

ارزیابی تغییرات شوری خاک در اراضی شهرستان بناب با استفاده از داده‌های

ماهواره‌ای و زمینی

بی‌تا حیدرزاده^۱، حسن خاوریان نه‌زک^۲، آیدا عباسی کلو^۳، نیکو حمزه‌پور^۳

۱. گروه سنجش از دور، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴

*نویسنده عهده دار مکاتبات: h.khavari@uma.ac.ir

کد ارکید: ۵۷۲۶-۳۶۴۶-۰۰۰۳-۰۰۰۰

چکیده

پیشینه و هدف: پیشگیری از شور شدن خاک و مدیریت آبیاری کشاورزی بستگی زیادی به برآورد دقیق شوری خاک دارد. بنابراین، استفاده از روش‌های سنتی (تحلیل آزمایشگاهی، بررسی‌های میدانی) برای پایش آن ناکافی و نامناسب است، زیرا با پویایی تکامل این پدیده هم‌خوانی ندارد و هزینه‌های بالایی را نیز به همراه دارد. در ضمن روش‌های مورد استفاده در ارزیابی تغییرات مکانی، باید قدرت پاسخ‌گویی به پرسش‌ها و تحولات جدیدی که در این زمینه رخ می‌دهد را داشته باشد. به عنوان یک راهکار، تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند به عنوان ابزاری قدرتمند برای نظارت مستمر استفاده شوند؛ زیرا حساسیت سیگنال‌های الکترومغناطیسی به پارامترهای خاک در اولین لایه سطحی که مستقیماً با محتوای نمک خاک مرتبط است، وجود دارد. در مورد شوری خاک مطالعات بسیاری صورت گرفته، که براساس نمونه‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده نتایج متفاوتی به دست آمده است، بنابراین به کارگیری داده‌ها و تکنیک‌هایی که بتواند ضمن حذف خطاهای تصویر از دقت و صحت کافی برخوردار باشد، مورد توجه نقشه‌برداران خاک است. با توجه به اهمیت این موضوع، هدف از این پژوهش، ارزیابی و بررسی ارتباط بین داده‌های زمینی با شاخص‌های طیفی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در شهرستان بناب است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، سه نوع داده مورد استفاده قرار گرفت: تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ با فاصله زمانی ۱۵ ساله، تصویر DEM بعنوان داده کمکی در عملیات طبقه‌بندی، همچنین نمونه‌های شوری خاک که از ۷۴ نقطه مختلف در فواصل مکانی ۵۰۰ متری جمع‌آوری شده‌اند. این نمونه‌ها از یک منطقه به مساحت ۴۰ کیلومتر مربع در پاییز ۲۰۱۴ برداشت شده‌اند. جهت بررسی معناداری نمونه‌های زمینی با تصاویر ماهواره‌ای، از ۱۲ شاخص طیفی سنجش از دور، استفاده شده است، پس از پیش‌پردازش‌های لازم (اتمسفری، رادیومتری و اعمال فیلتر ۳*۳)، مقادیر متناظر به مقادیر EC استخراج شدند. تصاویر قبل و بعد از اعمال فیلتر از طریق روش‌های رگرسیون مورد بررسی قرار گرفتند. در ادامه، از روش رگرسیون گام‌به‌گام برای بررسی ارتباط بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته استفاده شد. همه شاخص‌های طیفی به عنوان متغیرهای مستقل وارد مدل شدند، نتایج نشان داد که از بین این شاخص‌ها، NDWI و NDSI دارای بیشترین ارتباط معنادار با نمونه‌های زمینی هستند. برای تهیه نقشه‌ی تغییرات شوری خاک برای سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۴، از نمونه‌های زمینی و شاخص NDSI استفاده شد. همچنین، با استفاده از داده‌های DEM، داده‌های زمینی، و تصویر Landsat ۸، نقشه طبقه‌بندی حداکثر احتمال برای سال ۲۰۱۴ تهیه شد.

نتایج و بحث: تحلیل رگرسیون بین نمونه‌های EC و شاخص‌های طیفی نشان داد که شاخص‌های NDVI (۰/۴۵)، NDWI (۰/۳۷)، SI-T (۰/۴۳) و NDSI (۰/۴۱)، نسبت به دیگر شاخص‌ها دارای ارتباط معنادارتری با شوری خاک هستند. استفاده از فیلتر، ضریب تبیین این ارتباطات را بهبود بخشیده است

به علاوه، شاخص‌های VSSI و BI کمترین ارتباط معنایی را با نمونه‌های زمینی نشان دادند. نمودار تغییرات شوری خاک نشان می‌دهد که در منطقه‌ای با مساحت حدود ۴۰ کیلومتر مربع، بیشترین تغییرات شوری خاک با مقدار ۳۵.۳ کیلومتر مربع مربوط به تغییرات از اراضی شور به فوق‌العاده شور رخ داده است. نقشه طبقه‌بندی حداکثر احتمال برای سال ۲۰۱۴ نشان می‌دهد که با خشک شدن دریاچه ارومیه، روند افزایش شوری در منطقه تشدید شده است.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد، همه شاخص‌های استخراج شده دارای ارتباط معنایی با داده‌های شوری خاک هستند، و از بین شاخص‌های استخراج شده، شاخص‌های (NDSI، SI-T، NDWI، NDVI) دارای ارتباط معنایی بیش‌تری نسبت به شاخص‌های دیگر بودند. هم‌چنین نتایج استفاده از فیلتر نشان داد، اعمال فیلتر بر روی شاخص می‌تواند نتایج پژوهش را بهبود ببخشد. این مطالعه بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای پایش مداوم شوری خاک به دلیل حساسیت و سازگاری آن، بهتر از روش‌های سنتی تاکید دارد. همبستگی‌های قابل توجه بین داده‌های زمینی و شاخص‌های طیفی مانند NDVI، NDWI، SI-T و NDSI بر اثربخشی آنها در تجزیه و تحلیل دینامیک شوری خاک تاکید می‌کند. این یافته‌ها راهنمایی‌های ارزشمندی را برای تحقیقات آتی فراهم می‌کنند و بر استفاده از تکنیک‌های فیلتر برای بهبود دقت در ارزیابی تغییرات مکانی در شوری خاک تاکید می‌کند. اطلاعات این پژوهش می‌تواند به‌عنوان راهنما مفیدی برای انتخاب داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای دیگر در مطالعات مشابه مربوط به تغییرات مکانی شوری خاک در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های طیفی، رگرسیون، سنجش از دور، Stepwise، بناب

Assessment of soil salinity variations in the Bonab area using ground-based and remote sensing-derived data

Bitā Heydarzadeh^۴, Hassan Khavariyan Nahzak^{*۱}, Ayda Abbasi-Kalo^۲, Nikou Hamzehpour^۳

۱. Department of Remote Sensing, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
۲. Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
۳. Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

*corresponding author: h_khavari@uma.ac.ir

Received:

Accepted:

Abstract

Background and objective: Preventing soil salinization and managing agricultural irrigation heavily depend on accurate soil salinity estimation. Soil salinity represents a prevalent form of land degradation, characterized by its temporal and spatial evolution. Traditional methods like laboratory analysis and field surveys are inadequate for monitoring soil salinity due to their inability to keep pace with the rapid changes of this phenomenon and their associated high costs. Additionally, the methods used in assessing spatial changes should have the capability to respond to new questions and developments occurring in this field. To address this challenge, satellite imagery emerges as a valuable tool for continuous monitoring, given the sensitivity of electromagnetic signals to soil parameters, particularly in the surface layer directly linked to soil salt content. Numerous studies have been conducted on soil salinity, yielding different results based on ground samples and satellite imagery. Therefore, the attention of soil mappers is drawn to employing data and techniques capable of ensuring sufficient accuracy and reliability by

eliminating image errors. Given the significance of this issue, the objective of this study is the evaluating and establishing a relationship between ground data and spectral indices extracted from Landsat satellite images in Bonab County.

Material and methods:

In this study, three types of data were used: Landsat γ and $\wedge$ satellite images with a 10-year interval, DEM imagery as auxiliary data for classification operations, and soil salinity samples collected from 44 different points at 500-meter intervals. These samples were collected from a 40-square-kilometer area in the fall of 2014. To assess the significance of ground samples with satellite images, 12 remote sensing spectral indices were utilized, and after necessary preprocessing (atmospheric, radiometric corrections, and applying a 3*3 filter), corresponding values to EC were extracted. Pre- and post-filter images were examined using regression methods. Subsequently, stepwise regression was employed to examine the relationship between independent variables and the dependent variable. All spectral indices were included as independent variables in the model. The results indicated that among these indices, NDWI and NDSI had the most significant correlation with ground samples. To create the soil salinity change map for the years 1999 to 2014, ground samples and the NDSI index were used. Additionally, using DEM data, ground data, and Landsat $\wedge$ imagery, a maximum likelihood classification map for 2014 was generated.

Results and discussion: Regression analysis between EC samples and spectral indices revealed that NDVI (0.45), NDWI (0.37), SI-T (0.43), and NDSI (0.41) had a more significant correlation with soil salinity compared to other indices. The use of filters improved the coefficient of determination for these correlations. Additionally, VSSI and BI indices showed the least significant correlation with ground samples. The soil salinity change chart indicates that in an area of approximately 40 square kilometers, the most significant soil salinity changes, covering 30.3 square kilometers, occurred from saline to highly saline land. The maximum likelihood classification map for 2014 shows that with the drying of Lake Urmia, the trend of increasing salinity in the region has intensified.

Conclusion: In this study, Landsat γ (1999) and Landsat $\wedge$ (2014) imagery was utilized to assess the significant relationship and produce a soil salinity map between ground data and remote sensing spectral indices in Bonab County. The results demonstrated that all extracted indices had significant correlations with soil salinity data, with NDVI, NDWI, SI-T, and NDSI showing stronger correlations compared to other indices. Furthermore, the results of filtering showed that applying a filter to the index could improve research outcomes. The study emphasizes using satellite imagery for ongoing soil salinity monitoring due to its sensitivity and adaptability, outperforming traditional methods. Significant correlations between ground data and spectral indices like NDVI, NDWI, SI-T, and NDSI underscore their effectiveness in analyzing soil salinity dynamics. These findings provide valuable guidance for future research, advocating for filtering techniques to improve accuracy in assessing spatial changes in soil salinity. The findings of this study can serve as a useful guide for selecting data and satellite images in similar studies related to spatial changes in soil salinity.

Keywords: Spectral indexes, Regression, Remote Sensing, Stepwise, Bonab

۱- مقدمه

شوری خاک یک مشکل بزرگ و جدی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است، که یا به‌طور طبیعی رخ می‌دهد و یا مبتنی بر عملکرد انسان است. سطوح بالایی از شوری خاک به‌طور منفی بر رشد و عملکرد محصول تاثیر می‌گذارد و در نهایت منجر به تخریب زمین می‌شود

(۲۰۱۷, Battay et al., ۲۰۱۳; Allbed and Kumar). تخریب زمین ناشی از شوری خاک یک مسئله جهانی در مناطق خشک به‌ویژه در خاورمیانه بوده است (Delavar et al., ۲۰۲۱). از آنجا که بخش اعظم مساحت کشور را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند، این منابع محدود و تجدید ناپذیر در معرض انواع عوامل تخریب‌کننده از جمله فرسایش، شوری و تخریب‌های حاصل از فعالیت‌های انسانی قرار داشته و به‌شدت آسیب‌پذیر می‌باشند. به دلایل متعدد، وسعت زمین‌های شور طبیعی در کشور بسیار گسترده است. با این حال، روند افزایش تخریب پوشش گیاهی در عرصه‌های طبیعی و مدیریت نامناسب آبیاری در زمین‌های آبی، وسعت زمین‌های با شوری ثانویه کشور را به شکل قابل توجهی افزایش داده است (Jafari and Rostampour, ۲۰۱۹). پیش‌بینی شوری خاک در دهه‌های گذشته پیشرفت مهمی داشته و درک توزیع مکانی شوری خاک را بهبود بخشیده است، (Akramhanov et al., ۲۰۰۶). ولی برای مناطقی که معمولاً با شرایط اقتصادی نامناسبی مواجه هستند و بودجه‌های اختصاص داده شده به برنامه‌های نمونه‌برداری به‌طور مکانی و به‌طور موقت بسیار پایین است، رویکردهای مبتنی بر نظارت گسترده سالانه به شکست می‌انجامد، بنابراین رویکردهای جایگزین باید تنظیم و ترویج شوند (۲۰۱۷, Hamzehpour and Bogaert, ۲۰۱۶; Scudiero et al., ۲۰۱۶; Li et al.). فناوری سنجش از دور به ابزاری ضروری برای نظارت بر شوری خاک تبدیل شده است، زیرا می‌تواند اطلاعات نزدیک به زمان واقعی و بسیار کارآمد مبتنی بر اندازه پیکسل را در مورد طیف خاک شور شده ارائه دهند (۲۰۱۹, Jiang and Shu, ۲۰۰۱; Khan et al.). در حال حاضر از این قابلیت داده‌های سنجش از دور و انواع شاخص‌های به دست آمده از ترکیب باندهای مختلف ماهواره‌ها به‌نحو گسترده‌ای برای تهیه نقشه‌های شوری خاک استفاده می‌شود اساس کاربرد این شاخص‌ها تغییرپذیری ویژگی‌های طیفی براساس تغییرپذیری ویژگی‌های خاک است (۲۰۱۵, Azhirabi et al.). با این حال، هنگام استفاده از داده‌های سنجش از دور در خاک‌های شور، محدودیت‌های واضحی نیز وجود دارد. برای سطوح شوری بسیار بالا یا پایین که روی خاک‌هایی که با پوشش گیاهی پوشیده شده‌اند، پیش‌بینی قابل اعتماد شوری خاک عمدتاً غیرممکن است (Douaoui et al., ۲۰۱۷).

Kilic et al. (۲۰۲۲) در پژوهشی به ارزیابی شوری سطحی خاک‌های ۲۶۵۰ هکتار از اراضی کشاورزی و مرتعی در منطقه خشک آناتولی مرکزی، ترکیه پرداختند. آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و بررسی همبستگی مقادیر هدایت الکتریکی ۱۴۵ نمونه خاک و داده‌های سنجش از دور شامل ۲۳ متغیر در محدوده‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز طول موج کوتاه و شاخص‌های پوشش گیاهی، شوری خاک را پایش کردند. نتایج نشان داد که بیشترین همبستگی بین مقادیر هدایت الکتریکی و داده‌های سنجش از دور در باند SWIR^۱ به دست آمد ($R = -۰,۴۳$)، اما مدل‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای دقت کافی در تعیین شوری خاک نداشتند و پیچیدگی طیفی و وضوح پایین تصاویر از عوامل کاهش دقت مدل‌ها بودند. (۲۰۲۲, Zhao et al.) مدل پایش شوری خاک را با استفاده از داده‌های چندطیفی پهباد در منطقه خشک شمال غرب چین توسعه و بهینه‌سازی کردند. آن‌ها مدل‌های معکوس شوری خاک مبتنی بر رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVR)، جنگل تصادفی (RF)، شبکه عصبی پس‌انتشار (BPNN) و ماشین یادگیری تطبیقی (ELM) را ساختند. نتایج نشان داد که مدل ELM برای زمین‌های بایر بهترین عملکرد را داشت و مدل BPNN برای زمین‌های کشاورزی با پوشش گیاهی مناسب‌تر بود. این مطالعه پشتیبانی فنی برای پایش سریع و معکوس شوری خاک و کنترل شوری در مناطق آبیاری فراهم می‌کند. (۲۰۲۲, Singh). در مقاله‌ای جامع به بررسی مدیریت جهانی شوری خاک با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS پرداخت. او با بررسی بیش از ۲۶۰ منبع معتبر، به تحلیل کامل مشکل شوری خاک که بیش از یک میلیارد هکتار در بیش از ۱۰۰ کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهد، پرداخت. این مقاله به تأثیر شوری بر تولیدات کشاورزی و بهداشت محیط زیست و همچنین به بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر شوری خاک پرداخته است. سینگ نشان داد که استراتژی‌های سنجش از دور می‌تواند رویکردی عملی برای ارزیابی واکنش گیاهان نسبت به شوری در محیط‌های متنوع باشد، اما با چالش‌هایی مانند وضوح مکانی و زمانی پایین تصاویر مواجه است. با این حال، پیشرفت در روش‌های سنجش از دور مادون قرمز حرارتی می‌تواند امکان شناسایی تغییرات مکانی در مقیاس کوچکتر را فراهم کند و نتیجه‌گیری کرد که این پیشرفت‌ها می‌تواند به مدیریت بهتر و پایدارتر منابع خاکی کمک کند. (۲۰۲۲, Avdan et al.) به بررسی استفاده از سنسورهای مختلف سنجش از دور مانند، Landsat ۸، Sentinel-۲ و یک سنسور با وضوح مکانی بالا (PlanetScope) برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی شوری خاک از

داده‌های میدانی استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که وضوح مکانی بالاتر تمایل به تولید مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر دارد، اگرچه این مدل‌ها پیچیده‌تر هستند. نتایج همچنین نشان داد که مدل‌های ساده‌تر با وضوح مکانی کمتر همبستگی بالاتری بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده داشتند. این تحقیق تأکید کرد که استفاده از سنسورهای مختلف و داده‌های میدانی بیشتر می‌تواند به بهبود دقت مدل‌ها کمک کند. در پژوهشی، (Abuzaid et al. ۲۰۲۳) در شمال شرقی مصر، قابلیت داده‌های ماهواره لندست ۸ را برای شناسایی و پایش شوری و سدیمی خاک در فصول مرطوب و خشک بررسی کردند. آن‌ها ۷۰ نمونه خاک را در دو بازه زمانی مرطوب و خشک جمع‌آوری و مقادیر pH، هدایت الکتریکی (EC) و درصد سدیم تبدلی (ESP) را اندازه‌گیری کردند. مدل‌های رگرسیون خطی مرحله‌ای با استفاده از داده‌های خاک و بازتاب باندهای ماهواره برای تخمین این مقادیر ساخته و اعتبارسنجی شدند. نتایج نشان داد که باند NIR در تمایز سطوح شوری و سدیمی خاک عملکرد خوبی داشت. این مطالعه نشان داد که داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند به پایش دقیق و اقتصادی شوری و سدیمی خاک کمک کنند. (Emami et al. ۲۰۲۴) در پژوهشی، از سه الگوریتم یادگیری ماشین (جنگل تصادفی، جنگل رگرسیون کوانتیل، و کوبیست) برای پیش‌بینی و مقایسه توزیع مکانی شوری در استان گلستان، ایران، با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی، سنجش از دور، و داده‌های هواشناسی، استفاده شد. جنگل رگرسیون کوانتیل بهترین عملکرد را در پیش‌بینی شوری خاک در عمق ۲۵-۵۰ سانتی‌متر نشان داد.

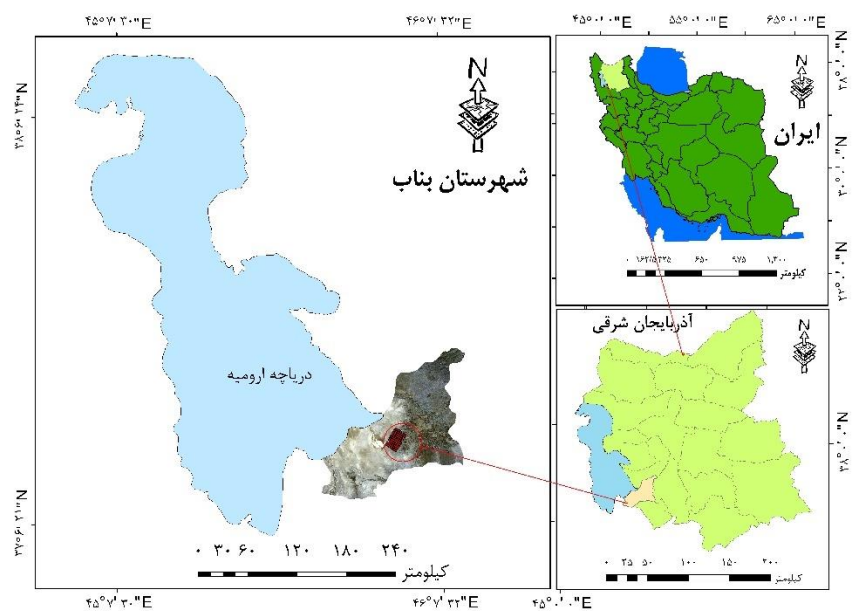
دریاچه ارومیه از جمله مناطقی است که در سال‌های اخیر با بحران پسروری آب، خشکی و افزایش شوری در اراضی اطراف آن مواجه شده است. این اراضی خشک و شور اثرات منفی بر کیفیت هوای منطقه و همچنین زمین‌های کشاورزی اطراف دریاچه دارد. وزش باد در جهات مختلف باعث حرکت ذرات نمک در هوا می‌شود. این ذرات برای سلامت انسان و سایر موجودات خطرناک هستند (Alizade Govarchin, Ghale et al., ۲۰۱۹).

هدف این تحقیق، بررسی تغییرات مکانی و زمانی شوری خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای می‌باشد. برای اطمینان از دقت نتایج حاصله، صحت سنجی نقشه شوری خاک حاصل از داده‌های سنجش از دور با استفاده از داده‌های میدانی مورد نیاز دارای اهمیت زیادی می‌باشد که در این تحقیق مورد بررسی دقیق قرار گرفت.

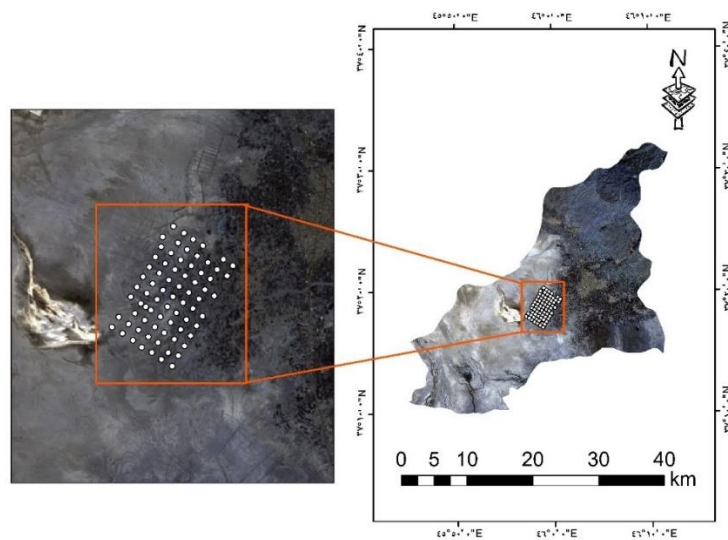
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

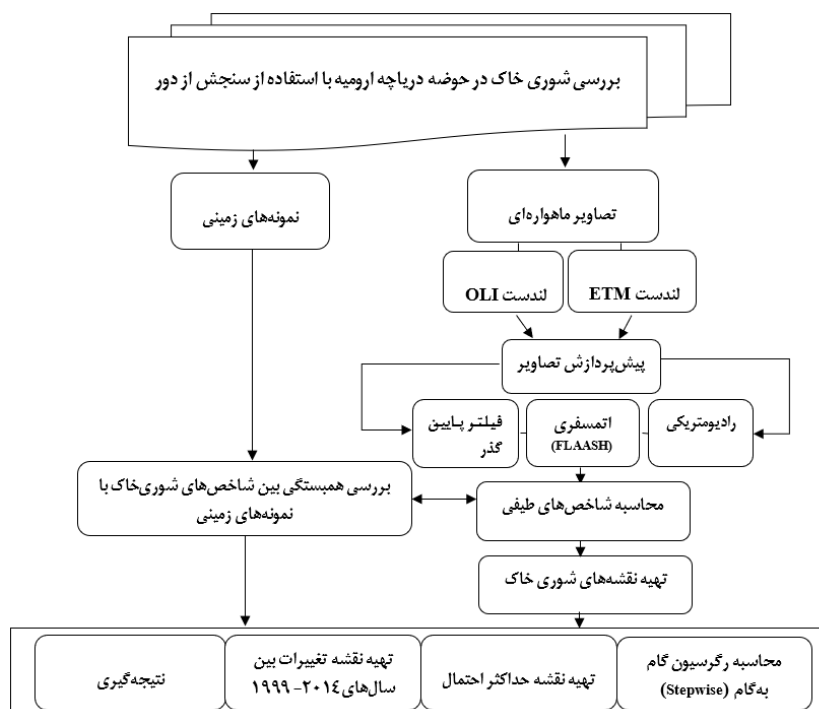
منطقه مورد مطالعه در دشت بناب با ارتفاعی بین ۱۳۰۰-۱۲۷۰ متر، در شمال غربی ایران و در جلگه‌ای حاصلخیز در پایین دست دامنه‌های کوه سهند واقع شده است. محدوده مورد مطالعه بین ۴۵ درجه و ۵۸ دقیقه و ۴۱ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۰۲ دقیقه و ۳۵ ثانیه شرقی و بین ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه و ۲۱ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقه و ۱۸ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. شهرستان بناب از نظر پستی و بلندی مسطح می‌باشد. میانگین بارش سالانه ۲۶۴/۷۳ میلی‌متر است. میانگین دمای سالانه ۱۵ درجه سانتیگراد است. تبخیر احتمالی در منطقه بین ۹۰۰-۱۱۷۰ میلی‌متر است. از نظر زمین‌شناسی، منطقه مورد مطالعه از رسوبات ساحلی و پلایا تشکیل شده است (Hamzehpour and Rahmati, ۲۰۱۶). موقعیت محدوده مورد مطالعه در شکل (۱،۲) و روند کلی مراحل انجام پژوهش در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان آذربایجان شرقی
Figure ۱- Location of the study area in Iran and East Azerbaijan



شکل ۲- نمونه‌های زمینی مورد استفاده در ارزیابی شوری خاک در منطقه مورد مطالعه
Figure ۲- Soil samples of the study area



شکل ۳- نمودار روند انجام پژوهش

Figure ۳- Diagram of the research process

۲-۲- نمونه‌های میدانی داده‌های شوری خاک

در این پژوهش از دو سری داده‌زمینی و ماهواره‌ای برای بررسی ارتباط بین آن‌ها در مورد شوری خاک استفاده شد. نمونه‌های داده‌زمینی پارامتر EC خاک شامل ۷۴ نقطه بودند. که به‌طور شبکه‌ای در فواصل مکانی ۵۰۰ متر برداشت شدند. این نقاط تقریباً یک منطقه به مساحت حدود ۴۰ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهند. با توجه به هدف تحقیق که ارزیابی تغییرات شوری خاک است، از متغیر EC (هدایت الکتریکی) نمونه خاک‌های برداشت شده میدانی برای ارزیابی نتایج استفاده شده است. نقاط نمونه‌برداری برای شوری خاک در (شکل ۲) و اطلاعات آماری مقادیر زمینی در جدول ۱ قابل مشاهده هستند.

جدول ۱- اطلاعات آماری مقادیر زمینی

Table ۱- Statistical information of land values

متغیر مورد بررسی	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار
EC	۱۱/۰۷	۰/۳۳	۱۰۷/۵	۲۰/۵۹

۲-۳- انتخاب و پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای

در این پژوهش برای پیش‌بینی شوری خاک، از تصاویر سری ۷ و سری ۸ لندست استفاده شد. ابتدا تصاویر ماهواره‌ای لندست (سنجنده OLI و ETM) و تصویر DEM ستری از سنجنده SRTM از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا USGS تهیه شد. تصویر DEM بعنوان داده اضافی در عملیات طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد. مشخصات تصاویر در جدول ۲ نمایش داده شده است. درانتخاب تصاویر تلاش شد از تصاویر با کیفیت مناسب و به‌ویژه بدون ابر استفاده شود، سپس منطقه‌ای که داده‌های زمینی در آن منطقه قرار داشتند، از کل منطقه جدا شد، برای پیش‌پردازش تصاویر، تصحیحات رادئومتریکی و اتمسفری با استفاده از نرم افزار ENVI روش FLAASH (Aghaei et al., ۲۰۱۹) و فیلتر پایین‌گذر ۳*۳ (Pujaniki et al., ۲۰۲۱) اعمال شد. تصاویر همچنین از لحاظ دقت تصحیحات هندسی مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۲- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در تحلیل تغییرات شوری خاک

Table ۲- Specifications of satellite images used in the analysis of changes in soil salinity

ماهواره	تاریخ	گذر	ردیف	قدرت تفکیک مکانی
لندست ۷ (ETM)	۱۹۹۹/۱۰/۱۶	۱۶۸	۳۴	۳۰
لندست ۸ (OLI)	۲۰۱۴/۰۸/۱۴	۱۶۸	۳۴	۳۰

۲-۳-۱- پیش‌پردازش فیلتر بر روی شاخص‌های سنجش از دوری

هدف از فیلتر پایین‌گذر، صاف کردن تصویر اصلی است. با کاهش تفاوت‌های بین مقادیر پیکسل‌ها با میانگین‌گیری پیکسل‌های نزدیک به یکدیگر، در مرحله اول از یک فیلتر پایین‌گذر با اندازه پنجره ۳*۳ استفاده می‌شود. این فیلتر آرایه‌ای از یک‌ها است که تقسیم بر تعداد عناصر در هسته فیلتر صورت می‌گیرد. فیلتر پایین‌گذر در دامنه فرکانس با حذف مولفه‌های فرکانس بالا به دست می‌آید. (Pujaniki et al., ۲۰۲۱).

۲-۴- محاسبه شاخص‌ها

جهت تهیه نقشه شوری خاک، در این پژوهش از ۱۲ شاخص شوری خاک که قبلاً در مطالعات دیگر مورد استفاده قرار گرفته بودند (جدول ۳) استفاده شد (Zare et al., ۲۰۱۹; Shafizadeh-Moghadam et al., ۲۰۲۲; Naseri and Mostafazadeh, ۲۰۲۳). به منظور بازیابی دقیق مقادیر پس از پیش‌پردازش، از شاخص‌های شوری برای طبقه‌بندی طبقات شوری براساس تخصیص مقادیر پیکسل متناظر به مقادیر EC استفاده شد. در نهایت تحلیل رگرسیون برای یافتن رابطه بین اندازه‌گیری‌های زمینی و مقادیر شاخص تصاویر ماهواره‌ای انجام شد (Gorji et al., ۲۰۱۷; Abdolalizadeh et al., ۲۰۲۰). برای نمونه‌های زمینی و شاخص‌های استخراج شده ضریب تبیین و نمودار رگرسیونی بدون اعمال فیلتر اجرا شد. سپس، بر روی شاخص‌ها فیلتر پایین‌گذر اعمال شد و نتایج آن در نقشه‌ها و معادله‌های رگرسیونی نمایش داده شد.

جدول ۳- شاخص‌های مورد استفاده در ارزیابی تغییرات مکانی شوری خاک

Table ۳- Indicators used in the evaluation of spatial changes of soil salinity

شاخص‌ها	فرمول	منبع
NDVT	$(NIR - Red)/(Red + NIR)$	Rouse et al. (۱۹۷۳)
NDSI	$(Red - NIR)/(Red + NIR)$	Khan et al. (۲۰۰۵)
NDWI	$(Green - NIR)/(Green + NIR)$	Mcfeters (۱۹۹۶)
SI	$\sqrt{BLUE \times R}$	Khan et al. (۲۰۰۵)
SI ^۱	$\sqrt{G \times R}$	Khan et al. (۲۰۰۵)
SI ^۲	$\sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2}$	Douaoui et al. (۲۰۰۶)
SI ^۳	$\sqrt{G^2 + R^2}$	Douaoui et al. (۲۰۰۶)
SI_T	$\frac{R}{(\frac{R}{NIR}) \times 100}$	Khan et al. (۲۰۰۵)
SSSI ^۱	$(Swir1 - Swir2)$	Bannari et al. (۲۰۰۸)
SSSI ^۲	$Swir1 \times Swir2 - Swir2 \times Swir2)/Swir1$	Bannari et al. (۲۰۰۸)
VSSI	$2 \times Green - 5(Red + NIR)$	Dehni & Lounis. (۲۰۱۲)
BI	$\sqrt{R^2 + NIR^2}$	Khan et al. (۲۰۰۵)

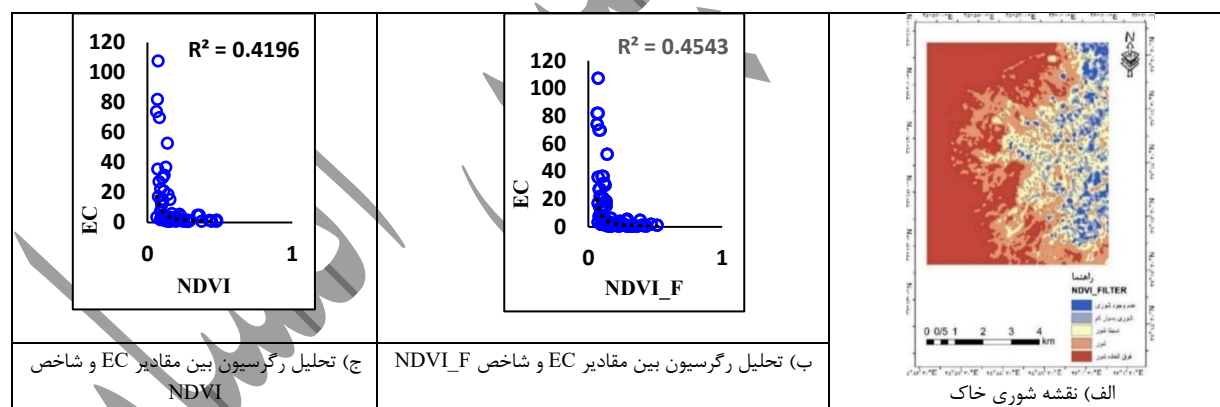
۲-۵- طبقه‌بندی حداکثر احتمال

روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال از بین روش‌های طبقه‌بندی به‌عنوان دقیق‌ترین و پراستفاده‌ترین روش‌ها ذکر شده است (Bolstad and Lillesand, ۱۹۹۱). همه مناطق آموزشی دارای پراکنش نرمال هستند. در واقع نمونه‌های آموزشی معرف هر کلاس هستند.

بنابراین تا حد امکان از نمونه بیشتری باید استفاده شود، تا تغییرات بسیاری از ویژگی‌های طیفی در این گستره پیوسته قرار گیرد (Alavipanah, ۲۰۱۶). به علت اینکه توپوگرافی درپیش‌بینی تغییرات شوری خاک نقش مهمی دارد (Yahiaoui et al., ۲۰۱۵). از اطلاعات توپوگرافی منطقه برای طبقه‌بندی شوری خاک استفاده شد. بدین صورت که لایه‌ی DEM منطقه به تصویر اضافه شد. سپس طبقه‌بندی صورت گرفت. نمونه‌های تعلیمی در این روش براساس نمونه‌های میدانی شوری خاک و نمونه‌های برداشت شده از تصویر استخراج شدند. جهت اعتبارسنجی از داده‌های زمینی شوری خاک استفاده شد. در نهایت چهار کلاس شوری کم، شوری متوسط، شوری زیاد و شوری بسیار زیاد استخراج شد.

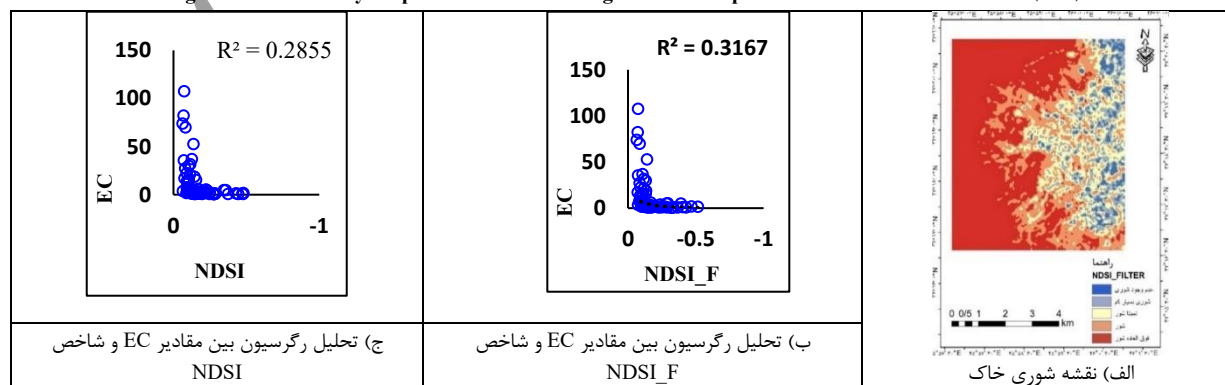
۳- نتایج و بحث

براساس نتایج به دست آمده، ضریب تبیین شاخص NDVI (شکل ۴) بدون اعمال فیلتر ۴۱ درصد به دست آمد. پس از اعمال فیلتر پایین‌گذر بر روی شاخص NDVI، ضریب تبیین به ۴۵ درصد افزایش یافت. در (شکل ۵) ارزیابی ضریب تبیین بین شاخص NDSI و نمونه‌های شوری زمینی (EC) با روش رگرسیون نمایش داده شده است. شاخص NDSI بدون اعمال فیلتر با ضریب تبیین ۳۸ درصد به دست آمد که پس از اعمال فیلتر پایین‌گذر، ضریب تبیین به ۴۱ درصد افزایش یافته است. در (شکل ۶) نیز ضریب تبیین بین شاخص NDWI و نمونه‌های زمینی نمایش داده شده است. براساس این یافته‌ها، شاخص NDWI پس از اعمال فیلتر پایین‌گذر، از ۳۵ درصد به ۳۸ درصد ارتقا یافت. به این ترتیب، در منطقه مطالعاتی، با اعمال فیلتر پایین‌گذر، ضریب تبیین بین شاخص‌ها و نمونه‌های EC افزایش یافت. از این رو، این نتایج می‌توانند به ما کمک کنند تا بهترین شاخص و روش تحلیل را برای پیش‌بینی شوری خاک در نظر بگیریم. هم‌چنین با استفاده از شاخص‌ها، نقشه شوری خاک تهیه شد. این نقشه‌ها به ۵ کلاس تقسیم شده است، که شامل عدم وجود شوری، شوری بسیار کم، نسبتاً شور، شور و فوق‌العاده شور است.



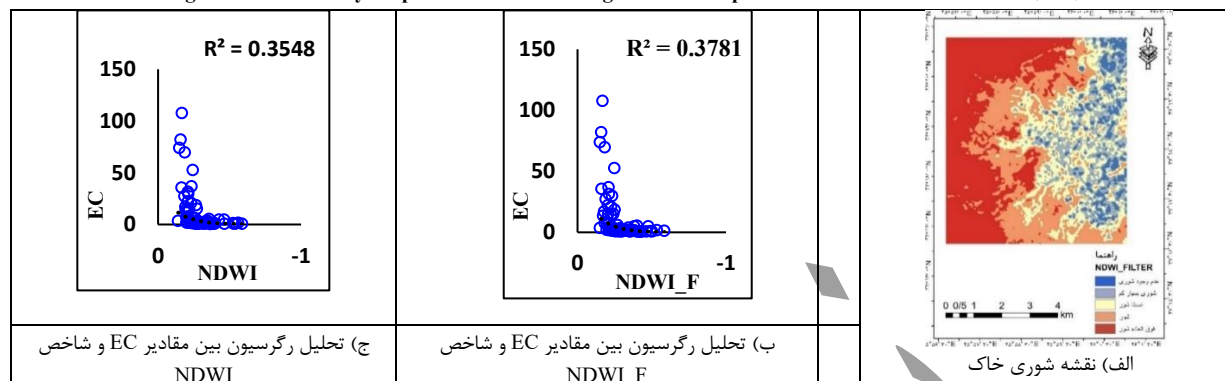
شکل ۴- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)

Figure ۴- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)



شکل ۵- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)

Figure ۵- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)

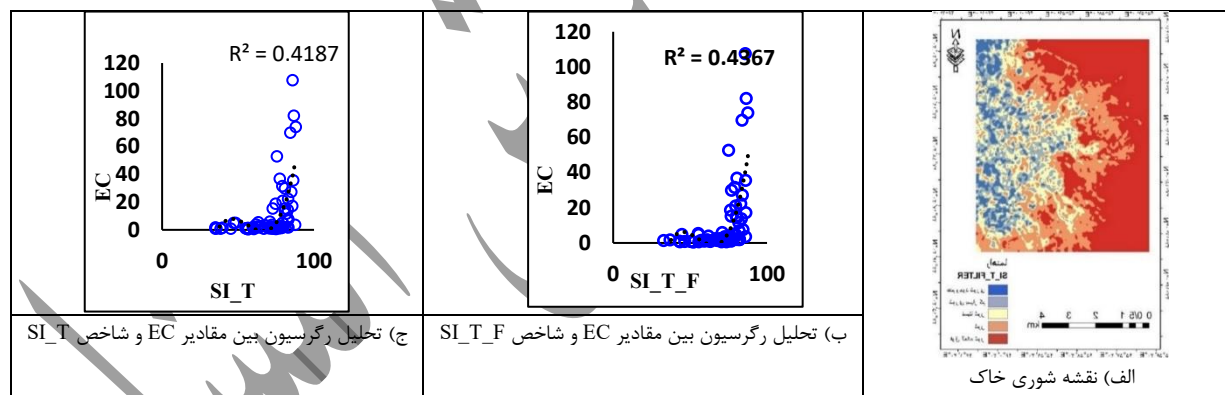


شکل ۶- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)

Figure ۶- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)

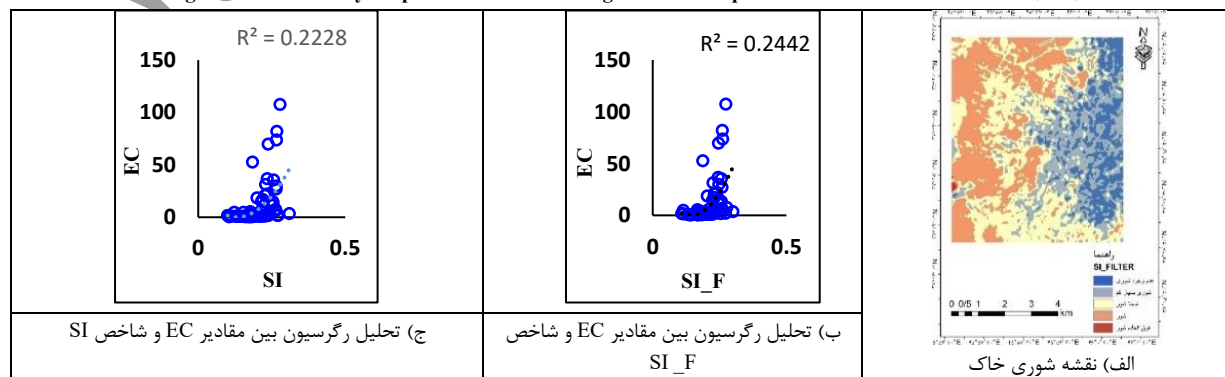
۳-۱- تحلیل محاسبه شوری خاک با استفاده از رگرسیون و شاخص SI^۱, SI, SI_T

(شکل‌های ۷، ۸ و ۹) به ترتیب ضریب تبیین بین شاخص‌های SI^۱, SI, SI_T با نمونه‌های زمینی را بصورت معادلات رگرسیونی نشان می‌دهد. براساس این نتایج، با اعمال فیلتر پایین‌گذر، شاخص SI_T از ۴۱ درصد به ۴۳ درصد؛ شاخص SI از ۲۲ درصد به ۲۴ درصد و شاخص SI^۱ از ۲۰ به ۲۲ درصد افزایش یافته است.



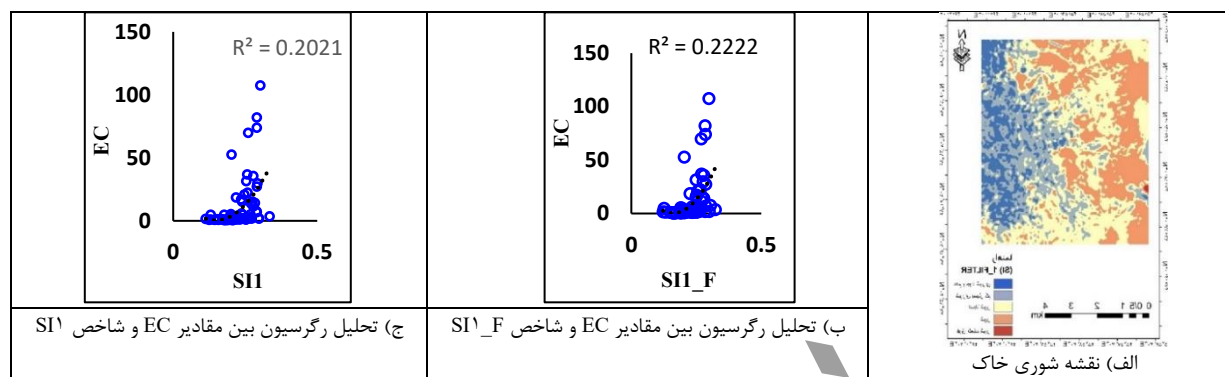
شکل ۷- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)

Figure ۷- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)



شکل ۸- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)

Figure ۸- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)

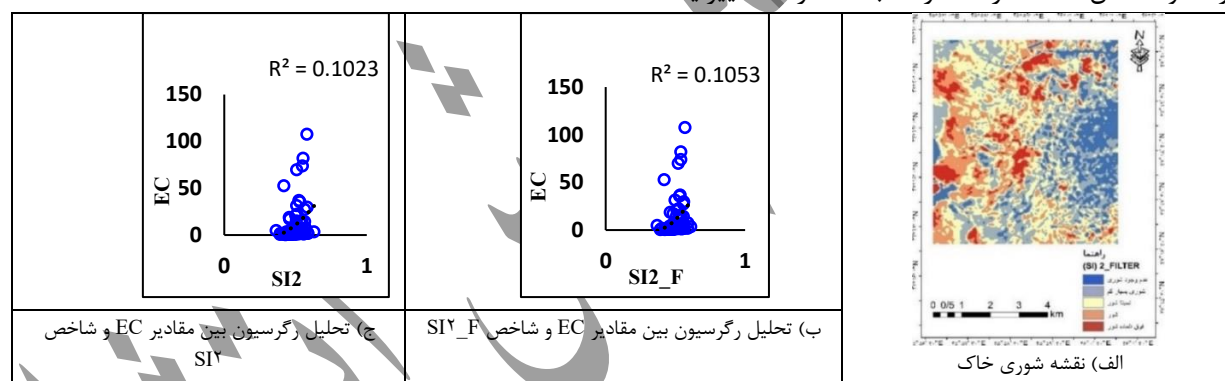


شکل ۹- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)

Figure ۹- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)

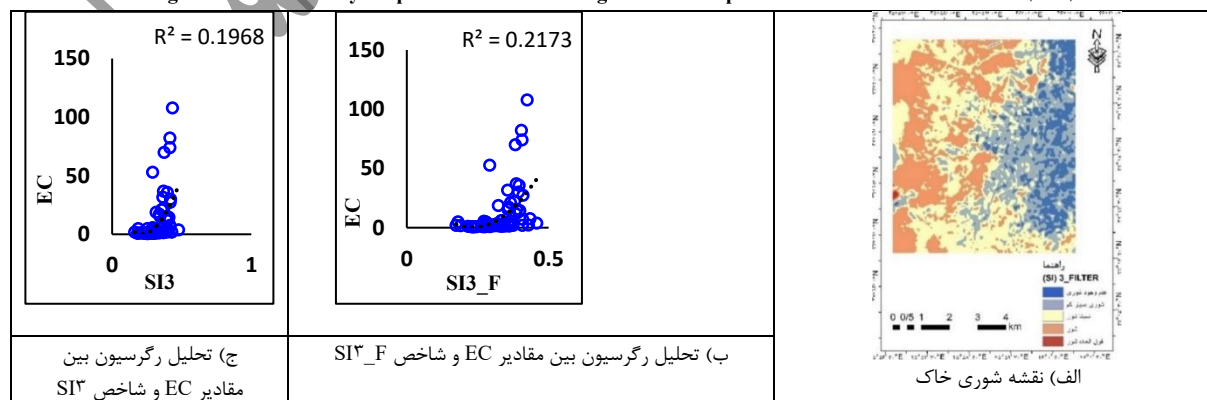
۳-۲- تحلیل محاسبه شوری خاک با استفاده از رگرسیون و شاخص SSSI^۱, SI^۲, SI^۳

(شکل های ۱۰، ۱۱ و ۱۲) به ترتیب ضریب تبیین بین شاخص های SI^۲, SI^۳, SSSI^۱ با نمونه های زمینی را به صورت معادلات رگرسیونی نشان می دهد. نتایج به دست آمده نشان دادند که شاخص SI^۲ بدون اعمال فیلتر، ضریب تبیین ۱۰ درصد داشت که با اعمال فیلتر پایین گذر، تنها مقدار جزئی تغییر یافت (شکل ۱۰). اما شاخص SI^۳ با اعمال فیلتر پایین گذر، از ۱۹ درصد به ۲۱ درصد و شاخص SSSI^۱ از ۱۴ درصد به ۱۶ درصد تغییر یافتند.



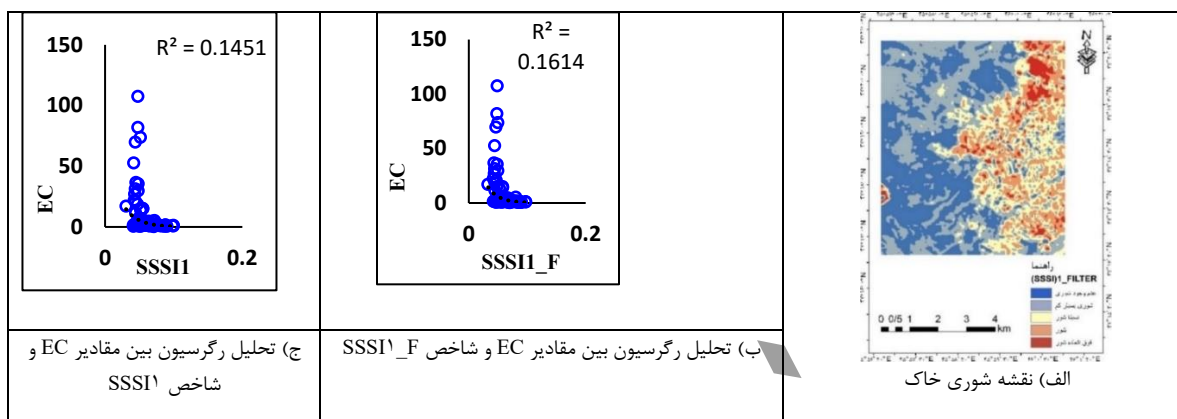
شکل ۱۰- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)

Figure ۱۰- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)



شکل ۱۱- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)

Figure ۱۱- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)

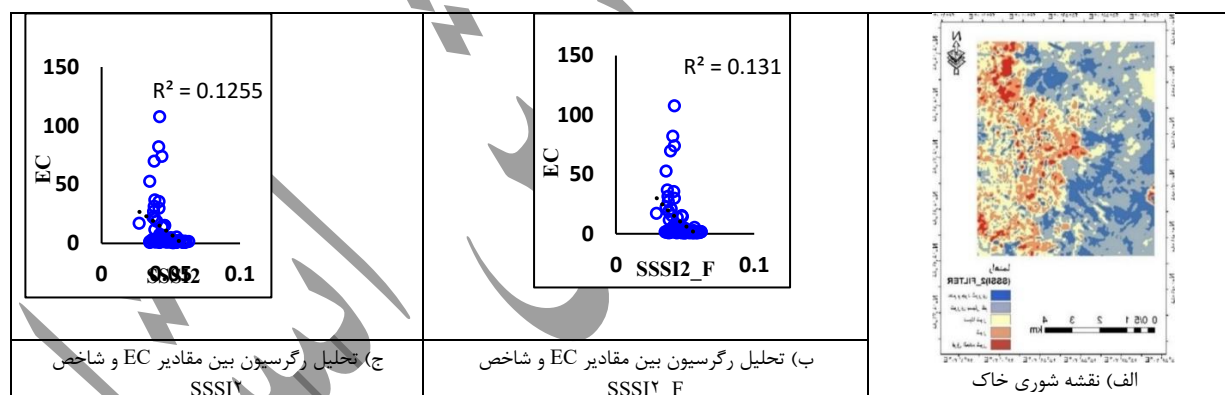


شکل ۱۲- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)

Figure ۱۲- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)

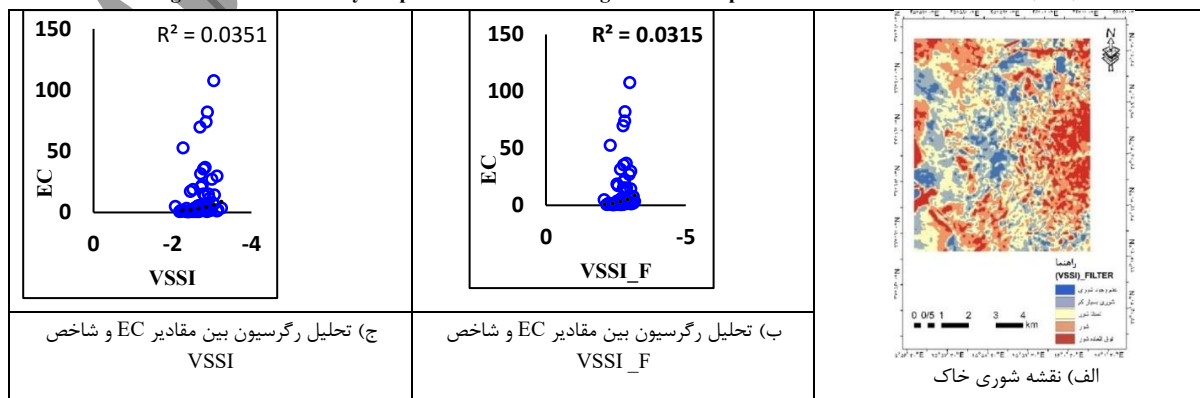
۳-۳- تحلیل محاسبه شوری خاک با استفاده از رگرسیون و شاخص $SSSI^2$, $VSSI$, BI

(شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵) ضریب تبیین و ارتباط بین شاخص‌های $SSSI^2$, $VSSI$, BI را بصورت معادلات رگرسیونی نشان می‌دهد، نتایج به دست آمده نشان دادند که شاخص $SSSI^2$ بدون اعمال فیلتر، ضریب تبیین ۱۲ درصد داشت که با اعمال فیلتر پایین‌گذر به ۱۳ درصد تغییر یافت. نتایج شاخص‌های $VSSI$ و BI ضریب تبیین ۰/۰۴ درصد داشت که حتی با اعمال فیلتر پایین‌گذر نتیجه تغییری نداشت.



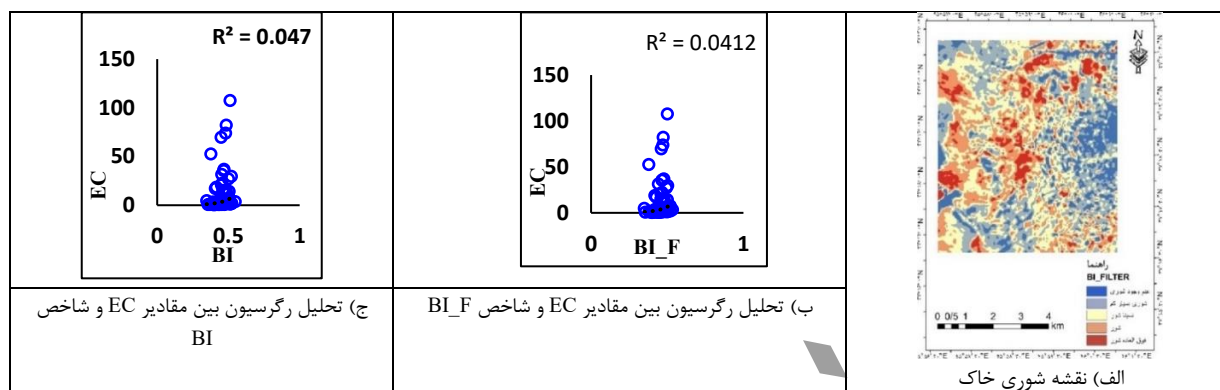
شکل ۱۳- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)

Figure ۱۳- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)



شکل ۱۴- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)

Figure ۱۴- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)



شکل ۱۵- نقشه شوری خاک و نمودارهای همبستگی شاخص محاسباتی با مقادیر EC (۲۰۱۴)
Figure ۱۵- Soil Salinity Map and Correlation Diagrams of Computational Index with EC Values (۲۰۱۴)

۳-۴- بررسی و ارزیابی ارتباط و همبستگی بین شاخص‌های سنجش از دور و نمونه‌های زمینی

در مطالعه حاضر، مدل‌های رگرسیون متنوعی ایجاد شد، از جمله خطی، لگاریتمی، اما رابطه‌ی نمایی بالاترین مقدار ضریب تبیین را با داده‌های شوری خاک نشان داد. رابطه‌ی نمایی به دلیل سطح اشباع پایین آن‌ها با شاخص‌های شوری خاک ایده‌آل است (Bannari, ۲۰۰۸). et al., (۲۰۰۸) براساس نتایج به دست آمده از شاخص‌ها و نمونه‌های زمینی شوری خاک بالاترین همبستگی را با شاخص‌های NDVI (۰/۴۵)، NDWI (۰/۳۷)، SI-T (۰/۴۳) و NDSI (۰/۴۱) دارد. و شاخص VSSI و BI با ضریب تبیین (۰/۰۴) دارای کمترین ارتباط با نمونه‌زمینی بود.

در پژوهشی (Ahmadi et al., ۲۰۱۷) در منطقه آجی‌چای اطراف دریاچه ارومیه از شاخص SI-T برای ارزیابی میزان همبستگی استفاده شد. که این شاخص با ضریب تبیین (۰/۹۷) بالاترین ضریب تبیین را در منطقه نشان داد، و می‌توان نتیجه گرفت، چون شاخص‌های سنجش از دور براساس شرایط منطقه مورد مطالعه طراحی می‌شوند، دارای نتایج متفاوتی در سایر مناطق هستند و شاخص SI-T در پژوهش حاضر دارای بالاترین ضریب تبیین بود.

به‌طور کلی، مناطق خشک ایران در دوره‌های خشکسالی پوشش گیاهی ناچیز و کمتر از ۵ تا ۱۰ درصد را تولید می‌کنند. در این سال‌ها، بازتاب گیاهی در ناحیه‌ی مادون قرمز نزدیک کاهش یافته و یا در ناحیه موج‌های مرئی افزایش قابل توجهی دارد. هنگامی که پوشش گیاهی تخریب شده است یا در دوره‌های خشکسالی، بازتاب خاک غالب می‌شود و شاخص‌های گیاهی توانایی تشخیص پوشش گیاهی و مرتع را از دست می‌دهند. به عبارت دیگر، در این شرایط بخش مرتع و خاک بازتاب‌های مشابه تولید می‌کنند که شاخص‌ها قادر به تفکیک آن‌ها نیستند (Farshad and Farzaneh, ۲۰۱۷).

۳-۵- نتایج رگرسیون گام‌به‌گام حاصل از مقایسه نمونه‌های میدانی و ماهواره‌ای

رگرسیون گام‌به‌گام بررسی اثر چند متغیر مستقل بر متغیر وابسته می‌باشد، در این روش تمام متغیرهای مستقل وارد مدل شدند و آن متغیر مستقل که تاثیر چندانی بر متغیر وابسته نداشت، از مدل حذف شد. تصمیم‌گیری اینکه کدام متغیرها در مدل رگرسیون گنجانده شود، همیشه آسان نیست و افزایش تعداد متغیرها در یک مدل ممکن است منجر به برآزش بیش از حد شود و در صورت استفاده با مجموعه داده‌های متفاوت، پیش‌بینی ضعیفی ارائه دهد (Allbed et al., ۲۰۱۴). رگرسیون گام‌به‌گام امکان یافتن مناسب‌ترین پارامترهای مرتبط با شوری خاک را فراهم می‌کند. در نهایت، درجه بندی براساس بزرگ‌ترین واحد تجمع، یک مدل دقیق‌تر به دست می‌دهد، چرا که تاثیر تغییرات شوری خاک بالا را کاهش می‌دهد. در غیر این صورت باید شبکه نمونه‌های خاک را گسترش دهیم تا بهترین برآوردها به دست آید (Lhissoui et al., ۲۰۱۴).

بنابراین، تمام شاخص‌های طیفی وارد مدل شدند، و از بین شاخص‌ها دو شاخص بالاترین ارتباط را نسبت به شاخص‌های دیگر داشتند. آزمون t در رگرسیون گام‌به‌گام برای ارزیابی اهمیت آماری هر متغیر مستقل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون برای

بررسی اینکه آیا اضافه کردن و یا حذف کردن یک متغیر مستقل، به مدل رگرسیون تغییر معناداری در عملکرد مدل ایجاد می کند یا نه استفاده می شود.

در آزمون t فرضیه صفر (تفاوت بین ضریب مربوطه و صفر) بررسی می شود اگر مقدار p-value کمتر از سطح معناداری مشخص شده (معمولاً ۰/۰۵) باشد معنادار خواهد بود، و ضریب مربوطه معنادار خواهد بود، و متغیر مستقل با متغیر وابسته مرتبط خواهد بود. با توجه به اطلاعات (جدول ۴) بررسی معناداری آزمون t با حد کمیتی که برای سطح مشخص شده مقایسه شد. با توجه به مقادیر p-value که بین (۰/۰۱-۰/۰۰) قرار دارد حد کمیت معادل با این سطح اهمیت، می تواند متغیر باشد و باید مقدار t بزرگتر از این حد باشد، تا ضریب معنادار شود. و با توجه به مقادیر t در جدول فوق می توان نتیجه گرفت ضریب متغیر مستقل معنادار است و بر نمونه های وابسته تاثیر می گذارد. مقدار R (ضریب همبستگی) بین متغیر وابسته و مستقل را نشان می دهد، که در مدل اول برابر $NDWI = ۰/۴۵$ ، مدل دوم یعنی NDWI و NDSI برابر با ۰/۵۶ می باشد. براساس اطلاعات فوق مقدار ضریب همبستگی بین متغیر وابسته و مستقل ارتباط متوسط تا قوی می باشد. ضریب همبستگی R مربع نشان می دهد، که طبق جدول متغیرهای مستقل نتوانسته اند تمام تغییرات متغیر وابسته را توضیح بدهند. ضریب همبستگی R تعدیل شده که با توجه به جدول به مدل دوم که ترکیب دو شاخص می باشد عدد ۰/۲۹ را نشان می دهد.

جدول ۴- رگرسیون گام به گام حاصل از نمونه های میدانی شوری خاک با داده های ماهواره ای

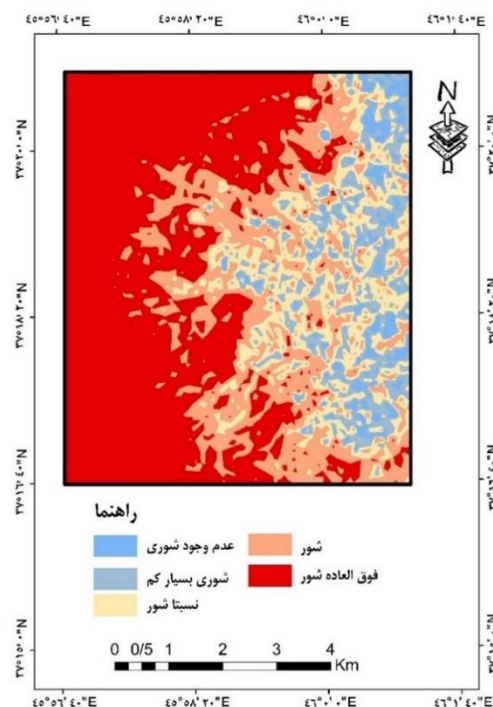
Table 4- Stepwise Regression of soil Salinity field samples with satellite data

Table -- Stepwise Regression of Soil Salinity field samples with satellite data									
مدل	ضرایب غیر استاندارد		ضرایب استاندارد	t	sig	R	ضریب همبستگی R	ضریب همبستگی R	خطای استاندارد پیش بینی
	B	خطای استاندارد	Beta				تعدیل شده		
ثابت	۳۹/۷۵	۶/۹۸	۰/۴۵	۵/۶۸	/۰۰۰	/۴۵	۰/۲۰	۰/۱۹	۱۸/۳۶۹
NDWI	۱۰۹/۵۲	۲۵/۲۹		۴/۳۲	/۰۰۰				
ثابت	۱۰۱/۵۸	۱۹/۵۳	۲/۸۵	۵/۲۰	/۰۰۰	/۵۶	۰/۳۱	۰/۲۹	۱۷/۱۸۲
NDWI	۶۸۸/۵۹	۱۷/۹۷	-۲/۴۲	۳/۹۵	/۰۰۰				
NDSI	-۵۳۸/۳۸	۱۶/۲۴		-۳/۳۶	/۰۰۱				

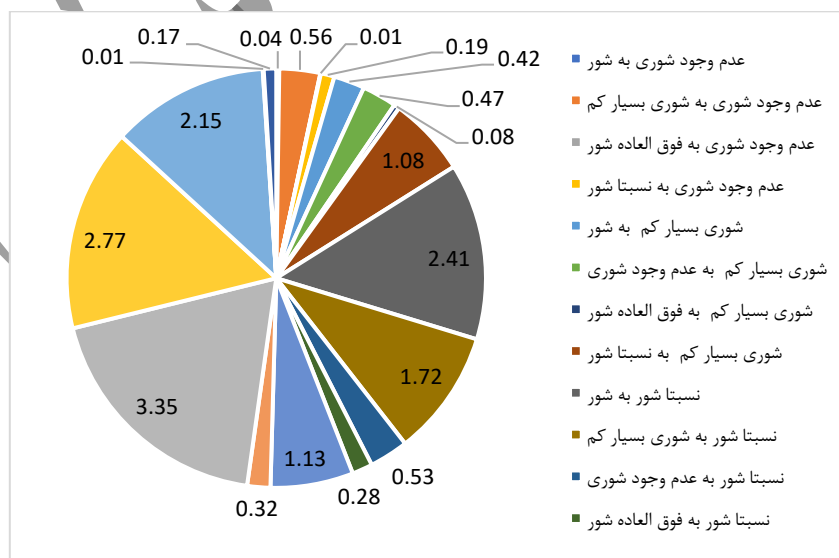
۳-۶- بررسی تغییرات درصد شوری در سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۴

(شکل ۱۷) روند تغییرات شوری خاک در منطقه مورد مطالعه در فاصله زمانی ۱۵ سال (۱۹۹۹-۲۰۱۴) را نشان می دهد. مقادیر تغییرات شوری خاک، براساس شاخص NDSI به دست آمده اند. با توجه به مقادیر، در منطقه مورد مطالعه که حدود ۴۰ کیلومتر مربع بود، بیشترین تغییرات شوری خاک با مقدار ۳/۳۵ کیلومتر مربع مربوط به تغییرات از اراضی شور به فوق العاده شور است، همچنین مقدار ۲/۷۷ کیلومتر مربع از اراضی شور به نسبتا شور تغییر کرده، ۲/۴۱ کیلومتر مربع از اراضی نسبتا شور به شور و ۲/۱۵ کیلومتر مربع از اراضی فوق العاده شور به شور تغییر کاربری داده اند.

مقدار RMSE محاسبه شده برای نقشه تغییرات ایجاد شده بین سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۴ برابر با ۲۳/۱۵ به دست آمده است. مقدار میانگین داده های هدایت الکتریکی نمونه خاک های مورد مطالعه برابر ۱۱/۰۷ (میلی زیمنس بر متر) است. هم چنین، مقادیر حداقل و حداکثر داده های هدایت الکتریکی نمونه خاک های مورد مطالعه به ترتیب ۰/۳۳ و ۱۰۷/۵ (میلی زیمنس بر متر) است که نشان دهنده دامنه تغییرات گسترده در شوری خاک در منطقه مورد مطالعه است. در این راستا، می توان گفت که مقادیر بالای هدایت الکتریکی می تواند تاثیر قابل توجهی بر تغییرات مقدار میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) بگذارند و باعث افزایش آن شوند و باعث افزایش خطا در مقادیر ارائه شده RMSE شوند.



شکل ۱۶- نقشه تغییرات ایجاد شده بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۴
Figure ۱۶- Map of the changes made between ۱۹۹۹ and ۲۰۱۴

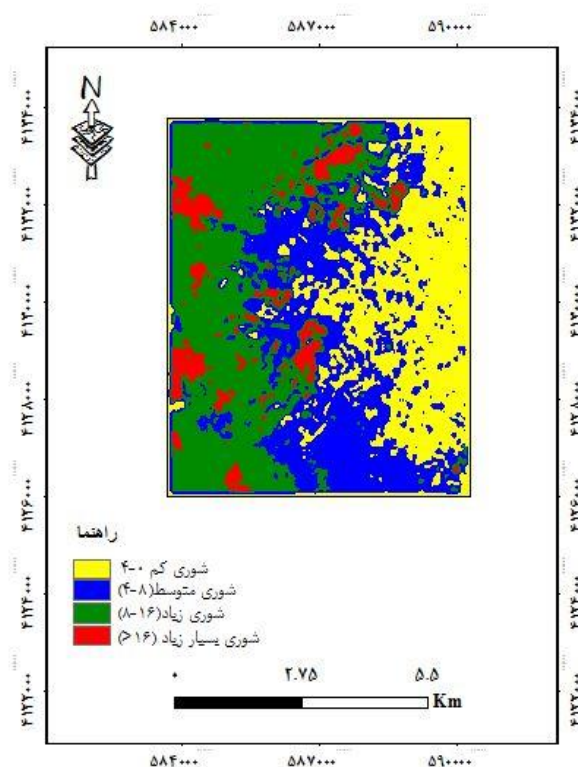


شکل ۱۷- روند تغییرات شوری خاک بین سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۴
Figure ۱۷- The trend of changes in soil salinity between ۱۹۹۹ and ۲۰۱۴

۳-۷- نقشه شوری خاک با استفاده از حداکثر احتمال

با استفاده از روش طبقه‌بندی با حداکثر احتمال، نقشه شوری خاک برای سال ۲۰۱۴ تهیه شد. این نقشه به چهار طبقه تقسیم‌بندی شده است که شامل شوری کم (۰-۴)، شوری متوسط (۴-۸)، شوری زیاد (۸-۱۶) و شوری بسیار زیاد (۱۶+) است. نتایج طبقه‌بندی حاصل، ضریب کاپای ۸۴ درصد و دقت کلی ۸۸/۷ درصد را نشان می‌دهد و دارای دقت بالایی است.

طبق نتایج طبقه‌بندی با حداکثر احتمال، مناطق غیر شور به مساحت ۱۴/۵ کیلومتر مربع را تشکیل می‌دهند و کلاس شوری متوسط مساحت ۱۷/۶ کیلومتر مربع را به خود اختصاص داده است. مساحت مناطق دیگر نیز در جدول ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۱۸- نقشه شوری خاک ۲۰۱۴ با استفاده از روش حداکثر احتمال
Figure 18- Soil salinity Map ۲۰۱۴ using Maximum likelihood method

جدول ۵ طبقات شوری خاک منطقه مورد مطالعه حاصل طبقه‌بندی حداکثر احتمال همراه با مساحت به کیلومتر و درصد مساحت برای سال ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد.

جدول ۵- جدول طبقه‌بندی شوری خاک به وسیله حداکثر احتمال
Table ۵- Soil salinity classification table by maximum likelihood

کلاس‌های شوری خاک	مساحت به کیلومتر	درصد مساحت
غیر شور	۱۴/۵۱۵۲	۲۸/۶۷
متوسط	۱۷/۶۵۷۱	۳۴/۸۸
زیاد	۱۵/۲۷۸۴	۳۰/۱۸
خیلی زیاد	۳/۱۶۸۹	۶/۲۶
مجموع	۵۰/۶۱۹۶	۱۰۰

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی شوری خاک از شاخص‌های سنجش از دوری و معادلات آماری استفاده شد. و از رگرسیون گام به گام (stepwise) برای بررسی معناداری بین متغیرهای مستقل با متغیر وابسته استفاده گردید. بدین جهت بعد از مطالعه متعدد درباره شوری خاک، یک مطالعه موردی با داده‌های موجود، انجام شد تا نقشه‌های شوری در منطقه مورد مطالعه با استفاده از ۱۲ شاخص

سنجش از دور و تحلیل‌های رگرسیون و اعمال فیلتر بر روی شاخص‌ها تهیه شود. هدف از این مطالعه، ارزیابی ارتباط بین داده‌های زمینی با تصاویر ماهواره‌ای در شهرستان بناب بود. نتایج تحلیل رگرسیون نشان داد که شاخص‌های NDVI (۰/۴۵)، NDWI (۰/۳۷)، SI-T (۰/۴۳) و NDSI (۰/۴۱) نسبت به سایر شاخص‌ها ارتباط معنادارتری با شوری خاک دارند. شاخص VSSI و BI با ضریب تبیین (۰/۰۴) دارای کمترین ارتباط با نمونه‌زمینی بود. پس از اجرای فیلتر بر روی شاخص‌ها، مشاهده شد که مقدار همبستگی بهبود یافت. همچنین در رگرسیون گام‌به‌گام هر ۱۲ شاخص به‌عنوان متغیر مستقل وارد نرم‌افزار شدند. از بین آن‌ها شاخص NDSI و شاخص NDWI دارای ارتباط معنایی بهتری نسبت به سایر شاخص‌ها با مقادیر شوری خاک بودند، بنابراین بقیه شاخص‌ها از معادله حذف شدند. با توجه به سطح معناداری داده‌های زمینی با شاخص‌های سنجش از دور بین بازتاب طیفی خاک و شوری خاک همبستگی وجود دارد، اما نه کاملاً همبستگی، که نشان می‌دهد بازتاب طیفی خاک شور شده تحت تأثیر عوامل دیگری نیز علاوه بر شوری خاک، از جمله مواد اولیه خاک، پوشش گیاهی، رطوبت خاک و وضوح مکانی و طیفی تصاویر سنجش از دور است (Yu et al, ۲۰۱۲; Jiang et al, ۲۰۱۹). بنابراین، این پارامترها باید برای طراحی نمونه‌برداری خاک و جمع‌آوری تصاویر ماهواره‌ای در نظر گرفته شوند (Gorji et al., ۲۰۲۰).

در ادامه با استفاده از حداکثر احتمال نقشه شوری خاک برای سال ۲۰۱۴ تهیه شد که نتایج ارزیابی روش حداکثر احتمال ضریب کاپا ۸۴ درصد و دقت کلی به میزان ۸۸ درصد را نشان می‌دهد. نقشه تغییرات با استفاده از شاخص NDSI برای سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ تهیه شد. با توجه به نتایج حاصل از نقشه‌ها اگرچه روند تغییرات شوری خاک بسیار کند می‌باشد و شاید به اندازه سیل، آتش سوزی و تغییرات آب و هوایی کم اهمیت به نظر برسد ولی در درازمدت با توجه به خشک شدن دریاچه باعث بروز مشکلات زیست‌محیطی و ایجاد مشکلات در تولید محصولات زراعی می‌شود. در سطح ایران و جهان پژوهش‌های دیگری در راستای پیش‌بینی شوری خاک با استفاده از سنجش از دور انجام شده است که با توجه به نوع داده و منطقه مورد مطالعه نتایج متفاوتی را دارد. در مطالعه انجام شده توسط (Feizizadeh et al., ۲۰۲۲) با استفاده از فناوری GIS و تحلیل مکانی، تأثیر خشکسالی در دریاچه ارومیه را بر شوری خاک و خطر تخریب خاک در دشت‌های اطراف آن بررسی کرده است. در این مطالعه، از داده‌های ماهواره‌ای موجود در GEE در دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که خشکی دریاچه ارومیه باعث افزایش شوری خاک و تشکیل اراضی نمکی گسترده شده است. (Alqasemi et al., ۲۰۲۱) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و داده‌های شبانه روز LST (دمای سطح زمین) از ماهواره مادیس برای تحلیل شوری خاک استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که بین شاخص NDVI و شوری خاک رابطه آماری معناداری با مقدار (۰/۴۳) وجود دارد. همچنین بین نسبت LST/BSI و LST/NDVI با شوری خاک رابطه آماری با ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۰۵ مشاهده شده است. یافته‌های آن‌ها نشان داد، که هر نوع شوری خاک منجر به کاهش رشد گیاهان می‌شود و همچنین همبستگی کمی بین شوری خاک و دمای شبانه‌روزی نشان می‌دهد. با افزایش دما، شوری خاک افزایش می‌یابد. در مطالعه که توسط (Abdolalizadeh et al., ۲۰۲۰) انجام شد، به برآورد پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج شده از تصویر لندست ۸ پرداختند، تمامی شاخص‌های استفاده شده، دارای ارتباط معنی‌دار با شیب، فاصله و تبدیل‌های مبتنی بر استخراج ویژگی‌های مرتبط با داده‌های پوشش گیاهی را نشان می‌دادند. این مطالعه بر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای پایش مداوم شوری خاک به دلیل حساسیت و سازگاری آن، بهتر از روش‌های سنتی تأکید دارد. همبستگی‌های قابل توجه بین داده‌های زمینی و شاخص‌های طیفی مانند NDVI، NDWI، SI-T و NDSI بر اثربخشی آنها در تجزیه و تحلیل دینامیک شوری خاک تأکید می‌کند. این یافته‌ها راهنمایی‌های ارزشمندی را برای تحقیقات آتی فراهم می‌کنند و بر استفاده از تکنیک‌های فیلتر برای بهبود دقت در ارزیابی تغییرات مکانی در شوری خاک تأکید می‌کند.

- Abdolalizadeh Z, Ghorbani A, Mostafazadeh R & Moameri M, ۲۰۲۰, Rangeland canopy cover estimation using Landsat OLI data and vegetation indices in Sabalan rangelands, Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, ۱۳, PP. ۱-۱۳. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۱۲۵۱۷۰۰۲۰۰۵۱۵۰۰۱.
- Abuzaid AS, El-Komy MS, Shokr MS, El Baroudy AA, Mohamed ES, Rebouh NY & Abdel-Hai MS, ۲۰۲۳, Predicting dynamics of soil salinity and sodicity using remote sensing techniques: a landscape-scale assessment in the northeastern Egypt, *Sustainability*, ۱۵(۱۲), PP. ۹۴۴۰. doi:۱۰.۳۳۹۰/su۱۵۱۲۹۴۴۰.
- Aghaei M, Khavarian H & Mostafazadeh R, ۲۰۱۹, Prediction of land use changes using the CA-Markov and LCM models in the Kozehotpraghi watershed in the province of Ardabil, *Watershed Management Research*, ۳۳(۳), PP. ۹۱-۱۰۷. doi:۱۰.۲۲۰۹۲/wmej.۱۲۸۰۰۹,۱۲۶۷.
- Akramhanov A & Martius C, ۲۰۰۶, The spatial distribution of soil salinity: detection and prediction, In: *The ۱۸th World Congress of Soil Science*.
- Alavipanah SK, ۲۰۱۶, Application of remote sensing in earth sciences (soil science), Tehran: Tehran University Press, P. ۳۱۱.
- Allbed A & Kumar L, ۲۰۱۳, Soil salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: a review, *Advances in Remote Sensing*, ۲, PP. ۳۷۳-۳۸۵. doi:۱۰.۴۲۳۶/ars.۲۰۱۳,۲۴۰۴۰.
- Allbed A, Kumar L & Sinha P, ۲۰۱۴, Mapping and modelling spatial variation in soil salinity in the Al Hassa Oasis based on remote sensing indicators and regression techniques, *Remote Sensing*, ۶(۲), PP. ۱۱۳۷-۱۱۵۷. doi:۱۰.۳۳۹۰/rs۶۰۲۱۱۳۷.
- Alqasemi AS, Ibrahim M, Al-Quraishi AMF, Saibi H, Al-Fugara AK & Kaplan G, ۲۰۲۱, Detection and modeling of soil salinity variations in arid lands using remote sensing data, *Open Geosciences*, ۱۳(۱), PP. ۴۴۳-۴۵۲. doi:۱۰.۱۵۱۵/geo-۲۰۲۰-۲۴۴.
- Avdan U, Kaplan G, Matcı DK, Avdan ZY, Erdem F, Mızık ET & Demirtaş İ, ۲۰۲۲, Soil salinity prediction models constructed by different remote sensors, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, ۱۲۸, PP. ۱۰۳۲۳۰. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.pce.۲۰۲۲,۱۰۳۲۳۰.
- Azhirabi R, Kamkar B & Abdi O, ۲۰۲۴, Comparison of different indices adopted from Landsat images to map soil salinity in the army field of Gorgan, *Soil Management and Sustainable Production Journal*, ۵(۱), PP. ۱۷۳-۱۸۶. doi:۱۰.۲۲۰۶۹/ejsms.۲۰۲۴,۲۲۴۲۷,۲۱۴۹.
- Bannari A, Guedon AM, El-Harti A, Cherkaoui FZ & El-Ghmari A, ۲۰۰۸, Characterization of slightly and moderately saline and sodic soils in irrigated agricultural land using simulated data of advanced land imaging (EO-۱) sensor, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, ۳۹(۱۹-۲۰), PP. ۲۷۹۵-۲۸۱۱. doi:۱۰.۱۰۸۰/۰۰۱۰۳۶۲۰۸۰۲۴۳۲۷۱۷.
- Bolstad P & Lillesand TM, ۱۹۹۱, Rapid maximum likelihood classification, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, ۵۷(۱), PP. ۶۷-۷۴.
- Dehni A & Lounis M, ۲۰۱۲, Remote sensing techniques for salt affected soil mapping: application to the Oran region of Algeria, *Procedia Engineering*, ۳۳, PP. ۱۸۸-۱۹۸. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.proeng.۲۰۱۲,۰۱,۱۱۹۳.
- Delavar MA, Naderi A, Ghorbani Y, Mehrpouyan A & Bakhshi A, ۲۰۲۰, Soil salinity mapping by remote sensing south of Urmia Lake, Iran, *Geoderma Regional*, ۲۲, PP. e۰۰۳۱۷. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.geodrs.۲۰۲۰.e۰۰۳۱۷.
- Douaoui AEK, Nicolas H & Walter C, ۲۰۰۶, Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data, *Geoderma*, ۱۳۴(۱-۲), PP. ۲۱۷-۲۳۰. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.geoderma.۲۰۰۵,۱۰,۰۰۹.
- El-Battay A, Bannari A, Hameid N & Abahussain A, ۲۰۱۷, Comparative study among different semi-empirical models for soil salinity prediction in an arid environment using OLI Landsat-۸ data, *Advances in Remote Sensing*, ۶, PP. ۲۳-۳۹. doi:۱۰.۴۲۳۶/ars.۲۰۱۷,۶۱۰۰۲.
- Emami M, Khormali F, Pahlavan-Rad MR & Ebrahimi S, ۲۰۲۴, Digital modeling of surface and subsurface soil salinity in Golestan Province, Iran, *Geoderma Regional*, ۳۷, PP. e۰۰۸۰۰. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.geodrs.۲۰۲۴.e۰۰۸۰۰.
- Farshad A & Farzaneh A, ۲۰۱۶, Application of remote sensing data and geographic information systems in sustainable agricultural development and conservation of natural resources and environment in Iran, *Agricultural Extension and Education Publications*, ۱st ed, P. ۲۷۲.
- Feizizadeh B, Omarzadeh D, Alajujeh KM, Blaschke T & Makki M, ۲۰۲۲, Impacts of the Urmia Lake drought on soil salinity and degradation risk: an integrated geoinformatics analysis and monitoring approach, *Remote Sensing*, ۱۴(۱۴), PP. ۳۴۰۷. doi:۱۰.۳۳۹۰/rs۱۴۱۴۳۴۰۷.
- Ghale YAG, Baykara M & Unal A, ۲۰۱۹, Investigating the interaction between agricultural lands and Urmia Lake ecosystem using remote sensing techniques and hydro-climatic data analysis, *Agricultural Water Management*,

- ۲۲۱, PP. ۵۶۶–۵۷۹. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.agwat.۲۰۱۹.۰۵.۰۲۸.
- Gorji T, Sertel E & Tanik A, ۲۰۱۷, Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: a case study from Turkey, *Ecological Indicators*, ۷۴, PP. ۳۸۴–۳۹۱. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.ecolind.۲۰۱۶.۱۱.۰۴۳.
- Gorji T, Yildirim A, Hamzehpour N, Tanik A & Sertel E, ۲۰۲۰, Soil salinity analysis of Urmia Lake Basin using Landsat-۸ OLI and Sentinel-۲A based spectral indices and electrical conductivity measurements, *Ecological Indicators*, ۱۱۲, PP. ۱۰۶۱۷۳. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.ecolind.۲۰۲۰.۱۰.۶۱۷۳.
- Hamzehpour N & Bogaert P, ۲۰۱۷, Improved spatiotemporal monitoring of soil salinity using filtered kriging with measurement errors: an application to the West Urmia Lake, Iran, *Geoderma*, ۲۹۵, PP. ۲۲–۳۳. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.geoderma.۲۰۱۷.۰۲.۰۰۴.
- Hamzehpour N & Rahmati M, ۲۰۱۶, Investigation of soil salinity to distinguish boundary line between saline and agricultural lands in Bonab Plain, southeast Urmia Lake, Iran, *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, ۲۰(۴), PP. ۱۰۳۷–۱۰۴۲. doi:۱۰.۴۳۱۴/jasem.v۲۰.i۴.۱۶.
- Jafari M & Rostampour M, ۲۰۱۹, *Soil and plant relationships: environmental stresses, seeds, and seedlings*, Tehran: Tehran University Press, P. ۹۵.
- Jiang H & Shu H, ۲۰۱۹, Optical remote-sensing data based research on detecting soil salinity at different depth in an arid-area oasis, Xinjiang, China, *Earth Science Informatics*, ۱۲, PP. ۴۳–۵۶. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۱۲۱۴۵۰۰۱۸۰۳۵۸۰۲.
- Khan NM & Sato Y, ۲۰۰۱, Monitoring hydro-salinity status and its impact in irrigated semi-arid areas using IRS-۱B LISS-II data, *Asian Journal of Geoinformatics*, ۱(۳), PP. ۶۳–۷۳.
- Khan NM, Rastoskuev VV, Sato Y & Shiozawa S, ۲۰۰۵, Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators, *Agricultural Water Management*, ۷۷(۱–۳), PP. ۹۶–۱۰۹. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.agwat.۲۰۰۴.۰۹.۰۳۸.
- Kılıc OM, Budak M, Gunal E, Acir N, Halbac-Cotoara-Zamfir R, Alfarraj S & Ansari MJ, ۲۰۲۲, Soil salinity assessment of a natural pasture using remote sensing techniques in central Anatolia, Turkey, *Plos One*, ۱۷(۴), PP. e۰۲۶۶۹۱۵. doi:۱۰.۱۳۷۱/journal.pone.۰۲۶۶۹۱۵.
- Lhissou R, El Harti A & Chokmani K, ۲۰۱۴, Mapping soil salinity in irrigated land using optical remote sensing data, *Eurasian Journal of Soil Science*, ۳(۲), PP. ۸۲–۸۸. doi:۱۰.۱۸۳۹۳/ejss.۸۴۵۴۰.
- Lhissou R, El Harti A, Maimouni S & Adiri Z, ۲۰۲۰, Assessment of the image-based atmospheric correction of multispectral satellite images for geological mapping in arid and semi-arid regions, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, ۲۰, PP. ۱۰۰۴۲۰. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.rsase.۲۰۲۰.۱۰۰۴۲۰.
- Li HY, Marchant BP & Webster R, ۲۰۱۶, Modelling the electrical conductivity of soil in the Yangtze delta in three dimensions, *Geoderma*, ۲۶۹, PP. ۱۱۹–۱۲۵. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.geoderma.۲۰۱۶.۰۱.۰۲۸.
- Mahdavi M, ۲۰۱۱, *Applied hydrology*, Vol. ۲, Tehran: Tehran University Press, P. ۴۲۷.
- Maleki M & Madadi A, ۲۰۱۵, Investigation of annual runoff with experimental methods in Ardabil watershed (Khalkhal City), The ۵th Conference of Rain Catchment Systems, Gilan-Rasht, March ۴th and ۵th, ۲۰۱۵.
- McFeeters SK, ۱۹۹۶, The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, ۱۷(۷), PP. ۱۴۲۵–۱۴۳۲. doi:۱۰.۱۰۸۰/۰۱۴۳۱۱۶۹۶.۸۹۴۸۷۱۴.
- Naseri N & Mostafazadeh R, ۲۰۲۳, Spatial relationship of Remote Sensing Ecological Indicator (RSEI) and landscape metrics under urban development intensification, *Earth Science Informatics*, ۱۶(۴), PP. ۲۷۹۷–۳۸۱۰. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۱۲۱۴۵۰۰۲۳۰۰۱۱۱۹-z.
- Niknejad D, ۲۰۱۵, Determining the runoff coefficient of different catchment levels in order to harvest rainwater, The ۵th Conference of Rain Catchment Systems, Gilan-Rasht, March ۴th and ۵th, ۲۰۱۵.
- Pishnamaz Ahmadi M, Rezaei Moghaddam MH & Feizizadeh B, ۲۰۱۷, Evaluation of indices and soil salinity mapping using remote sensing data (case study: Aji Chay Delta), *Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, ۸(۱), PP. ۸۵–۹۶.
- Pujianiki NN, Parwata INS & Osawa T, ۲۰۲۱, A new simple procedure for extracting coastline from SAR image based on low pass filter and edge detection algorithm, *Lontar Komputer: Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi*, ۱۲, PP. ۱۷۵. doi:۱۰.۲۴۸۴۳/LKJITI.۲۰۲۱.v۱۲.i۰۳.p۰۵.
- Rouse JW Jr, Haas RH, Schell JA & Deering DW, ۱۹۷۳, Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, *NASA-CR-۱۳۲۹۸۲*.
- Scudiero E, Skaggs TH & Corwin DL, ۲۰۱۶, Comparative regional-scale soil salinity assessment with near-ground apparent electrical conductivity and remote sensing canopy reflectance, *Ecological Indicators*, ۷۰, PP. ۲۷۶–۲۸۴. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.ecolind.۲۰۱۶.۰۶.۰۱۵.
- Shafizadeh-Moghaddam H, Minaei F, Talebi-khiyavi H, Xu T & Homaei M, ۲۰۲۲, Synergetic use of multi-temporal Sentinel-۱, Sentinel-۲, NDVI, and topographic factors for estimating soil organic carbon, *Catena*, ۲۱۲, PP.

۱۰۶۰۷۷. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.catena.۲۰۲۲.۱۰۶۰۷۷.
- Singh A, ۲۰۲۲, Soil salinity: a global threat to sustainable development, Soil Use and Management, ۳۸(۱), PP. ۳۹–۶۷. doi:۱۰.۱۱۱۱/sum.۱۲۷۷۲.
- Yahiaoui I, Douaoui A, Zhang Q & Ziane A, ۲۰۱۵, Soil salinity prediction in the Lower Cheliff plain (Algeria) based on remote sensing and topographic feature analysis, Journal of Arid Land, ۷, PP. ۷۹۴–۸۰۵. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۴۰۳۳۳-۰۱۵-۰۰۵۳-۹.
- Yu SP, Yang JS, Liu GM, Yao RJ & Wang XP, ۲۰۱۲, Multiple time scale characteristics of rainfall and its impact on soil salinization in the typical easily salinized area in Huang-Huai-Hai Plain, China, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, ۲۶, PP. ۹۸۳–۹۹۲. doi:۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۴۷۷-۰۱۲-۰۵۵۷-۱.
- Zare S, Shamsi SRF & Abtahi SA, ۲۰۱۹, Weakly-coupled geo-statistical mapping of soil salinity to Stepwise Multiple Linear Regression of MODIS spectral image products, Journal of African Earth Sciences, ۱۵۲, PP. ۱۰۱–۱۱۴. doi:۱۰.۱۰۱۶/j.jafrearsci.۲۰۱۹.۰۱.۰۰۸.
- Zhao W, Zhou C, Zhou C, Ma H & Wang Z, ۲۰۲۲, Soil salinity inversion model of oasis in arid area based on UAV multispectral remote sensing, Remote Sensing, ۱۴(۸), PP. ۱۸۰۴. doi:۱۰.۳۳۹۰/rs۱۴۰۸۱۸۰۴.