



Evaluation of drainage systems performance using digital soil salinity mapping

Farhad Dehghani¹✉ | Yosef Hasheminejad² | Amir Parnian³ | Nadia Besharat⁴

1. Corresponding Author, National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran. E-mail: dehghany47@gmail.com

2. Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran. E-mail: hasheminejad@gmail.com

3. National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran. E-mail: Amir.parnian86@gmail.com

4. National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran. E-mail: nadiabesharat@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 20, 2024

Revised: Jan. 26, 2025

Accepted: Feb. 4, 2025

Published online: May. 2025

Keywords:

Drainage,
Electromagnetic Induction,
Evaluation,
Pistachio,
Salinity.

ABSTRACT

A Latin hypercube sampling approach was employed to evaluate the drainage system performance in rehabilitated and modernized lands in Tanour-Lahour, Yazd Province. This determined the locations for collecting 147 soil samples, 28 water samples, and 225 electromagnetic conductivity readings. Soil and water salinity and ionic composition used to interpolate and create root zone soil salinity variation maps. The regression results showed that in both cases, only the device measurement in the horizontal position has a significant relationship with the average root zone soil salinity. Accordingly, the assessment of soil salinity based only on traditional sampling and laboratory analysis cannot provide a proper view of the salinity and also an overview of the performance of the drainage system. The land's soil salinity estimation using apparent electrical conductivity data showed a better relationship between the plant health status and the performance of the land's drainage system. Accordingly, the soil salinity in the middle lands has been completely controlled in such a way that the ECe has even reached less than the irrigation water EC, while in the marginal lands equipped by the drainage system and where the drainage occurred only by the main drainage ditch, the soil salinity values were higher than middle lands. The time sequence of drainage salinity indicates that the drainage water salinity was almost constant in time. The drainage salinity in the collectors remained constant about 20dS/m and in the main drain ditch about 33 dS/m. These conditions indicate that the drainage system has approached steady or quasi-steady conditions.

Cite this article: Dehghani, F., Hasheminejad, Y., Parnian, A., & Besharat, N. (2025) Evaluation of drainage systems performance using digital soil salinity mapping, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (3), 753-770. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387219.669857>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387219.669857>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

The effective management of soil salinity in the root zone is a critical factor for sustaining agricultural productivity in irrigated lands, particularly in arid and semi-arid regions. One robust method to assess the performance of agricultural drainage systems is to analyze their impact on soil salinity control. This study focused on evaluating the performance of the rehabilitated and modernized drainage systems in the Tanour-Lahour region, Yazd Province, using advanced spatial sampling and data analysis techniques.

Materials and Methods:

A Latin hypercube sampling (LHS) strategy was employed to enhance the efficiency and representativeness of the sampling process, allowing for the systematic collection of 147 soil samples, 28 water samples, and 225 electromagnetic conductivity (EM) readings across the study area. The LHS approach ensured comprehensive spatial coverage, reducing the potential bias associated with traditional random or grid sampling methods. Laboratory analysis was conducted on soil and water samples to measure salinity content and ionic composition, providing the basis for mapping soil salinity variations within the root zone. These maps were created through geostatistical interpolation methods, offering a visual and quantitative representation of salinity distribution in the study area.

Results and Discussion:

The results of this study demonstrated the significance of combining field measurements with indirect estimation techniques for assessing soil salinity. Regression analysis using both direct and inverse modeling approaches revealed that among the various electromagnetic device measurements, only the horizontal position measurements of apparent electrical conductivity (ECa) showed a significant correlation with the average root zone salinity. This finding underscores the importance of proper sensor orientation and the need for calibration in salinity assessment studies.

Traditional methods of salinity assessment, based solely on soil sampling and laboratory analysis, were found insufficient to provide an accurate and holistic view of salinity dynamics and the drainage system's performance. In contrast, the integration of indirect measurements, such as ECa data, with laboratory analyses offered a more comprehensive understanding of salinity levels and their spatial variability. This integrated approach provided better insights into the relationship between soil salinity, plant health, and the efficiency of the drainage system.

The study revealed significant spatial variability in soil salinity across the studied fields. In the middle lands, where the drainage system was well-maintained and fully functional, soil salinity levels were effectively controlled. In fact, in some areas, the soil electrical conductivity (ECe) was observed to be lower than the salinity of the irrigation water. This highlights the efficiency of the drainage system in preventing salt accumulation and maintaining favorable conditions for crop growth.

Conversely, in the marginal lands, where drainage relied solely on main ditches and lacked an integrated network of field drains, soil salinity levels were notably higher. This discrepancy between middle and marginal lands indicates the need for targeted drainage interventions in underperforming areas to enhance salinity control and ensure uniform field conditions.

Drainage water salinity showed a cumulative increase in downstream sections of the drainage network, with salinity levels in the collectors (P1 and P2) stabilizing around 20 dS/m and in the main drainage ditch (P3) reaching approximately 33 dS/m. Temporal analysis of the drainage water salinity indicated steady or quasi-steady conditions, reflecting the drainage system's long-term operation in the region. The stability of these values over time suggests that the system has reached a dynamic equilibrium, with consistent salt removal from the soil profile.

Implications for Drainage Management and Agricultural Practices

The findings of this study underscore the critical role of drainage systems in managing soil salinity in irrigated agricultural lands. The effectiveness of these systems is closely tied to their design, maintenance, and integration with irrigation management practices. Key recommendations based on this study include the following:

Enhancing Drainage Coverage: Marginal lands with inadequate drainage networks require the extension of field drains or improvements to existing infrastructure to achieve better salinity control.

Monitoring and Calibration: Regular monitoring of soil salinity using indirect methods, such as ECa measurements, is essential for identifying problematic areas and optimizing drainage system performance. Calibrating these measurements to local soil and water conditions will improve the accuracy of salinity

assessments.

Balancing Irrigation and Drainage: Efficient irrigation management, coupled with effective drainage, is crucial for minimizing salt buildup in the root zone. Adjustments in irrigation scheduling and water quality monitoring can help maintain soil salinity within acceptable limits.

Promoting Adaptive Management: Given the dynamic nature of salinity processes, adaptive management strategies that incorporate real-time monitoring data and predictive models are recommended. These strategies should focus on mitigating risks associated with soil and water salinity, especially under changing climatic and hydrological conditions.

Conclusion:

This study highlights the importance of using a combination of traditional sampling, laboratory analysis, and advanced geophysical methods to assess the performance of drainage systems in controlling soil salinity. The integration of ECa measurements with soil salinity data provided valuable insights into the spatial variability of salinity and the impact of drainage systems on soil health. The results emphasize the need for targeted drainage interventions in underperforming areas, as well as the adoption of adaptive management practices to enhance agricultural sustainability in saline environments.

By addressing the specific challenges of soil and water salinity, the findings of this research contribute to the broader goal of improving land productivity and ensuring long-term sustainability in irrigated agriculture. Future studies should explore the integration of remote sensing technologies with field measurements to further enhance the efficiency and scalability of salinity assessment and management approaches.

Author Contributions:

All authors are contributing in data collection, analysis and performing the article.

Data Availability Statement:

Raw data were generated at National Salinity Research Center (NSRC). Derived data supporting the findings of this study are available from the corresponding author Farhad Dehghani, Ph.D., on request after the permission of the NSRC.

Acknowledgements:

The authors would like to thank the Deputy of Agro-Water and Soil of the Ministry of Agriculture-Jahad for project providing funding.

Ethical considerations:

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest:

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی عملکرد سیستم‌های زه‌کشی با استفاده از نقشه‌برداری رقومی شوری خاک

فرهاد دهقانی^۱ | یوسف هاشمی‌نژاد^۲ | امیر پرنیان^۳ | نادیا بشارت^۴

۱. نویسنده مسئول، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. رایانامه: dehghany47@gmail.com

۲. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران. رایانامه:

hasheminejhad@gmail.com

۳. مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. رایانامه: Amir.parnian86@gmail.com

۴. مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. رایانامه: nadiabesharat@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۳۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶	
تاریخ انتشار: خرداد ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی: شوری، زه‌کشی، پسته، القای الکترومغناطیس، ارزیابی.	به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم زه‌کشی در اراضی تجهیز و نوسازی شده تنورلاهور استان یزد و بر اساس روش فرامکعب لاتین موقعیت ۴۹ نقطه برای اخذ ۱۴۷ نمونه خاک، ۲۸ نمونه آب و ۲۲۵ نقطه قرائت دستگاه هدایت‌گر الکترومغناطیس تعیین شد. مقادیر شوری و ترکیب یونی نمونه‌های آب و خاک در آزمایشگاه نیز برای درونیابی و تهیه نقشه تغییرات شوری خاک در منطقه ریشه تعیین شد. رابطه بین هدایت الکتریکی و هدایت الکترومغناطیسی قرائت شده توسط دستگاه در دو حالت افقی و عمودی با استفاده از روش‌های رگرسیون چندگانه بررسی شد. نتایج رگرسیون گام به گام نشان داد که در هر دو مورد تنها قرائت دستگاه در وضعیت افقی با میانگین شوری خاک دارای رابطه رگرسیونی معنی‌داری است. بر اساس نتایج ارزیابی شوری خاک تنها بر اساس نمونه‌گیری سنتی و تجزیه آزمایشگاهی نمی‌تواند تصویری واقعی از وضعیت شوری و عملکرد سیستم زه‌کشی ارائه نماید. در حالی که برآورد مقدار شوری خاک با استفاده از مقادیر هدایت الکتریکی ظاهری خاک، با وضعیت گیاه و عملکرد سیستم زه‌کشی رابطه بهتری نشان داد. بر این اساس، شوری خاک در قسمت‌های میانی پروژه کاملاً کنترل شده به‌نجوی که شوری خاک حتی به کمتر از شوری آب آبیاری نیز رسیده است، این در حالی است که در حاشیه پروژه و جایی که وظیفه زه‌کشی بر عهده زهکش اصلی بوده، مقادیر شوری خاک زیاد است. از لحاظ شوری زهاب نیز در قسمت‌های پایاب افزایش تجمعی شوری مشاهده شد. تغییرات زمانی شوری زهاب در مقاطع مختلف شبکه زه‌کشی نشان می‌دهد که شوری زهاب در هر محل با زمان تقریباً ثابت است. شوری زهاب در جمع‌کننده‌ها (نقاط P1 و P2) در حدود ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر و در زهکش اصلی (نقطه P3) در حدود ۳۳ دسی‌زیمنس بر متر باقی مانده است. این شرایط نشان می‌دهد که سیستم زه‌کشی به شرایط ماندگار یا شبه ماندگار نزدیک شده است.
استناد: دهقانی؛ فرهاد، هاشمی‌نژاد؛ یوسف، پرنیان؛ امیر، بشارت؛ نادیا، (۱۴۰۴) ارزیابی عملکرد سیستم‌های زه‌کشی با استفاده از نقشه‌برداری رقومی شوری خاک، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۳)، ۷۷۰-۷۵۳. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387219.669857	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسنده‌گان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.387219.669857	



مقدمه

احداث انواع زه‌کش به منظور خروج آب اضافی از محیط ریشه و کنترل شوری در بسیاری از مناطق تحت کشت با هدف دستیابی به عملکرد پایدار دارای اهمیت حیاتی می‌باشد. در حقیقت کارکرد صحیح این سازه‌ها عملیات آبشویی را امکان‌پذیر نموده و محیط ریشه را از نظر فیزیکی و شیمیایی برای فعالیت طبیعی گیاه مساعد می‌نماید. اراضی زه‌کشی شده، باید به‌صورت مستمر مورد ارزیابی قرار گیرند. از آنجا که شوری خاک در زمان و مکان بسیار متغیر است، در نتیجه تا حصول شرایط تعادلی (ماندگار یا شبه ماندگار) نمی‌توان در خصوص کفایت آبشویی و یا زه‌کشی در این اراضی تصمیم‌گیری کرد، بلکه باید از طریق پایش مستمر شوری، زه‌کشی و وضعیت عملکرد گیاه در خصوص ادامه برنامه مدیریتی مزارع تصمیم‌گیری نمود.

ارزیابی عملکرد سیستم زه‌کش احداث شده را می‌توان با روش‌های مختلف از جمله کنترل شوری زه‌آب خروجی و شوری محیط ریشه انجام داد. استفاده از روش‌های معمول نمونه برداری خصوصاً در سطوح وسیع علاوه بر هزینه زیاد، دقت کمتری را نسبت به استفاده از روش‌های جدیدتر دارد. روش‌های رقومی تهیه نقشه شوری و استفاده از دستگاه‌هایی مانند EM38 بعد از ارزیابی و مقایسه علمی با سایر روش‌ها قابل پیشنهاد هستند. منطقه تنور لاهور در استان یزد با منابع آب و خاک شور و سیستم زه‌کشی در حال بهره‌برداری در باغات پسته به منظور انجام این مطالعه انتخاب گردید.

کنترل شوری خاک در منطقه ریشه نیازمند دو جزء اساسی شامل آبشویی به منظور پایین راندن املاح و زه‌کشی به منظور بیرون راندن املاح از منطقه ریشه (Ayars et al., 2012) است. هر جا که یکی یا هر دوی این اجزا فراهم نباشد، تجمع شوری در خاک رخ خواهد داد که می‌تواند منجر به کاهش عملکرد یا از بین رفتن گیاه شود. در عمده مناطق فلات مرکزی ایران، مسئله اصلی جزء اول است، یعنی تأمین آب با کیفیت مناسب و با حجم مورد نیاز برای پایین راندن املاح (FAO., 2024)، زیرا خاک‌ها دارای زه‌کشی طبیعی بوده و عمق آب زیرزمینی معمولاً بسیار زیاد است. در عین حال در مواردی به‌صورت موضعی شرایط زه‌کشی طبیعی در خاک فراهم نیست. این‌گونه موارد چاره‌ای جز زه‌کشی مصنوعی برای خارج کردن آب و املاح اضافه از منطقه ریشه نیست.

سامانه‌های زه‌کشی می‌توانند بیلان آب و املاح در منطقه ریشه را کنترل نمایند. این سامانه‌ها املاحی را که در منطقه ریشه تجمع نموده دفع کرده و از افزایش شوری خاک جلوگیری می‌کنند هرچند که سامانه‌های سنتی زه‌کشی شرایط مساعدی را برای کشت در اراضی شور و ماندابی فراهم می‌کنند، ولی چالش‌هایی مانند هزینه بالای سرانه اجرا و نگهداری از این سامانه‌ها و مشکلات زیست‌محیطی در محل خروجی، آن‌ها را همراهی می‌کند (Akram et al., 2008؛ parsinejad & Akram., 2018).

معیارهای زه‌کشی کشاورزی معیارهایی هستند که بالاترین سطح ایستابی، روی و یا داخل خاک، را تعیین می‌کنند به‌نحوی که تولیدات کشاورزی در اثر مشکلات ماندابی کاهش نیابد (Oosterbaan., 1994). اگر سطح ایستابی واقعی، بالاتر از مقدار تعیین شده به‌وسیله این معیارها باشد، ممکن است لازم باشد، سیستم زه‌کشی کشاورزی مستقر شود، یا اینکه سیستم موجود ارتقا یابد تا مشکل ماندابی حذف شود. از طرف دیگر، اگر سیستم زه‌کشی سطح ایستابی را به مقداری پایین‌تر از مقدار تعیین شده به‌وسیله معیار کاهش داده باشد، با زه‌کشی بیش طراحی شده مواجه هستیم. علاوه بر استفاده از معیارهای زه‌کشی کشاورزی، می‌توانیم از معیارهای فنی زه‌کشی (برای کاهش هزینه‌های اجرا و کارکرد سیستم و همزمان حفظ معیارهای کشاورزی)، معیارهای زیست‌محیطی زه‌کشی (برای به حداقل رساندن تخریب‌های زیست‌محیطی) و نیز معیارهای اقتصادی زه‌کشی (برای به حداکثر رساندن سود خالص) نیز استفاده کنیم.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، سیستم‌های زه‌کشی زیرسطحی عمدتاً در اراضی آبیاری شده که تحت تأثیر ماندابی هستند، به‌منظور کاهش یا رفع مشکل شوری خاک ایجاد می‌شوند. بیلان نمک در این اراضی به‌طور عمده وابسته به بیلان آب است که در آن، حجم آب آبیاری نقش اساسی دارد. زمانی که آبیاری به میزان کافی انجام شود، تأثیر زه‌کشی بر بیلان نمک به میزان تخلیه نمک همراه با زهاب بستگی دارد. بنابراین، زه‌کشی برای کنترل شوری در درجه نخست به تأثیرات تخلیه وابسته است تا کاهش سطح ایستابی. در نتیجه، معیار کنترل شوری را باید در مقدار آب مورد نیاز برای فراهم کردن آبشویی مناسب جستجو کرد، نه در کاهش سطح ایستابی. در یک سیستم آبیاری با طراحی و عملکرد مناسب، لازم است سطح ایستابی در عمقی بیشتر حفظ شود تا شوری خاک کنترل شود. در مقابل، اگر سیستم آبیاری طراحی و عملکرد مناسبی نداشته باشد، حتی سطح ایستابی بسیار عمیق نیز شوری خاک را اصلاح نخواهد کرد.

در فصل آبیاری، زه‌کشی با هدف تهویه خاک و کنترل ماندابی انجام می‌شود، در حالی که در دوره‌های بدون آبیاری، جلوگیری از حرکت نمک به سطح خاک از طریق خیز مویینگی اهمیت دارد. سامانه‌های زه‌کشی کنترل‌شده می‌توانند راهکاری مؤثر برای مدیریت شوری و کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی باشند، اما هزینه‌های بالا و دشواری‌های نگهداری، اجرای آن‌ها را در کشورهای در حال توسعه

محدود کرده است. شخم زدن به عنوان روشی ساده برای قطع لوله های موبین مطرح است، اما ممکن است باعث کاهش مواد آلی خاک شود. به علاوه، استفاده از سامانه زه کشی دوعمقی می تواند سطح ایستابی را بهینه سازی کرده و خطر شور شدن مجدد خاک را کاهش دهد (شریفی پور و همکاران، ۱۳۹۹).

برآورد عمق مناسب نصب زه کش ها تحت تأثیر ملاحظات کشاورزی (تهویه و کنترل شوری)، زیست محیطی (حجم و کیفیت زه آب) و اقتصادی (تراکم و هزینه های اجرایی) قرار دارد، که هر یک می تواند به انتخاب عمق های متفاوت منجر شود. این مطالعه به بررسی دیدگاه های مختلف در تعیین عمق زه کش ها پرداخته و آن را برای اراضی دشت آزادگان تحلیل کرده است. نتایج نشان می دهد عمق کم برای رعایت ملاحظات زیست محیطی و عمق زیاد برای کنترل شوری مناسب تر است. در این منطقه، استفاده از زه کشی کنترل شده به عنوان راهکار بهینه پیشنهاد شده است که با تنظیم تراز سطح آب زیرزمینی، از زه کشی اضافی در فصل آبیاری و صعود نمک در دوره های بدون آبیاری جلوگیری می کند (شریفی پور و همکاران، ۱۳۹۴).

نوری و لیاقت (۱۳۸۷) به بررسی تأثیر مدیریت سطح ایستابی بر شوری ناحیه توسعه ریشه در مناطق نیمه خشک ایران پرداختند. تیمارها شامل سه سطح ایستابی کنترل شده (در عمق های ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ متر) و یک تیمار زه کشی آزاد بودند. برای ایجاد سطح ایستابی و آبیاری، از آب با هدایت الکتریکی ۱/۵ دسی زیمنس بر متر استفاده شد. نتایج نشان داد توزیع نمک در ناحیه ریشه در همه تیمارها مشابه و کمتر از ۴ دسی زیمنس بر متر بود. همچنین عملکرد یونجه در تیمارهای کنترل سطح ایستابی در عمق های ۳۰ و ۵۰ سانتی متر، به ترتیب ۷۳ و ۹۴ درصد بیشتر از تیمار زه کشی آزاد بود، که نشان دهنده کارایی بالای این روش در مناطق نیمه خشک است.

روش های ارزیابی سنتی خاک عمدتاً مبتنی بر نمونه برداری و حفر پروفیل در نقاط شاخص سری های مختلف خاک است که حاصل آن ایجاد نقشه های پلی گونی از خصوصیات خاک می باشد. در حالی که تغییرپذیری خصوصیات خاک عمدتاً به صورت پیوسته صورت می گیرد و نمی توان با مرز مشخصی آن را از هم جدا کرد. نقشه برداری رقومی خاک با استفاده از داده های کمکی که می تواند تصاویر ماهواره ای، مدل رقومی ارتفاع، سنجش از نزدیک و یا حتی مطالعات سنتی انجام شده در قبل باشد، مدلی را برای تغییرپذیری خصوصیات خاک ارائه می نماید که می توان با استفاده از آن تغییرپذیری پیوسته خصوصیات خاک را بررسی کرد (Zeraatpisheh et al., 2020). در این چارچوب از داده های کمکی می توان برای به حداقل رساندن و بهینه سازی نقاط نمونه برداری نیز استفاده کرد.

روش القای الکترومغناطیس^۱ به عنوان نوعی روش سنجش از نزدیک، شوری از طریق القای یک جریان الکتریکی به داخل خاک و اندازه گیری میانگین وزنی شوری خاک (یا هدایت الکتریکی ظاهری خاک^۲) تا عمقی مشخص کاربرد دارد (Wang et al., 2021). این جریان الکتریکی، میدان الکترومغناطیسی ثانویه ای ایجاد می کند که می تواند به ولتاژ خروجی تبدیل شود و این ولتاژ خروجی رابطه خطی با میانگین وزنی هدایت الکتریکی ظاهری خاک در عمق دارد. هدایت الکتریکی ظاهری خاک (ECa) که به این ترتیب اندازه گیری می شود، تحت تأثیر چندین ویژگی کلیدی شامل شوری خاک (محتوای املاح محلول)، مقدار و نوع کانی شناسی بخش رس و رطوبت و دمای خاک قرار می گیرد (Herrero & Pabuayon, 2021). اخیراً اندازه گیری هدایت الکتریکی ظاهری خاک به یک فناوری ارزشمند برای تشخیص الگوی تغییرپذیری ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک تبدیل شده است که بر عملکرد گیاه موثر هستند (Mulder et al., 2023).

دریافت اطلاعات در مورد تغییرات مکانی و زمانی ویژگی ها و وضعیت های خاک در کشاورزی برای شناسایی مناطق تحت مدیریت در کشاورزی دقیق ضروری است. تکنیک القای الکترومغناطیسی برای ارزیابی ویژگی ها، وضعیت ها، فرآیندها و تغییرات مکانی و زمانی خاک به کار رفته است. در مقایسه با روش های سنتی، تکنیک القای الکترومغناطیسی مزایایی دارد، از جمله قابلیت اندازه گیری غیرمخرب و تکرارپذیر، دقت بالا، صرفه جویی در نیروی کار، و پوشش فضایی وسیع تر با داده های جغرافیایی در کشاورزی. تکنیک القای الکترومغناطیسی کاربردهای گسترده ای مانند برآورد محتوای رطوبتی خاک، شوری خاک، وزن مخصوص ظاهری و غیره دارد. پیشرفت های آینده در کشاورزی دقیق می تواند با برآورد همزمان ویژگی ها، وضعیت ها و فرآیندهای هیدرولوژیکی خاک تقویت شود تا مناطق مدیریت شده شناسایی شده و ورودی های بهینه در مناظر کشاورزی محاسبه شوند (Pathirana et al., 2023).

فرزآمیان و همکاران در مطالعه شوری خاک در اراضی تحت آبیاری در تونس توانستند روابط رگرسیونی قوی بین مقادیر شوری خاک اندازه گیری شده از اعماق مختلف خاک و برآورد شده توسط دستگاه EM-38 در ارتفاع های مختلف بدست آورند (Farzamian et al., 2023). هاشمی نژاد و همکاران (۱۳۹۵) نیز بر اهمیت رطوبت خاک در اندازه گیری شوری به وسیله دستگاه القاگر الکترومغناطیس تأکید

1 - Electromagnetic Induction Technique

2 - Apparent Soil Electrical Conductivity (ECa)

کردند و اشاره نمودند که در رطوبت‌های کم ضرایب تعیین معنی‌داری بین شوری خاک و EC_a پیدا نشده است. با توجه به بررسی فوق حساسیت روابط همبستگی به عوامل ایجاد کننده آن در مقیاس وسیع تعیین نشده است.

تقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) برای تشخیص موقعیت نقاط نمونه‌برداری خاک با استفاده از متغیرهای کمکی، از تکنیک‌های فرامکعب لاتین و فازی کی مینز^۱ استفاده کردند. در این مطالعه برای تعیین تعداد و نوع متغیرهای کمکی، از تکنیک آنتروپی شانون استفاده شد و به این ترتیب ۱۰ متغیر ورودی کمکی انتخاب شدند. بر این اساس برای مطالعه ۷۲۰۰۰ هکتار از اراضی دشت یزد- اردکان، ۱۸۷ محل نمونه‌برداری انتخاب شد. همچنین تقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) در مقایسه روش‌های مختلف انتخاب موقعیت نقاط نمونه‌برداری، گزارش کردند که روش فرامکعب لاتین از بالاترین درجه تفکیک عوارض زمینی برخوردار است.

ارزیابی شوری خاک نیازمند صرف وقت و هزینه زیادی می‌باشد (Ivushkin et al. 2019). خوشبختانه در دهه‌های اخیر به لطف پیشرفت‌های حادث شده در فناوری سنجش از دور، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در این زمینه ایجاد شده است که در نتیجه، امکان ارزیابی سریع‌تر و به‌صرفه‌تر شوری خاک را فراهم آورده است. در واقع از سال ۱۹۷۰ به بعد تعدادی از پژوهشگران رابطه بین شوری خاک و خصوصیات طیفی و رادار را بررسی کردند و نتایج مهمی را بدست آوردند. در نتیجه، این تلاش‌ها روابط مختلفی بین شوری خاک با اندیس‌های مختلف مستخرج از تصاویر به‌دست آمده است. برای ارتباط دادن این اندیس‌ها با شوری خاک معمولاً از روش‌های رگرسیونی استفاده می‌شود. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد سیستم زه‌کشی دشت تنور لاهور واقع در استان یزد با استفاده از نقشه‌برداری رقومی شوری خاک و دستگاه تخمین‌گر زمینی EM-38 انجام شده است.

با توجه به بررسی منابع انجام شده مشخص است که روش نقشه‌برداری رقومی خاک امکان ارزیابی تغییرپذیری شوری خاک در زمان و مکان را فراهم می‌آورد و به این ترتیب می‌تواند به‌عنوان یک ابزار ارزشمند برای سنجش کارایی سیستم زه‌کشی در کنترل شوری خاک مورد استفاده قرار گیرد. تا کنون از این روش برای ارزیابی کارایی سیستم زه‌کشی استفاده نشده است و در نتیجه این تحقیق به‌منظور ارزیابی عملکرد زه‌کشی در کنترل شوری خاک برنامه‌ریزی و اجرا شد.

روش‌شناسی پژوهش

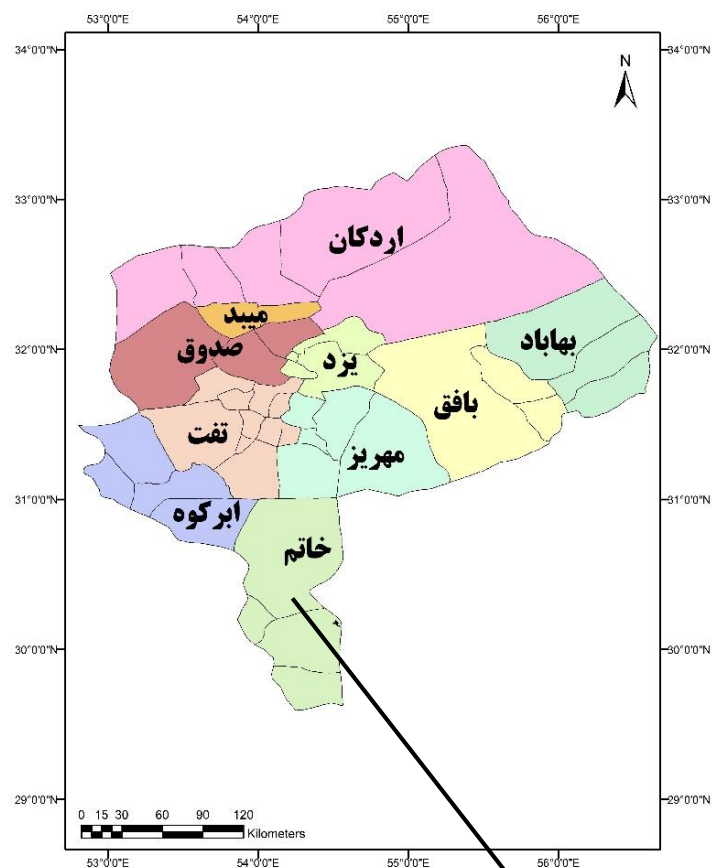
موقعیت منطقه مورد مطالعه

شهرستان خاتم در جنوبی‌ترین نقطه استان یزد و با ارتفاع ۱۶۰۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است. اراضی تنور لاهور خاتم از توابع شهرستان خاتم می‌باشند. این اراضی در گستره طول جغرافیایی "۱۵° ۳۳' ۵۴" تا "۴۵° ۲۸' ۵۴" شرقی و عرض جغرافیایی "۵۰° ۱۳' ۳۰" تا "۲۶° ۰۸' ۳۰" شمالی واقع شده است (شکل ۱). کل محدوده مورد مطالعه حدود ۳۰۰۰ هکتار بود که حدود ۸۰۰ هکتار آن باغات پسته دایر هستند. خاک‌های منطقه قبل از اصلاح و به‌سازی، به‌شدت شور و سدیمی بوده (شکل ۱) و سطح آب زیرزمینی منطقه نیز بالا بود. از آنجا که سطح وسیعی از منطقه مذکور تحت کشت پسته می‌باشد، لذا جهت حذف آب‌های زیرزمینی ورودی به منطقه رشد ریشه گیاه، تهویه مناسب و بهبود عملکرد درختان موجود و در حال کشت در اراضی، حدود ۱۰۰۰ هکتار از اراضی تحت آبیاری، مجهز به سامانه زه‌کشی شده، که آب آن از زه‌کش‌ها وارد کانال‌های زه‌کشی شده و در نهایت در یک کانال به کفه نمکی می‌ریزد.

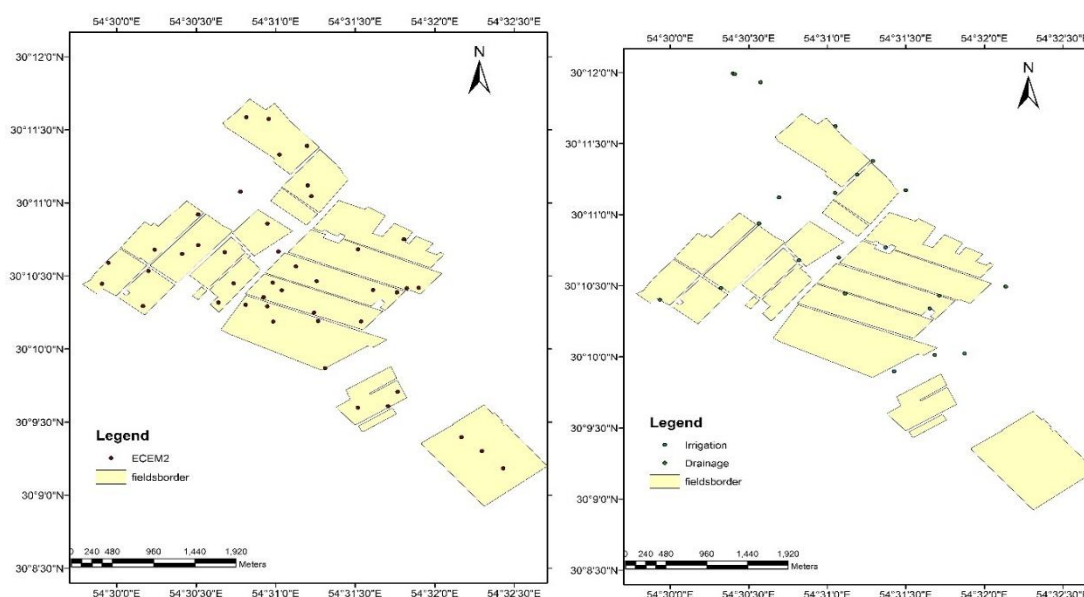
نمونه‌برداری

قبل از شروع نمونه‌برداری، بهترین موقعیت و تراکم نقاط نمونه‌برداری در محدوده مورد نظر تعیین شد (هاشمی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۴). به این منظور، از باندهای شماره ۲، ۳، ۴، ۸ و ۱۱ تصاویر ماهواره سنتینل ۲ (میانگین مقادیر مربوط به فصل بهار سال ۱۴۰۰) و شاخص‌های مستخرج از آن شامل SI، NDSI، NDVI، SAVI و EVI به‌عنوان متغیرهای کمکی با استفاده از الگوریتم فرامکعب لاتین استفاده شد. فرامکعب لاتین به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد برای تعیین نقاط نمونه‌برداری در خاک‌شناسی استفاده می‌شود، به ویژه زمانی که هدف تعیین نمونه‌هایی است که توزیع فضایی و تنوع متغیرهای خاک را به خوبی بازتاب دهند. مزایای این روش، کاهش تعداد نمونه‌ها، نمایش تنوع خاک و افزایش دقت مدل‌سازی است (Wang & Sun, 2024). به این منظور ابتدا یک شبکه ۱۰ متر در ۱۰ متری بر روی کل محدوده مطالعاتی تعیین شد. سپس مقادیر متغیرهای کمکی بر روی این شبکه فراخوانده شدند و در یک فایل متنی ذخیره گردیدند. فایل متنی ایجاد شده با فرمت برنامه cLHS (Minasny & McBratney, 2006) تنظیم شد. در این بسته نرم‌افزاری داده‌های رستری مستخرج

از تصاویر ماهواره‌ای به فرمت متنی بعنوان ورودی استفاده شده و با استفاده از الگوریتم فرامکعب لاتین موقعیت بهترین نقاط نمونه‌برداری تعیین می‌شود. پس از تنظیم پارامترهای برنامه کامپیوتری در تراکم‌های مختلف نقاط نمونه‌برداری تعیین شدند و با مقایسه آن‌ها مناسب‌ترین تراکم نمونه‌برداری انتخاب شد. نمونه‌های خاک در فصل بهار سال ۱۴۰۰ از سه عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۱۲۰ سانتی‌متری اخذ شده و برای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به آزمایشگاه ارسال گردید. شکل (۲) موقعیت نقاط نمونه‌برداری آب و خاک را در محدوده مورد نظر نشان می‌دهد. در مجموع از ۴۹ نقطه، نمونه‌برداری خاک در سه عمق انجام شد و ۱۴۷ نمونه مورد ارزیابی شوری خاک قرار گرفتند. همچنین ۲۸ نمونه آب نیز اخذ شد که شامل ۷ نمونه آب آبیاری و ۲۱ نمونه زه‌آب بود.



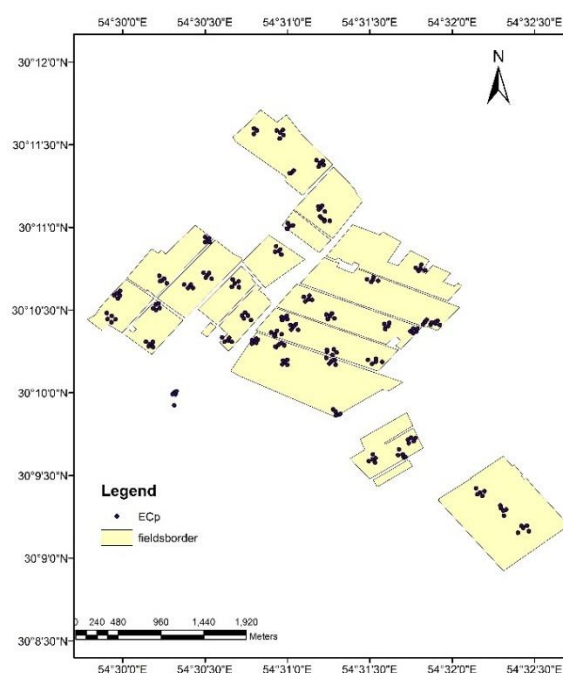
شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه تنور لاهور واقع در شهرستان خاتم یزد و وضعیت اراضی قبل از اصلاح و بهسازی



شکل ۲- نقاط نمونه‌برداری خاک (سمت راست) و آب آبیاری و زه‌آب (سمت چپ) در محدوده مورد مطالعه. محدوده‌های زرد رنگ، مرز باغات پسته دایر، نقاط موقعیت‌های نمونه‌برداری و محدوده‌های سفید خارج از باغات پسته هستند.

قرائت دستگاه Geonics EM38

پس از تعیین موقعیت نقاط نمونه‌برداری، همزمان قرائت شوری خاک با دستگاه Geonics EM-38 نیز صورت گرفت. این قرائت در دو وضعیت افقی و عمودی و با تراکمی حدود ۵ برابر نقاط نمونه‌برداری خاک انجام شد. به این ترتیب که در هر موقعیت نمونه‌برداری خاک، یک قرائت در محل نمونه و چهار قرائت به فاصله حدود ۱۰ متری از مرکز در چهار جهت جغرافیایی انجام شد و در هر موقعیت، مختصات جغرافیایی نقطه نیز ثبت شد. این نحوه قرائت دقت مدل‌سازی آماری را افزایش می‌دهد (هاشمی‌نژاد، همایی و نوروزی، ۱۳۹۶). شکل (۳) موقعیت نقاط قرائت شده به وسیله دستگاه Geonics EM-38 را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۳- موقعیت نقاط قرائت شده به وسیله دستگاه Geonics EM-38. محدوده‌های زرد رنگ، مرز باغات پسته دایر، نقاط موقعیت‌های نمونه‌برداری و محدوده‌های سفید خارج از باغات پسته هستند.

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

پس از برداشت نمونه‌های خاک و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه، نمونه‌های خاک خشک شده و ویژگی‌های هدایت الکتریکی عصاره اشباع و توزیع اندازه ذرات اندازه‌گیری شدند. سپس سایر خصوصیات خاک در نمونه‌های منتخب خاک اندازه‌گیری شد که در این مقاله شوری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شوری یا هدایت الکتریکی (EC) توسط دستگاه هدایت سنج (Rhoades, 1982) اندازه‌گیری شد. برای انتخاب این نمونه‌ها یک‌بار دیگر از روش فرامکعب لاتین با استفاده از متغیرهای کمکی خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک استفاده شد.

درونیابی

برای درونیابی مقادیر اندازه‌گیری شده و نیز صحت‌سنجی نتایج از کدنویسی در محیط R استفاده شد. پکیج‌های مورد استفاده برای درونیابی عبارت بودند از sp (Bivand et al., 2013)، gstat (Graler et al., 2016) و raster (Hijmans, 2024). بطور خلاصه مراحل کار به این صورت بود:

(۱) بارگذاری کتابخانه‌ها: کتابخانه‌های sp، gstat و raster برای تحلیل و پردازش داده‌های مکانی بارگذاری شدند. (۲) خواندن داده‌ها: داده‌های خام از فایل CSV به R وارد شده و مقادیر گمشده حذف شدند. (۳) تبدیل داده‌ها به شیء مکانی: ستون‌های longitude و latitude به عنوان مختصات مکانی تعریف شدند. (۴) تعریف سیستم مختصات: سیستم مختصات UTM منطقه برای داده‌ها تنظیم شد تا با سایر داده‌های مکانی سازگار شوند. (۵) آماده‌سازی برای تحلیل: داده‌ها آماده استفاده در تحلیل‌های مکانی مانند درونیابی با روش کریجینگ شدند. (۶) داده‌های درونیابی شده به روش ارزیابی متقاطع مورد صحت‌سنجی قرار گرفتند.

آماره‌های مورد استفاده برای صحت‌سنجی به روش ارزیابی متقاطع RMSE و R^2 بودند. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) از

رابطه ۱ بدست آمد:

رابطه ۱)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

که در آن y_i مقدار متغیر اندازه‌گیری شده، $\hat{y}_i$ مقدار متغیر برآورد شده به روش ارزیابی متقاطع و n تعداد اندازه‌گیری‌ها است. در روش ارزیابی متقاطع، مقادیر متغیرهای اندازه‌گیری شده به ترتیب از ابتدا یک به یک حذف شده و بر مقادیر باقیمانده مدل درونیابی اعمال می‌شود، به این ترتیب برای نقطه حذف شده یک مقدار جدید برآورد می‌شود. همین عملیات تا انتها ادامه می‌یابد و به این ترتیب برای کل مقادیر اندازه‌گیری شده یک مقدار برآورد شده نیز محاسبه می‌شود.

یافته‌های پژوهش

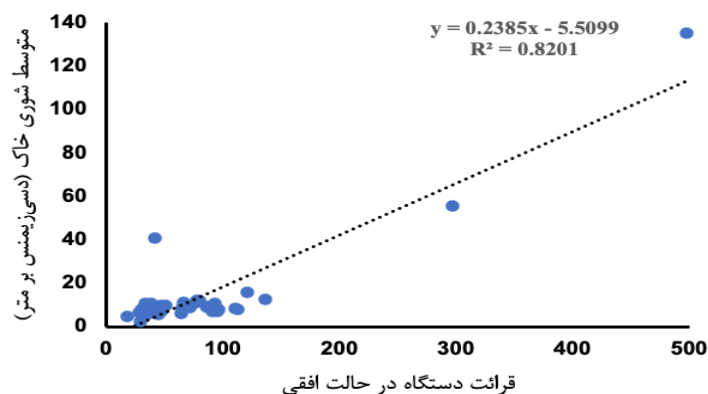
رابطه بین هدایت الکتریکی و هدایت الکترومغناطیسی

رابطه بین هدایت الکتریکی و هدایت الکترومغناطیسی قرائت شده توسط دستگاه در دو حالت افقی و عمودی با استفاده از روش‌های رگرسیون گام به گام بررسی شد. نتایج بررسی روابط رگرسیونی نشان داد که در هر دو مورد قرائت دستگاه در وضعیت افقی با میانگین شوری خاک دارای رابطه رگرسیونی است. این موضوع می‌تواند مربوط به عمق نمونه‌برداری باشد (Visconti, & De Paz, 2021)، چرا که در حالت عمودی دستگاه می‌تواند میانگین هدایت الکتریکی توده خاک را تا عمق ۱۸۰ سانتی‌متری برآورد کند، در حالی که عمق نمونه‌برداری تا ۱۲۰ سانتی‌متر بود که با شعاع تاثیر دستگاه در حالت افقی تطابق دارد.

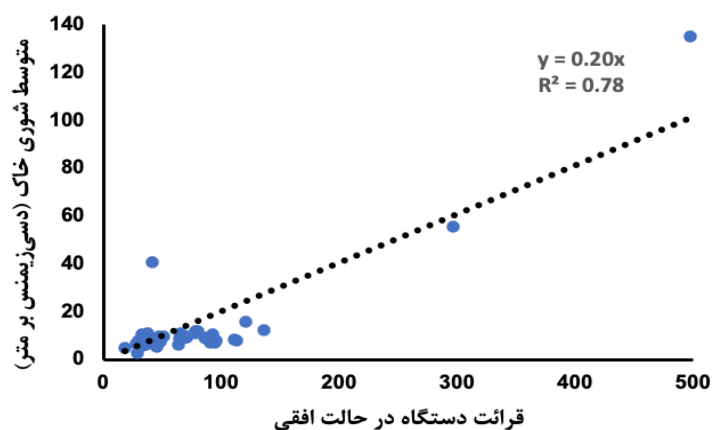
رابطه رگرسیونی بین قرائت دستگاه در حالت افقی با متوسط شوری خاک در شکل (۴) نشان داده شده است که دارای ضریب تبیین

۸۲ درصد می‌باشد.

با توجه به این که از این رابطه برای برآورد شوری خاک در نقاط نمونه‌برداری نشده استفاده می‌گردد، این معادله خطی در مقادیر قرائت کمتر از ۲۳ دسی‌زیمنس بر متر، شوری خاک را منفی برآورد خواهد کرد. به این ترتیب برای برآورد صحیح شوری خاک، عرض از مبدا معادله حذف شد. شکل (۵) معادله برازش داده شده بر داده‌ها در حالت عرض از مبدا صفر را نشان می‌دهد.



شکل ۴- رابطه بین قرائت دستگاه در حالت افقی با متوسط شوری خاک



شکل ۵- رابطه بین قرائت دستگاه در حالت افقی با متوسط شوری خاک در حالت عرض از مبدا صفر

درون‌یابی

برای برازش واریوگرام تجربی با استفاده از اسکریپت‌های R ابتدا مقادیر بهینه پارامترهای دامنه، سقف و ناگت (اثر قطعه‌ای) برای پارامترهای مختلف استخراج گردید. جدول ۱ پارامترهای مدل‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

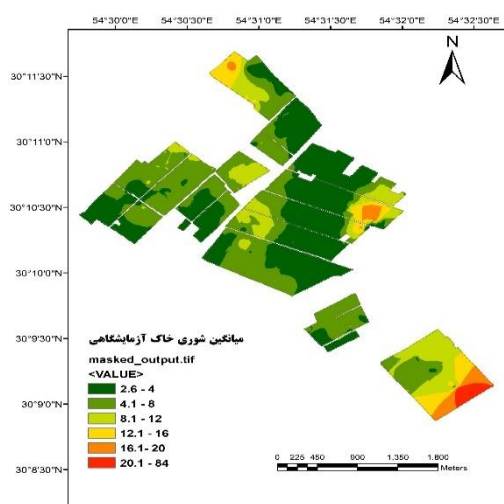
جدول ۱- پارامترهای مدل‌های بهینه‌شده برازش یافته بر واریوگرام تجربی^۱

متغیر	واحد	مدل واریوگرام	اثر قطعه‌ای (C_0)	آستانه ($C+C_0$)	دامنه تاثیر (متر)	$\frac{C}{C+C_0}$	RMSE	R^2
EMv	mS/m	موجی	۴۴/۶	۹۸۵/۶	۱۵۰۰/۰	۰/۰	۷/۳	۰/۸
EMh	mS/m	کروی	۰	۵۸۴/۱	۲۵۰۴/۵	۰	۵/۶	۰/۸
هدایت الکتریکی عصاره اشباع	dS/m	کروی	۰	۱۹/۱	۱۹۱۴/۰	۰	۳/۲	۰/۷
فسفر قابل جذب	mg/Kg	موجی	۰/۰	۳/۵	۱۵۰۰/۰	۰/۰	۲/۳	۰/۵
پتاسیم قابل جذب	mg/Kg	موجی	۷۷/۵	۳۷۵۸/۸	۱۵۰۰/۰	۰/۰	۶/۶	۰/۶
بیکربنات	meq/L	موجی	۰/۰	۰/۱	۱۵۰۰/۰	۰/۰	۱/۲	۰/۴
منیزیم	meq/L	کروی	۰	۱/۵	۲۳۶۴/۱	۰	۶/۵	۰/۴
کلسیم	meq/L	موجی	۰/۰	۹/۸	۱۵۰۰/۰	۰/۰	۴/۲	۰/۵
سدیم	meq/L	کروی	۰	۹۰/۹	۱۴۴۰/۵	۰	۴/۲	۰/۶
نسبت جذب سدیم	(meq/L) ^{-1/2}	کروی	۰	۳/۵	۱۳۵۸/۳	۰	۲/۷	۰/۵
کربن آلی	%	نمایی	۰	۰/۰	۱۵۰۴/۷	۰	۰/۱	۰/۴
مواد خنثی شونده	%	موجی	۰/۴	۱۰/۷	۱۵۰۰/۰	۰/۰	۲/۴	۰/۴
میانگین هندسی قطر ذرات	mm	نمایی	۰	۰/۰	۱۵۳۰/۶	۰	۰/۱	۰/۴

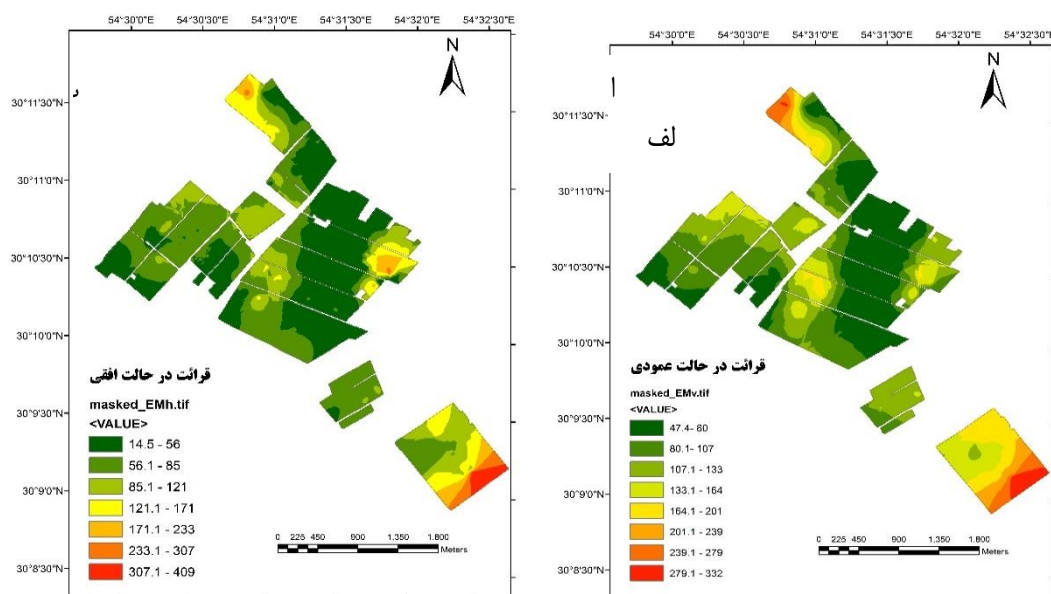
۱- واحد اثر قطعه‌ای، آستانه و RMSE هم واحد با متغیر مورد نظر است. و $\frac{C}{C+C_0}$ واحد ندارد.

واریوگرام تجربی بهینه شده برای رسم نقشه‌های درونیابی با استفاده از مقادیر پارامترها مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۶) تغییرات میانگین شوری خاک در عمق نمونه‌برداری را بر اساس نمونه‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشان می‌دهد. نگاهی به نقشه نشان می‌دهد که هرچند شوری خاک بین حدود ۲ تا ۵۵ دسی‌زیمنس بر متر متغیر است، ولی عمده پهنه مورد بررسی در دامنه شوری‌های کم تا متوسط قرار داشته و شوری‌های بسیار زیاد به صورت لکه‌ای دیده می‌شود. این یکنواختی با وضعیت درختان و تغییرپذیری شوری آب و مدیریت‌های مختلف کشاورزان همخوانی ندارد. در صورتی که قرائت دستگاه در حالت افقی در محدوده مورد بررسی (شکل ۷) دارای تغییرپذیری بالایی بود.

با توجه به رابطه همبستگی قوی بین شوری خاک و قرائت دستگاه در حالت افقی، به دلیل اینکه قرائت دستگاه با تکرار بیشتری انجام شده است، تغییرپذیری بیشتری از شوری خاک را پوشش می‌دهد و می‌توان شوری خاک را در محل‌های قرائت دستگاه با استفاده از رابطه رگرسیونی برآورد شده و مجدداً مقادیر را درونیابی کرد. شکل (۷) مقادیر درونیابی شده میانگین شوری خاک بر مبنای قرائت دستگاه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، الگوی تغییرات شوری خاک بدست آمده نسبت به شکل (۶) تغییرپذیری بیشتری را پوشش می‌دهد. بر اساس این نقشه شوری خاک از حدود ۳ تا بیش از ۸۰ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بوده و بالاترین مقادیر شوری در گوشه جنوب‌شرقی و شمال محدوده مشاهده می‌شود.

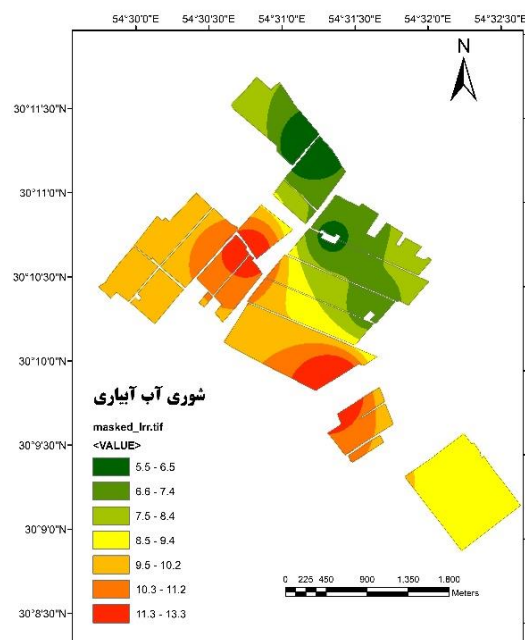


شکل ۶- میانگین شوری خاک، تخمین بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی



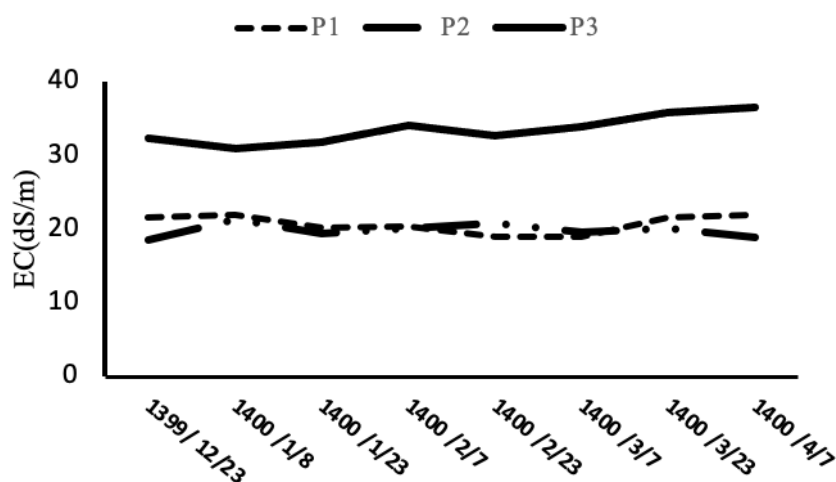
شکل ۷- مقادیر شوری میانگین خاک براساس تخمین قرائت دستگاه Geonics EM-38 در حالت الف: افقی و ب: عمودی در محدوده مورد مطالعه

توزیع سطحی شوری منابع آب آبیاری مورد استفاده برای آبیاری باغات پسته در شکل (۸) نشان داده شده است. شوری آب آبیاری در محدوده پروژه بین حدود ۵/۵ تا ۱۳ دسی‌زیمنس بر متر متغیر است. این تغییرپذیری شوری آب آبیاری به همراه مدیریت‌های مختلف آبیاری و آبیویی و نیز شرایط متنوع خاک، موجب تغییرپذیری شوری خاک شده است.



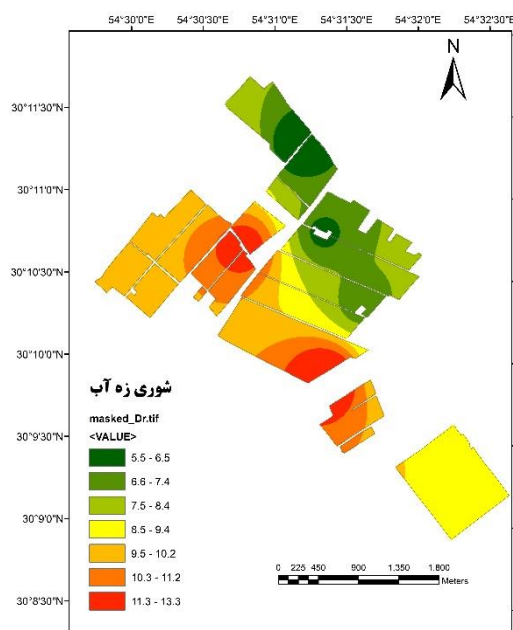
شکل ۸- تخمین تغییرپذیری شوری آب آبیاری در محدوده مورد مطالعه

تغییرات زمانی شوری زهاب در مقاطع مختلف شبکه زه‌کشی (شکل ۹) نشان می‌دهد که شوری زهاب در هر محل با زمان تقریباً ثابت است. شوری زهاب در جمع‌کننده‌ها (نقاط P1 و P2) در حدود ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر و در زه‌کش اصلی (نقطه P3) در حدود ۳۳ دسی‌زیمنس بر متر باقی مانده است. این شرایط نشان می‌دهد که سیستم زه‌کشی به شرایط ماندگار یا شبه ماندگار نزدیک شده است.



شکل ۹- تغییرات شوری زهاب در جمع‌کننده (نقاط P1 و P2) و زه‌کش اصلی (نقطه P3) با زمان

نگاهی به نقشه تغییرات شوری خاک (شکل ۷ ب) و شوری زهاب (شکل ۱۰) در محدوده مورد بررسی نشان می‌دهد که حداکثر مقدار شوری در کناره‌های پروژه واقع شده است. این بدان معنی است که زه‌کشی و کنترل املاح توسط زه‌کش‌های مزارع به‌خوبی انجام شده است، به‌نحوی که شوری زهاب در مرکز پروژه حدود ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر است که با توجه به شوری آب آبیاری در این محل حتی کمتر از مقادیر طراحی است.



شکل ۱۰- تخمین تغییرات شوری زه آب در محدوده مورد مطالعه

حال آن که در حاشیه پروژه و جایی که وظیفه زه کشی به جمع کننده ها و نه‌رهای زه کش اصلی سپرده شده است، شوری زه آب به بیش از ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر بالغ شده است و همین مکان‌ها نیز دارای حداکثر شوری خاک می‌باشند. همچنین این الگوی تغییرات شوری نمی‌تواند تماماً مربوط به شوری آب آبیاری باشد، چرا که بر اساس الگوی تغییرپذیری شوری آب آبیاری (شکل ۱۰) برخی از این مناطق حاشیه‌ای از شوری آب آبیاری کمتری هم برخوردار بوده‌اند که در اثر تجمع املاح در خاک به دلیل زه کشی ناکافی، مقدار شوری خاک افزایش یافته است.

بحث

شوری خاک در محدوده مورد مطالعه تغییرپذیری زیادی را نشان داد. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقادیر اندازه‌گیری شده شوری تا حدود ۱۴۰ دسی‌زیمنس بر متر نیز می‌رسد. در حالی که مقادیر شوری در اراضی زه کشی شده که تحت کشت پسته نیز هستند به مراتب کاهش یافته است. در عمده مناطق تحت آبیاری و زه کشی شوری خاک در محدوده زیر ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر و متناسب با شوری آب آبیاری کنترل شده است. این موضوع نشان می‌دهد که سیستم آبیاری و زه کشی توانسته است در کنترل شوری خاک تا حدود زیادی موفق باشد. شوری زه آب در محدوده مورد بررسی بالاتر از شوری منابع آبی است که برای آبیاری استفاده می‌شود. این موضوع هرچند طبیعی است ولی لزوم مدیریت دقیق منابع آب آبیاری برای کاهش حجم زه آب و جلوگیری از شور شدن منابع آب برگشتی زه آب را تا حد امکان یادآور می‌شود (Oster et al., 2022).

به‌منظور کاهش حجم زه آب، آبیاری دقیق و استفاده از روش‌های نوین آبیاری می‌تواند اثربخش باشد. استفاده از این گونه روش‌ها می‌تواند منجر به پایداری استفاده از منابع آب برای آبیاری به‌خصوص در شرایط شور باشد (Ferreira et al., 2024). هرچند در مورد محصولات باغبانی با عمق ریشه زیاد و نیز در شرایط آبیاری با آب‌های شور، تنظیم میزان آبیاری و آبشویی از اهمیت بیشتری برخوردار است. نتایج بررسی (Shamsi et al., 2022) در شمال اردکان در استان یزد نشان داد که میزان کسر آبشویی مورد استفاده در باغات پسته بطور متوسط حدود ۴۰ درصد است که تداوم کاربرد این مقدار آبشویی و زه کشی متعاقب آن می‌تواند منجر به تلفات آب قابل توجهی شود. آبیاری میکرو یکی از روش‌هایی است که به‌خصوص برای آبیاری با آب‌های شور (Ayars and Corwin, 2024) و باغات پسته (Marino et al., 2019) با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش‌ها به دلیل امکان انجام آبیاری در حجم‌های کم و با تواتر بالا، امکان تامین دقیق نیاز آبی و هم‌زمان آبشویی موثر منافذ ریز خاک فراهم می‌شود.

در بررسی وضعیت عملکرد باغات پسته در منطقه مورد مطالعه، مشخص شد که عملکرد این باغات حتی در مقایسه با شرایط شور

متعارف پایین است. شوری آب آبیاری در محدوده‌ی مطالعاتی بین ۵ تا ۱۳ دسی‌زیمنس بر متر متغیر است. با توجه به اینکه برای آستانه تحمل به شوری پسته در عصاره اشباع خاک عدد ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر نیز گزارش شده است (Mehdi-Tounsi et al., 2017)، این مقدار بالا نیست و تجارب کشاورزی در شرایط مشابه در استان یزد نشان داده که می‌توان انتظار عملکردهای بالاتری را داشت. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که شوری خاک منطقه‌ی ریشه در دامنه‌ی گسترده‌ای از ۲ تا بیش از ۸۰ دسی‌زیمنس بر متر متغیر است که این موضوع به عدم مدیریت و کنترل شوری خاک در منطقه‌ی ریشه مرتبط است.

حتی در مواردی که شوری خاک به‌خوبی کنترل شده، عملکرد پایین است که می‌تواند به مدیریت نامناسب آبیاری مربوط باشد. بر اساس مطالعه‌ی گلدانی سپاسخواه و مفتون (۱۹۸۱)، دور آبیاری طولانی‌تر (۷ روزه) منجر به کاهش رشد قابل توجه نهال‌های پسته شده است. این کاهش به دلیل پتانسیل ماتریک بالا و کاهش دسترسی به آب قابل جذب رخ داده است. درختان بالغ به دلیل ریشه‌های عمیق‌تر ممکن است این اثر را در بازه‌ی زمانی طولانی‌تری تجربه کنند. با این حال، در منطقه‌ی مورد مطالعه، فاصله‌ی بین دو آبیاری بین ۲۴ تا ۳۶ روز است که منجر به تنش رطوبتی می‌شود. در گزارش‌هایی که در مقیاس وسیع برای مدیریت آبیاری باغات پسته در ایالت کالیفرنیا آمریکا نیز گزارش شده است (Marino et al., 2019) دور آبیاری در شرایط شور و غیر شور بین ۲ تا ۳ روز گزارش شده است تا تخلیه رطوبتی پروفیل خاک در محدوده ۵۰ درصد آب قابل استفاده حفظ شود.

برای بهینه‌سازی عملکرد، باید توازن بین عمق آبیاری (برای آیشویی نمک‌ها) و دور آبیاری (برای جلوگیری از تنش رطوبتی) برقرار شود. استفاده از روش‌های آبیاری پیشرفته‌تر مانند آبیاری قطره‌ای می‌تواند با افزایش کارایی مصرف آب، به حل این چالش کمک کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که روابط رگرسیون خطی بین مقادیر شوری خاک اندازه‌گیری شده و مقادیر قرائت دستگاه EM-38 در وضعیت افقی می‌تواند با دقت مناسب برای برآورد شوری خاک در نقاط نمونه‌برداری نشده مورد استفاده قرار گیرد. این نتایج بیانگر قابلیت بالای این روش در بهبود بهره‌وری زمانی و کاهش هزینه‌های نمونه‌برداری مستقیم است، به‌ویژه در مناطقی که دارای توزیع مکانی ناهمگن شوری خاک هستند.

همچنین، یافته‌های این تحقیق با نتایج مطالعات پیشین نظیر پژوهش‌های (Petsetidi & Kargas, 2023) همخوانی دارد. آنها نشان دادند که استفاده از روش‌های واسنجی خطی و غیرخطی، مانند رگرسیون خطی و مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر ویژگی‌های خاک، از جمله شوری، کمک کند. این هم‌سویی علمی، کاربردپذیری گسترده روش‌های مبتنی بر واسنجی داده‌های الکتروژئوفیزیکی را تایید می‌کند.

بهینه‌سازی متغیرهای مورد استفاده برای روش کریجینگ توانست دقت نقشه‌های درونیابی شده را تا سطح ۸۰ درصد ارتقا دهد. بطور مشابه احمد و همکاران از روش کریجینگ ساده به همراه دو روش دیگر درونیابی برای درونیابی نقشه تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در قطر استفاده کردند و بر اساس یافته‌های آنها نیز روش کریجینگ ساده بهترین روش برای درونیابی عمده متغیرهای کیفیت آب زیرزمینی بود (Ahmad et al., 2021).

تلفیق نتایج حاصل از سنجنده EM-38 با روش‌های نقشه‌برداری رقومی خاک به منظور استخراج موقعیت مناسب نقاط نمونه‌برداری، بهینه‌سازی پارامترهای مدل درونیابی کریجینگ و صحت‌سنجی نقشه رقومی شوری خاک توانست تصویر کامل‌تری از وضعیت شوری خاک در اراضی تحت آبیاری و زهکشی ارائه نماید که بر این اساس شوری خاک در مناطق تحت آبیاری و زهکشی بطور چشم‌گیری نسبت به خارج از محدوده باغات پسته کاهش یافته است که نشان از کارایی سیستم زهکشی در کنترل شوری خاک می‌باشد. به‌طور مشابه سلیم و همکاران از القای الکترومغناطیس برای تعیین تغییرپذیری مکانی شوری خاک در محدوده‌ای وسیع در شمال مصر استفاده کردند (Selim et al., 2025). نتایج صحت‌سنجی این مطالعه نیز نشان داد که معادله واسنجی منطقه‌ای قابل اعتماد بوده و می‌تواند بدون نیاز به واسنجی جدید برای نقشه‌برداری شوری خاک در مقیاس‌های بزرگ مکانی و زمانی استفاده شود. از آنجا که خاک‌های منطقه به طور متوسط تا شدیداً شور طبقه‌بندی شده‌اند، این روش می‌تواند با ارزیابی دقیق شوری خاک به بهبود مدیریت کشاورزی در این منطقه و مناطق مشابه کمک کند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- شریفی پور، مجید؛ حسن اقلی، علیرضا؛ لیاقت، عبدالمجید و ناصری، عبدعلی. (۱۳۹۹). عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک: چالش‌ها و راهکارها. *تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)*، ۵۱(۳)، ۷۳۷-۷۵۲.
- شریفی پور، مجید؛ علیزاده، حمزه‌علی؛ ناصری، عبدعلی؛ لیاقت، عبدالمجید و حسن اقلی، علیرضا. (۱۳۹۴). ملاحظات کشاورزی، زیست‌محیطی و اقتصادی در تعیین عمق زهکش‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک - مطالعه موردی دشت آزادگان. *مدیریت آب در کشاورزی*، ۲(۱)، ۸۰-۷۱.
- تقی‌زاده مهرجردی، روح‌الله؛ سرمیدیان، فریدون؛ امید، محمود؛ تومانیان، نورایر؛ ثواقبی، غلامرضا؛ روستا، محمد جواد و رحیمیان، محمدحسن. (۱۳۹۲). مقایسه روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و درخت تصمیم در تهیه نقشه رقومی خاک در منطقه اردکان. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۴(۲)، ۱۸۲-۱۷۳.
- تقی‌زاده مهرجردی، روح‌الله؛ سرمیدیان، فریدون؛ تازه، مهدی؛ امید، محمود؛ تومانیان، نورایر؛ روستا، محمد جواد؛ و رحیمیان، محمدحسن. (۱۳۹۳). مقایسه روش‌های مختلف نمونه‌برداری جهت پهنه‌بندی رقومی خاک در منطقه اردکان. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت آب‌خیز*، ۶(۴)، ۳۵۳-۳۶۳.
- نوری، حمیده و لیاقت، عبدالمجید. (۱۳۸۷). بررسی تأثیر مدیریت سطح ایستابی بر پروفیل شوری ناحیه توسعه ریشه در منطقه خشک ایران با استفاده از لایسیمتر. *کشاورزی*، ۱۰(۱)، ۱۸۸-۱۷۵.
- هاشمی‌نژاد، یوسف؛ همایی، مهدی و نوروزی، علیرضا. (۱۳۹۵). آنالیز حساسیت روش القای الکترومغناطیسی برای تعیین شوری خاک در مقیاس وسیع. *نشریه آب و خاک*، ۳۰(۴)، ۱۲۹۳-۱۲۸۲.
- هاشمی‌نژاد، یوسف؛ همایی، مهدی و نوروزی، علیرضا. (۱۳۹۴). تعیین تراکم نقاط و روش مناسب نمونه‌برداری برای ارزیابی شوری خاک پیش از نمونه‌برداری. *پژوهش‌های خاک*، ۲۹(۳)، ۳۵۰-۳۳۵.
- هاشمی‌نژاد، یوسف؛ همایی، مهدی و نوروزی، علیرضا. (۱۳۹۶). مدل سازی آماری شوری خاک در پهنه‌های گسترده. *آب و خاک*، ۳۱(۳)، ۹۴۲-۹۲۹.

REFERENCES

- Ahmad, A. Y., Saleh, I. A., Balakrishnan, P., & Al-Ghouti, M. A. (2021). Comparison GIS-Based interpolation methods for mapping groundwater quality in the state of Qatar. *Groundwater for Sustainable Development*, 13, 100573.
- Akram, S., Kashkouli, H. A., & Pazira, E. (2008). Sensitive variables controlling salinity and water table in a bio-drainage system. *Irrigation and drainage systems*, 22(3-4), 271-285.
- Ayars, J. E., & Corwin, D. L. (2024). Salinity management. In *Microirrigation for Crop Production* (pp. 133-155). Elsevier Science.
- Ayars, J. E., Hoffman, G. J., & Corwin, D. L. (2012). Leaching and root zone salinity control. In K. Tanji (Ed.), *Agricultural Salinity Assessment and Management*. Vol. 12, pp. 371-403.
- Bivand R, Pebesma E, Gomez-Rubio V (2013). *Applied spatial data analysis with R, Second edition*. Springer, NY. <https://asdar-book.org/>.
- Ferreira, C. S., Soares, P. R., Guilherme, R., Vitali, G., Boulet, A., Harrison, M. T., & Ferreira, A. J. (2024). Sustainable water management in horticulture: problems, premises, and promises. *Horticulturae*, 10(9), 951.
- FAO. (2024). Global status of salt-affected soils—Main report. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd3044en>.
- Farzaman, M., Bouksila, F., Paz, A. M., Santos, F. M., Zemni, N., Slama, F., & Triantafilis, J. (2023). Landscape-scale mapping of soil salinity with multi-height electromagnetic induction and quasi-3d inversion in Saharan Oasis, Tunisia. *Agricultural Water Management*, 284, 108330.
- Gräler B, Pebesma E, Heuvelink G. (2016). "Spatio-Temporal Interpolation using gstat." *The R Journal*, 8, 204-218. <https://journal.r-project.org/archive/2016/RJ-2016-014/index.html>.
- Hasheminejhad, Y., Homaee, M., Noroozi, A.A. (2015). Determining Proper Sampling Density and Strategy for Soil Salinity Assessment before Sampling. *Journal of Soil Research*. 29(3), 1282-1293. (In Persian).
- Hasheminejhad, Y., Homaee, M., Noroozi, A.A. (2016). Sensitivity Analysis of Electromagnetic Induction Technique to Determine Soil Salinity in Large-Scale. *Journal of Water and Soil*. 30(4), 335-350. (In Persian).
- Hasheminejhad, Y., Homaee, M., Noroozi, A.A. (2017). Statistical Modeling of Soil Salinity on Large Scale. *Journal of Water and Soil*. 31(3), 929-942. (In Persian).

- Herrero, J., & Pabuayon, I. L. B. (2021). The problem with “apparent electrical conductivity” in soil electromagnetic induction studies. *Advances in Agronomy*, 165, 161-173.
- Hijmans R. (2024). *Raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. R package version 3.6-30, <https://rspatial.org/raster>.
- Ivushkin, K., Bartholomeus, H., Bregt, A. K., Pulatov, A., Kempen, B., & De Sousa, L. (2019). Global mapping of soil salinity change. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111260.
- Marino, G., Zaccaria, D., Snyder, R.L., Lagos, O., Lampinen, B.D., Ferguson, L., Grattan, S.R., Little, C., Shapiro, K., Maskey, M.L. and Corwin, D.L. (2019). Actual evapotranspiration and tree performance of mature micro-irrigated pistachio orchards grown on saline-sodic soils in the San Joaquin Valley of California. *Agriculture*, 9(4), 76.
- Mehdi-Tounsi, H., Chelli-Chaabouni, A., Mahjoub-Boujnah, D., & Boukhris, M. (2017). Long-term field response of pistachio to irrigation water salinity. *Agricultural Water Management*, 185, 1-12.
- Mendicino, G., Akram, M., & Senatore, A. (2018). Numerical evaluation of the effects of increasing ratio of cropped to uncropped width on dry drainage efficiency in salty soils. *Irrigation and Drainage*, 67, 91-100.
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2006). A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences*, 32(9), 1378–1388.
- Mulder, V. L., Roudier, P., & Arrouays, D. (2023). Digital soil mapping-advancing the knowledge frontiers. *Frontiers in Soil Science*, 3, 1225672.
- Noory, H., Liaghat, A. (2008). The effect of water table management on soil salinity distribution in plant rhizosphere in semi-arid climatic conditions of Iran. *Journal of Agriculture*, 10(1), 175-189. (In Persian)
- Oosterbaan, R. (1994). Agricultural drainage criteria. In *Drainage Principles and Applications*. ILRI Publ. Vol. 16, pp. 635-688).
- Oosterbaan, R., & Abu Senna, M. (1989). Using Saltmod to predict drainage and salinity in the Nile Delta. In *ILRI Annual Report* (pp. 63-75).
- Oster, J. D., Quinn, N. W., Daigh, A. L., & Scudiero, E. (2022). Agricultural subsurface drainage water. In *Unconventional water resources* (pp. 157-195). Cham: Springer International Publishing.
- Parsinejad, M., & Akram, M. (2018). A Fresh Look at Drainage for Agriculture. *Irrigation and Drainage*, 67, 8-16.
- Pathirana, S., Lambot, S., Krishnapillai, M., Cheema, M., Smeaton, C., & Galagedara, L. (2023). Ground-penetrating radar and electromagnetic induction: Challenges and opportunities in agriculture. *Remote Sensing*, (11), 2932.
- Petsetidi, P. A., & Kargas, G. (2023). Assessment and Mapping of Soil Salinity Using the EM38 and EM38MK2 Sensors: A Focus on the Modeling Approaches. *Land*, 12(10), 1932.
- Rhoades, J.D. (1982). Soluble salts. In: Page AL (ed) *Methods of soil analysis*, part II, 2nd ed., ASA, Monograph No. 9, Madison, WI, pp 167–179. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr.9.2.2ed.c10>.
- Selim, T., Amer, A., Farzamian, M., Bouksila, F., Elkiki, M., & Eltarabily, M. G. (2025). Prediction of temporal and spatial soil salinity distributions using electromagnetic conductivity imaging and regional calibration. *Irrigation Science*, 1-19.
- Shamsi, S., Kamali, A., & Hasheminejad, Y. (2022). An approach to predict soil salinity changes in irrigated pistachio orchards (Ardakan, Yazd Province): A case study. *Journal of Soil Science Society of Iran*, 1(1), 1-10.
- Sharifipour, M., Hassanoghli, A., Liaghat, A. and Naseri, A. A. (2020). Installation Depth of Subsurface Drains in Arid and Semi-Arid Regions; Challenges and Solutions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(3), 737-752. doi: 10.22059/ijswr.2019.292663.668397. (In Persian)
- Sharifipour, M., Alizadeh, H. A., Naseri, A., Liaghat, A. M. and Hasanoghli, A. (2015). Agricultural, Environmental and Economic Considerations in Determining Pipe Drain Depth in Arid and Semi-Arid Regions- Case Study Azadegan Plain. *Water Management in Agriculture*, 2(1), 71-80. Soltani, M., Rahimikhoob, A., Sotoodehnia, A., (In Persian)
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Sarmadian, F., Omid, M., Savaghebi, G.R., Toomanian, N., Rousti, M.J., Rahimian, M.H. (2013). Comparison of artificial neural network and decision tree methods for mapping soil units in Ardakan region. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 44(2), 173-182. (In Persian)



- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Sarmadian, F., Tazeh, M., Omid, M., Toomanian, N., Rousta, M.J., Rahimian, MH. (2014). Comparison of different sampling methods for digital soil mapping in Ardakan region. *Watershed Engineering and Management*, 6(4), 353-363. (In Persian)
- Visconti, F., & De Paz, J. M. (2021). A semi-empirical model to predict the EM38 electromagnetic induction measurements of soils from basic ground properties. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 720-738 .
- Wang, W., & Sun, J. (2024). Estimation of soil salinity using satellite-based variables and machine learning methods. *Earth Science Informatics*, 1-13.
- Wang, F., Yang, S., Wei, Y., Shi, Q., & Ding, J. (2021). Characterizing soil salinity at multiple depth using electromagnetic induction and remote sensing data with random forests: A case study in Tarim River Basin of southern Xinjiang, China. *Science of the Total Environment*, 754, 142030.
- Zeraatpisheh, M., Jafari, A., Bodaghabadi, M. B., Ayoubi, S., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Toomanian, N., Xu, M. (2020). Conventional and digital soil mapping in Iran: Past, present, and future. *Catena*, 188, 104424 .