



## مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

## Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture &amp; Natural Resources, University of Tehran



## حسگرهای پایش آلودگی خاک در کشاورزی: اصول، کاربردها و چشم اندازهای آینده

سمانه عبدوسی\*، رحمان شریفی<sup>۲</sup>

- ۱- کارشناس ارشد مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (تات)، ورامین، ایران؛ [sama.abdoosi@yahoo.com](mailto:sama.abdoosi@yahoo.com)
- ۲- عضو هیات علمی و استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (تات)، ورامین، ایران.

## چکیده

خاک به عنوان بستر اصلی امنیت غذایی و زیست محیطی، به طور فزاینده ای در معرض آلودگی توسط فلزات سنگین، آفتکش ها، هیدروکربنهای نفتی و کودهای شیمیایی قرار دارد. پایش مستمر و دقیق این آلاینده ها برای حفظ سلامت خاک، محصولات و در نهایت انسان امری ضروری است. روشهای سنتی آزمایشگاه محور، اگرچه دقیق هستند، اما اغلب پرهزینه، وقتگیر و فاقد قابلیت پایش (Real-time) میباشند. ظهور و توسعه فناوری حسگرها (Sensors) انقلابی در پایش آلودگی خاک ایجاد کرده است. این مقاله مروری به بررسی اصول کار، انواع، و کاربردهای حسگرهای مورد استفاده در پایش آلودگی خاک کشاورزی می پردازد. حسگرهای الکتروشیمیایی، نوری، زیستی (بایوسنسورها) و هیبریدی به عنوان پرکاربردترین انواع حسگرها مورد بحث قرار می گیرند. همچنین چالشهای پیشروی این فناوری، از جمله مسائل مربوط به کالیبراسیون در محیط های پیچیده خاک، مقیاس پذیری و هزینه، و نیز چشم اندازهای آینده مانند ادغام با هوش مصنوعی (AI) و شبکه های حسگر بی سیم (WSN) مورد بررسی قرار می گیرند. در نهایت، نتیجه گیری می شود که حسگرها با ارائه داده های بلادرنگ و با وضوح بالا، پتانسیل تبدیل شدن به ستون فقرات سیستم های مدیریت پایدار خاک و کشاورزی دقیق را دارند.

کلمات کلیدی: آلودگی خاک، حسگر (سنسور)، کشاورزی دقیق، فلزات سنگین، بایوسنسور.

## مقدمه

خاک سالم اساس کشاورزی پایدار و اکوسیستمهای مقاوم است. با این حال، فعالیت های کشاورزی شدید (استفاده بیش از حد از کودها و آفت کشها)، تخلیه صنعتی و شهری، منجر به انباشت آلاینده های مختلف در خاک شده است. این آلاینده ها نه تنها سلامت خاک و حاصلخیزی آن را کاهش می دهند، بلکه از طریق ورود به زنجیره غذایی به ویژه از طریق آب آشامیدنی تهدیدی جدی برای سلامت انسان محسوب می شوند (Rodriguez-Mozaz et al., 2010). بنابراین، پایش منظم و قابل اعتماد کیفیت خاک یک نیاز مبرم است. روش های تحلیلی مرسوم، مانند کروماتوگرافی گازی- طیف سنجی جرمی (GC-MS) و طیف سنجی جذب اتمی (AAS)، اگرچه بسیار دقیق هستند، اما به نمونه برداری مخرب، آماده سازی پیچیده نمونه و تجهیزات آزمایشگاهی گران قیمت نیاز دارند که آنها را برای پایش میدانی گسترده و سریع نامناسب می سازد (Wang, 2006). این محدودیت ها محرک اصلی توسعه فناوری حسگرها برای پایش خاک بوده است. حسگرها دستگاه های کوچک و قابل حملی



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress  
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران  
۲۷ تا ۲۹ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



هستند که قادر به تشخیص و اندازه گیری کمی آلاینده های خاص در خاک با حساسیت و انتخاب گری بالا، اغلب به صورت بلادرنگ یا نیمه بلادرنگ، هستند (Zhang et al., 2020).

### انواع آلاینده های خاک:

خاک به عنوان بستر اصلی تولید محصولات کشاورزی، در معرض آلودگی توسط مواد مختلفی قرار دارد که هر یک اثرات خاصی بر کیفیت خاک و سلامت اکوسیستم دارند. فلزات سنگین مانند کادمیوم، سرب و آرسنیک می‌توانند برای سالها در خاک باقی بمانند و به تدریج توسط گیاهان جذب شوند. این عناصر نه تنها رشد گیاه را مختل می‌کنند، بلکه از طریق زنجیره غذایی وارد بدن انسان شده و می‌توانند باعث بروز بیماری‌های مزمن از جمله سرطان شوند. فلزات سنگین و شبه فلزات (مانند کادمیوم، سرب، آرسنیک، جیوه، نیکل)، می‌توانند منشا طبیعی یا فعالیتهای انسانی (فعالیت های معدنی، پساب های صنعتی، لجن فاضلاب) داشته باشند. این عناصر غیرقابل تجزیه هستند و در خاک تجمع می یابند (Toth et al., 2016). آفت‌کش‌ها مانند (سموم علف کش، حشره کش، قارچ کش) نیز اگرچه در کنترل آفات مؤثر هستند، اما استفاده بی‌رویه از آنها می‌تواند تعادل طبیعی خاک را برهم بزند. این ترکیبات می‌توانند جمعیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک را کاهش داده و در درازمدت به حاصلخیزی خاک آسیب برسانند. همچنین باقی‌مانده این مواد می‌تواند به آب‌های زیرزمینی نفوذ کند و منابع آب را آلوده نمایند. باقیمانده این ترکیبات شیمیایی پس از کاربرد در مزارع می‌تواند برای مدت طولانی در خاک باقی بماند (Justino et al., 2017). هیدروکربن‌های نفتی (TPH) نیز معمولاً از طریق نشت از پالایشگاه‌ها، حوادث مربوط به نفت، پمپ‌بنزین‌ها یا تصادفات صنعتی وارد خاک می‌شوند (Das and Chandran., 2011). این ترکیبات می‌توانند ساختار فیزیکی خاک را تغییر داده و از نفوذپذیری آن بکاهند. همچنین برای بسیاری از موجودات زنده خاک سمی هستند و می‌توانند برای سال‌ها در خاک باقی بمانند. نیترات‌ها و فسفات‌ها که عمدتاً از طریق کودهای شیمیایی وارد خاک می‌شوند، اگرچه برای رشد گیاهان ضروری هستند، اما مصرف بیش از حد آنها منجر به یوتریفیکاسیون آب‌های زیرزمینی و سطحی می‌شود و می‌تواند مشکلات جدی ایجاد کنند (Carpenter et al., 1998). این ترکیبات می‌توانند به آب‌های زیرزمینی نفوذ کرده و کیفیت آب آشامیدنی را تحت تأثیر قرار دهند. همچنین ورود آنها به آب‌های سطحی می‌تواند باعث رشد جلبک‌ها و کاهش اکسیژن آب شود که به مرگ ماهی‌ها و دیگر آبزیان می‌انجام

### انواع حسگرهای پایش آلودگی خاک

حسگرها را میتوان بر اساس انتقال (Transducer) به دسته های اصلی زیر تقسیم بندی کرد:

### حسگرهای الکتروشیمیایی



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress

16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران

۱۴۰۴ شهریور ۲۷ تا ۲۵



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



این حسگرها با اندازه گیری تغییرات در خواص الکتریکی (جریان، پتانسیل، امپدانس) در پاسخ به برهمکنش بین آلاینده و عنصر حسگر (الکتروود) کار می کنند. آنها برای تشخیص فلزات سنگین و برخی آفت کشها بسیار محبوب هستند (Ronkanen et al., 2021).

**حسگرهای پتانسیومتری:** غلظت یون را بر اساس اندازه گیری پتانسیل الکتریکی اندازه گیری می کنند مانند الکترودهای یون انتخابی برای یونهای  $(NH_4^+, NO_3^-, Cd^{2+})$  (Bakker and Qin., 2002).

**حسگرهای آمپرومتری:** حسگرهای آمپرومتری با اندازه گیری جریان تولید شده از یک واکنش اکسیداسیون یا احیا در پتانسیل ثابت کار می کنند (Bard and Faulkner, 2001).

**حسگرهای رسانایی/امپدانسیمی:** تغییر در رسانایی یا امپدانس الکتریکی یک محیط را در اثر برهمکنش با آنالیت اندازه گیری می کنند (Lvova et al., 2017).

**حسگرهای نوری (اپتیکال)**

این حسگرها بر اساس برهمکنش بین نور و ماده کار می کنند. تغییر در ویژگی های نوری (شدت، طول موج، فاز) در اثر حضور آلاینده اندازه گیری می شود (McDonagh et al., 2008).

**فیبر نوری:** از یک فیبر نوری که با یک لایه حساس به آنالیت پوشش داده شده است استفاده می کند. حضور آلاینده باعث تغییر در ضریب شکست یا طیف جذب/فلورسانس نور منتشر شده در فیبر می شود (Borisov and Wolfbeis, 2008).

**طیف سنجی رامان و SERS:** طیف سنجی رامان یافته سطحی (SERS) با افزایش سیگنال رامان، امکان تشخیص مقادیر بسیار کم آلاینده ها را با اثرانگشت مولکولی منحصر به فرد فراهم می کند (Schlucker., 2014).

**حسگرهای رنگ سنجی:** تغییر رنگ در حضور یک آلاینده خاص کار می کنند. این تغییر رنگ را می توان با چشم غیرمسلح یا با استفاده از اسپکتروفتومترهای ساده یا حتی برنامه های تلفن هوشمند کرد (Zhang et al., 2020).

**بایوسنسورها (حسگرهای زیستی)**

بایوسنسورها دستگاه های آنالیتیکی هستند که یک عنصر زیستی مانند آنزیم، آنتی بادی، DNA یا کل سلول را با یک مبدل فیزیکی- شیمیایی ترکیب می کنند. عنصر زیستی به طور انتخابی با آلاینده هدف برهمکنش می کند و مبدل این برهمکنش را به یک سیگنال الکتریکی، نوری یا حرارتی قابل اندازه گیری تبدیل می کند. (Turner, 2013).

**آنزیم-بایوسنسورها:** برای تشخیص آفت کشها (که اغلب مهارکننده آنزیمها هستند) و فنولها استفاده میشوند (Verma and Bhardwaj, 2015).



## مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

### Holistic and Smart Soil and Water Management

#### دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

#### College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



ایمونوسنسورها: آنتی بادی هایی هستند که به طور خاص به یک آلاینده (مانند یک آفت کش خاص) متصل می شوند .  
(Justino et al., 2017)

بایوسنسورهای مبتنی بر DNA: برای تشخیص ترکیباتی که باعث آسیب به DNA می شوند، استفاده میگردند تشخیص آفت کش ها، توکسین ها، فلزات سنگین و آنتی بیوتیک ها (Kerman et al., 2008)

بایوسنسورهای کل سلول: از باکتری های زنده یا سایر میکروارگانیسم هایی که در پاسخ به آلاینده ها نور ساطع می کنند (بیولوژینسانس) یا تولید برق میکنند (بیولتاییک) استفاده می کنند (Belkin, 2003).

### حسگرهای هیبریدی و نوظهور

ترکیب چندین فناوری حسگری در یک پلتفرم واحد برای دستیابی به عملکرد برتر. برای مثال، ادغام نانومواد (مانند نانولوله های کربنی، گرافن، نانوذرات) در طراحی حسگرها به طور قابل توجهی حساسیت، انتخابگری و پایداری آنها را افزایش داده است (Ronkanen et al., 2021).

### چالشها و محدودیت ها

ماتریکس خاک (Soil Matrix): فاز جامد بنیان خاک را تشکیل می دهد و شامل ذرات معدنی و مواد آلی است. ذرات معدنی شامل کانی های اولیه مانند کوارتز، فلدسپات ها، الیوین ها، پیروکسن ها، آمفیبول ها و میکاها و همچنین کانی های ثانویه نظیر کائولینیت، مونتوریلونیت-اسمکتیت، ایلیت و کلریت هستند. مواد آلی طیف وسیعی از بقایای گیاهی و جانوری با تجزیه شدگی کم تا هوموس پایدار را در بر می گیرند. فاز جامد، ماتریکس یا اسکلت خاک (soil matrix or skeleton) را تشکیل می دهد که یک محیط بسیار پیچیده و ناهمگن است و حاوی ذرات معدنی و مواد آلی است. مواد آلی می توانند کمتر تجزیه شده (مانند برگ ها) یا تجزیه شده ها (مانند هوموس، اسیدهای هیومیک و فولویک) باشند. میکروارگانیسم هایی مانند باکتری ها، قارچ ها و ویروس ها نیز ممکن است وجود داشته باشند. هندسه ی ماتریکس خاک پیچیده است و از ذرات با اندازه ها و شکل های مختلف، خاکدانه ها، منافذ متصل به هم و جدا از هم و توده هایی از مولکول ها تشکیل شده است. ذرات خاک به صورت کره هایی با چینش های هندسی مختلف (مانند مکعبی و چهاروجهی) دیده میشوند (خنیفر، ۱۴۰۴). عوامل مختلفی مانند pH، محتوای رطوبت، بافت خاک (مانند درصد رس و شن)، و حضور مواد آلی می توانند به طور قابل توجهی بر عملکرد حسگر تأثیر گذاشته و با ایجاد تداخل، باعث کاهش دقت و قابلیت اطمینان اندازه گیری شوند (Kim et al., 2007).

آماده سازی نمونه و استخراج: برای بسیاری از حسگرها، به ویژه آنهایی که برای استفاده درجا (in-situ) طراحی شده اند، هنوز به یک مرحله ساده استخراج یا فیلتراسیون برای جلوگیری از مسدود شدن نیاز است (Wang, 2006).



## مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

## Holistic and Smart Soil and Water Management

## دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

## College of Agriculture &amp; Natural Resources, University of Tehran



انتخابگری (Selectivity): تشخیص یک آلاینده خاص در حضور سایر گونه های شیمیایی مشابه یک چالش بزرگ است (Pearson, 1963).

کالیبراسیون و پایداری بلندمدت: کالیبره نگه داشتن حسگرها در شرایط میدانی متغیر و اطمینان از پایداری خوانش آنها در طول زمان دشوار است (Gardner et al., 2014).

هزینه و مقیاس پذیر: هزینه هر حسگر ممکن است کم باشد، اما پایش یک مزرعه بزرگ به شبکه های بزرگی از حسگرها نیاز دارد که میتواند از نظر هزینه و مدیریت داده ها چالش برانگیز باشد (Farooq et al., 2020).

## نتیجه گیری

حسگرهای پیشرفته با توانایی ارائه داده‌هایی با وضوح بالا، در آستانه تحولی بنیادین در مدیریت پایدار خاک هستند. چالش‌های فعلی از جمله تداخل ماتریکس پیچیده خاک و نیاز به کالیبراسیون دقیق، با همگرایی فناوری‌های نوین در حال رفع هستند. ادغام این حسگرها با شبکه‌های اینترنت اشیا (IoT) و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، امکان ایجاد سیستم‌های هوشمند پیش‌بینی کننده را فراهم می‌کند که نه تنها قادر به پایش همزمان چندین آلاینده خواهند بود، بلکه توانایی تحلیل روندهای آلودگی و ارائه راهکارهای مدیریتی هدفمند را دارا می‌باشند. توسعه حسگرهای خود تغذیه شونده و کم‌هزینه با بهره‌گیری از نانومواد، افق دستیابی به پایش مستمر و مقرون به صرفه در مقیاس وسیع را هموار ساخته است. علیرغم چالش‌ها، آینده حسگرهای خاک بسیار روشن است. روندهای آینده شامل: ادغام با هوش مصنوعی و اینترنت اشیا (IoT)، که در شبکه های حسگر بی سیم (WSN) می‌توان داده‌ها را از حسگرهای توزیع شده در یک مزرعه جمع‌آوری کرده و به یک پلتفرم مرکزی ارسال کنند. الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند این داده‌های بزرگ (Big Data) را برای پیش‌بینی روند آلودگی، تهیه نقشه‌ها از توزیع آلاینده‌ها و ارائه توصیه‌های مدیریتی تجزیه و تحلیل کنند (Farooq et al., 2020). توسعه حسگرهای چندآلاینده (Multiplexed) که قادر به تشخیص همزمان چندین آلاینده مختلف در یک اندازه‌گیری هستند (Sharafeldin and Rusling, 2023). توسعه حسگرهای خود تغذیه (Energy Harvesting) که انرژی مورد نیاز خود را از محیط (مانند نور خورشید، ارتعاشات) تأمین می‌کنند و دارای سیستم مانیتورینگ هستند، امکان استقرار طولانی مدت و مستقل را فراهم می‌آورد (Paradiso and Starner, 2005). حسگرهای کم‌هزینه و قابل حمل که تولید انبوه این حسگرهای یکبارمصرف و بسیار ارزان می‌تواند توسط کشاورزان و بدون نیاز به متخصص مورد استفاده قرار گیرد (Zhang et al., 2020). در نتیجه می‌توان دریافت که حسگرهای نوین به‌عنوان هسته مرکزی کشاورزی دقیق و پایش محیطی، مسیر را برای انتقال از روش‌های سنتی پایش به سمت سیستم‌های یکپارچه، هوشمند و پیشگیرانه هموار می‌کنند. این فناوری‌ها با تبدیل داده‌های خام به اطلاعات عملی قابل تفسیر، امکان تصمیم‌گیری به موقع و مدیریت بهینه منابع خاک را فراهم می‌آورند. با تکامل روزافزون این فناوری‌ها، انتظار می‌رود حسگرهای خاک به ابزارهای ضروری در تحقق امنیت غذایی و حفاظت از محیط‌زیست تبدیل شوند.

منابع:



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress

16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران

۱۴۰۴ شهریور ۲۷ تا ۲۵



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



۱. خنیفر، ج. (۱۴۰۴). مبانی فیزیک خاک.

2. Bakker, E., Telting-Diaz, M. (2002). Electrochemical Sensors. *Analytical Chemistry*, 74(12), 2781–2800.
3. Bard, A. J., Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
4. Belkin, S. (2003). Microbial whole-cell sensing systems of environmental pollutants. *Current Opinion in Microbiology*, 6(3), 206-212.
5. Borisov, S. M., Wolfbeis, O. S. (2008). Optical biosensors. *Chemical Reviews*, 108(2), 423-461.
6. Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559–568.
7. Das, N., Chandran, P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. *Biotechnology Research International*, 2011, 941810.
8. Farooq, M.S., Riaz, SH., Abid, A., Umer, T., Bin Zikria, Y.(2020). Role of IoT Technology in Agriculture: A Systematic Literature Review. *Electronics* 2020, 9(2), 319
9. Gardner, J. W., Yinon, J., O'Connell, M. L. (2014). Calibration of chemical sensors. In M. L. Wang, J. P. Lynch, & H. Sohn (Eds.), *Sensor Technologies for Civil Infrastructure* (pp. 1–25). Woodhead Publishing.
10. Justino, C. I. L., Duarte, A. C., Rocha-Santos, T. A. P. (2017). Immunosensors for detection of pesticides residues in food matrices: Recent trends and future perspectives. *Trends in Analytical Chemistry*, 91, 25–33.
11. Kerman, K., Kobayashi, M., Tamiya, E. (2008). Electrochemical DNA biosensors for environmental monitoring. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 391(2), 455–471
12. Kim, H. J., Hummel, J. W., Birrell, S. J. (2007). Evaluation of nitrate and potassium ion-selective membranes for soil macronutrient sensing. *Transactions of the ASABE*, 50(1), 315–325.
13. Lvova, L., Nadporozhskaya, M. (2017). Chemical sensors for soil analysis: principles and applications *New Pesticides and Soil Sensors*. Pages 637-678
14. McDonagh, C., et al. (2008). Optical chemical sensors. *Chemical Reviews*, 108(2), 400-422.
15. Paradiso, J. A., Starner, T. (2005). Energy scavenging for mobile and wireless electronics. *IEEE Pervasive Computing*, 4(1), 18-27.
16. Pearson, R. G. (1963). Hard and soft acids and bases. *Journal of the American Chemical Society*, 85(22), 3533-3539.
17. Rodríguez-Mozaz, S., Weinberg, H.S. (2010). Meeting Report: Pharmaceuticals in Water—An Interdisciplinary Approach to a Public Health Challenge. *Environmental Health Perspectives* Volume 118, Issue 7



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress

16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران

۱۴۰۴ شهریور ۲۷ تا ۲۵



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



18. Ronkanen, A. K., Smith, J. D., Chen, L., & García, M. (2021). Electrochemical sensors for soil quality assessment. In K. Johnson (Ed.), *Sensors for Environmental Monitoring, Identification, and Assessment* (pp. 1-25). Elsevier Academic Press.
19. Schlucker, S. (2014). Surface-enhanced Raman spectroscopy: concepts and chemical applications. *Angewandte Chemie International Edition*, 53(19), 4756-4795.
20. Sharafeldin, M., Rusling, J. F. (2023). Multiplexed electrochemical assays for clinical applications. *Current Opinion in Electrochemistry* Volume 39.
21. Tóth, G., Hermann, T., Silva, M.R.D., Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, 299-309.
22. Turner, A. P. F. (2013). Biosensors: sense and sensibility. *Chemical Society Reviews*, 42(8), 3184-3196.
23. Verma, N., & Bhardwaj, A. (2015). Biosensor technology for pesticides—a review. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 175(6), 3093-3119.
24. Wang, J. (2006). *Analytical electrochemistry* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
25. Zhang, Y., Zhu, Y., Zeng, Z., Zeng, G., Xiao, R., Wang, Y., Hu, Y., Tang, L., Feng, C. (2020). Sensors for the environmental pollutant detection: Are we already there? . *Coordination Chemistry Reviews*. Volume 431

#### Soil pollution monitoring sensors in agriculture: principles, applications and future prospects

Samaneh Abdoosi\*<sup>1</sup>, Rahman Sharifi<sup>2</sup>

1- Senior Expert, Agricultural Research and Education Center, Tehran Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (TAT), Varamin, Iran; sama.abdoosi@yahoo.com

2- Faculty Member and Assistant Professor, Agricultural Research and Education Center, Tehran Province, Agricultural Research, Education and Extension Organization (TAT), Varamin, Iran.

#### Abstract

Soil, as the main substrate for food and environmental security, is increasingly exposed to contamination by heavy metals, pesticides, petroleum hydrocarbons, and chemical fertilizers. Continuous and accurate monitoring of these pollutants is essential to maintain the health of soil, crops, and ultimately humans. Traditional laboratory-based methods, although accurate, are often costly, time-consuming, and lack real-time monitoring capabilities. The emergence and development of sensor technology has revolutionized soil pollution monitoring. This review article reviews the working principles, types, and applications of sensors used in agricultural soil pollution monitoring. Electrochemical, optical, biological (biosensors), and hybrid sensors are discussed as the most widely used types of sensors. The challenges of advancing this technology, including issues related to calibration in complex soil environments, scalability, and cost, as well as future prospects such as integration with artificial intelligence (AI) and wireless sensor networks (WSN), are also reviewed. Finally, it is concluded that sensors have the potential to become the backbone of sustainable soil management systems



19<sup>th</sup> Iranian Soil Science Congress

16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران

۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



and precision agriculture by providing real-time, high-resolution data. Keywords: Soil pollution, sensor, precision agriculture, heavy metals, pesticides, biosensor.

**Keywords:** soil contamination, sensor, precision agriculture, heavy metals, biosensor.