

Soil Salinity Digital Mapping using Random Forest Model in Saline soil of Eyvanekey Plain

Abstract

This study aimed to investigate the spatial changes of soil salinity using RF model in a part of Eyvanekey Plain (Semnan Province 2018). Grid sampling with 100 m intervals (106 samples) was taken from 105 ha of soils developed on marl and gravely alluviums. The land uses were pistachio plantations with furrow irrigation and abandoned land. The maximum EC was (173.2 and 34 dS/m) in the abandoned and furrow irrigation pistachio plantations respectively. The main factors of salinization were saline marls, saline irrigation water, and high PET. The R² for the salinity prediction map by RF model was 0.49, and the most important covariates were normalized difference salinity index (NDSI), topographic wetness index (TWI), Channel Network Base Level (CNBL), normalized difference vegetation index (NDVI), and modified soil vegetation index (SAVI). Spectral ratio indices derived from Landsat 8 contributed the most to the soil salinity prediction. Out of 5 main auxiliary variables, 3 variables are related to spectral ratio indices and the reason was the presence of salt on the soil in the studied area. Using NDVI with other salinity and moisture indices improved the salinity prediction model. Examining the results of covariates correlation and the implementation of recursive feature elimination showed that many covariates increase model complexity and prediction error. Recursive feature elimination helped to simplify the model by identifying the most important covariates. The salinity prediction map by random forest was consistent with the field observations and clearly defined the critical saline area.

Keywords: Digital soil mapping, Furrow irrigation, Soil properties, Spatial changes, Spectral ratio.

پهنه‌بندی رقومی شوری خاک سطحی با بکارگیری مدل جنگل تصادفی در اراضی شور دشت

ایوانکی

چکیده

هدف این مطالعه بررسی تغییرات مکانی شوری خاک با استفاده از مدل RF در بخشی از دشت ایوانکی (استان سمنان، ۱۳۹۸) بود. تعداد ۱۰۴ نمونه برداری به روش شبکه (فاصله ۱۰۰ متر)، از ۱۰۵ هکتار خاک‌های واقع بر روی مارن و آبرفت‌های سنگریزه‌دار و کاربری پسته کاری با آبیاری جویچه‌ای و اراضی رها انجام شد. بیشترین EC خاک در اراضی رها شده و باغ پسته به ترتیب ۱۷۳٫۲ و ۳۴ dSm⁻¹ بود. عوامل شوری مواد مادری، کیفیت آب آبیاری، PET زیاد و خیز مویینه املاح بود. ضریب تبیین (R²) نقشه پیش‌بینی شوری توسط مدل RF مساوی ۰٫۴۹ و مهم‌ترین شاخص‌های کمکی شوری نرمال شده، خیزی توپوگرافی، سطح مینای زهکش، پوشش گیاهی نرمال شده و پوشش گیاهی تعدیل شده خاک بودند. شاخص‌های نسبت طیفی داده‌های لندست ۸، در پیش‌بینی تغییرات شوری اهمیت زیادی داشتند. از ۵ متغیر کمکی موثر در مدل، ۳ متغیر مربوط به شاخص‌های نسبت طیفی بود. دلیل اهمیت شاخص‌های نسبت طیفی در مدل، تجمع نمک در سطح خاک، و کاهش سهم متغیرهای زمین‌نما به دلیل مسطح بودن منطقه بود. کاربرد NDVI به تنهایی برای مطالعات شوری کافی نیست و استفاده از شاخص‌های شوری و رطوبت برای پیش‌بینی صحیح ضروری است. بررسی همبستگی بین متغیرهای کمکی و اجرای مدل حذف برگشتی نشان داد که متغیرهای کمکی زیاد سبب افزایش پیچیدگی و خطا در پیش‌بینی شود. روش حذف برگشتی با شناسایی مهم‌ترین متغیرها به ساده‌سازی مدل کمک کرد. نقشه پیش‌بینی شوری با مدل جنگل تصادفی با مشاهدات میدانی تطابق داشت و منطقه بحرانی شوری را به خوبی مشخص نمود.

کلید واژه‌ها: آبیاری جویچه‌ای، تغییرات مکانی، خصوصیات خاک، نسبت طیفی، نقشه‌برداری رقومی.

مقدمه

افزایش جمعیت کشور و نیاز روزافزون به غذا، چالش تولید و بهره‌وری پایدار را در پیش روی محققین بخش کشاورزی نهاده است. اقلیم خشک و نیمه خشک و پیامدهای ناشی از آن مانند کم آبی، شوری و قلیائیت، فرسایش و تخریب خاک سبب کاهش بازدهی خاک برای تولید محصولات زراعی در بخش اعظمی از مساحت کشور شده است. شوری خاک به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب خاک در مناطق خشک و نیمه خشک کشور دارای تغییرات مکانی-زمانی زیادی بوده که باعث ایجاد درجه‌های مختلفی از محدودیت در تولید محصولات کشاورزی و در موارد شدید حتی غیر قابل استفاده شدن اراضی کشاورزی شده است (جهانبازی و همکاران، ۱۳۹۸). بنابراین با توجه به پیامدهای شوری در اراضی کشاورزی مناطق خشک و نیمه خشک کشور، تهیه نقشه‌های شوری از جمله موارد ضروری برای مدیریت خاک در این مناطق می‌باشد. فراهمی نقشه‌های شوری با استفاده از روش‌های مرسوم نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی است و به همین دلیل روش‌های جدید مانند نقشه‌برداری رقومی خاک که با صرف هزینه و زمان کمتر این نقشه‌ها را ارائه می‌دهند از محبوبیت خاصی برخوردارند (Abbas et al., 2013; Allbed et al., 2014). فن نقشه‌برداری رقومی با استفاده از مدل‌های مختلف از جمله رگرسیون لاجیستیک^۱، درخت تصمیم^۲، جنگل تصادفی^۳، شبکه عصبی مصنوعی^۴، روابط بین متغیرهای محیطی و داده‌های خاک را تعیین و نقشه‌های مورد نیاز برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب را فراهم می‌سازد (McBratney et al., 2003). انتخاب مدل و همچنین تعداد و نوع متغیرهای محیطی تأثیر بسزایی بر نتایج پیش‌بینی و پیچیدگی مدل دارد و لذا در دهه‌های اخیر مطالعات متعددی برای شناسایی بهتر ترکیب داده‌های کمکی و انتخاب مدل برای پیش‌بینی شوری صورت گرفته است (Yang et al., 2015; Peng et al., 2019).

پیشینه پژوهش

در مطالعه‌ای برای تهیه نقشه شوری خاک از داده‌های چند طیفی تصاویر سنتینل ۲^۵، به عنوان متغیرهای کمکی و از سه الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)^۶، شبکه عصبی مصنوعی و جنگل تصادفی برای مدل‌سازی استفاده شد. نتایج نشان داد که متوسط بازتاب هر باند از داده‌های MSI از ۰/۲۸-۰/۲۱ متغیر است و با توجه به خصوصیات طیفی مربوط به سطوح مختلف شوری خاک (dS/m) ۱/۰۷-۷۹/۶، انعکاس طیفی مربوط به خاک شور در داده‌های MSI از ۰/۳۵-۰/۰۹ متغیر است. نتایج نشان داد که مدل ماشین پشتیبان بردار نسبت به دو مدل دیگر، عملکرد و دقت بالاتری را برای تهیه نقشه شوری منطقه مورد مطالعه دارد (R²=۰/۸۸، RMSE^۷=۴/۸۹). نقشه شوری حاصله از مدل ماشین بردار پشتیبان نشان داد که زمین‌های کشاورزی که دارای ارتفاع بیشتر هستند به دلیل آبیاری طولانی مدت سبب تخلیه نمک به مناطق اطراف می‌شوند. همچنین شور شدن ثانویه خاک در منطقه سبب انباشت مقدار زیادی نمک در خاک می‌گردد (Wang et al., 2021).

بررسی کارایی سنجنده‌های مختلف به عنوان منبع داده‌های کمکی مورد نیاز برای تهیه نقشه شوری خاک در ادوار مختلف زمانی نشان داد که فرآیند تغییر و تبدیل بر روی داده‌های خام سنجنده‌ها برای تشخیص و طبقه‌بندی پدیده‌ها ضروری است. با پردازش داده‌های خام سنجنده‌ها، شاخص‌های نسبت طیفی، مانند شاخص پوشش گیاهی نرمال شده، شاخص شوری نرمال شده محاسبه و به عنوان داده کمکی در مدل استفاده می‌شوند (Metternicht & Zink, 2003). در سال‌های اخیر داده‌های حاصل از ماهواره لندست به صورت گسترده‌ای برای بررسی تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی استفاده شده‌اند و نتایج حاکی از کارایی داده‌های حاصله برای بررسی تغییرات ویژگی‌های خاک از جمله شوری خاک است (Scudiero et al., 2015). با استفاده از

۱. Logistic Regression

۲. Regression Tree

۳. Random Forest

۴. Artificial Neural Network

5. Sentinel Multispectral Instrument

6. Support Vector Machines

7. Root mean square error

شاخص‌های سنجش از دور مانند شاخص پوشش گیاهی نرمال شده می‌توان اثرات خشکسالی و شوری را از طریق تأثیری که بر گیاهان دارند مورد بررسی قرار داد (Heim, 2002). مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از شاخص پوشش گیاهی نرمال شده به عنوان یک شاخص غیر مستقیم برای مطالعه خشکسالی و شوری در سطح دنیا صورت گرفته است که بر مناسب بودن این شاخص تأکید دارند اما برخی محققین استفاده از شاخص‌های مستقیم شوری مانند شاخص نرمال شده شوری خاک را کاراتر از شاخص پوشش گیاهی نرمال شده دانستند (Alhag, 2016).

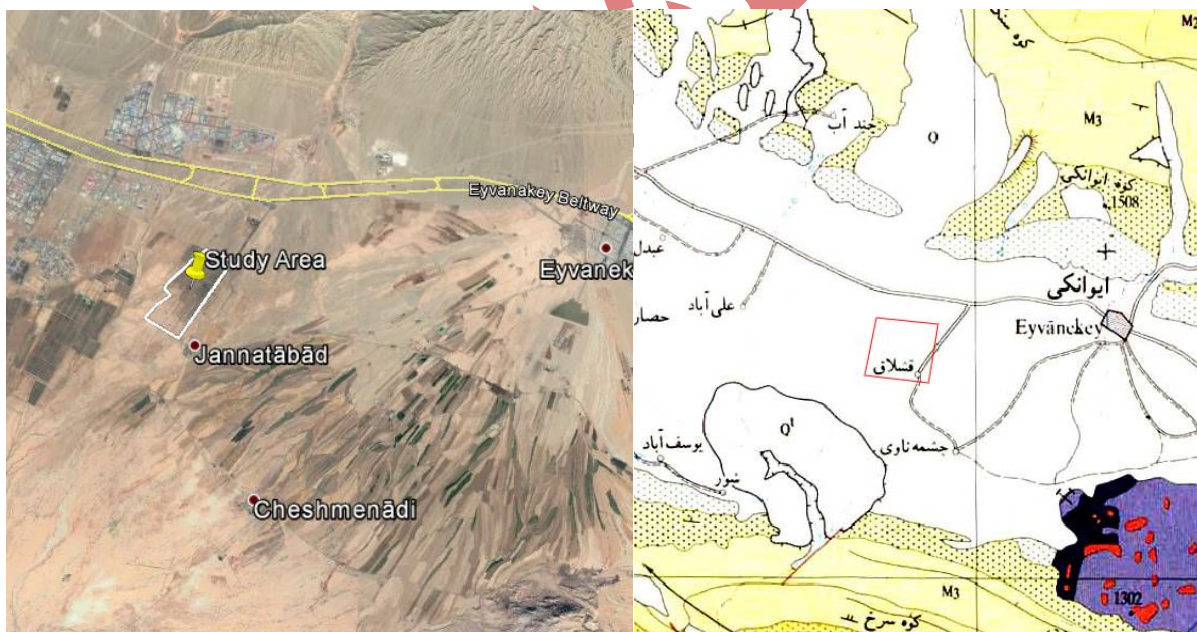
متغیرهای کمکی محیطی برای تهیه نقشه شوری خاک ترکیبی از شاخص‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای، مشتقات ارتفاعی رقومی، داده‌های اقلیمی، زمین‌شناسی و خصوصیات خاک هستند. علاوه بر کارایی داده‌های حاصل از سنجنده‌ها، کارایی استفاده از مشتقات مدل ارتفاعی رقومی برای پیش‌بینی شوری نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد که استفاده از نتایج ژئومورفومتری (آنالیز پستی و بلندی) با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی) سبب پیش‌بینی دقیق تغییرات مکانی شوری و کاهش صرف وقت و هزینه می‌گردد (Vermeulen & Niekerk, 2017). در مطالعه‌ای بررسی همبستگی نتایج پیش‌بینی شوری با ۱۵ متغیر کمکی حاصل از آنالیز مدل رقومی ارتفاعی نشان داد که فاصله از شبکه آبراهه، موقعیت نسبی و فاصله شبکه آبراهه با شوری خاک در سطح ۹۵ همبستگی درصد دارند (Peng et al., 2019). همچنین استفاده از الگوریتم‌های ماشین یادگیرنده مانند درخت تصمیم و جنگل تصادفی برای پیش‌بینی تغییرات مکانی شوری نشان داد شناسایی مناطق شوری با دقت مناسب صورت گرفته و کاربرد این الگوریتم‌ها راهکاری مطلوب برای کاهش هزینه و زمان در مقایسه با روش‌های مرسوم است (Suleymanov et al., 2021; Vermeulen & Niekerk, 2017). اراضی شور در مقایسه با اراضی غیر شور برای تولید محصول نیازمند آب بیشتری هستند که با توجه به وضعیت آب در مناطق خشک و نیمه خشک مانند منطقه مورد مطالعه این پدیده مانعی برای تولید محصول می‌باشد. در مناطق مستعد شوری، سالیانه وسعت اراضی دارای مشکل شوری افزایش یافته و بسیاری از زمین‌های کشاورزی به دلیل مدیریت نامناسب به ویژه در بحث آبیاری قابلیت تولید محصول را از دست داده و حتی ممکن است شوری تا اندازه‌ای پیشروی کند که کشاورز ناچار به رها کردن زمین شود که سرانجام ممکن است منجر به فرسایش و تخریب خاک شود. با وجود این که تاکنون مطالعات زیادی در زمینه شوری خاک صورت گرفته است اما مطالعات بزرگ مقیاس، در سطح مزرعه، که به بررسی تغییرات مکانی شوری با استفاده از تکنیک نقشه‌براری رقومی بپردازد و از این طریق به مدیریت شوری در مزرعه به افزایش عملکرد بصورت پایدار کمک کند، بسیار محدود است. از این رو مطالعاتی که با هدف افزایش عملکرد و رشد گیاه و جلوگیری از پیشروی اراضی شور به شناسایی حدود اراضی شور و تغییرات مکانی شوری بویژه با استفاده از متغیرهای کمکی با قدرت تفکیک زیاد می‌پردازند اهمیت زیادی دارند. مطالعه حاضر با اهداف ۱) بررسی تغییرات مکانی شوری با توجه به کاربری اراضی موجود ۲) تعیین مهم‌ترین متغیر کمکی پیش‌بینی کننده تغییرات شوری ۳) بررسی کارایی الگوریتم رگرسیون جنگل تصادفی برای پیش‌بینی تغییرات مکانی شوری در بخشی از اراضی شور دشت ایوانکی انجام شد.

روش‌شناسی پژوهش

موقعیت و مشخصات عمومی ناحیه‌ی مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه به مساحت ۱۰۵ هکتار در محدوده بخش ایوانکی شهرستان گرمسار واقع در غرب استان سمنان بین ۵۲ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع از سطح دریای آزاد ۱۰۷۵ متر واقع شده است. محصولات غالب منطقه ایوانکی صیفی‌جات، ذرت، جو، گندم، انار، خربزه و پسته می‌باشد. محدوده مطالعاتی مورد نظر باغ پسته است که بیش از ۶۰ سال سابقه کشت دارد که در حاضر به دلیل کاهش منابع آب بخشی از آن رها شده و به صورت بایر درآمده است. باغ پسته در حال حاضر دارای سیستم آبیاری جویچه‌ای می‌باشد ولی هم باغ پسته و هم اراضی رها شده سابقه استفاده از روش آبیاری قطره‌ای در گذشته را دارند.

از نظر زمین شناسی منطقه مورد مطالعه دارای دو نوع مختلف مواد مادری است و بر روی مخلوطی از رسوبات درشت بافت آبرفتی با منشا تشکیلات آذرین و آذرآواری که از ارتفاعات شمالی منطقه سرچشمه می‌گیرند به همراه بقایای مارن‌های قدیمی فرسایش‌یافته و رسوبات حاصل از تشکیلات مارنی در جنوب منطقه، واقع شده است. در واقع منطقه مورد مطالعه بخشی از یک مخروط افکنه کوچک از مخروط افکنه بزرگ ایوانکی است و رسوبات آبرفتی جدید در شمال منطقه مورد مطالعه تشکیلات مارنی قدیمی (مرتبط با کوه سرخ) را پوشانده‌اند (شکل ۱). کمترین ارتفاع در باغ پسته حدود ۹۷۰ متر و بیشترین ارتفاع حدود ۹۹۷ متر است. اختلاف ارتفاع بین پایین‌ترین ارتفاع تا مرتفع‌ترین نقطه منطقه، حدود ۲۷ متر در یک فاصله حدود ۲۰۰۰ متری است. بدین ترتیب شیب کلی منطقه حدود ۱/۵ درصد و کلاس شیب غالب کلاس ۲-۱ درصد است. البته در بخشی از اراضی تغییراتی در سطح زمین ایجاد شده است که توسط گریدر یک شیب در جهت عکس شیب کلی در فضای بین ردیف‌های درختان به وجود آمده است. این کار ضمن تغییر در شیب کلی زمین و جابجایی در خاک سطحی تجمع املاح را هم تحت تأثیر قرار می‌دهد. از نظر جهت شیب منطقه فاقد جهت تأثیرگذار است ولی در واقع در پای شیب جنوبی بر روی آبرفت‌های بادبزی شکل حاصل از رسوب‌گذاری رودخانه دائمی قرار گرفته است. شکل ۲ (راست) طبقات ارتفاعی بر حسب متر و واحدهای شیب اصلی اراضی را (چپ) بر حسب درصد نشان می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌شود بخش عمده باغ دارای شیب کمتر از ۲ بوده و کلاس غالب شیب ۲-۱ درصد است. البته شیب‌های کمتر از ۱ و بیش از ۲ درصد هم بخشی از وسعت باغ را تشکیل داده‌اند.



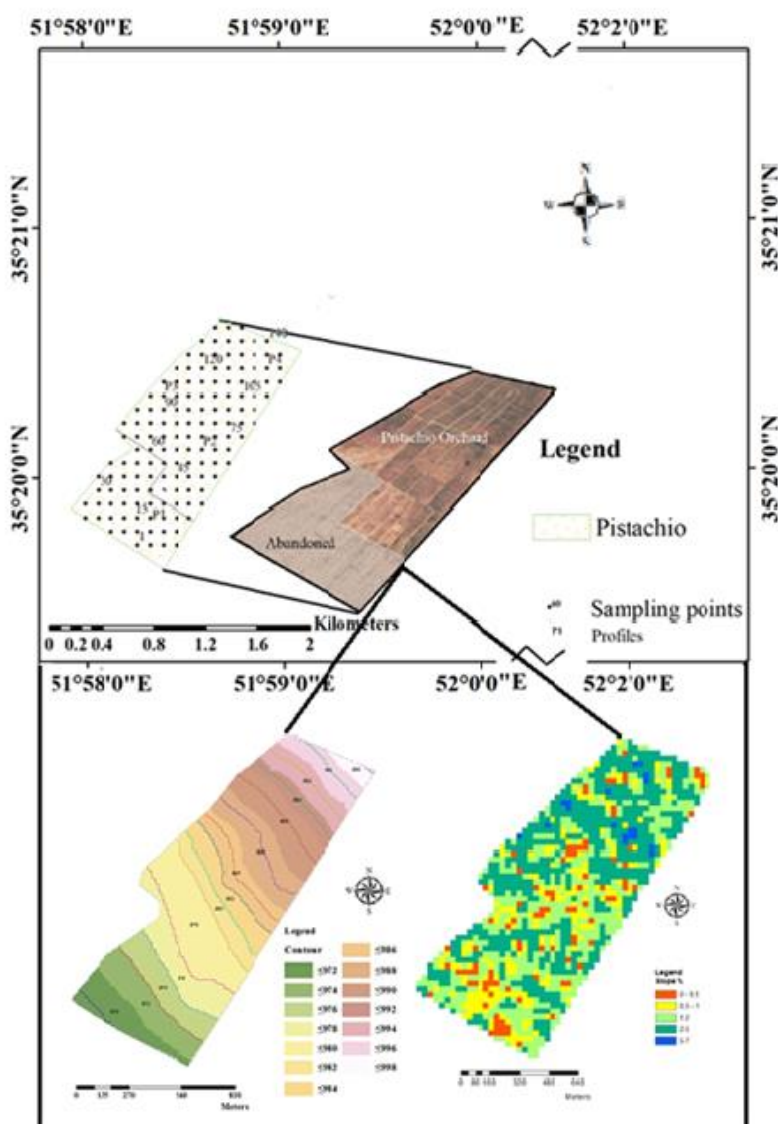
شکل ۱ - نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (چپ) (Q نشان دهنده آبرفت، Q1 زمین لغزش و سنگ‌ریزه، M3 گل‌سنگ گچ‌دار در شمال و جنوب منطقه، M2 ماسه سنگ و گل‌سنگ، و واحد زرد و سفید رنگ منقوطة دار (M-pl) کنگلومرای تشکیلات هزاردره را نشان می‌دهند) و تصویر محدوده مورد مطالعه در مجاورت مخروط افکنه ایوانکی (راست)

از نظر اقلیمی منطقه خشک می‌باشد و در سیستم طبقه‌بندی کوپن در کلاس گرم خشک (B) قرار می‌گیرد. با استفاده از داده‌های سازمان هواشناسی و نرم‌افزار JNSM رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک در منطقه مورد به ترتیب اریدیک و ترمیک تعیین شدند. طبق اطلاعات هواشناسی حاصل از ایستگاه سینوپتیک منطقه ایوانکی میانگین سالیانه دمای هوا ۱۶/۶ درجه سانتی‌گراد است و سردترین ماه سال با میانگین ۲/۹ درجه سانتی‌گراد ژانویه (دی ماه) و گرم‌ترین ماه سال جولای (مرداد ماه) با میانگین ۲۹/۷ درجه سانتی‌گراد

است. سردترین دمای ثبت شده ۳/۴- درجه و گرم‌ترین دمای ثبت شده نیز ۳۸/۷ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارندگی کل سالیانه ۱۲۷ میلی‌متر است که بیشترین بارندگی در ژانویه (دی ماه) روی می‌دهد و خشک‌ترین ماه‌ها هم جولای و آگوست می‌باشند.

نمونه‌برداری

قبل از طراحی نمونه‌برداری بررسی‌های میدانی از منطقه مورد مطالعه؛ اندازه‌گیری هدایت الکتریکی صحرایی و بر آورد خصوصیتی از قبیل وجود سخت‌لایه نمک در سطح خاک و همچنین تغییرات شدید در میزان سنگ و سنگریزه سطحی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی صحرایی تغییرپذیری شدید بین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی را حتی در فواصل کم اثبات نمود. به منظور بررسی تغییرات مکانی شوری در سطح منطقه شبکه منظمی با فواصل ۱۰۰ متر در جهت طولی و عرضی تهیه و مختصات نقاط در سیستم موقعیت یاب GPS وارد شد. شکل ۲ موقعیت مکانی و شبکه نمونه‌برداری منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با استفاده از این شبکه نمونه‌برداری منظم تعداد ۱۰۶ نمونه سطحی به صورت مرکب در سال ۲۰۱۸ جمع‌آوری شد.



شکل ۲- نقشه‌های موقعیت نقاط نمونه‌برداری (بالا)، شیب (پایین سمت چپ) و ارتفاع (پایین سمت راست)

بررسی تغییرات مکانی شوری با استفاده از روش نقشه‌برداری رقومی

تهیه داده‌های خاک

در فرآیند نقشه‌برداری رقومی، داده‌های خاک جهت ارتباط دادن خاک و متغیرهای محیطی استفاده می‌شوند. نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شدند و به منظور تعیین شوری، مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره گل اشباع ۱۰۴ نمونه سطحی جمع‌آوری شده، اندازه‌گیری شد (Nelson, 1986).

متغیرهای محیطی

بر مبنای هدف مطالعه متغیرهای محیطی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی^۸ (DEM) و داده‌های طیفی سنجنش از دور^۹ برای تهیه نقشه شوری بدست آمدند. به منظور استخراج شاخص‌های زمین‌نما از نقشه مدل ارتفاعی رقومی^{۱۰} SRTM تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. مشتقات مختلف زمین‌نما مانند شیب، جهت شیب، انحنای سطح^{۱۱}، انحنای نیم‌رخ^{۱۲}، شاخص خیزی^{۱۳}، فاکتور طول شیب^{۱۴}، سطح مبنای شبکه زهکشی^{۱۵}، فاصله شبکه زهکشی^{۱۶}، شاخص همگرایی^{۱۷}، موقعیت نسبی شیب^{۱۸}، شاخص خیزی^{۱۹}، کل مساحت حوزه آبخیز^{۲۰}، عمق دره^{۲۱}، حوضه زهکشی^{۲۲}، اراضی پست^{۲۳}، سایه‌اندازی تحلیلی^{۲۴} و کانال‌ها^{۲۵} با استفاده از نرم افزار SAGA GIS نسخه ۷/۲ تهیه شد. پس از ورود اطلاعات رقومی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸-OLI با قدرت تفکیک ۳۰ متر مربوط به بازه زمانی مورد مطالعه (۲۰۱۸) در محیط نرم افزار QGIS پردازش اولیه تصاویر رقومی شامل انجام تصحیحات هندسی به منظور زمین مرجع نمودن تصاویر با هدف مختصات‌دار نمودن تصاویر، انجام تصحیحات اتمسفری و رادیومتری به منظور حذف اثرات ذرات معلق در اتمسفر صورت گرفت. همچنین پردازش ثانویه تصاویر ماهواره‌ای شامل تهیه تصاویر مختلف با ترکیب‌های رنگی متفاوت به منظور مشخص نمودن سطوح مختلف شوری، رطوبت و پوشش گیاهی بر مبنای ترکیب رنگی قرمز، سبز و آبی (RGB) و بدست آوردن شاخص‌های رطوبت، شوری و پوشش گیاهی انجام گرفت. شاخص‌های طیفی حاصل از ترکیب باندهای تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ مانند شاخص پوشش گیاهی نرمال شده^{۲۶}، شاخص شوری نرمال شده^{۲۷}، شاخص رطوبت نرمال شده^{۲۸}،

۸. Digital elevation models

۹. Remotely sensed

۱۰. Shuttle Radar Topography Mission

۱۱. Plan Curvature

۱۲. Profile Curvature

۱۳. Wetness index

۱۴. LS-Factor

۸. Channel Network Base Level

۱۶. Channel Network Distance

۱۷. Convergence Index

۱۸. Relative Slope Position

۱۹. Topographic Wetness Index

۲۰. Total Catchment Area

۲۱. Valley Depth

۲۲. Drainage Basin

۲۳. Closed Depressions

۲۴. Analytical Hillshading

۲۵. Channels

۲۶. Normalized Difference Vegetation Index

۲۷. Normalized Difference Salinity Index

۲۸. Normalized Difference Moisture Index

شاخص روشنایی^{۲۹}، شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده^{۳۰} با استفاده از نرم افزار ERDAS محاسبه شد. ۹ شاخص شوری (SI₁-SI₉)^{۳۱} نیز با استفاده از ترکیب باندهای مختلف در محیط نرم افزار ARC GIS تهیه شدند.

نسبت طیفی

نسبت طیفی به معنای تقسیم مقدار درجه‌ی روشنایی یک باند طیفی به باند طیفی قابل انطباق دیگر می‌باشد. این کسر برای آشکار سازی تغییراتی که توسط تغییرات روشنایی تک باندها امکان پذیر نیست، بکار می‌رود و سبب به تصویر کشیده شدن تغییرات شیب منحنی بازتاب‌های طیفی بین دو باند می‌گردد. لازم به ذکر است که این شیب منحنی بسته به وضعیت منطقه و باندهای مختلف متفاوت خواهد بود. محاسبه این نسبت بین درجه روشنایی دو تصویر سبب بوجود آمدن یک تصویر جدید می‌گردد که می‌توان از این تصویر جدید نیز به عنوان یک مولفه برای اعمال سایر روش‌های آشکار سازی استفاده کرد. از تصاویر حاصل از نسبت طیفی به عنوان یک باند در ایجاد تصاویر رنگی مرکب استفاده می‌گردد که برای مطالعه پوشش گیاهی، خاک و شوری خاک بسیار مفید و کاربردی می‌باشند. در این مطالعه از این نسبت‌ها در قالب شاخص پوشش گیاهی، رطوبت و شوری برای بررسی وضعیت رطوبت، پیشروی شوری و تخریب اراضی کشاورزی در طی سالیان مختلف استفاده گردیده است.

شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده

شاخص‌های نسبت طیفی مربوط به پوشش گیاهی به عنوان راهی غیر مستقیم برای دستیابی به وضعیت شوری استفاده می‌گردد. از مهم‌ترین این شاخص‌ها شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده^{۳۲} است. این شاخص بر پایه این حقیقت که کلروفیل موجود در ساختار گیاهان قادر است نور قرمز را جذب و لایه مزوفیل برگ، نور مادون قرمز نزدیک را منعکس سازد، استوار است. مقدار این شاخص از +۱ تا -۱ تغییر می‌کند و توانایی تشخیص مناطق دارای پوشش گیاهی سالم، ناسالم و عاری از پوشش گیاهی را دارد. ارزش عددی +۱ مربوطه به پوشش گیاهی متراکم، مقادیر منفی مربوط به مناطق عاری از پوشش گیاهی مانند آب و مقادیر نزدیک به صفر مربوط به مناطق بدون پوشش گیاهی و یا با پوشش گیاهی ناچیز می‌باشد. مقدار این شاخص از طریق کسر زیر قابل محاسبه می‌باشد (Huete et al., 1985):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن Red باند قرمز و NIR باند مادون قرمز نزدیک است.

شاخص شوری تفاضلی نرمال شده

بر اساس رفتار طیفی خاک‌های بدون پوشش گیاهی، مانند خاک‌های شور، اراضی بایر و بیرون زدگی‌های سنگی، نسبت طیفی از باندهای مرئی سبز با قرمز و مادون قرمز نزدیک جهت شناسایی این مناطق در قالب شاخص‌های شوری تعریف شده است. شاخص تفاضلی شوری نرمال شده^{۳۳} که حاصل تقسیم مجموع باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه به تفاضل آنها است، یکی از این شاخص‌ها می‌باشد. این شاخص برای شناسایی مناطق شور و کم کردن اثر پوشش گیاهی کاربرد دارد و استفاده از آن نسبت به باندهای تک جهت مطالعات شوری مفیدتر می‌باشد:

$$NDSI = \frac{SWIR1 - SWIR2}{SWIR1 + SWIR2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

۲۹. Brightness Index

۳۰. Soil Adjusted Vegetation Index

۳۱. Salinity Index

۳۲. Normalized Difference Vegetation Index

33. Normalized Difference Salinity Index

در این فرمول SWIR1 و SWIR2 نشان دهنده طیف مادون قرمز کوتاه می‌باشند (Al-Khaier 2003).

شاخص رطوبت تفاضلی نرمال شده^{۳۴}

هنگام بروز مشکل شوری پوشش گیاهی به شدت تحت تاثیر استرس آب می‌باشد و بنابراین وضعیت رطوبتی نقش به سزایی در بقای پوشش گیاهی و یا نابودی آن دارد. با در دست داشتن اطلاعات دقیق زمانی تغییرات رطوبتی خصوصاً در مناطق تحت آبیاری می‌توان تصمیمات مدیریتی صحیحی را جهت حفظ پوشش گیاهی و مدیریت بحران شوری اتخاذ نمود. این شاخص با استفاده از کسر زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2}$$

رابطه ۳

در این فرمول SWIR2 و NIR به ترتیب مادون قرمز نزدیک و کوتاه می‌باشند (Gao, 1996).

مدل سازی مکانی

مدل رگرسیون جنگل تصادفی

در این مرحله داده‌های محیطی و خاک با یکدیگر از طریق مدل رگرسیون جنگل تصادفی ارتباط یافته و در نهایت نقشه قابلیت هدایت الکتریکی در منطقه مورد مطالعه بدست آمد. لایه‌های مختلف متغیرهای کمکی تولید شده با اندازه پیکسل ۳۰ متری و همچنین مقادیر مختلف شوری خاک وارد محیط نرم افزار R گردید و با استفاده از بسته "Ranger" مدل رگرسیون جنگل تصادفی اجرا گردید. در این تکنیک اهمیت متغیرها قابل بررسی می‌باشد، به نحوی که مقادیر صحیح متغیرها با مقادیری که به طور تصادفی برای هر درخت تولید شده جایگزین می‌شود و اثر آن بر روی نتایج پیش‌بینی اندازه‌گیری می‌شود. اگر این جایگزینی سبب افزایش خطای اندازه‌گیری شود نشان دهنده اهمیت بیشتر متغیر می‌باشد. جنگل تصادفی برای هر درخت و هر گره در درخت، هنگام انتخاب یک متغیر در هر تقسیم، از تصادفی بودن استفاده می‌کند و برای هر درخت، یک کیسه از داده‌های آموزشی استفاده می‌شود. علاوه بر این، تنها یک زیرمجموعه تصادفی از متغیرهای پیش‌بینی برای انتخاب نقطه تقسیم در هر گره در نظر گرفته می‌شود. در هر بار نمونه‌گیری با جایگزینی اطلاعات، برخی اطلاعات هرگز نمونه‌گیری نمی‌شوند و برخی دیگر شاید چند بار نمونه‌گیری شوند. به عبارت دیگر برخی داده‌های ورودی برای برخی درخت‌ها در اصطلاح نمونه خارج از کیسه^{۳۵} خواهند بود یعنی در ایجاد برخی درخت‌ها مشارکت نخواهد داشت.

ارزیابی عملکرد مدل

به منظور ارزیابی عملکرد مدل رگرسیون جنگل تصادفی برای پیش‌بینی مکانی تغییرات شوری از شاخص‌های آماری ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^{۳۶} استفاده گردید (Willmott, 1982). در این فرمول N تعداد مشاهدات، Pi مقدار پیش‌بینی شده متغیر، Yi مقدار اندازه‌گیری شده متغیر، \bar{y} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. یک مدل خوب، دارای حداقل مقدار ریشه میانگین مربعات خطای تخمین می‌باشد (Finke, 2012).

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (Y_i - P_i)^2}$$

رابطه ۴

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2}$$

رابطه ۵

۳۴. Normalized Difference Water Index

35. Out-of-bag (OOB)

36 Normalized Root Mean Square Deviation

روش حذف برگشتی^{۳۷}

حذف ویژگی برگشتی یک انتخاب رفت و برگشتی از متغیرهای کمکی منتخب و متناسب مورد استفاده در مدل پیش‌بینی شوری است. این تکنیک با ساختن مدل اولیه بر روی کل مجموعه داده‌ها با استفاده از تمامی متغیرهای کمکی، اقدام به محاسبه امتیاز اهمیت نسبی هر متغیر کمکی شرکت کننده در پیش‌بینی می‌کند. سپس متغیرهای کمکی با کمترین میزان اهمیت حذف شده و مدل دوباره ساخته می‌شود و امتیازهای اهمیت نسبی مجدداً محاسبه می‌شوند (Alarape et al., 2022). در عمل، این روش تعداد متغیرهای کمکی مورد نیاز برای پیش‌بینی را مشخص می‌کند. بنابراین، اندازه زیرمجموعه یک پارامتر تنظیم برای حذف ویژگی برگشتی است. با استفاده از این روش تعداد متغیر کمکی بهینه انتخاب و از این متغیرها برای آموزش مدل نهایی به منظور کاهش میزان خطا و پیچیدگی مدل استفاده می‌شود (Guyon et al., 2002). برای یافتن تعداد بهینه ویژگی‌های کمکی، اعتبارسنجی متقاطع^{۳۸} برای امتیازدهی به متغیرهای کمکی استفاده می‌شود. در این تحقیق برای اجرای مدل حذف برگشتی از بسته caret در محیط نرم افزار R با ارزیابی متقاطع ۱۰ تکرار و با در نظر گرفتن حداقل میانگین ریشه مربعات خطا برای انتخاب تعداد بهینه متغیر کمکی استفاده گردید.

بررسی تغییرات مکانی شوری نمونه‌های خاک سطحی با استفاده از روش معکوس وزنی فاصله^{۳۹}

در این مطالعه برای بررسی تغییرپذیری مکانی شوری خاک در نمونه‌های خاک سطحی (۲۰ سانتی متر بالایی) از روش معکوس وزنی فاصله در محیط نرم‌افزار Arc- استفاده شد. در صورت نرمال نبودن داده‌ها از روش‌های تبدیل داده برای نزدیک کردن توزیع داده‌ها به توزیع نرمال استفاده گردید.

یافته‌های پژوهش و بحث

نتایج آماری قابلیت هدایت الکتریکی نمونه‌های خاک

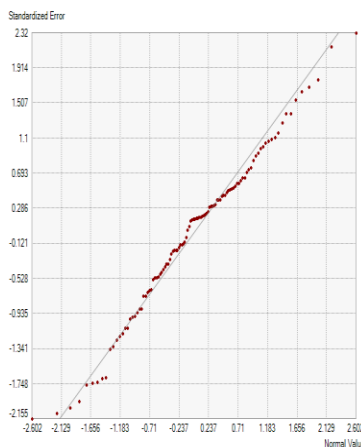
بررسی خصوصیات آمار توصیفی مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی نمونه‌های سطحی خاک (میانگین شوری) در منطقه مورد مطالعه را $51/98$ dS/m نشان داد که براساس تقسیمات شوری انجام شده توسط آزمایشگاه شوری وزارت کشاورزی ایالات متحده منطقه مورد مطالعه در دسته شوری خیلی (جدول ۱) زیاد قرار دارد (USSL Staff, 1954). ضریب تغییرات (CV) آماره‌ای مناسب برای نشان دادن میزان تغییرپذیری ویژگی‌های خاک است. مقادیر کمتر از $0/1$ ، $1-0/1$ و بیشتر از 1 به ترتیب به عنوان نماینده تغییرپذیری ضعیف، متوسط و شدید ویژگی‌ها شناخته می‌شوند (Nielsen & Bouma, 1985; Lv et al., 2013). مقدار ضریب تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی نمونه‌های مورد مطالعه $7/79$ بود که حاکی از تغییرات شدید قابلیت هدایت الکتریکی در منطقه مطالعاتی است. مقدار زیاد ضریب تغییرات و اختلاف قابل توجه بین مقادیر حداقل ($4/25$ dS/m) و حداکثر ($173/2$ dS/m) هدایت الکتریکی نمونه‌های مورد مطالعه را می‌توان مربوط به تفاوت مواد مادری، کاربری اراضی، مدیریت آبیاری، درصد سنگریزه و تغییرات بافتی در منطقه مورد مطالعه دانست. نتایج تحقیقات دیگری نیز تغییرات شوری خاک و مقادیر زیاد ضریب تغییرات را مرتبط با ترکیبی از عوامل مدیریتی، کاربری اراضی، تغییرات بافتی و زهکشی نشان داد (Jahanbazi et al., 2023). مقادیر چولگی و کشیدگی داده‌ها به ترتیب $0/83$ و $-0/15$ بود که این مقدار چولگی حاکی از غیرنرمال بودن توزیع داده‌ها و غیر یکنواختی واریانس بود. همچنین نتایج حاصل از آزمون شاپیرو-ویلک برای تست نرمالیتی داده‌ها حاکی از پایین‌تر بودن سطح معنی‌داری از $0/05$ و بنابراین تاییدی بر نرمال نبودن داده‌ها بود. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود داده‌ها در بخش ابتدایی و انتهایی نمودار از خط ۱ به ۱ مستقیم فاصله دارند که نشان‌دهنده چولگی داده‌ها

^{۳۷} Recursive Feature Elimination or Backwards Feature Selection

^{۳۸} Cross validation

^{۳۹} Inverse Distance Weight

می‌باشد. لازم به ذکر است که احتمال وجود داده پرت مورد بررسی قرار گرفت و این فرضیه رد شد. از روش‌های تبدیلی مختلف مانند ریشه دوم، لگاریتمی و توانی برای نزدیک کردن توزیع داده‌ها به توزیع نرمال استفاده شد که با توجه به عدم تغییر مقدار ضریب چولگی داده‌ها، توزیع داده‌ها به توزیع نرمال نزدیک نشد و بنابراین از داده‌های اصلی برای انجام مطالعه استفاده شد.



شکل ۳- نمودار نرمالیتی داده‌ها

جدول ۱- طبقات شوری استفاده شده برای کلاس‌بندی شوری در منطقه مطالعاتی (USSL Staff, 1954).

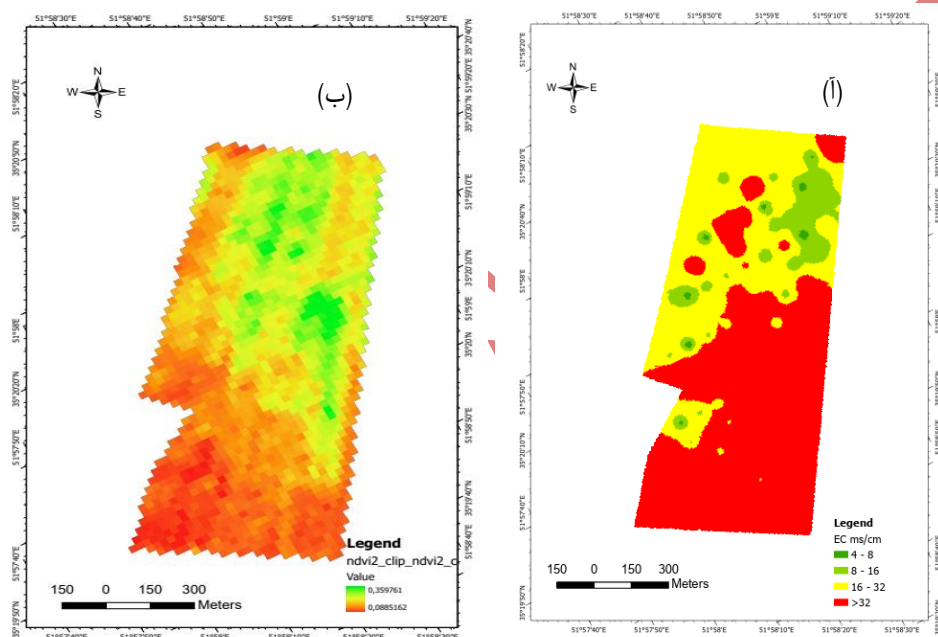
شوری (dSm ⁻¹)	طبقات شوری
< ۲	غیر شور
۲-۴	شوری خیلی کم
۴-۸	شوری کم
۸-۱۶	شوری متوسط
۱۶-۳۲	شوری زیاد
> ۳۲	شوری خیلی زیاد

بررسی تغییرات مکانی و مساحت طبقات شوری نمونه‌های خاک سطحی با روش معکوس وزنی فاصله

از این روش برای نمایش نقشه تغییرات هدایت الکتریکی در نمونه‌های خاک سطحی (۲۰ سانتی متر بالایی) استفاده شد (شکل ۴). مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی در سطح منطقه مورد مطالعه بیشتر از 4 dS/m بوده و بنابراین کل منطقه به عنوان خاک شور طبقه‌بندی شد. بیشترین مقدار EC_e در وسط باغ که زیر کشت درختان پسته است مشاهده شد و به دنبال آن منطقه بایر واقع در پایین دست شیب که روانابی که از ناحیه شور بالا دست عبور می‌کند را دریافت کرده است، قرار داشت. نقشه پراکنش شوری نشان می‌دهد که در قسمت میانی باغ شوری زیاد بوده که دلیل آن علاوه بر شوری اولیه حاصل از مواد مادری، شوری ثانویه حاصل از مدیریت نامناسب باغ می‌باشد. برای جلوگیری از انتشار املاح از این بخش به کل باغ اقدامات مدیریتی خاص مانند جمع‌آوری لایه سطحی شور و عدم آبیاری این قسمت توصیه گردید. جدول ۲ مساحت کلاس‌های قابلیت هدایت الکتریکی در منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود خاک‌های با شوری بیشتر از ۳۲ dS/m حدود ۳۳٪ از منطقه مورد مطالعه را اشغال کردند (جدول ۲).

جدول ۲- کلاس‌های قابلیت هدایت الکتریکی و مساحت آنها

مساحت (%)	مساحت (ha)	EC (dSm ⁻¹)
۳۲/۸۰	۳۴/۵۲	۴-۸
۱۹/۶۵	۲۰/۶۸	۸-۱۶
۱۴/۵۹	۱۵/۲۶	۱۶-۳۲
۳۲/۹۶	۳۴/۷۲	>۳۲
۱۰۰/۰۰	۱۰۵/۲۷	جمع



شکل ۴- الف: تغییرات مکانی طبقات شوری نمونه‌های خاک سطحی، ب: شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده

اهمیت فاصله نمونه‌برداری در بررسی پراکنش شوری خاک

انتخاب فاصله نمونه‌برداری بهینه برای بررسی تغییرات شوری به منظور ارائه راهکارهای مدیریتی در مطالعات بزرگ مقیاس مانند مطالعه حاضر، نیازمند توجه به وضعیت مواد مادری و تغییرات آن در منطقه، تغییرات بافتی، توپوگرافی و سایر عوامل مدیریتی و محیطی است (Wang et al., 2017). با توجه به دامنه تغییرات زیاد شوری، تغییرات مواد مادری و بافت، درصد سنگریزه، کاربری اراضی، مدیریت آبیاری در منطقه و نتایج حاصل از مشاهدات صحرائی فاصله نمونه‌برداری ۱۰۰ متر و نمونه‌برداری مرکب برای پوشش حداکثری تغییرات شوری در منطقه مورد استفاده قرار گرفت که با توجه به جداسازی مناطق با شوری بالا و مساحت کم بصورت لکه‌ای این روش کارایی لازم برای مطالعه شوری در منطقه را داشته است (شکل ۴). منطقه مورد مطالعه در تقسیمات ژئومورفولوژی به عنوان دشت (شیب کمتر از ۲ درصد) طبقه‌بندی شد و می‌توان اذعان داشت دلیل شوری بسیار شدید لکه‌ای و رخنمون نمک در سطح خاک در بعضی از نقاط مانند بخشی از کاربری ۲ که در نزدیکی کاربری ۱ قرار دارد، عمدتاً تفاوت مواد مادری است (شکل ۵). مدیریت آبیاری

جویچه‌ای در این بخش سبب پخشیدگی شوری در کل منطقه شده و در واقع این ناحیه به عنوان یک چشمه نمکی در منطقه مورد مطالعه عمل می‌کند. همچنین نتایج اندازه‌گیری قابلیت هدایت الکتریکی حاکی از مقادیر بحرانی آن، (بیش از ۱۲۰ dS/m)، در این ناحیه بود و بنابراین پیشنهاد قطع آبیاری و برداشت لایه سطحی خاک در این ناحیه برای جلوگیری از پیشروی شوری در کل منطقه داده شد. این نتایج نشان داد که بازدید صحرایی و انتخاب فاصله نمونه‌برداری بهینه برای بررسی دقیق تغییرات شوری در مطالعات بزرگ مقیاس این چینی ضروری می‌باشد. در مطالعات دیگری نیز محققین در تلاش برای یافتن روش مناسب نمونه‌برداری و تعریف یک فاصله بهینه برای مطالعات شوری بوده‌اند (Zhang et al., 2014; Wang et al., 2017). نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که تغییرات افقی شوری وابسته به فواصل نمونه‌برداری بوده و تعریف فاصله بهینه راهکاری کاربردی برای کاهش میزان عدم قطعیت نتایج مطالعات است.

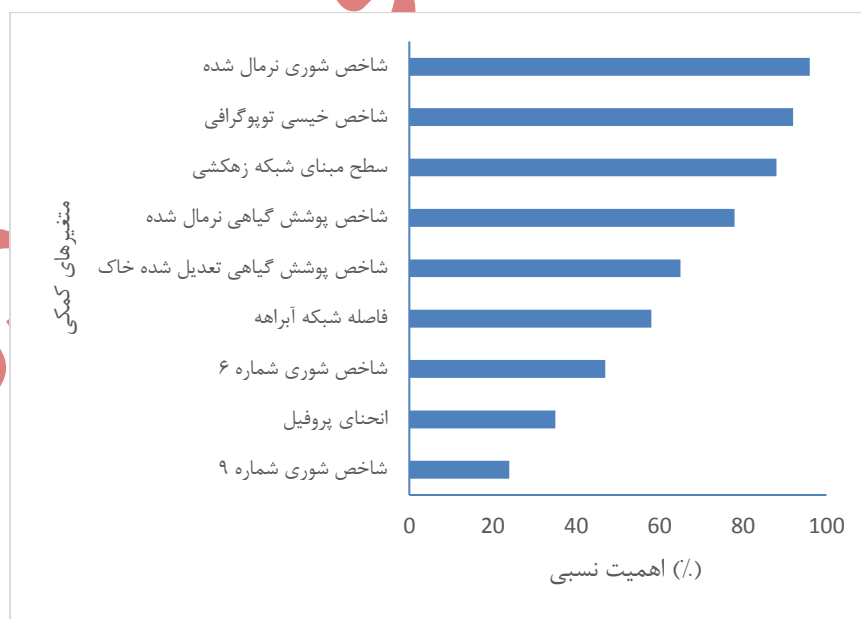


شکل ۵- تصاویری از مشاهده عوارض سطحی نمک در کاربری ۲

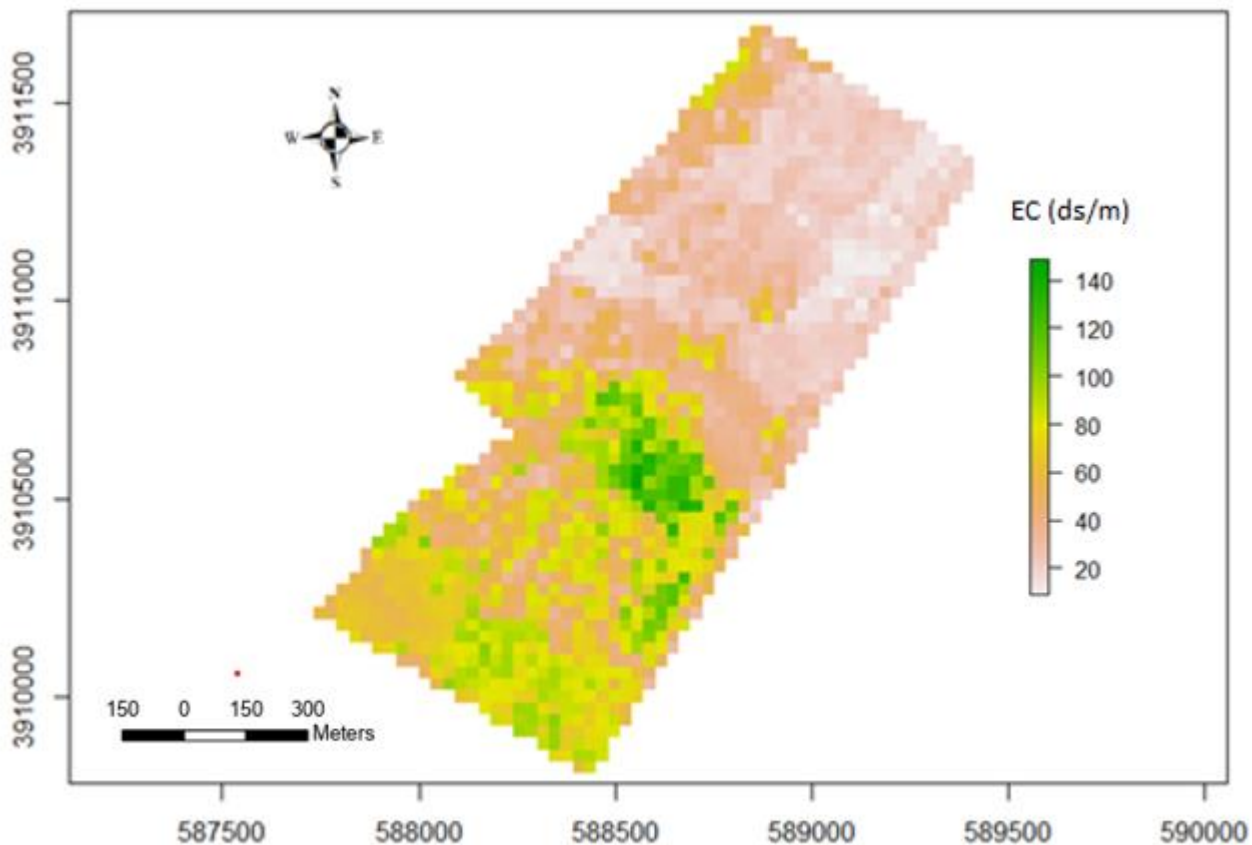
بررسی تغییرات مکانی شوری نمونه‌های خاک سطحی با نقشه‌برداری رقومی خاک

پیش از برآزش مدل با استفاده از بررسی نتایج آزمون همبستگی بین متغیرهای کمکی محیطی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و همچنین پارامترهای زمین‌نما مستخرج شده از مدل رقومی ارتفاع، اقدام به استفاده از روش حذف برگشتی برای به دست آوردن مهم‌ترین متغیرهای محیطی موثر در پیش‌بینی گردید و سپس با استفاده از متغیرهای معرفی شده توسط حذف برگشتی مدل رگرسیون جنگل تصادفی اجرا شد. در مطالعات دیگری نیز از مدل حذف برگشتی برای کاهش پیچیدگی مدل و ساده‌سازی آن استفاده شده است (Guyon et al., 2002; Kuhn&Johnson, 2019 Alarape et al., 2022). مدل حذف برگشتی با استفاده از ارزیابی متقاطع با ۱۰ تکرار و با در نظر گرفتن حداقل مقدار میانگین ریشه مربعات خطا و تعداد ۵۰۰ درخت انجام شد. تعداد متغیر استفاده شده در هر گره برای طبقه‌بندی ۵ و میزان خطای خارج از کیسه حدود ۴۷ درصد بوده است. برآورد OOB از میزان خطای یک معیار مفید برای تمایز بین طبقه‌بندی کننده‌های تصادفی جنگل است که با استفاده از آن می‌توانیم تعداد درخت‌ها یا تعداد متغیرهایی را که باید در نظر گرفته شوند را تغییر دهیم و ترکیبی را انتخاب کنیم که کمترین مقدار را برای این میزان خطا ایجاد کند. با بررسی نتایج همبستگی پارامترهای زمین‌نما از جمله مدل رقومی ارتفاع، موقعیت در دامنه و عمق دره که دلیل ایجاد خطای پیش‌بینی هستند، پارامترهای دارای همبستگی بالا با یکدیگر حذف شدند. با بررسی همبستگی بین شاخص‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای اقدام به حذف شاخص‌های با همبستگی بالا (شاخص شوری شماره ۱، ۷ و ۸) شد و در نهایت مدل رفت و برگشتی مجدداً اجرا گردید. پس از حذف شاخص‌های با همبستگی بالا، مهم‌ترین متغیرهای کمکی شاخص شوری نرمال شده، شاخص خیسی توپوگرافی، سطح مبنای شبکه زهکشی، شاخص پوشش

گیاهی نرمال شده و شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک معرفی شدند (شکل ۶). سپس با استفاده از مهم‌ترین متغیرهای کمکی معرفی شده توسط تکنیک حذف برگشتی، مدل رگرسیون جنگل تصادفی اجرا و پیش‌بینی شوری انجام شد. ارزیابی کارایی مدل رگرسیون جنگل تصادفی برای پیش‌بینی شوری در منطقه مورد مطالعه با معیارهای برازش خط مورد بررسی قرار گرفت و مقدار ضریب تبیین 0.48 و میانگین مقدار خطا $15/44$ بدست آمد. مقدار شاخص NRMSE نیز 29% بود. نقشه پیش‌بینی شوری حاصل از مدل رگرسیون جنگل تصادفی برای پیش‌بینی پراکنش شوری با مشاهدات میدانی تطابق داشته و قسمت جنوبی منطقه را به عنوان بخش بحرانی نشان می‌دهد (شکل ۷). با توجه به اهمیت مطالعات شوری و مشکلات ناشی از آن در کشور به نظر می‌رسد برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی آن می‌توان از مدل‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی با درجه اطمینان بالایی استفاده کرد. ماهیت رقومی نقشه‌های حاصل از این مدل‌ها سبب به روز رسانی اطلاعات با هزینه کمتر و با سرعت بیشتری می‌شود (Wang et al., 2020, Mohammadifar et al., 2021). همچنین این نقشه‌ها راهنمای بسیار مناسبی برای زارعین منطقه خواهند بود چرا که با توجه به وضعیت بحرانی زمین در بخش جنوبی منطقه در طول زمان روال پیشروی شوری قابل مشاهده و تصمیم‌گیری برای اقدامات اصلاحی با سهولت بیشتر صورت خواهد گرفت (Hassan et al., 2021; De Santo, et al., 2022). نتایج حاصل از اجرای مدل رگرسیون جنگل تصادفی برای پیش‌بینی شوری نشان داد که حضور متغیرهای کمکی زیاد می‌تواند سبب ایجاد خطا در پیش‌بینی شود. دلیل این امر ایجاد پیچیدگی در مدل و همچنین افزایش سهم متغیرهای با همبستگی بالا با یکدیگر می‌باشد (Guyon et al., 2002; Kuhn&Johnson, 2019 Alarape et al., 2022). در این مطالعه قبل از بررسی نتایج آزمون همبستگی، متغیر شیب به عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای کمکی توسط مدل معرفی شد ولی از آنجایی که در واقعیت شیب زمین کمتر از 2 درصد می‌باشد لذا نمی‌تواند تغییرات را به درستی نشان دهد. همبستگی زیاد بین شیب با سایر پارامترهای مستخرج از زمین‌نما خطایی بود که پس از بررسی همبستگی‌ها و اجرای روش حذف برگشتی، به عنوان متغیر در پیش‌بینی معرفی نشد. بنابراین نتایج این مطالعه مانند دیگر مطالعات انجام شده در این زمینه نشان داد که انجام آزمون همبستگی بین متغیرهای کمکی قبل از اجرای روش رفت و برگشتی ضروری می‌باشد (Guyon et al., 2002; Kuhn&Johnson, 2019).



شکل ۶- درصد اهمیت نسبی متغیرهای کمکی در پیش‌بینی نقشه شوری خاک



شکل ۷- نقشه پیش‌بینی مقادیر شوری با استفاده از مدل رگرسیون جنگل تصادفی

اهمیت شاخص‌های نسبت طیفی در بررسی تغییرپذیری شوری

شاخص‌های نسبت طیفی سهم مهمی در پیش‌بینی شوری با مدل رگرسیون جنگل تصادفی داشتند و از ۵ متغیر کمکی اصلی ۳ متغیر مربوط به شاخص‌های نسبت طیفی بود. دلیل این امر مسطح بودن منطقه مورد مطالعه و کاهش سهم پارامترهای زمین‌نما می‌باشد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود دو متغیر کمکی مهم استخراج شده از نقشه رقومی ارتفاعی شاخص خیسی توپوگرافی

و سطح مبنای شبکه است که هر دو در ارتباط با هموار بودن منطقه هستند (Peng et al. 2019). با توجه به رخنمون نمک در سطح خاک و آثار آبیاری جویچه‌ای، مدل پیش‌بینی شوری در سطح خاک با استفاده از طیف‌های تصاویر ماهواره‌ای سهم به سزایی در ثبت این تغییرات در خاک سطحی دارند. در حالی که مدل پیش‌بینی شوری برای عمق خاک نتایج کاملاً متفاوتی دارد، از جمله اینکه اهمیت شاخص‌های نسبت طیفی در پیش‌بینی شوری کاهش پیدا کرد (De Santos et al., 2022).

به طور کلی نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های نسبت طیفی حاصله از آن به عنوان داده‌های کمکی برای تهیه نقشه شوری بسیار مفید می‌باشد، اما در هر صورت باید به عدم قطعیت داده‌ها توجه داشت. خاک‌های شور مناطق خشک همانند منطقه مورد مطالعه، به دلیل تنوع زیاد مورفولوژیکی و ترکیب شیمیایی، بازتاب‌های مختلفی دارند که این امر سبب ایجاد محدودیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در مطالعات شوری خاک می‌گردد. در این گونه مناطق عواملی همچون مقدار و کانی‌شناسی نمک، رطوبت خاک، رنگ خاک و زبری بر بازتاب از سطح نمک تأثیر می‌گذارند (Hunt et al., 1972; Hassan et al., 2022). به طور کلی تشخیص مناطق با شوری زیاد و متوسط با کمک روش سنجش از دور و شاخص‌های نسبت طیفی به مراتب بسیار راحت‌تر از مناطقی است که شوری کم دارند، زیرا فراوانی و خلوص نمک و همچنین میزان رطوبت تأثیر بسزایی در دقت داده‌های حاصله دارد، بنابراین با توجه اقلیم خشک منطقه، شوری زیاد و رطوبت کم استفاده از شاخص‌های نسبت طیفی به عنوان داده‌های کمکی برای تهیه نقشه شوری در منطقه مورد مطالعه کاربردی بود (Saha, 2011). لازم به ذکر است که در بسیاری از مطالعات شوری انجام شده تنها به استفاده از شاخص پوشش گیاهی نرمال شده که به وضعیت و تراکم پوشش گیاهی اشاره دارد اکتفا می‌شود که باید در نظر داشت این شاخص غیر مستقیم بوده و به تنهایی قادر به تشخیص تغییرات شوری نیست. این شاخص، شوری را عامل اصلی کاهش پوشش گیاهی در نظر می‌گیرد و تأثیر سایر عوامل مانند مدیریت خاک، آب و حاصلخیزی خاک را نادیده می‌گیرد. همچنین در مناطق با شوری زیاد مانند منطقه مورد مطالعه درختان پسته و دیگر گیاهان بومی منطقه تا حد زیادی خود را با شوری انطباق داده‌اند و توانایی بقا در سطوح مختلف شوری را دارند. لذا می‌توان این گونه استنباط نمود که کاربرد شاخص پوشش گیاهی به تنهایی برای مطالعات شوری برای همه انواع گیاهان کافی نمی‌باشد و احتمال ایجاد خطا مدل‌سازی وجود دارد (Huang et al., 2021; Singh et al., 2022). این امر استفاده از دیگر شاخص‌های نسبت طیفی مانند شاخص‌های شوری به کار برده شده در این پژوهش را ضروری می‌سازد (Aikheir, 2003; Kılıc et al., 2022; Aksoy et al., 2022).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از داده‌های حاصله از مدل رقومی ارتفاع و ماهواره لندست ۸، نقشه شوری خاک سطحی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش رگرسیون جنگل تصادفی تهیه گردید. نتایج نشان داد که مهم‌ترین متغیرهای کمکی انتخاب شده توسط مدل رگرسیون جنگل تصادفی برای پهنه‌بندی شوری خاک شاخص شوری نرمال شده، شاخص خیزی توپوگرافی، سطح مبنای شبکه زهکشی، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده خاک هستند. با توجه به انتخاب مهم‌ترین متغیرهای کمکی توسط مدل، شاخص‌های نسبت طیفی سهم مهمی در مدل پیش‌بینی شوری داشتند و از ۵ متغیر کمکی محیطی ۳ متغیر مربوط به شاخص‌های نسبت طیفی بودند. همچنین نتایج حاصل از بررسی آزمون همبستگی متغیرهای کمکی و اجرای مدل حذف رفت و برگشتی نشان داد که حضور متغیرهای کمکی زیاد می‌تواند سبب ایجاد خطا در پیش‌بینی شود. دلیل این امر ایجاد پیچیدگی در مدل و همچنین افزایش سهم متغیرهای با همبستگی بالا با یکدیگر می‌باشد که روش حذف رفت و برگشتی با شناسایی مهم‌ترین متغیرهای محیطی کمک شایانی به ساده‌سازی مدل می‌کند. نقشه پیش‌بینی شوری حاصل از مدل رگرسیون جنگل تصادفی با مشاهدات میدانی تطابق داشته و قسمت جنوبی منطقه را به عنوان بحرانی‌ترین بخش منطقه از نظر شوری نشان داد. از جمله دلایل عمده شوری در منطقه مواد مادری شور، کیفیت آب زیرزمینی و آب آبیاری، تبخیر و تعرق زیاد و حرکت رو به بالای املاح بود. چالش اصلی کشاورزی در خاک‌های شور منطقه مورد مطالعه روش آبیاری نامناسب و عدم توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، کیفیت آب آبیاری،

نوع محصول زراعی و وارسته آن، کاربری زمین، میزان بارندگی، تبخیر و تعرق سالانه و تغییرات اقلیمی است. پایش تغییرات و انجام اقدامات اصلاحی مانند آماده‌سازی زمین، از بین بردن سخت لایه، بررسی عمق تجمع نمک و آهک، تسطیح زمین، بررسی وضعیت حاصلخیزی و غنی‌سازی خاک قبل از کشت برای کشاورزی در خاک و آب نامتعارف ضروری می‌باشد. همچنین با توجه به دقت قابل قبول مدل رگرسیون جنگل تصادفی برای پیش‌بینی شوری در منطقه، تغییرپذیری مکانی زیاد شوری خاک و روند افزایشی آن در منطقه استفاده از متغیرهای کمکی با دقت بیشتر برای تهیه نقشه شوری منطقه و بنابراین پایش روند تغییرات شوری و کیفیت خاک در منطقه از جمله موارد پیشنهادی برای مطالعات بعدی می‌باشد.

منابع

جهانبازی، لیلا؛ میرخانی، رایحه و قوامی، محمد سجاد (شهریور ۱۳۹۸). امکان سنجی تشخیص روند تغییرات شوری با استفاده از داده‌های سنجش از دور. *شانزدهمین کنگره علوم خاک ایران، زنجان، ایران*.

References

- Abbas, A., Khan, S., Hussain, N., Hanjra, M. A., & Akbar, S. (2013). Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach. *Physics and chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 55, 43-52.
- Aksoy, S., Yildirim, A., Gorji, T., Hamzehpour, N., Tanik, A., & Sertel, E. (2022). Assessing the performance of machine learning algorithms for soil salinity mapping in Google Earth Engine platform using Sentinel-2A and Landsat-8 OLI data. *Advances in Space Research*, 69(2), 1072-1086.
- Alarape, M. A., Ameen, A. O., & Adewole, K. S. (2021). Hybrid students' academic performance and dropout prediction models using recursive feature elimination technique. In *Advances on Smart and Soft Computing: Proceedings of ICACIn 2021* (pp. 93-106). Singapore: Springer Singapore.
- Al-Khaier, F. (2003). Soil Salinity Detection Using Satellite Remote Sensing, ITC MSc. Thesis, Supervisor: Bastiaanssen, ITC, Netherlands.
- Allbed, A., Kumar L., & Sinha, P. (2014). Mapping and Modeling Spatial Variation in Soil Salinity in the Al Hassa Oasis Based on Remote Sensing Indicators and Regression Techniques. *Remote Sensing*, 6, 1137-1157.
- Dos Santos, E. P., da Silva, D. D., do Amaral, C. H., Fernandes-Filho, E. I., & Dias, R. L. S. (2022). A Machine Learning approach to reconstruct cloudy affected vegetation indices imagery via data fusion from Sentinel-1 and Landsat 8. *Computers and Electronics in Agriculture*, 194, 106753.
- Elhag, M. (2016). Evaluation of different soil salinity mapping using remote sensing techniques in arid ecosystems, Saudi Arabia. *Journal of Sensors*, 2016.
- Finke, P. A. (2012). On digital soil assessment with models and the Pedometrics agenda. *Geoderma*, 171, 3-15.
- Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.
- Guyon, I., Weston, J., Barnhill, S., & Vapnik, V. (2002). Gene selection for cancer classification using support vector machines. *Machine learning*, 46, 389-422.
- Hammam, A. A., & Mohamed, E. S. (2020). Mapping soil salinity in the East Nile Delta using several methodological approaches of salinity assessment. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(2), 125-131.
- Hassan, R., Ahmed, Z., Islam, M. T., Alam, R., & Xie, Z. (2021). Soil Salinity Detection Using Salinity Indices from Landsat 8 Satellite Image at Rampal, Bangladesh. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 4, 1-12.
- Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing [Erratum: December 2021, Vol. 32 (8), p. 2719].
- Hunt, G. R., JW, S., & CJ, L. (1972). Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: V. Halides, phosphates, arsenates, vanadates and borates.
- Huete, A. R., Jackson, R. D., & Post, D. F. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote sensing of environment*, 17(1), 37-53.
- Jahanbazi, L., Mirkhani, R. & Qavami, M. S. (2018, September). Possibility of salinity changes detect by using remote sensing data. The focus of the article: Pedometry and Soil Evaluation, 16th Iran Soil Science Congress, Zanjan, Iran. (In Persian)

- Jahanbazi, L., Heidari, A., Mohammadi, M. H., & Kuniushkova, M. (2023). Salt accumulation in soils under furrow and drip irrigation using modified waters in Central Iran. *Eurasian Journal of Soil Science*, 12(1), 63-78.
- Kilic, O. M., Budak, M., Gunal, E., Acir, N., Halbac-Cotoara-Zamfir, R., Alfarraj, S., & Ansari, M. J. (2022). Soil salinity assessment of a natural pasture using remote sensing techniques in central Anatolia, Turkey. *Plos one*, 17(4), e0266915.
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2019). Feature engineering and selection: A practical approach for predictive models. Chapman and Hall/CRC.
- Lv, Z. Z., Liu, G. M., Yang, J. S., Zhang, M. M., He, L. D., Shao, H. B., & Yu, S. P. (2013). Spatial variability of soil salinity in Bohai Sea coastal wetlands, China: Partition into four management zones. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 147(4), 1201-1210.
- McBratney, A. B., Santos, M. M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52.
- Metternicht, G. I., & Zinck, J. A. (2003). Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote sensing of Environment*, 85(1), 1-20.
- Mohammadifar, A., Gholami, H., Golzari, S., & Collins, A. L. (2021). Spatial modelling of soil salinity: deep or shallow learning models. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 39432-39450.
- Nielsen, D. R. (1985). Soil spatial variability. In *Soil Spatial Variability. Proc. Workshop, 1985* (pp. 1-2). ISSS and SSSA.
- Peng, J., Biswas, A., Jiang, Q., Zhao, R., Hu, J., Hu, B., & Shi, Z. (2019). Estimating soil salinity from remote sensing and terrain data in southern Xinjiang Province, China. *Geoderma*, 337, 1309-1319.
- Saha, S. K. (2012). Microwave remote sensing in soil quality assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 34-39.
- Scudiero, E., Corwin, D. L., & Skaggs, T. H. (2015, November). Regional-Scale Soil Salinity Assessment Using Landsat ETM+. In *ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings (2015)*. ASA-CSSA-SSSA.
- Singh, G., Bundela, D. S., Sethi, M., Lal, K., & Kamra, S. K. (2010). Remote Sensing and Geographic Information System for Appraisal of Salt- Affected Soils in India. *Journal of environmental quality*, 39(1), 5-15.
- Singh, A. (2022). Soil salinity: A global threat to sustainable development. *Soil Use and Management*, 38(1), 39-67.
- Suleymanov, A., Abakumov, E., Suleymanov, R., Gabbasova, I., & Komissarov, M. (2021). The soil nutrient digital mapping for precision agriculture cases in the trans-ural steppe zone of Russia using topographic attributes. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), 243.
- Staff, U. S. L. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture handbook*, 60, 83-100.
- Vermeulen, D., & Van Niekerk, A. (2017). Machine learning performance for predicting soil salinity using different combinations of geomorphometric covariates. *Geoderma*, 299, 1-12.
- Wang, Z., Zhao, G., Gao, M., & Chang, C. (2017). Spatial variability of soil salinity in coastal saline soil at different scales in the Yellow River Delta, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 1-12.
- Wang, J., Ding, J., Yu, D., Teng, D., He, B., Chen, X., ... & Su, F. (2020). Machine learning-based detection of soil salinity in an arid desert region, Northwest China: A comparison between Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI. *Science of the Total Environment*, 707, 136092.
- Wang, J., Peng, J., Li, H., Yin, C., Liu, W., Wang, T., & Zhang, H. (2021). Soil salinity mapping using machine learning algorithms with the Sentinel-2 MSI in arid areas, China. *Remote Sensing*, 13(2), 305.
- Yang, L., Huang, C., Liu, G., Liu, J., & Zhu, A. X. (2015). Mapping soil salinity using a similarity-based prediction approach: a case study in Huanghe River Delta, China. *Chinese Geographical Science*, 25, 283-294.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.
- ZHANG, W. T., Hong-Qi, W. U., Hai-Bin, G. U., Guang-Long, F. E. N. G., Ze, W. A. N. G., & SHENG, J. D. (2014). Variability of soil salinity at multiple spatio-temporal scales and the related driving factors in the oasis areas of Xinjiang, China. *Pedosphere*, 24(6), 753-762.

Soil Salinity Digital Mapping using Random Forest Model in Saline soil of Eyvanekey Plain

Extended Abstract

Introduction:

Soil salinization is a prevalent form of land degradation in arid regions which threatens soil productivity, agricultural sustainability, and food security. Since, the salinity can be caused by anthropogenic activities, in addition to natural sources, many studies have been conducted to study the spatial and temporal changes and their constituents. Monitoring and evaluating spatiotemporal dynamics of soil salinity are important due to high variability of salinity. The classical methods of study of soil salinity are time and cost-consuming compared to digital soil mapping. Monitoring and lab works in digital soil mapping could be reduced.

Purpose:

The purpose of this study was characterizing and mapping secondary salinity by using random forest model at a field scale in Eyvanekey plain for precision and sustainable management of saline soils in study area.

Research method:

106 surface samples were taken in 2018 by grid with 100 m intervals from 105 ha of soils developed on marl and gravely alluviums parent materials and the necessary measurements were made on them. The land uses were pistachio tree with furrow irrigation and abandoned land. According to SCORPAN model, soil salinity data as target variable and spectral indices derived from satellite images and train attributes derived from DEM as environmental covariates were prepared in 30 m resolution. Random forest model was used to connect soil salinity data and environmental covariates to predict salinity map. Also recursive feature elimination method was used to determine the suitable amount and type of environmental covariates for avoiding prediction model complexity and error.

Results:

The hot and arid climate combined with other environmental parameters demonstrate the unsuitability of the study area for agricultural purposes. All the study area was classified as hypersaline soil ($EC_e > 4$ dS/m). EC amount range was between 4.25 to 173.2 dS/m with mean amount 51.98 dS/m. According to salinity map the highest values of EC_e were at the middle of the field, in pistachio trees land use, followed by the abandoned area located on the downward slope that receives the runoff water which has passed through the higher saline area. The main factors of salinity in study area were saline parent materials, the quality of irrigation water, high evaporation and transpiration and capillary rise of solutes. The coefficient of determination (R^2) of the salinity prediction map by random forest model was equal to 0.49 and the most important covariate for salinity mapping were normalized difference salinity index (NDSI), topographic wetness index (TWI), Channel Network Base Level (CNBL), normalized difference vegetation index (NDVI), and modified soil vegetation index (SAVI). Spectral ratio indices derived from Landsat 8 had an important contribution in the soil salinity prediction model and out of 5 main environmental covariates, 3 were related to spectral ratio indices. Also, the results showed that use of NDVI with other spectral ratio indices like salinity and moisture indices improved salinity prediction model. In general, the use of spectral ratio indices derived from satellite images are very useful for salinity studies due to provide an overview of the salinity variation in study area, but always the uncertainty of the data should be considered. It should be considered that the amount and mineralogy of salt, soil moisture, soil colour and roughness could effect on salt reflection and as a result on the remote sensing derived data. Examining the results of environmental covariates correlation and the implementation of recursive feature elimination showed that the presence of many environmental covariates increased model complexity and prediction error. Recursive feature elimination results helped to simplify the model by identifying the most important environmental covariates for making random forest model. The salinity prediction map by random forest was consistent with the field observations and clearly defined the critical saline area in middle part of the field.

Conclusion:

The availability of suitable land for agriculture use in arid region is scarce and having information about limitation factors like salinity is essential to prevent soil degradation. To improve the existing fragile conditions, characterize saline soils and monitoring salinity changes is necessary. salinity map produced by RF was reliable and helped to see the extent and severity of salinity in each single pixel of study area. The salinity prediction map was in consistent with the field observations and showed the middle part of the study area as a critical saline area. The digital nature of these maps allows information to be updated at a lower cost and faster in future in the study area.

Keywords: *Digital soil mapping, Furrow irrigation, Soil properties, Spatial changes, Spectral ratio.*

فیلد استناری و نقشه