

سنة الفجر

نانو تکنولوژی و کاربرد آن در

طراحی کود های نانو

تالیف : علی اصغر سلیمی

## مقدمه

کودهای شیمیایی به طور معمول از طریق محلول پاشی یا به صورت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان، به دلیل وقوع معضلاتی مانند آبهویی، روان‌آب و تبخیر، تنها بخش اندکی از عناصر موثر کود به نقطه هدف می‌رسد که بسیار کمتر از حداقل غلظت موثر مورد نیاز گیاه است. از این رو، به منظور اعمال کنترل موثر بر وضعیت تغذیه‌ای گیاه به کاربرد مکرر کودهای شیمیایی نیاز است. با به‌کارگیری فناوری‌های نوین میتوان اقدام به طراحی و ساخت کودهایی کرد که از ویژگی‌هایی مانند رهاسازی کنترل‌شده عناصر در پاسخ به محرک‌های ویژه، فعالیت هدف‌گیری ارتقاء یافته، و رسانش آسان و ایمن عناصر برخوردارند و بدین طریق مانع از کاربرد مکرر کودهای شیمیایی شد. نانو فناوری، به عنوان یک فناوری نوظهور، نقش مهمی در بهینه‌سازی تکنیک‌های مدیریتی کشاورزی مرسوم برعهده دارد. به واسطه کاربرد نانو فناوری در طراحی و توسعه نانوکودها و نانوسیستم‌های رسانش عناصر غذایی به ریشه‌های گیاهان، می‌توان از طریق افزایش کارایی مصرف کودهای شیمیایی به دستاوردهای شگرفی مانند افزایش عملکرد محصول، کاهش هزینه‌های تولید، و حفاظت از محیط زیست نائل آمد.

## تاریخچه نانو فناوری

نقطه شروع و توسعه اولیه نانو فناوری به طور دقیق مشخص نیست. در حقیقت تاریخ نانو فناوری<sup>۱</sup> به دوران ماقبل تاریخ و زمانی که بشر اولیه از نانومواد طبیعی استفاده می‌کرد، برمی‌گردد. آموختیم که اولین مهندس نانو فناوری در حقیقت خود طبیعت بوده است. چنانچه به طور مثال مولکول‌های کربن در مقیاس نانومتری در حفرات دیواره غارها قرار گرفته که نتیجه آن باقی ماندن آنها برای هزاران سال است. در دوران صنعتی و پسا صنعتی و در صنایع برقی نیز کوچک‌سازی اجسام، مقوله جدیدی نبوده است. هزاران سال قبل و در خاور دور،

---

<sup>۱</sup> - Nano technology

کوچک بودن، ارزش و بهای ویژه‌ای داشته است. چنانچه در متون ادبی کلاسیک ژاپن در قرن دهم از کوچکی به عنوان زیبایی یاد شده است. در آثار باستانی دوران مختلف تاریخی همچون قرون وسطا نیز اثری از مواد نانو ساختار دیده شده است. شاید شیشه‌گران قرون وسطا را بتوان اولین فناوران نانو دانست. مطالعات نشان داده است که در شیشه‌های بسیار زیبای کلیساها در آن دوران از نانوذرات طلا استفاده شده است. البته این شیشه‌گران نمی‌دانستند که چرا با اضافه کردن طلا به شیشه رنگ آن تغییر می‌کند. نمونه مشهور دیگر، جام لیکرگوس در رم و متعلق به قرن چهارم میلادی است. این جام در نور روز به رنگ سبز دیده می‌شود ولی با تاباندن نور به داخل جام، به رنگ قرمز و صورتی دیده می‌شود. این خاصیت جالب نوری به دلیل وجود نانوذرات طلا و نقره به کار رفته در آن است. با این حال با توسعه علم و ابزارهای مطالعه خواص و ویژگی‌های مواد در قرن بیستم بود که مقیاس نانو و اهمیت آن شناخته و مورد توجه قرار گرفت. بسیاری از محققین ریچارد فاینمن<sup>۱</sup> (فیزیکدان و برنده جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۶۵) را پدر نانو فناوری دانسته‌اند. وی در سال ۱۹۵۹ در همایش جامعه فیزیک آمریکا طی یک سخنرانی، پیش‌بینی‌های جالب و انقلابی خود را بیان کرد. عنوان سخنرانی وی «فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد» بود. سخنرانی او شامل این مطلب بود که چرا نتوان تمام ۲۴ جلد دایره‌المعارف بریتانیا را روی یک سنجاق نگارش کرد؟ وی در آن سخنرانی این نکته را مطرح ساخت که اصول علم فیزیک چیزی جز امکان ساختن اتم به اتم اشیا را بیان نمی‌کند. فاینمن همچنین خطوط حکاکی شده‌ای روی یک سطح را فرض نمود که عرضی به اندازه تنها چند اتم داشته‌اند. وی پیشنهاد کرد که می‌توان اتم‌های مجزا را دستکاری کرد و مواد و ساختارهای کوچکی را تولید نمود که خواص متفاوتی دارند (در جلسه آینده به طور مفصل با پیشنهادهای فاینمن آشنا خواهید شد). اگر چه فاینمن مستقیماً به کلمه نانو اشاره‌ای نکرد ولی آشکارا مفهوم جهان نانو را مطرح کرده بود [۱].

در سال ۱۹۷۴ ناریو تاینگوچی<sup>۲</sup> استاد دانشگاه علوم توکیو برای اولین بار از واژه نانو فناوری استفاده کرد. وی این واژه را برای توصیف ابزار دقیقی که ابعادهای نزدیک به نانومتر است، استفاده کرد. در این ابعاد گرانش کاهش

---

۱ - Richard PHillips Feynman

۲ - Norio Taniguchi

یافته ولی در عین حال استحکام مواد افزایش می‌یابد. اختراع میکروسکوپ پروبی روبشی ۱ در سال ۱۹۸۱ در آزمایشگاه و در آزمایشگاه تحقیقاتی زوریخ *IBM* از دیگر اتفاقات تاثیرگذار بر توسعه علم نانو بود. از طریق این میکروسکوپ دانشمندان برای اولین بار توانستند اتم‌های مجزا را مشاهده کنند .

واژه نانو فناوری در سال ۱۹۸۶ توسط کی اریک درکسلر در کتابی تحت عنوان "موتور آفرینش آغاز دوران نانو فناوری" بازآفرینی و تعریف مجدد شد. وی این واژه را به شکل عمیق‌تری در رساله دکترای خود مورد بررسی قرار داده و بعدها آن را در کتابی تحت عنوان "نانوسیستم‌ها ماشین‌های مولکولی، چگونگی ساخت و محاسبات آنها" توسعه داد. در حقیقت درکسلر پایه‌گذار نانوفناوری مولکولی بوده است. وی شاگرد ماروین لی مینسکی<sup>۲</sup> پدر هوش مصنوعی بود. مینسکی گروهی از دانشجویان کامپیوتر را به صورت یک انجمن گرد یکدیگر جمع کرد. آنها بر اساس عقاید فاینمن ایده‌هایی را که نانو فناوری نامیده بود دنبال می‌کردند. تحقیقات درکسلر به شیمیدان‌ها نشان داد که چگونه علم مولکول‌ها و پیوندهای میان آنها می‌تواند به عنوان پایه توسعه هر چه بیشتر سیستم‌های ساخت ابزارها در نانو فناوری عمل کند. او همچنین به مهندسين و فیزیکدانان مسیر چگونه کوچک کردن سیستم‌های ماکرومولکولی به مقیاس‌های مولکولی را نشان داد. در دهه ۹۰ توسعه و پیشرفت نانو فناوری با سرعت بیشتری صورت گرفت. چنانچه در اواخر دهه ۸۰ و دهه ۹۰ میلادی اولین شرکت‌های فعال در حوزه نانو فناوری شروع به کار کردند [۲].

در سال ۱۹۹۱ نانو ساختار بسیار مهم دیگر نانولوله‌های کربنی<sup>۳</sup> توسط سومیو ایجیما<sup>۴</sup> و به وسیله میکروسکوپ الکترونی<sup>۵</sup> کشف شد. نانولوله‌های کربنی در واقع صفحاتی از گرافیت هستند که به شکل لوله درآمده‌اند. ایجیما در هنگام بررسی رسوبات کاتدی ناشی از گرافیت برای تولید فولرین در روش قوس الکتریکی این ساختار را شناسایی کرد. نانولوله‌های کربنی دارای خواص غیرعادی از لحاظ استحکام و رسانایی گرمایی و الکتریکی می‌باشند. توسعه نانومواد و روش‌های تولید آنها نیز به سرعت در دهه ۹۰ گسترش یافت. در دهه اول

---

۱ - Scanning probe microscopy

۲ - Marvin Lee Minsky

۳ - Carbon nanotube

۴ - Sumio Iijima

۵ - Scanning electron microscope

قرن بیست و یکم کنفرانس‌ها و همایش‌های تخصصی حوزه نانو فناوری آغاز به کار کردند. آرام آرام با شناخته شدن اهمیت و بزرگی این فناوری و نقشی که در آینده فنی و اقتصادی دنیا دارد، کشورهای بزرگ و پیشرفته برای بهره‌گیری از فرصت این فناوری برای بیشتر کردن فاصله خود با دنیا، وارد میدان مسابقه می‌شوند. چنانچه در سال ۲۰۰۰ ایالات متحده برای تمرکز و یکپارچه‌سازی تحقیقات حوزه نانو، برنامه توسعه ملی نانو فناوری را تصویب کرد. ژاپن در سال ۲۰۰۱، ۴۰۰ میلیون دلار و در سال ۲۰۰۴، ۹۶۰ میلیون دلار در این زمینه هزینه کرده و آمریکا برای این امر در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ حدود ۷/۳ میلیارد دلار اختصاص داده است. هرچند موج‌های علمی و فنی معمولاً با یک فاصله زمانی چند ده ساله به ایران می‌رسد، اما نانو فناوری در ایران، مسیری غیر از دیگر فناوری‌ها را در پیش می‌گیرد. در سال ۱۳۸۲ ستاد ویژه توسعه نانو فناوری به منظور توسعه همه جانبه این فناوری در کشور و در نهایت حصول ثروت از آن تشکیل گردیده، که نتیجه آن حضور ایران در میان ده کشور پیش رو در این حوزه فناوری برای سالیان متمادی است. امروزه نانو فناوری در اثرگذاری بر بسیاری از جنبه‌های زندگی مردم، بیش از هر کشف علمی‌ای موثر بوده است. می‌توانید کاربردها و اثرات آن را در حوزه‌های مختلف مشاهده کنید. از حوزه‌های پزشکی تا صنایع الکترونیکی تا محیط زیست. در بخش آینده با توجه به اهمیت سخنرانی ریچارد فاینمن به عنوان پدر علم نانو به بررسی پیشنهادهای او درباره حوزه نانو فناوری می‌پردازیم [۳]

## مقیاس نانو

پیشوند نانو از واژه یونانی نانو به معنای قدکوتاه<sup>۱</sup> استخراج شده است. نانو هم اکنون واژه شناخته شده برای بیشتر علوم پیشرفته و بسیاری از نانوواژه‌ها (واژه‌های مربوط به نانو) اخیراً در فرهنگ لغات وارد شده‌اند. اخیراً نانوفناوری به دلیل مزایای بالقوه زمینه‌های مختلف دنیای امروز را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد [۴].

---

<sup>۱</sup> - Dwarf

مطابق تعریف سازمان بین‌المللی استاندارد نانومواد به دو دسته کلی نانوشی و مواد نانساختار تقسیم می‌شوند. نانوشی ماده‌ای است که حداقل یکی از ابعاد آن در مقیاس نانو باشد. مطابق این تعریف نانوآشیا را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد.

نانوآشیا سه بعدی: یعنی موادی که در هر سه بعد نانومقیاس هستند. این دسته شمار بسیاری از نانومواد را در برمی‌گیرد. مهمترین نمونه‌های این مواد فولرین<sup>۱</sup>، نقاط کوانتومی<sup>۲</sup>، نانوذرات<sup>۳</sup> و نانوپودرها<sup>۴</sup> هستند.

نانوآشیا دوبعدی: موادی هستند که دو بعد آنها در مقیاس نانو هست. از مهمترین نمونه‌های این دسته می‌توان به نانولوله کربنی، نانوسیمها و نانوالیاف اشاره کرد.

نانوآشیا تک بعدی: موادی هستند که تنها در یک بعد نانو هستند و دو بعد دیگر آنها بزرگ‌تر از مقیاس نانو است. نانوروکشها، گرافن، تک‌لایه‌های خودآرا و فیلم‌های لانگمیر-بلاجت مثال‌هایی از این دسته هستند. [۵].

واژه‌هایی مانند نانومتر<sup>۵</sup>، نانساختار<sup>۶</sup>، نانولوله<sup>۷</sup>، نانوسیم<sup>۸</sup> و نانوربات<sup>۹</sup> از این قبیل هستند. نانو یک پیشوند اندازه به معنی یک بیلیونیوم یا  $10^{-9}$  است. نانو فناوری درباره ساختارها یا موادی با اندازه بسیار کوچک در حد چند نانومتر بحث می‌کند. یک نانومتر ( $10^{-9}$ )، تقریباً معادل طول ده اتم هیدروژن یا پنج اتم سیلیکون ردیف شده در یک خط است.

## چرا مقیاس نانو اهمیت دارد؟

خواص مواد را می‌توان به دو بخش خواص فیزیکی و خواص شیمیایی تقسیم‌بندی کرد. رنگ، شفافیت، خواص الکتریکی، خواص مغناطیسی، سختی، حلالیت، نقطه ذوب ویژگی‌هایی هستند که آنها را با نام خواص فیزیکی

---

<sup>۱</sup> - Fullerenes

<sup>۲</sup> - Quantum dots

<sup>۳</sup> - Nanoparticles

<sup>۴</sup> - Nanopowders

<sup>۵</sup> - Nanometer

<sup>۶</sup> - Nanostructure

<sup>۷</sup> - Nanotube

<sup>۸</sup> - Nanowire

<sup>۹</sup> - Nano robot

می‌شناسیم و سرعت واکنش، واکنش‌پذیری از جمله خواص شیمیایی هستند. تجربه چند هزار ساله زندگی انسان به او نشان داده که در شرایط عادی، ویژگی‌های یک ماده خاص تا حد قابل قبولی ثابت است و به این دلیل است که ما می‌توانیم مواد را از روی خواصشان شناسایی کنیم. موضوع جذابیت مقیاس نانو نیز مربوط به خواص مواد است. مواد در مقیاس نانومتر با اندازه کلی ۱ تا ۱۰۰ نانومتر به دلیل مساحت سطح تماس بالا خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی کاملاً متفاوت از خود نشان می‌دهند. این در حالی است که کوچک کردن ذرات یک تغییر فیزیکی است و ما انتظار نداریم که با این تغییر فیزیکی، ویژگی‌های اصلی ماده تغییر کند. این امر سبب اهمیت بیشتر مقیاس نانو نسبت به سایر مقیاس‌ها شود.

نقطه ذوب، خواص حرارتی، خواص الکتریکی، خواص مکانیکی و ده‌ها خاصیت فیزیکی و شیمیایی شناخته شده دیگر نیز در این مقیاس تغییر می‌کنند. گویا دیگر نمی‌توانیم بدون در نظر گرفتن اندازه ذرات یک ماده، آنرا از روی خواص شناسایی کنیم. برخی برای حل این مشکل پیشنهاد داده‌اند که یک بُعد دیگر به جدول تناوبی مندلیف اضافه کنیم. بدین معنی که برای مشخص کردن خواص یک عنصر، علاوه بر اینکه باید نام آن عنصر و جایگاه آن را در جدول مندلیف مشخص کنیم، لازم است که معلوم کنیم خواص عنصر را در چه ابعادی می‌خواهیم [۶ و ۷].

## کاربردهای نانو فناوری

برای نانو فناوری کاربردهایی را در حوزه های مختلف از جمله غذا، دارو، کشاورزی، پزشکی و زیست فناوری تا الکترونیک، کامپیوتر، حمل و نقل، انرژی، محیط زیست، مواد، هوافضا و امنیت ملی، پتروشیمی، علوم مواد، الکترونیک، کامپوترهای کوانتومی و غیره بر شمرده اند. کاربردهای وسیع این عرصه به همراه پیامدهای اجتماعی، سیاسی و حقوقی آن، این فناوری را به عنوان یک زمینه فرارشته ای مطرح نموده است. هر چند آزمایش‌ها و تحقیقات پیرامون نانو فناوری از ابتدای دهه ۸۰ قرن بیستم به طور جدی پیگیری شد، اما اثرات تحول آفرین، معجزه آسا و باور نکردنی نانو فناوری در روند تحقیق و توسعه باعث گردید که نظر تمامی



کشورهای بزرگ به این موضوع جلب گردد و نانو فناوری را به عنوان یکی از مهم ترین اولویت های پژوهشی خویش طی دهه اول قرن بیست و یکم محسوب نمایند .

## نانو فناوری و کشاورزی

علی‌رغم تلاش‌های صورت پذیرفته به وسیله‌ی دانشمندان بخش کشاورزی، همچنان بهره‌وری و بازدهی گیاهان زراعی کمتر از توان بالقوه‌ی آنها است. دلیل این امر بازدهی اندک آب و عناصر غذایی مورد استفاده‌ی گیاهان زراعی و تحمیل رقابت شدید از جانب آفات و علف‌های هرز بر گیاه است. نانو فناوری ، رویکرد علمی نوینی است که قادر به درهم‌شکستن این موانع بوده و انتظار می‌رود که در سال‌های آینده موجب افزایش عملکرد و کارایی گیاهان زراعی و پاسخگویی به چالش‌های فراروی امنیت غذایی بشر گردد . در حال حاضر، چالش عمده در جهان برای کشاورزی تغییر آب و هوا، شهرنشینی، استفاده پایدار از منابع طبیعی و مسائل زیست محیطی مانند تجمع سم‌ها و کودهای شیمیایی است. مشکلات بیشتر توسط افزایش نگران کننده در تقاضا مواد غذایی برای تغذیه جمعیت حدود ۶ تا ۹ بیلیون نفر تا سال ۲۰۵۰ تشدید خواهد شد [۸].

از نانو فناوری عمدتاً به منظور پاسخگویی به برخی از محدودیت‌ها و چالش‌های پیش‌روی بخش کشاورزی نظیر مدیریت علف‌های هرز در دسر ساز، تولید نانوکودهایی<sup>۱</sup> که به آهستگی و در تمام طول فصل رشد گیاه عناصر غذایی خود را آزاد کنند، رهاسازی کنترل شده‌ی آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها، مدیریت دقیق اجزای ریز خاک، مصرف کارآمدتر و دقیق‌تر نهاده‌های شیمیایی و تولید سمومی با فرمولاسیون‌های جدید برای کنترل آفات، استفاده می‌شود . از این رو استفاده از حامل‌های نانو مقیاس به دلیل آزادسازی کارآمدتر کود، آفت‌کش، علف-کش، تنظیم کننده رشد گیاهی، و غیره مکانیسم‌های گسترش یافته است [۹].

برخی از کاربردهای نانو فناوری در عرصه‌ی کشاورزی و پالایش آلاینده‌های زیست‌محیطی عبارتند از [۱۰]:

اصلاح گیاهان

---

<sup>۱</sup> - Nanofertilizer

- کشاورزی دقیق
- رسانش ژن‌ها به وسیله‌ی نانوذرات
- مدیریت تغذیه گیاهی
- تشخیص درجای حاصلخیزی خاک
- تشخیص اختلالات تغذیه‌ای در گیاهان زراعی
- مدیریت بذر
- نانو فناوری و مدیریت علف‌های هرز
- سازوکار هوشمند رسانش علف‌کش‌ها
- حفاظت از گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی
- تشخیص بیماری‌های گیاهی
- نانوآفت‌کش‌ها: کیسوله کردن آفت‌کش‌ها
- کنترل رهاسازی مواد از طریق کیسوله کردن آن‌ها
- فرآوری محصولات برداشت شده
- نقش حسگرهای زیستی در کشاورزی
- استفاده از نانوذرات جهت پالایش آلاینده‌های زیست‌محیطی
- راهکارهای نانو فناوری برای تغییر اقلیم

نانو فناوری دارای فواید و موارد استفاده‌ی گسترده‌ای در بخش کشاورزی است. کاربردهای نانو فناوری در کشاورزی شامل ارتقای بهره‌وری عملیات‌های مختلف زراعی به واسطه‌ی استفاده از نانوذرات<sup>۱</sup>، نانومتخلخل<sup>۲</sup> جهت رهاسازی آرام<sup>۳</sup> و موثر عناصر غذایی کودهای شیمیایی و قطرات آب، استفاده از نانوکپسول‌ها به منظور آزادسازی کنترل شده آفت‌کش‌ها و مدیریت کارآمد آفات و ناقلین عوامل بیماری‌زا،

---

<sup>۱</sup> - Zeolite

<sup>۲</sup> - Nanoporous

<sup>۳</sup> - Slow release

بکارگیری نانوحسگرها جهت ردیابی آفات و موارد بیشمار دیگر است. بدون شک با بهره‌گیری از مزایای نانو فناوری به عنوان یک فناوری پیشرفته‌ی نوظهور در بخش کشاورزی، می‌توان به نتایج مطلوبی از جمله تضمین امنیت غذایی و توسعه‌ی کشاورزی پایدار و سازگار با محیط زیست در کشورها و نواحی در حال توسعه‌ی جهان دست یافت [۱۱و۱۲].

## ضرورت استفاده از نانوفناوری در توسعه کودها

کودهای شیمیایی<sup>۱</sup>، نقش اساسی را در افزایش تولید محصولات دانه‌ای در کشورهای در حال توسعه جهان خصوصاً پس از معرفی ارقام زراعی پرمحصول و کودپذیر طی وقوع انقلاب سبز، بر عهده داشته‌اند. اگرچه عملکرد دانه‌ی یکسری از محصولات زراعی در اثر مصرف مقادیر زیاد کودهای شیمیایی افزایش یافت، اما عملکرد بسیاری از محصولات دیگر به دلیل عدم تعادل در حاصلخیزی و مقدار ماده‌ی آلی خاک، با رکود مواجه گردید. با استفاده از نانوکودها به عنوان جایگزینی برای کودهای مرسوم، عناصر غذایی کود به تدریج و به صورت کنترل شده در خاک آزاد می‌شوند. در حقیقت با بهره‌گیری از نانو فناوری در طراحی و ساخت نانوکودها، فرصت‌های جدیدی به منظور افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی و به حداقل رساندن هزینه‌های حفاظت از محیط زیست، پیش‌روی انسان قرار می‌دهد. نانوکودها، به دلیل رهاسازی تدریجی و آرام عناصر غذایی خود، بهترین جایگزین برای کودهای محلول مرسوم، هستند. با بهره‌گیری از نانوکودها، عناصر غذایی به آرامی و با سرعتی مناسب در تمام طول فصل رشد گیاه آزاد می‌شوند و بنابراین به دلیل کاهش شدید آبشویی عناصر،

---

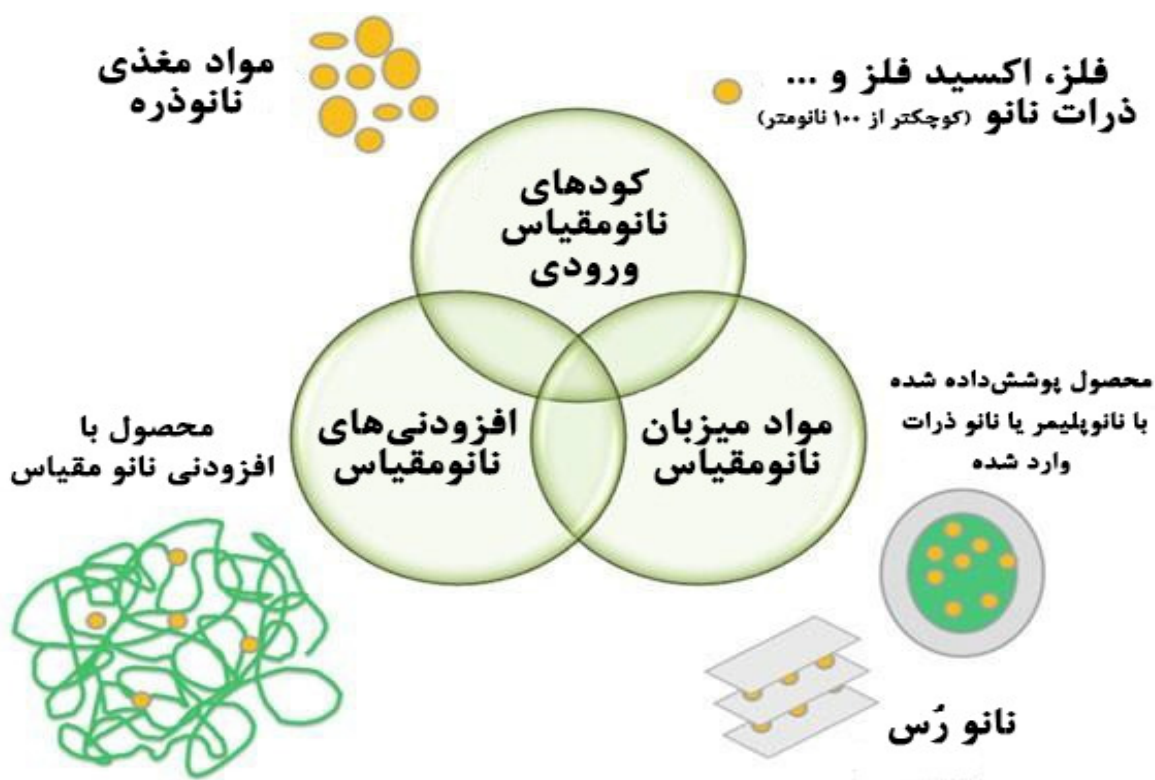
<sup>۱</sup> - Chemical fertilizers

گیاهان قادر به جذب بیشترین مقدار مواد غذایی خواهند بود. با استفاده از زئولیت‌ها، که گروهی از کانی‌های دارای ساختار لایه‌ای کندومانند هستند و به‌طور معمول در طبیعت یافت می‌شوند، می‌توان کودهایی ایجاد نمود که قادر به رهاسازی آرام عناصر غذایی به درون خاک هستند. قابلیت بارگیری و پرشدن شبکه‌ی به هم پیوسته‌ی تونل‌ها و اتاقک‌های کانی زئولیت به‌وسیله‌ی عناصر نیتروژن و پتاسیم، که با سایر ترکیبات گُندانحلال محتوی فسفر، کلسیم و مجموعه‌ی کاملی از عناصر غذایی نادر و کم‌مصرف ترکیب شده‌اند، وجود دارد. کانی زئولیت، به عنوان منبعی از عناصر غذایی که در پاسخ به نیاز گیاه، به تدریج و با سرعتی مناسب آزاد می‌شوند، عمل می‌کند. با پوشاندن کودهای شیمیایی مرسوم به‌وسیله‌ی نانوغشاها، می‌توان به کودهایی دست یافت که عناصر غذایی خود را به صورت آهسته و پیوسته آزاد کنند. نانوکمپوزیت‌های پوشاننده و سیمان‌کننده، قادر به تنظیم سرعت رهاسازی عناصر غذایی از کپسول حاوی کود، هستند [۱۳].

تاثیر اقتصادی چشمگیر استفاده‌ی ناکارآمد از کودها را نیز نباید از نظر دور داشت. در این میان نانوفناوری به- عنوان یک فناوری بین رشته‌ای و نوظهور پتانسیل کاربردی گسترده‌ای می‌تواند در تهیه و استفاده از نانوکودها داشته باشد [۱۴-۱۵]. نانومواد با اندازه ۱ تا ۱۰۰ نانومتر در حد فاصل میان اتم و مولکول با مواد توده است. از این رو ممکن است به لحاظ خواص فیزیکی و شیمیایی تفاوت‌های چشمگیری از خود نشان دهند. با توجه به پتانسیل بالقوه مواد نانومقیاس افق‌های روشنی برای بهبود بازده کشاورزی انتظار می‌رود. به‌عنوان مثال نانوکودها به دلیل سطح تماس بزرگ و اندازه‌ی کوچک امکان برهم‌کنش بهتر و جذب موثر مواد مغذی را برای باروری محصول فراهم می‌سازند از این رو می‌توانند نوآوری بسیار مهمی در کشاورزی ایجاد کنند.

همچنین ممکن است میزان رهاسازی محصولات کودی بهبود و بازدهی جذب را افزایش دهند که در نتیجه منافع اقتصادی و زیست محیطی را به دنبال دارد [۱۶].

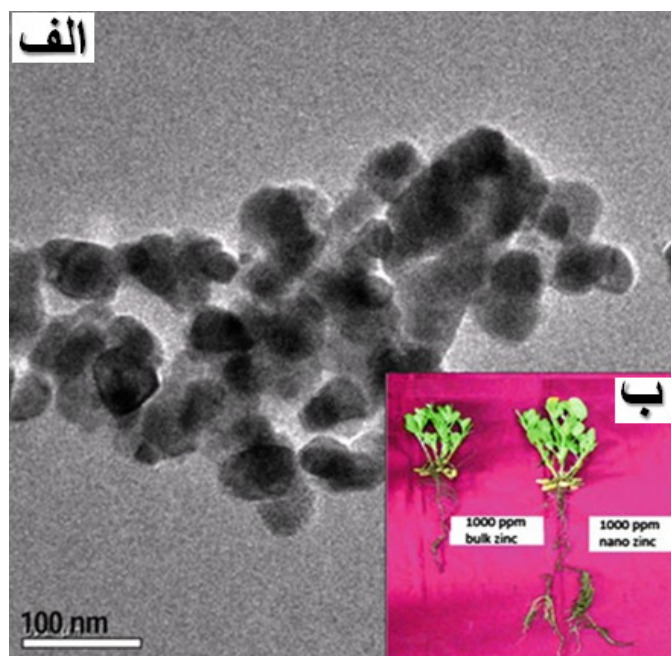
کاربردهای نانوفناوری در ساخت کود و مواد محافظ گیاه به سه گروه نشان داده شده در شکل (۱-۱) تقسیم می‌شود. لازم به ذکر است که این سه گروه همپوشانی قابل ملاحظه‌ای دارند و محصولاتی وجود دارند که بهترین توصیف از آن‌ها در قالب ترکیبی از دو یا سه گروه است [۱۷].



شکل ۱-۱: سه گروه کاربرد نانوفناوری برای کود عبارت از نهاده‌های کودی نانومقیاس؛ افزودنی‌های نانومقیاس؛ پوشش‌های نانومقیاس یا مواد میزبان نانومقیاس برای کودها است [۱۴].

## الف - کود نانومقیاس ۱

کود همراه با ماده‌ی مکمل مورد نظر با روش‌های مکانیکی و شیمیایی به ابعاد نانومتر و به شکل ذرات یا امولسیون‌های نانومقیاس تهیه می‌شود. به طور کلی کاهش اندازه‌ی باعث جذب بهتر و افزایش بازدهی رهاسازی خواهد شد که در نتیجه اثربخشی کود بیشتر شده و مقدار مورد نیاز کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال استفاده از نانوذرات اکسید روی در دانه‌های بادام زمینی که در شکل (۱-۲) نشان داده شده است، منجر به جوانه‌زنی بیشتر دانه، قدرت بیشتر جوانه زنی، افزایش بازدهی محصول، افزایش محتوای کلروفیل و افزایش رشد ساقه و ریشه می‌شود [۱۸].



شکل ۱-۲: الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذرات اکسید روی و ب) تصویر افزایش چشمگیر رشد ریشه‌ی گیاه بادام زمینی پس از عمل‌آوری با نانوذرات اکسید روی (راست: ۱۰۰۰ پی پی ام) در مقایسه با روی توده (چپ: ۱۰۰۰ پی پی ام) طی دوره زمانی ۱۱۰ روز [۱۸].

<sup>۱</sup> - Fertilizers nanoscale

## ب - افزودنی‌های نانومقیاس ۱

نانومواد به محصول در مقیاس توده با اندازه بزرگتر از ۱۰۰ نانومتر اضافه می‌شود که به‌عنوان یک ماده‌ی مکمل به دلایل ثانویه از قبیل حفظ آب یا کنترل بیماری‌زایی برای گیاه و خاک استفاده می‌شود. نانومواد در اسفرهای کوچک از محصول گنجانده می‌شود که ممکن است الزاماً حاوی خود ماده‌ی مغذی نباشد بلکه به‌عنوان افزودنی برای بهبود رشد گیاه استفاده شود و در نتیجه به حفظ آب کمک کند یا از گیاه در مقابل بیماری خاک دفاع کند. افزودنی‌های نانومقیاس برای محصولات کودی جهت مقاومت در برابر میکروب‌ها نیز به کار می‌رود [۱۹-۲۰]. به‌عنوان مثال استفاده از نانولوله‌های کربنی برای بهبود رشد جوانه‌های گوجه فرنگی و برداشت محصول در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. نانولوله‌های کربنی در پوشش دانه‌ی گوجه فرنگی نفوذ می‌کنند و در نتیجه منجر به افزایش چشمگیر در جوانه زنی دانه و رشد می‌شوند [۲۱].



فاقد نانولوله کربنی

حاوی نانولوله کربنی

<sup>۱</sup> - Add nanoscale

شکل ۱-۳: دانه‌های گوجه فرنگی در محیط کشت (راست) حاوی نانولوله‌های کربنی در طی سه روز که ۳۰ درصد دانه‌های گوجه فرنگی دسته اول شروع به جوانه زدند و (چپ) فاقد نانولوله‌های کربنی که در این مدت زمان، هیچ کدام از دانه‌های عمل آوری نشده و سبز نشدند و ۱۲ روز طول کشید تا ۳۲ درصد دانه‌های گوجه فرنگی بدون کمک نانولوله جوانه زنند [۲۱].

## ج - پوشش‌های نانومقیاس<sup>۱</sup> یا مواد میزبان نانومقیاس به‌عنوان کود

این گروه شامل کودها و مکمل‌ها در کپسول‌هایی از لایه‌های نازک نانومقیاس بسته‌بندی می‌شوند یا در خلل و فرج نانومقیاسی درون یک ماده‌ی پشتیبان نگه داشته می‌شوند. رس‌هایی مانند کائولینیت‌ها، اسمکتیت‌ها، هالوویسیت‌ها و پلی‌گورسکیت‌ها در محصولات کودی کاربرد پیدا کرده‌اند. این مواد به لحاظ ترکیب‌بندی شیمیایی و نیز خواصی از قبیل مساحت سطح و بار سطحی بسیار با هم متفاوتند. نانورس‌ها عموماً در سایر کاربردها به‌عنوان عوامل پراکنده‌ی پشتیبان برای تشکیل ساختارهای نانوکامپوزینی استفاده می‌شوند تا پایداری گرمایی و خواص مکانیکی یک ماده‌ی حجیم را بهبود بخشند. در مورد این کودها، معمولاً می‌توان آن‌ها را به‌عنوان رسانه‌ای برای جذب محصول حاوی ماده‌ی مغذی به کار برد. در داخل فضای میان لایه‌ای نانومقیاس، کودها را می‌توان از تجزیه شدن توسط نور خورشید، گرما و میکروب‌ها محافظت کرد و به این ترتیب از اتلاف کودها جلوگیری می‌شود. علاوه بر این، جذب قوی در داخل رس‌ها به کاهش اتلاف کود از طریق آب‌شویی کمک می‌کند و کود به آهستگی رهاسازی می‌شود [۱۷-۲۲].

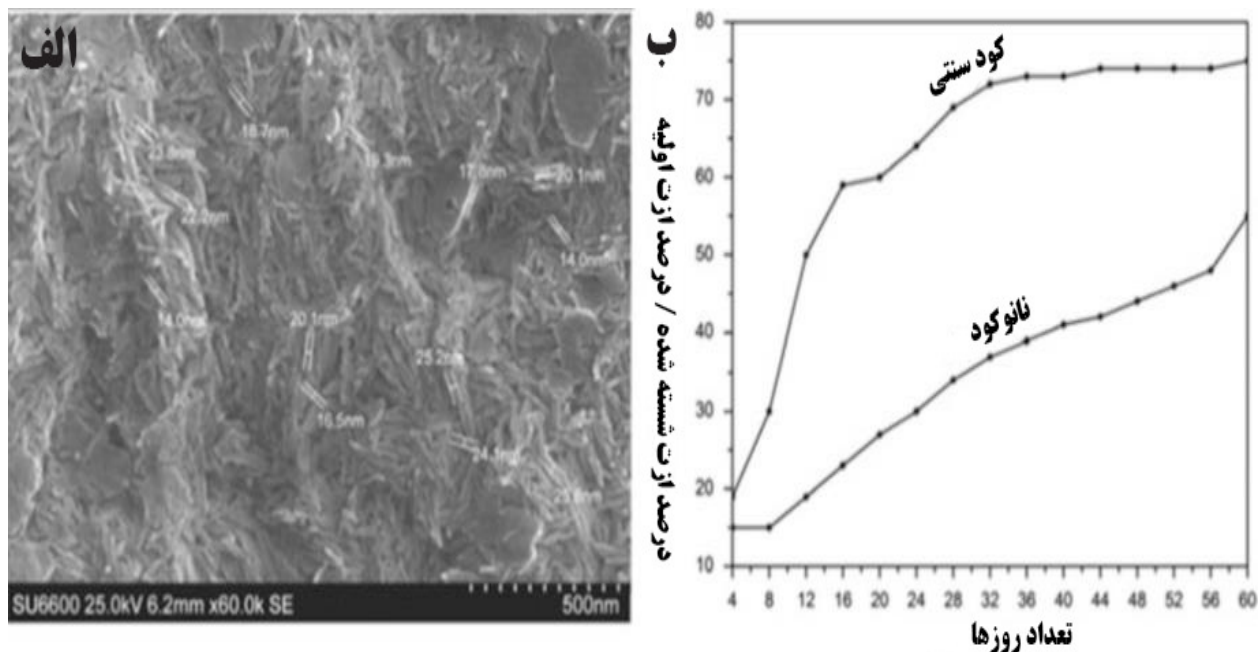
برای مثال قرارگیری کمپلکس منیزیم-اوره در فضای میان-لایه‌ای نانو ساختارهای رس مونت موریلونیت باعث حفظ اوره از تجزیه‌ی سریع در خاک می‌شود و می‌تواند به بهبود بازدهی استفاده از نیتروژن کمک کند. استفاده از ژئولیت‌ها به تنهایی یا به صورت دوپ شده با نانوذرات مواد مغذی گیاهی باعث افزایش بازدهی کود می‌شود. به‌طور مشابه، خلل و فرج و کانال‌های نانومقیاسی کائولین و رس برای جذب قوی کودها و آهسته رهاسازی آن به کار گرفته شده است. کودها را می‌توان روی ناذرات پوشش‌دار یا درون نانولوله‌ها جای داد. نانوذرات فلزی نظیر نقره به‌عنوان حامل‌هایی برای مواد مغذی گیاهی بررسی شده‌اند. نوع دیگر نانولوله‌های هالوویسیت به‌صورت

<sup>۱</sup> - Nanoscale Coatings



لوله‌های رسی توخالی هستند و در اثر فرسایش سطحی مواد معدنی آلومینوسیلیکات در اثر هوازدگی ایجاد می‌شوند. قطر این لوله‌ها معمولاً کمتر از ۱۰۰ نانومتر است و طول آن‌ها بین ۵۰۰ نانومتر تا ۱٫۲ میکرومتر در تغییر است و می‌توان این لوله‌ها را از هر چیزی پر کرد و به این ترتیب رهاسازی آن‌ها را کنترل کرد [۱۷].

نانوذرات هیدروکسی آپاتیت نیز به‌عنوان حامل‌هایی در کود بررسی می‌شوند. شکل (۱-۴) رهاسازی اوره را از این نانوذرات اصلاح شده در خاک‌هایی با pH متفاوت نشان می‌دهد که در طی ۶۰ روز به‌صورت آهسته با آهنگ بیش از ۱۰ میلی گرم در روز رهاسازی ماده را انجام می‌شود که این برخلاف آهنگ رهاسازی سریع کودهای سنتی است. آزمایش‌های کنترلی با کودهای سنتی جاسازی شده در این چوب به جداسازی اثر نانوحامل‌ها بر آهنگ رهاسازی اوره کمک کرد [۲۲].



شکل ۱-۴: نانوذرات هیدروکسی آپاتیت برای رهاسازی اوره. (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> نانوذرات هیدروکسی

آپاتیت اصلاح شده با اوره. (ب) مقایسه درصد نیتروژن آزاد شده طی ۶۰ روز برای (الف) نانو کودها و (ب) کود سنتی [۲۲].

<sup>۱</sup> - Hydroxyapatite nanoparticles

<sup>۲</sup> - Scanning Electron Microscope

گستره وسیعی از پلیمرهای سنتزی و طبیعی میتوانند به منظور آماده سازی نانوذرات زیست تخریب پذیر مورد استفاده قرار گیرند. پلیمرهای طبیعی مزیت‌های زیادی را نسبت به پلیمرهای سنتزی دارند، به ویژه اینکه این پلیمرها غیرسمی، زیست تخریب پذیر، زیست سازگارند. کیتوزان یک پلی مر داستیله شده طبیعی پلی کاتیونی است که از واحدهای N-استیل D- گلوکز آمین D گلوکز آمین تشکیل شده است .

کیتوزان در وزنهای ملکولی مختلف وجود دارد و دارای ویژگی های جالب توجهی است که به موجب آن میتواند کاربردهای [۲۳-۲۴] زیادی در صنعت و به ویژه انتقال دارو داشته باشد ذرات کیتوزان میتوانند به صورت میکروکپسول، میکروسفر و نانوذرات تولید شوند [۲۳]. کیتوزان از طریق گروههای آمین خود در واکنشهای شیمیایی مختلف شرکت میکند [۲۵] برای تهیه نانوذرات کیتوزان حداقل چهار روش گزارش شده است که عبارتند از: ژل اینیو تروپیک<sup>۱</sup>، انتشار میکروامولسیون<sup>۲</sup>، حلال امولسیون<sup>۳</sup> و کمپلکس پلی الکترولیت<sup>۴</sup> [۲۵-۲۶]. در میان این روشها روش ژل اینیو تروپیک به علت ساده بودن، عدم استفاده از حلال آلی و حرارت بالا بیشتر استفاده می شود. [۲۳-۲۷]. این روش بر پایه میان کنش الکترواستاتیک بین گروه های آمین آزاد کیتوزان و گروه های پلی آنیون مثل پتاسیم پرسولفات است و باعث تشکیل هیدروژلی از میکروذرات یا نانوذرات میشود که میتوانند برای انکپسوله شدن و یا رهایش کنترل شده و ترکیبات مختلف مورد استفاده قرار گیرند .

## نتیجه گیری

فن آوری نانو مدت‌هاست که به نوآوری‌های بسیار در زمینه‌های گوناگون از قبیل پزشکی، علم مواد و الکترونیک منجر شده است. علاوه بر این، فن آوری نانو در محصولات مصرفی روزمره‌ی ما از منسوجات گرفته تا تجهیزات ورزشی و دستگاه‌های الکترونیکی، کاربردی همه جانبه یافته است. افق‌های روشنی برای بهبود بخشیدن به بازدهی کشاورزی با استفاده از فن آوری نانو وجود دارد. کودهای نانو می‌توانند نوآوری

<sup>۱</sup> - Ionotropic gelation

<sup>۲</sup> - Microemulsion diffusion

<sup>۳</sup> - Emulsification solvent

<sup>۴</sup> - Polyelectrolyte complex

بسیار مهمی در کشاورزی باشند؛ سطح تماس بزرگ و اندازه‌ی کوچک مواد نانو امکان برهمکنش بهتر و جذب موثر مواد مغذی برای باروری محصول را فراهم می‌سازد. وارد کردن فن‌آوری نانو در محصولات کودی ممکن است میزان رهاسازی این مواد را بهبود بخشد و بازدهی جذب را بالا ببرد که نتیجه‌ی اینها چیزی جز منافع اقتصادی و زیست محیطی نیست.

کودها و مکمل‌هایی که در کپسول‌هایی از لایه‌های نازک نانومقیاس بسته‌بندی می‌شوند یا در خلل و فرج نانومقیاسی درون یک ماده‌ی پشتیبان نگه داشته می‌شوند، رس‌هایی که در محصولات کودی کاربرد پیدا کرده‌اند، عبارتند از کائولینیت‌ها، اسمکتیت‌ها، هالووایت‌ها و پلی گورسکیت‌ها. این مواد به لحاظ ترکیب‌بندی شیمیایی و نیز خواصی که دارند (از قبیل مساحت سطح و بار سطحی) بسیار با هم متفاوتند. نانورس‌ها عموماً در سایر کاربردها به‌عنوان عوامل پراکنده‌ی پشتیبان برای تشکیل ساختارهای نانوکامپوزینی استفاده می‌شوند تا پایداری گرمایی و خواص مکانیکی یک ماده‌ی حجیم را بهبود بخشند. در مورد این کودها، معمولاً می‌توان آن‌ها را به‌عنوان رسانه‌ای برای جذب محصول حاوی ماده‌ی مغذی به کار برد. در داخل فضای میان لایه‌ای با ابعاد نانو، کودها را می‌توان از تجزیه شدن توسط نور خورشید، گرما و میکروب‌ها محافظت کرد و به این ترتیب از اتلاف کودها جلوگیری می‌شود. علاوه بر این، جذب قوی در داخل رس‌ها به کاهش اتلاف کود از طریق آب‌شویی کمک می‌کند و علاوه بر آن، کود به آهستگی رهاسازی می‌شود.

همچنان که نانو فناوری به رشد و توسعه‌ی خود ادامه می‌دهد، فرصت‌های بیشتری برای الحاق نانومواد به نهاده‌های کودی فراهم خواهد شد. به هر حال، پیشرفت نسبتاً آهسته‌ی نانو فناوری در فرمول‌بندی کودها ممکن تا حدی نتیجه‌ی سرمایه‌گذاری اندک در این حیطه، فقدان قوانین واضح و عدم درک صحیح از نوآوری در صنعت کود باشد. مسیری که نانو فناوری در صنعت داروسازی طی می‌کند ممکن است به‌عنوان مرجعی مناسب برای کمک به پیش‌بینی کاربردهای این فن‌آوری در صنعت کود عمل کند.

یک نقطه ضعف عمده در نوشتارهای فعلی مرتبط با نانو فناوری در کودها، کمبود استانداردهای موجود در این زمینه است. برای مثال، در مطالعات بسیاری که به بررسی اثرات یک نانو کود خاص اختصاص یافته اند، حتی بنیادی ترین خواص فیزیکی فرمول بندی مشخص نشده است. اختلاف اندازه، تک پراکندگی، و شیمی سطح می تواند به تغییرات فیزیکی و شیمیایی قابل ملاحظه ای در نانوماده منجر گردد؛ این می تواند به اثرات به ظاهر متناقض ناشی از یک نانوماده ی یکسان بینجامد.

## منابع :

- ۱ - اچارلز پی . پول ، فرانک جی . اونسز. مقدمه ای بر نانو فناوری. ترجمه نیما تقوی . تهران : انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف ، ۱۳۸۹. ص ۲-۹
- ۲ Drexler, K. Eric ( 1 September 1981). "Molecular engineering: An approach to the development of general capabilities for molecular manipulation". *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 78 ( 9): ۵۲۷۵-۵۲۷۸. ISSN ۰۰۲۷-۸۴۲۴. Retrieved ۶ September ۲۰۱۶
- ۳ Iijima, Sumio (1991), "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, 354: ۵۶-۵۸, Bibcode: 1991Natur. 354... ۵۶I, doi: 10.1038/354056a0
- ۴ Huang, Z., Chen, H., Yip, A., Ng, G., Guo, F., Chen, Z.-K., Roco, M.C., (۲۰۰۳) "Longitudinal patent analysis for nanoscale science and engineering: country, institution and technology field", *Journal of Nanoparticle Research* ۵ ۳۳۳-۳۶۳.
- ۵ ISO/TR ۱۱۳۶۰: ۲۰۱۰, Nanotechnologies Methodology for the classification and categorization of nanomaterials
- ۶ Kamel, S., ۲۰۰۷. Nanotechnology and its applications in lignocellulosic composites, a mini review. *Express Polymer Letters*, ۱(۹): ۵۴۶-۵۷۵.
- ۷ Christina, G., Dirk, V., Arnout, I., Blaaderen, V., (۲۰۰۳) "A general method to coat colloidal particles with silica". *Langmuir*. 19 (17) ۶۶۹۳-۶۷۰۰.
- ۸ Chen, H., Yada, R., (۲۰۱۱) "Nanotechnologies in agriculture: New tools for sustainable development", *Trends Food Sci. Technol.* 22 ۵۸۵-۵۹۴.
- ۹ Johnston, C.T., (۲۰۱۰) "Probing the nanoscale architecture of clay minerals", *Clay Miner.* 45 ۲۴۵-۲۷۹.
- ۱۰ C.R Chinnamuthu and P Murugesu Boopathi, Nanotechnology and Agroecosystem, Madras Agricultural Journal., 96: ۱۷-۳۱, (۲۰۰۹).
- ۱۱ Ghormade, V., Deshpande, M.V., Paknikar, K.M., (۲۰۱۱) "Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants", *Biotechnology Advances*. 29 ۷۹۲-۸۰۳.

- 12 Wu, S.C., Cao, Z.H., Li, Z.G., Cheung, K.C., Wong, M.H., (2005) "Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: a greenhouse trial", *Geoderma*. 125 155-166.
- 13 C.R Chinnamuthu and P Murugesu Boopathi, *Nanotechnology and Agroecosystem, Madras Agricultural Journal.*, 96: 17-31, (2009).
- 14 Liu, R., Lal, R., (2014) "Synthetic apatite nanoparticles as a pHosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*", *Scientific reports*. 4 0686-0682.
- 15 Bansiwala, A.K., Rayalu, S.S., (2006) "Surfactant-modified zeolite as a slow release fertilizer for pHosphorus", *J. Agric. Food Chem*. 54, 4773-4779.
- 16 Kale, S.N., Mona, J., Dhobale, S., Thite, T., Laware, S.L., (2011) "Intramolecular and intermolecular crosslinked poly(vinyl alcohol)-borate complexes for the sustained release of fertilizers and enzymes", *Journal of Applied Polymer Science*. 121 2500-2507.
- 17 Mastrorardi, E., Tsae, P., Zhang, X., Monreal, C., DeRosa, M.C., (2010) "Strategic role of nanotechnology in fertilizers: potential and limitations", Chapter 2 20-67.
- 18 Prasad T.N.V.K.V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Raja Reddy, K., Sreeprasad, T.S., Sajanlal, P.R., Pradeep, T., (2012) Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *J Plant Nutr*. 35 900-927.
- 19 Khodakovskaya, M., Dervishi, E., Mahmood, M., Xu, Y., Li, Z.R., Watanabe, F., Biris, A.S., (2009) "Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth", *ACS Nano*. 3 3221-3227.
- 20 Nair, R., Varghese, S.H., Nair, B.G., Maekawa, T., Yoshida, Y., Sakthi Kumar, D., (2010) "Nanoparticulate material delivery to plants", *Plant Science*. 179 104-113.
- 21 Khodakovskaya, M.V., Kim, B.S., Kim, J.N., Alimohammadi, M., Dervishi, E., Mustafa, T., Cernigla, C.E., (2013) "Carbon nanotubes as plant growth regulators: effects on tomato growth, reproductive system, and soil microbial community", *Small*. 9 110-122.
- 22 Kottegoda, N., Munaweera, I., Madusanka, N., Karunaratne, V., (2011) "A green slow-release fertilizer composition based on urea-modified hydroxyapatite nanoparticles encapsulated wood", *Curr Sci*. 101 73-78.
- 23 Bulmera C., Margaritisa A. and Xenocostasb A. (2012). Production and characterization of novel chitosan nanoparticles for controlled release of rHu-Erythropoietin, *Biochemical Engineering Journal*, pp. 61-69.

- ૨૬ Patel J.K. and Jivani N.P. (૨૦૦૧), Chitosan based nanoparticles in Drug Delivery, International journal of pHarmaceutical sciences and Nanotechnology, pp. ૦૧૧-૦૨૨.
- ૨૭ Zhao L., Shi L., Zhang Zh., Chen J., Yang J. and Tang Zh. (૨૦૧૧). Preparation and application of chitosan nanoparticles and nanofibers, Brazilian Journal of Chemical Engineering, pp. ૨૦૨-૨૧૨.
- ૨૮ Sudheesh K. Sh., Ajay K., Omotayo A. and Bhekie B. (૨૦૧૩). Chitosan-based nanomaterials: A state-of-the-art review, International Journal of Biological Macromolecules, pp. ૬૬-૭૮.
- ૨૯ Shahbazi M. A., Hamidi M. and Mohammadi-Samani S. (૨૦૧૩). Preparation, optimization, and in-vitro/in-vivo/ex- vivo characterization of chitosan-heparin nanoparticles: drug-induced gelation, Journal of PHarmacy and pHarmacology, pp. ૧૧૧-૧૧૩.