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

نورزدهمین 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

معرفی حسگرهای خاک و ابزارهای پوشیدنی گیاهی قابل استفاده در کشاورزی هوشمند

سید محمود انجوی‌نژاد[1*]، الهام نصیری[2]

۱- دانش آموخته دکتری تخصصی مدیریت منابع خاک، گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه شیراز؛ * پست الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله **(enjavimahmoud@gmail.com)**

۲- دانشجوی دکتری تخصصی مدیریت منابع خاک، گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه شیراز

چکیده

در کشاورزی هوشمند و دقیق، حسگرهای خاک و ابزارهای پوشیدنی گیاهی نقش اساسی در پایش و مدیریت بهینه وضعیت مزرعه ایفا می‌کنند. این فناوری‌ها با ثبت و تحلیل سیگنال‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و گیاه به‌صورت لحظه‌ای، امکان پایش دقیق شرایط زیستی و غیرزیستی را فراهم می‌سازند و با ارائه داده‌های کلیدی، تصمیم‌گیری بهینه برای رشد بهتر گیاه، مقابله با تنش‌ها و افزایش بهره‌وری محصول را ممکن می‌سازند. در این مقاله، پیشرفت‌های اخیر در زمینه انواع حسگرهای خاک، ابزارهای پوشیدنی برای گیاهان، و فناوری‌های پشتیبان مانند شبکه‌های حسگر بی‌سیم به‌صورت مختصر مرور شده است. هدف این بررسی، تبیین نقش این فناوری‌ها در تحول کشاورزی سنتی به سمت نظام‌های نوین و هوشمند است.

واژگان کلیدی: کشاورزی دقیق، مدیریت نوین مزرعه، مدیریت پایدار

مقدمه

کشاورزی هوشمند شامل مجموعه‌ای از فناوری‌ها است که حسگرها، سیستم‌های اطلاعاتی، ماشین‌آلات پیشرفته، و مدیریت آگاهانه را ترکیب می‌کند تا تولید را با در نظر گرفتن نوسانات و عدم قطعیت‌ها در سیستم‌های کشاورزی پایدار بهینه سازد. در میان این فناوری‌ها، سیستم‌های حسگر پیشرفته که سلامت و شرایط خاک و رشد محصول را نظارت می‌کنند، از اهمیت بالایی برخوردارند؛ زیرا داده‌های حیاتی را برای تصمیم‌گیری و مدیریت جمع‌آوری و ارزیابی می‌کنند. ویژگی‌های خاک و بیماری‌های گیاهی ممکن است الگوهای مکانی بلندمدت را تشکیل دهند، علاوه بر این، تغییرپذیری زمانی از الگوهای آب و هوایی و شیوه‌های مدیریتی ناشی می‌شود (Yin et al., 2021).

حسگرهای خاک به عنوان واسطه‌ای میان خاک و سامانه‌های هوشمند، قادر به اندازه‌گیری پارامترهایی مانند رطوبت، دما، پ‌هاش، هدایت الکتریکی و حتی مواد مغذی (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) هستند (Faqir et al. 2024). این داده‌ها برای مدیریت دقیق آبیاری، کنترل شوری و بهینه‌سازی مصرف کود حیاتی‌اند. در مطالعات گسترده‌ای نشان داده شده که حضور شبکه‌ای از حسگرهای خاک در مزارع می‌تواند میزان مصرف آب را کاهش دهد و بازدهی محصولات را افزایش دهد. (Soussi et al., 2024). همچنین، یک بررسی اخیر بر نقش حسگرهای خاک در پایداری کشاورزی تأکید می‌کند که «سنجش ترکیبات خاک با حسگرهای بی‌سیم در زمان واقعی» یکی از الزامات تحول در کشاورزی پایدار است(Sobhy & Anandhi, 2025).

در کنار حسگرهای خاک، ابزارهای پوشیدنی گیاهی یکی از مرزهای نوین در کشاورزی هوشمند به شمار می‌آیند. این دستگاه‌ها مستقیماً بر بخش‌هایی از گیاه مانند برگ یا ساقه نصب می‌شوند و پارامترهایی چون نرخ تعرق، غلظت برخی یون‌ها، تغییرات تنش و سیگنال‌های الکتروشیمیایی را اندازه‌گیری می‌کنند. به عنوان مثال، یک مرور اخیر به بررسی گسترده فناوری‌های

پوشیدنی گیاهی پرداخته و آن‌ها را از نظر عملکرد، محدودیت‌ها و چالش‌های آینده تحلیل کرده است (Yan et al., 2024). همچنین، در مقاله‌ای درباره‌ی «حسگرهای پوشیدنی انعطاف‌پذیر برای گیاهان»، مزایایی مانند انعطاف‌پذیری زیاد، سازگاری زیستی و مقیاس‌پذیری بالا برجسته شده‌اند (Yan et al., 2025).

ترکیب این دو گروه حسگر (خاک + پوشیدنی گیاهی) با زیرساخت‌های اینترنت اشیاء (IoT) و فناوری‌های تحلیل داده (مثل یادگیری ماشینی و هوش مصنوعی) امکان مدیریت دقیق‌تر منابع، پیش‌بینی تنش‌ها و بهینه‌سازی تصمیمات کشاورزی را فراهم می‌سازد. به این ترتیب کشاورزی هوشمند نه تنها به افزایش عملکرد محصولات کمک می‌کند بلکه در کاهش هدررفت آب، کود و انرژی نقش مؤثری ایفا می‌کند (Wu et al., 2025). در مجموع، معرفی و توسعه حسگرهای خاک و ابزارهای پوشیدنی گیاهی، از منظر تحقیقاتی و کاربردی، هم‌اکنون یکی از محورهای اساسی پیشرفت در کشاورزی دیجیتال هستند.

پیشرفت‌ها در حسگرهای خاک

حسگرهای خاک به طور مستقیم ویژگی‌های خاک را اندازه‌گیری می‌کنند و داده‌های حیاتی برای تصمیم‌گیری و مدیریت فراهم می‌آورند. در ادامه به پیشرفت‌ها در انواع متداول حسگرهای خاک پرداخته می‌شود:

حسگرهای رطوبت خاک

رطوبت خاک، یک پارامتر مهم برای ارزیابی سلامت خاک است و نقش کلیدی در رشد گیاه ایفا می‌کند (Al-Faraj & Al-Amoudi, 2025). این حسگرها برای تخمین میزان آب در خاک استفاده می‌شوند تا کشاورزان را از زمان و مقدار مناسب آبیاری مطلع سازند (شکل ۱). حسگرهای رطوبت خاک معمولاً شامل الکترودها، مدارهای انتقال و بخش الکترونیک برای پردازش سیگنال هستند. این حسگرها تغییرات ویژگی‌های خاک مربوط به محتوای آب را اندازه‌گیری می‌کنند، از جمله گذردهی دی‌الکتریک، پتانسیل ماتریسی و جرم خاک (Kumar et al., 2025). پیشرفت‌های اخیر شامل حسگرهای خازنی با دوام بالا و حسگرهای مبتنی بر بازتاب دامنه زمانی (TDR[1]) با دقت بالا هستند که به سیستم‌های اینترنت اشیا (IoT) برای پایش بی‌درنگ متصل می‌شوند(Bogena et al., 2022) . همچنین، استفاده از سنجش از راه دور با امواج مایکروویو نیز برای تخمین رطوبت خاک در مقیاس وسیع در حال توسعه است (Chen & Li, 2025) .

[1] Time-domain reflectometry

شکل ۱. حسگر رطوبت خاک

حسگرهای دمای خاک

دمای خاک، که بر جوانه‌زنی، گل‌دهی و فرآیندهای مختلف رشد گیاه تأثیر می‌گذارد، پارامتر مهمی برای کشاورزی است. حسگرهای دمای خاک از کاوشگرهای دما برای تبدیل تغییرات دما به سیگنال الکتریکی و الکترونیک برای تفسیر سیگنال استفاده می‌کنند(Hu et al., 2024) . این حسگرها معمولاً در کنار حسگرهای دیگر در سیستم‌های چندپارامتری به کار گرفته می‌شوند تا تصویری جامع از ریزمحیط خاک ارائه دهند (Kumar & Sharma, 2025) .

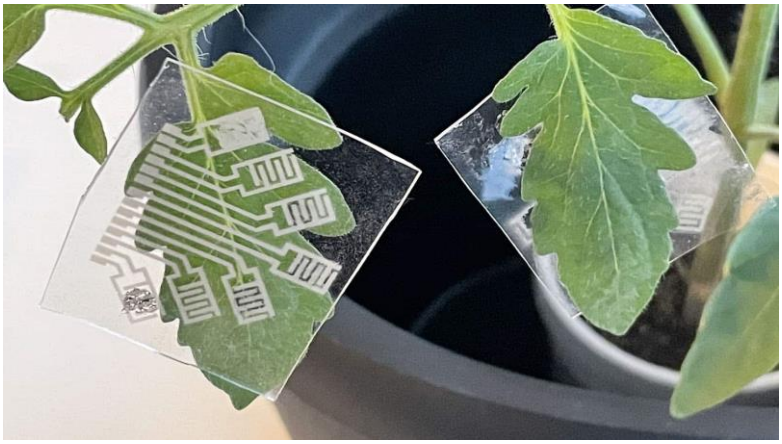
حسگرهای پ‌هاش خاک:

پ‌هاش خاک معیاری برای اسیدیته یا قلیایی بودن خاک است که نشان‌دهنده اثرات ترکیبی عوامل تشکیل‌دهنده خاک مانند مواد والد، ارگانیسم‌ها و اقلیم است. پ‌هاش خاک بر فعالیت‌های میکروبی و همچنین بر دسترس‌پذیری مواد مغذی مختلف برای گیاه تأثیر می‌گذارد. محدوده پ‌هاش بهینه برای رشد بیشتر گیاهان بین ۵/۵ تا ۷/۵ است (Patel & Singh, 2025). حسگرهای الکتروشیمیایی و نوری از جمله فناوری‌های اصلی برای اندازه‌گیری پ‌هاش خاک هستند که دقت و پایداری آن‌ها در حال بهبود است.

ابزارهای پوشیدنی گیاهی و شبکه‌های حسگر بی‌سیم :

فناوری‌های نوظهوری مانند ابزارهای پوشیدنی گیاهی و شبکه‌های حسگر بی‌سیم (WSNs) در حال تغییر چهره کشاورزی دقیق هستند (شکل ۲). ابزارهای پوشیدنی گیاهی قادر به ردیابی اطلاعات بیومتریک گیاهان در محل، مانند تنش‌های محیطی و سلامت گیاه، هستند (Wang, et al., 2024). این ابزارها امکان پایش مداوم و ارتباط از راه دور را فراهم می‌آورند و می‌توانند به عنوان ابزارهای قدرتمندی برای تحقیق در رابط بین گیاه و ریزمحیط، حفظ محیط‌های بهینه برای رشد گیاه و افزایش عملکرد محصول با حداقل ورودی‌های کشاورزی عمل کنند (Wang & Li, 2024) . حسگرهای پوشیدنی انعطاف‌پذیر، از جمله حسگرهای ترکیبات آلی فرار (VOC) که نشانگر سلامت گیاه هستند، در حال توسعه‌اند(Xu, 2025) .

شبکه‌های حسگر بی‌سیم امکان پایش بی‌درنگ محتوای آب خاک با وضوح مکانی و زمانی بالا را فراهم می‌کنند (Li et al., 2025). این شبکه‌ها معمولاً از سه جزء اصلی تشکیل شده‌اند: هماهنگ‌کننده برای ذخیره اطلاعات، مسیریاب برای انتقال داده‌ها و حسگرهای خاک برای تشخیص و ارتباط با گره‌های والد (Gao & Zhang, 2024) .



شکل ۲. ابزارهای پوشیدنی گیاهی

چالش‌ها و روندهای آینده

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، چالش‌هایی در استفاده گسترده از حسگرهای خاک و ابزارهای پوشیدنی گیاهی وجود دارد. این چالش‌ها شامل تداخل نویز، نیاز به مصرف انرژی پایین، قابلیت اطمینان، و هزینه‌های بالا برای استقرار در مقیاس وسیع است (Kumar & Sharma, 2025) . توسعه حسگرهای دقیق‌تر و مقاوم‌تر در برابر شرایط سخت محیطی و همچنین بهبود قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌ها و تحلیل آن‌ها با استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، از روندهای کلیدی آینده است (Shah & Kumar, 2023) .

روندهای آینده در حسگرهای خاک بر چهار جنبه اصلی متمرکز خواهد بود:

۱) بهبود عملکرد حسگر (مانند حساسیت و ویژگی) و قابلیت اطمینان برای پارامترهای کلیدی خاک؛

۲) توسعه WSN با مصرف انرژی پایین و قابلیت پردازش داده قدرتمند؛

۳) توسعه پلتفرم‌های حسگر خاک چندکاره برای جمع‌آوری داده‌های ریزمحیطی در زمان واقعی؛ و

۴) توسعه حسگرها و پلتفرم‌های حسگر خودگردان یا مستقل از انرژی که کم‌هزینه، قابل اعتماد و بدون نیاز به نگهداری باشند (Hu et al., 2024).

نتیجه‌گیری

حسگرهای خاک و ابزارهای پوشیدنی گیاهی به طور فزاینده‌ای نقش مهمی در کشاورزی هوشمند و دقیق ایفا می‌کنند. با پیشرفت‌های مداوم در فناوری‌های حسگری و شبکه‌های بی‌سیم، و همچنین ادغام با هوش مصنوعی و اینترنت اشیا، می‌توان انتظار داشت که این ابزارها به طور گسترده‌ای برای بهینه‌سازی تولید محصولات کشاورزی، کاهش مصرف منابع و مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی به کار گرفته شوند و به سمت کشاورزی پایدار حرکت کنیم (Patel & Singh, 2025) .

فهرست منابع

Al-Faraj, F. J., & Al-Amoudi, S. S. (2025). Advances In Soil Moisture Monitoring Technology. *International Water and Irrigation*.

Bogena, H. R., Huisman, J. A., Schilling, B., & Vereecken, H. (2022). Recent Developments in Wireless Soil Moisture Sensing to Support Scientific Research and Agricultural Management. *Sensors*, *22*(24), 9792.
Chen, S., & Li, H. (2025). Soil moisture estimation with microwave remote sensing: a systematic review and meta-analysis. *International Journal of Remote Sensing*, *46*(7), 2468413.
Faqir, Y., Qayoom, A., Erasmus, E., Schutte-Smith, M., & Visser, H. G. (2024). A review on the application of advanced soil and plant sensors in the agriculture sector. *Computers and Electronics in Agriculture*, *226*, 109385.
Gao, Y., & Zhang, Q. (2024). Review of Wireless Sensor Networks for Agricultural IoT. *Sensors*, *24*(8), 2379.
Guo, H., & Chen, L. (2023). Recent advances and prospects in wearable plant sensors. *ResearchGate*.
Hu, Y., Sun, S., Fan, D., & Yang, B. (2024). New horizons in smart plant sensors: key technologies, applications, and prospects. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1490801.
Kumar, S., & Sharma, M. (2025). The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now—A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. *Sensors*, *25*(12), 3583.
Kumar, V., Singh, K., & Jain, R. (2025). Assessing capacitance soil moisture sensors for precision irrigation scheduling in wheat crop. *CABI Agriculture and Bioscience*, *6*(1), 25.
Li, J., Zhang, C., & Wang, X. (2025). A Monitoring Method for Agricultural Soil Moisture Using Wireless Sensors and the Biswas Model. *Agriculture*, *15*(3), 344.
Pan, Z., & Wang, H. (2024). Recent Progress in Smart Sensing Systems for Agricultural Applications. *Journal of Sensors*, *2024*.
Patel, V., & Singh, R. (2025). Integration of smart sensors and IOT in precision agriculture: trends, challenges and future prospectives. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1587869.
Shah, G., & Kumar, A. (2023). Smart Agriculture using IoT and Machine Learning. *Smart Computing Techniques in Agriculture and Animal Husbandry*, 1-13.
Sobhy, D. M., & Anandhi, A. (2025). Soil Nutrient Monitoring Technologies for Sustainable Agriculture: A Systematic Review. *Sustainability*, 17(18), 8477.
Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trinchero, D., & Fossa, M. (2024). Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review. *Sensors*, 24(8), 2647.
Wang, Y., & Li, Q. (2024). Flexible wearable sensors for crop monitoring: a review. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1406074.
Wang, Y., Jiang, Y., & Yan, Y. (2024). Wearable Sensors for Plants: Status and Prospects. *Sensors*, *24*(1), 53.
Wu, S., Li, Y., Wang, Q., Cai, Y., Teng, P., Li, W., ... & Wang, S. (2025). Wearable Plant Sensing Devices for Health Monitoring. *Wearable Electronics*.
Xu, J. (2025). Advancing Wearable VOC Sensors: A Roadmap for Sustainable Agriculture and Real-Time Plant Health Monitoring. *ACS Publications - Chemical and Biological Engineering*.
Yan, B., Zhang, F., Wang, M., Zhang, Y., & Fu, S. (2024). Flexible wearable sensors for crop monitoring: A review. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1406074.
Yan, X., Pang, Y., Niu, K., Hu, B., Zhu, Z., Tan, Z., & Lei, H. (2025). Wearable Sensors for Plants: Status and Prospects. *Biosensors*, *15*(1), 53.
Yin, H., Cao, Y., Marelli, B., Zeng, X., Mason, A. J., & Cao, C. (2021). Soil Sensors and Plant Wearables for Smart and Precision Agriculture.

Introducing applicable soil sensors and plant wearables tools in smart agriculture

Sayyed Mahmoud Enjavinezhad[1*], Elham Nasiri[2]

1- PhD in Soil Resources Management, Department of Soil Science and Engineering, Shiraz University; * Corresponding Author's Email (enjavimahmoud@gmail.com)
2- PhD Student in Soil Resources Management, Department of Soil Science and Engineering, Shiraz University

Abstract

In smart and precision agriculture, soil sensors and plant wearables tools play a key role in monitoring and optimally managing the field. These technologies enable precise monitoring of biotic and abiotic conditions by recording and analyzing physical and chemical signals of soil and plants in real time, and by providing key data, they enable optimal decision-making for better plant growth, coping with stresses, and increasing crop productivity. In this article, recent advances in various types of soil sensors, plant wearables tools, and supporting technologies such as wireless sensor networks are briefly reviewed. The aim of this review is to explain the role of these technologies in the transformation of traditional agriculture towards modern and smart systems.

Keywords: Precision agriculture, modern farm management, sustainable management