



Monitoring soil Salinity of the Sistan plain using field data and remote sensing

Saeed Saadat^{1✉}, Leila Esmaeelnejad², Hamed Rezaei³, Rasoul Mirkhani⁴

1. Corresponding Author, Monitoring and Improvement of Soil and Water Research Department, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, Email: saeed_saadat@yahoo.com
2. Monitoring and Improvement of Soil and Water Research Department, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, esmaeelnejad.leila@gmail.com
3. Monitoring and Improvement of Soil and Water Research Department, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, Email: h_rezaei@yahoo.com
4. Monitoring and Improvement of Soil and Water Research Department, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, Email: rasoul_mirkhani@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history:</p> <p>Received: June. 15, 2024</p> <p>Revised: July. 3, 2024</p> <p>Accepted: July. 13, 2024</p> <p>Published online: Oct. 2024</p> <p>Keywords: Electrical Conductivity, Landsat 8, Soil Characteristics, Salinity Index, Variability.</p>	<p>One of the most important limitations of cultivation in the Sistan plain is soil salinity. To investigate the salinity status using remote sensing in Sistan Plain, Landsat 8 (LC08-LOI/TIRS) satellite images were used in April, August and November of 2017 and April 2018. To convert radiance data, the initial correction related to voltage change to digital number (DN) to convert radiance data was done by sensor calibration file as well as data radiometric correction using flat area method in ENVI 5.1 software. To determine the soil sampling points, first draw a 2x2 km grid and then by referring to the area and checking the sampling location, 312 soil samples were taken and the values of Electrical Conductivity (EC), Sodium Adsorption ratio (SAR) and texture in them were measured. By secondary processing, extracting the spectral features of satellite images and using several algorithms and indices, a salinity map was prepared for the surface soils of the region in four periods. The results of the remote sensing investigation showed that surface soil salinity in the region is a dynamic phenomenon and has significant changes with the changes of season, rainfall, irrigation and land management. The results obtained from the interpretation of satellite images showed that time, rainfall events of the planting season and water and soil management have a significant effect on soil salinity and the areas of lands with different salinity. The extent of soils with high salinity increased in the summer season, but in April 2018 (MBE=0.98, NRMSE=17.56%, R²=0.69) which coincided with the sampling due to the occurrence of rains and floods in these areas, this extent decreased.</p>
<p>Cite this article: Saadat, S., Esmaeelnejad, L., Rezaei, H., & Mirkhani, R. (2024) Monitoring Soil Salinity of the Sistan Plain Using Field Data and Remote Sensing, <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i>, 55(8), 1297-1309. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378077.669733</p> <p>© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.</p> <p>DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378077.669733</p>	



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

One of the most important limitations of farming in the Sistan plain is soil salinity, which, according to the existing records in the region, is considered a very important and influential issue on the production of regional products and water management. Due to low rainfall, limited water resources, increasing temperature, decreasing relative humidity and increasing evaporation, the agricultural lands of Sistan plain show various degrees of salinity and alkalinity. Therefore, the quantitative determination of spatial and temporal changes can be important as decision-making components in irrigation management and exploitation of agricultural inputs and products. Also, knowing the state of soil salinity distribution of this plain plays an important role in choosing lands with less restrictions for project implementation and optimal management of water and soil resources. For this reason, knowledge of the soil salinity will help in the proper management of crop production.

Materials and Methods

To study the salinity situation using remote sensing for different sites in Sistan Plain, Landsat (LC08-LOI/TIRS) satellite images were used in April, August and November of 2017 and April of 2018. The initial correction processing was related to change voltage to digital number (DN) via converting radiance data was done by satellite calibration file and data radiometric correction using flat field method in ENVI 5.1 software. To determine the soil sampling points, using a 2x2 km grid and by referring to the area and checking the sampling location, 312 soil samples were taken. Then the values of soil Electrical Conductivity (EC), Sodium Absorption Ratio (SAR) and texture were measured. Using cross-validation, 75% of the samples were considered as training data and 25% of them considered for the testing data. The spectral characteristics of the satellite images were extracted via secondary correction processing. Salinity map was prepared for the surface soils of the region in four periods using several algorithms and indices.

Results and Discussion

The results of the remote sensing investigation showed that surface soil salinity in the region is a dynamic phenomenon and has significant changes with the changes of season, rainfall, irrigation and land management. For example, in the northeast of Zahak 3, in the summer, more lands have high salinity, but at the end of winter and the beginning of April, the percentage of lands with high salinity has decreased in that region. The results showed that in August 2017, the surface of the land with EC more than 8 dS/m were more than the other seasons. On the other hand, the land surface with salinity less than 4 dS/m had the highest value in April 2018, which could be due to the increase in rainfall and flooding in the region at this time. After that, in November 1997, the largest area of land with salinity less than 4 dS/m was observed. The results obtained from the interpretation of satellite images showed parameters such as time, rainfall events of the planting season and water and soil management have a significant effect on soil salinity and the areas of lands with different salinity. The extent of soils with high salinity increased in the summer season, but in April 2018 (which coincided with the sampling), this extent decreased, due to the occurrence of rains and floods in these areas.

Conclusion

Salinity changes can be considered in general scale and farm scale. On a general scale, the location of the lands in relation to the Pozak Saburi and Hirmand mountains and the course of the rivers and floods, the difference in the height of areas (Zahak and Zabol are higher and Hirmand, Nimroz and Hamon are lower in height situation), the elevation, level of the water table (especially in the past years when a lot of floodwater entered the plain from the Hirmand River) are the most important factors that determine the salinity situation. However, on a farm scale, management of cultivation, fallow, leaching at the beginning of the season, irrigation, and removing of saline surface soils are decisive. Among them, agricultural activities on a smaller scale play an important role. despite the high variability of soil salinity at the field scale in the region, a relative general distribution is prevailed. The results of the study show more salinity in Nimroz and Hamon and less salinity in areas like Zahak and Zabol. The validation results of remote sensing studies showed that this technique can provide a suitable estimate of soil salinity in the Sistan plain and is a good quality method for monitoring of soil salinity changes.

Author Contributions

Saeed Saadat: Sampling, Conceptualization, Validation, Supervision, Writing manuscript; Leila Esmaeelnejad: Conceptualization, methodology, Software, Manuscript editing; Hamed Rezaei: Sampling, consulting; Rasoul Mirkhani: Sampling

Data Availability Statement

We have no permission to release data and codes.

Acknowledgements

We would like to express our sincere gratitude to the Research and Education Center for Agriculture and Natural Resources of Sistan and Baluchistan (Zabol) and Water and Soil Deputy, ministry of Jihad-e-Agriculture for the financial and logistics supports who significantly contributed during the research project.

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the Soil and Water Research Institute. The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

پایش وضعیت شوری خاک دشت سیستان با استفاده از داده‌های زمینی و سنجش از دور

سعید سعادت^۱ | لیلا اسماعیل‌نژاد^۲ | حامد رضایی^۳ | رسول میرخانی^۴

۱. نویسنده مسئول، بخش تحقیقات پایش و بهسازی خاک و آب، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

کرج، ایران. رایانامه: saeed_saadat@yahoo.com

۲. بخش تحقیقات پایش و بهسازی خاک و آب، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه:

esmaeelnejad.leila@gmail.com

۳. بخش تحقیقات پایش و بهسازی خاک و آب، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه:

h_rezaei@yahoo.com

۴. بخش تحقیقات پایش و بهسازی خاک و آب، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه:

rasoul_mirkhani@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۲۳

تاریخ انتشار: آبان ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

تغییرپذیری،

شاخص شوری،

لندست،

ویژگی‌های خاک،

هدایت الکتریکی.

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های کشت و کار در دشت سیستان، شوری خاک است. برای بررسی وضعیت شوری با استفاده از سنجش از دور در دشت سیستان، از تصاویر ماهواره لندست ۸ (LC08-LOI/TIRS) در چهار زمان فروردین، مرداد و آبان سال ۱۳۹۷ و نیز فروردین ۱۳۹۸ استفاده شد. پردازش اولیه برای اصلاح مربوط به تغییر ولتاژ به عدد رقومی (DN) برای تبدیل داده‌های رادینس، توسط فایل واسنجی سنجنده و اصلاح رادیومتریک داده‌ها با استفاده از روش پهنه مسطح در نرم‌افزار ENVI 5.1 انجام شد. برای تعیین نقاط نمونه‌برداری خاک ابتدا شبکه ۲×۲ کیلومتر ترسیم و سپس با مراجعه به منطقه و بررسی محل نمونه‌برداری، تعداد ۳۱۲ نمونه خاک گرفته شد و مقادیر شوری (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR) و نیز بافت در آنها اندازه‌گیری شدند. با پردازش ثانویه، استخراج ویژگی‌های طیفی تصاویر ماهواره‌ای و بهره‌گیری از الگوریتم‌ها و شاخص‌های متعدد، نقشه شوری برای خاک‌های سطحی منطقه در چهار زمان تهیه گردید. نتایج بررسی دورسنجی نشان داد که شوری خاک سطحی در منطقه پدیده‌ای پویا بوده و با تغییرات فصل، بارش، آبیاری و مدیریت اراضی، تغییرات قابل‌توجهی دارد. نتایج حاصل از تفسیر تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که زمان، رویدادهای بارشی فصل کاشت و مدیریت آب و خاک بر شوری خاک و مساحت سرزمین‌های دارای شوری مختلف، تأثیری قابل توجه دارد. وسعت خاک‌های با شوری زیاد در فصل تابستان افزایش، ولی در فروردین ۹۸ (MBE ۰/۹۸، NRMSE %۱۷/۵۶، R^2 ۰/۶۹) که مصادف با نمونه‌برداری‌های بود، به دلیل بارندگی‌ها و سیل در این مناطق، از این وسعت کاسته شد.

استناد: استناد: سعادت، سعید؛ اسماعیل‌نژاد، لیلا؛ رضایی، حامد؛ و میرخانی، رسول، (۱۴۰۳) پایش وضعیت شوری خاک دشت سیستان با استفاده از داده‌های زمینی و سنجش

از دور، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۸)، ۱۳۰۹-۱۲۹۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378077.669733>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.378077.669733>

مقدمه

دشت سیستان از لحاظ زمین‌شناسی به صورت فرورفتگی است که در اثر رسوبات دریاچه‌ای و رسوبات رودخانه‌ای پر شده و دارای رسوبات عمیقی هستند و خاک سطحی نسبت به اعماق، بافت ریزتری دارد. مهمترین عواملی که در پراکنش شوری در منطقه مؤثرند را می‌توان در (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر نسبت به هامون‌های پوزک، سابوری و هیرمند، (۲) وقوع سیلاب‌ها و طغیان رودخانه‌ها، (۳) فعالیت کشاورزی و (۴) صعود موئینه و بالابودن سطح ایستابی جستجو نمود (مهندسین مشاور آب خاک تهران، ۱۳۹۵). یکی از محدودیت‌های اصلی کشاورزی در دشت سیستان بعد از مسئله کمبود آب، شوری خاک است. کمی بارندگی، وجود بادهای شدید در منطقه، خشکی هوا و درجه حرارت زیاد هوا موجب زیاد شدن تبخیر و تجمع املاح طبقات زیرین در سطح خاک می‌شود. از این رو، خاک‌های منطقه عموماً شور هستند (مهندسین مشاور پندام، ۱۳۹۶). به همین دلیل، برای مدیریت تولید محصولات در منطقه سیستان در اولین گام لازم است تا وضعیت شوری خاک در این مناطق مشخص شود. بررسی وضعیت و تغییرات شوری خاک به‌ویژه در مناطقی با وسعت زیاد، گران و زمان‌بر است. از این رو به روش‌هایی نیاز است که بتوان به راحتی، گستره و وسعت شوری مناطق را با دقت بالا برآورد و روند تغییرات شوری را بررسی کرد. امروزه با پیشرفت علوم، استفاده از فناوری‌های جدید مانند دریافت و پردازش داده‌ها از طریق ماهواره و به‌کارگیری نرم‌افزارها و سامانه‌های پردازش اطلاعات، این امر محقق شده است (Wang et al., 2024). اراضی زراعی و باغی دشت سیستان به علت بارش کم، محدودیت منابع آب، افزایش دما، کاهش رطوبت نسبی و افزایش تبخیر دارای درجات مختلف شوری و قلیائیت هستند. از این رو تعیین کمی تغییرات مکانی و زمانی می‌تواند به‌عنوان مؤلفه‌های تصمیم‌ساز در مدیریت آبیاری و بهره‌برداری از نهاده‌ها و تولیدات کشاورزی مهم باشد. همچنین اطلاع از وضعیت پراکنش شوری خاک‌های این دشت، نقش مهمی در انتخاب اراضی دارای محدودیت‌های کمتر برای اجرای پروژه و مدیریت بهینه بهره‌برداری از منابع آب و خاک دارد. اصلاح و مدیریت اراضی شور نیاز به اطلاعات کمی، به‌هنگام و دقیق دارد. یکی از راه‌های دسترسی به این اطلاعات استفاده از داده‌های ماهواره‌ای می‌باشد که در مقایسه با تهیه این قبیل نقشه‌ها با استفاده از روش‌های سنتی و معمول، توانایی تولید نقشه‌هایی با هزینه کمتر، مدت زمان کوتاه‌تر، به‌هنگام و با دقت بالاتر را دارد. هدف از انجام این مطالعه پایش زمانی و تعیین گسترش و پراکنندگی خاک‌های شور در دشت سیستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور مدیریت بهینه منابع خاک و آب دشت سیستان بود.

پیشینه پژوهش

تفکیک‌پذیری خاک‌های شور توسط سنجش از دور به ویژگی‌های بازتاب طیفی این خاک‌ها برمی‌گردد. مطالعات صحرایی و اندازه‌گیری‌های رادیومتری نشان می‌دهد که در بیشتر موارد خاک‌های شور و قلیایی بازتاب طیفی بیشتری در ناحیه مرئی و مادون قرمز طیف نسبت به خاک‌های غیر شور دارند. ناحیه مادون قرمز حرارتی اغلب برای تعیین رطوبت و شوری به کار می‌رود. محققان مختلفی نیز از این فناوری برای تهیه نقشه‌های شوری خاک استفاده کردند. از جمله، (Khan et al., 2015) از داده‌های ماهواره IRS سنجنده LISS-II و از شاخص‌های مختلف سنجش از دور برای طبقه‌بندی خاک‌های شور استفاده نمودند. آنها شاخص شوری (SI)، (NDSI)، شاخص درخشندگی (BI)، و نسبت باند سه به دیگر باندها، و همچنین شاخص‌های گیاهی را بررسی کردند. نتایج نشان داد نسبت باند سه به دیگر باندها و همچنین نسبت‌های NDSI و NDVI بهترین شاخص‌ها برای شناسایی خاک‌های شور هستند.

(Al-Khuzai et al. (2022) نقشه توزیع مکانی تجمع نمک را با استفاده از سنجش از دور در اراضی استان الدیوانیه عراق تهیه کردند. نتایج آنها حاکی از عملکرد خوب شاخص‌های NDVI و SI-5 در پیش‌بینی مناطق متأثر از نمک بود. همچنین (Xiao et al. (2024) با استفاده از تصاویر لندست ۸ و الگوریتم یادگیری ماشین، پراکنش شوری خاک در مناطق جنوبی زینجیانگ چین را بررسی کردند. تصاویر ماهواره‌ای لندست، برای مطالعات کشاورزی، زمین‌شناسی، جنگل‌داری و ... بسیار پرکاربرد است. از تصاویر این ماهواره، برای بررسی شوری خاک به‌وفور استفاده شده است و دقت آن توسط متخصصین مختلف تأیید شده است. از جمله، می‌توان به مطالعات (Gorji et al. (2020)، (Abuelgasim et al. (2019)، (Wu et al. (2014) و (Wu et al. (2008) اشاره کرد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر در اراضی شهرستان‌های واقع در دشت سیستان شامل زهک، هامون، هیرمند، نیمروز و زابل به وسعت ۴۶۰۰۰ هکتار

و در قالب ۱۶ ناحیه عمرانی شامل هیرمندهای یک تا چهار، زهک‌های یک تا سه، نیمروزهای یک تا سه، هامون‌های یک تا چهار، و زابل یک و دو (شکل ۱-الف) انجام شد. برای تعیین نقاط نمونه‌برداری خاک ابتدا شبکه ۲×۲ کیلومتر ترسیم شد. سپس با مراجعه به منطقه و بررسی میدانی، سرانجام ۳۱۲ خاک‌رخ حفر و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تمامی افق‌ها اندازه‌گیری شدند. موقعیت منطقه مطالعه شده و نقاط نمونه‌برداری شده در شکل ۱-ب نشان داده شد.



شکل ۱- موقعیت واحدهای عمرانی در دشت سیستان (الف) و موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده در دشت سیستان (ب)

تکنیک سنجش از دور

به منظور بررسی وضعیت شوری با استفاده از سنجش از دور برای اراضی واحدهای مختلف عمرانی، از تصاویر ماهواره لندست ۸ (LC08-LOI/TIRS) در چهار تاریخ شامل زمان نمونه‌برداری (مارس ۲۰۱۹)، و سه فصل قبل از نمونه‌برداری (سپتامبر ۲۰۱۸، نوامبر ۲۰۱۸ و مارس ۲۰۱۸) استفاده شد. تصاویر مورد نظر در بازه زمانی مربوطه از بین تصاویر موجود با در نظر گرفتن مساعد بودن شرایط جوی و عدم پوشش ابر انتخاب شد. از آنجا که تصاویر رقومی سنجنده لندست هشت، زمین مرجع می‌باشد، نیازی به انجام تصحیح هندسی ندارند، ولی پردازش اولیه برای اصلاح مربوط به تغییر ولتاژ به DN برای تبدیل داده‌های رادیانس، توسط فایل واسنجی سنجنده و اصلاح رادیومتریک داده‌ها با استفاده از روش پهنه مسطح در نرم‌افزار ENVI 5.1 انجام شد. نتایج تجزیه و تحلیل‌های اولیه مربوط به باندهای مختلف نشان داد که مناطق مسکونی دارای اختلاط طیفی با خاک‌های شور هستند که این اراضی پیش از طبقه‌بندی ماسک^۱ شدند و سپس عمل طبقه‌بندی نظارت شده بر روی تصویر انجام شد (Al-Ali et al. 2019).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ترکیب پیچیده نوع خاک، آثار جوی و پوشش‌های تنک گیاهی، امکان استخراج اطلاعات قابل اعتماد را کاهش می‌دهد و به همین دلیل در این پژوهش، از شاخص‌های متعددی استفاده شد تا آثار ناخواسته یاد شده کاهش یابد. بدین منظور، مجموعه باندی^۲ یا رویکردهای مختلفی برای طبقه‌بندی نظارت شده استفاده شد (جدول ۱). سه رویکرد اول روش‌های رایج طبقه‌بندی نظارت شده شامل الگوریتم‌های حداقل فاصله از میانگین^۳، روش متوازی‌السطوح^۴ و روش حداکثر احتمال^۵ می‌باشند. دو روش پایش انتقال طیفی تسلدکپ^۶ و آنالیز مؤلفه‌های اصلی^۷ با همبستگی باندها، واریانس بین داده‌های اولیه را به حداقل می‌رساند و به چشم‌انداز یا مکان وقوع تصویر وابسته است. از آنجا که سه مؤلفه اصلی اولیه بخش زیادی از کل واریانس را تعریف می‌کنند و مؤلفه‌های بعدی نقش چشم‌گیری در توجیه واریانس ندارند، در این پژوهش سه عامل اصلی اولیه (اول تا سوم) مد نظر قرار گرفت.

در رویکرد چهارم، افزون بر باند سنجنده لندست هشت، از اطلاعات کمکی مانند نقشه مدل رقومی ارتفاع و شیب برای افزایش دقت طبقه‌بندی استفاده شد. از این‌رو، در هنگام و یا پس از طبقه‌بندی با داشتن لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS از قبیل مدل رقومی ارتفاع،

۱ Mask

۲ Layer stack

۳ Minimum distance

۴ Box Classifier or parallel piped

۵ Maximum likelihood

۶ Tasseld Cap differencing

۷ Principal Component Analysis

خطاهای پیکسل‌های غلط را می‌توان تا حدی تصحیح نمود. در رویکرد پنجم و ششم به ترتیب از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تبدیل تسلدکپ واکاوی و تحلیل شدند.

جدول ۱- رویکردهای استفاده‌شده برای تهیه نقشه‌های شوری خاک.

روش	مجموعه باندها
۱	۹ باند سنجنده لندست ۸ و استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی حداقل فاصله از میانگین
۲	۹ باند سنجنده لندست ۸ و استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی متوازی‌السطوح
۳	۹ باند سنجنده لندست ۸ و استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال
۴	۹ باند سنجنده لندست ۸ و مدل رقومی ارتفاع و شیب
۵	تجزیه به مؤلفه‌های اصلی
۶	تبدیل تسلدکپ
۷	شاخص‌ها

انتخاب باندهای مناسب برای طبقه‌بندی یکی از مراحل اساسی پیش از طبقه‌بندی می‌باشد. در رویکرد هفتم از شاخص‌های یاد شده در جدول ۲ استفاده شد. یازده شاخص شوری مختلف با استفاده از نرم‌افزار ENVI 5.1 و با به‌کارگیری روابط تجربی محاسبه و بهترین شاخص و بهترین ترکیب باندهای برای تهیه نقشه شوری منطقه که بیشترین همبستگی با داده‌های اندازه‌گیری شده شوری داشت، انتخاب شد.

جدول ۲- شاخص‌های مستخرج شده از داده‌های لندست هشت برای تهیه نقشه شوری خاک

ردیف	نام شاخص	فرمول
۱	شاخص شوری اول	$SI1 = \sqrt{Green^2 + Red^2}$
۲	شاخص شوری دوم	$SI2 = \sqrt{Green \times Red}$
۳	شاخص شوری سوم	$SI3 = Blue \times Red$
۴	شاخص شوری چهارم	$SI4 = (Red * NIR)/Green$
۵	شاخص شوری پنجم	$SI5 = Blue/Red$
۶	شاخص شوری نرمال شده	$NDSI = (Red - NIR)/(Red + NIR)$
۷	شاخص پوشش گیاهی نرمال شده	$NDVI = (NIR - Red)/(Red + NIR)$
۸	شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده	$SAVI = (1 + L)(NIR - Red)/(NIR + Red + L)$
۹	شاخص شوری-خاک-پوشش گیاهی	$VSSI = 2Green - 5(Red - NIR)$
۱۰	شاخص عمودی پوشش گیاهی	$PVI = NIR - R - b/\sqrt{1 + a^2}$
۱۱	شاخص درجه روشنایی	$BI = \sqrt{R^2 + NIR^2}$

مدل‌سازی شوری خاک

پس از انتخاب شاخص‌ها و باندها، اطلاعات شوری خاک سطحی در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 بر روی هر یک از متغیرهای یاد شده همپوشانی شد و پس از تلاقی، مقادیر طیفی هر یک از شاخص‌ها و باندها بر اساس مختصات هر نقطه در قالب جدول توصیفی استخراج و ذخیره شد. سپس ارتباط بین شوری خاک با هر یک از شاخص‌ها و باندهای بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای از نرم‌افزار آماری SPSS به‌دست آمد. تجزیه و تحلیل‌های آماری بین هدایت الکتریکی خاک به‌عنوان متغیر وابسته و باندها و شاخص‌ها به‌عنوان متغیر مستقل ایجاد و روابط رگرسیونی مورد نظر با دقت بالا استخراج شدند. روابط آماری ارائه شده با نقاط آزمون اعتبارسنجی شده و سرانجام بهترین رابطه شناسایی شوری خاک در منطقه مطالعه شده بر پایه بیشترین صحت و کمترین خطای آمارها انتخاب شد. به‌منظور ارزیابی صحت رابطه نهایی، مقادیر متغیرها در نقاط نمونه‌برداری به نسبت ۷۵ به ۲۵ درصد به دو قسمت آموزش و آزمون تفکیک و ۲۵ درصد از نقاط از همان ابتدا برای اعتبارسنجی کنار گذاشته شدند. رابطه به دست آمده که منجر به تولید نقشه شوری خاک شد با نقاط آزمون تلاقی داده شده و میزان صحت مدل به کار رفته آزمون شد (Bandak et al. 2024).

پس از مشخص شدن روش مناسب برای تولید نقشه سنجش از دور در فروردین ۱۳۹۸ (زمان نمونه‌برداری فاز اول)، از این روش برای تهیه نقشه شوری خاک در فصول قبل از آن (آبان ۹۷، مرداد ۹۷ و فروردین ۹۷) و در نهایت با استفاده از نقشه‌های به دست آمده، روند تغییرات شوری سطح خاک طی فصول مختلف سال ۹۷ تا ۹۸ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. (Elshehy et al. 2024).



در این مرحله از معادله رگرسیونی به دست آمده در فروردین ۹۸ استفاده شد؛ به عنوان مثال، چنانچه معادله رگرسیونی به دست آمده برای محاسبه شوری خاک در فروردین ۱۳۹۸ بدین صورت باشد ($EC=0.2PC234+0.3B5$)، همین معادله را برای تصاویر ماهواره‌ای سه زمان دیگر استفاده می‌کنیم با این تفاوت که به جای پارامترهای PC234 و B5 فروردین ۱۳۹۸ از پارامترهای PC234 و B5 مربوط به تصویر آبان ۹۷، مرداد ۹۷ و فروردین ۹۷ در بدست آوردن شوری استفاده می‌شود (Xiao, et al., 2024). در واقع، با اعمال معادله رگرسیونی و جایگذاری روش مناسب، هر DN به میزان شوری خاک تبدیل می‌شود.

ارزیابی دقت نقشه‌های شوری خاک

برای اطمینان از نتایج طبقه‌بندی اقدام به ارزیابی صحت طبقه‌بندی شد. در این مطالعه برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی از پارامتر صحت کلی^۱، ضریب کاپا، صحت تولیدکننده و صحت کاربر استفاده شد (Bandak, et al., 2024). این معیار بیان‌کننده این است که واقعیت زمینی (پیکسل‌های نمونه آموزشی) به چه نسبتی، درست طبقه‌بندی شده‌اند.

صحت کلی از معادله ۱ به دست می‌آید:

$$OA = \frac{1}{N} \sum P_i \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، OA صحت کلی، N تعداد کل پیکسل‌های آموزشی و $\sum P_i$ جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا می‌باشد. صحت کاربر از تقسیم تعداد پیکسل‌های درست طبقه‌بندی شده بر تعداد کل پیکسل‌هایی که در یک طبقه جای گرفته‌اند (جمع ردیف) حاصل می‌شود. ضریب کاپا (معادله ۲) نیز تشریح‌کننده میزان تطابق بین نتایج طبقه‌بندی و واقعیت زمینی می‌باشد.

$$Kappa = \frac{P_i - P_c}{1 - P_c} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، P_i درستی مشاهده شده و P_c توافق مورد انتظار است. حالت ایده‌آل برای مقدار ضریب کاپا عدد یک می‌باشد و چنانچه این مقدار برابر صفر باشد طبقه‌بندی کاملاً تصادفی و اگر مقدار منفی به دست بیاید نشان‌دهنده خطا در طبقه‌بندی است.

نتایج و بحث

آماره‌ها و شاخص‌های ارزیابی تشابه پهنه‌های شوری چهار تصویر مربوط به بازه زمانی فروردین ۹۷ تا فروردین ۹۸ در جدول ۳ نشان داده شد. بر این پایه، در مورد نقشه شوری خاک مربوط به مارس ۲۰۱۹ (فروردین ۹۸)، رویکرد دوم کمترین میزان صحت را داشت. همچنین، الگوریتم حداکثر احتمال (روش سوم) دارای صحت بالاتری نسبت به الگوریتم حداقل فاصله از میانگین (رویکرد اول) بود. در مورد سه نقشه دیگر (فروردین، مرداد و آبان ۹۷)، رویکرد اول دقت کمتری نسبت به رویکردهای دوم و سوم داشت ولی رویکرد سوم (الگوریتم حداکثر احتمال) در بین سه رویکرد یادشده طبقه‌بندی نظارت‌شده، بیشترین میزان صحت را داشت که با نتایج Ahmad and Quegan (2012)، Sisodia et al. (2014) و Guo et al. (2013) مطابقت دارد (جدول ۳). از آنجا که در بررسی عامل شوری خاک با استفاده از داده‌های سنجنش از دور، احتیاج به تصویر همزمان با تاریخ نمونه‌برداری است ولی به عللی از جمله طولانی شدن بازه نمونه‌برداری، تهیه تصویر دقیقاً همزمان با نمونه‌برداری مقدور نبود، از این‌رو، می‌توان یکی از دلایل کاهش صحت نقشه شوری در روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده (حداکثر احتمال، حداقل فاصله و متوازی‌السطوح) را تفاوت زمانی بین ثبت داده‌های ماهواره‌ای با تاریخ نمونه‌برداری در منطقه مطالعاتی دانست.

در بین سایر رویکردهای باقیمانده، رویکرد چهارم (باندھا + مدل رقومی ارتفاع) در مورد هر چهار نقشه کمترین صحت را داشت. به عبارتی استفاده از DEM در تهیه نقشه شوری نتوانست دقت آن را افزایش دهد. در صورتی که انتظار بر این است که استفاده از DEM بتواند به‌ویژه در افزایش دقت نقشه شوری خاک مؤثر باشد. زیرا خاک‌های شور و غیر شور از لحاظ موقعیت ارتفاعی متفاوت می‌باشند (Liu et al. (2005)، Wang et al. (2024)، Masoud and Kike (2006)). شاید دلیل این امر تفاوت بسیار کم ارتفاع نقاط با یکدیگر و مسطح بودن دشت سیستان باشد و در نتیجه این امر نمی‌تواند نقش چندانی در تغییرات شوری خاک‌های دشت سیستان داشته باشد. از سوی دیگر، این موضوع ممکن است ناشی از مدیریت آبیاری در فصول کشت در نواحی مختلف باشد. رویکرد هفتم (شاخص‌ها) در هر چهار مورد، دارای بیشترین مقدار صحت کلی، صحت کاربر، صحت تولیدکننده و ضریب کاپا بودند که نشان‌دهنده اهمیت شاخص‌های طیفی در شناسایی و طبقه‌بندی شوری خاک است. به همین دلیل، با استفاده از روش تعیین همبستگی خطی پیرسون، بهترین رابطه شوری خاک با هر شاخص

و باند بدست آمده و در تهیه نقشه شوری خاک از آن استفاده شد.

جدول ۳- صحت کلی، صحت کاربر، صحت تولیدکننده و ضریب کاپا در رویکردهای مختلف تهیه نقشه شوری خاک با استفاده از داده‌های سنجش از دور

الف) نقشه شوری خاک مربوط به مارس ۲۰۱۹ (فروردین ۹۸) (زمان نمونه‌برداری)

رویکردها	صحت کلی	صحت کاربر	صحت تولیدکننده	ضریب کاپا
۱	۶۸/۳۲	۷۳/۴	۷۰/۵۱	۰/۶۳
۲	۵۰/۲۶	۵۲/۹	۵۶/۵	۰/۴۳
۳	۷۲/۴۹	۷۲/۱۴	۷۱/۷	۰/۶۷
۴	۶۲/۶۷	۶۰/۲۱	۶۵/۲	۰/۵۷
۵	۷۳/۸۷	۷۴/۴۱	۷۴/۹۶	۰/۶۹
۶	۷۴/۶۸	۷۷/۶۹	۷۶/۵	۰/۷۰
۷	۸۱/۲۵	۸۲/۳۶	۷۹/۲۷	۰/۷۹

ب) نقشه شوری خاک مربوط به نوامبر ۲۰۱۸ (آبان ۹۷)

۱	۳۲/۴۵	۴۰/۳۷	۵۱/۷	۰/۵۲
۲	۵۲/۲۹	۵۶/۵۵	۵۷/۷۲	۰/۴۹
۳	۷۰/۲۱	۷۰/۱۲	۷۱/۶۵	۰/۷۱
۴	۵۱/۲۶	۵۱/۸۳	۵۴/۲	۰/۴۵
۵	۷۸/۱۸	۷۰/۲۵	۷۲/۳۹	۰/۸۱
۶	۷۱/۲۵	۷۳/۶۲	۷۰/۲۹	۰/۷۵
۷	۹۳/۷۵	۹۶/۱	۹۴	۰/۹۱

ج) نقشه شوری خاک مربوط به سپتامبر ۲۰۱۸ (مرداد ۹۷)

۱	۵۴/۳۳	۳۸/۷۳	۴۹/۹	۰/۴۱
۲	۶۲/۲۱	۶۶/۴۵	۶۷/۲۷	۰/۵۹
۳	۷۳/۱۹	۷۱/۷۱	۷۰/۲۶	۰/۷۲
۴	۵۰/۱۶	۵۲/۳۱	۵۶/۴۲	۰/۴۴
۵	۶۴/۸۶	۷۷/۶۹	۷۶/۵	۰/۷۰
۶	۶۹/۶۸	۷۰/۶۹	۷۳/۵	۰/۷۱
۷	۸۲/۳۴	۸۰/۳۷	۷۸/۲۸	۰/۷۸

د) نقشه شوری خاک مربوط به مارس ۲۰۱۸ (فروردین ۹۷)

۱	۳۳/۵۴	۴۱/۳۹	۵۰/۷۶	۰/۵۱
۲	۵۱/۹۴	۶۱/۵۵	۵۹/۷۲	۰/۵۰
۳	۷۲/۲۹	۷۱/۲۶	۷۱/۰۹	۰/۷۰
۴	۳۱/۹۱	۴۲/۲۴	۳۵/۰۹	۰/۳۸
۵	۷۰/۸۷	۷۱/۴۹	۷۴/۹۶	۰/۶۹
۶	۷۲/۶۸	۷۳/۹۶	۷۴/۵۳	۰/۷۰
۷	۷۵/۴۷	۷۴/۳۹	۷۳/۳۳	۰/۷۵

نتایج نشان داد که هدایت الکتریکی با شاخص‌های شوری یک و باند پنج سنجنده لندست هشت رابطه مستقیم و با SAVI رابطه معکوس دارد. این نتایج با یافته‌های (Du et al. (2024) و (Suliman et al. (2023) مطابقت دارد. نتایج اعتبارسنجی داده‌های آزمون با نقشه‌های تولیدشده در جدول ۵ ارائه شده است. بر این پایه، مقادیر مثبت MBE نشان‌دهنده بیش برآورد هدایت الکتریکی خاک توسط فن سنجش از دور است. همچنین مقادیر NRMSE همه نقشه‌های فوق در محدوده ۲۰-۱۰٪ قرار دارد که نشان‌دهنده وضعیت مناسب برآورد نقشه‌ها می‌باشد. از طرفی، ضریب تبیین همه نقشه‌ها بین ۰/۷۱-۰/۶۵ قرار دارد که حاکی از دقت مناسب نقشه‌های برآورد شده است. روابط رگرسیونی استفاده شده برای تهیه نقشه شوری خاک در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- روابط رگرسیونی استفاده شده برای تهیه نقشه های شوری خاک سطحی در زمان نمونه برداری

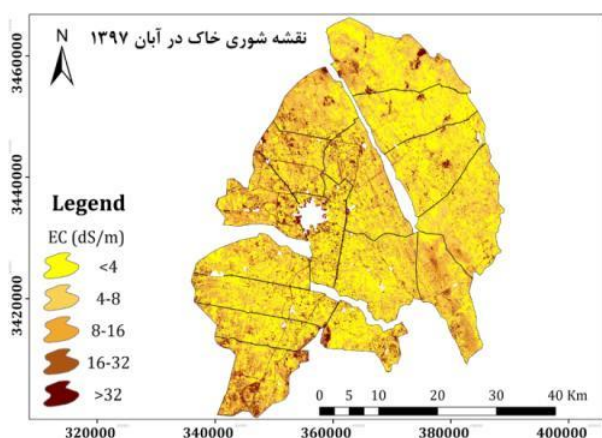
تاریخ بررسی	رابطه رگرسیونی
مارس ۲۰۱۹ (فروردین ۹۸)	$EC = 62.405B5 - 60.21SAVI + 6.28SI1 - 7.64$

پارامترهای B5 و B2 به ترتیب باند مربوط به طیف مادون قرمز و طیف آبی است.

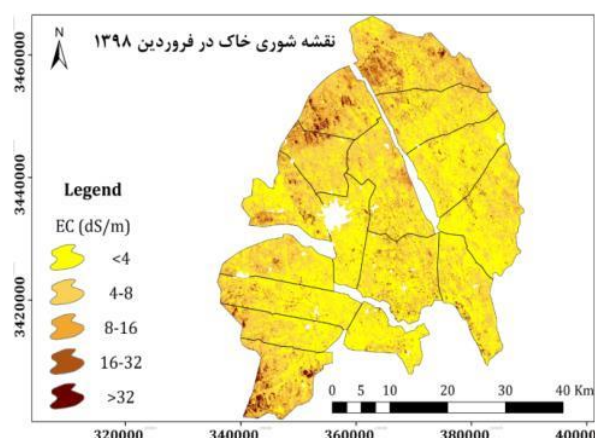
جدول ۵- نتایج اعتبارسنجی داده های آزمون با نقشه های تولید شده برای هر یک از تاریخ های مورد بررسی

تاریخ بررسی	MBE	NRMSE (%)	R ²
مارس ۲۰۱۹ (فروردین ۹۸)	۰/۹۸	۱۷/۵۶	۰/۶۹
نوامبر ۲۰۱۸ (آبان ۹۷)	۰/۸۹	۱۹/۳۹	۰/۶۹
سپتامبر ۲۰۱۸ (مرداد ۹۷)	۰/۷۸	۱۹/۱۲	۰/۶۵
مارس ۲۰۱۸ (فروردین ۹۷)	۰/۵۹	۱۰/۲۵	۰/۷۱

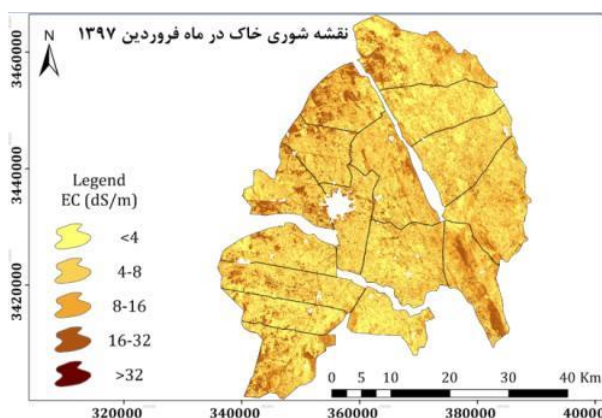
برای پایش تغییرات مکانی شوری، نقشه شوری خاک برای کل منطقه دشت سیستان در شکل ۲ ارائه شده است. شکل ۲-الف، نقشه مربوط به مارس ۲۰۱۹ (فروردین ۹۸)، یعنی اسفندماه ۹۷ تا فروردین ۹۸ (در زمان پیک بارش ها و پس از رویداد سیل اخیر)، شکل ۲-ب مربوط به آبان ماه ۹۷ (فصل کشت منطقه در سال ۹۷)، شکل ۲-ج، مربوط به وضعیت شوری خاک در اواخر مردادماه ۹۷ (که گیاه در زمین وجود ندارد) و شکل ۲-د نیز مربوط به وضعیت شوری خاک در مارس ۲۰۱۸ (یک سال پیش از نمونه برداری) است.



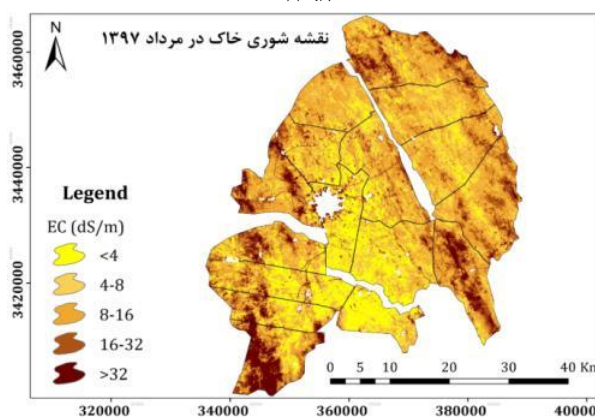
ب- نقشه شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره ای، آبان ۱۳۹۷



الف- نقشه شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره ای، فروردین ۱۳۹۸



د- نقشه شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره ای، فروردین ۱۳۹۷



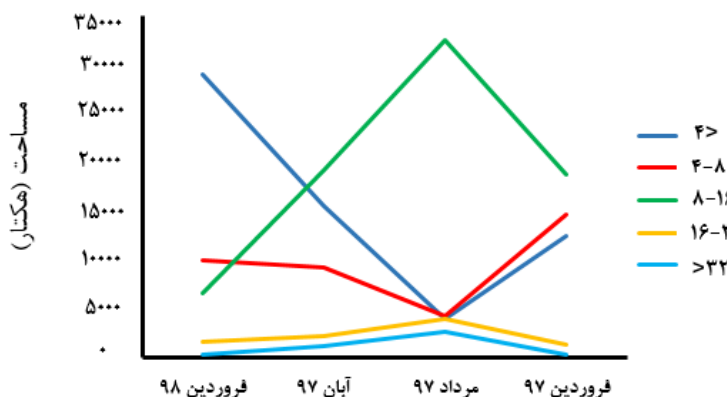
ج- نقشه شوری خاک با استفاده از تصاویر ماهواره ای، مرداد ۱۳۹۷

شکل ۲- پایش مکانی تغییرات شوری خاک در دشت سیستان، (۲-الف، نقشه شوری خاک در فروردین ۱۳۹۸، ۲-ب، آبان ۹۷، ۲-ج، مرداد ۹۷ و ۲-د، فروردین ۹۷)

جدول ۶- مساحت کلاس‌های شوری خاک سطحی (هکتار) در زمان‌های مختلف بدست آمده از طریق فن سنجش از دور

تاریخ بررسی	<۴	۴-۸	۸-۱۶	۱۶-۳۲	>۳۲
فروردین ۹۸	۲۸۹۵۲/۵	۹۹۲۱/۳	۶۵۷۵/۹۸	۱۵۵۵	۲۲۸/۲
آبان ۹۷	۱۵۴۳۲/۲۶	۹۲۵۳	۱۹۱۸۶/۲	۲۱۵۶	۱۲۰۵
مرداد ۹۷	۴۰۱۱/۲۱	۴۲۳۱/۴۸	۳۲۵۱۹/۳	۳۸۷۲	۲۵۹۹
فروردین ۹۷	۱۲۴۰۲/۱۵	۱۴۵۹۸/۶۱	۱۸۶۶۱/۲۲	۱۳۱۵	۲۵۶

مقایسه مقادیر و کلاس‌های شوری در زمان‌های مختلف (جدول ۶ و شکل ۲) نشان می‌دهد که شوری خاک پدیده‌ای پویا بوده و با گذشت زمان، تغییرات جوی، تغییرات فصل، بارش، آبیاری و مدیریت زمین تغییر قابل توجهی می‌کند. به‌عنوان مثال، در شمال شرقی واحد عمرانی زهک سه در تابستان، اراضی بیشتری دارای شوری بالا بوده‌اند اما در اواخر فصل زمستان و شروع فروردین، درصد اراضی با شوری زیاد در آن قسمت کاهش یافته است. نتایج نشان داد که در مرداد ۹۷، سطح اراضی با هدایت الکتریکی بیشتر از ۸ دسی‌زیمنس بر متر بیش از دیگر فصل‌ها بوده است (شکل ۳).



شکل ۳- نمودار تغییرات مساحت اراضی با شوری‌های مختلف در فصل‌های بررسی شده

از طرفی سطح اراضی با شوری کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر در فروردین ۹۸، بیشترین مقدار را داشت که می‌تواند ناشی از افزایش بارش‌ها و وقوع سیل در منطقه در این زمان باشد (شکل ۴-ب). پس از آن، در آبان ماه ۹۷ بیشترین سطح اراضی دارای شوری کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد. این امر می‌تواند به دلیل مصادف بودن با زمان کشت و آبیاری اراضی زراعی در منطقه و همچنین بارش‌های پاییزی باشد (شکل ۴-الف). سطح اراضی با شوری بیشتر از ۸ دسی‌زیمنس بر متر در مرداد ۹۷ نسبت به فروردین ۹۷ حدود ۱۸۰۰۰ هکتار افزایش داشته است. نکته قابل توجه در این رابطه این است که با تغییر فصل از بهار به تابستان، از سطح اراضی با شوری کمتر از ۴ و ۴-۸ دسی‌زیمنس بر متر کاسته شده و تقریباً همه این سطح کاهش یافته، به شوری‌های بیشتر از ۸ دسی‌زیمنس بر متر تبدیل شده‌اند.



شکل ۴- میزان بارندگی (میلی‌متر) در ایستگاه‌های هامون، زهک و زابل در فروردین سال ۱۳۹۸ (الف) و بارندگی (میلی‌متر) در ماه‌های مختلف سال در ایستگاه‌های زهک و زابل در سال ۹۷ (ب)



نتیجه گیری

برای آگاهی از وضعیت شوری و سدیمی خاک‌ها لازم است عوامل مؤثر بر شور و قلیائی شدن خاک‌ها را دانست. دشت سیستان از لحاظ زمین‌شناسی به صورت فرورفتگی است که در اثر رسوبات دریاچه‌ای و رسوبات رودخانه‌ای پر شده و دارای رسوبات عمیقی هستند و خاک سطحی نسبت به اعماق، بافت ریزتری دارند.

با توجه به آنچه گفته شد تغییرات شوری را می‌توان در دو مقیاس عمومی و مقیاس مزرعه‌ای در نظر گرفت. در مقیاس عمومی، موقعیت اراضی نسبت به هامون‌های پوزک، سابوری و هیرمند و مسیر رودها و سیلاب‌ها، تفاوت در ارتفاع مناطق مختلف (زهک و زابل، مرتفع‌تر و هیرمند، نیمروز و هامون پست‌تر هستند)، بالابودن سطح ایستابی (به‌ویژه در سال‌های گذشته که آورد سیلابی زیادی از رودخانه هیرمند به دشت وارد می‌شد) مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده وضعیت شوری هستند. اما در مقیاس مزرعه‌ای مدیریت کشت، آیش، آبشویی آغاز فصل، آبیاری، و برداشت خاک‌های سطحی شور تعیین‌کننده هستند. در این میان فعالیت‌های کشاورزی در مقیاس و سطح کوچکتر نقش مهمی دارند. با کشت گیاه در دشت سیستان به دلیل بارندگی کم (حدود ۵۰ میلی‌متر) و تبخیر بسیار زیاد (نزدیک به ۶ متر) آبیاری ضروری است. از این‌رو، با آبیاری، نمک‌های سطح خاک شسته شده و به اعماق پایین‌تر می‌رود. افزون بر آبیاری معمول در منطقه برای رفع نیاز آبی گیاهان، پیش از کشت پیش آبیاری انجام می‌شود که به نوعی آبشویی زمین است. عملیات دیگر برای شوری‌زدایی خاک، جمع‌کردن لایه سطحی خاک شور و انتقال آن به اطراف به‌عنوان مرز (پرن) مزرعه است.

بر مبنای بررسی‌ها و مشاهدات میدانی، به نظر می‌رسد شوری موجود در شهرستان زهک به‌ویژه زهک ۳ منشأ مدیریتی داشته و ناشی از کشت نکردن بخشی از اراضی این منطقه طی سالیان گذشته است. اما شوری‌های مربوط به مناطق هیرمند، هامون و نیمروز بیشتر به دلیل قرار گرفتن در نقاط کم ارتفاع‌تر منطقه است. هرچند در این مناطق نیز عوامل مدیریتی در مقیاس مزرعه می‌تواند عامل تغییرات شوری‌های بیشتر باشد.

نگاهی به این مطالعه و دیگر مطالعات انجام‌گرفته نشان می‌دهد علی‌رغم تغییرپذیری زیاد شوری خاک در مقیاس مزرعه در منطقه، توزیع و پراکنش عمومی نسبی حاکم است. به‌طوری‌که نتایج بررسی‌های انجام‌شده نشان‌دهنده شوری‌های بیشتر در شهرستان‌های نیمروز و هامون و شوری کمتر در مناطقی مثل زهک و زابل است. آنچه سهم این تغییرات را پررنگ‌تر می‌کند میزان آب ورودی به منطقه است که بر سطح کشت تأثیر می‌گذارد که در سالیان گذشته میزان آب ورودی به ایران به دلیل خشکسالی‌ها و ایجاد سدها در بالادست بیشتر روندی نزولی بوده است.

همچنین مقایسه رویکردهای مختلف به‌کار رفته در این مطالعه نشان داد نقشه‌های شوری خاک تهیه‌شده با استفاده از شاخص‌های طیفی و باندهای تصاویر ماهواره‌ای دارای بیشترین مقدار صحت و دقت بودند که نشان‌دهنده اهمیت شاخص‌های طیفی در شناسایی و طبقه‌بندی شوری خاک است و می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب برای تهیه نقشه شوری خاک مورد استفاده قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- مهندسین مشاور آب خاک تهران، ۱۳۹۵، طرح و ساخت (EPC) انتقال و توزیع آب به اراضی سیستان محدوده زابل، واحد عمرانی ۱، گزارش خاکشناسی، لایه‌بندی، ضریب آبگذری و نفوذپذیری خاک.
- مهندسین مشاور پندام، ۱۳۹۶، گزارش نفوذپذیری خاک به روش استوانه مضاعف، محدوده نیمروز واحد عمرانی ۳.

REFERENCES

- Abuelgasim, A., Rubab Ammad, R. (2019). Mapping soil salinity in arid and semi-arid regions using Landsat 8 OLI satellite data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, 415-425, doi.org/10.1016/j.rsase.2018.12.010
- Ahmad A., and Quegan S. (2012). Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data. *Applied mathematical sciences*, 6 (129): 6425-6436.
- Al-Ali, Z., Bannari, A. Hameid, N. & El-Battay A. (2019). "Physical Models for Soil Salinity Mapping Over Arid Landscape Using Landsat-Oli and Field Data: Validation and Comparison," IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019, pp. 7081-

- 7084, doi: 10.1109/IGARSS.2019.8900080.
- Al-Khuzai, M.M, Abdul Maulud K.N, & Taib A.M. (2022). Soil Salinity Monitoring and Quantification Using Modern Techniques. *Journal of Ecological Engineering*: 23(11), 57–67
- Bandak, S., Movahedi-Naeini, S.A., & Mehri, S. (2024). A longitudinal analysis of soil salinity changes using remotely sensed imageries. *Sci Rep*, 14, 10383.
- Du, D.; He, B.; Luo, X.; Ma, S.; Song, Y.; & Yang, W. (2024). Spatio-Temporal Variation Analysis of Soil Salinization in the Ougan-Kuqa River Oasis of China. *Sustainability*, 16, 2706. doi.org/10.3390/su16072706
- Elshevy, M.A., Mohamed, M.H.A. & Refaat, M. (2024). Developing a Soil Salinity Model from Landsat 8 Satellite Bands Based on Advanced Machine Learning Algorithms. *J Indian Soc Remote Sens*, 52, 617–632. doi.org/10.1007/s12524-024-01841-1
- Gorji, T., Yildirim, A., Hamzehpour, N., & Tanik ElifSertel, A. (2020). Soil salinity analysis of Urmia Lake Basin using Landsat-8 OLI and Sentinel-2A based spectral indices and electrical conductivity measurements. *Ecological Indicators*, 12, 106173.
- Guo, Y.; Shi, Z.; Li, H.Y.; & Triantafilis, J. (2013). Application of Digital Soil Mapping Methods for Identifying Salinity Management Classes Based on a Study on Coastal Central China. *Soil Use Manag.*, 29, 445–456.
- Khan NM, Rastoskuev VV, Sato Y, & Shiozawa S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, 77(1): 96-109.
- Liu, X., J. Peterson, Z. Zhang, & S. Chandra, (2005). Improving soil salinity prediction with high resolution DEM derived from LIDAR data, The 9th International symposium on physical measurements and Signature in Remote sensing, China.
- Masoud, A.A., & K. kike, (2006). Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes, A case study in the Siwa region, NW Egypt, *Journal of Arid Environments*, 66,151-167.
- Pandam Consulting Engineers. (2016). Soil permeability report using double cylinder method, Nimroz area, construction unit 3. (In Persian)
- Sisodia P. S, Tiwari V. and A. Kumar. (2014). Analysis of Supervised Maximum Likelihood Classification for remote sensing image, International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014), Jaipur, 2014, pp. 1-4.
- Suliman, M.M.; Kaya, F.; Elsheikh, M.A.; Başayığit, L.; & Francaviglia, R. (2023). Application of Machine Learning Algorithms for Digital Mapping of Soil Salinity Levels and Assessing Their Spatial Transferability in Arid Regions. *Land*, 12, 1680. doi.org/10.3390/land12091680
- Tehran water and soil consulting engineers. (2015). Design and construction (EPC) of water transfer and distribution to the lands of Sistan, Zabol area - civil engineering unit 1, Soil science, layering, hydraulic conductivity and soil permeability report. (In Persian)
- Wang N, Chen S, Huang J, Frappart F, Taghizadeh R, Zhang X, Wigneron JP, Xue J, Xiao Y, Peng J., (2024).. Global Soil Salinity Estimation at 10 m Using Multi-Source Remote Sensing. *J. Remote Sens*. 4, 0130. doi.org/10.34133/remotesensing.0130
- Wu W., Ahmad S., & MhaimedbWaleed M. (2014). Mapping soil salinity changes using remote sensing in Central Iraq. *Geoderma Regional*, (2–3): 21-31, doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.09.002
- Wu, J, Vincent, B , Yang, J., Bouarfa, S., & Vidal, A. (2008). Remote Sensing Monitoring of Changes in Soil Salinity: A Case Study in Inner Mongolia, China, *Sensors*, 8 (11):7035-7049. doi: 10.3390/s8117035
- Xiao, S., Nurmemet, I. & Zhao, J. (2024). Soil salinity estimation based on machine learning using the GF-3 radar and Landsat-8 data in the Keriya Oasis, Southern Xinjiang, *China. Plant Soil*, 498, 451–469. doi.org/10.1007/s11104-023-06446-0