

به نام خدا

نانو فناوری و علوم گیاهی

مؤلفان :

سید امین متقی

بهرز اذرلی

منا بیرجندی راد

مهناز فرخنده نژاد

راحله بیگم میراکبری

انتشارات ارسطو

(سازمان چاپ و نشر ایران - ۱۴۰۴)

نسخه الکترونیکی این اثر در سایت سازمان چاپ و نشر ایران و اپلیکیشن کتاب رسان موجود می باشد

Chaponashr.ir



سرشناسه: متقی، سید امین، ۱۳۴۷
عنوان و نام پدیدآور: نانو فناوری و علوم گیاهی / مولفان سید امین متقی، بهروز اذرلی، منا بیرجندی راد، مهناز فرخنده نژاد، راحله بیگم میراکبری
مشخصات نشر: انتشارات ارسطو (سازمان چاپ و نشر ایران)، ۱۴۰۴.
مشخصات ظاهری: ۱۲۷ ص.
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۱۱۷-۹۷۸-۷
شناسه افزوده: آذرلی، بهروز، ۱۳۶۰
شناسه افزوده: بیرجندی راد، منا، ۱۳۶۳
شناسه افزوده: فرخنده نژاد، مهناز، ۱۳۶۴
شناسه افزوده: بیگم میراکبری مرزنکلاته، راحله، ۱۳۶۶
وضعیت فهرست نویسی: فیبا
یادداشت: کتابنامه.
موضوع: نانو فناوری - علوم گیاهی
رده بندی کنگره: TP ۹۸۳
رده بندی دیویی: ۵۵/۶۶۸
شماره کتابشناسی ملی: ۹۹۷۶۵۸۸
اطلاعات رکورد کتابشناسی: فیبا

نام کتاب: نانو فناوری و علوم گیاهی
مولفان: سید امین متقی، بهروز اذرلی، منا بیرجندی راد، مهناز فرخنده نژاد، راحله بیگم میراکبری
ناشر: انتشارات ارسطو (سازمان چاپ و نشر ایران)
صفحه آرای، تنظیم و طرح جلد: محدثه فرهنگد
تیراژ: ۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ: اول - ۱۴۰۴
چاپ: زبرجد
قیمت: ۱۹۰۰۰۰ تومان
فروش نسخه الکترونیکی - کتاب رسان:
<https://chaponashr.ir/ketabresan>
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۱۱۷-۹۷۸-۷
تلفن مرکز پخش: ۰۹۱۲۰۲۳۹۲۵۵
www.chaponashr.ir



فهرست

پیشگفتار	۷
فصل اول: شیمی، بیوشیمی نانوذرات و نقش آنها در سیستم دفاع آنتی اکسیدانی در گیاهان	۹
مقدمه	۹
نانوذرات و برهمکنش آنها با گیاهان	۱۱
برهمکنش نانوذرات با دستگاه فتوسنتزی	۱۲
نانوذرات فلزی	۱۲
نانوذرات اکسید فلزی	۱۴
گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و آسیب اکسیداتیو	۱۶
نانوذرات اکسید فلزی	۱۶
سایر نانوذرات	۲۰
سیستم دفاع آنتی اکسیدانی	۲۱
منابع	۲۳
فصل دوم: نقش نانوذرات در گیاهان	۳۱
مقدمه	۳۱
اثرات نانوذرات بر رشد و نمو گیاه	۳۲
نانوذرات دی اکسید سیلیکون	۳۲
نانوذرات اکسید روی	۳۳
نانولوله‌های کربنی	۳۴
نانوذرات طلا	۳۶
نانوذرات نقره	۳۶

۳۷	نانوذرات دی اکسید تیتانیوم
۳۸	نقش نانوذرات در فتوسنتز
۴۰	نتیجه گیری و چشم اندازهای آینده
۴۱	منابع
۵۳	فصل سوم: پیامدهای فناوری نانو بر بهره‌وری گیاهان و محیط ریزوسفری آن
۵۳	مقدمه
۵۴	نانومواد به عنوان سیستم‌های رسانش
۵۵	نانومواد در سیستم کشاورزی
۵۵	نانوآفت کش و علف کش‌ها
۵۶	نانوکودها
۵۷	سمیت گیاهی نانومواد
۵۹	تأثیر نانومواد بر محیط ریزوسفری
۶۱	سرنوشت نانومواد و تولید زباله‌های نانو
۶۱	تجمع در گیاهان
۶۲	تجمع در خاک و بدنه‌های آبی به عنوان نانوضایعات
۶۳	نتیجه‌گیری
۶۴	منابع
	فصل چهارم: نانوذرات در کشاورزی پایدار تولید محصولات کشاورزی: کاربردها و دیدگاه‌ها
۷۵	مقدمه
۷۵	فناوری نانو چیست؟
۷۷	مروری بر کاربردهای نانوذرات در کشاورزی
۷۷	تأثیر نانوذرات بر جوانه‌زنی و رشد بذر گیاهان زراعی مختلف

تصفیه آب آبیاری.....	۷۸
زئولیت‌ها برای حفظ آب.....	۷۸
حامل‌های نانومقیاس و نانوکودها.....	۷۹
نانوذرات و حفاظت از گیاهان.....	۸۰
فناوری نانو بارکد.....	۸۲
کاربردهای بیولوژیکی نانوبارکدها.....	۸۳
کاربردهای غیربیولوژیکی نانوبارکدها.....	۸۳
فناوری نانو برای بیوتکنولوژی محصولات کشاورزی.....	۸۴
نانوحسگرها.....	۸۴
کنترل سطح مواد مغذی خاک.....	۸۴
حسگرهای زیستی آنزیمی.....	۸۵
بینی الکترونیکی (E-Nose).....	۸۵
نانوذرات طلا.....	۸۵
غبار هوشمند.....	۸۶
ZigBee یک استاندارد شبکه مش.....	۸۶
نتیجه‌گیری و دیدگاه‌ها.....	۸۷
منابع	۸۹
فصل پنجم: تعاملات بین نانومواد مهندسی‌شده و گیاهان: سمیت گیاهی، جذب، انتقال و تبدیل	
زیستی.....	۱۰۱
مقدمه.....	۱۰۱
برهمکنش ENM ها و گیاهان.....	۱۰۱
سمیت گیاهی نانومواد مهندسی‌شده.....	۱۰۲
نانومواد کربنی.....	۱۰۳

جذب و انتقال ENM ها در گیاهان.....	۱۰۸
تبدیل ENM ها در گیاهان.....	۱۱۲
نتیجه گیری و دیدگاه ها.....	۱۱۶
منابع	۱۱۸

پیشگفتار

برای تغذیه بشریت پرجمعیت در هزاره جدید، مسئولیت بزرگی بر دوش دانشمندان علوم گیاهی است تا راه‌های جدیدتری برای افزایش تولید محصولات کشاورزی کشف کنند. در کنار ورودی‌های حاصل از اصلاح نژاد کلاسیک، اصلاح نژاد مولکولی و علوم بیوتکنولوژی، آیا فناوری نانو نیز در این امر کمک خواهد کرد؟ آیا تولد علم به اصطلاح "نانوبیوتکنولوژی" یک موهبت خواهد بود؟ فناوری نانو به معنای ساده ممکن است به عنوان الگویی از علوم فیزیکی به نظر برسد. با این حال، این یک دست کم گرفتن پتانسیل فناوری نانو است. همانطور که اکنون مشخص است، علم پیشرفته و مدرن فناوری نانو به همان اندازه با علوم زیستی مرتبط است و ممکن است نقش مهمی در بهبود کیفیت زندگی انسان در سال‌های آینده ایفا کند. بر اساس اصول فناوری نانو، اختراعات جدید هر روز در زمینه پزشکی انجام می‌شود. نانوذرات به دلیل خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد خود توجه زیادی را به خود جلب می‌کنند. بنابراین، نانوذرات به عنوان سیستم‌های رسانش هوشمند در علوم زیستی به کار گرفته می‌شوند. جای تعجب نیست که برنده جایزه نوبل فیزیولوژی، پاول ارلیش، از این ترکیبات به عنوان «گلوله‌های جادویی» یاد کرده است. در کشاورزی، نانوذرات به عنوان کودهای ترکیبی و نانوأفت‌کش‌ها اهمیت خود را نشان می‌دهند. هیجان‌انگیزتر از همه، در سال‌های اخیر نشان داده شده است که نانوذرات ممکن است به عنوان «عوامل انتقال شیمیایی» برای هدف قرار دادن مولکول‌هایی مانند ژن‌ها به اندامک‌های سلولی خاص مانند هسته در گیاهان عمل کنند. با توجه به اینکه درک عمیق‌تر از نقش فناوری نانو در رابطه با سیستم‌های گیاهی از اهمیت بالایی برخوردار است، احساس کردیم که یک کتاب اختصاصی در مورد گرد هم آوردن جنبه‌های مختلف گیاه و فناوری نانو، نیاز امروز است. کتاب ما با عنوان «فناوری نانو و علوم گیاهی»، دیدگاهی جامع از استفاده از نانوذرات در جنبه‌های پیچیده و پویای تحقیقات گیاهی ارائه می‌دهد. گنجاندن نانوذرات در محصولات تجاری و کاربردهای صنعتی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. برای گسترش بیشتر این دستاوردهای تجاری، درک مکانیسم‌های تعامل بین نانوذرات و سیستم‌های بیولوژیکی در سطح مولکولی مهم است. جنبه دوم در این کتاب مورد تأکید قرار گرفته است. نانوبیوتکنولوژی به عنوان یک حوزه نوظهور، مرزهای جدیدی را در علم مهندسی ژنتیک می‌گشاید.

فصل اول:

شیمی، بیوشیمی نانوذرات و نقش آنها در سیستم دفاع آنتی اکسیدانی در گیاهان

مقدمه

فرآیندهای متابولیکی در موجودات هوازی، مانند گیاهان، مولکول‌های گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را به عنوان محصولات واسطه‌ای کاهش اکسیژن حالت پایه (O_2) به آب تولید می‌کنند (اپل و هرت، ۲۰۰۴ و کاریوپانپاندیان و همکاران، ۲۰۱۱). اکسیژن برای تولید انرژی کاهش می‌یابد و در این فرآیند، ROS های زیر به ترتیب تولید می‌شوند: اکسیژن تکی ($O_2^{\cdot -}$)، رادیکال سوپراکسید، رادیکال هیدروپروکسی (HO_2)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال هیدروکسیل (اپل و هرت، ۲۰۰۴ و کاریوپانپاندیان و همکاران، ۲۰۱۱). گیاهان به طور مداوم ROS را در ساختارهایی مانند کلروپلاست‌ها، میتوکندری‌ها، پراکسی‌زوم‌ها، شبکه آندوپلاسمی (ER) و غشاهای پلاسمای تولید می‌کنند (کاریوپانپاندیان و همکاران، ۲۰۱۱). به همین ترتیب، مولکول‌های ROS تجمع پیدا نمی‌کنند زیرا به طور مداوم توسط یک سیستم دفاعی پیچیده به صورت غیرآنزیمی یا آنزیمی حذف می‌شوند. اجزای سیستم دفاعی بر اساس فعالیت کاتالیزوری، وزن مولکولی، قسمتی که در آن عمل می‌کنند و سطح دفاع یا مکانیسم عمل طبقه‌بندی شده‌اند (پرادیدوا و همکاران، ۲۰۱۱). چندین عامل زیستی و غیرزیستی وجود دارد که تعادل بین تولید و حذف ROS را تغییر می‌دهد. حملات حشرات از جمله عوامل استرس‌زای زیستی هستند که بیشترین مطالعه را داشته‌اند. در نقطه نفوذ، یک پاسخ حساسیت موضعی و متعاقباً تولید فیتوالکسین‌ها و سایر پروتئین‌های مرتبط با پاتوژنز در آماده‌سازی برای مرگ برنامه‌ریزی شده سلولی (PCD) وجود دارد. این فرآیند باعث تولید ROS می‌شود (دی‌گرا و همکاران، ۲۰۰۳). طبق گفته دی‌گرا و همکاران (۲۰۰۳)، ROS اضافی باعث ایجاد تغییراتی در «سطح و/یا حالت اکسایش-کاهش آسکوربات و/یا گلووتاتیون (GSH) و همچنین در فعالیت آنزیم‌های اکسایش-کاهش آنها» می‌شود. پروتئین‌های فسفریله‌شده، پاسخ دیگری به تنش‌های زیستی در گیاهان هستند. هوانگ و همکاران (۲۰۱۱) تغییرات کمی در فسفوپروتئین‌ها در برگ‌های گیاه *Arabidopsis thaliana* که با ترکیباتی که تنش‌های زیستی را تقلید می‌کنند، تیمار شده بودند، تعیین کردند. آنها ۷۵ فسفوپروتئین را که به احتمال زیاد با عوامل تنش‌زای زیستی مرتبط هستند، یافتند و توصیف کردند. تیاهی و همکاران (۲۰۱۴) دریافتند که گیاهان برنجی که توسط

باکتری‌ها و قارچ‌ها مورد تهاجم قرار گرفته‌اند، افزایش بیان ژن‌های OsSAP1 و OsSAP11 را نشان می‌دهند. نقش عملکردی OsSAP1 در پاسخ‌های دفاعی گیاه از طریق افزایش بیان در گیاهان تراریخته بررسی شده است (تیاگی و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه بر این، خانواده ژنی GF14 گیاهان برنج تحت حمله پاتوژن افزایش بیان می‌یابد. در حالی که در سایر گیاهان، هورمون‌های گیاهی مانند اتیلن، اسید سالیسیلیک و اسید جاسمونیک تحت تنش زیستی افزایش یافتند (Fraire-Velázquez 2011).

تنش غیرزیستی توسط مجموعه‌ای از عوامل مانند دمای شدید، ترکیبات شیمیایی، عدم تعادل در شرایط آب و وجود بیش از حد فلزات سنگین ایجاد می‌شود. Mizoi و همکاران (۲۰۱۲) مقالات اخیر در مورد پاسخ‌های تنش گیاهی را تحت شرایط دما و آب بررسی کردند. طبق این مقالات، گیاهان پروتئین‌های اتصال دارند که بیان ژن‌های پاسخ به تنش غیرزیستی را فعال می‌کنند. پاسخ‌ها به تنش‌های آبی و دمایی توسط خانواده بزرگی از فاکتورهای رونویسی به نام AP2/ERF تنظیم می‌شوند که یک دامنه اتصال DNA به خوبی حفظ شده را به اشتراک می‌گذارند. پروتئین کینازهای وابسته به کلسیم، Ca²⁺ و ROS نیز مولکول‌های سیگنالینگ شناخته شده‌ای هستند که تحت تنش‌های غیرزیستی و زیستی افزایش بیان می‌یابند (Fraire-Velázquez 2011). مسیر ژنتیکی شامل چندین خانواده ژنی است که افزایش بیان دارند. هاشیموتو و همکاران (۲۰۰۴) گزارش دادند که در برنج، ژن RO-292 تحت تنش‌های شوری و خشکی افزایش بیان می‌یابد. فلزات سنگین از عوامل استرس‌زای شناخته شده گیاهان غیرزیستی هستند. در یک بررسی اخیر، اووکا و تاکاک (۲۰۱۴) استراتژی‌های مورد استفاده گیاهان برای مدیریت استرس ناشی از فلزات سنگین را برجسته کردند. این نویسندگان نتیجه گرفتند که پاسخ گیاهان به استرس فلزات سنگین مختص ژنوتیپ است اما "تا حدی توسط شرایط محیطی تعدیل می‌شود." مشخص شده است که چندین ناقل فلزی در حفظ هموستاز فلزات سنگین در سلول‌های گیاهی نقش دارند. اطلاعات دقیق در مورد خانواده‌های ناقل‌هایی مانند ZIP، HMA، CDF، NRAMP، فیتوکلاتین‌ها و سایر موارد توسط اووکا و تاکاک (۲۰۱۴) تجزیه و تحلیل شد. همچنین مطالعاتی با هدف بررسی اثرات فلزات سنگین بر تولید ROS و پمپ‌های پروتون در سطوح غشای واکوئلی و پلازما انجام شده است. کابالا و همکاران (۲۰۰۸) گزارش دادند که کادمیوم، مس و نیکل بر پمپ‌های پروتون تأثیری نداشتند؛ با این حال، این فلزات ساختار و خواص اسیدهای چرب غشای پلازما را تغییر دادند. پراکسیداسیون لیپید یکی دیگر از اثرات معمول استرس اکسیداتیو اعمال شده توسط فلزات سنگین در گیاهان است. در جو (*Hordeum vulgare* L)، غلظت‌های میکرومولار مس (۱۰)، روی (۴)، کروم (۴)، نیکل (۴)، سرب (۰،۱) و کادمیوم (۲۲) باعث القای پراکسیداسیون لیپید شدند (لوکنیز و همکاران،

۲۰۱۲). علاوه بر این، روی و کادمیوم به ترتیب در غلظت‌های کم ۰٫۱ و ۳ میکرومولار، تولید زیست توده خشک را کاهش دادند (لوکنیز و همکاران، ۲۰۱۲). انواع دیگر استرس ناشی از فلزات سنگین شامل کاهش فتوسنتز (مس، روی، کادمیوم)، تغییرات در فراساختار و معماری ریشه (آلومینیوم، کادمیوم، مس) و تغییر در یونوم سلولی (کادمیوم، سرب، اورانیوم) است (ویه‌وگر، ۲۰۱۴). نقره یکی دیگر از فلزات سنگین است که نشان داده شده است حتی در غلظت‌های پایین باعث ایجاد استرس در گیاهان می‌شود. کاوه و همکاران (۲۰۱۳) گزارش دادند که پس از ۱۰ روز قرار گرفتن در معرض ۵ میلی گرم Ag^+/L ، ۸۴ ژن افزایش بیان و ۵۳ ژن کاهش بیان در گیاه *A. thaliana* وجود داشت. برخی از ژن‌های افزایش بیان با استرس اکسیداتیو مرتبط بودند و برخی از ژن‌های کاهش بیان با پاسخ به عوامل بیماری‌زا و محرک‌های هورمونی مرتبط بودند.

نانوذرات و برهمکنش آنها با گیاهان

نانوذرات (NPs)، طبیعی یا مصنوعی، موادی با حداقل دو بعد بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند (ASTM 2012). نانوذرات مصنوعی (نانوذرات مهندسی‌شده، ENPs) می‌توانند بر پایه کربن یا فلز باشند (Peralta-Videa و همکاران، ۲۰۱۱). نانوذرات مبتنی بر کربن دو نوع اصلی دارند: فولرن‌ها و نانولوله‌های کربنی؛ در حالی که نانوذرات مبتنی بر فلز در فلزات، اکسیدهای فلزی و نقاط کوانتومی گروه‌بندی می‌شوند (PeraltaVidea و همکاران، ۲۰۱۱). از جمله نانوذرات مبتنی بر فلز که بیشترین تولید و استفاده را دارند، می‌توان به نانوذرات اکسید روی ($nZnO$)، دی‌اکسید تیتانیوم ($nTiO_2$)، طلا (nAu)، نقره (nAg)، اکسید سرب ($nCeO_2$) و نانوذرات مس (nCu) اشاره کرد (Keller و همکاران، ۲۰۱۳). نانوذرات دیگری مانند nMn ، nFe_3O_4 ، $nCuO$ و $nCoFe_2O_4$ نیز به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحقیقات نشان داده است که هر دو ENPs مبتنی بر کربن و فلز قادر به ایجاد تنش هستند و ROS اضافی با پتانسیل تأثیر بر پروتئین‌ها، لیپیدها، کربوهیدرات‌ها و DNA در گیاهان تولید می‌کنند (شکل ۱،۱). گزارش شده است که نانولوله‌های کربنی، یکی از ENPs مبتنی بر کربن، باعث تجمع ROS می‌شوند و پراکسیداسیون لیپید را در کشت سلولی (لیو و همکاران، ۲۰۱۰) و نوک ریشه نهال‌ها (لیو و همکاران، ۲۰۱۳) افزایش می‌دهند. از سوی دیگر، مشخص شده است که ENP‌های مبتنی بر فلز و/یا یون‌های آزاد شده از نانوذرات، باعث ایجاد استرس و تجمع ROS در گیاهان می‌شوند. به عنوان مثال، چندین گزارش نشان می‌دهد که nAu و nAg به روش‌های مختلف بر فتوسنتز تأثیر می‌گذارند (Barrazzouk و همکاران، ۲۰۰۵؛ Bujak و همکاران، ۲۰۱۱؛ Olejnik و همکاران، ۲۰۱۳). نانوذرات دیگری مانند $nCeO_2$ ، nFe_3O_4 ، $nCoFe_2O_4$ و $nTiO_2$ نیز نشان داده‌اند که بر تولید کلروفیل و ROS تأثیر می‌گذارند (Mingyu و همکاران، ۲۰۰۷؛

Ursache-Oprisan و همکاران، ۲۰۱۱؛ Rico و همکاران، ۲۰۱۳b). مطالعات نشان داده‌اند که هر دو فاز کریستالی روتیل و آناتاز nTiO₂ باعث تولید ROS در اسفناج می‌شوند (Fenoglio و همکاران، ۲۰۰۹). تنش اعمال شده توسط ZnO و nCuO با نانوذرات و یون‌های روی و مس آزاد شده مرتبط دانسته شده است (Shi et al. 2011; Kumari et al. 2011; Lee et al. 2013; Nair

and Chung 2014). از سوی دیگر، نتایج متناقضی در مورد تولید ROS توسط nCeO₂ گزارش شده است (Rico et al. 2013b; Gomez-Garay et al. 2014). در بخش‌های بعدی، تنش اعمال شده توسط ENPs/یون‌های آزاد شده بر گیاهان و مکانیسم‌های دفاعی آنها را مورد بحث قرار می‌دهیم.

برهمکنش نانوذرات با دستگاه فتوسنتزی

بازده فتوسنتزی پارامتر مناسبی برای تشخیص تنش ناشی از عوامل زیستی و غیرزیستی است. اختلال در فعالیت فتوسنتزی منجر به تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شود. نانوذرات، بازده فتوسنتزی، فلورسانس فتوشیمیایی و عملکرد کوانتومی را در گیاهان تغییر می‌دهند؛ بنابراین، دانش در مورد برهمکنش نانوذرات با دستگاه فتوسنتزی، درک تنش اکسیداتیو ناشی از نانوذرات و سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی در گیاهان را فراهم می‌کند.

نانوذرات فلزی

پیامدهای نانوذرات فلزی در تولید انرژی شیمیایی یک سیستم فتوسنتزی بررسی شده است. آزمایشی که توسط گووروف و کارملی (۲۰۰۷) طراحی شده است و در آن مرکز واکنش فتوسنتزی یک فتوسیستم (PSI) به nAu و nAg متصل شده بود، دو اثر رقابتی مؤثر بر کارایی فتوسیستم را نشان داد: بهبود جذب نور توسط مولکول کلروفیل به دلیل اثر رزونانس پلاسمون نانوذرات فلزی، و کاهش بازده کوانتومی توسط فتوسیستم به دلیل افزایش انتقال انرژی کلروفیل به نانوذرات فلزی. به طور مشابه، انتقال الکترون از فلوروفور برانگیخته به nAu یا nAg گزارش شده است (Barrazzouk و همکاران، ۲۰۰۵؛ Nieder و همکاران، ۲۰۱۰؛ Beyer و همکاران، ۲۰۱۱؛ Bujak و همکاران، ۲۰۱۱؛ Matorin و همکاران، ۲۰۱۳؛ Olejnik و همکاران، ۲۰۱۳). Falco (۲۰۱۱) اثرات nAu را بر خاموشی فلورسانس کلروفیل a در فتوسیستم (PSII) II در برگ‌های سویا تعیین کردند. کلروفیل استخراج شد و پس از مخلوط کردن با nAu با اندازه‌های مختلف (۵، ۱۰، ۲۰ نانومتر) و غلظت‌های مختلف (۰، ۳، ۶، ۷، ۱۰، ۱۴، ۱۷، ۳ میکرومولار)، جذب در ۵۳۸ نانومتر (باند جذبی مشخصه سطوح nAu) و

طیف‌های فلورسانس در ناحیه معمول PSII (۸۰۰-۶۲۵ نانومتر) اندازه‌گیری شدند. داده‌ها نشان داد که جذب و خاموشی فلورسانس با افزایش غلظت nAu افزایش می‌یابد. جذب در درجه اول به دلیل مقدار بیشتر nAu که نور را جذب می‌کند، افزایش یافت، در حالی که خاموشی فلورسانس به دلیل بیشتر موجود برای انتقال الکترون افزایش یافت. از سوی دیگر، کمترین جذب در بالاترین اندازه nAu ثبت شد در حالی که بالاترین خاموشی فلورسانس در کمترین اندازه nAu ثبت شد. اندازه کم nAu به دلیل سطح تماس بالاتر، سرکوب فلورسانس را افزایش داد که می‌تواند مقدار زیادی مولکول کلروفیل را جذب کند که انتقال الکترون کلروفیل به نانوذرات فلزی را بهتر تسهیل می‌کند. به طور مشابه، nAu (۸ نانومتر) باعث افزایش خاموشی فلورسانس در محلول کلروفیل شد که به انتقال الکترون افزایش یافته از مولکول‌های کلروفیل برانگیخته شده به nAu نسبت داده شد (بارازوک و همکاران، ۲۰۰۵). در همان مطالعه، فالکو و همکاران (۲۰۱۱) فلورسانس کلروفیل را در برگ‌های سویا در شرایط *in vivo* بررسی کردند. دانه‌های سویا با nAu تلقیح شدند و اجازه داده شد تا جوانه بزنند تا برگ‌های لپه‌ای، تک‌برگی و سه‌برگی ظاهر شوند. فلورسانس کلروفیل مستقیماً روی سطح هر یک از برگ‌های لپه‌ای، تک‌برگی و سه‌برگی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان‌دهنده تغییر باند فلورسانس به طول موج بالاتر و خاموشی ناشی از nAu در فلورسانس کلروفیل بود. فلورسانس همچنین زمانی که nAu مستقیماً روی سطح یا سطح زیرین برگ‌ها رسوب داده شد، اندازه‌گیری شد و نتایج، خاموشی فلورسانس مشابه افزایش یافته با nAu را در برگ‌ها نشان داد. در یک مطالعه مشابه، ماتورین و همکاران (۲۰۱۳) تأثیر nAg را بر فعالیت فتوسنتزی جلبک سبز کلامیدوموناس رینهاردتی بررسی کردند. آنها دریافتند که nAg هیچ اثر مستقیمی بر PSI ندارد، اما انتقال الکترون را در PSII مهار می‌کند و تولید گیرنده‌های الکترون کینون ثانویه (QB) را افزایش می‌دهد. این مشاهدات برخلاف مشاهدات گزارش شده توسط شارما و همکاران (۲۰۱۲) بود که در آن nAg راندمان کوانتومی PSII را در *Brassica juncea* بهبود بخشید. تعدیل در فتوشیمی *Vigna radiata* در معرض nMn به طور گسترده توسط Pradhan و همکاران (۲۰۱۳) مورد بررسی قرار گرفته است. تجزیه و تحلیل فعالیت‌های کاهش نوری در کلروپلاست‌های جدا شده نشان داد که nMn فعالیت PSII را با افزایش تجزیه آب و تکامل اکسیژن و بهبود فعالیت فتوفسفوریلاسیون زنجیره انتقال الکترون (ETC) تعدیل می‌کند. مطالعات مرتبط همچنین اثرات نقاط کوانتومی را بر فعالیت فتوسنتزی در *Chlamydomonas sp* نشان داد. Lin و همکاران (۲۰۰۹) *Chlamydomonas sp* را در معرض نقاط کوانتومی CdSe/ZnS قرار دادند و دریافتند که نقاط کوانتومی جذب نور را کاهش می‌دهند که باعث کاهش فعالیت فتوسنتزی در جلبک می‌شود. در مقابل، Jung و همکاران (۲۰۱۰) فرآیند فتوسنتز در PSI خالص‌سازی شده از *C. reinhardtii* و ادغام شده با

نقاط کوانتومی CdSe/ZnS را بررسی کردند. آنها دریافتند که نقاط کوانتومی می‌توانند نور را جذب کرده و انرژی را به طور موثر به PSI منتقل کنند.

نانوذرات اکسید فلزی

کلروفیل a، رنگدانه اصلی فتوسنتزی در گیاهان، نسبت به سایر رنگدانه‌ها به تخریب نوری حساس‌تر است و می‌تواند شاخص مفیدتری برای سمیت نانوذرات در مقایسه با ویژگی‌های رشد باشد. به عنوان مثال، nCeO₂ علائم ظاهری سمیت را القا نکرد اما محتوای کلروفیل را در برنج (*Oryza sativa*) به شدت کاهش داد (Rico et al. 2013a). nFe₃O₄ و nCoFe₂O₄ نیز هیچ اثر سمی بر روی نهال‌های آفتابگردان نشان ندادند، اما محتوای کلروفیل نسبت به شاهد، در تیمارهای nFe₃O₄ به میزان ۵۰٪ و در تیمارهای nCoFe₂O₄ به میزان ۲۸٪ کاهش یافت (Ursache-Oprisan et al. 2011). یک مطالعه مرتبط نیز نشان داد که *Scenedesmus obliquus* در معرض ۵۰ میلی گرم در لیتر nSiO₂، علیرغم رشد طبیعی خود، کاهش قابل توجهی در کلروفیل a نشان داد (Wei et al. 2010). در مقابل، نانوذرات اکسید آهن سوپرپارامگناطیس (SPIONs) سطح کلروفیل را بدون هیچ اثری از سمیت در سویا بهبود بخشیدند (غفاریان و همکاران، ۲۰۱۳). نسبت کلروفیل a/b به عنوان یک شاخص جهانی فعالیت فتوسنتزی در نظر گرفته می‌شود. این شاخصی از پاسخ گیاهان به نور و در دسترس بودن نیتروژن است (هیکوساکا و تراشیمایا، ۱۹۹۶). اورساج-اوپریسان و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند که nFe₃O₄ و nCoFe₂O₄ (۱۰۰-۲۰ میکرولیتر در لیتر) بر سرعت جوانه‌زنی تأثیری نداشتند و باعث اثرات سمی در آفتابگردان نشدند. با این حال، نسبت کلروفیل در هر دو nFe₃O₄ و nCoFe₂O₄ در مقایسه با شاهد به طور قابل توجهی کاهش یافت. در مقابل، ریکو و همکاران (۲۰۱۳) دریافتند که nCeO₂ علیرغم کاهش محتوای کلروفیل در برنج، نسبت کلروفیل را افزایش داد، در حالی که غفاریان و همکاران ... (۲۰۱۳) هیچ تغییری در نسبت کلروفیل a/b در سویای در معرض SPIONs مشاهده نکردند، که نشان می‌دهد راندمان فتوسنتز تحت تأثیر قرار نگرفته است. با این حال، این مطالعات مکانیسم‌های ایجاد کننده تغییرات در نسبت کلروفیل a/b را روشن نکردند. فلورسانس کلروفیل a در *Lemna gibba* که در معرض ۰٫۱ تا ۰٫۴ گرم در لیتر nCuO قرار گرفته است، بررسی شده است (Perreault و همکاران، ۲۰۱۰). این مطالعه نشان داد که nCuO به طور قابل توجهی بازده کوانتومی را کاهش می‌دهد که فرآیندهای فتوسنتزی را مهار می‌کند و باعث عقب ماندگی در رشد گیاه می‌شود. nCuO همچنین به شدت خاموشی فلورسانس فتوشیمیایی را سرکوب کرده و خاموشی فلورسانس غیر فتوشیمیایی را تا حد زیادی افزایش داده است، که نشان دهنده تغییرات عمده در فتوشیمی PSII است. به طور

کلی، یافته‌ها نشان داد که nCuO تبدیل انرژی نور جذب شده را از طریق انتقال الکترون PSII کاهش می‌دهد. به طور مشابه، Lalau و همکاران. (۲۰۱۴) گزارش دادند که nCuO باعث اختلال در میتوکندری، اتساع غشای کلروپلاست، اعوجاج استروما و گرانه‌های کلروپلاست‌ها و تغییر رنگدانه‌های فتوسنتزی در لندولتیا پونکتاتا می‌شود. nCuO پوشش داده شده با اسید پلی آکرلیک همچنین به سیستم انتقال الکترون PSII در جلبک تک سلولی *C. reinhardtii* آسیب جدی وارد کرد (Saison و همکاران، ۲۰۰۹). در اینجا، سمیت nCuO به انحلال و آزادسازی یون‌های مس نسبت داده شد. نانو-آنتاز (nTiO₂-A) به طور کلی به دلیل مساحت سطح ویژه بزرگ، رسانایی حرارتی بالا و توانایی فوتوکاتالیستی بالا، فعالیت فتوسنتزی را در گیاهان بهبود می‌بخشد (Mingyu و همکاران، ۲۰۰۷؛ Lei و همکاران، ۲۰۰۷؛ a، b؛ Yang و همکاران، ۲۰۰۷). مطالعات نشان داده‌اند که تیمار کلروپلاست اسفناج (*Spinacia oleracea*) با nTiO₂-A (۵ میکرومولار) منجر به افزایش جذب نور در کلروفیل a، افزایش بازده کوانتومی فلورسانس در PSII، افزایش فعالیت‌های انتقال الکترون و افزایش سرعت تکامل اکسیژن می‌شود (Mingyu و همکاران، ۲۰۰۷؛ یانگ و همکاران، ۲۰۰۷).

اسفناج و گوجه‌فرنگی که در معرض nTiO₂-A قرار گرفتند، راندمان بالاتری در جذب، انتقال و تبدیل نور در PSII نشان دادند (Lei و همکاران، ۲۰۰۷؛ a، b؛ Qi و همکاران، ۲۰۱۳). Lei و همکاران (۲۰۰۷b) این فرضیه را مطرح کردند که حفره‌های الکترونی تولید شده توسط نور در nTiO₂، h^+ ، الکترون‌ها را از آب جذب می‌کنند که باعث تسریع فتولیز آب و آزادسازی اکسیژن در PSII می‌شود. برعکس، محلول‌پاشی ۰٫۱ تا ۰٫۴ درصد nTiO₂-A در گیاه *Ulmus elongata* که در معرض شدت نور ۸۰۰ و ۱۶۰۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه قرار گرفته بود، منجر به کاهش عملکرد کوانتومی PSII، فلورسانس کلروفیل، خاموشی فتوشیمیایی و سرعت انتقال الکترون، اما افزایش خاموشی غیرفتوشیمیایی و از دست دادن آب نسبت به شاهد شد (Gao و همکاران، ۲۰۱۳). کاهش قابل توجه فعالیت فتوسنتزی به دلیل افزایش اتلاف آب ناشی از کاهش فعالیت مزوفیل بود. این محققان همچنین معتقد بودند که nTiO₂-A با مسدود کردن انتقال الکترون از QA به QB، سرعت انتقال الکترون را کاهش می‌دهد. در یک مطالعه مرتبط، غلظت‌های تغییر یافته nTiO₂ (نانو روتیل پوشش داده شده با فیلم‌های هیدروکسید آلومینیوم و دایمیتیکون) در غلظت‌های ۵ تا ۵۰ ppm، حداکثر بازده کوانتومی PSII را در گیاه باقلا، حتی پس از ۴۸ ساعت قرار گرفتن در معرض آن، تغییر نداد (Foltete و همکاران، ۲۰۱۱). تجزیه و تحلیل انتشار فلورسانس از *Medicago arborea* ۸ ماهه که در معرض nCeO₂ (۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی گرم در لیتر) قرار گرفته بود، انجام شده است (Gomez-Garay و همکاران، ۲۰۱۴). این مطالعه نشان داد که نسبت به شاهد، تیمارهای ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر nCeO₂