



Evaluation of Soil Salinity Zonation Using Remote Sensing and Geostatistical Methods in the Alluvial Plain Lands of the Tigris River, Iraq

Marvan Al-Refahi ¹, Alireza Karimi ², Ebrahim Mahmoudabadi ^{3*},
Morteza Akbari ⁴

¹ MSc Graduate, Department of Soil Sciences, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Professor in soil sciences, Department of Soil Sciences, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Assistant Professor, Department of Desert and Arid Zones Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Desert and Arid Zones Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 01 June 2025

Revised: 25 October 2025

Accepted: 27 October 2025

Available Online:

31 October 2025

Keywords:

Soil Salinity Mapping

Soil Electrical Conductivity

Geostatistics

Remote Sensing

Tigris River

ABSTRACT

One of the essential requirements in soil salinity management and reclamation is access to high accuracy salinity maps. This study was conducted to evaluate the accuracy of soil salinity mapping using remote sensing and geostatistical methods in a part of the alluvial lands of the Tigris River within the Al-Suwayrah farms in Iraq, located 30 km south of Baghdad. For this purpose, 100 soil samples were collected using a regular grid with 1,000 m spacing from a depth of 0–20 cm across an area of 10,000 hectares, and the electrical conductivity (EC) of the saturated paste extract was measured. Spectral bands and indices of ASTER and Landsat satellite images were prepared in three spectral modes: digital number (DN), radiance, and reflectance. Subsequently, using multiple linear regression, equations were developed between the derived spectral indices in each spectral mode and soil salinity, and a soil salinity map was also generated using the kriging method. The results of comparing the radiance, reflectance, and DN spectral modes for salinity modeling indicated that the Landsat satellite in reflectance mode achieved the highest accuracy (MBE = -1.24, RMSE = 4.58) among the remote sensing methods. Comparison of the remote sensing and geostatistical approaches showed that the geostatistical method, due to the use of measured field data, exhibited higher accuracy (MBE = -0.06, RMSE = 3.53) than the remote sensing methods; however, the maps produced by remote sensing also demonstrated acceptable accuracy, and the salinity map derived from this method closely corresponded to the salinity distribution map obtained from geostatistics. Considering the lower cost and time requirements, as well as the capability for temporal repetition, remote sensing methods can be effectively used to produce reconnaissance level soil salinity maps for the alluvial plain of the Tigris River with acceptable accuracy.

* Corresponding author: Ebrahim Mahmoudabadi

E-mail address: Mahmoudabadi@um.ac.ir

How to cite this article: Al-Refahi, M., Karimi, A., Mahmoudabadi, E., & Akbari, M. (2025). Evaluation of Soil Salinity Zonation Using Remote Sensing and Geostatistical Methods in the Alluvial Plain Lands of the Tigris River, Iraq. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(4), 85-104. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.93856.1579>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil salinity is a major environmental challenge in arid and semi-arid regions, as it negatively affects agricultural productivity and can cause irreversible soil degradation. Accurate assessment of soil salinity is therefore essential for sustainable land management. The Tigris alluvial plain in Iraq an agriculturally important region is highly susceptible to salinization due to its arid climate and intensive irrigation practices. Providing precise information on soil properties, particularly salinity, is crucial for managing land resources and improving crop production.

Traditional soil mapping and sampling methods are time-consuming, costly, and spatially limited. In recent years, remote sensing techniques have emerged as effective tools for large-scale soil salinity assessment. Spectral indices derived from satellite imagery enable the detection of subtle variations in soil characteristics such as moisture, salinity, organic matter, and texture. Geostatistical methods, particularly kriging, also offer powerful capabilities for interpolating field-based soil salinity measurements. Although many studies worldwide have explored the application of remote sensing and geostatistical approaches for soil salinity mapping, each region possesses unique environmental and soil conditions that influence the accuracy of these techniques. The Tigris alluvial plain presents specific challenges due to its soil properties, vegetation cover, and hydrological conditions. Therefore, evaluating the performance of these techniques in this region is essential for identifying the most accurate method for soil salinity assessment and for supporting effective management of soil degradation.

Material and Methods

The study was conducted in the alluvial plain of the Tigris River, within the Al-Suweera (Alsouyreh) region, approximately 30 km south of Baghdad, Iraq. Soil samples were collected using a systematic grid sampling scheme with a spacing of 1000 m, covering an area of 10,000 ha at a depth of 0–20 cm. Laboratory analyses included electrical conductivity (EC), pH, and sodium adsorption ratio (SAR).

Satellite imagery from ASTER and Landsat was processed using three spectral modes Digital Number (DN), radiance, and reflectance to generate soil salinity maps. The kriging interpolation technique was applied to the field-measured salinity data to produce geostatistical salinity maps.

Accuracy assessment of the resulting maps was performed using Mean Bias Error (MBE) and Root Mean Square Error (RMSE), which are widely used metrics for evaluating differences between observed and estimated values.

Results and Discussion

The results indicated that the radiance mode of Landsat imagery and the reflectance mode of ASTER imagery provided the highest accuracy among remote sensing-based salinity estimates. However, the geostatistical approach (kriging) outperformed all remote sensing methods, producing the most accurate salinity maps. Validation results showed negative MBE values for all remote sensing and geostatistical models, with the lowest MBE (−0.06) obtained using kriging. Kriging also yielded the lowest RMSE value (3.53), confirming its superior performance.

Landsat reflectance demonstrated better accuracy than all spectral modes derived from ASTER imagery. The superior accuracy of kriging can be attributed to its direct reliance on dense field measurements, which is particularly advantageous for relatively small study areas with adequate sampling density.

Both the remote sensing and geostatistical maps showed similar spatial patterns of salinity distribution and exhibited strong agreement, highlighting the potential of remote sensing for large-scale soil salinity mapping. The spatial patterns revealed lower salinity levels in the southern part of the study area and higher levels in the northern part, nearer the Tigris River. This aligns with actual field conditions, where the southern region has benefited from surface drainage systems since 2000, reducing salinity.

Conversely, the northern region relies on long-term irrigation with saline river water ($EC_w = 4 \text{ dS/m}$) and lacks an effective drainage system, resulting in persistent salinity accumulation.

Conclusion

This study demonstrates the effectiveness of remote sensing and geostatistical methods for soil salinity mapping in arid environments such as the Tigris alluvial plain in Iraq. Although geostatistical methods particularly kriging were found to provide the highest accuracy, remote sensing offers valuable spatial information and is well suited for broader scale assessment. Maps produced by both approaches provide essential data for monitoring soil degradation and guiding land management strategies. The results also underscore the importance of proper drainage infrastructure in preventing salinity buildup, especially in areas where irrigation depends on saline river water.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support of Ferdowsi University of Mashhad (Project Code: 47644), which made this research possible.



مقایسه پهنه‌بندی شوری خاک با استفاده از روش‌های دورسنجی و زمین آمار در اراضی دشت آبرفتی رودخانه دجله عراق

مروان الرفاهی^۱، علیرضا کریمی^۲، ابراهیم محمودآبادی^{۳*}، مرتضی اکبری^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ استاد گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۴ دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۵	یکی از موارد ضروری در مدیریت و اصلاح شوری خاک دسترسی به نقشه با دقت بالا است. این پژوهش با هدف بررسی دقت نقشه شوری خاک با استفاده از روش‌های سنجش از دور و روش زمین آمار در بخشی از اراضی آبرفتی رودخانه دجله در مزارع الصویره عراق در فاصله ۳۰ کیلومتری جنوب بغداد انجام شد. برای این منظور، تعداد ۱۰۰ نمونه خاک با روش شبکه منظم با فاصله ۱۰۰ متر از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری در محدوده‌ای به وسعت ۱۰ هزار هکتار برداشت شد و مقدار هدایت الکتریکی (EC) در عصاۑ گل اشباع نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شد. باندها و شاخص‌های طیفی تصاویر ماهواره استر و لندست، در سه حالت طیفی، ارزش رقومی (DN)، تابش طیفی (radiance) و بازتابش (reflectance) تهیه شد. سپس با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه معادله بین شاخص‌های به‌دست آمده در هر حالت طیفی و مقدار شوری به‌دست آمد، همچنین با استفاده از روش کریجینگ نیز نقشه شوری خاک ترسیم گردید. نتایج مقایسه حالت‌های طیفی radiance، reflectance و DN برای مدلسازی شوری بیانگر آن بود که ماهواره لندست در حالت بازتابش بیشترین دقت (MBE=-1.24, RMSE=4.58) را در مدلسازی شوری خاک در بین روش‌های سنجش از دوری داشت. مقایسه روش‌های سنجش از دور و زمین‌آمار نشان داد که روش زمین‌آمار به دلیل استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده دارای دقت بالاتری (MBE=-0.06, RMSE=3.53) نسبت به روش‌های سنجش از دوری بود اما همچنان نقشه‌های به‌دست آمده از روش سنجش از دور نیز دقت قابل قبول را دارا بودند و نقشه شوری به‌دست آمده از این روش با نقشه پراکنش شوری خاک حاصل از روش زمین‌آمار همخوانی زیادی داشت. با توجه به هزینه و وقت کمتر با قابلیت تکرار در دوره‌های زمانی، روش‌های سنجش از دور در تهیه نقشه‌های اجمالی شوری خاک دشت آبرفتی رودخانه دجله با دقت قابل قبول می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.
کلمات کلیدی: نقشه‌برداری شوری خاک هدایت الکتریکی خاک زمین آمار سنجش از دور رودخانه دجله	

مقدمه

زمین‌های زراعی الصویره در ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهر بغداد، و بر روی اراضی دشت آبرفتی رودخانه دجله نقش به‌سزایی در تولید مواد غذایی به ویژه غلات، گندم و جو در کشور عراق دارد به طوری که این شهر رتبه اول در تولید محصولات کشاورزی در استان واسط عراق را دارد. کشت متوالی و آبیاری اراضی الصویره با آب دجله و بالا بودن سطح سفره‌های آب زیرزمینی این مناطق و اقلیم گرم با تبخیر فراوان سبب شده تا املاح در سطح خاک تجمع یابد و موجب شور شدن و غیر قابل کشت شدن قسمت‌هایی از اراضی این منطقه شود (Al-Senafy & Abraham, 2004). براساس گزارش فرانکن (Frenken, 2009) شوری خاک زمین‌های کشاورزی عراق موجب کاهش ۳۰ درصدی عملکرد در ۷۰ درصد از اراضی تحت آبیاری این کشور شده است. در گزارشات فائو (FAO, 2012) نیز آمده است که به دلیل مشکلات شوری خاک‌های عراق، پتانسیل تولید و عملکرد ۷۰ درصد از زمین‌های کشاورزی این کشور کاهش یافته است، که در مجموع باعث کاهش ۳۰ درصدی تولید محصولات کشاورزی عراق شده است.

با توجه به اهمیت زمین‌های کشاورزی بین النهرین در تولید و اقتصاد مردم و کشور عراق و مشکلاتی که این اراضی از نظر شوری پیدا کرده‌اند شناسایی و تهیه نقشه شوری خاک با دقت مناسب می‌تواند شناخت بهتری از اراضی و تأثیرات کشاورزی بر خاک منطقه را روشن نماید و در جهت پایش وضعیت شوری و اعمال مدیریت مکانی مناسب منطقه بسیار کارآمد باشد. برای تهیه نقشه شوری خاک از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود که نقشه‌برداری مرسوم^۱ عمومی‌ترین روش نقشه‌برداری تا چند دهه گذشته بود. نقشه‌های پلی‌گونی و گسسته محصول این روش است اما منطق ناپیوسته موجود در این روش به عنوان مهمترین محدودیت و خطای موجود در این نوع نقشه‌برداری معرفی شده است (Mahmoudabadi, Karimi, Haghnia & Sepehr, 2017b). با ورود به عصر تکنولوژی و پیدایش کامپیوتر و ارسال ماهواره‌ها به مدار زمین و در نتیجه دسترسی به ابزار جدید و اطلاعات سنجش از دور، روش‌های نقشه‌برداری نیز به روز شدند. در ابتدا روش‌های زمین‌آماری معرفی شدند. روش زمین‌آمار قادر است با استفاده از داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده و استفاده از تخمین‌گرهای آماری مختلف به برآورد ویژگی مورد نظر در نقاطی که نمونه‌برداری نشده‌اند بپردازد و می‌توان از آن برای درون‌یابی داده‌های شوری خاک و تهیه نقشه‌های پیوسته توزیع شوری خاک استفاده کرد (Panagiotou & Tziritis, 2022). در روش‌های زمین‌آمار، برای به‌دست آوردن دقت مناسب، نیاز به تعداد زیاد نمونه است که باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود. به عنوان راه حل جایگزین، استفاده داده‌های سنجش از دور به دلیل پوشش زیاد سطح زمین و ارتباط با ویژگی‌های خاک، قابلیت برآورد شوری خاک با هزینه مناسب را دارند. روش سنجش از دور، اطلاعات ارزشمندی در مورد تغییرات مکانی و زمانی در خواص و شرایط خاک ارائه می‌کند که شامل استفاده از سنسورهای ماهواره‌ای، زمینی یا هواپرد برای گرفتن تصاویر و داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک است. این حسگرها می‌توانند تشعشعات الکترومغناطیسی منعکس شده یا ساطع شده توسط خاک را شناسایی کنند و برای پیش‌بینی و تهیه نقشه ویژگی‌های خاک استفاده کردند (Abdulraheem et al., 2023; Srivastava, Srivastava, Singh, Gupta & Dugesar, 2025). داده‌های سنجش از دور ماهواره‌هایی مانند Landsat و ASTER اغلب به سه شکل نمایش داده می‌شوند: اعداد دیجیتال (DN)، درخشندگی (Radiance) و انعکاس (Reflectance). هر یک از این فرم‌ها بینش‌های متفاوتی را ارائه می‌دهند و برای کاربردهای مختلف در رصد زمین و نظارت بر محیط زیست استفاده می‌شوند. اعداد دیجیتال (DN) مقادیر پیکسل خام هستند که مستقیماً از سنسورهای ماهواره‌ای به دست می‌آیند. مقادیر DN برای هر سنسور خاص است و تحت تأثیر عواملی مانند ویژگی‌های سنسور و تنظیمات کالیبراسیون قرار می‌گیرد (Yale center, 2024). تشعشع اندازه‌گیری مقدار انرژی نوری است که از سطح زمین ساطع یا منعکس شده و توسط حسگر تشخیص داده می‌شود. این یک کمیت فیزیکی است و معمولاً بر حسب واحد وات بر متر مربع بر استرادیان بر میکرومتر ($W/m^2/sr/\mu m$) بیان می‌شود. مقادیر تشعشع با اعمال ضرایب کالیبراسیون رادیومتری به مقادیر DN به دست می‌آید. این فرآیند تعصبات خاص حسگر

را تصحیح می‌کند و مقادیر DN را به معیار استاندارد از انرژی ساطع شده یا منعکس شده تبدیل می‌کند (USGS, 2024). انعکاس نسبت مقدار نور منعکس شده توسط سطح زمین به مقدار نوری است که بر روی آن تابیده می‌شود. این یک کمیت بدون بعد است و معیار نرمال شده‌ای از خواص سطح را ارائه می‌دهد و برای مقایسه داده‌ها در زمان‌ها و حسگرهای مختلف مفید است. مقادیر بازتاب از درخشندگی با تصحیح اثرات جوی و زوایای روشنایی خورشیدی به دست می‌آیند. این اصلاح تضمین می‌کند که مقادیر بازتاب، صرف نظر از زمان روز یا شرایط جوی، سازگار و قابل مقایسه هستند. به طور کلی، در حالی که مقادیر DN داده‌های خام و کالیبره‌نشده از حسگرهای ماهواره‌ای هستند، تابش اندازه‌گیری انرژی واقعی شناسایی شده را ارائه می‌دهد و بازتاب یک معیار نرمال شده و قابل مقایسه از ویژگی‌های سطح را ارائه می‌دهد. انتخاب نوع داده مورد استفاده برای تخمین شوری خاک می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر دقت و قابلیت اطمینان نتایج داشته باشد. به دست آوردن و پردازش داده‌های DN نسبتاً آسان است، اما ممکن است تحت تأثیر تغییرات در حساسیت سنسور قرار گیرند. داده‌های Radiance اطلاعاتی در مورد انرژی ساطع یا منعکس شده از یک سطح ارائه می‌دهد، اما تفسیر و استفاده در تخمین شوری خاک می‌تواند چالش برانگیز باشد. داده‌های بازتاب پایدارتر هستند و اطلاعات دقیق‌تری در مورد خواص سطح ارائه می‌دهند، اما نیاز به پردازش پیچیده‌تری دارند (Sayler & Zanter, 2024). هدف این مقاله مقایسه اثربخشی داده‌های DN، تابش و بازتاب از تصاویر لندست و استر برای تخمین شوری خاک، و مقایسه نتایج با نتایج به دست آمده با استفاده از روش‌های زمین‌آماري بود. در این مطالعه، نتایج به دست آمده با استفاده از داده‌های DN، درخشندگی و بازتاب از تصاویر لندست و استر برای تخمین شوری خاک مورد مقایسه قرار گرفت. دقت و قابلیت اطمینان هر روش بررسی شد و در نهایت بهترین و مؤثرترین رویکرد در برآورد شوری خاک منطقه ارائه گردید.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب شهر بغداد در منطقه تصویر از اراضی حاشیه رودخانه دجله انتخاب گردید. تصویر دارای اقلیم خشک است که میزان متوسط بارندگی سالیانه این منطقه حدود ۱۲۵ میلی‌متر است و متوسط دمای سالیانه ۲۳/۵ درجه سانتی‌گراد است. سطح آب زیرزمینی در اراضی تصویر بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر است. محدوده‌ای به وسعت ده هزار هکتار در بین طول جغرافیایی $44^{\circ}53'43''$ تا $45^{\circ}2'55''$ شرقی و عرض جغرافیایی $32^{\circ}41'33''$ و $32^{\circ}51'06''$ شمالی مورد مطالعه و نمونه‌برداری قرار گرفت (شکل ۱). این محدوده شامل زمین‌های با کشت (گندم و جو) و همچنین وجود اراضی فاقد کشت در مجاورت آنها است. ارتفاع این منطقه از سطح دریا بیست متر و عمق آب زیرزمینی در فاصله دو متری قرار دارد.

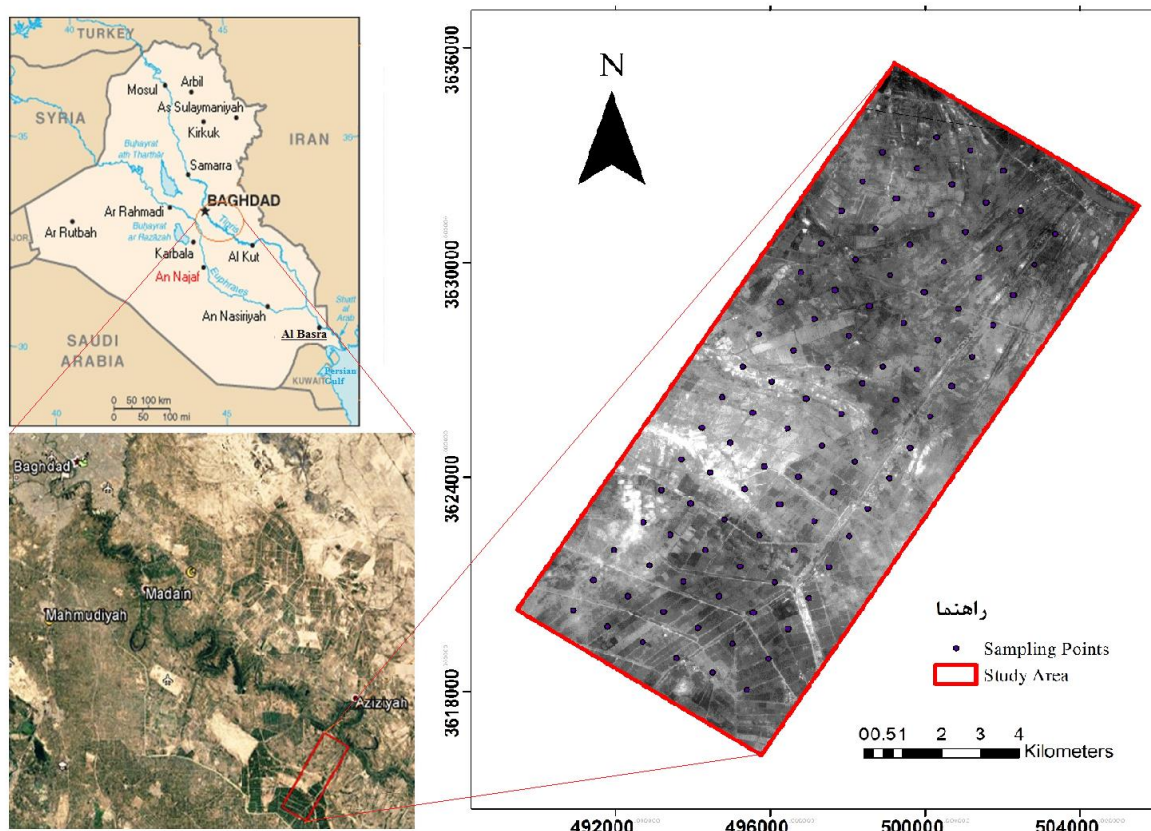
مواد و روش‌ها

تعداد نمونه و روش نمونه‌برداری

تعداد ۱۰۰ نمونه سطحی به صورت شبکه منظم و با فاصله ۱۰۰۰ متر از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری سطح خاک در منطقه‌ای به وسعت ۱۰ هزار هکتار از اراضی کشت شده و فاقد کشت نمونه‌برداری شد. همچنین، از آب رودخانه دجله نیز نمونه‌برداری صورت گرفت.

آنالیزهای آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه و هوا خشک نمودن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، مورد آنالیز آزمایشگاهی قرار گرفتند. بافت خاک به روش هیدرومتری، pH و EC در عصاره گل اشباع، ماده آلی به روش والکی بلاک، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون، املاح محلول کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون و سدیم به وسیله دستگاه فلیم فتومتر مدل PFP7 اندازه‌گیری شدند (Pansu, 2006).



شکل ۱- محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در حاشیه رودخانه دجله - عراق

Fig. 1. Geographic extent of the study area along the Tigris River margin, Iraq

تجزیه و تحلیل داده‌ها

آماره‌های توصیفی شامل میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی محاسبه شدند. در این پژوهش، علاوه بر آزمون چولگی و کشیدگی برای بررسی نرمال بودن یا نبودن توزیع داده‌ها از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف ۱ نیز استفاده شد. تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS16 انجام شدند.

تهیه تصاویر ماهواره‌ای

به منظور بررسی تغییرات شوری خاک در منطقه مورد مطالعه به وسیله اطلاعات ماهواره‌ای از تصاویر ماهواره لندست و استر استفاده شد. این تصاویر از سایت www.earthexplorer.usgs.gov تهیه و دانلود شد. تاریخ نمونه‌برداری و تصاویر ماهواره‌ای مطابق با تاریخ نمونه‌برداری از تصاویر تاریخ ۲۰۱۷/۱۱/۱۸ ماهواره استر و همچنین از تصاویر ماهواره لندست ۸ (سنجنده OLI) در تاریخ ۲۰۱۷/۱۱/۱۰ استفاده شد.

تبدیل طیفی تصاویر ماهواره‌ای

تبدیل DN به Radiance و بالعکس

تصاویر اولیه به دست آمده از باندهای مختلف ماهواره لندست ۸ بر حسب DN است و تصاویر اولیه ماهواره استر بر حسب رادیانس است، که جهت تبدیل طیف DN به رادیانس از رابطه (۱) استفاده شد.

$$L = L_{min} + ((L_{max} - L_{min}) / DN_{max}) * DN \quad (۱)$$

در این رابطه L مقدار رادیانس، DN مقدار رقومی پیکسل مورد نظر، DN_{max} حداکثر DN ثبت شده به وسیله سنجنده مورد نظر و L_{min} و L_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل رادیانس سنجنده مورد نظر است. تصاویر اولیه به دست آمده از ماهواره استر برحسب رادیانس است که برای تبدیل رادیانس به DN از رابطه (۲) استفاده شد.

$$DN_i = (L_i / coef_i) + 1 \quad (۲)$$

در این رابطه L_i رادیانس پیکسل مورد نظر، DN_i مقدار رقومی پیکسل مورد نظر و $coef_i$ ضریب تبدیل DN به رادیانس است.

تبدیل تابش طیفی (Radiance) به بازتابش (Reflectance)

به منظور تبدیل مقدار رادیانس تصاویر ماهواره‌ای لندست و استر از رابطه (۳) استفاده شد.

$$\rho = \frac{\pi \cdot L \cdot d^2}{ESUN \cdot \cos(Sz)} \quad (۳)$$

در این رابطه ρ مقدار Reflectance، L مقدار رادیانس پیکسل مورد نظر، d فاصله زمین تا خورشید بر حسب واحد نجومی، $ESUN$ ارتفاع خورشید و Sz زاویه خورشید در هنگام تابش در زمانی که ماهواره در حال ثبت تصویر است.

شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور جهت پهنه‌بندی و ارزیابی شوری خاک

جهت ارزیابی شوری خاک منطقه مورد مطالعه به وسیله تصاویر ماهواره‌ای از شاخص‌های تعریف شده در این زمینه استفاده شد. در ماهواره لندست از شاخص‌های^۱ (SI_1 , SI_2 , SI_3)، BI^2 ، $NDVI^3$ ، $IPVI^4$ ، DVI^5 ، $PD322^6$ و باندهای ۱ تا ۷ این ماهواره استفاده شد (جدول ۱). شاخص‌های مورد استفاده برای ماهواره استر شامل SI_1 ، SI_2 ، SI_3 ، $NDVI$ ، BI و باندهای ۱ تا ۳ از این ماهواره بوده که فرمول محاسبه شدند (جدول ۲).

نقشه‌های حاصل از اطلاعات ماهواره‌ای

به منظور تهیه نقشه‌های شوری خاک منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ابتدا شاخص‌های به دست آمده از داده‌ای دو ماهواره استر و لندست در سه حالت DN ، $Radiance$ و $Reflectance$ محاسبه شد. سپس با استفاده از نرم افزار SPSS رابطه بین شاخص‌های به دست آمده از تصاویر به عنوان متغیرهای مستقل و مقادیر واقعی شوری به عنوان متغیر وابسته از روش رگرسیون خطی گام به گام به دست آمد. ابتدا نرم‌افزار انواع روابط ممکن میان شوری و متغیرهای مستقل را بررسی کرد و در نهایت چندین مدل پیشنهاد نمود که با توجه به ضریب تبیین مناسب‌ترین معادله انتخاب شد (Mahmoudabadi et al., 2017a). برای آزمون معنی‌دار بودن مدل رگرسیونی از آزمون F استفاده گردید. در صورت معنی‌داری مدل رگرسیون، معنی‌دار بودن ضرایب آن با استفاده از آزمون t نیز مورد بررسی قرار گرفت. در گام آخر، با استفاده از نرم افزار Arc GIS نسخه ۱۰/۳ نقشه‌های شوری خاک با استفاده از معادله رگرسیونی برای حالت‌های طیفی مختلف ترسیم شد. در این بخش در مجموع ۶ نقشه شوری از سه حالت مختلف طیفی برای دو ماهواره لندست و استر تهیه شد.

- 1- Saline Index
- 2- Brightness index
- 3- Normalized difference vegetation index
- 4- Infrared Percentage Vegetation Index
- 5- Difference Vegetation Index
- 6- Potential Different

جدول ۱- شاخص‌های پردازش شده روی تصاویر ماهواره لندست

Table 1- Spectral indices acquired from Landsat satellite images

شاخص	معادله	منبع
Index	Formula	Reference
SI1	$\sqrt{B2 * B3}$	Zarco-Tejada et al. (2005)
SI2	$\sqrt{B2^2 + B3^2 + B4^2}$	
SI3	$\sqrt{B2^2 + B3^2}$	
NDVI	$\frac{B2 - B5}{B2 + B5}$	Mahmoudabadi et al. (2017)
DVI	$\frac{B4 - B3}{B3 - B2}$	
PD322	$\frac{B3 + B2}{B4}$	
IPVI	$\frac{B3 + B4}{B3 + B4}$	Wiegand et al. (1991)
B1	Blue Visible	
B2	Green Visible	
B3	Red Visible	-
B4	Near Infrared	-
B5	Middle Infrared	-
B6	-	-
B7	Far Infrared	-

جدول ۲- شاخص‌های پردازش شده روی تصاویر ماهواره استر

Table 2- Spectral indices acquired from Aster satellite images

شاخص	معادله	منبع
Index	Formula	Reference
SI ₁	$\sqrt{B1 * B2}$	Zarco-Tejada et al. (2005)
SI ₂	$\sqrt{B1^2 + B2^2 + B3^2}$	
SI ₃	$\sqrt{B1^2 + B2^2}$	
NDVI	$\frac{B2 - B3}{B2 + B3}$	Gao (1996)
BI	$\sqrt{B2^2 * B3^2}$	
B ₁	Red Visible	
B ₂	Green Visible	-
B ₃	Blue Visible	-

نقشه‌های شوری حاصل از زمین آمار

جهت تهیه نقشه‌های شوری به روش کریجینگ ابتدا شناخت و مدلسازی ساختار مکانی شوری توسط آنالیز نیم‌تغییرنا بررسی شد. در گام بعد تخمین شوری با توجه به وزن‌دهی و واریوگرام مرحله قبل صورت گرفت. از روش اعتبارسنجی تقاطعی برای اعتبارسنجی مدل استفاده گردید.

تحلیل ساختار مکانی

در صورت وجود ساختار مکانی نقاط نزدیک به هم شباهت بیشتری نسبت به نقاط دور از هم نشان می‌دهند که این پیش شرط استفاده از زمین آمار می‌باشد. مقادیر نیم‌تغییرنمای تجربی نشان دهنده درجه تفاوت بین مقدار نمونه و مقادیر داده‌های اطراف آن است. محاسبه تغییرنا اولین گام در بررسی تغییرات مکانی متغیر است. جهت محاسبه تغییرنا از فرمول (۴) به شرح زیر استفاده

گردید:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (4)$$

که در آن: $\gamma(h)$: از مقدار نیم تغییرنما، $N(h)$: تعداد زوج نقاط، $z(x_i)$: مقدار مشاهده‌های متغیر x در موقعیت i ، $z(x_i + h)$: مقدار مشاهده‌های متغیر در فاصله h از x_i می‌باشند. در گام بعدی برازش مناسب‌ترین مدل تئوری به تغییرنمای تجربی می‌باشد. که این انتخاب این مدل توسط محاسبه حداقل مجموع مربع انحرافات و بیشینه ضرایب تعیین و محاسبه حداکثر احتمال می‌باشد. محاسبه وزن حداقل مجموع مربع انحرافات رایج‌ترین تکنیک مورد استفاده است. مدل برازش داده شده، اطلاعاتی درباره ساختار مکانی داده‌ها را برای پهنه‌بندی توسط تخمین‌گر کریجینگ می‌دهد. کریجینگ تخمین‌گری است که بر منطق میانگین وزنی استوار می‌باشد. این تخمین‌گر بهترین تخمین‌گر نارایب^۱ است.

آزمون اعتبارسنجی داده‌ها

به منظور ارزیابی و مقایسه بین داده‌های برآورد شده هدایت اکتريکی با روش‌های مختلف و داده‌های هدایت اکتريکی اندازه‌گیری ده از معیارهای مجذور میانگین مربعات باقیمانده^۲ و میانگین ارببی خطا^۳ استفاده شد که این معیارها با فاصله یافتن از صفر، کمی دقت و یا زیاد بودن انحراف را نشان می‌دهد (Webster & Oliver, 2007).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}(x_i) - Z(x_i))^2} \quad (5)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)) \quad (6)$$

نتایج و بحث

خلاصه آماری خصوصیات خاک منطقه مورد مطالعه

پارامترهای آماری برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه، در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول نتایج تجزیه آماری شامل معیارهای مرکزی داده‌ها (میانگین، میانه)، پارامترهای مربوط به نحوه توزیع داده‌ها (واریانس و انحراف معیار) و پارامترهای شکل توزیع (چولگی، کشیدگی و ضریب تغییرات) ویژگی‌های مورد بررسی ارائه شده است. باتوجه به نتایج میانگین EC_e ، PH_e و SAR به ترتیب برابر با ۲۰/۹۵ دسی زیمنس بر متر، ۷/۷۴ و ۱۰/۵۰ بود (جدول ۳) که بر این اساس خاک منطقه مورد مطالعه در محدوده خاک‌های شور قرار می‌گیرد (Hamman & Mohamed, 2020). میانگین درصد رس، سیلت و شن خاک به ترتیب برابر ۵۲/۲، ۳۲/۵ و ۱۴/۱ درصد است که نشان می‌دهد که خاک منطقه، دارای بافت سنگین با مقدار زیاد رس است، که شرایط مناسبی را برای تجمع املاح محلول و شور شدن خاک ایجاد می‌کند. جابر و ژائو (Jabbar & Zhou, 2012) در بررسی شوری اراضی آبرفتی اطراف رودخانه دجله در استان بصره عراق گزارش کردند که وجود بافت رسی سنگین در این مناطق باعث تشدید شوری خاک شده است. بیشترین میزان ضریب تغییرات در بین پارامترهای اندازه‌گیری شده مربوط به EC_e خاک به میزان ۶۹ درصد است (جدول ۳)، که تغییرات زیاد شوری خاک را نشان می‌دهد، که احتمالاً، می‌تواند به دلیل توپوگرافی منطقه و وجود پستی و بلندی‌هایی کوچک در سطح منطقه باشد که باعث ایجاد شرایط ماندابی برای آب باران یا آب حاصل از آبیاری رودخانه دجله شده و از طرفی تبخیر زیاد در این منطقه، سبب تجمع نمک در این قسمت‌ها می‌شود و این امر موجب بالا بودن ضریب تغییرات شوری خاک شده است.

1- Unbias Estimator

2- Root Mean Square Error (RMSE)

3 -Mean Bias Error (MBE)

جدول ۳- تجزیه آماری برخی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه

Table 3- Statistical analysis of selected physical and chemical soil parameters in the study area

نسبت سدیم جذب	منیزیم Mg	کلسیم Ca	سدیم Na	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی ECe	خلاصه آماری
3.4	5.7	7.3	8.3	1	19.3	35.7	7.2	11.1	حداقل Min
15.1	40.7	60	107.9	33	45.3	69.1	8.2	38.4	حداکثر Max
10.5	21.3	24.9	56.2	14.1	32.5	52.2	7.7	20.9	میانگین Mean
9.1	23.7	27.1	53.3	14.3	33.3	53.4	7.1	18.3	میانه Median
-0.3	-0.1	-0.05	0.2	0.7	-0.3	-0.1	-0.001	1	چولگی Skewness
-0.4	-0.01	-0.6	-0.5	0.1	-0.4	-0.03	-0.2	0.2	کشیدگی Kurtosis
44.1	59.9	5.9	0.1	56.7	44.1	59.1	0.05	13.4	واریانس Variance
6.6	7.7	2.4	0.2	7.5	6.6	7.7	0.2	3.7	انحراف معیار Std.Dev
20	15	9	39	50	20	15	3	69	ضریب تغییرات CV

یاهییو و همکاران (Yahiaoui, Douaoui, Zhang & Ziane, 2015) در بررسی تغییرات شوری خاک در دشت چلیف کشور الجزایر گزارش دادند، که ارتباط مستقیمی بین شوری خاک و پستی و بلندی‌های کوچک سطح منطقه وجود دارد.

نقشه‌های شوری خاک، به‌دست آمده از پردازش اطلاعات طیفی ماهواره لندست

جهت تهیه نقشه‌های شوری خاک با استفاده از اطلاعات طیفی ماهواره لندست در سه حالت طیفی مختلف (DN، radiance و reflectance)، از روش رگرسیون گام به گام استفاده شد. با توجه به معادله خط (جدول ۴) به‌دست آمده، میزان EC برآورد شد و برای ترسیم نقشه‌های شوری مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۴- معادلات رگرسیونی تخمین EC خاک با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره لندست

Table 4- Regression equations for estimating soil EC using Landsat satellite imagery data

حالت طیفی Spectral mode	پارامتر Parameter	معادله خط Equation
DN	EC	$EC = (0.029 \times B1) - (11121.87 \times PD322) - 251.84$
Radiance	EC	$EC = (2.6 \times B1) - (1860 \times PD322) - 490.80$
Reflectance	EC	$EC = (776.5 \times B1) - (460.14 \times PD322) - 113.27$

نقشه شوری خاک، به‌دست آمده از اطلاعات ماهواره لندست در حالت طیفی DN

نقشه پراکنش شوری خاک، تهیه شده از اطلاعات طیفی ماهواره لندست در حالت طیفی DN در شکل ۲ ارائه شده است. در نقشه حاصل (شکل ۲- الف) نقاط روشن دارای EC زیاد ($EC > 30.82 \text{ dS/m}$) و نقاط تیره دارای EC کم ($EC < 11.25 \text{ dS/m}$) است. دامنه EC برآورد شده به وسیله تصاویر ماهواره لندست در حالت DN بین ۱۱/۲۵ تا ۸۴/۱۸ دسی‌زیمنس بر متر است که این محدوده بزرگ‌تر از دامنه EC_e اندازه‌گیری شده در سطح منطقه ($11.05 - 38.40 \text{ dS/m}$) است (جدول ۳).

بر این اساس بیشتر نقاط روشن که دارای شوری بیشتری است، در نواحی مرکزی و شمالی منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود و نقاط تیره که دارای شوری کمتری است در نواحی جنوبی منطقه مشاهده می‌شود، که نشان دهنده شورت‌تر بودن نیمه شمالی منطقه (نزدیک به رودخانه دجله) نسبت به نیمه جنوبی است. احتمالاً آبیاری بیشتر مناطق نزدیک به رودخانه دجله با آب

شور رودخانه ($EC_w = 4 \text{ dS/m}$) باعث شورتر شدن این نواحی شده است. مویل و حسین (Moyel & Hussain, 2015) گزارش کردند که EC در آب رودخانه دجله بیشتر از ۳ دسی‌زیمنس بر متر است که باعث شور شدن اراضی تحت آبیاری این رودخانه شده است.

در مرکز عراق، عمق سطح آب زیرزمینی از ۱۵۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر متغیر است، و شوری آب‌های زیرزمینی این منطقه، بین ۸ تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر است. در جنوب عراق، تفاوت در عمق سطح آب زیرزمینی، باعث ایجاد شوری‌های متفاوتی در اراضی آبی اطراف رودخانه دجله شده است (Qureshi, Ahmad & Ahmad, 2013). الجبوری (Al-Jeboory, 1987) در تحقیقی روی شوری اراضی مرکز عراق گزارش داد، که هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در خاک‌های غیر کشاورزی در عمق ۲۰ سانتی‌متری فوقانی خاک بسیار زیاد بود، که علت این شوری زیاد خاک به دلیل آب‌های زیرزمینی شور و شرایط دمایی بالا منطقه نسبت داده شد. عباس (Abbas, 2010) بیان داشت که میزان شوری اراضی اطراف رودخانه دجله با افزایش فاصله از این رودخانه کاهش می‌یابد، این محقق دلیل این شورتر بودن اراضی نزدیک رودخانه را به دلیل استفاده زیاد از آب شور رودخانه گزارش نموده است. بر این اساس مناطق نزدیک رودخانه دجله به دلیل شوری زیاد برای تولید محصولات کشاورزی مناسب نیست.

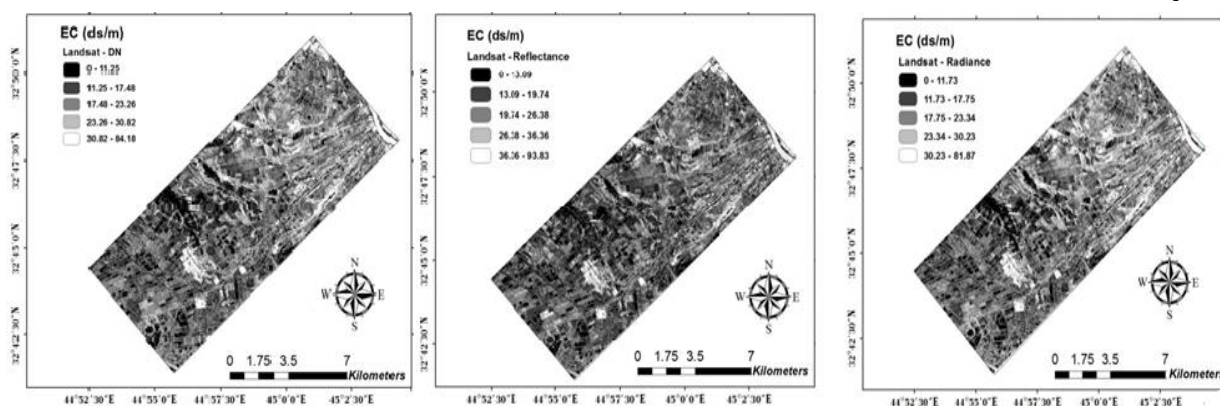
نقشه شوری خاک، به دست آمده از اطلاعات ماهواره لندست در حالت طیفی reflectance

نقشه شوری به دست آمده از EC برآورد شده از اطلاعات طیفی ماهواره لندست در حالت reflectance در شکل ۲-ب ارائه شده است. در این نقشه، بیشترین میزان EC ($EC > 36.36 \text{ dS/m}$) به صورت نقاط روشن نمایش داده شده است که بیشتر در نواحی شمالی و مرکزی منطقه، نزدیک به رودخانه دجله مشاهده شد و کمترین میزان شوری ($EC < 13.09 \text{ dS/m}$) در نواحی جنوبی منطقه دور از رودخانه دجله مشاهده شد. دامنه EC برآورد شده به وسیله تصاویر ماهواره لندست در حالت reflectance بین ۱۳/۰۹ تا ۹۳/۸۳ دسی‌زیمنس بر متر است (شکل ۲-ب)، که این دامنه نیز بیشتر از دامنه EC برآورد شده در حالت DN (11.25 DN) (84.18 dS/m) است (شکل ۲-الف). بر این اساس دامنه EC برآورد شده در حالت reflectance نسبت به حالت DN حدود ۸ درصد افزایش پیدا کرده است و اعداد بزرگتری را نشان می‌دهد، این اختلاف، گویای این مطلب است که با تبدیل حالت DN به reflectance موقعیت هندسی خورشید نسبت به سنجده مورد نظر (ارتفاع خورشید، زاویه تابش خورشید، شیب زمین و پستی و بلندی سطح منطقه) تغییر کرده، که این تغییر موقعیت، باعث شده تا ماهواره لندست ارزش رقومی بزرگتری را در هر پیکسل ثبت کند. اگر چه میزان انرژی الکترومغناطیسی ثبت شده از یک پدیده مشخص، توسط سنجده مورد نظر در حالت‌های طیفی مختلف (reflectance و DN) باید برابر باشد، ولی در آمیختگی طیفی باعث می‌شود که حتی پدیده‌های با ظاهر یکسان، بازتاب طیفی متفاوتی داشته باشند (Alavipanah, 2006). دشام و همکاران (Deschamps, Herman & Tanre, 1983) گزارش کردند که میزان DN و reflectance ثبت شده از سطح جسم برابر نیست، که علت را تغییر موقعیت هندسی خورشید نسبت به ماهواره بیان داشتند که سبب شده تا ارزش رقومی متفاوتی در هر پیکسل ثبت شود. الهارتی و همکاران (El Harti et al., 2016) در بررسی زمانی شوری خاک در دشت تادلا^۱، مراکش گزارش کردند که تبدیل طیفی تصاویر ماهواره لندست از DN به reflectance باعث افزایش دقت در تخمین شوری خاک شد.

نقشه شوری خاک، به دست آمده از اطلاعات ماهواره لندست در حالت طیفی radiance

با توجه به نقشه شوری تهیه شده از EC برآورد شده از اطلاعات طیفی تصاویر ماهواره لندست در حالت radiance (شکل ۲-ج) بیشترین شوری برآورد شده دارای EC بیشتر از ۳۰/۲۳ دسی‌زیمنس بر متر است که در شکل به صورت نقاط روشن نشان داده شده است و در نقاط شمالی و مرکزی منطقه مورد مطالعه نسبت به نقاط جنوبی بیشتر مشاهده می‌شود و کمترین میزان شوری برآورد شده دارای EC کمتر از ۱۱/۷۳ دسی‌زیمنس بر متر است (رنگ تیره) که در نواحی جنوبی منطقه بیشتر مشاهده می‌شود.

دامنه EC برآورد شده به وسیله تصاویر ماهواره لندست در حالت طیفی radiance بین ۱۱/۷۳ تا ۸۱/۸۷ دسی‌زیمنس بر متر است (شکل ۲-ج) که نسبت به دو حالت DN (شکل ۲-الف) و reflectance (شکل ۲-ب) دارای EC برآورد شده کمتری است. کمترین بودن EC برآورد شده در حالت radiance نسبت به دو حالت reflectance و DN نشان می‌دهد که این تغییر حالت سبب شده ماهواره لندست ارزش رقومی کمتری را در هر پیکسل ثبت کند، که این دامنه (Landsat - radiance) به داده‌های اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر بود. radiance مقدار انرژی الکترومغناطیسی است، که از زمین به ماهواره می‌رسد، در واقع مقدار انرژی است که در واحد سطح به ازای زاویه فضایی ثبت شده است (Hajizadeh et al., 2013). این احتمال وجود دارد که با توجه به این که سطح منطقه، دارای پستی و بلندی‌های کوچکی است، سبب شده تا نمک در نقاط پست تجمع پیدا کند و نقاط روشنی را به صورت پراکنده ایجاد کند، وجود پستی و بلندی‌های منطقه در رؤیت این نقاط تأثیرگذار است و حالت radiance که مقدار انرژی ثبت شده در واحد سطح به ازای زاویه فضایی است، با تغییر در زاویه انعکاس سبب شده تا EC برآورد شده در این حالت طیفی به مقدار واقعی نزدیک‌تر باشد.



شکل ۲- نقشه شوری برآورد شده به وسیله اطلاعات ماهواره لندست در حالت‌های طیفی الف- DN، ب- reflectance، ج- radiance

Fig. 2. Soil salinity map estimated from Landsat data in spectral modes: (a) DN, (b) reflectance, (c) radiance

نقشه‌های شوری خاک، به‌دست آمده از پردازش اطلاعات ماهواره استر

جهت تهیه نقشه‌های شوری خاک از اطلاعات طیفی ماهواره استر در سه حالت طیفی مختلف (DN، radiance و reflectance)، بعد از محاسبه شاخص‌های شوری، بین این شاخص‌ها و باندهای یک تا ۳ از ماهواره استر رگرسیون خطی گام به گام برازش داده شد و با توجه به معادله خط به‌دست آمده (جدول ۵)، میزان EC تخمین زده شد و برای ترسیم نقشه‌های شوری مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۵- معادلات محاسبه EC خاک با استفاده از اطلاعات تصاویر ماهواره استر

Table 5- Equations for calculating soil EC using ASTER satellite imagery data

حالت طیفی Spectral mode	معادله خط Equation
DN	$EC = (-0.604 \times B2) + 66.63$
Radiance	$EC = (-0.34 \times BI) + 68.51$
Reflectance	$EC = (-61.14 \times NDVI) + 13.16$

نقشه شوری خاک، به دست آمده از اطلاعات ماهواره استر در حالت طیفی DN

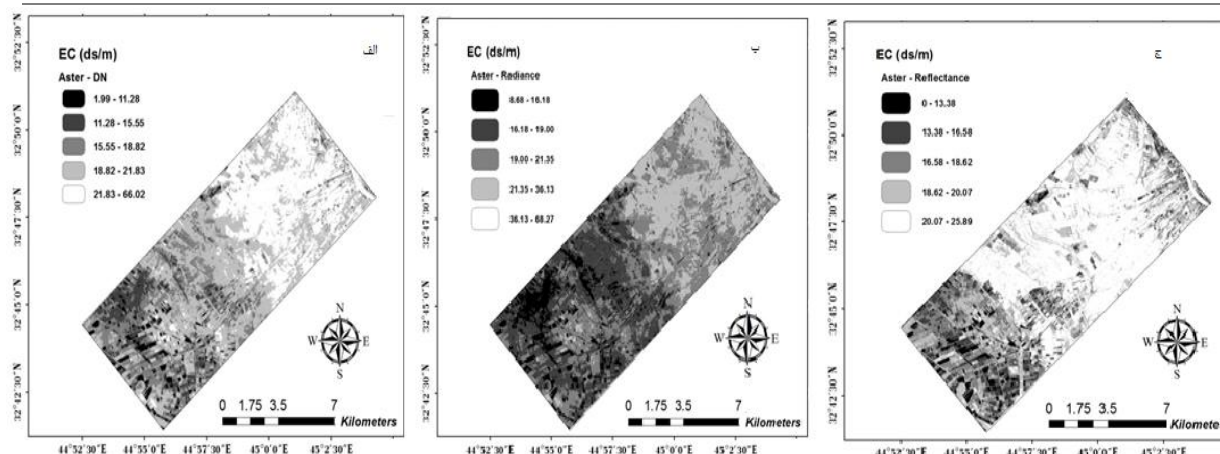
نقشه پراکنش شوری خاک، تهیه شده از EC محاسبه شده از اطلاعات طیفی ماهواره استر در حالت طیفی DN در شکل ۳- الف ارائه شده است. با توجه به این نقشه بیشترین EC برآورد شده $66/02$ دسی‌زیمنس بر متر است که به صورت نقاط سفید، بیشتر در نیمه شمالی منطقه، گسترش دارد و کمترین میزان EC برآورد شده $1/99$ دسی‌زیمنس بر متر است که به صورت نقاط تیره در نیمه جنوبی منطقه دیده می‌شود. دامنه EC به دست آمده از تصاویر ماهواره استر ($66/02 - 1/99$) از دامنه EC اندازه‌گیری شده از سطح منطقه مورد مطالعه ($39 - 11$ دسی‌زیمنس بر متر) گسترده‌تر است. همچنین، محدوده EC برآورد شده توسط ماهواره استر (شکل ۳- الف) در حالت DN کمتر از محدوده EC محاسبه شده به وسیله ماهواره لندست ($84 - 0$ دسی‌زیمنس بر متر) در حالت DN است. دامنه EC برآورد شده در حالت DN ماهواره استر نسبت به EC برآورد شده از حالت DN ماهواره لندست به داده‌ای واقعی نزدیک‌تر است که نشان دهنده بیشتر بودن دقت تصاویر ماهواره استر نسبت به ماهواره لندست در تخمین شوری سطح خاک در این مطالعه است. روند تغییرات شوری برآورد شده با ماهواره استر با روند تغییرات شوری برآورد شده به وسیله ماهواره لندست کاملاً همخوانی داشت.

نقشه شوری خاک، به دست آمده از اطلاعات ماهواره استر در حالت طیفی radiance

با توجه به شکل ۳- ب مربوط به EC برآورد شده از تصاویر ماهواره استر در حالت طیفی radiance، بیشترین شوری برآورد شده $67/27$ دسی‌زیمنس بر متر بود که به صورت نقاط روشن، بیشتر در نواحی نیمه شمالی منطقه، پراکنش داشت و کمترین EC برآورد شده $8/68$ دسی‌زیمنس بر متر بود که به صورت نقاط تیره، در نیمه جنوبی پراکنده بود. دامنه EC برآورد شده از تصاویر ماهواره استر در حالت radiance (شکل ۳- ب) کمتر از دامنه EC برآورد شده به وسیله تصاویر ماهواره لندست در حالت radiance (شکل ۲- ج) بود، ولی در مقایسه با حالت DN ماهواره استر (شکل ۳- الف) EC‌های بزرگتری را برآورد کرده بود. بیشتر شدن دامنه EC برآورد شده، توسط ماهواره استر با تغییر حالت از DN به radiance نشان دهنده افزایش ارزش رقمی ثبت شده در حالت radiance است. علوی‌پناه و همکاران (Alavipannah, Matinfar, Sarmasti, Jafarbeglou & Goodarzimehr, 2011) ارزیابی ماهواره استر در شناسایی شوری خاک گزارش کردند که تغییر حالت طیفی تصاویر این ماهواره از DN به radiance باعث افزایش دقت نقشه‌های تولیدی شد.

نقشه شوری خاک، به دست آمده از اطلاعات ماهواره استر در حالت طیفی reflectance

نقشه شوری برآورد شده از تصاویر ماهواره استر در حالت reflectance در شکل ۳- ج نمایش داده شده است، بر اساس این شکل بیشترین EC برآورد شده $25/89$ دسی‌زیمنس بر متر بود که به صورت نقاط روشن بیشتر در نیمه شمالی منطقه وجود داشت. کمترین EC برآورد شده کمتر از $13/38$ دسی‌زیمنس بر متر بود، که به صورت نقاط تیره، بیشتر در نیمه جنوبی منطقه مشاهده شد. دامنه EC برآورد شده از حالت reflectance تصاویر ماهواره استر ($EC = 0 - 25.89$ dS/m) نسبت به تمام سه حالت مختلف تصاویر ماهواره لندست (شکل ۲) و دو حالت DN و radiance ماهواره استر (شکل ۳) کمتر بود. بر اساس دامنه EC برآورد شده به دامنه EC اندازه‌گیری شده در میان سه حالت طیفی مختلف ماهواره استر و ماهواره لندست حالت طیفی reflectance ماهواره استر بهترین حالت برای برآورد شوری خاک منطقه مورد مطالعه به روش سنجش از دور است. پیکارزیک و همکاران (Piekarczyk, Kaźmierowski & Krolewicz, 2012) در بررسی ارتباط خصوصیات سطحی مزارع استان لوبوکسی، لهستان با خصوصیات طیفی بازتابی ماهواره استر بیان داشتند، که حالت طیفی reflectance دارای همبستگی بیشتری با داده‌های برداشت شده از سطح منطقه نسبت به دو حالت DN و radiance داشت.

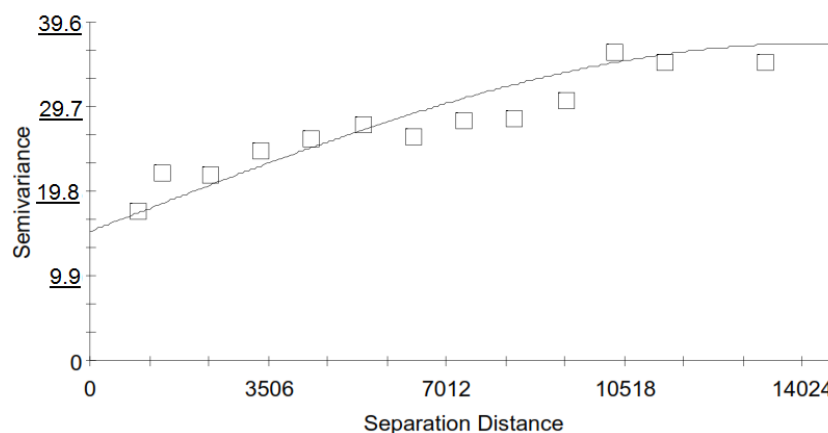


شکل ۳- نقشه شوری خاک، برآورد شده از اطلاعات طیفی ماهواره استر در حالت الف- DN، ب- radiance، ج- reflectance

Fig. 3. Soil salinity map estimated from ASTER spectral data in modes: (a) DN, (b) radiance, (c) reflectance.

نقشه شوری خاک، به روش زمین آمار

به منظور تشریح پیوستگی مکانی شوری در منطقه از آنالیز واریوگرام استفاده شد. مناسب‌ترین مدل واریوگرام برای میزان شوری مدل کروی به‌دست آمد. این مدل نشان می‌دهد که بخش ساختاردار واریوگرام شوری (C) بر بخش تصادفی (اثر قطعه‌ای C0) غلبه دارد. نسبت اثر قطعه‌ای (۱۳/۵) به آستانه (۳۷/۵) برابر با ۰/۳۶ به‌دست آمد که نشان می‌دهد تنها ۳۶ درصد از تغییرات واریانس از نوع تصادفی است و ۶۴ درصد از تغییرات شوری در منطقه ساختاردار است که حاکی از پیوستگی مکانی شوری در منطقه است و نشان می‌دهد که تراکم نمونه‌برداری برای استفاده از روش کریجینگ مناسب است و می‌تواند بخش غالب تغییرات شوری در منطقه را آشکار نماید (شکل ۴).

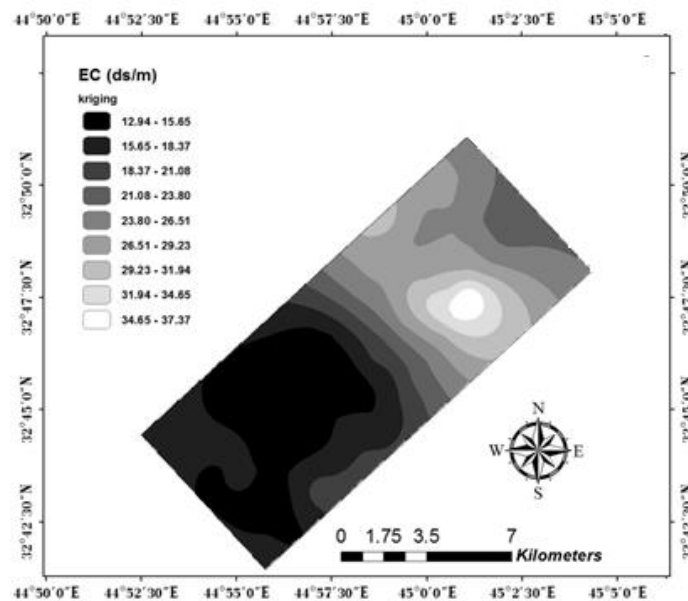


شکل ۴- تغییرنمای همه جهته مقادیر هدایت الکتریکی

Fig. 4. Three-dimensional variation of electrical conductivity values

با استفاده از نتایج واریوگرام، کریجینگ نقشه میان‌یابی شوری را در سطح منطقه، ارائه نمود (شکل ۵). با توجه به این شکل، بیشترین EC خاک ۳۷/۳۷ دسی‌زیمنس بر متر بود، که به رنگ سفید در نیمه شمالی منطقه نزدیک به رودخانه دجله مشاهده شد و کمترین مقدار EC ۱۲/۹۴ دسی‌زیمنس بر متر بود، که به رنگ سیاه در نیمه جنوبی منطقه وجود داشت. شورتر بودن اراضی نزدیک به رودخانه دجله احتمالاً به دلیل آبیاری طولانی مدت با آب شور رودخانه دجله (۴ دسی‌زیمنس بر متر) و تبخیر زیاد این

منطقه و از طرفی نزدیک بودن عمق آب زیرزمینی (۲ متر) به سطح خاک، موجب شده تا نمک در سطح خاک تجمع پیدا کند و باعث شورتر شدن این قسمت از منطقه مورد مطالعه شود. از طرف دیگر در اراضی جنوبی منطقه از سال ۲۰۰۰ میلادی سیستم زهکشی سطحی اجرا شده است، که باعث کاهش شوری این منطقه شده است. الفلاحی (2011, Alfalahi) در بررسی شوری اراضی اطراف رودخانه دجله گزارش کردند، عمق آب زیرزمینی در اراضی مرتعی اطراف رودخانه ۲ متر و در اراضی کشاورزی بین ۹۰ تا ۱۳۰ سانتی متر است، که بالا بودن عمق آب زیرزمینی یکی از دلایل شور شدن این اراضی گزارش شد.



شکل ۵- نقشه پراکنش EC خاک، به روش زمین آمار

Fig. 5. Spatial distribution map of soil EC using geostatistical methods

اعتبار سنجی بین نقشه‌های تهیه شده به روش‌های مختلف

بر اساس شاخص‌های اعتبارسنجی میانگین خطای انحراف^۱ (MBE) و ریشه دوم میانگین مربع خطا برای دو حالت DN و radiance برای لندست تفاوتی وجود ندارد ولی در حالت reflectance دارای خطای انحراف (MBE) کمتر (۱/۲۴-) و همچنین RMSE کمتری (۴/۵۸) نسبت به دو حالت طیفی دیگر است که می‌توان نتیجه گرفت که نقشه شوری خاک، تهیه شده به وسیله حالت reflectance ماهواره لندست از دقت بیشتری برخوردار است. یوکسل و همکاران (2008, Yüksel, Akay & Gundogan) در تبدیل تصاویر ماهواره‌ای از radiance به reflectance به این نتیجه رسیدند که این تبدیل طیفی باعث افزایش دقت و صحت اطلاعات برآورد شده از این تصاویر شد.

نتایج اعتبارسنجی EC محاسبه شده در سه حالت طیفی مختلف از تصاویر ماهواره استر (جدول ۶) نشان داد که کمترین مقدار (اختلاف از صفر) MBE در حالت طیفی DN (۱-) مشاهده شد. مقدار MBE دو حالت radiance و reflectance تقریباً برابر بودند و مقدار شاخص RMSE تقریباً برای تمام حالت‌های طیفی مختلف، مقدار ۱۶ بود. با توجه به نتایج اعتبارسنجی حالت‌های مختلف استر اختلاف چندانی دیده نمی‌شود. اعتبارسنجی روش طبقه‌بندی نظارت شده اگرچه نشان از بالاتر رفتن دقت مدل‌ها داشت ولی این افزایش چندان زیاد نبود.

1- Mean Bias Error

با مقایسه پارامترهای اعتبارسنجی، نقشه‌های تهیه شده به روش سنجش از دور (لندست و استر) و روش زمین آمار (کریجینگ) (جدول ۶) متوجه می‌شویم که در میان نقشه‌های EC به‌دست آمده روش زمین آمار دارای کمترین MBE و RMSE است، که نشان دهنده حداقل اختلاف بین EC برآورد شده به وسیله این روش با EC اندازه‌گیری شده است و در نتیجه دارای بیشترین دقت در تهیه نقشه شوری خاک است.

جدول ۶- اعتبارسنجی حالت‌های مختلف طیفی ماهواره لندست و استر در تخمین ECe

Table 6- Validation of different spectral modes of Landsat and ASTER satellites in estimating ECe

Index	DN		Radiance		Reflectance		Kriging
	Landsat	Aster	Landsat	Aster	Landsat	Aster	
MBE	-1.38	-1.00	-1.41	-1.38	-1.24	-1.56	-0.06
RMSE	17	15.87	15.14	16.03	4.58	16.07	3.53

روش زمین آمار دارای دقت بیشتری برای تهیه نقشه‌های شوری خاک منطقه مورد نظر بوده است. احتمالاً تنوع کاربری در منطقه مورد نظر سبب شده تا گوناگونی طیفی در سطح منطقه، افزایش یابد و باعث افزایش خطا در تهیه نقشه شوری شود. علاوه بر این، در تهیه نقشه‌های زمین آمار، ما از اطلاعات اندازه‌گیری شده استفاده می‌کنیم که باعث می‌شود تا دقت نقشه‌های تهیه شده از این روش نسبت به روش سنجش از دور بیشتر باشد. الدری و گارسیا (Eldeiry & Garcia, 2010) در مقایسه روش‌های مختلف زمین آمار شامل کریجینگ معمولی، کریجینگ رگرسیون و کوکرجنگ به همراه روش سنجش از دور (لندست) جهت تخمین شوری در حوزه رودخانه آرکانزاس، کلرادو، گزارش کردند که در بین روش‌های مورد استفاده روش کریجینگ معمولی بهترین عملکرد در تهیه نقشه شوری خاک نشان داد. تاجگردون و همکاران (Tajgardan, Ayoubi, Shataee & Sahrawat, 2010) در بررسی شوری اراضی استان گلستان، ایران به وسیله تصاویر ماهواره استر و مقایسه آن با روش‌های زمین آمار، گزارش کردند که از میان روش‌های مختلف زمین آمار و سنجش از دور (ماهواره استر) روش کریجینگ، رگرسیون دارای بیشترین دقت در تهیه نقشه‌های شوری خاک بود. والرم (Wallerman, 2003) نشان داد که مدل‌های زمین آماری در مقیاس‌های محلی و مساحت‌های کم نسبت به روش‌های سنجش از دوری نتایج بهتری در تخمین خصوصیات خاک دارند. به طور کلی در روش زمین آمار، هرگاه مؤلفه ساختاردار ویژگی مورد بررسی بر اثر قطعه‌ای غالب باشد دقت روش زمین آمار بالا خواهد بود که این امر وابستگی مستقیمی به وسعت منطقه مطالعاتی و فاصله بین نقاط نمونه‌برداری دارد (Mahmoudabadi & Karimi, 2015). این مطالعه، نشان داد در مقیاس مورد بررسی روش کریجینگ نسبت به تمامی روش‌های مختلف سنجش از دوری و حالت‌های مختلف اطلاعاتی دو ماهواره استر و لندست از نظر دقت و صحت تولید نقشه شوری ارجحیت دارند.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی وضعیت شوری خاک در منطقه‌ای به وسعت ۱۰ هزار هکتار از اراضی آبرفتی رودخانه دجله، که دارای کاربری کشاورزی بود، صورت گرفت. برای این منظور از روش‌های سنجش از دور و زمین آمار استفاده شد، که در روش سنجش از دور از اطلاعات دو ماهواره استر و لندست، در سه حالت طیفی radiance، reflectance و DN استفاده شد و برای روش زمین آمار از روش کریجینگ استفاده شد.

نتایج به‌دست آمده از کلیه نقشه‌های شوری تهیه شده از روش سنجش از دور، به وسیله ماهواره‌های لندست و استر در حالت‌های مختلف طیفی نشان داد، که نیمه جنوبی منطقه مورد مطالعه نسبت به نیمه شمالی منطقه که نزدیک به رودخانه دجله بود دارای شوری کمتری بود. نقشه‌های به دست آمده از روش سنجش از دور با نتایج به دست آمده از نقشه شوری به دست آمده از روش زمین آمار، تقریباً پراکنش یکسانی نشان دادند به طوری که قسمت جنوبی منطقه، نسبت به شمال منطقه، دارای شوری کمتری در تمام روش‌ها بود، که این امر با واقعیت منطقه نیز تطابق داشت.

قسمت‌های جنوبی منطقه مطالعاتی از سال ۲۰۰۰ تحت عملیات زهکشی سطحی قرار گرفته است، که باعث کاهش شوری خاک این منطقه شده است و نیمه شمالی منطقه مورد مطالعه که در مجاورت رودخانه دجله قرار دارد به دلیل آبیاری طولانی مدت با آب شور رودخانه دجله (۴ دسی‌زیمنس بر متر) و عدم زهکشی همچنان شوری آن بیشتر است. مقایسه انجام شده در این تحقیق بین روش زمین آمار و سنجش از دور در تهیه نقشه شوری نشان داد، که روش زمین آمار (کریجینگ) دارای دقت بیشتری در تهیه نقشه شوری خاک بود، احتمالاً به دلیل استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در روش زمین آمار، برای تهیه نقشه شوری خاک دقت نقشه‌های تولیدی را بالا برده است. روش سنجش از دور اگر چه نسبت به روش زمین آمار، به دلیل نمونه‌برداری کمتر، به صرفه‌تر است و همچنین به دلیل بررسی پیکسل به پیکسل منطقه مورد مطالعه، نسبت به روش زمین آمار از قدرت تفکیک بالاتری برخوردار است. ولی این امکان وجود دارد، که به دلیل وجود خطاهای طیفی در تصاویر ماهواره‌ای، میزان شوری که از منطقه برآورد می‌شود با مقدار واقعی خیلی اختلاف داشته باشد، این در صورتی است که این خطا در روش زمین آمار کمتر وجود دارد.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد کمال تشکر و قدردانی را دارند (کد طرح ۴۷۶۴۴).

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

References

- Abbas, A. H. (2010). *Units of North Kut Project and Prediction of Some Soil Physical Properties by Using GIS and Remote Sensing*. (PhD Thesis), College of Agriculture at University of Baghdad.
- Abdulraheem, M. I., Zhang, W., Li, S., Moshayedi, A. J., Farooque, A. A., & Hu, J. (2023). Advancement of remote sensing for soil measurements and applications: A comprehensive review. *Sustainability*, 15(21), 15444. <https://doi.org/10.3390/su152115444>
- Alavi Panah, S. K. (2006). *Application of remote sensing in earth sciences*. Tehran: Tehran University Press. [in Persian]
- Alavipanah, S. K., Matinfar, H. R., Sarmasti, N., Jafarbeglou, M., & Goodarzimehr, S. (2011). Evaluation of ASTER and LISS III data in identification of saline soils, case study: regions of Iran. *Geocomputation, London, UK*, 20-22.
- Alfalahi, A. A., Qureshi, A. S., & Wu, W. (2015). Understanding the linkages between groundwater table depth, groundwater quality, soil salinity and crop production in Al-Musaib and Al-Dujaila Project areas of Iraq. <https://hdl.handle.net/20.500.11766/8844>
- Al-Jeboory, S. R. J. (1987). *Effect of soil management practice on chemical and physical properties of soil from Great Musaib projects*. (PhD Thesis). University of Baghdad, College of Agriculture.
- Al-Senafy, M., & Abraham, J. (2004). Vulnerability of groundwater resources from agricultural activities in southern Kuwait. *Agricultural Water Management*, 64(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00195-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00195-1)
- Anderson, G. L., & Hanson, J. D. (1992). Evaluating hand-held radiometer derived vegetation indices for estimating above ground biomass. *Geocarto International*, 7(1), 71-78. <https://doi.org/10.1080/10106049209354354>

- Balasin, H., Al-Azzawi, M., & Rabee, A. (2013). Assessment of pollution with some heavy metals in water, sediments and Barbus xanthopterus fish of the Tigris River-Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 54(4), 813-822. <https://ijs.uobaghdad.edu.iq/index.php/eijs/article/view/12332>
- Deschamps, P. Y., Herman, M., & Tanre, D. (1983). Definitions of atmospheric radiance and transmittances in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 13(1), 89-92. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(83\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(83)90029-9)
- Eldeiry, A. A., & Garcia, L. A. (2010). Comparison of ordinary kriging, regression kriging, and cokriging techniques to estimate soil salinity using LANDSAT images. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(6), 355-364. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000208](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000208)
- El-Harti, A., Lhissou, R., Chokmani, K., Ouzemou, J. E., Hassouna, M., Bachaoui, E. M., & El Ghmari, A. (2016). Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 50, 64-73. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.03.008>
- Frenken, K. (2009). *Irrigation in the Middle East region in figures AQUASTAT Survey-2008*. Water Reports.
- Gao, J. A. (1996). Modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 82, 303-310.
- Hajizadeh, A., Nezam Mahalleh, M. A., Farzane, S., Rastegar, A., & Sydrzayy, H. (2013). *Intoduction to microwave remote sensing*. Satelite Publications. [in Persian]
- Hammam, A. A., & Mohamed, E. S. (2020). Mapping soil salinity in the East Nile Delta using several methodological approaches of salinity assessment. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(2), 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.11.002>
- Iraq, F. A. O. (2012). *Agriculture Sector Note*. FAO: Rome, Italy.
- Jabbar, M. T., & Zhou, J. (2012). Assessment of soil salinity risk on the agricultural area in Basrah Province, Iraq: Using remote sensing and GIS techniques. *Journal of Earth Science*, 23(6), 881-891. <https://doi.org/10.1007/s12583-012-0299-5>
- Kotenko, M. E., & Zubkova, T. A. (2008). The effect of the microrelief on salinization of semidesert soils. *Eurasian Soil Science*, 41, 1033-1040. <https://doi.org/10.1134/S1064229308100049>
- Mahmoudabadi, E., & Karimi, K. A. (2015). Mapping of calcium carbonate equivalent and clay content of surface soil using geostatistical methods (Case study: Chitgar park, Tehran). *Journal of RS and GIS for Natural Resource*, 3(6), 73-85. [in Persian] <https://sanad.iau.ir/journal/girs/Article/516799?jid=516799&lang=en>
- Mahmoodabadi, E., Karimi, A. R., Haghnia, G. H., & Sepehr, A. (2017a). Assessing Performance of Multivariate Linear Regression (MLR), artificial neural network (ANN) and Gene Expression Programming (GEP) in estimating soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(2), 23-44. [in Persian] <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.11811.2633>
- Mahmoudabadi, E., Karimi, A., Haghnia, G. H., & Sepehr, A. (2017b). Digital soil mapping using remote sensing indices, terrain attributes, and vegetation features in the rangelands of northeastern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6197-7>
- Moyel, M. S., & Hussain, N. A. (2015). Water quality assessment of the Shatt al-Arab river, Southern Iraq. *Journal of Coastal Life Medicine*, 3(6), 459-465. <https://doi.org/10.12980/JCLM.3.2015J5-26>
- Panagiotou, C. F., Kyriakidis, P., & Tziritis, E. (2022). Application of geostatistical methods to groundwater salinization problems: A review. *Journal of Hydrology*, 615, 128566. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128566>
- Pansu, M. (2006). *Handbook of soil analysis*. Springer.
- Piekarczyk, J., Kaźmierowski, C., & Krolewicz, S. (2012). Relationships between soil properties of the abandoned fields and spectral data derived from the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER). *Advances in Space Research*, 49(2), 280-291. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.010>
- Qureshi, A. S., Ahmad, W., & Ahmad, A. F. A. (2013). Optimum groundwater table depth and irrigation schedules for controlling soil salinity in central Iraq. *Irrigation and Drainage*, 62(4), 414-424. <https://doi.org/10.1002/ird.1746>
- Srivastava, P. K., Srivastava, S., Singh, P., Gupta, A., & Dugesar, V. (2025). Soil chemical properties estimation using hyperspectral remote sensing: A review. *Earth Observation for Monitoring and Modeling Land Use*, 25-43. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95193-7.00008-7>

- Sayler, K., & Zanter, K. (2024). *Landsat 7 Data Users Handbook*. USGS Landsat User Serv. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7-data-users-handbook>
- Tajgardan, T., Ayoubi, S., Shataee, S., & Sahrawat, K. L. (2010). Soil surface salinity prediction using ASTER data: Comparing statistical and geostatistical models. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(3), 457-467. <http://oar.icrisat.org/id/eprint/8342>
- USGS. (2024). <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>
- Wallerman, J. (2003). *Remote sensing aided spatial prediction of forest stem volume* (No. 271). (PhD Thesis), Swedish University of Agricultural Sciences. <https://pub.epsilon.slu.se/190/1/91-576-6505-2.fulltext.pdf>
- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons. <https://planninginsights.co.in/data/ebook/1622466729.pdf>
- Wiegand, C. L., Richardson, A. J., Escobar, D. E., & Gerbermann, A. H. (1991). Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*, 35(2-3), 105-119. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90004-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90004-P)
- Yahiaoui, I., Douaoui, A., Zhang, Q., & Ziane, A. (2015). Soil salinity prediction in the Lower Cheliff plain (Algeria) based on remote sensing and topographic feature analysis. *Journal of Arid Land*, 7, 794-805. <https://doi.org/10.1007/s40333-015-0053-9>
- Yale Center. (2022). <https://yceo.yale.edu/how-convert-landsat-dns-top-atmosphere-toa-reflectance>
- Yüksel, A., Akay, A. E., & Gundogan, R. (2008). Using ASTER imagery in land use/cover classification of eastern Mediterranean landscapes according to CORINE land cover project. *Sensors*, 8(2), 1237-1251. <https://doi.org/10.3390/s8021287>
- Zarco-Tejada, P. J., Ustin, S. L., & Whiting, M. L. (2005). Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*, 97(3), 641-653. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.0257>