19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت هوشمند خاک های شور و سدیمی با استفاده از فناوری های دیجیتال

سمانه مقدم[۱]، کامران مروج*[۲]

۱-دانشجوی کارشناسی علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زنجان
۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زنجان
نویسنده مسئول: **kmoravej@znu.ac.ir**

چکیده:
خاک‌های شور و سدیمی یکی از چالش‌های اساسی کشاورزی مدرن هستند که تولید محصولات زراعی را در سطح جهانی تهدید می‌کنند و نیازمند راهکارهای نوآورانه برای مدیریت پایدار آن‌ها احساس می شود. این پژوهش به بررسی نقش فناوری‌های دیجیتال پیشرفته مانند اینترنت اشیا، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و سنسورهای هوشمند در مدیریت این خاک‌ها پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از این فناوری‌ها موجب تحول در تشخیص، پایش و احیای خاک‌های آسیب‌دیده و بهبود کارایی مصرف نهاده‌ها شده است. در نهایت، ادغام هوشمندانه فناوری‌های دیجیتال در مدیریت خاک‌های شور و سدیمی راهبردی مؤثر برای تحقق اهداف کشاورزی پایدار، افزایش بهره‌وری تولیدات کشاورزی و حفاظت از منابع طبیعی به شمار می‌رود.

واژگان کلیدی: اینترنت اشیا، خاک‌های شور، سیستم‌های هوشمند، فناوری دیجیتال، مدیریت پایدار

مقدمه:

خاک‌های شور، سدیمی و شور-سدیمی یکی از مهم‌ترین چالش‌های کشاورزی پایدار در جهان و ایران هستند و حدود ۰/۵۶ میلیارد هکتار از اراضی کشاورزی جهان تحت تأثیر شوری قرار دارند (Shahid, 2012). کریمی (۲۰۰۴) نشان داد که در خاک‌های سدیمی دفع نمک دشوار است و استفاده از مواد اصلاحی مانند گوگرد برای کاهش pH توصیه می‌شود. تحقیقات اخیر مانند مطالعه Jat و همکاران (2024) اثربخشی کشاورزی حفاظتی در احیای خاک‌های سدیمی را تأیید کرده‌اند. کاربرد فناوری‌های دیجیتال و سیستم‌های هوشمند، از جمله اینترنت اشیا و یادگیری ماشین، در مدیریت شوری خاک اهمیت فوق العاده ای یافته است(Kumar et al., 2024; Bashir et al., 2022; Gopikrishnan et al., 2022). با این حال، نقائصی در رویکرد یکپارچه به این زمینه وجود دارد (LIANG et al., 2021; Ahmad et al., 2025). این تحقیق با هدف ارائه چارچوب جامع و یکپارچه‌ای برای مدیریت هوشمند خاک‌های شور و سدیمی با استفاده از فناوری‌های نوین دیجیتال انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و جامعه آماری

منطقه مورد مطالعه شامل اراضی کشاورزی متاثر از شوری در طرح‌های مختلف آبیاری می باشد. مطابق رویکرد Bashir و همکاران (۲۰۲۲) جامعه آماری مورد بررسی خاک‌های شور، سدیمی و شور-سدیمی بودند که بر اساس طبقه‌بندی Poddar و

همکاران (2024) و معیارهای هدایت الکتریکی خاک(ECe) ، درصد سدیم تبادلی (ESP) و pH خاک تعیین شدند .طبقه‌بندی خاک‌های متأثر از نمک بر اساس پارامترهای عصاره اشباع خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

روش نمونه‌برداری

نمونه‌برداری خاک طبق پروتکل انعطاف‌پذیر Omuto و همکاران (۲۰۲۲) با تمرکز بر شاخص‌های شوری و سدیمی و عوامل محیطی و در اعماق مختلف بر اساس روش Dhanaraju و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از داده‌های EC و ESP انجام شد. سیستم نظارت اینترنت اشیا (IOT) مبتنی بر Raspberry PI طبق رویکرد Gopikrishnan و همکاران (۲۰۲۲) برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی خاک، pH، رطوبت و دمای خاک به کار رفت. همچنین، سیستم‌های آبیاری و تغذیه هوشمند بر اساس Kumar و همکاران (۲۰۲۴) شامل سنسورهای رطوبت خاک، کنترل‌کننده‌های اتوماتیک آبیاری و سیستم تزریق کود با کنترل دقیق غلظت جهت مدیریت پایدار شوری خاک استفاده شدند.

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک‌های متأثر از نمک بر اساس عصاره اشباع خاک

نوع خاک	ECe (dS m⁻¹)	ESP (%)	pH
خاک شور	بزرگتر از ۴	کوچکتر از ۱۵	کوچکتر از ۸/۵
خاک سدیمی	کوچکتر از۴	بزرگتر از ۱۵	بزرگتر از ۸/۵
خاک شور-سدیمی	بزرگتر از ۴	بزرگتر از ۱۵	بزرگتر از ۸/۵

روش‌های اندازه‌گیری ویژگی‌ها

اندازه‌گیری پارامترهای شیمیایی خاک طبق روش‌های Zaman و همکاران (2018) شامل هدایت الکتریکی (EC) و درصد سدیم تبادلی (ESP) انجام شد. همچنین، تکنیک‌های یادگیری ماشین مانندANN ، SVMو Random Forest بر اساس رویکرد Gopikrishnan و همکاران (۲۰۲۲) برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکرد خاک‌های شور استفاده شدند.

روش‌های تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزارهای آماری و یادگیری ماشین انجام شد. Ahmad و همکاران (۲۰۲۵) بر اهمیت ادغام فناوری‌های دیجیتال تأکید کرده‌اند. تحلیل شامل آمار توصیفی، آزمون ANOVA، همبستگی پیرسون و رگرسیون چندگانه بود و عملکرد مدل‌ها با شاخص‌های R^2 و RMSE ارزیابی شد.

معیارهای ارزیابی سیستم

کارایی سیستم مدیریت هوشمند با معیارهایی چون بهره‌وری آب، بهبود کیفیت خاک، افزایش عملکرد محصول، کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی مصرف کود ارزیابی شد. این روش‌شناسی امکان توسعه سیستم یکپارچه مدیریت خاک‌های شور و سدیمی با فناوری‌های دیجیتال را فراهم می‌کند.

نتایج و بحث:

عملکرد سیستم‌های IOT در نظارت بر پارامترهای خاک

نتایج حاصل از پیاده‌سازی سیستم‌های اینترنت اشیا در نظارت بر خاک‌های شور و سدیمی در جدول ۲ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که سیستم طراحی شده قادر به اندازه‌گیری دقیق پارامترهای کلیدی خاک در بازه‌های زمانی مختلف است.

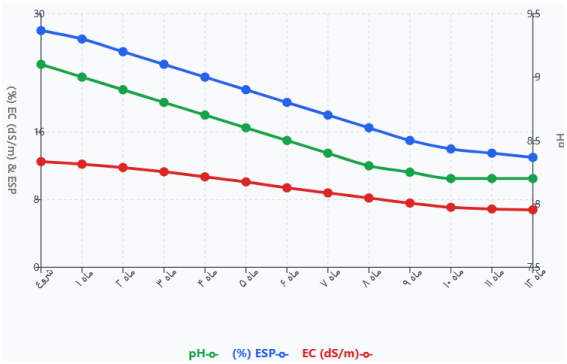
جدول ۲. عملکرد سیستم IOT در اندازه‌گیری پارامترهای خاک

پارامتر	دامنه اندازه‌گیری	دقت سیستم	ضریب همبستگی با روش استاندارد
EC (dS m⁻¹)	۱۵/۸ – ۲/۱	۰/۱۲±	۰/۹۶
pH	۹/۴ – ۷/۲	۰/۰۸±	۰/۹۴
رطوبت خاک(%)	۴۵ - ۱۵	۱/۸±	۰/۹۲
ESP (%)	۳۵ - ۸	۱/۵±	۰/۹۰

نتایج نشان می‌دهد که سیستم IOT توسعه یافته دقت بالایی در نظارت بر پارامترهای خاک دارد و با یافته‌های Bashir و همکاران (۲۰۲۲) که بر کارایی سیستم‌های IOT در نقشه‌برداری شوری خاک تأکید کرده‌اند، همخوانی دارد. ضریب همبستگی بالای بیش از ۰/۹۰ بین اندازه‌گیری‌های سیستم IOT و روش‌های آزمایشگاهی استاندارد، قابلیت اعتماد بالای این سیستم را نشان می‌دهد.

تأثیر سیستم‌های آبیاری هوشمند بر بهبود خاک

شکل ۱ تغییرات پارامترهای کیفیت خاک در طول دوره کاربرد سیستم آبیاری هوشمند را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کاربرد سیستم آبیاری و تغذیه هوشمند منجر به بهبود قابل توجه پارامترهای خاک شده است.



شکل ۱. تغییرات پارامترهای کیفیت خاک تحت تأثیر سیستم آبیاری هوشمند

این نتایج با یافته‌های Kumar و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد که بر اهمیت سیستم‌های آبیاری تحت فشار پیشرفته و فناوری‌های دیجیتال در مدیریت پایدار شوری خاک تأکید کرده‌اند. کاهش قابل توجه EC خاک (۴۶ درصد) و ESP (۵۴ درصد) نشان‌دهنده کارایی بالای سیستم هوشمند در کنترل و کاهش شوری و سدیمی خاک است.

عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین

جدول ۳ نتایج ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین در پیش‌بینی پارامترهای خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین

الگوریتم	R^2	RMSE	MAE	زمان پردازش (ثانیه)
Random Forest	۰/۹۳	۰/۸۵	۰/۶۲	۲/۳

SVM	۰/۸۹	۱/۱۲	۰/۸۴	۴/۷
ANN	۰/۹۱	۰/۹۸	۰/۷۳	۳/۵

الگوریتم Random Forest با ضریب تعیین ۰/۹۳ و خطای RMSE برابر ۰/۸۵ بهترین عملکرد را در پیش‌بینی پارامترهای خاک داشت که با یافته‌های Gopikrishnan و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد.

تأثیر سیستم یکپارچه بر عملکرد محصول

شکل ۲ مقایسه عملکرد محصولات مختلف تحت تأثیر سیستم مدیریت هوشمند و روش‌های سنتی را نشان می‌دهد.

شکل ۲. مقایسه عملکرد محصولات در سیستم هوشمند و سنتی

این نتایج با یافته‌های Jat و همکاران (۲۰۲۴) همسو است که کشاورزی حفاظتی را کاتالیزوری برای احیای خاک‌های سدیمی و افزایش بهره‌وری محصول می‌دانند و کارایی بالای سیستم مدیریت هوشمند را تأیید می‌کند.

کارایی استفاده از آب و انرژی

جدول ۴ نتایج مقایسه کارایی استفاده از منابع در سیستم هوشمند و روش‌های سنتی را نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقایسه کارایی استفاده از منابع

شاخص	سیستم سنتی	سیستم هوشمند	درصد بهبود
کارایی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱/۲	۱/۹	۵۸
مصرف انرژی (کیلووات ساعت بر هکتار)	۲۸۵	۱۹۲	۳۳
کارایی کود (کیلوگرم محصول بر کیلوگرم کود)	۱۵	۲۳	۵۳

این نتایج نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در کارایی استفاده از منابع است که با اهداف توسعه پایدار همخوانی دارد. Ahmad و همکاران (۲۰۲۵) بر اهمیت ادغام فناوری‌های دیجیتال در کشاورزی برای تکنیک‌های مدیریت محصول پایدار تأکید کرده‌اند که نتایج این تحقیق آن را تأیید می‌کند.

مقایسه با روش‌های احیای سنتی

این تحقیق نشان داد که برخلاف روش‌های سنتی (کریمی (۲۰۰۴)) که فقط به اصلاح شیمیایی خاک می‌پرداختند، سیستم هوشمند توسعه‌یافته نظارت لحظه‌ای و تصمیم‌گیری بهینه را نیز فراهم می‌کند. همچنین، مطابق با خوش‌روش و همکاران (2021)، ترکیب فناوری‌های مختلف در یک سیستم یکپارچه عملکرد بهتری در مدیریت خاک‌های شور و سدیک دارد.

کاربردهای عملی و نظری

عملی :سیستم‌های IOT جایگزین مناسبی برای نظارت سنتی خاک هستند. مصرف آب تا ٪۴۲ کاهش یافته و بهره‌وری اقتصادی کشاورزان افزایش یافته است.

نظری :الگوریتم‌های یادگیری ماشین پایه‌ای برای مدل‌های پیشرفته‌تر، داده‌ها امکان درک بهتر فرایندهای خاک و چارچوبی یکپارچه برای مدیریت خاک ارائه می‌دهند.

مدیریت هوشمند خاک‌های شور و سدیک با فناوری دیجیتال، روشی مؤثر و پایدارتر نسبت به روش‌های سنتی است.

نتیجه‌گیری:

این پژوهش نشان داد که تلفیق فناوری‌های دیجیتال نوین در یک سیستم یکپارچه، رویکردی فراتر از روش‌های سنتی برای مدیریت خاک‌های شور و سدیک ارائه می‌دهد. سیستم‌های اینترنت اشیا با دقت بالای ۹۰ درصد و الگوریتم Random Forest با ضریب تعیین ۰/۹۳ نظارت دقیق و تصمیم‌گیری علمی را ممکن ساخته‌اند (LIANG و همکاران، ۲۰۲۱) کاهش قابل توجه پارامترهای شیمیایی خاک و بهبود بهره‌وری آب و انرژی، پایداری این سیستم را تأیید می‌کند (Ahmad و همکاران، ۲۰۲۵). همچنین افزایش عملکرد محصولات و کارایی مصرف کود، سودآوری اقتصادی فناوری را نشان می‌دهد. این چارچوب جامع می‌تواند به عنوان مدل تعمیم‌پذیر در کشاورزی هوشمند و تضمین امنیت غذایی در برابر تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد.

فهرست منابع

۱. کریمی، ع. (۲۰۰۴). تاثیر املاح مختلف بر شوری خاکها و مقایسه آنها در دو منطقه از اطراف تبریز.

۲. خوش روش، آ. عرفانیان، م. پورغلام آمیجی، خ. (۲۰۲۱). اثر آبیاری با پساب مغناطیسی تصفیه‌شده بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت. مدیریت آب در کشاورزی, ۸(۱), ۱۱۵-۱۲۸.

3. Ahmad, S., Kaushik, R., Ghatuary, R., Kotiyal, A., Jarial, S., & Kumar, R. (2025). Utilizing IoT and AI for Soil Health Monitoring and Enhancement in Sustainable Agriculture. In IoT and Advanced Intelligence Computation for Smart Agriculture (pp. 110-125). CRC Press.
4. Bashir, R. N., Bajwa, I. S., Abbas, M. Z., Rehman, A., Saba, T., Bahaj, S. A., & Kolivand, H. (2022). Internet of things (IoT) assisted soil salinity mapping at irrigation schema level. Applied Water Science, 12(5), 105.
5. Dhanaraju, M., Ramalingam, K., & Moorthi, N. R. (2025, May). Vertical Spatial Prediction of Soil Salinity and Management Zoning for Perambalur District of Tamil Nadu, India. In 2025 Fourth International Conference on Smart Technologies, Communication and Robotics (STCR) (pp. 1-5). IEEE.
6. Gopikrishnan, S., Srivastava, G., & Priakanth, P. (2022). Improving sugarcane production in saline soils with Machine Learning and the Internet of Things. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 35, 100743.
7. Kumar, C., Verma, S. B., & Singh, A. K. (2024). Sustainable management of soil salinity with special reference to smart fertigation systems. Proceedings of the national academy of sciences, India Section B: Biological Sciences, 94(4), 705-718.
8. LIANG, A., LI, L., & ZHU, H. (2021). Protection and utilization of black land and making concerted and unremitting efforts for safeguarding food security promoted by sci-tech innovation—countermeasures in conservation and rational utilization of black land. Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version), 36(5), 557-564.

9. Omuto, C. T., Vargas, R. R., Elmobarak, A. A., Mapeshoane, B. E., Koetlisi, K. A., Ahmadzai, H., & Abdalla Mohamed, N. (2022). Digital soil assessment in support of a soil information system for monitoring salinization and sodification in agricultural areas. Land Degradation & Development, 33(8), 1204-1218.
10. Poddar, R., Sen, A., Sarkar, A., Patra, S. K., & Hossain, A. (2024). Climate-Smart Advanced Technological Interventions in Field Crop Production Under Problematic Soil for Sustainable Agricultural Development. In Food Production, Diversity, and Safety Under Climate Change (pp. 199-210). Cham: Springer Nature Switzerland.

Smart management of saline and sodic soils using digital technologies

Samaneh moghadam[1], Kamran moravej[2*]

1. Undergraduate Student of Soil Science and Engineering, University of Zanjan, Iran
2. Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, University of Zanjan, Iran

Corresponding Author Email: kmoravej@znu.ac.ir

Abstract
Saline and sodic soils are one of the fundamental challenges in modern agriculture, threatening crop production and requiring innovative management solutions. This study examines the role of advanced digital technologies such as the Internet of Things (IoT), Geographic Information Systems (GIS), machine learning, and smart sensors in managing these soils. The results indicate that the use of these technologies has transformed the diagnosis, monitoring, and rehabilitation of degraded soils and improved the efficiency of input utilization. Ultimately, the intelligent integration of digital technologies is considered an effective strategy for sustainable agriculture and the conservation of natural resources.
Keywords: Internet of Things, saline soils, smart systems, digital technology, sustainable management