



Evaluation and Preparation of Soil Salinity Map Using Vegetation Indicators and Sentinel-2 and Landsat-8 Multispectral Images in Salt Marsh Qazvin Plain

Mohadese Sadat Fakhar¹ | Bijan Nazari²

1. Department of Water Science and Engineering Faculty of Agriculture and Natural Resources Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: Fakhar@edu.ikiu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department Faculty of Agriculture and Natural Resources Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: B.nazari@eng.ikiu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 8 April 2023

Received in revised form

30 July 2023

Accepted 30 July 2023

Published online 12 October 2023

Keywords:

GDVI

GEE

Qazvin plain salt marsh

remote sensing, soil salinity

ABSTRACT

In this research, 23 soil samples with specific geographical characteristics were collected to investigate and monitor salinity changes in the region. Using the Sentinel-2 and Landsat-8 sensors, seven vegetation cover indices and five salinity indices were examined and evaluated in the GEE environment, resulting in a total of 240 outputs from the two sensors. To assess the modeled values, several statistical indices including root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R^2), normalized root mean square error (NRMSE), and percent bias (PBIAS) were utilized. The results indicated that the SI-2 index exhibited the highest correlation with the measured salinity values in the region, with an R^2 value of 0.91, demonstrating its accuracy in estimating salinity levels. In the next step, a multiple regression model was employed to investigate the mean values of measured E_{ce} (electrical conductivity of the saturation extract) and the vegetation indices GDVI (Green Difference Vegetation Index) and CRSI (Crop Salt Stress Index) obtained from the Sentinel-2 sensor, which showed the highest correlation with the salinity data. The results demonstrated that the two-variable regression model achieved a satisfactory accuracy with an R^2 value of 0.84 and a PBIAS value of 0.01 in producing a salinity map of the area. Therefore, this model can be utilized as a cost-effective approach for salinity mapping in the region with minimal ground-based data. Furthermore, the investigation of the impact of constructing a barrier drain in the area revealed that the construction of a barrier drain within a distance of 250 meters had a significant effect of approximately 40 percent in controlling salinity. It was able to prevent a substantial increase in salinity levels in the region. Therefore, if a barrier drain is not constructed in the area, salinity progression in the upstream agricultural lands could significantly escalate.

Cite this article: Sadat Fakhar, M., & Nazari, B. (2023). Evaluation and Preparation of Soil Salinity Map Using Vegetation Indicators and Sentinel-2 and Landsat-8 Multispectral Images in Salt Marsh Qazvin Plain. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (3), 783-799. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.357320.1065>





ارزیابی و تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و تصاویر چند طیفی Landsat-8 و Sentinel-2 در شوره‌زار دشت قزوین

محدثه‌السادات فخار^۱ | بیژن نظری^۲ ✉

۱. گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمینی(ره)، قزوین، ایران. رایانامه: Fakhar@edu.ikiu.ac.ir
 ۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمینی(ره)، قزوین، ایران. رایانامه: B.nazari@eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

کلیدواژه‌ها:

سنجش از دور

شوره‌زار دشت قزوین

شوری خاک

GDVI

GEE

در این پژوهش، برای بررسی و پایش تغییرات شوری در منطقه، ۲۳ نمونه خاک با مشخصات جغرافیایی مشخص اندازه‌گیری شد. استفاده از دو سنجنده Landsat-8 و Sentinel-2، به منظور بررسی و ارزیابی هفت شاخص پوشش گیاهی و پنج شاخص شوری در محیط GEE صورت گرفت و به‌طور کلی ۲۴۰ خروجی از دو سنجنده به‌دست آمد. برای ارزیابی مقادیر مدل‌سازی‌شده، از تعدادی شاخص آماری شامل میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین R^2 ، ریشه نرمال‌شده میانگین مربع خطا NRMSE و درصد سوگیری PBIAS استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص SI-2 با $R^2=0/91$ بیش‌ترین همبستگی با مقادیر شوری اندازه‌گیری‌شده در منطقه را داشته است، که نشان از دقت این شاخص در برآورد میزان شوری است. در مرحله بعد، از مدل رگرسیون چندگانه برای بررسی میانگین مقادیر ECE اندازه‌گیری‌شده و شاخص‌های پوشش گیاهی GDVI و CRSI سنجنده Sentinel-2 استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از این مدل رگرسیونی دومتغیره، با $R^2=0/84$ و $PBIAS=0/01$ ، دقت مناسبی در تهیه نقشه شوری در منطقه داشته است. بنابراین، می‌توان از این مدل به‌عنوان یک روش برای تهیه نقشه شوری در منطقه با حداقل داده‌های زمینی و با هزینه کم استفاده کرد. در ادامه، بررسی اثر احداث زهکش حائل در منطقه نشان می‌دهد که احداث زهکش تا فاصله ۲۵۰ متری تأثیرگذاری حدود ۴۰ درصدی را در کنترل شوری داشته و توانسته است به‌طور قابل‌توجهی از افزایش میزان شوری در منطقه جلوگیری کند. بنابراین، در صورت عدم احداث زهکش در منطقه، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی افزایش پیدا کند.

استناد: فخار، محدثه‌السادات؛ و نظری، بیژن (۱۴۰۲). ارزیابی و تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و تصاویر چندطیفی Landsat-8 و Sentinel-2 در شوره‌زار دشت قزوین. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۳)، ۷۸۳-۷۹۹.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.357320.1065>



۱- مقدمه

شوری خاک جزو یکی از محدودیت‌های مهم در کشاورزی محسوب می‌شود که بر تولید مواد غذایی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأثیر فراوانی را می‌گذارد (Minhas *et al.*, 2020). در مناطق خشک و نیمه‌خشک نمک‌ها به‌دلیل تقاضای تبخیر بالا تمایل دارند در پروفیل سطح خاک تجمع پیدا کنند که در این حالت تنش اسمزی افزایش می‌یابد و این امر بر دسترسی ریشه به آب خاک و جذب آب توسط آن تأثیر می‌گذارد. همچنین به‌طور بالقوه باعث ایجاد سمیت یونی و عدم تعادل در گیاهان می‌شود (Pereira *et al.*, 2009). در نتیجه، با رسیدن شوری خاک به آستانه تحمل معین، رشد محصول، میزان تعرق و عملکرد کاهش می‌یابد و سطوح بالاتر در نهایت منجر به از بین رفتن محصول می‌شود (Maas and Hoffman, 1977). حدود ۴۱۲ میلیون هکتار اراضی متأثر از شوری و ۶۱۸ میلیون هکتار از اراضی تحت تأثیر سدیمی بودن یا فرایندهای ناشی از دخالت انسان در مدیریت ضعیف آبیاری و بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی شور قرار دارند (FAO, 2015). حدود ۵۰ درصد اراضی کشاورزی آبی مناطق خشک و نیمه‌خشک کره زمین، مشکل شوری خاک با درجات مختلف دارند و سالانه به‌طور متوسط حدود ۴۰ هزار هکتار از این اراضی به‌دلیل مشکلات شوری رها می‌شوند (Ghavam, 2018). اراضی زیادی در سراسر جهان تحت تأثیر شوری قرار دارند و هر ساله تا دو میلیون هکتار به گسترش آن ادامه می‌دهند (Koochafkan and STEWART, 2008). بنابراین، در چند دهه اخیر جامعه علمی زمان و منابع قابل‌توجهی را برای توسعه روش‌های سریع و مقرون‌به‌صرفه برای ارزیابی مقیاس بزرگ توزیع مکانی و زمانی مناطق آسیب‌دیده از نمک سرمایه‌گذاری کرده است (Corwin, 2021; Corwin and Scudiero, 2019). گسترش فعالیت‌های کشاورزی در طی سال‌ها برای پاسخگویی به تقاضای غذایی جمعیت فزاینده همراه با رویدادهای شدید اقلیمی مانند تبخیر زیاد و بارندگی کم، استفاده از روش‌های آبیاری سنتی با مصرف مقادیر زیاد آب و سیستم‌های زهکشی ضعیف باعث ایجاد یک مشکل فزاینده شوری خاک در بسیاری از زمین‌های زراعی شده است (Vickers, 2017). استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور به‌منظور تهیه نقشه‌های شوری از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، زیرا شوری یک فرایند ساکنی نیست (Yang *et al.*, 2011). از این‌رو، تهیه نقشه‌های به‌روز خصوصیات خاک سطحی به‌منظور شناسایی وضعیت کنونی منطقه از نظر غلظت نمک در راستای مدیریت طرح‌های کشاورزی و بیابان‌زدایی دارای اهمیت است (Nohegar and Zare, 2012). با این‌حال، این واقعیت که در خاک‌های کشاورزی، نمک‌ها تمایل به تجمع عمیق‌تر در ناحیه ریشه دارند تا در سطح خاک، نمونه پژوهش‌ها و کاربردهای سنجش‌ازدور را تغییر داده است. به‌طوری‌که عملکرد محصول و وضعیت پوشش زراعی به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان نماینده‌ای برای بررسی شوری منطقه ریشه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Scudiero *et al.*, 2014b). یکی از راه‌های دستیابی به این هدف، ترسیم هدایت الکتریکی (EC) عصاره اشباع خاک است. روش‌های سنتی برای تهیه نقشه‌های EC خاک با انجام بررسی‌های میدانی و اندازه‌گیری مقادیر EC خاک پرهزینه و زمان‌بر است. با این‌حال، فناوری‌های مدرن و روش‌های جدید برای کمک به نقشه‌برداری EC خاک و ارائه اطلاعات در مورد مناطق متأثر از نمک با کارایی بسیار بیشتر در دسترس هستند (Taghadosi *et al.*, 2019). با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تکنیک‌های سنجش‌ازدور، نظارت بر شوری خاک به‌طور مؤثرتر و اقتصادی‌تر امکان‌پذیر می‌شود (Morshed *et al.*, 2016). با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌های ماهواره‌های تازه پرتاب‌شده با وضوح مکانی و طیفی مناسب، می‌توان ویژگی‌های طیفی خاک‌های سطحی شور و توزیع مکانی مناطق آسیب‌دیده از شوری خاک را تعیین کرد، که به نقشه‌برداری از شوری در مقیاس‌های بزرگ و با دقت بالا کمک می‌کند (Allbed and Kumar, 2013). در میان سنجنده‌های مختلف که برای نقشه‌برداری از شوری و تولید نقشه‌های EC استفاده می‌شوند، تصاویر ماهواره‌ای چند طیفی به‌طور گسترده در پژوهش‌های مختلف مورد مطالعه

قرار گرفته‌اند و مشخص شده است که ابزار بسیار امیدوارکننده‌ای برای این کار است (Gorji et al., 2017). همچنین Gorji et al. (2017) با استفاده از شاخص‌های آماری تغییرات شوری دریاچه‌ای در کشور ترکیه را در طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۵ با کمک ۲۵ تصویر سنجنده TM و OLI موردبررسی قرار دادند. نتایج بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که ضریب همبستگی تصاویر با نمونه‌های اندازه‌گیری‌شده بین ۰/۹۳-۰/۸۳ بود. در یک مطالعه موردی در ماله‌ور، اورگن ایالت متحده آمریکا، از تصاویر Landsat TM برای نقشه‌برداری شوری استفاده کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که مقادیر بالای نمک در خاک‌های بدون پوشش گیاهی را می‌توان با باندهای یک تا چهار سنجنده Landsat به‌دلیل بازتاب طیفی بالای نمک در این محدوده از طیف الکترومغناطیسی شناسایی کرد (Elnaggar and Noller, 2009). در مطالعه دیگری Katawatin and Kotrapat (2005) از سه منبع داده جانبی (توپوگرافی، زمین‌شناسی و کیفیت آب زیرزمینی) برای نقشه‌برداری شوری خاک با استفاده از Landsat-ETM+ استفاده کردند. نتایج این مطالعه حاکی از امکان نقشه‌برداری شوری در سنجنده ETM+ با استفاده از باندهای چهار و پنج و هفت در ترکیب با همان سه داده جانبی دارد که میزان دقت کلی برآورد شده ۸۳/۶ درصد می‌باشد. در پژوهشی Allbed et al. (2014) باند سه تصاویر ماهواره‌ای IKONOS را به‌منظور مطالعه منطقه عربستان انتخاب نمودند. با استفاده از شاخص شوری SI و داده‌های زمینی، مدل رگرسیون ساده خطی اجرا شد و همبستگی معناداری بین شوری سطحی خاک و شاخص شوری SI به‌دست‌آمد (El Harti et al., 2016). در پژوهشی با استفاده از تصاویر سنجنده TM و سنجنده OLI در دشت تادلا در مرکز مراکش اقدام به تهیه نقشه شوری خاک نمودند. آن‌ها یک بازه ۱۳ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ را موردبررسی و با تهیه مقادیر هدایت الکتریکی خاک منطقه، مدل‌های رگرسیونی را اجرا نمودند. در مرحله اعتبارسنجی مدل‌ها، ضریب تبیین R^2 از ۰/۵۵ تا ۰/۷۷ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین ۱/۰۲ ds/m تا ۲/۳۵ ds/m به‌دست آمد. نقشه‌های خروجی، کاهش شوری در بازه مورد مطالعه را نشان داد. در مطالعه‌ای با استفاده از تصاویر سنجنده OLI و الگوریتم PLSR به تهیه نقشه شوری خاک در غرب ایالت جیلین چین پرداختند. آن‌ها متغیرهای محیطی PH و EC خاک را اندازه‌گیری نمودند. نتایج نشان می‌دهد که دقت نقشه‌های شوری خاک به‌واسطه باندهای انعکاسی و شاخص‌های طیفی بهبودیافته است و روش PLSR در مدل‌سازی تخمین میزان شوری خاک توانمند است (Yu et al., 2018). با توجه به این‌که بررسی شوری توسط سنجنده‌های مختلفی صورت می‌پذیرد در پژوهشی با انتخاب داده‌های سنجنده مودیس و شاخص‌های NDVI، EVI و CRSI به بررسی شوری خاک در مرکز کالیفرنیا پرداختند. نتایج نشان داد، استفاده از داده‌های MODIS و به‌کارگیری شاخص‌های منتخب به‌منظور تخمین شوری سطح خاک با دقت قابل‌قبولی امکان‌پذیر می‌باشد (Whitney et al., 2018). در مطالعه دیگری به بررسی شوری خاک در فلات سهان کشور ترکیه پرداختند. آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 و در نظر گرفتن دو شاخص شوری و چهار شاخص پوشش گیاهی و مقادیر هدایت الکتریکی خاک به تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از دو مدل رگرسیونی MLR و SLR پرداختند. براساس نتایج مدل‌ها بیش‌ترین وابستگی مربوط به ۲۱ مارس به‌دست آمد که براساس نقشه شوری منطقه تهیه شده بود (Asfaw et al., 2018). با توجه به اهمیت روند تغییرات شوری در پژوهشی به بررسی تغییرات شوری دریاچه نمک توز ترکیه در یک بازه زمانی ۲۵ ساله در طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵ پرداختند. با توجه به مقادیر هدایت الکتریکی و شاخص‌های شوری تصاویر ماهواره‌ای لندست را مورد مطالعه قرار دادند و دو مدل رگرسیونی خطی و میانگین‌گیری وزنی را بر روی داده‌های سال ۲۰۰۲ اعمال نمودند. نتایج با داده‌های مرجع، مقایسه و منجر به رابطه آماری قابل‌قبولی بین شوری خاک و متغیرهای موردبررسی گردید. علاوه بر آن شاخص شوری SI-1 نتایج بهتری از R^2 ۰/۸۳ و ۰/۹۳ را برای دو مدل میانگین‌گیری وزنی و رگرسیون خطی ارائه نموده است. بنابراین هدف از این پژوهش ارزیابی شوری توسط

سنجنده‌های Sentinel-2 و Landsat-8 در دشت قزوین و محدوده زهکش حائل با استفاده از ۱۲ شاخص پوشش گیاهی و شوری مختلف به‌منظور تهیه نقشه شوری با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری در منطقه است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعه و داده‌های هواشناسی

منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیمات کشوری در بخشی از استان قزوین و در حدود ۱۵۰ کیلومتری شمال غرب تهران قرار دارد. دشت قزوین با مساحتی حدود ۴۵۰۰۰۰ هکتار در محدوده‌ی طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۲۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی قرار دارد (Mohammadi *et al.*, 2011). حداکثر ارتفاع این منطقه برابر ۲۹۷۱ متر و حداقل آن ۱۱۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. شوره‌زار مرکزی دشت قزوین ۶۰ هزار هکتار است که گستره هسته مرکزی آن نزدیک به ۲۰ هزار هکتار بوده و شوری این اراضی بسیار زیاد است. نزدیک به ۹۵ درصد از اراضی این محدوده هدایت الکتریکی بیش از ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر و پنج درصد از اراضی، هدایت الکتریکی بیش از ۱۰۰ دسی‌زیمنس بر متر داشتند (Akram and Sotoodehnia, 2011). این منطقه که در محدوده شهرستان‌های آبیک و بوبین‌زهره قرار دارد از نظر زیست‌محیطی در ردیف مراکز منحصربه‌فرد تلقی می‌شود. کارشناسان میزان ذخایر آبخوان دشت قزوین را ۱۸ میلیارد مترمکعب برآورد کرده‌اند که میزان برداشت بی‌رویه و افزون بر میزان سهمیه تعیین شده، حفر چاه‌های غیرمجاز، خشک‌سالی و گسترش شوره‌زار موجب شده است این دشت با خطر کم‌آبی و گسترش اراضی شوره‌زار در سال‌های آینده روبه‌رو شود. میزان کسری ذخیره مخازن آب در دشت قزوین در طول ۳۷ سال اخیر بیش از دو میلیارد مترمکعب اعلام شده است که با میانگین ۵۸ میلیون مترمکعب در سال حجم قابل توجهی است که در سال‌های اخیر هم این روند ادامه یافته است. به همین منظور طرح احداث زهکشی شوره‌زار مرکزی دشت قزوین باهدف جلوگیری از پیشروی شوری خاک، خارج کردن شورابه‌های اراضی بالادست دشت قزوین اجرا شد.

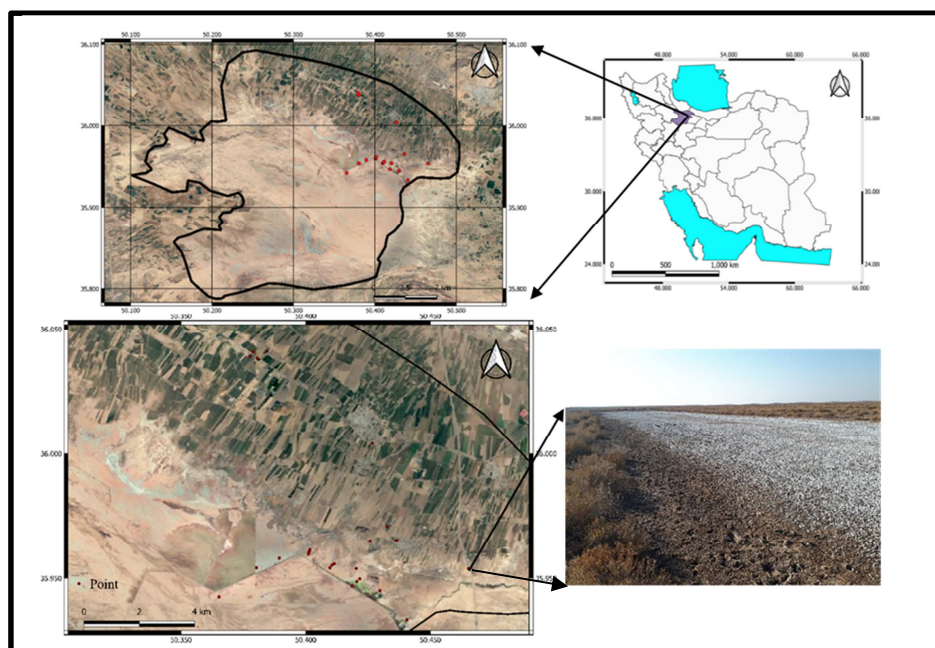


Figure 1. Geographical location of Qazvin Plain in the study area

۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

ماهواره سنتینل ۲ شامل دو ماهواره دو قلو به نام‌های Sentinel-2A و Sentinel-2B بوده و در جهت مخالف هم در مدار حرکت می‌کنند و هر یک از آن دو می‌تواند در طول پنج روز یک پوشش کامل از سطح زمین تهیه کند. سنجنده تصویربرداری نصب‌شده بر روی سنتینل ۲، MSI نام دارد که تصاویر منحصربه‌فردی را ارائه می‌دهد (Marco *et al.*, 2019). داده‌های ماهواره سنتینل ۲ حاوی حجم زیادی از داده‌ها با توان تفکیک مکانی بالا (حداکثر ۱۰ متر)، طیفی (۱۳ باند) می‌باشد. در این مطالعه از ده باند طیفی استفاده شده است (جدول ۱). سنجنده Landsat-8 دارای دو حسگر است. حسگر عملیاتی زمین (OLI) و حسگر مادون قرمز حرارتی (TIRS). باندهای طیفی سنسور OLI و باندهای حرارتی سنسور TIRS اطلاعات تصویر برای نُه باند موج کوتاه و دو باند موج حرارتی را با قدرت تفکیک مکانی حداکثر ۳۰ متر جمع‌آوری می‌کند (USGS).

Table 1. Spectral specifications of Sentinel-2 and Landsat-8 sensors

	Satellite band	Wavelength (nm)	Spatial resolution (m)		Satellite band	Wavelength (nm)	Spatial resolution (m)	
Sentinel-2	B2 Blue (B)	490	10/20	Landsat-8	B1 Coastal/Aerosol	443	30	
	B3 Green (G)	560	10/20		B2 Blue (B)	483	30	
	B4 Red (R)	665	10/20		B3 Green (G)	560	30	
	B5 Red edge (RE ₁)	705	20		B4 Red (R)	660	30	
	B6 Red edge (RE ₂)	740	20		B5 Near infrared (NIR)	865	30	
	B7 Red edge (RE ₃)	783	20		B6 SWIR 1	1650	30	
	B8 Near infrared (NIR)	842	10		B7 SWIR 2	2220	30	
	B8a Narrow near infrared (NIRN)	865	20		B8 Panchromatic	640	15	
	B11 Short wave infrared (SWIR1)	1610	20		B9 Cirrus	1375	30	
	B12 Short wave infrared (SWIR2)	2190	20					

۲-۳- داده‌های زمینی

دشت قزوین به‌عنوان قطب کشاورزی مدرن در ایران می‌تواند با مدیریت راهبردی و بررسی و کنترل شوری در بهبود و توسعه کشاورزی و جلوگیری از گسترش اراضی شور، کمک شایانی کند (Fakhar and Kaviani, 2022). بنابراین بررسی تغییرات شوره‌زار و تأثیرات آن بر اراضی کشاورزی مناطق بالادست و پایین‌دست زهکش احداث‌شده از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است. به همین منظور پس از انتخاب منطقه و بازدید میدانی، برای نمونه‌گیری از خاک سطحی، نمونه‌هایی از منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. به‌طور کلی، ۲۳ نمونه خاک با وزن میانگین یک کیلوگرم برای هر نمونه و مشخصات جغرافیایی مشخص به‌منظور بررسی و پایش تغییرات شوری در شکل (۱) اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها با استفاده از Soil Sampler برداشت شد. نمونه‌های برداشت‌شده از کناره زهکش حائل هر یک به میزان یک کیلومتر از یک دیگر فاصله داشت. نمونه‌ها در دی‌ماه ۱۴۰۱ از منطقه مورد مطالعه برداشت شد. منطقه مورد مطالعه شامل نقاطی از قسمت‌های مختلف به‌ویژه مناطقی بین اراضی کشاورزی غیرشور و اراضی شور در قسمت زهکش حائل می‌باشد. نمونه‌های خاک انتخاب‌شده شامل محدوده‌های متفاوتی از هر سطح شوری خاک بود که نقشه‌برداری شوری خاک را دقیق‌تر پشتیبانی می‌کرد. با توجه به نمونه‌برداری‌های زمینی انجام‌شده مقادیر برداشت‌شده از سطح زمین هر کدام در پیکسل جداگانه قرار گرفت و مقادیر برآوردشده توسط شاخص‌های مختلف با مقادیر اندازه‌گیری‌شده به‌صورت جداگانه توسط سنجنده‌های Sentinel-2 و Landsat-8 مقایسه شدند. نمونه‌های برداشت‌شده با استفاده از ابزار EC سنج موجود در آزمایشگاه اندازه‌گیری و مقادیر EC یادداشت شد. علاوه بر این، جمع‌آوری و استفاده یکپارچه از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و Landsat-8 بدون ابر و نمونه‌های میدانی اندازه‌گیری‌شده مزیتی را برای بررسی بهتر توزیع مکانی مناطق متأثر از شوری ایجاد کرد. در این پژوهش سعی شد از تصاویری استفاده شود که از حداقل

پوشش برف برخوردار باشند، بنابراین براساس شرط تعریف‌شده تمامی تصاویر استفاده‌شده کم‌تر از ۱۵ درصد از پوشش ابر برخوردار بودند. نمونه‌های مشخص‌شده در دی‌ماه ۱۴۰۱ از نقاط مشخص‌شده مطابق با شکل (۱) برداشت شده است. به همین منظور تمامی تصاویر مربوط به بازه زمانی مورد مطالعه که شرایط لازم برای محاسبه شاخص‌های مدنظر را داشتند، برای بررسی و اندازه‌گیری شاخص‌های مطرح‌شده استفاده شد.

پردازش تصاویر Landsat-8 و Sentinel-2 در محیط GEE انجام گرفت. GEE یک پلتفرم متن‌باز است که به دلیل قدرت سریع محاسباتی و کتابخانه‌ای گسترده از مجموعه داده‌های مکانی مورد استفاده قرار گرفته شد سپس با استفاده از روابط ارائه‌شده توسط پژوهش‌گران مختلف به بررسی و برآورد هریک از این شاخص‌ها و ارتباط آن‌ها با شورى با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پرداخته شد. در این پژوهش از هفت شاخص پوشش گیاهی و پنج شاخص شورى که طبق پژوهش‌های انجام‌شده در این منطقه از دقت مناسبی برخوردار بودند استفاده شد. شاخص‌های استفاده‌شده برای ارزیابی شورى خاک و تأثیر آن بر پوشش گیاهی استفاده می‌شوند که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به برآورد شورى خاک و تحلیل تغییرات پوشش گیاهی در طول زمان می‌پردازد. شاخص‌های شورى مورد استفاده با استفاده از اندازه‌گیری‌های طیفی نور خورشید به برآورد شورى خاک و ترکیبات شیمیایی موجود در خاک می‌پردازد، به طوری که می‌توان با استفاده از شاخص‌های شورى مطرح‌شده و الگوریتم‌های مختلف میزان نمک، کلسیم، منگنز و آهن در خاک را تخمین زد هر یک از این شاخص‌ها دارای معایب و مزایایی می‌باشد از جمله مزایای این شاخص‌ها می‌توان به برآورد شورى خاک و تحلیل تأثیر آن بر پوشش گیاهی اشاره کرد، شاخص‌های ارائه‌شده قابلیت تفکیک مکانی و زمانی دارد، به طوری که با استفاده از این شاخص‌ها می‌توان تغییرات شورى را در طول زمان و در محدوده مورد نظر ارزیابی کرد. شاخص‌های مطرح‌شده برای انواع محیط‌های زیستی مانند مناطق خشک و نیمه‌خشک قابل استفاده است. اما در کنار مزایای آن می‌توان به محدودیت‌های این شاخص‌ها نیز اشاره کرد از جمله این شاخص‌ها فقط برای تحلیل تأثیر شورى خاک بر روی پوشش گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد و نمی‌تواند تأثیر دیگر عوامل مانند خشکی، مسمومیت با فلزات سنگین و غیره را بررسی کند. این شاخص‌ها تحت تأثیر شرایط جوی و شرایط نوری متفاوت می‌تواند مقادیر متفاوتی را نشان دهد. در جدول (۲) به تمامی شاخص‌های مورد بررسی در این پژوهش اشاره شده است. تمامی این شاخص‌ها در محیط GEE برآورد و در نهایت با استفاده از شاخص‌های آماری به بررسی هر یک از این شاخص‌ها پرداخته شد. به طور کلی، در این پژوهش ۲۰ تصویر از دو سنجنده مختلف دریافت و در نهایت ۲۴۰ خروجی مورد بررسی قرار گرفت.

Table 2. Indicators used in forecasting and preparation of soil salinity

Index	Formulation	Value	Reference
Canopy Response Salinity Index	$CRSI = \frac{(NIR \times R) - (G \times B)}{(NIR \times R) + (G \times B)}$	(-1,1)	(Scudiero <i>et al.</i> , 2014a)
Enhanced Vegetation Index	$EVI = g \times \frac{NIR - R}{NIR + c_1 \times R - c_2 \times B + 1}$	(-1,1)	(Huete <i>et al.</i> , n.d.)
Green Atmospherically Resistant Vegetation Index	$GARI = \frac{NIR - (G + \gamma \times (B - R))}{NIR + (G + \gamma \times (B - R))}$	(0,1)	(Gitelson <i>et al.</i> (1996)
Generalized Difference Vegetation Index	$GDVI_x = \frac{NIR^x - R^x}{NIR^x + R^x}$	(-1,1)	(Wu <i>et al.</i> , 2014)
Normalized Difference Salinity Index	$NDSI = \frac{(R - NIR)}{(R + NIR)}$	(-1,1)	(Khan <i>et al.</i> , 2005)
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$	(-1,1)	(Rouse Jr <i>et al.</i> , 1973)
Salinity Index	$SI = (G \times R)^{0.5}$	(0,1)	(Aldakheel <i>et al.</i> , 2005)
Normalized Difference Index	$NDI = \frac{SWIR_2 - RE_3}{SWIR_2 + RE_3}$	(-1,1)	(Wang <i>et al.</i> , 2019)
Salinity Index SI1	$SI1 = (B \times R)^{0.5}$	(0,1)	(Khan <i>et al.</i> , 2005)
Salinity Index SI2	$SI2 = (NIR^2 + R^2 + G^2)^{0.5}$	(0,1)	(Khan <i>et al.</i> , 2005)
Salinity Index SI3	$SI3 = ((G)^2 \times (R)^2)^{0.5}$	(0,1)	(Khan and Abbas, 2007)
Salinity Index SI5	$SI5 = \frac{(G) + (R)}{2}$	(0,1)	(Nicolas and Walter, 2006)

g (2.5), c₁ (6.0), c₂ (7.5), l (1.0), γ (0.9).

۲-۴- شاخص‌های آماری

به منظور ارزیابی مقادیر مدل‌سازی شده از سنجنده‌های Sentinel-2 و Landsat-8 با مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری میدانی از تعدادی شاخص‌های آماری میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین R^2 ریشه نرمال شده میانگین مربع خطا NRMSE و درصد سوگیری PBIAS، میانگین، واریانس و انحراف معیار استفاده شده است که تعدادی از روابط مهم آن در رابطه‌های (۱) تا (۳) نشان داده شده است.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}{n-1}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)}{\sum_{i=1}^n o_i} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این روابط، O_i میانگین ECE، P_i به مقدار پیش‌بینی شده مدل در محل نمونه‌گیری اشاره دارد و \bar{P} میانگین مقادیر مربوطه است. ضریب تعیین بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دو دسته را نشان می‌دهد مقادیر R^2 نزدیک به عدد یک نشان می‌دهد که مدل به خوبی واریانس مشاهدات را توضیح می‌دهد. همچنین مقادیر RMSE، NRMSE و PBIAS نزدیک به صفر، نشان از پیش‌بینی دقیق مدل است. با توجه به این که تعداد داده‌های زمینی برداشت شده در یک بازه زمانی حدوداً یک ماهه اندازه‌گیری شده است. لذا به منظور بررسی دقیق‌تر موضوع، از تمامی تصاویر ماهواره‌ای که امکان ثبت و بررسی شاخص‌های مختلف را در بازه زمانی مورد مطالعه داشتند، استفاده شد به همین منظور در ابتدا براساس تمامی تصاویر، شاخص‌های مدنظر محاسبه و سپس میانگین، واریانس و انحراف معیار کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین مقدار برای هر شاخص از این ۲۰ تصویر محاسبه و سپس مقادیر و داده‌های زمینی با یکدیگر مقایسه گردید.

۳- نتایج و بحث

توجه به این که در این پژوهش از دو سنجنده استفاده شده است، لذا در ابتدا به بررسی و ارتباط بین این شاخص‌ها و میزان همبستگی هر یک از آن‌ها توسط ضریب همبستگی پیرسون با مقادیر ECE، پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲) نیز قابل ملاحظه است، نمودار ماتریس همبستگی نشان می‌دهد که شاخص CRSI با ضریب همبستگی $0/85$ بیش‌ترین میزان همبستگی را با مقدار EC اندازه‌گیری شده داشته است، کاهش مقدار این شاخص موجب افزایش مقدار ECE خواهد شد. بعد از شاخص CRSI شاخص GDVI با اختلاف نسبتاً کمی، بیش‌ترین میزان همبستگی را با مقادیر ECE اندازه‌گیری شده داشته است که یکی از دلایل این که شاخص CRSI از همبستگی بالاتری برخوردار بوده می‌توان به تفکیک مکانی ده متری باندهای RGB سنجنده Sentinel-2 اشاره کرد. به‌طور کلی، تمامی شاخص‌های گیاهی بررسی شده از میزان همبستگی نسبتاً مناسبی برخوردار بودند. در پژوهشی Scudiero *et al.* (2014) در منطقه‌ای در کالیفرنیا به ارزیابی منطقه‌ای شوری خاک با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی پرداختند که نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها همبستگی بیش‌تری بین دو شاخص GDVI و CRSI و پوشش گیاهی و داده‌های شوری منطقه آن‌ها نشان داد. بررسی انجام شده در منطقه نشان می‌دهد در بین شاخص‌های بررسی شده شاخص EVI با میزان همبستگی، $0/67$ - نسبت به سایر شاخص‌ها از همبستگی کم‌تری برخوردار بوده است با توجه به این که شاخص EVI به منظور بررسی تراکم میزان تراکم و حجم گیاهان طراحی شده است یکی از دلایل کاهش میزان همبستگی می‌تواند به دلیل عدم وجود پوشش گیاهی در مناطق و نمونه‌های بررسی شده باشد، زیرا بیش‌تر نمونه‌های

بررسی شده در مناطقی بوده است که از تراکم پوشش گیاهی ضعیف و حتی فاقد پوشش گیاهی بوده است در پژوهشی Zhang *et al.* (2015) به همبستگی بالای این شاخص اشاره کردند، اما یکی از دلایل این همبستگی بالا استفاده از سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر بود اما استفاده از این شاخص پوشش گیاهی با وضوح بالاتر (۱۰ متر) ممکن است به توضیح عملکرد ضعیف این شاخص در مناطق با شوری زیاد کمک کند. در ادامه با توجه به محدوده مورد مطالعه به بررسی شوری خاک با استفاده از شاخص‌های شوری مختلف پرداخته شد. شاخص‌های شوری مختلفی در سال‌های اخیر تهیه شده است، اما با توجه به پژوهش‌های انجام شده در این پژوهش به بررسی پنج شاخص پرداخته شد. طبق نتایج به دست آمده از نمودار ماتریس همبستگی، شاخص SI-2 با $R^2=0/91$ بیش‌ترین میزان همبستگی را با مقادیر شوری اندازه‌گیری شده در منطقه داشت که نشان از دقت این شاخص در برآورد میزان شوری در منطقه است همچنین سایر شاخص‌های شوری نیز از میزان همبستگی مناسبی برخوردار بودند که یکی از دلایل مهم آن می‌تواند ناشی از سطح شوری بالا در منطقه مورد مطالعه باشد.

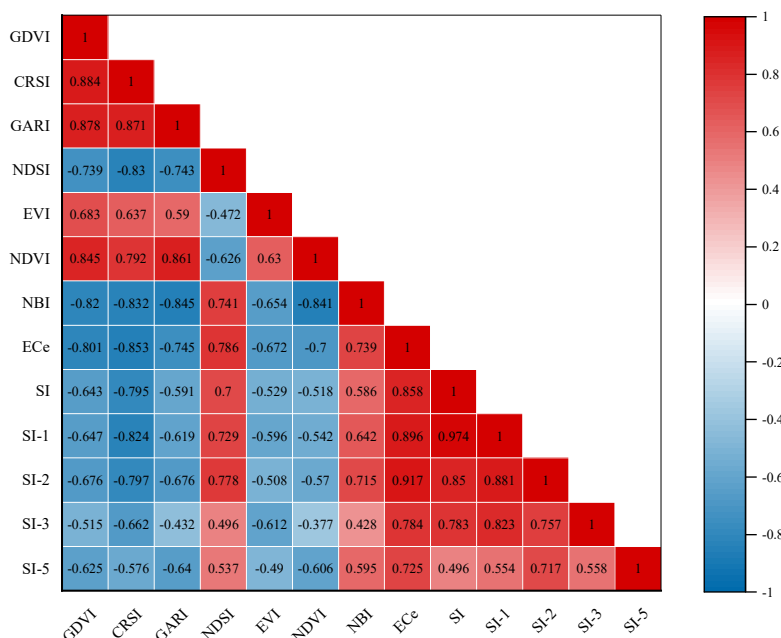


Figure 2. Correlation matrix diagram of different estimated indicators and ECe values measured by Sentinel-2

به‌طورمعمول خاک‌های شور مناطق خشک به‌ویژه زمانی که پوسته نمکی در سطح خاک تشکیل می‌شود بازتاب طیفی بالایی را نشان می‌دهد (Allbed *et al.*, 2018)، از طرفی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی می‌توان به‌طور غیرمستقیم مناطق شور را مشخص کرد. زیرا در مناطقی که پوشش گیاهی ندارند احتمال شوری و همچنین تنش آبی زیاد خواهد بود در نتیجه گیاه با کاهش تعداد برگ و کوچک شدن برگ همراه خواهد بود. بنابراین در ادامه به بررسی و مقایسه شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی و ارتباط هر یک از این شاخص‌ها با استفاده از Landsat-8 و ۲۳ نمونه اندازه‌گیری شده پرداخته شد (شکل ۳). نتایج نمودار پراکندگی به دست آمده نشان داد که شاخص CRSI بیش‌ترین میزان همبستگی را در این سنجنده داشته است که البته این میزان همبستگی نسبت به سنجنده Sentinel-2 نزدیک ۱۵ درصد کاهش داشته است که این روند کاهشی در تمامی ضرایب همبستگی به دست آمده از این سنجنده دیده می‌شود و به‌جز شاخص CRSI و شاخص GDVI سایر شاخص‌ها از ضریب همبستگی پایینی برخوردار هستند که از جمله دلایل این

کاهش میزان همبستگی می‌توان به تفکیک مکانی ۳۰ متری باندهای RGB این سنجنده اشاره کرد. پژوهش‌های مختلفی به بررسی شوری با استفاده از سنجنده Landsat-8 انجام گرفته است. در اکثر این پژوهش‌ها ماهواره لندست را به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین ماهواره‌ها برای بررسی ویژگی‌های خاک، از جمله شوری و تعیین رطوبت خاک معرفی کردند، از جمله دلایل آن داشتن نوارهای زیاد محدوده طیفی وسیع از محدوده مرئی تا مادون قرمز و مادون قرمز حرارتی است.

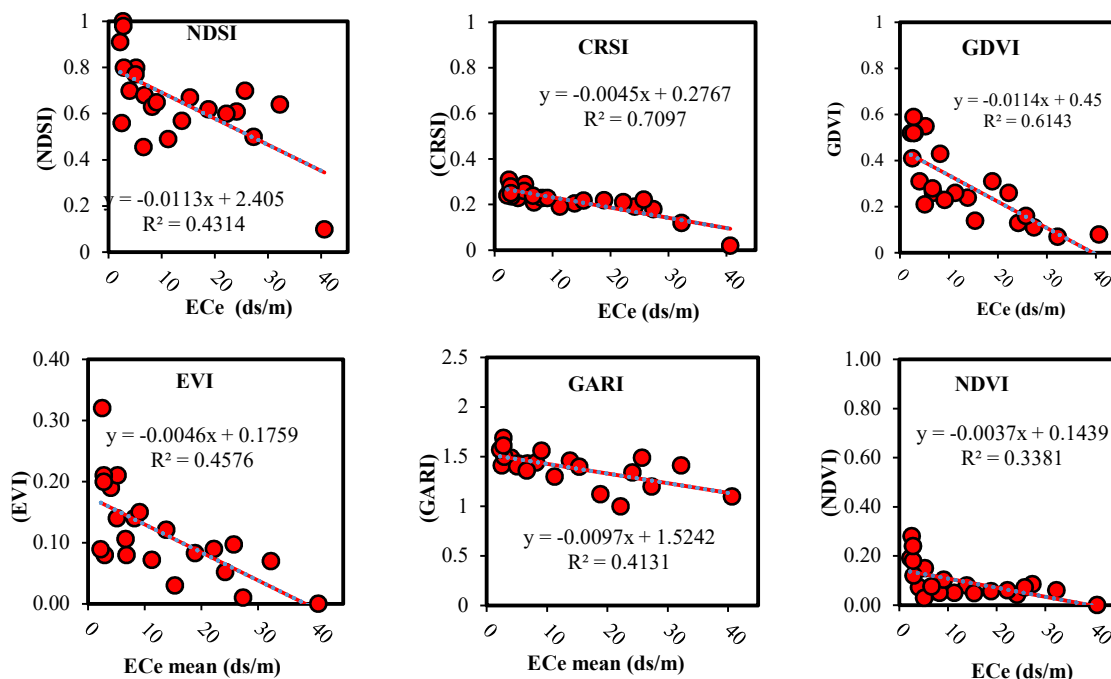


Figure 3. Scatter plot of vegetation indices estimated from Landsat-8 versus measured salinity values

۳-۱- مدل‌های شوری خاک

جدول (۴) نتایج بررسی و تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه بین میانگین مقادیر ECe و شاخص‌های پوشش گیاهی که بیش‌ترین میزان همبستگی را با داده‌های شوری برداشت شده داشتند، را نشان می‌دهد. مدل شماره (۱) در جدول (۳) ساده‌ترین مدل پیش‌بینی شده برای منطقه را تشکیل می‌دهد که تنها براساس رابطه خطی شاخص CRSI با شوری خاک است. در این مدل مقادیر میانگین تحلیل واریانس مجموع مربعات ناشی از رگرسیون (SSR) برابر با ۱۹۰۹/۳۸، مجموع مربعات ناشی از خطا (SSE) نیز برابر با ۷۱۲/۵۴، مقدار $P_Value < 0/0001$ و انحراف استاندارد، $\sigma = 0/14$ می‌باشد. به‌طور کلی، شاخص‌های آماری بررسی شده نشان می‌دهد که مدل شماره (۱) با میزان همبستگی ۰/۶۲ و میانگین جذر مربعات خطا ۵/۵۷ نسبت به مدل شماره (۲) با درصد همبستگی کم‌تری همراه است، اما دقت مناسب و قابل‌قبولی را ارائه داده است به‌طوری‌که در مدل شماره (۲) مقدار میانگین تحلیل واریانس مجموع مربعات ناشی از رگرسیون (SSR) برابر با ۱۹۳۵/۹۵، مجموع مربعات ناشی از خطا (SSE) نیز برابر با ۶۸۵/۹۷، مقدار $P_Value < 0/0001$ می‌باشد در پژوهشی (Wang et al., 2019) مقادیر بالاتر ضریب تعیین R^2 و مقادیر کمتر RMSE را نشان‌دهنده عملکرد بهتر برای مدل مورد استفاده معرفی کرد. شاخص آماری PBIAS نیز نشان می‌دهد که هر دو مدل رگرسیونی حاصل از سنتیل ۲ دقت مناسبی در برآورد میزان ECe منطقه دارد. اما مدل شماره (۲) از دقت بالاتری برخوردار است. در مقابل،

معادله رگرسیونی حاصل از سنجنده Landsat-8 از دقت بسیار کم‌تری برخوردار است، به طوری که میزان ضریب تعیین و درصد سوگیری حاصله از این سنجنده به ترتیب برابر با ۵۷/۳۱ و ۰/۲۶ می‌باشد.

Table 3. Regression models to evaluate soil salinity in the study area

Model	Equation	R ² (-)	RMSE(ds/m)	NRMSE	PBIAS (%)
SENTINEL-2	1 $EC_{e\ mean} = 27.43 - 63.33\ CRSI$	62.82	6.57	0.35	0.11
	2 $EC_{e\ mean} = 28.30 - 15.5\ GDMI - 49.2\ CRSI$	79.84	5.16	0.28	0.01
Landsat-8	3 $EC_{e\ mean} = 46.28 - 5.4\ GDMI - 158.3\ CRSI$	57.31	8.27	0.52	0.26

مقادیر میانگین جذر مربعات خطا و ریشه نرمال شده میانگین مربع خطا در مدل شماره (۲) نشان می‌دهد که دقت مدل دو به مراتب بیشتر از مدل شماره (۱) خواهد بود. در شکل (۴) نیز نمودار پراکندگی مقادیر EC پیش‌بینی شده با استفاده از دو مدل برازش شده و مقدار $EC_{e\ mean}$ اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان این انتظار را داشت که گنجاندن شاخص‌های پوشش گیاهی که از همبستگی بالایی برخوردار هستند، می‌تواند موجب بهبود پیش‌بینی مدل شود. بررسی‌های دو مدل نشان داده است که استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی با همبستگی بالا توانسته است تا ۱۷ درصد میزان همبستگی را افزایش دهد و موجب کاهش میزان RMSE از مقدار ۶/۵۷ به ۵/۱۶ دسی زیمنس بر متر شود. در پژوهشی Lobell *et al.* (2010) تأکید کردند که استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی توانست در پیش‌بینی مقدار شوری مؤثر باشد و میزان همبستگی را از ۰/۲۶ به ۰/۵۳ افزایش دهد.

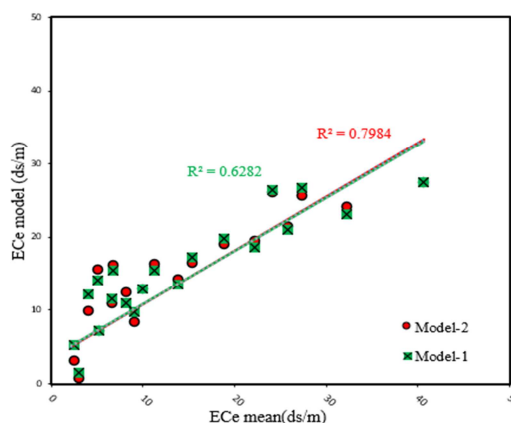


Figure 4. Scatter plot of measured salinity data ($EC_{e\ mean}$) versus predicted salinity data ($EC_{e\ predicted}$) with regression models

۳-۲- ارزیابی شوری در مقیاس منطقه‌ای

شکل (۵)، نتایج اجرای مدل‌های رگرسیون ارزیابی شوری در مقیاس منطقه‌ای براساس سنجنده SENTINEL-2 را نشان می‌دهد این نقشه شوری در نه کلاس مختلف براساس میزان شوری موجود در منطقه طبقه‌بندی شد. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده و نتایج به‌دست‌آمده، نقشه‌های شوری براساس وضوح مکانی ۱۰ متر از سنجنده Sentinel-2 که از دقت و میزان همبستگی بالاتری برخوردار بود، تهیه شد. بنابراین، این عامل می‌تواند در ارزیابی دقت مدل‌های رگرسیونی تهیه‌شده بسیار مؤثر باشد. نتایج در شکل (۵-ا) نشان داد که استفاده از شاخص CRSI به‌تنهایی در برآورد و بررسی میزان شوری مؤثر نخواهد بود، زیرا با توجه به شکل (۵-ا) مشخص است که این شاخص امکان بررسی اراضی کشاورزی با دقت زیاد را ندارد، زیرا اراضی کشاورزی بالادست زهکش حائل را

به خوبی شناسایی نکرده و مساحت زیادی از این اراضی را براساس کلاس بندی انجام شده اراضی با میزان $EC > 4$ دسی زیمنس بر متر شناسایی کرده است. از طرفی دقت مدل رگرسیونی شماره (۱) در برآورد و ارزیابی اراضی با شوری بالا، مناسب بوده و تا حد زیادی توانسته است از دقت مناسبی برخوردار باشد. اما به طور کلی و در مجموع استفاده از مدل رگرسیونی شماره (۱) برای ارزیابی مناطق با میزان شوری بالا بوده و استفاده از این معادله رگرسیونی تک متغیره برای ارزیابی اراضی با تنوع پوشش گیاهی مختلف مناسب نخواهد بود. در مقابل شکل (۵-ب) به بررسی مدل رگرسیونی دومتغیره شماره (۲) پرداخته است. همان طور که در شکل (۵-ب) نیز قابل ملاحظه است این مدل رگرسیونی توانسته است مقدار ECE_{mean} اراضی کشاورزی بالادست زهکش حائل را به خوبی شناسایی کند، به طوری که با توجه به تفکیک مکانی مناسب سنجنده Sentinel-2، این مدل رگرسیونی توانسته است با دقت بالایی میزان ECE_{mean} اراضی کشاورزی با تنوع محصول را به خوبی شناسایی و ارزیابی کند. همچنین بررسی های انجام شده در قسمت زهکش حائل نشان می دهد که مقادیر به دست آمده از این مدل رگرسیونی با مقادیر اندازه گیری شده در محل تا حد زیادی قابل اعتماد خواهد بود.

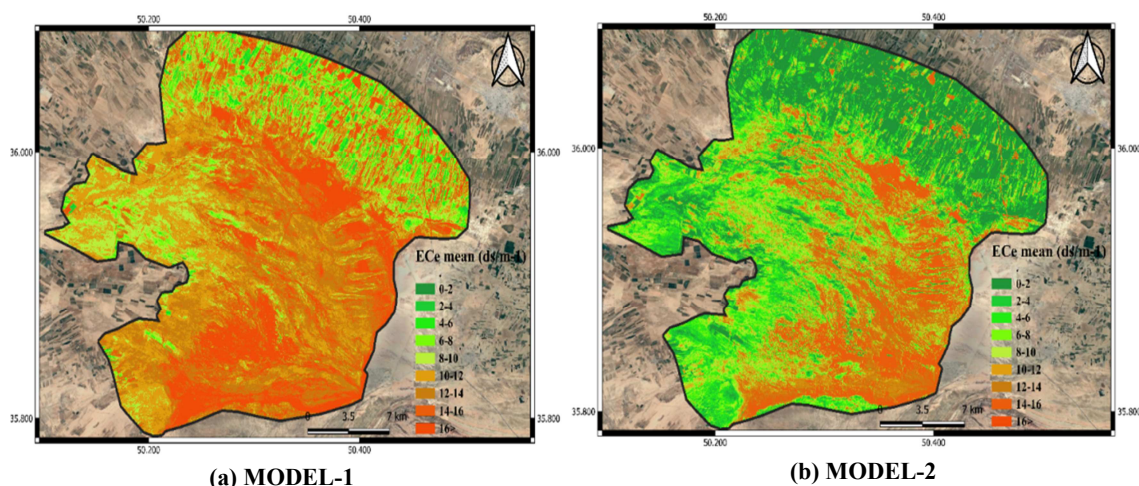


Figure 5. Soil salinity map based on the regression models introduced by the Sentinel-2 sensor

در ادامه بررسی اثر احداث زهکش حائل در منطقه نشان می دهد که احداث زهکش تا فاصله ۲۵۰ متری در کنترل شوری تا میزان ۴۰ درصد تأثیرگذار بوده و توانسته است تا حد زیادی از افزایش میزان شوری در منطقه جلوگیری کند، همچنین طبق بررسی های انجام شده تأثیر احداث زهکش بر اراضی بالادست کشاورزی تا شعاع ۱۴۰۰ متری نیز دیده می شود و مانع از پیشروی شوری تا حد زیادی در اراضی کشاورزی این مناطق شده است. بنابراین، در صورت عدم احداث زهکش در منطقه ممکن بود پیشروی شوری اراضی کشاورزی بالادست را تا حد زیادی افزایش پیدا می کرد در پژوهشی *Sotoodehnia et al.* (2014) به بررسی اثر احداث زهکش حائل در کنترل شوری پرداختند. آن ها آثار کاهش شوری خاک را تا فاصله حدود ۱۰۰۰ متری در بالادست مؤثر دانستند که در حال حاضر به میزان حدود ۴۰۰ متر نسبت به سال اول احداث زهکش پیشروی شوری داشته است که ممکن است با توجه به پدیده تغییر اقلیم و کاهش بارندگی در منطقه این میزان در سال های آتی با افزایش بیش تری روبه رو خواهد شد که در این صورت باید اقداماتی در راستای جلوگیری از پیشروی شوری انجام پذیرد یکی از این راهها می توان به کاشت گیاهان هالوفیت در منطقه اشاره کرد که می تواند تأثیر زیادی در افزایش و پیشروی شوری در منطقه داشته باشد.

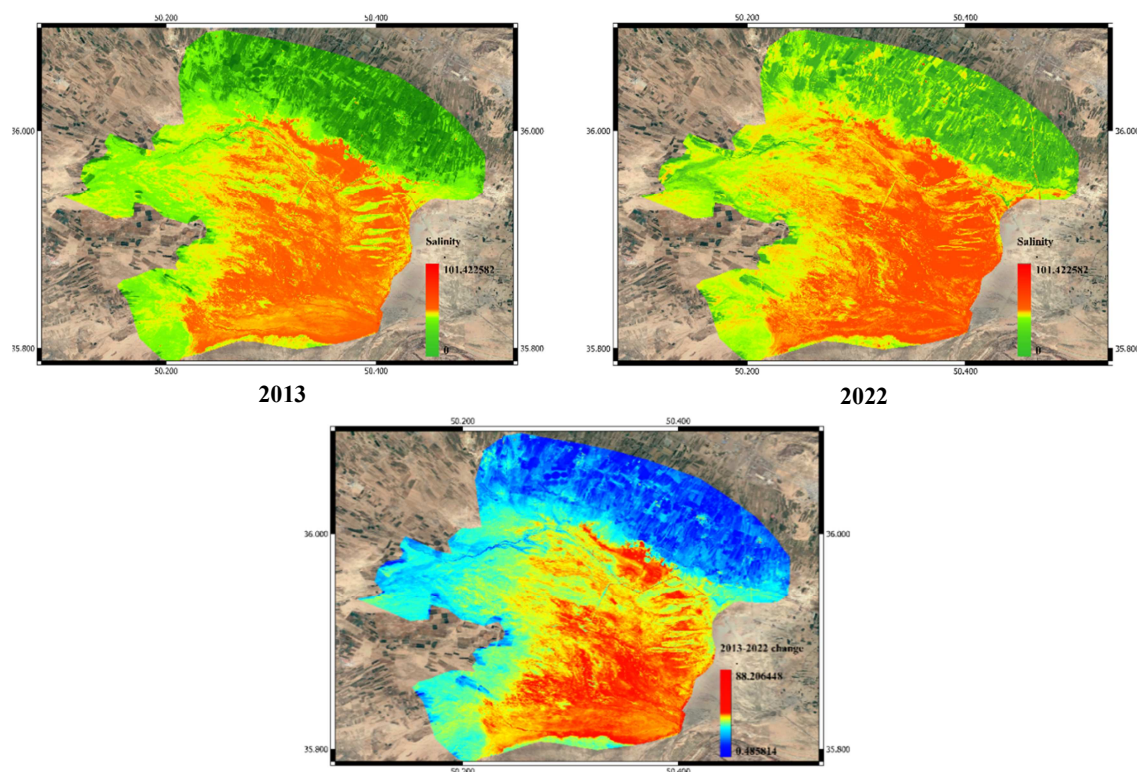


Figure 6. Soil salinity map in the years 2013 and 2022 and analysis of salinity changes in the period 2013-2022 using Landsat-8 sensor

در شکل (۶) به بررسی میزان شوری در طی سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ با استفاده از سنجنده Landsat-8 پرداخته شده است. با توجه به این که سنجنده Sentinel-2 تصاویری با قدرت تفکیک مکانی بسیار مناسبی را در اختیار قرار می‌دهد، اما در حال حاضر این سنجنده امکان دریافت و بررسی تغییرات را در منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۱۹ در دسترس قرار می‌دهد، بنابراین در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات شوری در یک بازه زمانی ده‌ساله از تصاویر Landsat-8 استفاده شد.

نتایج به دست آمده از شکل (۶) نشان می‌دهد میزان EC در اراضی کشاورزی بالادست زهکش حائل در سال ۲۰۱۳ نسبت به سال ۲۰۲۲ کمتر بوده و به تدریج در این بازه زمانی ده‌ساله بر میزان EC افزوده شده است، به طوری که نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که میزان EC در مناطقی که مقادیری بین صفر تا دو دسی‌زیمنس بر متر دارند به میزان ۴۶ درصد کاهش داشته است که این کاهش می‌تواند ناشی از کشت متوالی و یا کشت محصولاتی که در تغییر میزان EC نقش داشته‌اند، باشد. همچنین بررسی نقشه‌های تغییرات EC و میزان شوری در بازه زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد که به طور کلی شدت تغییرات مقدار EC با توجه به محدوده‌های مختلف، متفاوت خواهد بود. به طوری که اراضی که از شدت شوری کمتری برخوردار بودند؛ مانند اراضی کشاورزی و مناطق با پوشش گیاهی به نسبت مناسب. همچنین اراضی که در قسمت‌های مرکزی شورزار دشت قزوین قرار دارند به دلیل شوری به شدت بالا روند تغییرات شوری اندک بوده است، به طوری که میزان این تغییرات در جدول (۵) مشاهده می‌شود که تقریباً در اکثر کلاس‌بندی انجام شده، مساحت شوری در سال ۲۰۲۲ به نسبت سال ۲۰۱۳ با افزایش همراه بوده، اما در دو کلاس EC صفر تا دو و $EC < 16$ مساحت تغییرات شوری با کاهش همراه شده است.

Table 4. The trend of changes in salinity in the study area over a period of 10 years

Level-Salinity	Area (ha)		Change
	2013	2023	
0-2	3441.284	1832.197	-1609.09
2-4	6335.448	8150.414	1814.966
4-6	8587.273	9591.37	1004.097
6-8	7556.182	10834.52	3278.338
8-10	10799.06	18573.67	7774.61
10-12	20255.86	19715.52	-540.94
12-14	15110.77	19282.14	4171.37
16>	28065.73	12170.49	-15895.2

۴- نتیجه گیری

دشت قزوین از مراکز مهم کشاورزی در کشور محسوب می‌شود. از طرفی وجود شوره‌زار در این دشت ممکن است موجب اختلال در کشاورزی شود بنابراین در این پژوهش به ارزیابی میزان شوری با استفاده از دو سنجنده Sentinel-2 و Landsat-8 براساس شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف پرداخته شد. همبستگی شاخص‌های پوشش گیاهی و شاخص‌های شوری مختلف با مقادیر اندازه‌گیری شوری در منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی‌های انجام شده نشان داد که سنجنده Sentinel-2 با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر و دسترسی رایگان از دقت بالاتری به‌منظور ارزیابی شاخص‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه داشته است همچنین نتایج به‌دست‌آمده از ارزیابی شاخص‌های مختلف نشان از همبستگی بالای دو شاخص CRSI و GDVI با مقادیر شوری اندازه‌گیری شده داشت، بنابراین به تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه بین میانگین مقادیر ECE و شاخص‌های پوشش گیاهی که بیش‌ترین میزان همبستگی را با داده‌های شوری اندازه‌گیری شده داشتند، پرداخته شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که استفاده از مدل رگرسیونی دومتغیره از میزان همبستگی بالاتری برخوردار خواهد بود و دقت مناسبی در تهیه نقشه شوری در منطقه داشت بنابراین می‌تواند به‌عنوان یک مدل برای تهیه نقشه شوری در منطقه با داده‌های زمینی اندک و با هزینه بسیار کم استفاده شود. در ادامه با توجه به اهمیت بررسی اثربخشی احداث زهکش حائل در منطقه به ارزیابی آن نیز پرداخته شد نتایج به‌دست‌آمده نشان داد احداث زهکش تا فاصله ۲۵۰ متری در کنترل شوری به میزان ۴۰ درصد تأثیرگذار بوده و توانسته است تا حد زیادی از افزایش میزان شوری در منطقه و اراضی بالادست زهکش جلوگیری کند. در ادامه روند تغییرات شوری در دشت قزوین در یک بازه زمانی ده‌ساله مورد بررسی قرار گرفت که بررسی‌های انجام شده نشان از افزایش میزان EC در بخش زیادی از اراضی تحت کشت و مناطق با پوشش گیاهی مناسب داشته است که می‌تواند زنگ خطری برای افزایش شوری باشد. بنابراین سهولت روش‌های مورد استفاده و در دسترس بودن تصاویر ماهواره‌های به‌صورت توالی زمانی و مکانی و در مقابل هزینه‌بر بودن و زمان‌بر بودن کارهای میدانی و آزمایشگاهی که در نهایت به داده‌های گسسته از منطقه منجر می‌شود پیشنهاد می‌گردد برای مطالعه و پایش شوری اراضی از روش‌های سنجش‌ازدوری و مدل‌های برآورد شده به‌منظور پایش شوری استفاده گردد.

۵- پی‌نوشت‌ها

1. GEE: Google Earth Engine
2. USGS: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

- Akram, M., & Sotoodehnia, A. (2011). Monitoring plan of interceptor drain in Qazvin. Co. Reports, Kamab Pars Saman Abran. (In Persian).
- Aldakheel, Y.Y., Elprince, A.M., & Al-Hosaini, A.I. (2005). Mapping of salt-affected soils of irrigated lands in arid regions using remote sensing and GIS, in: Proceedings of 2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies, RAST 2005. IEEE, pp. 467-472.
- Allbed, A., & Kumar, L. (2013). Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: a review. *Adv Remote Sens* (2), 373-385.
- Allbed, A., Kumar, L., & Sinha, P. (2018). Soil salinity and vegetation cover change detection from multi-temporal remotely sensed imagery in Al Hassa Oasis in Saudi Arabia. *Geocarto Int.*, (33), 830-846.
- Allbed, A., Kumar, L., & Sinha, P. (2014). Mapping and modelling spatial variation in soil salinity in the Al Hassa Oasis based on remote sensing indicators and regression techniques. *Remote Sens* (6), 1137-1157.
- Asfaw, E., Suryabhadgavan, K. V., & Argaw, M. (2018). Soil salinity modeling and mapping using remote sensing and GIS: The case of Wonji sugar cane irrigation farm, Ethiopia. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, (17), 250-258.
- Corwin, D.L. (2021). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *Eur. J. Soil Sci.* (72), 842-862.
- Corwin, D.L., & Scudiero, E. (2019). *Advances in Agronomy*.
- El Harti, A., Lhissou, R., Chokmani, K., Ouzemou, J., Hassouna, M., Bachaoui, E.M., & El Ghmari, A. (2016). Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, (50), 64-73.
- Elnaggar, A.A., & Noller, J.S. (2009). Application of remote-sensing data and decision-tree analysis to mapping salt-affected soils over large areas. *Remote Sens*, (2), 151-165.
- FAO. (2015). Status of the world's soil resources. Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy.
- Fakhar, M.S., Kaviani, A., (2022). Evaluation of FAO WaPOR product and PYSEBAL algorithm in estimating The amount of water consumed. *Iran. J. Soil Water Res.* ISSN 2423, 7833.
- Ghavam, M. (2018). Effect of silver nanoparticles on seed germination and seedling growth in *Thymus vulgaris* L. and *Thymus daenensis* Celak under salinity stress. *J. Rangel. Sci.*, 8, 93-100.
- Gorji, T., Sertel, E., & Tanik, A. (2017). Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey. *Ecol. Indic.*, 74, 384-391.
- Huete, A.K., Didan, T.M., EP, R., Gao, n.d. X., & Ferreira, L. G. (2002). Overv. Radiom. Biophys. Perform. MODIS Veg. Indices. *Remote Sens. Environ.*, 83, 195-213.
- Katawatin, R., & Kotrapat, W. (2005). Use of LANDSAT-7 ETM+ with ancillary data for soil salinity mapping in Northeast Thailand, in: Third International Conference on Experimental Mechanics and Third Conference of the Asian Committee on Experimental Mechanics. SPIE, pp. 708-716.
- Khan, N.M., Rastoskuev, V. V, Sato, Y., & Shiozawa, S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agric. Water Manag.*, 77, 96-109.
- Khan, S., & Abbas, A. (2007). Using remote sensing techniques for appraisal of irrigated soil salinity. *Int. Congr. Model. Simul.(MODSIM)*, Model. Simul. Soc. Aust. New Zealand, Bright, 2632-2638.
- Koohafkan, P., & STEWART, B.A. (2008). Water and cereals in drylands, 113pp. Food Agric. Organ. United Nations Earthscan, London-Sterling, VA, UK.

- Lobell, D.B., Lesch, S.M., Corwin, D.L., Ulmer, M.G., Anderson, K.A., Potts, D.J., Doolittle, J.A., Matos, M.R., & Baltas, M.J. (2010). Regional-scale assessment of soil salinity in the Red River Valley using multi-year MODIS EVI and NDVI. *J. Environ. Qual.*, (39), 35-41.
- Maas, E.V., & Hoffman, G.J. (1977). Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. Drain. Div.*, 103, 115-134.
- Marco, E.S., Herrmann, D., Schwab, K., Schweitzer, K., Almengor, R., Berndt, F., Sommer, C., & Probeck, M. (2019). Improvement of existing and development of future copernicus land monitoring products—the ecolass project. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, (42), 201-208.
- Minhas, P.S., Ramos, T.B., Ben-Gal, A., & Pereira, L.S. (2020). Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. *Agric. Water Manag.*, 227, 105832.
- Morshed, M., Islam, M., & Jamil, R. (2016). Soil salinity detection from satellite image analysis: an integrated approach of salinity indices and field data. *Environ. Monit. Assess.*, 188, 1-10.
- Mohammadi, M., Mohammadi Ghaleney, M., & Ebrahimi, K. (2011). Spatial and Temporal Variations of Groundwater Quality of Qazvin plain, Water Research Iran, 5(8), 41-51. (In Persian)
- Nicolas, H., & Walter, C. (2006). Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. *Geoderma*, 134, 217-230.
- 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). *J. Geogr. Environ. Hazards*, 1, 49-64.
- Pereira, L.S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2009). Coping with water scarcity: Addressing the challenges. Springer Science & Business Media.
- Rouse Jr, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1973). Paper a 20, in: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: The Proceedings of a Symposium Held by Goddard Space Flight Center at Washington, DC On. p. 309.
- Scudiero, E., Skaggs, T.H., & Corwin, D.L. (2014)a. Regional scale soil salinity evaluation using Landsat 7, western San Joaquin Valley, California, USA. *Geoderma Reg.*, 2, 82-90.
- Scudiero, E., Teatini, P., Corwin, D.L., Ferro, N.D., Simonetti, G., & Morari, F. (2014b). Spatiotemporal response of maize yield to edaphic and meteorological conditions in a saline farmland. *Agron. J.*, 106, 2163-2174.
- Sotoodehnia, A., Jafari, M., & Daneshkar Arasteh, P. (2014). The Role of Qazvin Central Marsh Interceptor Drain in Controlling Shallow Groundwater Salinity. *Iran. J. Soil Water Res.*, 45, 447-452.
- Taghadosi, M.M., Hasanlou, M., & Eftekhari, K. (2019). Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery. *Eur. J. Remote Sens.*, 52, 138-154.
- Vickers, N.J. (2017). Animal communication: when i'm calling you, will you answer too? *Curr. Biol.*, 27, R713-R715.
- Wang, J., Ding, J., Yu, D., Ma, X., Zhang, Z., Ge, X., Teng, D., Li, X., Liang, J., & Lizaga, I. (2019). Capability of Sentinel-2 MSI data for monitoring and mapping of soil salinity in dry and wet seasons in the Ebinur Lake region, Xinjiang, China. *Geoderma*, 353, 172-187.
- Whitney, K., Scudiero, E., El-Askary, H.M., Skaggs, T.H., Allali, M., & Corwin, D.L. (2018). Validating the use of MODIS time series for salinity assessment over agricultural soils in California, USA. *Ecol. Indic.*, 93, 889-898.
- Wu, W., Al-Shafie, W.M., Mhaimed, A.S., Ziadat, F., Nangia, V., & Payne, W.B. (2014). Soil salinity mapping by multiscale remote sensing in Mesopotamia, Iraq. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 7, 4442-4452.

- Yang, Z., Gao, J., Zhou, C., Shi, P., Zhao, L., Shen, W., & Ouyang, H. (2011). Spatio-temporal changes of NDVI and its relation with climatic variables in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers. *J. Geogr. Sci.*, 21, 979-993.
- Yu, H., Liu, M., Du, B., Wang, Z., Hu, L., & Zhang, B. (2018). Mapping soil salinity/sodicity by using Landsat OLI imagery and PLSR algorithm over semiarid West Jilin Province, China. *Sensors*, 18, 1048.
- Zhang, T.-T., Qi, J.-G., Gao, Y., Ouyang, Z.-T., Zeng, S.-L., & Zhao, B. (2015). Detecting soil salinity with MODIS time series VI data. *Ecol. Indic.*, 52, 480-489.