

## کاربرد نانوحسگرها در تعیین رطوبت و دمای خاک\*

معصومه مهدی‌زاده<sup>۱</sup> و نصرت‌اله نجفی

دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. [m\\_mahdizadeh20@yahoo.com](mailto:m_mahdizadeh20@yahoo.com)

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. [n-najafi@tabrizu.ac.ir](mailto:n-najafi@tabrizu.ac.ir)

دریافت: دی ۱۳۹۶ و پذیرش: دی ۱۳۹۷

### چکیده

نانوحسگرها، حسگرهایی در ابعاد نانو هستند که دقت و واکنش‌پذیری بسیار بالایی دارند. لذا، نانوحسگر وسیله‌ای بسیار ظریف، دقیق و حساس است که قادر به شناسایی و پاسخ به محرک‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی است. استفاده از این نوع حسگرها در حوزه کشاورزی به‌ویژه در علوم خاک کمک زیادی به سنجش دقیق دما و رطوبت خاک خواهد کرد. همچنین به دلیل برخورداری از مزیت‌های ارتباط بی‌سیم، استفاده از این فناوری در مقایسه با روش‌های دیگر بسیار به‌صرفه‌تر، راحت‌تر و با سهولت بیشتر خواهد بود. از نانوحسگرهای استفاده شده در خاک می‌توان به نانولوله‌های کربن و گرافن، حسگر بی‌سیم، سامانه‌های میکروالکترومکانیکی مبتنی بر نانوفناوری اشاره کرد. در این مطالعه، امکان استفاده از دستگاه‌های ارزان‌قیمت بی‌سیم مبتنی بر فناوری نانو برای اندازه‌گیری دما و رطوبت خاک بررسی شد. سامانه‌های میکروالکترومکانیکی مبتنی بر نانوفناوری می‌توانند دما و رطوبت خاک را به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری نمایند. این سامانه‌ها از حسگرهای میکرو و نانو و یک عملگر تشکیل یافته‌اند که به تغییرات محیط پیرامون خود حساس هستند. حسگر سامانه‌های میکروالکترومکانیکی از اصل تنش برشی برای اندازه‌گیری بخار آب استفاده می‌کند که در آن تراشه میکرو حسگر با یک نانوپلیمر ویژه و مدار پیزومقاومتی پل ویستون ترکیب شده و ولتاژهای حاصل با رطوبت نسبی از صفر تا ۱۰۰ درصد و دما از ۳۰- تا ۱۰۰+ درجه سلسیوس رابطه خطی دارد. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از نقاط کوانتومی گرافن نیز می‌توان استفاده کرد که به مدت چهار ماه در خاک پایدار بوده و تغییر ناچیزی در مقاومت آن مشاهده شده است. زمان پاسخ حسگر بسیار سریع (حدود دو تا سه دقیقه) است. نانو ورقه‌های گرافن برای اندازه‌گیری سریع و دقیق رطوبت خاک مناسب است.

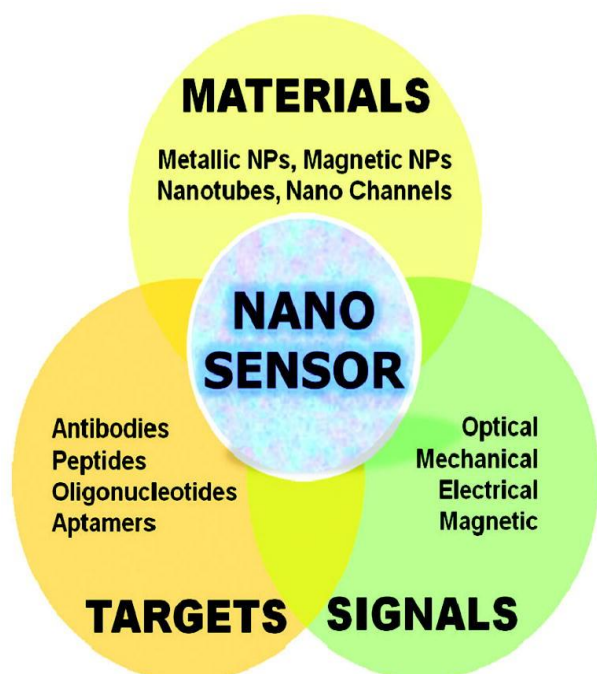
**واژه‌های کلیدی:** رطوبت خاک، دمای خاک، سامانه‌های میکروالکترومکانیکی، نقاط کوانتومی گرافن، نانوفناوری، نانوحسگر

\* بخش عمده مطالب این مقاله از مقاله انگلیسی با عنوان «Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors» گرفته شده است.

۱- آدرس نویسنده مسئول: گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

## مقدمه

را که معمولاً به شکلی متفاوت از شکل مورد نیاز جزء زیستی است از یک سامانه ثانویه دریافت نموده و آنرا به شکل قابل استفاده برای جزء زیستی حسگر تبدیل می نماید. حسگرهای زیستی قادر به ردیابی و تشخیص تغییرات به وجود آمده در یاخته ها و مولکول ها بوده و بدین طریق کاربر را قادر می سازند که نسبت به ارزیابی و شناسایی ماده ی مورد آزمون، حتی تحت شرایطی که مقدار بسیار ناچیزی از آن موجود باشد، اقدام نماید. با پیشرفت های انجام شده در عرصه فناوری نانو، طراحی و توسعه حسگرهای زیستی در آینده با تحولی شگرف مواجه خواهد شد. از نانومواد برای طراحی انواع جدیدی از حسگرهای زیستی استفاده می شود. این کار بر اثر عرضه وسایلی که کوچک، قابل حمل، کاربری آسان، ارزان قیمت و شدیداً حساس هستند، موجب ارتقای بسیار چشمگیر توان واکنش سامانه های کشاورزی نسبت به تغییرات محیطی مخرب می شود (کاراسکوسا و همکاران، ۲۰۰۶).



شکل ۱- اجزای نانوحسگرها (سویروزوسکا و همکاران، ۲۰۱۲).

## کاربرد نانوحسگرها در خاک

نصب و راه اندازی نانوحسگرها یا حسگرهای بی سیم در مقیاس نانو، در مزارع باعث پایش زمان واقعی

حسگر یا سنسور در اصل یک نوع مبدل انرژی است که می تواند برخی تغییرات ویژگی های مربوط به محیط اطرافش را تشخیص بدهد. حسگرها تغییرات در کمیت های مختلف را تشخیص داده و نتیجه را به صورت یک سیگنال خروجی متناظر با تغییرات حاصل شده که عموماً یک سیگنال الکتریکی یا نوری است، نمایش می دهند در واقع حسگرها تغییرات عوامل فیزیکی و شیمیایی را به تغییرات عوامل الکترونیکی تبدیل می کنند (ریزونی، ۲۰۰۰). حسگرها انواع مختلفی دارند و کاربردهای بسیار زیادی در زمینه های مختلف پیدا کرده اند. یکی از مهمترین انواع حسگرها که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته اند، نانوحسگرها هستند. نانوحسگر وسیله ای است بسیار ظریف و در عین حال دقیق و حساس که قادر به شناسایی و ارائه پاسخ به محرک های فیزیکی، شیمیایی و زیستی است. در نتیجه، یکی از مهمترین مشخصات مورد نیاز حسگرها و نانوحسگرها این است که حساسیت و قدرت تشخیص بالایی داشته باشند تا بتوان به داده های آنها اعتماد کرد (سویروزوسکا و همکاران، ۲۰۱۲). این نوع نانوحسگرها برای آشکارسازی همزمان چند آلاینده در نمونه های خاک با ظرفیت آشکارسازی حساسیت بالا به کار می رود. از نانوحسگرهای بی سیم که قادر به ردیابی و کنترل شرایط خاک و رشد گیاه هستند، در حال حاضر در بخش های خاصی از آمریکا و استرالیا استفاده می شوند (صوفیان و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین، فناوری نانو از نقش مهمی در توسعه حسگرهای زیستی نوین برخوردار است. با بکارگیری نانومواد مختلف امکان بهبود حساسیت و سایر ویژگی های حسگرهای زیستی وجود خواهد داشت. هر نانوحسگر از سه بخش مواد، هدف ها و سیگنال ها تشکیل شده است (شکل ۱).

هر حسگر زیستی متشکل از یک جزء زیستی نظیر یاخته، آنزیم و یا آنتی بادی است که این جزء زیستی به یک مبدل کوچک متصل شده است. مبدل انرژی خود

نانولوله‌های کربن و گرافن<sup>۳</sup>، حسگر بی‌سیم، سامانه‌های میکروالکترومکانیکی مبتنی بر نانوفناوری اشاره کرد.

### نانولوله‌های کربن و گرافن

گرافن ورقه‌ای دو بعدی (D۲) از اتم‌های کربن در یک پیکربندی شش ضلعی است. گرافن جدیدترین عضو خانواده مواد کربنی گرافیتی چند بعدی می‌باشد. این خانواده شامل فولرن به‌عنوان نانوماده‌ی صفر بعدی (D۰)، نانولوله‌های کربنی به‌عنوان نانوماده یک بعدی (D۱) و گرافیت به‌عنوان یک ماده سه بعدی (D۳) می‌باشد و شاید بتوان گفت جالب‌ترین نانوساختارها با کاربردهای بالقوه، نانولوله‌های کربنی است که به صورت یک ورقه گرافیت پیچیده شده با ساختار شش ضلعی تصور شده که پیوندهای انتهایی ورقه سبب بسته شدن صفحه و تشکیل لوله می‌گردد (ویلدر، ۱۹۹۸). نانولوله‌های کربنی به‌صورت تک‌جداره و چند جداره هستند (شکل ۲). با برش دادن دیواره نانولوله کربن تک‌جداره در راستای طول، یک صفحه از اتم‌های کربن به نام گرافن به‌دست می‌آید (شکل ۳).

این مولکول‌های کربن با نیروهای قوی واندروالس نگه‌داشته شده‌اند و در تصفیه آب و فاضلاب، وسایل ذخیره انرژی، محیط‌زیست و غیره کاربرد دارند. دلیل کاربردهای متعدد آن، انعطاف‌پذیری بالای آن است (ماکرو و همکاران، ۲۰۱۶). زمانی که در بخش کشاورزی استفاده شود، نانولوله‌های کربن چند جداره، یک نقش مفیدی در افزایش سرعت رشد، مصرف آب، جذب مواد غذایی ضروری از خاک بازی می‌کنند. بررسی‌ها نشان داده است که استفاده از نانولوله‌های کربن چند جداره با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در محصولاتی مانند ذرت، گندم، بادام زمینی و سیر باعث افزایش طول ریشه و ساقه، زمان جوانه‌زنی بذر، افزایش رشد و توسعه ریشه‌ها شد (آنتیا و راثو، ۲۰۱۴).

آبیاری خاک و تشخیص زودهنگام مشکلات بالقوه مانند کمبود و بیشبود عناصر غذایی و آب در خاک شده است (اسکوت و چن، ۲۰۰۳). در این زمینه، نانوحسگرها می‌توانند وسیله جدید برای افزایش دقت کشاورز برای شناسایی و اصلاح مشکلات زراعی در فاصله زمانی کوتاه باشد. نظارت مستمر بر رطوبت و دمای خاک در زمینه‌های مختلف مانند مهندسی آب، علوم خاک، هواشناسی، زراعت و غیره بسیار مهم است. رطوبت و دما همچنین، از عوامل مهم کنترل تبادل آب و انرژی گرمایی بین سطح زمین و جو از طریق تبخیر و تعرق گیاه هستند. روش‌های رایج اندازه‌گیری رطوبت و دمای خاک گران و وقت‌گیر بوده و عمدتاً رطوبت و دمای خاک از قبیل ضریب گاما، بازتاب زمانی امواج، جریان حرارتی خاک و غیره گران و وقت‌گیر می‌باشند. علاوه‌بر این، عوامل محیطی به‌طور قابل‌توجه نتایج حاصل از این روش‌های اندازه‌گیری را تغییر می‌دهند؛ بنابراین، به یک پردازش‌گر پیشرفته نیازمند است (نیمیک، ۱۹۹۸).

امروزه حسگرهای زیادی برای اندازه‌گیری رطوبت و دمای خاک در دسترس هستند اما دقت آنها کم و هزینه آنها زیاد است؛ بنابراین، دستگاه‌های مبتنی بر فناوری نانو در چند سال اخیر رواج یافته است. سامانه‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS)<sup>۱</sup> مبتنی بر نانوفناوری از حسگرهای نانو و میکرو و عملگرها<sup>۲</sup> تشکیل شده‌اند که به تغییرات محیط اطراف حساس بوده و توانایی پاسخ به تغییرات محیط با استفاده از کنترل ریزمدار را دارند (جایگیر، ۲۰۰۲). به‌طورکلی، از کاربردهای انواع نانوحسگرها در خاک می‌توان به (۱) پایش میزان درجه حرارت خاک، (۲) کنترل و پایش میزان رطوبت خاک، (۳) مشاهده و پایش شرایط کشت و نمایش دوره‌ای میزان عناصر غذایی و (۴) تشخیص میزان آلودگی خاک به فلزات سنگین اشاره نمود (فردان، ۱۹۹۳). از نانوحسگرهای استفاده شده در خاک می‌توان به

<sup>۱</sup>-Micro electro mechanical systems (MEMS)

<sup>۲</sup>-Actuators

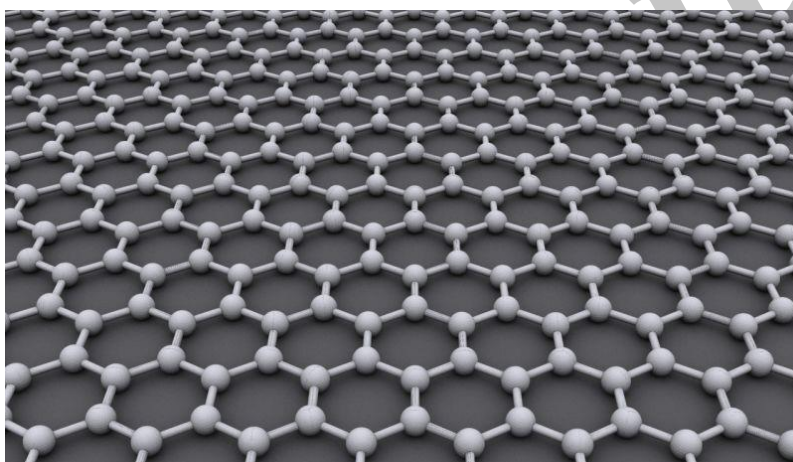
<sup>۳</sup>-Graphene quantum dots

میزان ۵۰ میلی گرم بر لیتر افزایش می یابد (الگا و گیونتر، ۲۰۱۶).

نانولوله های کربن به گیاهان برای حفظ آب خود کمک کرده و عملکرد گیاه با مصرف نانومواد به



شکل ۲- نانولوله های کربنی تک جداره (A) و چند جداره (B) (اعتمادی و همکاران، ۲۰۱۴)



شکل ۳- ساختار لانه زنبوری گرافن تک لایه (یونگ و همکاران، ۲۰۱۲)

یکی از ویژگی های حساس این کوانتوم نقطه ای است. کاربرد بالقوه GQDs به دلیل اندازه گیری سریع و دقیق رطوبت خاک در کشاورزی ارجحیت دارد (همین و همکاران، ۲۰۱۶).

#### شبکه های حسگر بی سیم

استفاده از فناوری شبکه حسگر بی سیم در کنار سامانه های تعبیه شده منجر به ظهور فناوری سامانه های میکروالکترومکانیکی شد که در آنها ریزپردازنده ها، حسگرها و مدارهای مخابراتی در یک سامانه قرار گرفته و با همدیگر در یک شبکه، اهدافی را دنبال می نمایند. این سامانه ها گره های حسگر نامیده می شوند و به شبکه ای که با یکدیگر تشکیل می دهند شبکه های حسگر گفته می شود

همچنین، از نانولوله های کربن و گرافن به دلیل سطح ویژه بالای این نانومواد در مقایسه با پلیمرها و اکسیدهای فلزی، برای ارزیابی رطوبت خاک استفاده می کنند. اخیراً، پژوهشگران حسگرها و دستگاه هایی بر اساس شکل های مختلف گرافن برای اندازه گیری رطوبت کشف کرده اند که مهمترین آن نقاط کوانتومی گرافن (GQDs) است (همین و همکاران، ۲۰۱۶). آنان نشان دادند که نقاط کوانتومی گرافن استفاده شده برای اندازه گیری رطوبت خاک به مدت چهار ماه در خاک پایدار بوده و تغییر بسیار ناچیزی در مقاومت با زمان مشاهده شد. زمان پاسخ حسگر حدود دو تا سه دقیقه بوده که بسیار سریع می باشد. جذب فیزیکی مولکول های آب (از طریق پیوند هیدروژنی) با مکان های فعال کوانتوم نقطه ای

نظارت مستمر بر شرایط خاک و محیط زیست به حفظ رشد مطلوب گیاه کمک می‌کنند.

#### سامانه‌های میکروالکترومکانیکی مبتنی بر نانو فناوری

سامانه‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) مبتنی بر نانو فناوری مجموعه‌ای از حسگرهای میکرو، نانو و عملگرها است که توانایی پاسخ به تغییرات محیط از طریق کنترل ریزمدار را دارند (جایگر، ۲۰۰۲). برخلاف میکروالکترونیک سنتی، این حسگرها متصل به ساختار آنتن برای ارائه سیگنال‌هایی در داخل ساختار میکروالکترومکانیکی برای حس و توابع اجرایی هستند. MEMS ترکیبی از فرآیند سیگنال‌دهی و قابلیت محاسبات آنالوگ و مجموعه مدارهای دیجیتال با طیف گسترده‌ای از عناصر غیرالکترونیک هستند (کول‌کلاسر، ۱۹۸۰).

#### اندازه‌گیری رطوبت و دمای خاک با سامانه‌های میکروالکترومکانیکی

پژوهشگران بر حسگر رطوبت خاک مبتنی بر پلیمر با استفاده از دستگاه‌های پلیمر MEMS تمرکز کرده‌اند که در آن تغییرات مقاومت متناسب با افزایش رطوبت خاک است (پالپارتی و همکاران، ۲۰۱۳). در حسگر کانتیلور<sup>۱</sup> مبتنی بر رطوبت خاک، از پلی‌آنیلین که یک ماده حساس به رطوبت بوده استفاده می‌شود (پاتیل و همکاران، ۲۰۱۴). پلی‌آنیلین یک پلیمر پیزومقاومتی بوده که با مولکول‌های آب خاک واکنش داده و در نتیجه ایجاد تنش بر روی کانتیلور شعاعی کرده که باعث انحراف کانتیلور شعاعی می‌شود (پاتیل و همکاران، ۲۰۱۴). به طور مشابه، حسگر کانتیلور مبتنی بر رطوبت خاک، دارای غشای نانوپلیمر حساس به آب بوده که در بالای کانتیلور قرار دارد (جکسون و همکاران، ۲۰۰۸). نقاط ضعف این حسگر مبتنی بر کانتیلور، بی‌ثباتی و گران بودن آن است. پژوهشگران برای کارایی بیشتر، در حال تولید مواد جدید

و با توجه به اینکه به صورت بی‌سیم به وجود می‌آیند، شبکه‌های حسگر بی‌سیم نام گرفته‌اند در واقع یک شبکه حسگر متشکل از تعداد زیادی گره‌های حسگری است که در یک محیط به طور گسترده پخش شده و به جمع‌آوری اطلاعات از محیط می‌پردازد. کم‌مصرف بودن، هزینه پایین، اندازه کوچک و قطعات توزیع شده در گره‌های حسگر بی‌سیم باعث شده است که پردازش محلی، ارتباطات بی‌سیم، جمع‌آوری و توزیع اطلاعات در شبکه‌های حسگر بی‌سیم به راحتی صورت پذیرد و به اطلاعاتی در مورد مکانی که امکان دسترسی به آن وجود ندارد به راحتی آگاهی داشت (چپارا و همکاران، ۲۰۰۹).

حدود ۸۵ درصد منابع آب شیرین جهان در صنعت کشاورزی مصرف می‌شود و این مقدار مصرف آب به دلیل افزایش جمعیت جهان همچنان ادامه دارد (جوکان و همکاران، ۲۰۱۴). با استفاده از شبکه حسگر بی‌سیم می‌توان در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. مورایس و همکاران (۲۰۰۵) یک شبکه جمع‌آوری داده بی‌سیم ساختند که با جمع‌آوری اطلاعات آب و هوا و رطوبت خاک آبیاری هوشمند را انجام می‌داد. باجیو (۲۰۰۵) طرحی اجرا کرد که در آن با استفاده از شبکه حسگر بی‌سیم، رطوبت و دما در نقاط مختلف مزرعه زمینی پایش می‌شد. ماژون و همکاران (۲۰۱۳) از شبکه حسگر بی‌سیم برای پایش رطوبت و دمای خاک در یک باغ سیب ۵۰۰۰ متر مربع استفاده کردند. آنان گزارش کردند که حسگر بی‌سیم رطوبت خاک را به طور دقیق اندازه‌گیری نموده اما باید با دقت مورد استفاده قرار گیرند زیرا دقت داده‌های جمع‌آوری شده به توانایی سامانه در حفظ و لتاژ ورودی و اعتبار سنجی منحنی کالیبراسیون بستگی دارد.

فن‌آوری بی‌سیم هنوز در مراحل اولیه استفاده بوده و نیازمند تمام آزمایش‌های مزرعه‌ای قبل از استفاده کامل است. با این وجود این نوع حسگرها در موقعیتی استفاده می‌شود که در آن امواج رادیویی و مبدل متصل شده به حسگرها قابلیت استفاده را داشته باشند (سیوکیونگ و همکاران، ۲۰۱۰). این نوع حسگرها با

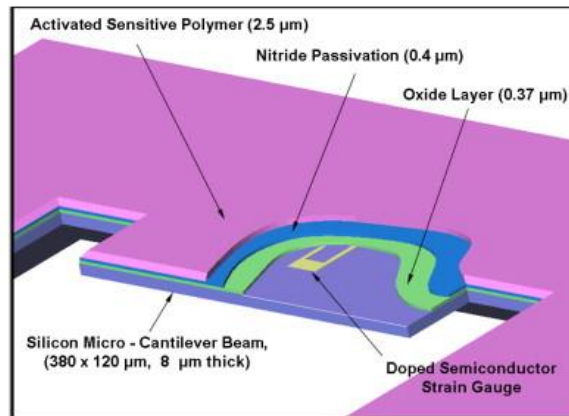
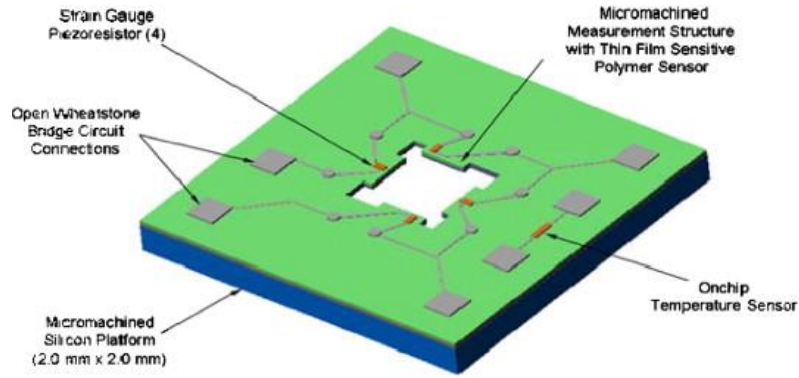
<sup>۱</sup>-Cantilever

حسگر پایش شده و با تغییر درجه حرارت بخار آب تغییر می‌کند. بررسی‌ها نشان داده که تغییر در مقاومت حسگر با توجه به رطوبت عمدتاً به ضخامت کانتلیور شعاعی و ضریب قابلیت ارتجاعی و مقدار تنش ایجاد شده در حدفاصل پلیمر/کانتلیور بستگی دارد. همچنین، مشخص شده که تنها ضخامت کانتلیور شعاعی و سفتی، حساسیت MEMS را تحت تأثیر قرار می‌دهد و این حساسیت مستقل از طول کانتلیور است. آزمایش‌های تجربی نشان داده است که داده خروجی MEMS منعکس کننده تغییر در مقدار رطوبت و دمای خاک است. با این حال، آزمایش‌های تجربی درازمدت مورد نیاز است تا دوام دستگاه پیشنهادی در خاک زمانی که برای مدت طولانی در خاک تعبیه می‌شود، ارزیابی شود. بر اساس آزمون واسنجی، MEMS یک رابطه خطی خوب با رطوبت نسبی و درجه حرارت، نشان داده است. با این حال، آزمایش‌های بیشتری برای ارزیابی تأثیر اجزای مختلف خاک بر پاسخ MEMS لازم است (جکسون و همکاران، ۲۰۰۸).

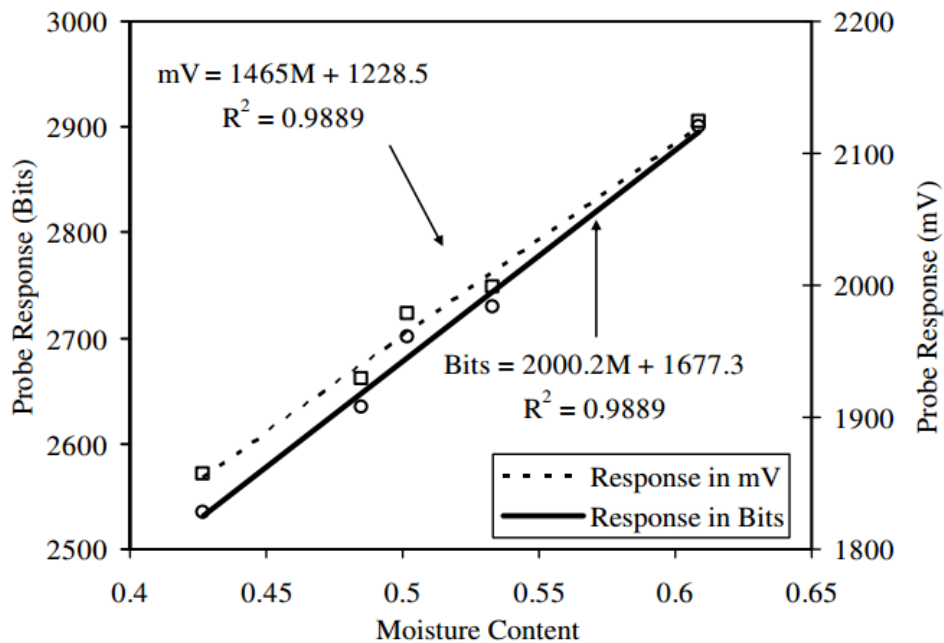
حساس به رطوبت هستند. امکان استفاده از پروب مبتنی بر MEMS بی‌سیم برای اندازه‌گیری درجه حرارت خاک و رطوبت خاک به‌طور آنالیتیکی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، حسگر MEMS متشکل از یک میکروکانتلیور وده که قادر به اندازه‌گیری هم‌زمان دما و رطوبت خاک است. حسگر MEMS بر اصل تنش برشی<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری بخار آب استوار بوده که در آن تراشه میکرو حسگر ترکیبی از نانوپلیمر اختصاصی حساس به رطوبت و مدار پیزومقاومتی پل ویت استون برای انتقال به دو ولتاژ خروجی DC بوده که به‌طور خطی با رطوبت نسبی صفر تا ۱۰۰ درصد و دمای ۳۰- تا ۱۰۰+ درجه سلسیوس متناسب است (شکل‌های ۵ و ۶). در واقع این شکل‌ها واسنجی الکتروود MEMS نسبت دما و رطوبت خاک را نشان می‌دهند. البته بهتر بود رطوبت و دما در محور عمودی شکل‌ها قرار داده شود تا با قرار دادن ولتاژ (میلی‌ولت) در معادله رگرسیون مقدار رطوبت و دمای خاک را تعیین کرد.

غشای نانوپلیمر حساس به بخار آب، به بالای هر کانتلیور متصل شده و برای انبساط و انقباض در طول قرار گرفتن در معرض بخار آب طراحی شده است. در طول عمل حسگر، مولکول‌های بخار آب محیط به مواد سطح غشای حساس جذب می‌شوند و توسط نیروهای ضعیف واندوالسی با توجه به ماهیت قطبی مولکول‌های آب نگه‌داشته می‌شوند. مولکول‌های آب پیوندهای قطبی با گروه‌های رادیکالی مولکول‌های پلیمر در داخل غشا تشکیل می‌دهند. تنش‌های ایجاد شده در حد فاصل غشا باعث انحراف کانتلیور می‌شود. این انحراف به عنوان تغییر مقاومت در برابر اندازه تنش، اندازه‌گیری شده و به‌طور خطی متناسب با تنش است. در نتیجه، غلظت بخار آب متناسب با تغییر اختلاف ولتاژ در مدار پل ویت استون است. درجه حرارت نیز توسط سنجش درجه حرارت بخار آب با استفاده از حسگر دمای تراشه و خروجی این

<sup>۱</sup>-Shear stress

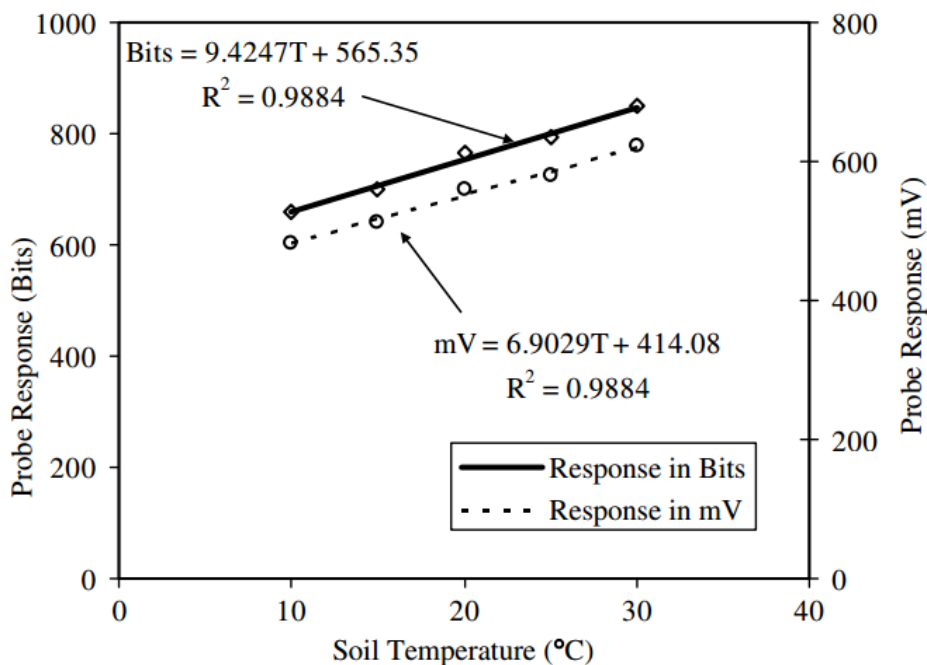


شکل ۴- ساختار حسگر MEMS برای اندازه‌گیری رطوبت و دمای خاک (جکسون و همکاران، ۲۰۰۸)



شکل ۵- اثر مقدار رطوبت خاک بر پاسخ الکترونیکی MEMS (جکسون و همکاران، ۲۰۰۸)





شکل ۶- اثر دمای خاک بر پاسخ الکتروود MEMS (جکسون و همکاران، ۲۰۰۸)

#### نتیجه گیری کلی

از نانوحسگرها مانند پروب مبتنی بر MEMS بی سیم برای اندازه گیری رطوبت و دمای خاک و نقاط کوانتومی گرافن برای اندازه گیری رطوبت خاک استفاده شده است. نتایج بررسی ها نشان داده که نقاط کوانتومی گرافن به مدت چهار ماه در خاک پایدار بوده و تغییر بسیار ناچیزی در مقاومت با زمان مشاهده شده است. زمان پاسخ حسگر حدود دو تا سه دقیقه بوده و بسیار سریع می باشد که کاربرد بالقوه QDs به دلیل اندازه گیری سریع و دقیق رطوبت خاک در کشاورزی ارجحیت دارد. همچنین، بررسی های تجربی نشان داده است که تغییر در مقاومت حسگر MEMS به دلیل رطوبت بوده که عمدتاً به ضخامت کانتلیور شعاعی و مقدار تنش برشی در حدفواصل پلیمر/کانتلیور وابسته است. همچنین، مشخص شده است که حساسیت MEMS تحت تأثیر ضخامت کانتلیور شعاعی بوده و مستقل از طول کانتلیور است. آزمایش های تجربی کوتاه مدت نشان داد که خروجی پروب مبتنی بر MEMS منعکس کننده تغییرات رطوبت و دمای خاک است. با این حال، آزمایش های تجربی دراز مدت، برای ارزیابی دوام و پایداری درازمدت دستگاه پیشنهادی زمانی

که به مدت طولانی در خاک استفاده شود لازم است. بر اساس آزمون واسنجی، MEMS رابطه خطی خوبی را نشان داد و معادلات خروجی MEMS به رطوبت نسبی و دما مربوط شدند. از طریق آزمایش های مزرعه ای، رطوبت و دمای خاک با استفاده از MEMS بی سیم به طور موفقیت آمیز پایش شد.

#### پیشنهادات ترویجی

تجربه کشورهای مختلف نشان داده است که رسیدن به این فن آوری یک فرآیند وقت گیر و گام به گام است که با مطالعات و آزمایش ها و انجام پروژه های کاربردی و مفصل قابل دستیابی است. بنابراین، اولین قدم در بحث استفاده از نانوفناوری در اصلاح خاک، شناسایی توانایی ها و قابلیت های بالقوه ای است که می تواند بسیاری از محدودیت ها را از سر راه برداشته و در نتیجه باعث محلی شدن این فن آوری گردد. اندازه ی کوچک و نسبت سطح به حجم بالای نانومواد می تواند سرآغاز بسیاری از اکتشافات حساس باشد. این ویژگی ها، امکان ساخت ابزار تشخیص آلودگی دقیق تر، کوچکتر و حساس تر (نانوحسگرها) را فراهم می کند. خاک و آب های



مسائل مربوط به بی‌سیم از جمله پردازش سیگنال، تأمین انرژی، محل ذخیره‌سازی داده‌ها، قابلیت‌های شبکه لازم است بررسی شود و در حال حاضر توسط نویسندگان در حال بررسی است. برای ترویج استفاده از این فناوری در پایش دما و رطوبت خاک، سالم‌سازی محیط زیست و کشاورزی، لازم است رسانه‌های عمومی مانند رادیو و تلویزیون و نشریات مختلف نسبت به معرفی این فناوری اقدام نمایند. البته در استفاده از فناوری نانو در علوم خاک لازم است میزان سمیت نانومواد بر ریزجانداران خاکریزی نیز مورد توجه قرار گیرد.

زیرزمینی‌ای که توسط کارخانه‌ها آلوده می‌شوند موضوعی پیچیده، بزرگ و نگران‌کننده است. این مناطق عموماً توسط فلزات سنگین و ترکیبات آلی آلوده می‌گردند. فناوری نانو می‌تواند با استفاده از نانوحسگرها روش‌های پاک‌سازی را دقیق‌تر و مقرون به صرفه کند. همچنین، یکی از مشکلات موجود در کشور، کم‌آبی و خشکسالی است از این رو در کشورهایی مانند ما نیاز دارند تا آبیاری مزارع به شیوه هوشمند و با استفاده از نانوحسگرها انجام شود.

همچنین، آزمایش‌های بیشتری برای ارزیابی تأثیر اجزای خاک بر پاسخ MEMS لازم است. همچنین،

### فهرست منابع

- Anita, S., and D.P. Rao. 2014. Enhancement of seed germination and plant growth of wheat, maize, peanut and garlic using multiwalled carbon nanotubes. *European Chemical Bulletin*. 3: 502-504.
- Baggio, A. 2005. Wireless sensor networks in precision agriculture. *ACM Workshop Real-World Wireless Sensor Networks*, Stockholm, Sweden.
- Carrascosa, L.G. 2006. Nanomechanical biosensors: a new sensing tool. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 25(3): 196-206.
- Colclaser, R.A. 1980. *Microelectronics Processing and Device Design*. John Wiley & Sons, New York.
- Eatemadi, A., H. Daraee, H. Karimkhanloo, M. Kouhi, N. Zarghami, A. Akbarzadeh, M. Abasi, Y. Hanifehpour, and S.W.Joo. 2014. Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications. *Nanoscale Research Letters*. 9(1): 393.
- Fraden, J. 1993. *AIP Handbook of Modern Sensors: Physics, Design and Applications*. American Institute of Physics, New York.
- Hemen, K., P. Vinay., B. Shojaei., and M. Aslama. 2016. Graphene quantum dot soil moisture sensor. *Sensors & Actuators, B: Chemical*. 233: 582-590.
- Jackson, T., M. Katrina., S. Mohamed., C. Tommy, and R. Peter. 2008. Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors. *Measurement*. 41: 381-390.
- Jaeger, R. 2002. *Introduction to Microelectronic Fabrication*. Volume V, Prentice Hall.
- Jeonghwan, H., S. Changsun., and Y. Hyun. 2010. Study on an agricultural environment monitoring server system using wireless sensor networks. *School of Information and Communication Engineering, Sunchon National University, Maegok-don*.
- Joaqun, G., F. Juan., M. Villa., N. Alejandra., and P. Miguel. 2014. Automatic irrigation system using wireless sensor network and GPRS module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 63(1): 166 – 176.
- Swierczewska, M., G. Liu, S. Lee, X.Chen. 2012. High sensitivity nanosensors for biomarker detection. *Chemical Society Reviews*. 41(7): 2641-2655.
- Majone, B., F. Viani., E. Filippi., A. Bellin., A. Massa., G. Toller., F. Robol and M. Salucci. 2013. Wireless sensor network deployment for monitoring soil moisture dynamics at the field scale. *Procedia Environmental Sciences*. 19: 426-435.
- Marco, N., L. Jinzhang., V. Kristy., and M. Nunzio. 2016. Synthesis and applications of carbon nanomaterials for energy generation and storage. *Beilstein Journal of Nanotechnol* 7:149-196.

15. Morais, R., Valente, A., and Serodio, C. 2005. Wireless sensor network for smart irrigation and environmental monitoring, EFITA/WCCA Joint Congress on IT in Agriculture, Portugal, pp. 845–850.
16. Nemec, T. 1998. Monitoring of moisture transport in building materials by neutron radiography, in: 7th European Conference on Non-Destructive Testing. 26–29.
17. Olga, Z., and N. Gunter. Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 3: 17.
18. Palaparthi, V.S., M. Shojaei-Baghini., and D.N. Singh. 2013. Review of polymer-based sensors for agriculture-related applications. Emerging Materials Research 2:166–180.
19. Patil, S.J., A. Adhikari., M. Shojaei-Baghini., and V. Ramgopal Rao. 2014. An ultra-sensitive piezoresistive polymer nano-composite microcantilever platform for humidity and soil moisture detection. Sensors & Actuators, B: Chemical. 203: 165–173.
20. Rizzoni, G. 2005. Principles and Applications of Electrical Engineering, 5th ed., McGraw-Hill, USA.
21. Scott, N.R., and H. Chen. 2003. Nanoscale science and engineering or agriculture and food systems. In: Roadmap Report of National Planning Workshop. Washington. D.C. Available from: <http://www.nseafs.cornell.edu/web.road>.
22. Sofian, Y., Harwin, A. Kurniawan, D. Adityawarman, and A. Indarto. 2012. Nanotechnologies in water and air pollution treatment. Environmental Technology. 1: 136-148.
23. Suiqiong, L.I., S. Aleksandr., and A. Bryan. 2010. Sensors for agriculture and the food industry. The Electrochemical Society Interface. Winter 2010: 41-46.
24. Wildoer, J.W.G., C.L. Venema, A.G. Rinzler, R.E. Smalley, and C. Dekker. 1998. Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes. Nature, 391(6662): 59-62.
25. Young, R.J., I.A. Kinloch, L. Gong, and K.S. Novoselov. 2012. The mechanics of graphene nanocomposites: A review. Composites Science and Technology. 72(12): 1459-1476.

Archive SID

## Application of nano-sensors in the determination of soil moisture and temperature

M. Mahdizadeh <sup>1</sup> and N. Najafi

PhD Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, East Azerbaijan, Iran.  
m\_mahdizadeh20@yahoo.com.

Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, East Azerbaijan, Iran. n-najafi@tabrizu.ac.ir

Received: January 2018, Accepted: January 2019

### Abstract

Nano-sensors are of extreme precision and reactivity, properties that make them delicate, precise, and sensitive instruments for identifying and responding to physical, chemical, and biological stimuli. Application of nano-sensors in agriculture and, especially in soil science, is a great help toward accurate measurement of soil temperature and moisture. Being equipped with wireless communication systems, they are more economical, easier to use, and user-friendly than other similar instruments. Carbon nanotubes and graphene, wireless sensors, and nanotechnology-based microelectromechanical systems are some of the nano-sensors used in soil investigations. This review study explores the feasibility of using nanotechnology-based, cheap, wireless devices consisting of microcantilever beams for the simultaneous measurement of soil temperature and moisture. The system relies on the principle of shear stress for measuring water vapor, in which a micro-sensor chip is combined with a proprietary nanopolymer sensing element and the Wheatstone bridge piezoresistor circuit to deliver two DC output voltages that are linearly proportional to relative humidity in the range of 0% to 100% and to temperature from -30 to 100 °C. The graphene quantum dots may be alternatively used to measure soil moisture; these remain stable for about 4 months exhibiting negligible changes in their resistance with time. The response time of the sensor is quite fast (around 2–3 minutes) and the graphene quantum dots are found appropriate for quick and accurate measurement of soil moisture.

**Keywords:** Graphene quantum dots, Microelectromechanical systems, Nanosensors, Nanotechnology, Soil moisture, Soil temperature

---

1 - Corresponding author: Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.