقد شوری، دچار شوری شده‌اند.

نتیجه‌گیری: شاخص SI_3 ، بهترین شاخص جهت برآورد شوری خاک می‌باشد. بیشترین میزان شوری خاک در بخش‌های میانی و کمترین شوری خاک در بخش‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه می‌باشد همچنین اراضی فاقد شوری در بخش‌های شمالی، شرقی و جنوب شرقی منطقه پراکنده شده است. بررسی روند شوری خاک با استفاده از نقشه‌های طبقه‌بندی نظارت شده طی بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۴ مشخص شد که اراضی دارای خاک شور در منطقه مورد مطالعه دارای روندی افزایشی می‌باشد. به صورتی که حدود ۳۶ درصد از اراضی فاقد شوری، دچار شوری شده است؛ که اگر این روند شوری خاک ادامه پیدا کند، علاوه بر اراضی فاقد شوری داخل منطقه مورد مطالعه، تهدید جدی برای اراضی اطراف منطقه مورد مطالعه به‌خصوص اراضی کشاورزی می‌باشد.

واژگان کلیدی: شاخص پوشش گیاهی، شاخص شوری، شاخص روشنایی، کوکریجینگ، الگوریتم SVM.

لطفاً به این مقاله استناد کنید: اصغری سراسکانرود، صیاد، توکلی احسان، زینالی، بتول، صفری، شیوا، ملانوری الهام، صادقی، ابودر. (۲۰۲۵) برآورد شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های آزمایشگاهی منطقه موردی: شهرستان برخوار استان اصفهان. نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۶ (۴): ۱۱۱-۱۳۴.

مقدمه

شوری خاک که از آن با عنوان تخریب خاک نیز یاد می‌شود، یک تهدید بزرگ برای اکوسیستم‌های کشاورزی، تعادل اکولوژیک و توسعه پایدار در سراسر جهان بوده (۲۹) و بیش از ۱۰۰ کشور و منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۸). به‌طور کلی شوری خاک از جمله قدیمی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی بوده و به‌عنوان یکی از هفت عامل اصلی بیابان‌زایی محسوب می‌گردد (۱۴). انباشت نمک روی سطح خاک و یا در ناحیه ریشه خواص فیزیکی و شیمیایی خاک را تغییر می‌دهد (۲۰). شوری همراه با کاهش جذب آب و مواد مغذی ضروری از طریق ریشه‌های گیاه و افزایش غلظت یون‌های Na^+ و Cl^- و کاهش جذب مواد مغذی ضروری مانند کلسیم (Ca^{+2}) پتاسیم (K^+) همراه است (۳). این مسئله می‌تواند تأثیرات منفی بر عملکرد اکولوژیکی خاک داشته (۱۰) و منجر به از دست رفتن باروری خاک شود (۶). از طرفی شوری خاک تهدید جدی برای منابع آب و محیط‌زیست محسوب می‌شود (۵). این مسائل می‌تواند افزایش رهاشدگی زمین‌های کشاورزی را به دنبال داشته باشد. شوری خاک در مناطقی با آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک، تبخیر زیاد، سطح آب‌زیرزمینی کم عمق و محتوای نمک محلول در آب بالا (صالح)؛ و در حالت کلی تحت تأثیر عوامل مختلف طبیعی یا انسانی رخ می‌دهد. جهت مطالعات آزمایشگاهی متداول بررسی شوری خاک، نمونه‌های میدانی جمع‌آوری شده و آنالیز می‌شوند. از آنجایی که شوری خاک در فواصل کوتاه بسیار متغیر است، نمونه‌های خاک زیادی برای به ثبت تغییرات فضایی شوری خاک در یک منطقه وسیع جهت بررسی آزمایشگاهی مورد نیاز است (۱۸). در نتیجه، این روش بسیار زمان‌بر و پرهزینه است (۲۲). مطالعات شوری خاک با استفاده از سنجش از دور از نیمه دوم قرن بیستم شروع شده و تصاویر ماهواره‌ای با قابلیت ویژه در دستیابی اطلاعات از پهنه‌های مختلف، مناطق صعب‌العبور و دوردست و توانایی بررسی تغییرات شوری در بازه زمانی بخصوص مورد توجه محققین قرار گرفته است. بررسی مطالعات مختلف نشان می‌دهد؛ باندهای طیفی نور مرئی،

مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه برای ارزیابی شوری سطحی خاک استفاده می‌شود (۲۵). برخی از پژوهشگران، چندین شاخص شوری مانند شاخص نرمال‌شده شوری خاک را ارائه داده‌اند که برای تشخیص مستقیم شوری خاک به کار می‌رود؛ همچنین چندین شاخص پوشش گیاهی مانند شاخص نرمال‌شده پوشش گیاهی و شاخص تنظیم خاک و پوشش گیاهی به‌عنوان شاخص‌های غیرمستقیم شوری خاک توسط آن‌ها مطرح شده است (۲۲).

حبشی و همکاران (۱۱) در مطالعه‌ای به ارزیابی شوری خاک در شرق اصفهان بر پایه داده‌های سنجنده OLI و تجزیه و تحلیل عوارض توپوگرافی پرداختند. این محققان جهت رسیدن به اهداف تحقیق از تصویر سنجنده OLI و داده‌های زمینی؛ و همچنین از شاخص‌های شوری (SI_1 , SI_2 , SI_3)، شاخص‌های پوشش گیاهی ($NDVI$ و RVI)، شاخص روشنایی (SBI) و شاخص رنگ خاک (SCI) استفاده کرده‌اند. طبق نتایج این محققین سطح آماری ۹۹ درصد همبستگی معنی‌داری بین EC نمونه‌های خاک سطحی، ارتفاع از سطح دریا و باند ۴ (باند مادون قرمز با طول موج ۰/۶۷۳ – ۰/۶۳۶) مشاهده شده است. نقشه شوری به‌دست آمده میزان بالای شوری در منطقه را نشان داده به‌طوری‌که بیش از ۷۰ درصد از مساحت منطقه دارای غلظت نمک بیش از ۶۰ دسی‌زیمنس بر متر است. در پژوهشی امینی و همکاران (۴) پهنه‌بندی و روند شوری خاک را با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و آنالیزهای زمین‌آماري در منطقه شادگان خوزستان مورد مطالعه قرار داده‌اند. این محققین از تصاویر ماهواره‌ای لندست، TM و $ETM+$ و ۵۶ نمونه خاک؛ همچنین جهت تهیه نقشه شوری خاک از روش‌های زمین‌آماري، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA_{457} , PCA_{234} , PCA_{123} , $PCA_{1234567}$) و شاخص‌های BI , $NDSI$, SI , SI_1 , SI_2 , SI_3 استفاده کرده‌اند. طبق نتایج این تحقیق روش PCA_{123} ۶ از بالاترین میزان همبستگی با نقاط نمونه‌برداری برخوردار بوده است. بررسی روند شوری خاک نیز جایگزینی مناطق شوری متوسط

و زیاد توسط ارضی با شوری بسیار زیاد را نشان داده است. مومی‌پور (۲۲) بررسی تغییرات زمانی و مکانی شوری خاک شهرستان آباد در بازه ۲۴ ساله (۱۹۹۰-۲۰۱۴) را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ مورد مطالعه قرار داده است. این محقق از برداشت‌های زمینی در زمان گذر ماهواره از منطقه برای ارزیابی همبستگی رگرسیونی استفاده کرده؛ همچنین برای استخراج شوری خاک از شاخص‌های NDSI و SI و نسبت باندهای آبی به سبز استفاده کرده است. طبق نتایج این محققین شاخص شوری خاک SI بهترین انطباق را با واقعیت میدانی داشته است ($R^2=0.573$). کاهش شوری خاک در بیشتر مناطق شهرستان آباد در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه از نتایج دیگر این پژوهشگر است. کرم و همکاران (۱۳) در مطالعه‌ای به بررسی شوری خاک با استفاده از داده‌های دور سنجی و آمار مکانی در منطقه سبزوار پرداخته‌اند. این محققین از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ سنجنده ETM+ و OLI مربوط به سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۷ و ۴۸ نمونه میدانی از خاک منطبق با زمان اخذ تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرده‌اند. آن‌ها همچنین از شاخص‌های شوری (SI_1, SI_2, SI_3)، شاخص پوشش گیاهی ($SAVI, EVI, NDVI$)، شاخص روشنایی (BI)، مؤلفه اصلی (PCA_1, PCA_2, PCA_3) و شاخص انتقال طیفی برای بررسی شوری خاک بهره برده‌اند. سپس به بررسی رابطه همبستگی بین مقادیر EC با متغیرهای به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای پرداخته‌اند. طبق نتایج آن‌ها الگوی همبستگی مکانی در شاخص موران از الگوی خوشه‌ای و شاخص حداقل-حداکثر از الگوی تصادفی پیروی می‌کند و در سطح آماری، ۹۹.۹۵ درصد همبستگی معناداری بین مقادیر EC و شاخص‌ها وجود دارد؛ همچنین تجزیه و تحلیل نقشه‌های شوری خاک افزایش مساحت اراضی شور را در بازه زمانی مورد مطالعه نشان داده است. تقدسی و همکاران (۲۶) در مطالعه‌ای به ارزیابی و مقایسه پنج روش طبقه‌بندی نظارت‌شده (حداقل فاصله، ماکسلا نوبیس، متوازی‌السطوح، حداکثر احتمال و ماشین بردار پشتیبان) جهت تهیه نقشه درجات شوری خاک پرداخته‌اند. در این مطالعه،

تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، لندست ۸ و ۵۸ نمونه داده زمینی؛ همچنین شاخص‌های NDVI, EVI, SAVI, GDVI, LST, RVI, SI1, SI2, SI3, SI4, CRSI, NDSI (دمای سطح زمین) و DEM (مدل رقومی ارتفاعی زمین) مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داده، طبقه‌بندی به روش ماشین‌بردار پشتیبان با دقت کلی ۹۲٪ و ضریب کاپای ۸۹٪ از دقت بالایی جهت تهیه نقشه شوری خاک برخوردار است. آلب و همکاران (۲) در تحقیقی به ارزیابی تنش خاک مبتنی بر شوری خاک و شاخص‌های گیاهی پرداخته‌اند. این پژوهشگران برای رسیدن به اهداف تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای آیکونوس و از ۱۴۹ نمونه خاک؛ همچنین شاخص‌های شوری $SI-T, SI_1, SI_2, SI_3, SI_4, SI_5, SI_6, SI_7, SI_8, SI_9, SI_{10}, SI_{11}, SI_{12}$ ، شاخص پوشش گیاهی ($SAVI$ و $NDVI$) و شاخص روشنایی (BI) استفاده کرده‌اند. در میان شاخص‌های مورد بررسی، شاخص پوشش گیاهی ($SAVI$)، شاخص ($NDSI$) و شاخص شوری ($SI-T$) بهترین نتایج جهت ارزیابی شوری خاک اراضی کشت‌شده با پوشش گیاهی متراکم و یکنواخت و شاخص $SI-T$ همبستگی قابل توجه با شوری برای زمین‌های با پوشش گیاهی کم‌تر و فاقد پوشش گیاهی را نشان داده است. یلدریم و همکاران (۲۷) در پژوهشی به مقایسه شاخص‌های مختلف شوری خاک پرداخته‌اند. در این مطالعه از تصویر سنتینل ۲، ۷۰ نمونه خاک از منطقه مطالعاتی، شاخص‌های $SI_1, SI_2, SI_3, SI_4, SI_5, SI_6, SI_7, SI_8, SI_9, SI_{10}, SI_{11}, SI_{12}$ ، $CRSI, VSSI, NDSI, ASTER-SI$ طبق باندهای مرئی و مادون قرمز استفاده شده است. طبق نتایج این پژوهش شاخص‌های شوری خاک استخراج‌شده از باندهای مرئی، نتایج بهتری را در مقایسه با باندهای مادون قرمز جهت تشخیص شوری خاک، نشان داده است. گرجی و همکاران (۹) در مطالعه‌ای، شوری خاک دریاچه ارومیه را مبتنی بر شاخص‌های طیفی و اندازه‌گیری رسانای الکتریکی، مورد بررسی قرار داده‌اند. این محققین برای رسیدن به اهداف تحقیق از تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲، ۵۴ نمونه میدانی EC و شاخص‌های SI_1, SI_2, SI_3 استفاده کرده‌اند. آن‌ها همچنین تجزیه و تحلیل

لندست و سنتینل ۲ و در کنار آن مطالعات آزمایشگاهی با در نظر گرفتن نمونه‌های میدانی و داده‌های ویژه، همچنین به کار بردن برخی شاخص‌ها برای بار نخست، با بالاترین میزان همبستگی با مطالعه‌ی میدانی، می‌تواند به‌عنوان نوآوری پژوهش حاضر در نظر گرفته شود.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

براساس آخرین تقسیمات سیاسی استان اصفهان منطقه مورد مطالعه با توجه به شکل ۱ با وسعتی بالغ بر ۱۰۱۱۳ هکتار، در دو شهرستان اصفهان و برخوار و در ۳۵ کیلومتری شرق شهر اصفهان واقع شده است. موقعیت منطقه در طول جغرافیایی "۲۹° و '۵۶" تا "۳۰° و '۷" و ۵۲° شرقی و عرض جغرافیایی "۵۰° و '۲۳" تا "۳۲° و '۱۸" و ۵۵° شمالی قرار دارد (شکل ۱). اقلیم منطقه، خشک و بیابانی و متوسط بارندگی سالانه منطقه ۱۲۵/۶ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه آن ۱۶/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال به ترتیب مرداد و بهمن می‌باشد (۲۸).

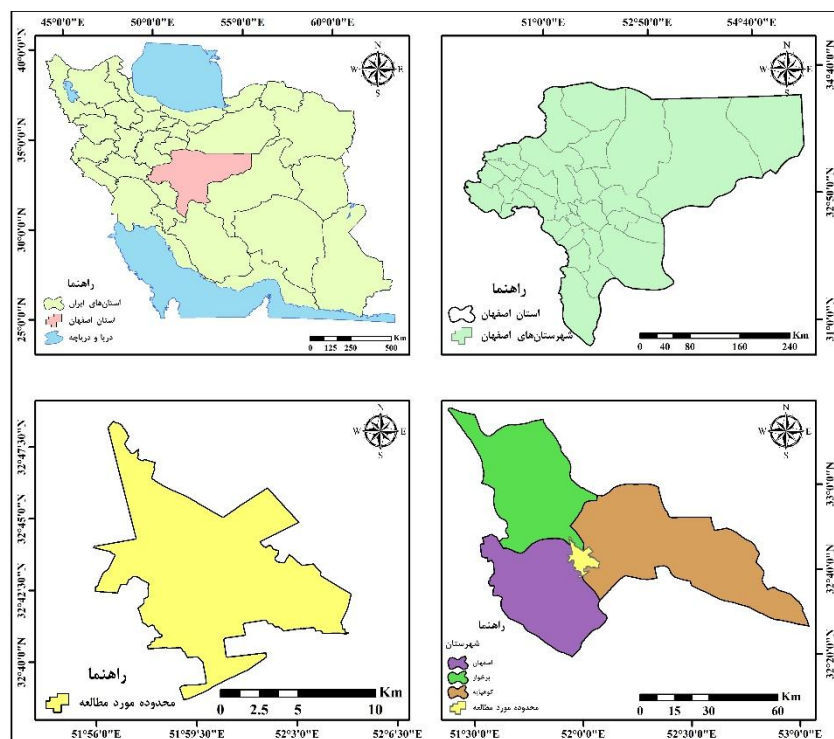
داده‌های مورد استفاده

در مطالعه حاضر جهت بررسی میزان شوری خاک در منطقه مورد مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، لندست ۸ (جدول ۱) استفاده شده است. پس از تهیه تصاویر، تصحیحات اتمسفری و هندسی در نرم‌افزار ENVI5.3 صورت گرفته و با استفاده از شاخص‌های شوری خاک، شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص روشنایی و شاخص‌های انتقال طیفی مقدار شوری خاک تخمین زده شد. در نهایت با استفاده از روش طبقه‌بندی SVM نقشه طبقه‌بندی شاخص‌ها تهیه گردید. از آنجایی که شوری خاک بحث بسیار پیچیده‌ای است صرفاً نمی‌شود به نتایج مطالعات تصاویر ماهواره‌ای اکتفا کرد؛ بر همین اساس مطالعه آزمایشگاهی نیز صورت گرفت. به همین جهت پس از برداشت نمونه‌های میدانی و انتقال آنها به آزمایشگاه، شوری خاک با پارامترهای

رگرسیون خطی چندگانه و خطی را برای بررسی همبستگی داده‌های EC با مقادیر شاخص طیفی خاک حاصل از باندهای مرئی تصویر ماهواره‌ای اعمال کرده‌اند. طبق نتایج این پژوهش شاخص‌های شوری خاک، مقدار شوری خاک را با دقت قابل قبولی ($R^2 = 0/73, 0/74$) تخمین زده و تحلیل رگرسیون خطی چندگانه با استفاده از هر دو ماهواره، با مقادیر ۷۷٪ و ۷۵٪ در مقایسه با رگرسیون خطی دقت بیشتری را نشان داده است.

بخش زیادی از خاک ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع شده و از طرفی مدیریت ناکارآمد و سایر عوامل انسانی منجر به تهدید اراضی کشاورزی توسط شوری خاک شده است. اراضی خاک شور در ایران با درجات مختلف مساحتی معادل ۵۵/۶ میلیون هکتار (۳۴ درصد مساحت کل کشور) را در برمی‌گیرند (۱۹). افزایش روند شوری و تهدید بیابان‌زایی در کشوری مثل ایران با ابعاد آسیب‌پذیری بالا، خطرناک است. حدود ۱۴/۲٪ از سطح کشور به درجات مختلف شوری خاک دچار شده است که این رقم هر سال در حال افزایش است (۱۳)؛ بنابراین، شناسایی دوره‌ای، بررسی و ارزیابی دقیق گستره و شدت شوری خاک برای مدیریت طرح‌های مختلف کشاورزی و بیابان‌زدایی بسیار حائز اهمیت است (۲۴). منطقه مورد مطالعه نیز از اقلیم نیمه‌خشک سرد، نیمه‌خشک و یا نیمه بیابانی شدید برخوردار بوده؛ همچنین، به دلیل بارش کم و محدودیت‌های شرایط خاک مانند شوری، بافت خاک، وجود ماسه‌های روان و همچنین فرسایش، دارای پوشش گیاهی کم یا فاقد پوشش گیاهی است (۲۳)؛ بنابراین بررسی میزان و روند شوری خاک می‌تواند ضروری می‌باشد. طبق مطالعات صورت گرفته پیشرفت فراوان فناوری سنجش‌ازدور و امکان استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور بررسی شوری خاک به اثبات رسیده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد و مفید در این امر محسوب شود. با توجه به مطالب بیان‌شده هدف اصلی پژوهش حاضر برآورد شوری خاک با استفاده سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای است. همچنین، بررسی وضعیت شوری خاک در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۴ هدف دیگر این مطالعه است. استفاده از دو نوع تصویر ماهواره‌ای

مختلف استخراج شد. همچنین داده‌های زمینی با استفاده از روش کوکریجینگ در نرم افزار GIS10.5 درونیابی شده است. سپس نقشه زمین آمار داده‌های مربوطه به دست آمده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شهرستان اصفهان.

Fig 1. Location of the study area in Esfahan city

جدول ۱. مشخصات تصویر

Table 1. Image specifications

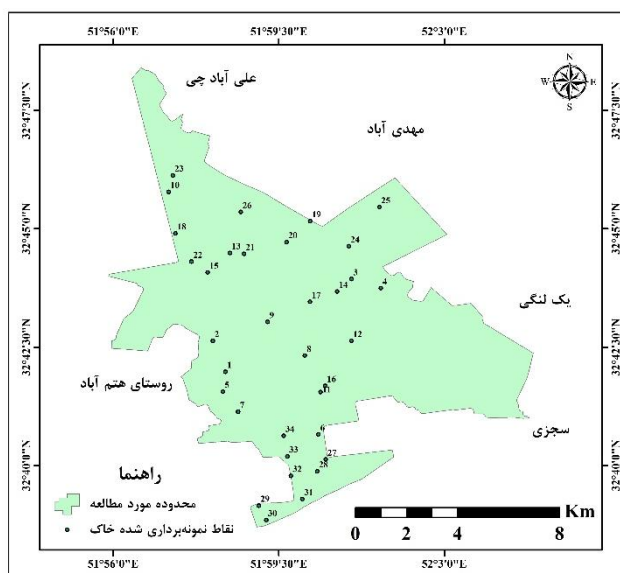
ردیف	ماهواره	سنجنده	زمان اخذ تصویر به میلادی	زمان اخذ تصویر به شمسی
۱	Landsat	OLI	۲۰۱۴/۹/۱۹	۱۳۹۳/۶/۲۸
۲	Landsat	OLI	۲۰۲۰/۹/۱۹	۱۳۹۹/۶/۲۹
۳	Sentinel	Sentinel-2A	۲۰۲۰/۹/۲۱	۱۳۹۹/۶/۳۱

مطالعات میدانی و جمع‌آوری

نمونه‌های خاک نمونه‌برداری اولین گام برای بررسی تغییرات در خواص خاک است. روش نمونه‌برداری به این صورت بود که ابتدا به صورت تصادفی یک نقطه مشخص شده و مختصات آن با استفاده از GPS ثبت گردید. سپس این نقطه به عنوان مرکز یک دایره فرضی به شعاع ۳۰ متر لحاظ شده و در ۸ جهت

متفاوت از این نقطه عمل نمونه‌برداری خاک از عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری انجام شد. توزیع جغرافیایی این داده‌ها در قالب نقشه در (شکل ۲) قابل مشاهده است. به طور کلی ۳۴ نمونه خاک در تاریخ ۱۳۹۹/۶/۲۷ برداشت شده و به منظور آنالیزهای مختلف در آزمایشگاه کاملاً خشک شدند. در ادامه نمونه‌ها کوبیده شده، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و جهت انجام آزمایشات

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه خاک شناسی
دانشکده منابع طبیعی (دانشگاه اصفهان) منتقل شدند. همچنین
در (شکل ۳) بازدید میدانی و نمونه‌برداری از محدوده مورد
مطالعه نمایش داده شده است.



شکل ۲. موقعیت نقاط نمونه برداری خاک سطحی در منطقه

Fig 2. Location of surface soil sampling points in the region



شکل ۳. نمای کلی از منطقه مورد مطالعه

Fig 3. Overview of the study area

هدایت الکتریکی (EC)

۱ که در این رابطه ECt نشان دهنده الکتریکی اندازه‌گیری شده (میکرو زیمنس بر سانتیمتر) در درجه حرارت، K ضریب تصحیح الکتروود و Ft ضریب تصحیح حرارتی است.

محاسبه شاخص‌های طیفی

در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل ترکیب پیچیده نوع خاک و پوشش گیاهی کم، احتمال استخراج اطلاعات صحیح را کاهش می‌دهد، از طرف دیگر با توجه به این که هر کدام از ویژگی‌های خاک بازتاب مخصوص به خود را دارند، استفاده از شاخص‌های طیفی مختلف، احتمال پیدا کردن شاخص طیفی مناسب که در برآورد شوری خاک موثرتر باشد را افزایش می‌دهد (۱۳). بر همین اساس در این مطالعه، از شاخص‌های طیفی متفاوت (جدول ۲) استفاده شده است تا به بهترین نتیجه برسد.

هدایت الکتریکی خاک نشان‌دهنده میزان کل املاح محلول در خاک بوده و در واقع معیاری برای تعیین شوری خاک است. از تمامی نمونه‌های خاک، گل اشباع تهیه شد و عصاره‌گیری با استفاده از دستگاه انجام گرفت. سپس هدایت الکتریکی هر نمونه با دستگاه هدایت‌سنج از عصاره‌ی اشباع خاک بر حسب میلی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری شد. در ادامه ضرایب تصحیح حرارتی بر اساس رابطه ۱ محاسبه شده و هدایت الکتریکی نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد اصلاح گردید (۲۱).

$$EC = EC_t \times k \times F_t$$

[1]

جدول ۲. شاخص‌های طیفی مورد استفاده برای استخراج شوری خاک

Table 2. Spectral indices used for soil salinity extraction

منبع	تعریف شاخص	شاخص
Khan, N.M.; Rastoskuev, V.V.; Sato, Y.; Shiozawa, S (2005) (18)	Salinity Index ($\sqrt{BLUE * R}$)	SI
Douaoui, A.E.K.; Nicolas, H.; Walter, C(2006) (10)	Salinity Index1 ($\sqrt{G * R}$)	SI ₁
Douaoui, A.E.K.; Nicolas, H.; Walter, C(2006) (10)	Salinity Index2 ($\sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2}$)	SI ₂
Douaoui, A.E.K.; Nicolas, H.; Walter, C(2006) (10)	Salinity Index3 ($\sqrt{G^2 + R^2}$)	SI ₃
Khan, N.M.; Rastoskuev, V.V.; Sato, Y.; Shiozawa, S (2005) (18)	Normalized Differential Salinity Index (R-NIR/R+NIR)	NDSI
Taghizadeh-Mehrjardi, R.; Minasny, B.; Sarmadian, F.; Malone, B(2014) (30)	Normalized Differential Vegetation Index (NIR-R/NIR+R)	NDVI

BI	Brightness Index ($\sqrt{R^2 + NIR^2}$)	Douaoui, A.E.K.; Nicolas, H.; Walter, C(2006) (10)
TAS ₁	TASSELED (خاک) شفافیت CAP1(Brightness)	Douaoui, A.E.K.; Nicolas, H.; Walter, C(2006) (10)
TAS ₂	TASSELED (گیاهی پوشش سبزیگی) CAP2(Greenness)	Douaoui, A.E.K.; Nicolas, H.; Walter, C(2006) (10)
TAS ₃	(روابط متقابل پوشش گیاهی و رطوبت خاک) TASSELED CAP3(Wetness)	Douaoui, A.E.K.; Nicolas, H.; Walter, C(2006) (10)

طبقه‌بندی تصاویر شاخص‌ها

در پژوهش حاضر جهت تهیه نقشه‌ی طبقه‌بندی شاخص‌های اعمال شده از روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) به دلیل دقت بالای این الگوریتم در استخراج نقشه‌ی طبقه بندی (۱۷) استفاده شده است. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان که توسط ولادیمیر واپکینگ در سال ۱۹۶۵ معرفی شده، یک طبقه بندی کننده دودویی است و بر مبنای نظریه‌ی یادگیری آماری بنا نهاده شده است. در این الگوریتم با ایجاد یک فراصفحه و استفاده از همه‌ی باندها نمونه‌هایی به دست می‌آید و مرز کلاس‌ها مشخص می‌شود و سپس یک مرز تصمیم گیری بهینه تعیین می‌شود (۱۶). اجرای الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) در نرم‌افزار ENVI5.3 اعمال شد. بر همین اساس، شاخص‌های طیفی با دو کلاس خاک شور و و خاک بدون شوری اجرا شدند.

ارزیابی صحت (Accuracy assessment)

پس از دانلود تصاویر، برای اعمال شاخص‌های مورد نظر تصحیحات اتمسفری با استفاده از روش FLASH و تصحیحات هندسی بر روی تصاویر انجام شد (شکل ۴) در ادامه جهت بررسی صحت طبقه‌بندی، دقت کلی و ضریب کاپا مورد بررسی قرار گرفت. در دقت کلی، مجموع پیکسل‌های طبقه‌بندی شده بر تعداد کل پیکسل‌ها تقسیم می‌شود و در ضریب کاپا، با

در نظر گرفتن پیکسل‌های طبقه‌بندی نادرست، دقت روش‌های طبقه‌بندی ارزیابی می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت ضریب کاپا از دقت کلی مهم تر است.

$$OA = \frac{\sum_{k=1}^N a_{kk}}{\sum_{i,k=1}^N a_{ik}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^N a_{kk} \quad [2]$$

در این رابطه؛ K شماره کلاس، OA نشان دهنده صحت کلی و N معرف تعداد کل پیکسل‌های طبقه‌بندی شده و نمایه مجموع پیکسل‌های قطر اصلی ماتریس خطا (تعداد کل پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده) است.

درون‌یابی

جهت تهیه نقشه درونیابی شوری خاک به روش زمین آمار ابتدا داده‌های حاصل از آنالیز آزمایشگاهی جهت بررسی نرمال بودن توسط نرم‌افزار SPSS 23 مورد ارزیابی قرار گرفت و داده‌هایی که نرمال نبودند به روش‌های استاندارد نرمال سازی شدند. سپس داده‌ها به روش کوکریجینگ، با کمک داده‌های EC درونیابی شدند و در نهایت نقشه زمین آمار داده‌های زمینی بدست آمد. روش کوکریجینگ یک حالت کریجینگ چند متغیره می‌باشد که بر اساس همبستگی موجود بین متغیر اصلی و سایر متغیرهای اندازه گیری شده که به اصطلاح به آن‌ها متغیر کمکی یا ثانویه می‌گویند، به تخمین متغیر مورد نظر می‌پردازد (۹). این ویژگی می‌تواند به تخمین‌های دقیق‌تر و صرفه جویی در هزینه‌ها (با

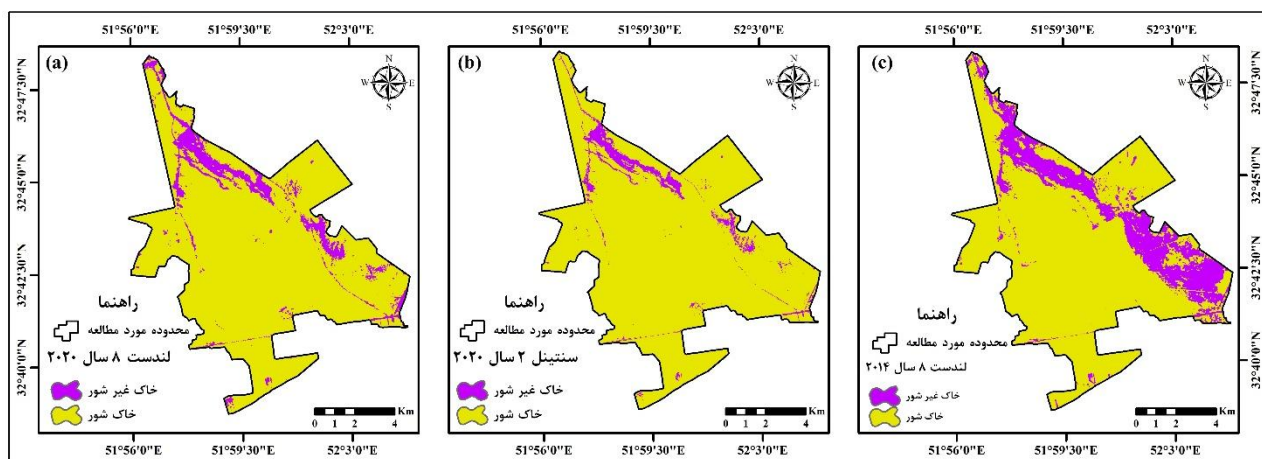
نمونه برداری کمتر) منجر شود (۱۵). در نهایت مقادیر واقعی و مقادیر برآورد شده با استفاده از معیارهای خطا، مقایسه می‌شوند. در این پژوهش جهت بررسی صحت روش دورنیایی از معیارهای خطای مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد متوسط (ASE)، خطای استاندارد شده میانگین (MSE) و خطای میانگین مربعات استاندارد شده (RMSSE) استفاده شده است. بدین صورت که مقادیر عددی مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای استاندارد شده میانگین (MSE) هرچقدر به صفر نزدیک‌تر باشد و از طرفی هرچقدر مقدار عددی خطای میانگین مربعات استاندارد شده (RMSSE) نزدیک به ۱ باشد، خطای روش مورد استفاده کمتر می‌باشد (۱۹). در این پژوهش آستانه‌ها با توجه به شاخص‌ها کاملاً متفاوت بوده است. برای مثال در بحث پوشش گیاهی آستانه‌های شاخص‌ها تقریباً یک آستانه ثابتی است مثلاً در شاخص NDVI یا EVI، در حالی که در بحث شوری خاک شاخص‌های مختلف، آستانه‌های کاملاً متفاوتی دارند، که این تفاوت آستانه‌ها در مطالعات بسیاری بحث برانگیز است.

نتایج

نتایج حاصل از طبقه‌بندی شاخص‌های طیفی به روش ماشین بردار پشتیبان

شکل (b) ۵ طبقه بندی تصویرسنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۰، با اعمال شاخص SI_3 را نشان می‌دهد. این شاخص، بیشتر اراضی خاک غیرشور را در شمال منطقه، بخشی از شرق و جنوب شرقی و بخش کوچکی نیز در جنوب منطقه مورد مطالعه استخراج کرده است. مساحت کلاس خاک غیرشور و خاک شور به ترتیب ۹۵۸ و ۹۱۵۵ هکتار برآورد شده است. در نتیجه اکثر اراضی منطقه مورد مطالعه بر روی تصویر سنتینل ۲ بصورت خاک شورشناسایی شده است. شکل (a) ۵ نقشه طبقه‌بندی شاخص SI_3 روی تصویر لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۰

می‌باشد. نتیجه این طبقه‌بندی نیز تجمع خاک غیرشور را در بخش‌های شمالی، بخش‌های شرقی و جنوب شرقی و قسمت کوچکی نیز در نواحی جنوبی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد؛ همچنین بخش‌های مرکزی و غربی و جنوبی منطقه مورد مطالعه به عنوان اراضی خاک شور توسط این شاخص شناسایی شده است. مساحت کلاس خاک غیرشور ۱۱۱۱ هکتار و مساحت کلاس خاک شور ۹۰۰۲ هکتار تخمین زده شده است. بنابراین تصویر ۲۰۲۰ لندست ۸ نیز اکثر اراضی منطقه را دربرگیرنده ی خاک شور نشان می‌دهد. نتیجه ی مقایسه نقشه های طبقه‌بندی شاخص SI_3 روی تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۰ نشان داده، اجرای شاخص SI_3 روی تصویر سنتینل ۲، اراضی خاک غیرشور را حدود ۱۵۳ هکتار کمتر و اراضی خاک شور را حدود ۱۵۳ هکتار بیشتر از اعمال شاخص SI_3 روی تصویر لندست ۸ تخمین زده که دلیل این اختلاف به احتمال زیاد می‌تواند ناشی از قدرت تفکیک مکانی متفاوت دو ماهواره و قدرت تفکیک مکانی بالای تصویر سنتینل ۲ باشد. شکل (c) ۵ مربوط به نقشه طبقه‌بندی شاخص SI_3 تصویر لندست ۸ سال ۲۰۱۴ می‌باشد. این شاخص اراضی خاک غیرشور را بیشتر در مناطق شمالی، شرقی و جنوب شرقی منطقه برآورد کرده است. مساحت کلاس‌های خاک غیرشور و خاک شور به ترتیب ۱۵۱۰ و ۸۶۰۳ تخمین زده شده است. با مقایسه نقشه‌های شکل ۵ به این نتیجه می‌رسیم که اراضی خاک غیرشور در سال ۲۰۱۴ نسبت به سال ۲۰۲۰ بیشتر می‌باشد که این اختلاف در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه در شکل‌های (a,b,c) ۵ مشهود است. شاخص SI_3 با استفاده از باندهای مرئی سبز و قرمز، توانسته خاک‌های شور و غیرشور را استخراج کند و بیانگر انعکاس بالای خاک شور در باندهای مرئی به خصوص باند قرمز می‌باشد که با نتایج زمینی و داده‌های تهیه شده از گوگل ارث همخوانی خوبی دارد.



شکل ۵. نقشه طبقه بندی شاخص SI_3 لندست ۸ سال ۲۰۲۰ (b): نقشه طبقه بندی شاخص SI_3 سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰ (c): نقشه طبقه بندی شاخص SI_3 لندست ۸ سال ۲۰۱۴.

Figure 5. (a) SI_3 classification map of Landsat 8 for the year 2020, (b) SI_3 classification map of Sentinel 2 for the year 2020, (c) SI_3 classification map of Landsat 8 for the year 2014

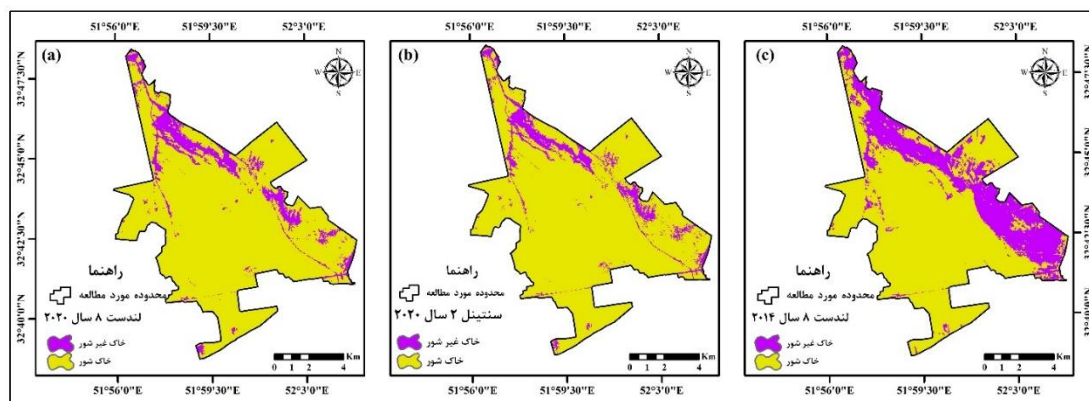
ترتیب ۱۶۱۹ و ۸۴۹۴ هکتار استخراج شده است. نتایج طبقه‌بندی شاخص SI و SI_3 با اختلاف جزئی مشابهت زیادی دارد. بنابراین به سختی می‌توان به صورت بصری تفاوت آنها را بیان کرد. دلیل این امر می‌تواند استفاده هر دو شاخص از باندهای مرئی باشد.

با توجه به شکل (b) ۷ که مربوط به نقشه طبقه‌بندی شاخص Wetness تصویر سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰ می‌باشد، اراضی غیرشور علاوه بر نواحی شمالی منطقه در قسمت‌های جنوبی و بخش کمی از مناطق مرکزی و شرقی منطقه مورد مطالعه شناسایی شده و مساحت کلاس های خاک غیرشور و شور به ترتیب ۲۱۱۹ و ۷۹۹۴ هکتار برآورد شده است. شکل (a) ۷ نیز مربوط به نقشه طبقه‌بندی شاخص Wetness تصویر لندست ۸ سال ۲۰۲۰ می‌باشد. طبق این نقشه اراضی خاک غیرشور در نواحی شمالی و جنوبی و بخش کمی از مناطق مرکزی و شرقی منطقه مورد مطالعه مشاهده شده و مساحت کلاس های خاک غیر شور و شور به ترتیب ۲۳۸۰ و ۷۷۳۳ هکتار می‌باشد. در مقایسه ی نتایج اجرای شاخص Wetness مربوط به تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰، این نتیجه برداشت می‌شود که

شکل (b) ۶ مربوط به اجرای شاخص SI روی تصویر سنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۰ می‌باشد. این شاخص مساحت کلاس های خاک غیرشور و شور را به ترتیب ۱۲۹۶ و ۸۸۱۷ هکتار استخراج کرده است. در نتیجه اکثر اراضی منطقه مورد مطالعه بصورت خاک شور شناسایی شده است. شکل (a) ۶ نیز نقشه طبقه‌بندی شاخص SI روی تصویر لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۲۰ می‌باشد. این شاخص تجمع خاک غیرشور را در بخش‌های شمالی، بخش‌های شرقی و جنوب شرقی و قسمت کوچکی نیز در نواحی جنوبی شناسایی کرده است. همچنین اراضی خاک شور نیز در بخش‌های مرکزی و غربی و جنوبی منطقه مورد مطالعه شناسایی شده است. بنابراین مساحت کلاس های خاک غیرشور و شور به ترتیب با مقادیر ۱۱۴۱ و ۸۹۷۲ هکتار، نشان دهنده ی شور بودن اکثر اراضی منطقه است. با مقایسه نقشه طبقه‌بندی شاخص SI مربوط به تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰، نتیجه این شد که شاخص SI مربوط به تصویر سنتینل ۲، اراضی خاک غیرشور را حدود ۱۵۵ هکتار بیشتر از تصویر لندست ۸ استخراج کرده است. شکل (c) ۶ مربوط به نقشه طبقه‌بندی شاخص SI تصویر لندست ۸ سال ۲۰۱۴ می‌باشد. مساحت کلاس های خاک غیرشور و شور به

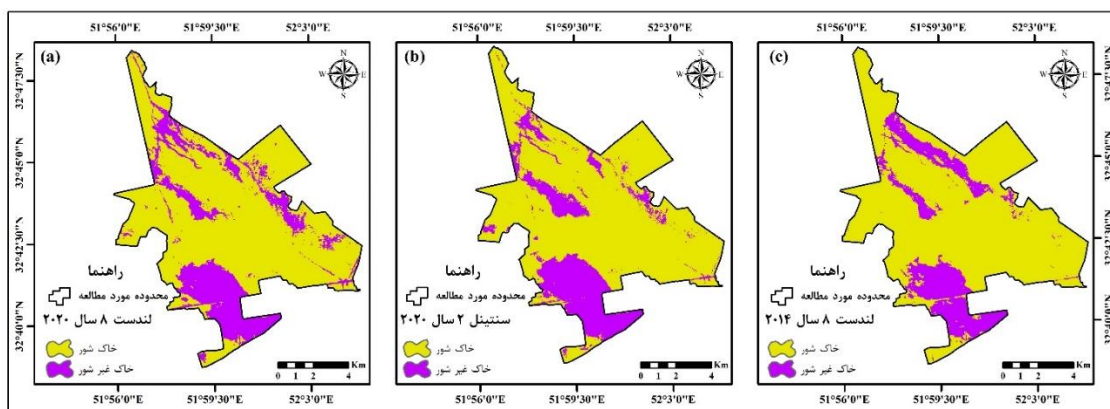
خاک‌ها می‌شود و منجر به استخراج خاک‌های غیر شور بیش از حد معمول شده است؛ به طوری که بخشی از محدوده کلاس خاک غیر شور که در نواحی جنوبی منطقه مورد مطالعه می‌باشد، دقیقاً منطبق بر محدوده اراضی با میزان شوری کم در نتایج زمین آماری داده‌های زمینی هستند که نشان از خطای این شاخص در استخراج خاک‌های غیر شور دارد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که شاخص SI_3 از ماهواره سنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۰، بیشترین محدوده از اراضی دارای خاک شور و شاخص Wetness مربوط به ماهواره لندست ۸ سال ۲۰۲۰، کمترین محدوده از اراضی دارای خاک شور را شناسایی و استخراج کرده است. با مقایسه این سه شاخص به این نتیجه می‌رسیم که اراضی خاک غیر شور در سال ۲۰۱۴ بیشتر از اراضی خاک غیر شور در سال ۲۰۲۰ بوده است.

اجرای شاخص Wetness روی تصویر سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰، اراضی خاک غیر شور را ۲۶۱ هکتار کمتر از اجرای شاخص روی تصویر لندست ۸ شناسایی کرده است که این اختلاف در قسمت‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه طبق شکل‌های (a,b) ۷ مشخص است. با توجه به شکل (c) ۷ که مربوط به نقشه طبقه‌بندی شده شاخص Wetness مربوط به تصویر لندست ۸ سال ۲۰۱۴ می‌باشد، اراضی غیر شور در نواحی شمالی، جنوبی و بخش کمی از مناطق مرکزی و شرقی منطقه مورد مطالعه وجود داشته و مساحت کلاس خاک غیر شور و شور به ترتیب ۲۱۱۸ و ۷۹۹۳ هکتار استخراج شده است. شاخص Wetness، از چندین باند به خصوص باند مرئی و مادون قرمز نزدیک برای استخراج انواع خاک‌ها استفاده کرده است که نتیجه آن بیشترین استخراج خاک غیر شور در بین همه‌ی شاخص‌های اعمال شده می‌باشد. علت این مساله می‌تواند استفاده از باند مادون قرمز نزدیک باشد چون در این باند پوشش گیاهی بازتاب بالایی داشته و باعث خطا در استخراج انواع



شکل ۶. نقشه طبقه بندی شاخص SI لندست ۸ سال ۲۰۲۰ (b): نقشه طبقه بندی شاخص SI سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰ (c): نقشه طبقه بندی شاخص SI لندست ۸ سال ۲۰۱۴

Figure 6. (a) SI classification map of Landsat 8 for the year 2020, (b) SI classification map of Sentinel 2 for the year 2020, (c) SI classification map of Landsat 8 for the year 2014



شکل ۷. نقشه طبقه بندی شاخص خیسى لندست ۸ سال ۲۰۲۰ (b): نقشه طبقه بندی شاخص خیسى سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰ (c): نقشه طبقه بندی شاخص wetness لندست ۸ سال ۲۰۱۴.

Figure 7. (a) Wetness index classification map of Landsat 8 for the year 2020, (b) Wetness index classification map of Sentinel 2 for the year 2020, (c) Wetness index classification map of Landsat 8 for the year 2014

نتایج صحت سنجی

دو باند سبز و قرمز می باشد زیرا در محدوده باند قرمز، پوشش گیاهی کم ترین بازتاب و شوری دارای بیش ترین بازتاب می باشد و به طور کلی خاک های شور در محدوده مرئی دارای بازتاب بالایی می باشند. از طرفی اجرای شاخص شوری SI_3 روی تصویر سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰ با مقدار ضریب کاپای ۰.۹۶۰۵، نشان دهنده ی عملکرد بهترین تصویر در برآورد شوری خاک می باشد. در نتیجه می توان به دقت بالای تصویر سنتینل ۲ در برآورد شوری خاک اشاره کرد؛ هرچند تفاوت چندانی با تصویر لندست ۸ نداشته و این اختلافات جزئی می تواند به دلیل تفاوت در قدرت تفکیک مکانی این دو ماهواره باشد.

جدول ۳ نتایج آزمون صحت سنجی طبقه بندی تصاویر شاخص های طیفی را به دو روش دقت کلی و ضریب کاپا نشان می دهد. با توجه به جدول، شاخص SI_3 اجرایی روی تصاویر لندست ۸ و سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰ به ترتیب با مقادیر ضریب کاپای ۰.۹۴ و ۰.۹۶ و دقت کلی ۹۷/۸۸، ۹۸/۴۱؛ تصویر لندست ۸ سال ۲۰۱۴، با مقدار ضریب کاپای ۰.۸۷ و دقت کلی ۹۴/۰۹، دارای بالاترین مقادیر ضریب کاپا و دقت کلی هستند؛ در نتیجه شاخص SI_3 بهترین شاخص در برآورد شوری خاک در سال های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۴ بوده که دلیل آن استفاده این شاخص از

جدول ۳. نتایج صحت سنجی شاخص های طیفی شوری خاک

Table 3. Validation Results of Soil Salinity Spectral Indices

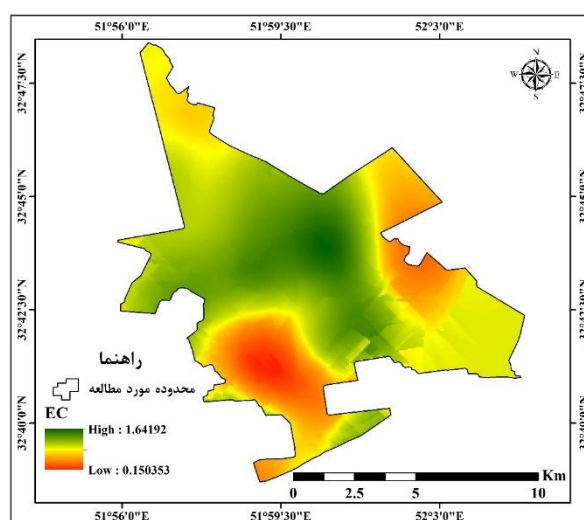
شاخص	لندست ۸ سال ۲۰۲۰	سنتینل ۲ سال ۲۰۲۰	لندست ۸ سال ۲۰۱۴		
SI	دقت کلی	ضریب کاپا	دقت کلی	ضریب کاپا	دقت کلی
					ضریب کاپا
SI_1	97.8836	0.9476	97.8836	0.9487	93.2489
SI_2	96.8254	0.9195	97.8836	0.9470	92.4051
SI_3	96.8254	0.9231	97.3545	0.9355	83.1224

0.8783	94.0928	0.9605	98.4127	0.9481	97.8836	NDSI
0.7881	89.873	0.7724	91.5344	0.7407	90.4762	NDVI
0.7977	90.2954	0.8772	95.2381	0.8184	93.1217	BI
0.5733	80.1688	0.9088	96.2963	0.8865	95.2381	Brightness
0.7988	90.2954	0.9476	97.8836	0.9355	97.3545	Greenness

نتایج حاصل از درونیابی داده‌های زمینی

درونیابی داده‌های زمینی به روش کوکریجینگ معمولی برای سال ۲۰۲۰ انجام شد که نسبت به بقیه‌ی روش‌های درونیابی از خطای کمتری برخوردار بود. شکل ۸ نقشه شوری خاک به روش کوکریجینگ را نشان می‌دهد. بیشترین درجه شوری خاک در قسمت‌های میانی منطقه و کمترین درجه شوری خاک در قسمت‌های جنوبی و شرقی دیده می‌شود؛ همچنین شوری خاک متوسط بیشتر در نواحی شمالی منطقه مورد مطالعه به چشم می‌آید.

خورد. معیارهای خطای به دست آمده از درونیابی در جدول ۴ ذکر شده است. با توجه به اینکه مقادیر عددی مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای استاندارد شده میانگین (MSE)، تقریباً نزدیک به صفر می‌باشد؛ از سوی دیگر، مقدار عددی خطای میانگین مربعات استاندارد شده (RMSSE) نزدیک به ۱، نقشه درونیابی از دقت بالایی در تخمین شوری خاک برخوردار بوده است.



شکل ۸. نقشه شوری خاک به روش کوکریجینگ برای سال ۲۰۲۰

Figure 8. Soil salinity map using the Kokriging method for 2020

جدول ۴. معیارهای خطای درونیابی شوری خاک به روش کوکریجینگ برای سال ۲۰۲۰

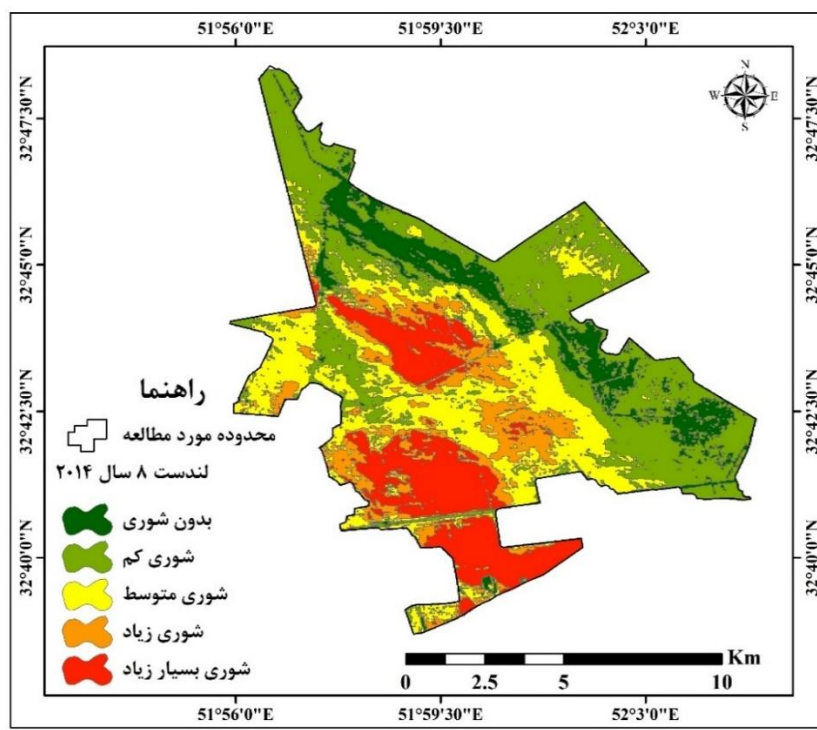
Table 4. Interpolation Error Metrics of Soil Salinity Using the Cokriging Method for the Year 2020

مقدار عددی	معیارهای خطا
0.1629	RMSE
0.9289	RMSSE
-0.0048	MSE
0.20	ASE

مقایسه نتایج شاخص‌ها و زمین‌آمار

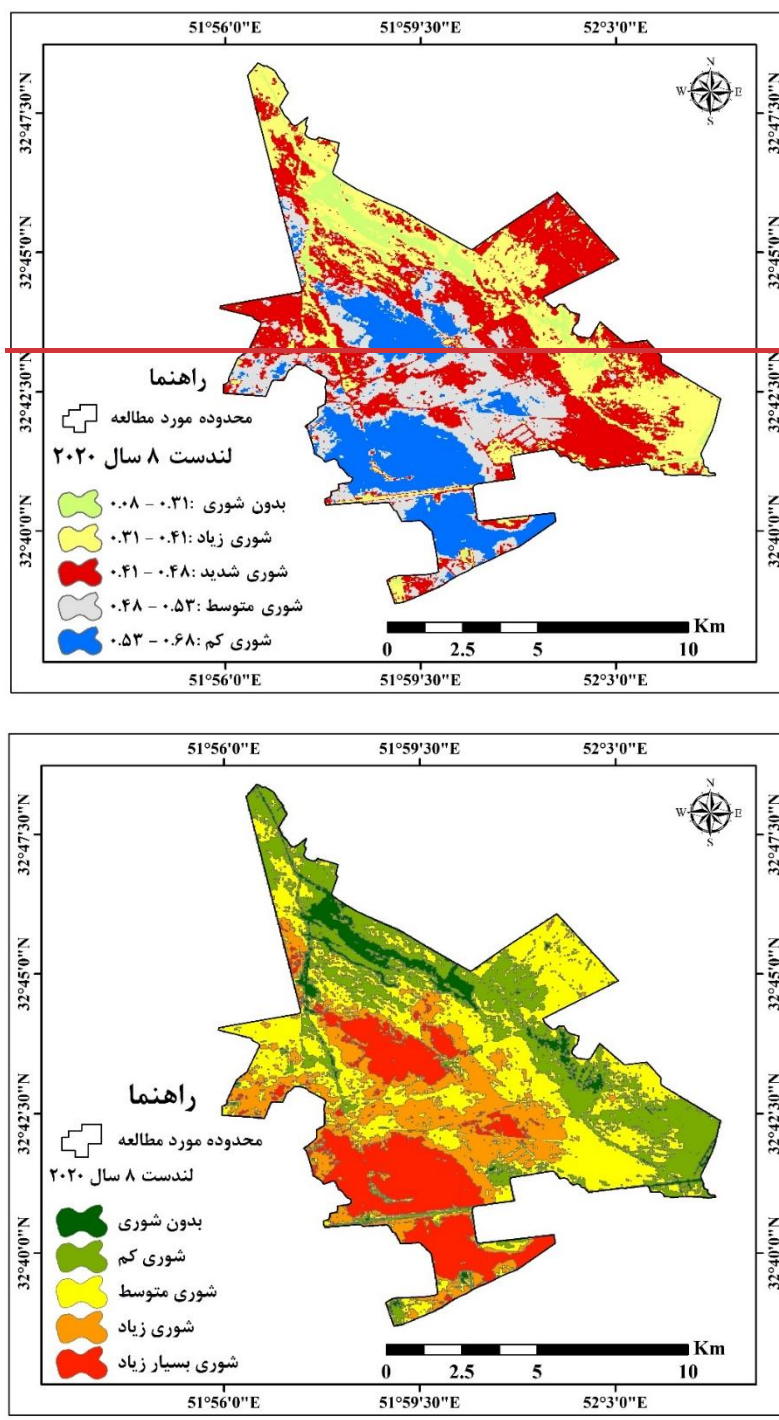
۲۰۲۰ بیش‌ترین میزان درجه شوری خاک در بخش‌های میانی منطقه مورد مطالعه و کم‌ترین میزان درجه شوری خاک در قسمت‌های جنوبی منطقه است، که از این نظر با نتایج زمین‌آمار همخوانی دارد. همچنین خاک غیرشور در نواحی شمال‌شرقی و شرقی منطقه است.

در این تحقیق پس از تهیه نقشه طبقه‌بندی شاخص‌ها مقادیر نقشه طبقه‌بندی آستانه‌گذاری شد. شکل ۹ و ۱۰ نقشه طبقه‌بندی شاخص SI_3 به روش آستانه‌گذاری، به ترتیب برای سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ در سال



شکل ۹. نقشه شوری خاک شاخص SI_3 به روش آستانه‌گذاری برای سال ۲۰۱۴.

Figure 9. Soil salinity map of SI_3 index by threshold method for 2014



شکل ۱۰. نقشه شوری خاک شاخص SI_3 به روش آستانه گذاری برای سال ۲۰۲۰

Figure 10. Soil salinity map of SI_3 index by threshold method for 2020

تحلیل روند شوری خاک

زمانی ۲۰۱۴ - ۲۰۲۰ مورد ارزیابی قرار گرفت که روش اول با استفاده از نقشه‌های طبقه‌بندی نظارت شده شاخص طیفی SI_3 می‌باشد که مساحت کلاس‌های خاک غیرشور و کلاس خاک

در مطالعه حاضر روند شوری خاک از طریق دو روش در بازه

شور طبق جدول ۵ محاسبه شده و با تحلیل آن‌ها روند شوری خاک طی بازه زمانی مورد مطالعه به دست آمد. روش دوم با استفاده از طبقه‌بندی آستانه‌گذاری اعمال شده بر روی شاخص SI_3 می‌باشد، که با محاسبه مساحت کلاس‌های به دست آمده و مقایسه آن‌ها، روند شوری خاک در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۴ مشخص شد. با توجه به نتایج جدول ۶ مساحت اراضی شور در سال ۲۰۱۴ از ۸۶۰۳ هکتار به ۹۱۵۵ هکتار در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته، در نتیجه اراضی دارای خاک شور در منطقه مورد مطالعه طی بازه زمانی مورد مطالعه به میزان ۵۵۲ هکتار افزایش یافته است و حدود ۳۶ درصد از اراضی فاقد شوری، دچار شوری شده‌اند. با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ بخش اعظم اراضی موجود در بخش شرقی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه دچار شوری شده است. براساس جدول ۶، سال ۲۰۱۴ مناطق بدون شوری ۱۱۲۲ هکتار بوده است که این مقدار در سال ۲۰۲۰ به ۵۷۹ هکتار کاهش یافته است و به اراضی شور تبدیل شده است که این تغییر در نواحی شرقی و جنوب شرقی منطقه مورد کاملاً مشخص است. مناطق با شوری کم طی بازه زمانی ۶ ساله به مقدار ۷۶۷ هکتار کاهش یافته و میزان شوری این اراضی افزایش یافته است و نواحی دارای شوری خاک متوسط در سال ۲۰۱۴، ۱۲۶۵ هکتار بوده و این مقدار در سال ۲۰۲۰ به ۷۴۷ هکتار کاهش یافته است و حدود ۵۱۸ هکتار این اراضی با افزایش

شوری مواجه شده است. اراضی دارای شوری زیاد در سال ۲۰۱۴ به مقدار ۳۵۹۵ هکتار بوده که در سال ۲۰۲۰ به ۴۳۲۷ هکتار افزایش یافته است که این اراضی در این بازه زمانی ۶ ساله افزایش محسوسی داشته است که در نواحی شرقی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه شکل‌های ۹ و ۱۰ مشخص می‌باشد و در آخر اراضی دارای شوری شدید در سال ۲۰۲۰ افزایش چشم‌گیری داشته و حدود ۱۰۶۷ هکتار به اراضی دارای شوری شدید افزوده شده است و در نهایت اینگونه می‌توان نتیجه گرفت که حدود ۵۴۳ هکتار از اراضی بدون شور دچار شوری شده‌اند و بیش‌ترین تغییر در میزان شوری نیز مربوط به اراضی دارای شوری شدید بوده به طوری که حدود ۱۰۶۷ هکتار طی بازه زمانی مورد مطالعه دچار شوری شدید شده‌اند. همانطور که آلود و همکاران (۲) در مطالعه ی خود منشا شوری خاک را به دو دسته ی شوری اولیه(طبیعی) و ثانویه(انسانی) تقسیم کرده‌اند؛ بنابراین بررسی علت‌های مختلف شوری خاک در منطقه نیازمند مطالعات مجزا بوده و داشتن اطلاعات دقیق در این زمینه برای سال‌های مختلف؛ جهت شناسایی منشا شوری خاک و جلوگیری از پیشروی آن ضروری است. با این حال به نظر می‌رسد تغییرات اقلیم و تبخیر بالا، وضعیت آب‌های زیرزمینی و نامناسب بودن آبیاری کشاورزی جزو عوامل مهم تاثیرگذار در منطقه باشند.

جدول ۵. روند شوری خاک از سال ۲۰۲۰-۲۰۱۴

Table 5. Soil salinity trends from 2014-2020

سال	مساحت غیر شور (هکتار)	خاک شور (هکتار)	مساحت خاک	درصد شوری خاک
۲۰۱۴	۱۵۱۰	۸۶۰۳		٪۸۵/۰۶
۲۰۲۰	۹۵۸	۹۱۵۵		٪۹۰/۵۲

جدول ۶. روند شوری خاک از سال ۲۰۲۰-۲۰۱۴

Table 6. Soil salinity trends from 2014-2020

کلاس شوری خاک	مساحت در سال ۲۰۱۴ (هکتار)	مساحت در سال ۲۰۲۰ (هکتار)	درصد سال ۲۰۱۴	درصد سال ۲۰۲۰
بدون شوری	۱۱۲۲	۵۷۸	٪۱۱/۰۹	٪۵/۷۱
شوری کم	۱۶۷۱	۹۰۴	٪۱۶/۵۲	٪۸/۹۳
شوری متوسط	۱۲۶۵	۷۴۷	٪۱۲/۵۰	٪۷/۳۸
شوری زیاد	۳۵۹۵	۴۳۲۷	٪۳۵/۵۴	٪۴۲/۷۸
شوری شدید	۲۵۴۸	۳۶۱۵	٪۲۵/۱۹	٪۳۵/۷۴

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای تخمین شوری خاک، شاخص‌های شوری (SI_1, SI_2, SI_3)، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص روشنایی (BI) و شاخص‌های انتقال طیفی با به‌کارگیری روابط تجربی محاسبه و استخراج شدند. سپس با استفاده از طبقه‌بندی SVM و نمونه‌های تعلیمی تهیه‌شده از گوگل ارث، شاخص SI_3 به‌عنوان بهترین شاخص آستانه‌گذاری شد. نتایج صحت‌سنجی طبقه‌بندی نشان می‌دهد ضریب کاپا و صحت کلی شاخص SI_3 برای تصویر سال ۲۰۱۴ به ترتیب ۰/۹۶۰۵ و ۰/۸۷۸۳ می‌باشد و برای سال ۲۰۲۰ دارای دقت کلی ۹۸/۴۱۲۷ و ضریب کاپا ۹۴/۰۹۲۸ برآورد شده است. در این شاخص از باندهای سبز و قرمز استفاده‌شده که با نتایج شیخ‌الاسلامی و همکاران (۲۵) هم‌خوانی دارد؛ به‌طوری‌که آن‌ها نیز به‌دقت بالای شاخص SI_3 در برآورد شوری خاک اشاره کرده‌اند. در ادامه‌ی پژوهش جهت درون‌یابی داده‌های زمینی از روش کوکریجینگ، به دلیل خطای کم این روش در بین روش‌های درون‌یابی، استفاده شده است. نقشه حاصله،

نشان‌دهنده بیشترین درجه شوری خاک در قسمت‌های میانی منطقه، کمترین درجه شوری خاک در قسمت‌های جنوبی و شرقی و اکثر شوری خاک متوسط در نواحی شمالی منطقه مورد مطالعه برای سال ۲۰۲۰ است. نتایج مربوط به درون‌یابی با مطالعه‌ی ژانگ (۲۸) مطابقت دارد؛ به‌طوری‌که این پژوهشگر به بررسی روش‌های زمین‌آماری در برآورد EC و SAR مزارع کشاورزی پرداخته و در نتایج خود، دقت بالای روش درون‌یابی کوکریجینگ را در مقایسه با سایر روش‌های آماری مطرح کرده است. با مقایسه نتایج درون‌یابی و طبقه‌بندی شاخص‌های SI_3 به روش آستانه‌گذاری مشخص شد که در سال ۲۰۲۰، بیشترین و کمترین میزان درجه شوری خاک به ترتیب در بخش‌های میانی و قسمت‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین در سال ۲۰۱۴ نیز، بیش‌ترین میزان درجه شوری خاک در بخش‌های میانی و بخشی در قسمت‌های شمالی و غربی منطقه مورد مطالعه و کم‌ترین میزان درجه شوری خاک در قسمت‌های جنوبی و بخش دیگر در قسمت‌های مرکزی منطقه می‌باشد. در نهایت با بررسی روند شوری خاک با استفاده از نقشه‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده طی بازه زمانی ۲۰۱۴-۲۰۲۰ مشخص شد که اراضی دارای خاک شور در منطقه مورد مطالعه در این بازه زمانی افزایش یافته و حدود ۳۶ درصد از اراضی فاقد شوری،

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده علل و عوامل شوری خاک همچون مواد شوری خاک، اقلیم، وضعیت آب‌های زیرزمینی و نوع تخصیص آب به کشاورزان و... در مورد سال‌های مختلف بررسی و به دنبال آن تحقیق در مورد تمهیدات لازم جهت جلوگیری از شوری خاک براساس دلایل ایجاد شوری صورت گیرد تا گامی در مسیر بیابان‌زدایی و جلوگیری از شوری خاک منطقه برداشته شود. همچنین استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا جهت بالا رفتن دقت طبقه‌بندی حاصل از اجرای شاخص‌های شوری خاک، مطالعات آزمایشگاهی با نمونه‌های بیشتر (به دلیل تغییرات مکانی بالای شوری خاک) جهت برآورد دقیق‌تر مساحت تحت پوشش شوری و حتی استفاده از فناوری رادار جهت مطالعه‌ی شوری عمق خاک، پیشنهادهای دیگر این پژوهش، جهت مطالعات آینده می‌باشد.

دچار شوری شده‌اند؛ به‌طوری‌که مساحت اراضی شور در سال ۲۰۱۴ از ۸۶۰۳ هکتار به ۹۱۵۵ هکتار در سال ۲۰۲۰ افزایش داشته است. نتیجه‌ی بررسی روند شوری خاک با استفاده از نقشه‌های طبقه‌بندی به روش آستانه‌گذاری، نشان داد حدود ۵۴۳ هکتار از اراضی فاقد شوری دچار شوری شده‌اند و بیشترین تغییر در میزان شوری نیز مربوط به اراضی دارای شوری شدید بوده به‌طوری‌که حدود ۱۰۶۷ هکتار طی بازه زمانی مورد مطالعه دچار شوری شدید شده‌اند. با توجه به نتایج، این‌گونه برداشت می‌شود که اگر روند شوری خاک به همین ترتیب ادامه پیدا کند، علاوه بر اراضی فاقد شوری داخل منطقه مورد مطالعه، تهدید جدی برای اراضی اطراف منطقه مورد مطالعه به‌خصوص اراضی کشاورزی است. نتایج به‌دست‌آمده در این قسمت با مطالعه احمدیان و همکاران (۱) همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که آن‌ها نیز به افزایش میزان شوری خاک بیش‌ازپیش اشاره کرده‌اند.

منابع مورد استفاده

- Ahmadian M, Pakparvar M, & Ashourloo D. 2010. Evaluation of Soil Salinity Using Digital Image Processing of Landsat Satellite in Qhahavand Plain (Hamadan Province). *Iranian Journal of Soil Research*, 24(2), 179-191. [In Persian]
- Allbed A, and Kumar, I. 2013. Soil Salinity Mapping and Monitoring in Arid and Semi-Arid Regions Using Remote Sensing Technology: A Review. *Advances in Remote Sensing*, No. 2, 373-385.
- Al-Saif, A., Sas-Paszt, L., & Mosa, W. (2024). Olive Performance under the Soil Application of Humic Acid and the Spraying of Titanium and Zinc Nanoparticles under Soil Salinity Stress. *Horticulturae*, 10(3), 295. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030295>
- Amini D, Tavakoli M, Rostaminy M. 2018. Mapping Spatial Variability of Soil Salinity Using Remote Sensing Data and Geostatistical Analysis: A Case of Shadegan, Khuzestan. *E.E.R.*; 7 (4) :24-43. [In Persian]
- Chen, H., Wu, J., & Xu, C. (2024). Monitoring Soil Salinity Classes through Remote Sensing-Based Ensemble Learning Concept: Considering Scale Effects. *Remote Sensing*, 16(4), 642. <https://doi.org/10.3390/rs16040642>
- Daliakopoulos I. N, Tsanis I. K. Koutroulis A, Kourgialas N. N. Varouchakis A. E. Karatzas G. P. Ritsema C. J. 2016. The threat of soil salinity: A European scale review. *Sci. Total Environ.* No. 573, 727-739.
- Delbari M, Khalki M, & Mahdian M. 2004. Evaluation of geostatistical methods in estimating soil hydraulic conductivity in the water slope and backwater areas of the lower Sistan plain. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 35(1). [In Persian]
- El-Ramady, H., Prokisch, J., Mansour, H., Bayoumi, Y. A., Shalaby, T. A., Veres, S., & Brevik, E. C. (2024). Review of Crop Response to Soil Salinity Stress: Possible Approaches from Leaching to Nano-Management. *Soil Systems*, 8(1), 11. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010011>
- Gorji T, Yildirim A, Hamzehpour N, Tanik A & Sertel E, 2020. Soil salinity analysis of Urmia Lake Basin using Landsat-8 OLI and Sentinel 2A based spectral indices and electrical conductivity measurements. *Ecological Indicators*, Vol. 112, No. 106173, pp. 1-10.
- Grunwald S, Vasquesy G.M. & Rivero R.G. 2015. Fusion of soil and remote sensing data to model

- soil properties. *Advances in Agronomy*, 131. 1-109.
11. Habashi K, Karimzadeh H & Pourmanafi S. 2017. Assessment soil salinity in east Isfahan based on OLI sensor data and topographic feature analysis. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 8(1), 36-51. [In Persian]
12. Hosni Pak, A., 2010. Geostatistics. Tehran University Press, pp. 314. [In Persian]
13. Karam A, Kiani T, Dadras Sabzevar A & Davarzar Z. 2019. Estimating soil salinity by using of remote sensing data and spatial statistic in Sabzevar region. *Quantitative Geomorphological Research*, 7(4), 31-53. [In Persian]
14. Kassas M, 1987. Seven paths to desertification. *Desertification Control Bulletin* 15, 24-26.
15. Karami, P., & Nemati, F. (2023). Investigation of some physical and chemical properties of soil in rangelands and abandoned drylands (Case study: Sanandaj rangelands). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 30(2), 247-263. doi: 10.22092/ijrdr.2023.129900 [In Persian]
16. Khedmatzadeh, A., Mousavi, M. N., & Mohammad Torkamani, H. (2021). An Analysis on Land Use Process Changes and Forecasting in Urmia City Using SVM Model and Neural Networks. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 12(4), 53-7. doi: 10.52547/gisj.12.4.53 [In Persian]
17. Jems, H., Yarahmadi, D., Nasiri, A., & Mirhashem H. (2023). Monitoring the spatial changes of the snow cover of Central Alborz using the SVI algorithm and landsat images. *Researches in Earth Sciences*, 14(2), 20-37. doi: 10.48308/esrj.2023.103194 [In Persian]
18. Masoud A. A, Koike K, Atwia M. G, El-Horiny M. M, Gemal K. S. 2019. Mapping soil salinity using spectral mixture analysis of landsat 8 OLI images to identify factors influencing salinization in an arid region. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*. 83. 1-16.
19. Moameni A. 2011. Geographical Distribution and Salinity Levels of Soil Resources of Iran. *Iranian Journal of Soil Research*, 24(3), 203-215. [In Persian]
20. Mohamed E. S, Saleh A. M, Belal A. B, Gad A. 2018. Application of near infrared reflectance for quantitative assessment of soil properties. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 21. 1-14.
21. Momin Rumiani H, Ghorbani A, Fakheri Fard p, Darbandi. 2013. Optimizing the spatial distribution of the network of rain gauge stations in the GIS environment (case study: Maharlou-Bakhtegan basin). Master's thesis in the field of water engineering, Faculty of Agriculture, Tabriz University. [In Persian]
22. Mumipour, M. 2018. Temporal and Spatial Variation of Soil Salinity Variations in a 24-year Period in Abadan District Using Satellite Images. *Geography and Environmental Sustainability*, 8(2), 47-58. [In Persian]
23. Malekian, M., Pourpirali, Z. (2013). Studies on the management plan of hand-planted forests in Sajzi region of Isfahan city, Isfahan province's general department of natural resources and watershed management, desert department. [In Persian]
24. Nohegar A & Zare G. 2012. Extraction of soil salinity zone in arid and semi arid regional using of remote sensing data (case study: Darab Township). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 1(1), 49-64. doi: 10.22067/geo.v1i1.16522. [In Persian]
25. Sheikh al-Islami M, Esmaili A. 2014. Investigating the trend of changes in soil salinity resulting from the reduction of water in Lake Urmia using remote sensing indicators. Master's thesis in the field of remote sensing, Faculty of Civil Engineering and Mapping, University of Advanced Industrial and Technological Education. [In Persian]
26. Taghadosi M. M, Hasanlou M & Eftekhari K. 2019. Evaluating and comparing supervised classification algorithms With the aim of mapping soil salinity levels using Sentinel-2 satellite imageries. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(110), 37-52. doi: 10.22131/sepehr.2019.36608 [In Persian]
27. Yildirim A, Gorji T, Hamzehpour N, Sertril E, Tanik A. 2019. COMPARISON OF DIFFERENT SOIL SALINITY INDICES DERIVED FROM SENTINEL-2A IMAGES. *International Symposium on Applied Geoinformatics*, 1,(1). 230-614.
28. Zhang M, Ustin S, Rejmankova E & Sanderson E. 1997. Monitoring Pacific-Coast salt marshes using remote sensing. *Ecological Applications*, 7, 1039-1053.
29. Zhang, Y., Wu, H., Kang, Y., Fan, Y., Wang, S., Liu, Z., & He, F. (2024). Mapping the soil salinity distribution and analyzing its spatial and temporal changes in Bachu County, Xinjiang, based on Google Earth engine and machine learning. *Agriculture*, 14(4), 630. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040630>



Estimation of soil salinity using satellite imagery and Laboratory data: A Case Study of Barkhar city, Isfahan province

Sayad Asghari Saraskanroud^{1*}, Ehsan Tavakoli², Batool Zeinali³, Shiva Safari⁴, Elham Mollanouri⁵, Aboozar Sadeghi⁶

Received: 2023-02-12 / Accepted: 2025-05-12 / Published: 2025-12-27

Abstract

Soil salinization is one of the most significant environmental hazards in arid and semi-arid regions. This research aims to estimate soil salinity over a specific period using remote sensing techniques in Barkhar City, Isfahan Province. To achieve this, various salinity indices (NDSI, SI1, SI2, SI3), vegetation index (NDVI), brightness index (BI), and spectral transmission indices were calculated and extracted using empirical

Sayad Asghari Saraskanroud¹ (✉), Ehsan Tavakoli², Batool Zeinali³, Shiva Safari⁴, Elham Mollanouri⁴, AboozarSadeghi⁵

1. Professor of Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2. MSc of remote sensing and geographic information system, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

3. Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

4. MSc of remote sensing and geographic information system, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

5. Ph.D. student of Hydrology and Meteorology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

6. Ph.D. student of Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

DOI: 10.82447/girs.2025.902996

e-mail: S.asghari@uma.ac.ir

relationships. The study applied the Support Vector Machine (SVM) algorithm for classification of all indices, followed by accuracy assessment. Ultimately, the best indicator for soil salinity estimation was identified. A total of 34 soil samples were collected and subjected to normality tests using SPSS software. An interpolation method was then applied to the data. The evaluation of classified spectral indices maps revealed that the SI3 index applied to Landsat 8 (2014), Sentinel-2 (2020), and Landsat 8 (2020) imagery demonstrated the highest accuracy, with Kappa coefficient values of 0.87, 0.96, and 0.94, respectively. Moreover, salinity maps generated from Sentinel-2 satellite imagery were more accurate than those derived from Landsat 8 imagery. Comparison of the results obtained through the index thresholding method and geostatistical analysis confirmed the reliability of the indices in estimating soil salinity. The study's temporal analysis of soil salinity in the area revealed an increasing trend. Approximately 36% of previously non-saline land became saline during the study period, with the most significant changes occurring in highly saline lands. Notably, about 1,067 hectares experienced severe salinization over the observed timeframe.

Extended abstract

Statement of the Problem: Soil is essential for life, and monitoring soil properties is vital for solving global environmental challenges such as food and water security, reducing climate change, and adapting and protecting biodiversity. Accumulation of salt on the soil surface or in the root area causes the loss of soil fertility and changes the physical and chemical properties of the soil. It also has negative effects on the ecological function of the soil. As a result, excessive concentration of salt in the soil may lead to the abandonment of agricultural land. In general, soil salinity is one of the oldest environmental problems and is considered as one of the seven main factors of desertification. Increasing the salinization of land and the threat of desertification in Iran, a country with high vulnerability dimensions, is dangerous. Periodic identification, examination and accurate assessment of the extent and intensity of soil salinity is very important for managing agricultural and desertification projects. Common laboratory studies on soil salinity investigation, field samples are collected and analyzed, as a result, they are very time-consuming and expensive. soil salinity is very variable even in short distances. Therefore, many soil samples are needed to record the spatial changes of soil salinity in a wide area. In the last few decades, geostatistical methods and remote sensing data are used to measure and investigate the trend of soil salinity. Satellite images have a special ability to obtain information from different areas, even inaccessible areas, and the ability to investigate changes in salinity over a period of time. One of the

biggest advantages of using this method is the possibility of checking remote areas.

Purpose: The main purpose of this research is to estimate soil salinity using remote sensing and satellite images. Also, another goal of the research is to investigate the changes in soil salinity between 2020 and 2014.

Research method: The studied area with an area of 10113 hectares, which is located in the two cities of Isfahan and Barkhar according to the latest political divisions of Isfahan province, and is located 35 km east of Isfahan city. The location of the region is located in longitude 29,56 and 51° to 30,7 and 52°E and latitude 50,23 and 32° to 18,55 and 32°N. In the present study, to estimate soil salinity, first salinity indices NDSI, SI₁, SI, SI₂, SI₃, vegetation cover index (NDVI), brightness index (BI) and spectral transmission indices using software Envi 5.3 software and were calculated and extracted using empirical relations. Then, all the indicators were classified by SVM algorithm method and by applying validation and Kappa coefficient on all classifications, the best indicator in estimating soil salinity was determined. Also, in this research, 34 soil samples were checked for normality with statistical tests in Spss software environment, then interpolation was done using Cokriging method in GIS10.5 software. Then, the best indicators in the estimation of soil salinity were classified by the thresholding method and compared with the prepared interpolation map. Finally, by evaluating and analyzing the SVM classification maps of the best indicators and the classification map of the best

indicators using the thresholding method in 2020 and 2014, the trend of soil salinity during the studied period was determined.

Results and discussion: The evaluation of the classification maps of spectral indices shows that the SI_3 indices applied to the images of Landsat 8, Sentinel 2 in 2020 and Landsat 8 in 2014 are the most accurate spectral indices for estimation with the Kappa coefficient value of 0.9481, 0.9605 and 0.8783 respectively. soil salinity is, as a result, the SI_3 index is the best index in estimating soil salinity in the years 2020 and 2014, the reason for which is the use of two bands, green and red, because in the range of the red band, vegetation has the least reflection and salinity has It is the most reflective, and in general, saline soils have high reflectivity in the visible range, and the salinity maps extracted from Sentinel 2 satellite images are more accurate than the maps obtained from Landsat 8 images. Sentinel 2 satellite as the best indicator in estimating soil salinity in 2020, has a Kappa coefficient value of 0.9605; As a result, the Sentinel 2 satellite has a higher kappa coefficient value than the Landsat 8 satellite, so it has a higher accuracy in soil salinity estimation, although there are minor differences, the reason of which can be the difference in the spatial resolution of these two satellites. By comparing the classification map obtained by thresholding the indices, it was found that the indices are consistent with the results of geostatistics and the indices have sufficient accuracy to estimate soil salinity; Examination of the index classification map and

examination of the interpolation map showed that the highest degree of soil salinity is in the middle parts of the studied area and the lowest degree of soil salinity is in the southern parts of the area, and non-saline soil is in the northeast and east of the area. Finally, during the studied time period, about 552 hectares of non-salinity lands in the region have experienced soil salinity, and the largest change in the amount of salinity is related to highly saline lands, so that about 1067 hectares have experienced severe salinity during the studied time period. In general, about 36% of the land without salinity has become saline.

Conclusion: SI_3 index is the best index to estimate soil salinity. The highest amount of soil salinity is in the middle parts and the lowest soil salinity is in the southern parts of the study area, also the lands without salinity are scattered in the northern, eastern and southeastern parts of the region. Investigating the trend of soil salinity using monitored classification maps during the period of 2014-2020, it was found that the lands with saline soil in the study area have an increasing trend. In such a way that about 36% of the land without salinity is affected by salinity; If this trend of soil salinity continues, in addition to the lands without salinity inside the study area, it will be a serious threat to the lands around the study area, especially agricultural lands.

Keywords: vegetation index, salinity index, brightness index, cokriging, SVM algorithm.