



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

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

Morteza Akbari ⁴

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

² Professors, Department of Soil Science, 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:

Electrical Conductivity

Iraq

Satellite images

Sensors

ABSTRACT

Accurate assessment and delineation of soil salinity maps are essential for effective management and control of salinized lands. This study aimed to evaluate and map soil salinity in the Al-Suweera fields of Iraq using remote sensing and geostatistical techniques. Soil samples were collected from the topsoil layer across a 10,000-hectare area using a regular grid sampling method with 1,000-meter intervals. Electrical conductivity (EC) of the saturated paste extract was measured. Spectral bands and indices from ASTER and Landsat satellite imagery were processed in three spectral formats: digital number (DN), spectral radiance, and reflectance. Multiple linear regression was employed to establish relationships between the spectral indices and measured salinity values. Comparative analysis of the three spectral modes revealed that Landsat reflectance data provided the highest accuracy for salinity modeling (MBE = -1.24, RMSE = 4.58) among the remote sensing approaches. Furthermore, comparison between remote sensing and geostatistical methods showed that the geostatistical approach yielded superior accuracy (MBE = -0.06, RMSE = 3.53), attributed to its reliance on direct field measurements. Nonetheless, the remote sensing-derived salinity maps demonstrated acceptable accuracy and showed strong spatial agreement with the geostatistical maps.

* Corresponding author: Dr. 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 Using Remote Sensing and Geostatistical Methods in the Alluvial Plains of the Tigris River, Iraq. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoe.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 concern in arid and semi-arid regions, as it can negatively impact agricultural productivity and cause irreversible damage to soil. Accurate assessment of soil salinity is crucial for sustainable management and prevention of soil degradation. The Tigris alluvial plain in Iraq, an important region for crop productions, is particularly susceptible to soil salinity due to its arid climate and intensive irrigation for agriculture. Providing soil properties especially soil salinity can be used for managing the land and crop. Conventional mapping of soil and sampling are time-consuming, costly, and limited in spatial coverage. In recent years, remote sensing techniques provide an effective alternative for large-scale soil salinity mapping. The use of various spectral indices derived from satellite imagery allows for the detection of subtle changes in soil characteristics, such as soil moisture, salinity, organic matter, and texture. Geostatistics, such as kriging, is another method which offers a powerful tool for interpolating soil salinity data collected from field measurements. In recent years, numerous studies have evaluated the use of remote sensing and geostatistical methods for soil salinity mapping in different regions worldwide. However, each region has its unique characteristics that may affect the accuracy of these methods. The alluvial plain of the Tigris River in Iraq presents a unique challenge due to its specific soil properties, vegetation cover, and climate. Therefore, it is essential to evaluate the performance of these techniques in this region and identify the best approach for accurate assessment of soil salinity is thus imperative for the management and prevention of soil degradation in this region.

Material and Methods

The study was conducted in the alluvial plain of the Tigris River, in the Al-Suweera region in Alsouyreh region with a distance of 30 kilometer from Baghdad, Iraq.

Soil samples were collected using a grid sampling strategy with 1000 m distance, covering an area of 10000 ha at a depth of 0-20 cm. The collected soil samples were analyzed in the laboratory to determine the electrical conductivity (EC), pH, and sodium absorption ratio (SAR). Satellite images from the Aster and Landsat satellites were processed in three spectral modes: digital value (DN), radiance, and reflectance and then were applied to generated salinity map. The Kriging method as a geostatistics model was applied for interpolating and mapping of soil salinity, using the measured data. The estimated soil salinity maps were then compared with the measured values of soil salinity in the study area to assess the accuracy of the remote sensing and geostatistical methods. The accuracy assessment was performed using Mean Bias Error (MBE) and Root Mean Square Error (RMSE), which are commonly used metrics to evaluate the difference between estimated and known values.

Results and Discussion

The results showed that Landsat's radiance spectral mode and Aster's reflectance spectral mode were the most accurate for producing soil salinity maps. The geostatistical method, using the kriging technique, outperformed the remote sensing methods for preparing soil salinity maps. The validation results demonstrated a negative Mean Bias Error (MBE) for all remotely sensed and geostatistics methods, the lowest value (-0.06) obtained when the kriging method were applied. Additionally, kriging with the value of 3.53 yields the lowest RMSE. The results of Root Mean Square Error (RMSE) also showed a better performance of Landsat reflectance mode than all modes of Aster images. Interpolation of soil salinity using Kriging led to the most accurate maps due to the use of measured data in generating map in small area with enough taken samples. Comparison of maps generated from remote sensing data and geostatistical methods revealed almost similar salinity distribution patterns and there was a good agreement among them, demonstrating the effectiveness of remote sensing techniques which indicate the potential of remote sensing for large-scale soil salinity mapping.

The soil salinity maps generated using remote sensing and geostatistical methods both indicated lower salinity levels in the southern part of the study area compared to the northern part, which is closer to the

Tigris River. This finding aligns with the actual conditions in the region, where the southern area has undergone surface drainage since 2000, effectively reducing soil salinity. In contrast, the northern part of the study area has been subject to long-term irrigation with saline water from the Tigris River ($EC_w=4$ dS/m) and has no drainage system, resulting in persistently high salinity levels.

Conclusion

This study highlights the potential of remote sensing and geostatistical methods for mapping soil salinity in arid regions like the Tigris alluvial plain in Iraq. The findings suggest that geostatistical methods provide more accurate soil salinity maps, but remote sensing can provide valuable information at a larger scale. The produced map by both methods can provide valuable information for the management and monitoring of soil degradation in the region. The study also highlights the importance of effective drainage systems in preventing soil salinity buildup, particularly in regions where irrigation relies on salty 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 عصاره 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 بدست آمده در هر حالت طیفی و مقدار شوری بدست 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 (RMSE=4.58، MBE=-1.24) را در مدلسازی شوری خاک در بین روشهای سنجش از دوری داشت. مقایسه روش‌های سنجش از دور و زمین‌آمار نشان داد که روش زمین‌آمار بدلیل استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده دارای دقت بالاتری (RMSE=3.53، MBE=-0.06) نسبت به روش‌های سنجش از دوری بود اما همچنان نقشه‌های بدست آمده از روش سنجش از دور نیز دقت قابل قبول را دارا بودند و نقشه شوری بدست 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: تصاویر ماهواره‌ای هدایت الکتریکی سنجندها عراق	

مقدمه

زمین‌های زراعی الصویره در ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهر بغداد، و برروی اراضی دشت آبرفتی رودخانه دجله نقش بسزایی 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 کرده اند شناسایی و تهیه نقشه شوری خاک با دقت مناسب می‌تواند شناخت بهتری از اراضی و تاثیرات 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 زمین‌آماري 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 هوابرد 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 دیجیتالی (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 دیجیتالی (DN) مقادیر پیکسل خام هستند که مستقیماً از سنسورهای ماهواره ای 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 شده ای 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 دقیق تری در مورد خواص سطح ارائه می‌دهند، اما نیاز به پردازش پیچیده تری 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 موثرترین رویکرد در برآورد شوری خاک منطقه ارائه گردید.

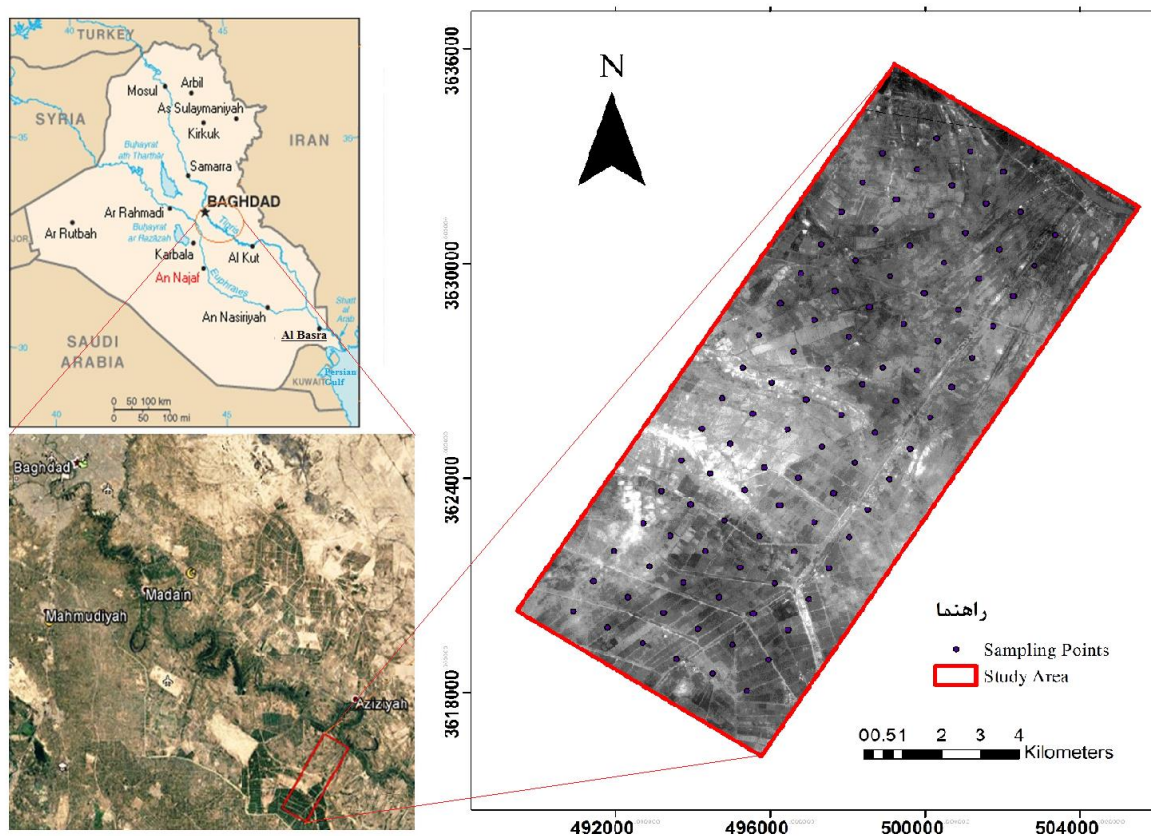
منطقه مورد مطالعه

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 $44^{\circ}53'43''/44''$ تا $45^{\circ}2'55''/41''$ شرقی و عرض جغرافیایی $32^{\circ}41'33''/76''$ و $32^{\circ}51'0''/67''$ شمالی مورد مطالعه و نمونه برداری 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 نمونه برداری شد. همچنین، از آب رودخانه دجله نیز نمونه‌برداری صورت گرفت.



شکل 1- محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در حاشیه رودخانه دجله-عراق

Fig. 1. Geographical boundary of the study area located on Tigris River alluvial plain, Iraq

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 اندازه گیری شدند (Pansu, 2006).

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 نمونه برداری 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.

$$L = L_{min} + (L_{max} - L_{min}) / DN_{max} * DN \quad (1)$$

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_{max} و L_{min} به ترتیب حداکثر و حداقل رادیانس سنجنده مورد نظر است. تصاویر اولیه بدست آمده از ماهواره استر بر حسب رادیانس است که برای تبدیل رادیانس به DN از رابطه (۲) استفاده شد.

$$DN_i = (L_i / coef_i) + 1 \quad (2)$$

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.

$$\rho = \frac{\pi \cdot L \cdot d^2}{ESUN \cdot \cos(SZ)} \quad (3)$$

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 پهنه بندی 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(SI₁، SI₂، SI₃)، BI^۲، NDVI^۳، IPVI^۴، DVI^۵، PD322^۶ و باندهای ۱ تا ۷ این ماهواره استفاده شد (جدول ۱). شاخص‌های مورد استفاده برای ماهواره استر شامل SI₁، SI₂، SI₃، 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 بدست آمده از تصاویر به عنوان متغیرهای مستقل و مقادیر واقعی شوری به عنوان متغیر وابسته از روش رگرسیون خطی گام به گام بدست 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

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

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.

جدول ۱- شاخص‌های پردازش شده روی تصاویر ماهواره لندست

Table 1- Spectral indices acquired from Landsat satellite images

شاخص Index	معادله Formula	منبع 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 Index	معادله Formula	منبع 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 نیم تغییرنمای تجربی نشان دهنده درجه تفاوت بین مقدار نمونه و مقادیر داده‌های اطراف آن است. محاسبه تغییرنما اولین گام در بررسی تغییرات مکانی متغیر است. جهت محاسبه تغییرنما 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 ناریب^۱ است.

آزمون اعتبارسنجی داده‌ها

به منظور ارزیابی و مقایسه بین داده‌های برآورد شده هدایت اکتريکی با روش‌های مختلف و داده‌های هدایت اکتريکی اندازه گیری ده از معیارهای مجذور میانگین مربعات باقیمانده^۲ و میانگین اریبی 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 (Hammam & Mohamed, 2020).

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- Descriptive Statistical analysis of soil physical and chemical properties

نسبت سدیم جذب	منیزیم Mg	کلسیم Ca	سدیم Na	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	اسیدیته pHe	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

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 اندازه-گیری شده مربوط به ECe 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.

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، بدست 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) به دست 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 model equations for estimation of soil EC by acquired data of Landsat images

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، به دست 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 شورتر 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. بر این اساس مناطق نزدیک رودخانه دجله به دلیل شوری زیاد برای تولید محصولات کشاورزی مناسب نیست.

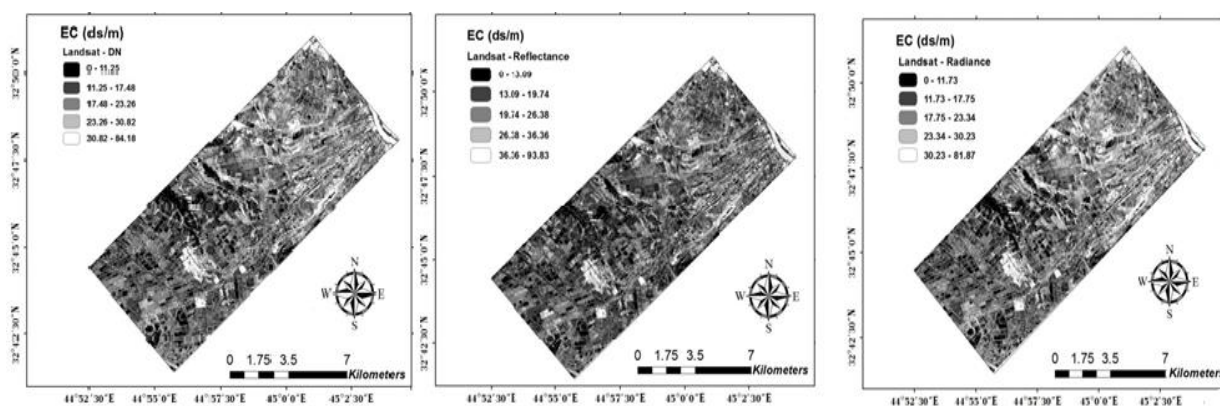
نقشه شوری خاک، به دست آمده از اطلاعات ماهواره لندست در حالت طیفی reflectance

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 ($11.25 - 84.18 \text{ dS/m}$) 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 سنجنده 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 سنجنده مورد نظر در حالت‌های طیفی مختلف (DN و $reflectance$ ، $radiance$) 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. بودن EC برآورد شده در حالت radiance نسبت به دو حالت reflectance و DN نشان می‌دهد که این تغییر حالت سبب شده تا ماهواره لندست ارزش رقمی 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, Nezam Mahalleh, Farzane, Rastegar & Sydrzayy, 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 رویت این نقاط تاثیرگذار 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. Salinity map estimated by Landsat satellite data in DN, Reflectance and Radiance spectral mode

نقشه‌های شوری خاک، بدست 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 به دست 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-Regression model equations for estimation of soil EC by acquired data of Aster images

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

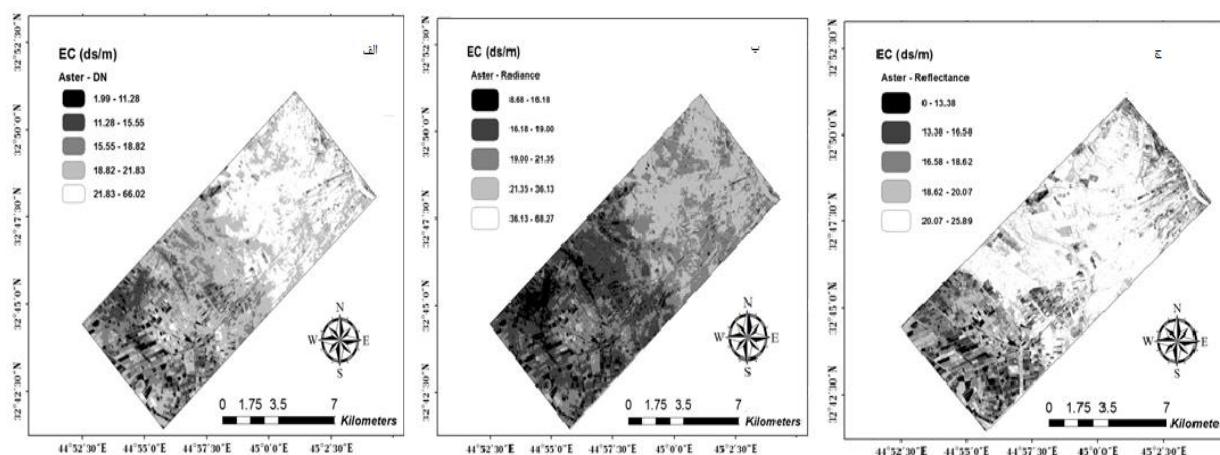
نقشه پراکنش شوری خاک، تهیه شده از EC محاسبه شده از اطلاعات طیفی ماهواره استر در حالت طیفی DN در شکل ۳-الف ارائه شده است. با توجه به این نقشه بیشترین EC برآورد شده ۶۶/۰۲ دسی‌زیمنس بر متر است که به صورت نقاط سفید، بیشتر در نیمه شمالی منطقه گسترش دارد و کمترین میزان EC برآورد شده ۱/۹۹ دسی‌زیمنس بر متر است که به صورت نقاط تیره در نیمه جنوبی منطقه دیده می‌شود. دامنه EC به دست آمده از تصاویر ماهواره استر (۶۶/۰۲ - ۱/۹۹) از دامنه EC اندازه‌گیری شده از سطح منطقه مورد مطالعه (۳۹ - ۱۱ 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 (۸۴ - ۰ 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 ۶۷/۲۷ دسی‌زیمنس بر متر بود که به صورت نقاط روشن بیشتر در نواحی نیمه شمالی منطقه پراکنش داشت و کمترین EC برآورد شده ۸/۶۸ 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 رقومی ثبت شده در حالت radiance است. علوی پناه و همکاران (Alavipanah, Matinfar, Sarmasti, Jafarbeglou & Goodarzimehr, 2011) در 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 ۲۵/۸۹ دسی‌زیمنس بر متر بود که به صورت نقاط روشن بیشتر در نیمه شمالی منطقه وجود داشت. کمترین EC برآورد شده کمتر از ۱۳/۳۸ 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.

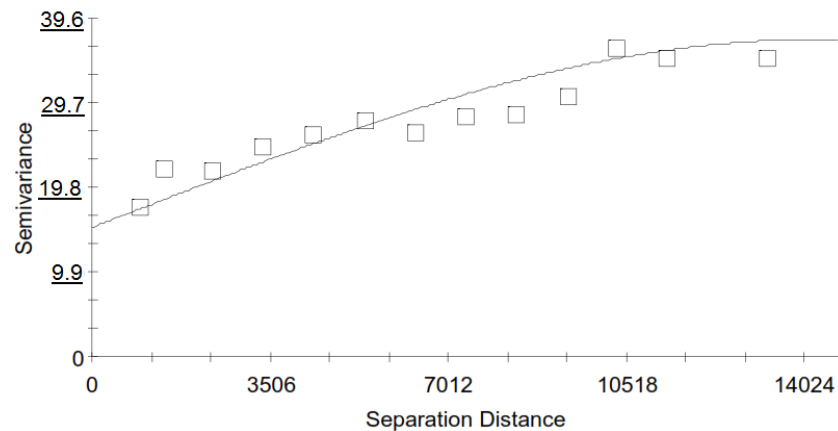


شکل ۳- نقشه شوری خاک، برآورد شده از اطلاعات طیفی ماهواره استر در حالت الف-DN، ب-radiance، ج-reflectance

Fig. 3. Salinity map estimated by Aster data in DN, radiance and reflectance spectral mode

نقشه شوری خاک، به روش زمین آمار

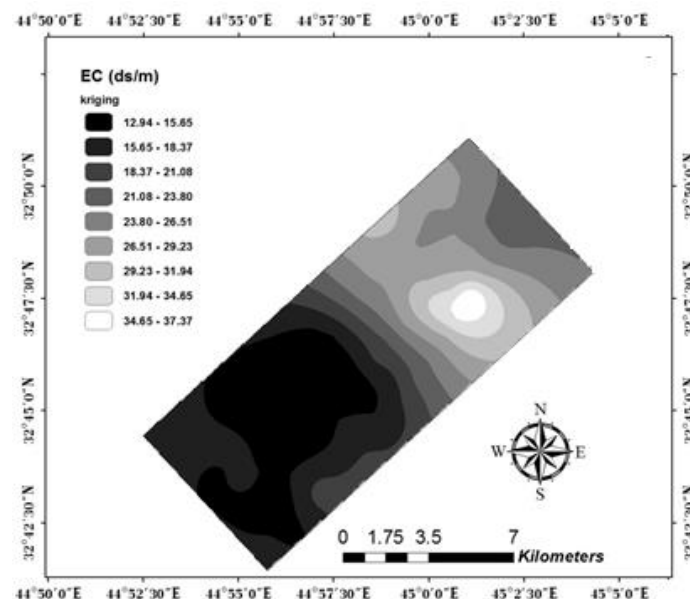
به منظور تشریح پیوستگی مکانی شوری در منطقه از آنالیز واریوگرام استفاده شد. مناسبترین مدل واریوگرام برای میزان شوری مدل کروی بدست آمد. این مدل نشان می‌دهد که بخش ساختاردار واریوگرام شوری (C) بر بخش تصادفی (اثر قطعه‌ای C0) غلبه دارد. نسبت اثر قطعه‌ای (۱۳/۵) به آستانه (۳۷/۵) برابر با ۰/۳۶ بدست آمد که نشان 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 نمونه برداری 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. Isotropic Variogram of electrical conductivity values

با استفاده از نتایج واریوگرام، کریجینگ نقشه میانمایی 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 کنند 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 سانتی‌متر 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. Soil EC distribution map produced by geostatistical method

اعتبارسنجی 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 (Yüksel, Akay & Gundogan, 2008) 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.

با مقایسه پارامترهای اعتبارسنجی، نقشه‌های تهیه شده به روش سنجنش از دور (لندست و استر) و روش زمین آمار (کریجینگ) (جدول ۶) متوجه می‌شویم که در میان نقشه‌های EC به دست 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 assessment of different spectral solutions of Landsat and Aster satellites in ECe estimation

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 سنجنش 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 سنجنش 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 سنجنش از دور (ماهواره استر) روش کریجینگ، رگرسیون دارای بیشترین دقت در تهیه نقشه‌های شوری خاک بود. والرم (Wallerma, 2003) نشان داد که مدلهای زمین آماری در مقیاسهای محلی و مساحت‌های کم نسبت به روش‌های سنجنش از دوری نتایج بهتری در تخمین خصوصیات خاک دارند. به طور کلی در روش زمین آمار هرگاه مولفه ساختاردار ویژگی

مورد بررسی بر اثر قطعه‌ای غالبیت داشته 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 تولیدنقشه شوری ارجحیت داشت.

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 reflectance، radiance و DN استفاده شد و برای روش زمین آمار از روش کریجینگ استفاده شد.

نتایج به دست 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 داده‌ای 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 47644).

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>
- Balasim, 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*. Satellite 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>