



# توسعه پایدار وفناوری نانو

■ سال اول ■ شماره ۶



[www.icanano.ir](http://www.icanano.ir)





# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## فهرست مطالب

|    |                                       |
|----|---------------------------------------|
| ۵  | مقدمه                                 |
| ۶  | تعاریف                                |
| ۱۰ | فناوری نانو سبز                       |
| ۱۱ | کاربردهایی از اصول فناوری نانو سبز    |
| ۱۲ | تولید نانو                            |
| ۱۴ | سنتز سبز نانومواد                     |
| ۱۸ | نانومواد مورد استفاده در تصفیه فاضلاب |
| ۲۰ | فوتوکاتالیست یا نانوکاتالیست          |
| ۲۱ | تصفیه آب با استفاده از نانوفیلتراسیون |
| ۲۱ | تولید انرژی‌های تجدیدپذیر             |
| ۲۲ | محدودیت‌های فناوری نانو سبز           |
| ۲۳ | نتیجه‌گیری                            |

## گردآورندگان

**آزاده خسروی؛** مسئول آموزش مرکز صنعتی‌سازی نانوفناوری کاربردی

ایمیل: azadeh\_khosravi\_82@yahoo.com

لینکدین: <https://www.linkedin.com/in/azadeh-khosravi-755387100>



**لیلا الهی مقدم؛** مسئول همکاری فناورانه مرکز صنعتی‌سازی نانوفناوری کاربردی

ایمیل: elahimoghadam.l@gmail.com

لینکدین: <https://www.linkedin.com/in/leila-elahimoghadam-5078a81b>





## چکیده

با افزایش جمعیت انسانی در جهان، عرضه منابع، با محدودیت مواجه شده است. توسعه فناوری‌های عاری از آلودگی، برای اصلاح محیط‌زیست و تأمین انرژی پاک به منظور رشد پایدار جامعه انسانی در حال حاضر امری ضروری است. فناوری نانو می‌تواند بر روی توسعه فناوری‌های «سبزتر» و «پاک‌تر» به همراه افزایش در سطح سلامتی و مزایای محیط‌زیستی، تأثیر چشمگیری بگذارد. کاربردهای فناوری نانو به دلیل پتانسیلی که برای ارائه راه‌حل‌هایی مدیریتی، کاهش آلودگی زمین، هوا و آب و همچنین بهبود عملکرد فناوری‌های موجود مورد استفاده در پاک‌سازی محیط‌زیست دارد، در حال بررسی است. فناوری نانو سبز شاخه‌ای از فناوری نانو است که مباحث مربوط به پایداری را در کاربردهای مختلف در نظر می‌گیرد. در این مجله، کاربردهای فناوری نانو مورد استفاده برای حل موضوعات محیط‌زیستی با استفاده از کاهش سرانه مصرف حین سنتز و فرایند تولید، قابلیت بازیافت مواد پس از استفاده از آن‌ها، توسعه و استفاده از مواد سازگار و همچنین اصول استفاده از شیمی سبز به منظور تأثیرگذاری بر روی چرخه عمر محصولات نانو، از طراحی تا دفع بیان خواهد شد. در حال حاضر، فناوری نانو نشان داده که می‌تواند نویدبخش ارائه راه‌حل‌هایی برای موضوعات پایداری باشد، اما نمی‌توان از اثرات سوئی که مواد نانو بر محیط‌زیست و سلامتی انسان دارد، چشم‌پوشی کرد. علیرغم عملکرد بالا و قیمت پایین فناوری اصلاح شده با نانو، انجام تحقیقات پیشرفته و بیشتر جهت درک و جلوگیری از اثرات سو بالقوه در اکوسیستم ضروری است.

## کلمات کلیدی

فناوری نانو سبز، فوتوکاتالیست، اصلاح، پایداری، نانومواد



## ۱- مقدمه

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های موقعیت کنونی، ایجاد توسعه پایدار برای نسل‌های آینده با استفاده از مفاهیم و اصول شیمی و مهندسی سبز برای تولید محصولات و مواد نانویی بدون سمیت در محصول نهایی و به کار بردن تفکر چرخه عمر در کل فاز طراحی و مهندسی است.

فناوری نانو، پتانسیل بالقوه‌ای برای استفاده از نانومواد جدید جهت تصفیه آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی و فاضلاب آلوده شده توسط یون‌های سنگین، املاح معدنی و غیرمعدنی و طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌ها دارد. در حال حاضر چندین نانوماده به منظور استفاده در پاک‌سازی محیط‌زیست و انجام اصلاحات (به دلیل فعالیت منحصر به فرد آن‌ها در برابر آلاینده‌های غیرقابل تجزیه)، در مرحله تحقیقات گسترده هستند.

تولید سبز، مؤثرترین روش جهت کاهش و حذف آلودگی‌های سمی در محیط‌های خاک، هوا و آب است. با استفاده از نانوجاذب‌ها می‌توان به صورت مؤثر آلودگی‌های ارگانیکی، رنگ‌ها و پساب‌های رنگی را از آب‌های آلوده حذف کرد. از جمله جاذب‌های نانویی که می‌توان به آن‌ها اشاره کرد، انواع خاک رس، زئولیت‌ها، فلزات، اکسیدهای فلزی، غشاهای پلیمری، نانوالیاف متخلخل و آهن با ظرفیت صفر است.

فوتوکاتالیست‌های بر پایه نیمه‌هادی‌ها در فرایند اکسیداسیون پیشرفته به منظور تخریب و کانی‌سازی تحت تابش مواد سمی (طبیعی و مصنوعی)، مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عبارتی آلاینده‌های آلی به ترکیبات دوستدار محیط‌زیست تبدیل می‌شوند. نانومواد به عنوان یک رشته نوظهور، چهارچوب مفیدی را برای مطالعه کاربردها و مفاهیم شیمی سبز به روشی ایمن‌تر و گسترده‌تر، فراهم می‌کند.

تصفیه‌کننده‌های نانویی در مقایسه با فناوری‌های تصفیه‌کننده پیشین، منجر به کاهش کلی آلودگی‌ها می‌شوند. فناوری‌های مبتنی بر فناوری نانو را می‌توان به منظور پیشگیری، کاهش و به حداقل رساندن آسیب‌هایی که به محیط‌زیست و سلامتی انسان وارد می‌شود، مورد استفاده قرار داد.

استفاده از فرایند تولید مبتنی بر فناوری نانو سبز به منظور توسعه محصولات نانویی کارآمد، کم‌هزینه، غیرسمی با کارایی چندمنظوره، بدون تولید محصولات نهایی خطرناک است.

در حال حاضر، فناوری نانو در حال ایجاد توسعه پایدار در فناوری‌های جدید با هدف حفاظت از محیط‌زیست است و پتانسیل آن‌ها را به منظور ارائه راه‌حل‌هایی برای مدیریت و حذف آلودگی‌های زمین، هوا و آب بررسی می‌کند. همچنین یکی دیگر از اهداف آن، بهبود عملکرد فناوری‌های رایج مورد استفاده در فعالیت‌های پاک‌سازی و تصفیه است. کاربردهای فناوری نانو راه‌حل‌های فناورانه کم‌هزینه، تصفیه درجا، کارآمد و سریعی را ارائه می‌دهد.

فناوری تصفیه و پاک‌سازی مبتنی بر فناوری نانو نه تنها پتانسیل کاهش هزینه‌های کلی تصفیه آلودگی را دارد، بلکه منجر به کاهش زمان پاک‌سازی، از بین بردن نیاز به دفع و تصفیه خاک‌های آلوده و همچنین منجر به کاهش خطر آلودگی تا نزدیک به صفر می‌شود.

نانومواد به دلیل فعالیت منحصر به فردشان در برابر آلاینده‌های مقاوم، در تحقیق و توسعه پیشرفته به منظور استفاده در پاک‌سازی محیط‌زیست و تصفیه در محل، در حال بررسی هستند.

اخیراً، نانومواد بسیار گوناگونی، به عنوان مثال زئولیت، اکسیدهای فلز-فلز، نانولوله‌های کربنی، دندریمنت‌ها، فلزات نجیب و نانوذرات دوپ شده با فلز- پلیمر در مقیاس نانو به منظور استفاده در تصفیه و پالایش ارزیابی شده‌اند.

نانومواد علاوه بر کاهش حضور فاز مایعات غیرآبی، در تصفیه و پاک‌سازی درجای آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از نانومواد اکسیدی، برای پاک‌سازی نشأت نفت از مخازن زیرزمینی نفت، کمک کرده است.

رویکرد مبتنی بر فناوری نانو در مقایسه با فناوری‌های پیشین پالایش و تصفیه، نشان داده است که در کاهش سطوح کلی آلودگی، روش کارآمد و پربازده‌تری است.

فناوری نانو سبز حول محور استفاده از کاربردهای فناوری نانو به منظور توسعه محصولات و فرایندهای دوستدار محیط‌زیست می‌چرخد. هدف اصلی این فناوری، توسعه طرح‌های دوستدار محیط‌زیست است که با جایگزینی کاربردهای موجود به کاهش پیامدهای بهداشتی و محیط‌زیستی کمک می‌کند.

فناوری نانو نقش مهمی در گسترش فناوری‌های نوآورانه برای طراحی و توسعه محصولات جدید، جایگزینی تجهیزات تولیدی موجود، فرموله کردن مواد شیمیایی و سایر مواد جدید با عملکرد بالا ایفا می‌کند. فناوری نانو سبز شامل اصول شیمی سبز است، بنابراین در ابتدا درک «شیمی سبز» بسیار مهم است. هدف از شیمی سبز ایجاد نوآوری در استفاده از مواد شیمیایی برای عملکردی ایمن‌تر و کارآمدتر است. در این مرحله، جنبش پایداری در فناوری نانو دخالت می‌کند و اصطلاح شیمی پایدار و سبز به طور کامل مورد استفاده قرار می‌گیرد. جدول ۱ تعاریف کلی از اصطلاحات رایج را ارائه می‌دهد.

جدول ۱- تعاریف کلی

| موارد           | تعاریف                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| فناوری نانو     | شاخه‌ای از فناوری است که با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، به ویژه دست‌کاری اتم‌ها و مولکول‌های جداگانه سروکار دارد.                                                                                              |
| فناوری نانو سبز | فناوری مورد استفاده برای توسعه فناوری‌های پاک به منظور به حداقل رساندن خطرات بهداشتی و محیطی بالقوه. این فناوری شامل استفاده از محصولات نانو و فرایند تولید نانو است.                                      |
| شیمی سبز        | طراحی محصولات و فرایندهای شیمیایی است که استفاده و تولید مواد سمی را کاهش داده و ریشه‌کن می‌کند. در طول چرخه عمر یک محصول شیمیایی، از جمله طراحی، ساخت، استفاده و دفع نهایی آن (پایان عمر) استفاده می‌شود. |
| پایداری         | شکلی از توسعه که نیازهای حال را برآورده می‌کند، بدون اینکه توانایی نسل‌های آینده را در استفاده از منابع به خطر بیندازد.                                                                                    |

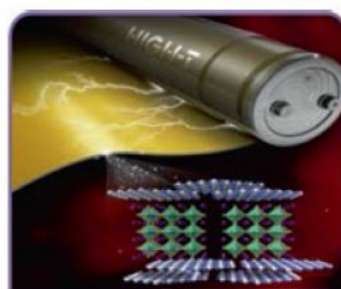
فناوری نانو سبز دو هدف دارد؛ فرایند و محصول که شامل استفاده از نانومواد چندمنظوره برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، نانوحسگرها برای تشخیص و پایش آلودگی، بسته‌بندی سبز، فوتوکاتالیست نیمه‌هادی برای اصلاح مؤثر محیطی و غشای جدید برای تصفیه کارآمدتر فاضلاب، است. اصول شیمی سبز به همراه مباحث مربوط به پایداری به شناسایی فرصت‌های زیادی به منظور انجام تحقیقات جدید در این حوزه، کمک می‌کند. شیمی سبز تأیید می‌کند که فناوری نانو با ارائه چشم‌انداز در خصوص پیامدهای فناوری‌های جدید خطرات احتمالی را کاهش می‌دهد. هنگام در نظر گرفتن مفاهیم و کاربردهای فناوری‌های اخیر، شیمی سبز از سایر گرایش‌های فناورانه که کاملاً بر محصولات و فرایندها تمرکز دارند جدا است. فناوری سبز بدون شک یکی از مهم‌ترین شاخه‌های فناوری است که از ۱۲ اصل شیمی سبز، برای کاربردهای بالقوه مختلف استفاده می‌کند. فناوری نانو به عنوان یک علم نوظهور، فرصت‌های امیدوارکننده‌ای برای اصول شیمی سبز به منظور ایجاد پایداری، حفاظت و ارتقای ایمنی شغلی و سلامتی در حین تولید محصول و کاربرد فرایند پیشنهاد می‌دهد. پس از درک مفهوم نانو سبز برای توسعه پایدار، تمرکز به سمت حوزه‌های کاربردی مختلف که با پایداری مرتبط هستند، معطوف شده است. شکل ۱ شش حوزه کاربردی فناوری نانو سبز را نشان می‌دهد.



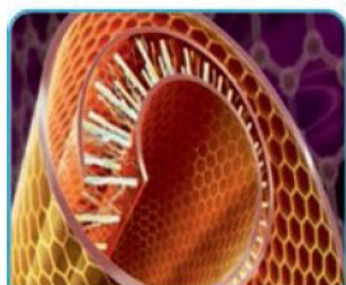
Water Treatment



Solar Cells  
(Nanobased)



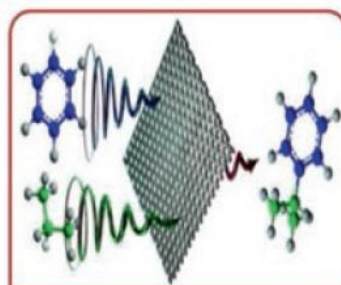
Energy Storage  
Devices



Nanogenerators



Thermal Energy



Catalysis



شکل ۱- شش حوزه کاربردی فناوری نانو سبز

کاربردهای مبتنی بر فناوری نانو در موارد فوق الذکر، مزایای بالقوه‌ای از قبیل سمیت پایین، قیمت کمتر، بازدهی بالاتر، کاهش پیچیدگی‌ها و ایمنی بیشتر را ارائه می‌دهد. همچنین فرصت‌هایی را در جهت غلبه بر اثرات نامطلوب قبل از وقوع آن‌ها فراهم می‌آورد.

فناوری نانو سبز می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر موارد زیر داشته باشد:

- طراحی نانومواد و محصولات از طریق حذف یا به حداقل رساندن آلودگی‌های مستقیم حاصل از سنتز؛
- ارزیابی چرخه عمر؛
- تخمین و کاهش دادن اثرات محیط‌زیستی که در زنجیره محصول می‌تواند اتفاق بیفتد؛
- طراحی نانومواد غیرسمی و استفاده از آن‌ها به منظور حل مشکلات زیست‌محیطی موجود.

استفاده از نانومواد جدای از موارد آشکار مطرح شده، قابلیت استفاده در زمینه‌های متنوعی از قبیل فوتوکاتالیست‌ها، سلول‌های خورشیدی، سلول‌های سوختی/سوختی-زیستی می‌شود. علاوه بر موارد ذکر شده، بازیافت مواد زائد صنعتی به نانومواد با تبدیل دوده دیزل به نانومواد کربن، فلاش به نانومواد سیلیس، آلومینا و اکسید آهن نیز در کاربردهای نانو سبز گنجانده شده است. این یک تصور عمومی است که فناوری نانو، فناوری‌های سبزتر و پاک‌تر را به نفع محیط‌زیست توسعه می‌دهد. اولین ایده در رابطه با مفهوم فناوری نانو سبز توسط موسسه شیمی سبز ACS با مشارکت موسسه علم مواد و میکروبیولوژی اورگان، به شناسایی چالش‌ها و فرصت‌های فناوری نانو سبز پرداخت. دانشمندان و مهندسان تصور می‌کنند که امن‌ترین آینده برای پیشرفت در فناوری نانو برای توسعه پایدار می‌تواند

با استفاده از اصول شیمی سبز به دست آید. ۱۲ اصل در شیمی سبز وجود دارد که فناوری نانو سبز حول محور آن‌ها می‌چرخد. کاربرد شیمی سبز شامل طراحی فرایندها و محصولات است که مواد سمی را از ابتدا تا انتهای چرخه حیات یک ماده شیمیایی، حذف می‌کند. فناوری نانو سبز حول اصول شیمی سبز و مهندسی سبز می‌چرخد و بر آن‌ها از طریق اثرات منحصربه‌فردی که در مواد در مقیاس نانو رخ می‌دهد تأکید می‌کند. قبل از بحث در مورد فناوری نانو سبز، درک اصول اولیه شیمی سبز که توسط USEPA<sup>۳</sup> منتشر شده است بسیار مهم است.

شیمی سبز گاهی اوقات به عنوان پایداری شیمیایی که شامل طراحی، توسعه، تولید محصولات شیمیایی و فرایندهای تولید است یاد می‌شود که می‌تواند ریسک‌های عمومی ضایعات سمی و خطرناک محصول نهایی را حین فرایند تولید، کاهش دهد. شایان ذکر است که اصول شیمی سبز به طور کامل در فناوری نانو سبز و فرایندهای تولید در ابعاد نانو کاربرد دارد. ۱۲ اصل شیمی سبز در جدول ۲ آورده شده است.

اصول شیمی سبز را می‌توان برای تولید نانومواد و فرایندهای ساخت پاک‌تر، ایمن‌تر و پایدارتر به کار برد. از سوی دیگر، علم نانو همراه با شیمی سبز، سنتز ماده را آسان کرده و نانومواد را به موادی دوستدار محیط‌زیست تبدیل می‌کند. بنابراین فناوری نانو سبز رابطه نزدیکی با اصول شیمی سبز و تولید سبز دارد. شکل ۲ نمایش تصویری اصول شیمی سبز درگیر در فرایند سنتز سبز را نشان می‌دهد.

### جدول ۲- اصول کلی شیمی سبز

| ردیف | اصل                                             | تعریف                                                                                                                                                                                                                                   |
|------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱    | جلوگیری                                         | بهتر است از تولید ضایعات جلوگیری کنید تا پس از ایجاد آن به تصفیه یا تمیز کردن زباله‌ها بپردازید.                                                                                                                                        |
| ۲    | اقتصاد اتمی                                     | روش‌های سنتز باید به گونه‌ای طراحی شوند که ترکیب تمام مواد مورد استفاده در فرایند در محصول نهایی به حداکثر برسد.                                                                                                                        |
| ۳    | سنتزهای شیمیایی کم‌خطر                          | هر جا که امکان‌پذیر باشد، روش‌های سنتز باید برای استفاده و تولید موادی طراحی شود که برای سلامت انسان و محیط‌زیست سمی نباشد.                                                                                                             |
| ۴    | طراحی مواد شیمیایی ایمن‌تر                      | محصولات شیمیایی باید به گونه‌ای طراحی شوند که بر عملکرد موردنظر خود تأثیر بگذارند و در عین حال سمیت آن‌ها را به حداقل برسانند.                                                                                                          |
| ۵    | حلال‌ها و مواد کمکی ایمن‌تر                     | از مواد کمکی مانند حلال‌ها، عوامل جداکننده و... در صورت امکان استفاده نشود و در صورت استفاده بی‌ضرر باشد.                                                                                                                               |
| ۶    | طراحی برای بهره‌وری انرژی                       | انرژی مورد نیاز فرایندهای شیمیایی باید برای اثرات محیط‌زیستی و اقتصادی آن‌ها شناخته شده و به حداقل برسد. در صورت امکان، روش‌های سنتز باید در دما و فشار محیط انجام شود.                                                                 |
| ۷    | استفاده از مواد اولیه تجدیدپذیر                 | یک ماده خام باید هر زمان که از نظر فنی و اقتصادی عملی باشد، به جای اینکه از بین برود، تجدیدپذیر باشد.                                                                                                                                   |
| ۸    | کاهش مشتقات                                     | استفاده غیرضروری از گروه‌های مسدودکننده، حفاظت/عدم محافظت، اصلاح موقت فرایندهای فیزیکی/شیمیایی و... باید به حداقل برسد و در صورت امکان از آن اجتناب شود، زیرا چنین مرحله‌ای به معرف‌های اضافی نیاز دارند و منجر به تولید زباله می‌شوند. |
| ۹    | کاتالیست                                        | معرف‌های کاتالیزوری (تا حد امکان انتخابی) نسبت به معرف‌های استوکیومتری برتری دارند.                                                                                                                                                     |
| ۱۰   | طراحی برای تخریب                                | محصولات شیمیایی باید طوری طراحی شوند که در پایان کارکرد خود به محصولات تخریب‌پذیر بی‌ضرر تجزیه شوند و در محیط باقی نمانند.                                                                                                              |
| ۱۱   | تجزیه و تحلیل زمان واقعی برای جلوگیری از آلودگی | روش‌های تحلیلی باید بیشتر توسعه یابد تا امکان نظارت و کنترل در زمان واقعی، در حین فرایند قبل از تشکیل مواد خطرناک فراهم شود.                                                                                                            |
| ۱۲   | شیمی ذاتاً ایمن‌تر برای پیشگیری از حوادث        | مواد و شکل یک ماده مورد استفاده در یک فرایند شیمیایی باید به گونه‌ای انتخاب شود که احتمال وقوع حوادث شیمیایی از جمله انتشار، انفجار و آتش‌سوزی به حداقل برسد.                                                                           |





شکل ۲- نمایش تصویری اصول شیمی سبز درگیر در فرایند سنتز سبز

فناوری نانو امید فراوانی برای توسعه فناوری‌های جدید که سبزتر و بسیار پایدارتر از فناوری‌های موجود هستند، ایجاد کرده است. تقریباً تمام بخش‌های اصلی تأثیر قابل توجهی بر پیشرفت فناوری نانو دارند که شامل ترکیب نانومواد در محصولات و فرایندها می‌شود.

در سنتز نانومواد جهت استفاده در محصولات، از مواد شیمیایی و فرایندهای تولید شیمیایی بسیاری استفاده می‌شود؛ بنابراین فرایند سنتز منجر به تولید محصول نهایی سمی می‌شود که پیامدهای نامطلوب سلامتی و محیط‌زیستی ایجاد می‌کند.

هدف پنهان فناوری نانو سبز، توسعه پروتکل‌های بی‌خطر برای محصولات سنتزی و دیگر فرایندهای وابسته است. همچنین هدف اصلی آن به حداقل رساندن ریسک‌ها و خطرناک مرتبط با سنتز نانومواد است، زیرا انتشار نانومواد سمی باعث ایجاد مسائل نانوسمیتی می‌شود. بنابراین نانومحصولات سبز، آن دسته از مواد نانویی هستند که با استفاده از اصول شیمی سبز سنتز می‌شوند و به طور مستقیم و غیرمستقیم برای کاربردهای محیط‌زیستی مانند پالایش محیطی، تصفیه فاضلاب و... استفاده می‌شوند.

همان‌طور که می‌دانیم، فرایندها و کاربردهای نانو محصول سبز شامل سنتز نانومواد با استفاده از روش‌های سازگار با محیط‌زیست و همچنین استفاده از آن‌ها در فرایندهای پاک‌سازی محیطی است که باعث می‌شود استفاده از مفهوم نانو سبز، امکان‌پذیرتر و قابل پذیرش‌تر باشد. یکی از بهترین مثال‌هایی که در روش‌های سبز سنتز نانومواد می‌توان به آن اشاره کرد، روش‌های سنتزی بیولوژیکی با استفاده از گیاهان و میکروب‌ها است. همچنین در صورت استفاده از روش‌های سبز، حتی در طی فرایند سنتز شیمیایی، با جایگزینی حلال‌های ارگانیک که سمیت و خطرات کمتری دارند به جای حلال‌های شیمیایی، سمیت منیفوولدها<sup>۴</sup> کاهش می‌یابد.

تعداد زیادی از بررسی‌های شاخصی که قبلاً منتشر شده‌اند، بر روی سنتز نانومواد و استفاده از آن‌ها در یک کاربرد مشخص متمرکز شده است، از این رو در اینجا به جای تمرکز بر روی جزئیات فرایند سنتز، تمرکز بر روی جنبه‌های مختلف محصولات و فرایندهای مرتبط به شیمی سبز خواهد بود.

همان طور که از اصلاح فناوری نانو سبز برمی آید، در این قسمت به مواردی که مربوط به مباحث دوستدار محیط زیست است، اشاره می شود.

فناوری نانو سبز شامل توسعه کاربرد محصولات، به روشی سازگار با محیط زیست است، در حالی که شیمی سبز به عنوان روش استفاده از دوازه اصلی است که منجر به کاهش یا حذف استفاده و تولید مواد خطرناک حین طراحی، تولید و یا مصرف مواد شیمیایی می شود.

اصول ۱۲ گانه شیمی سبز که توسط آناستاس<sup>۵</sup> و وارنر<sup>۶</sup> تعریف شده و در جدول ۲ آورده شده است که امروزه برای تولید طیف وسیعی از مواد شیمیایی با هدف کاهش خطر برای سلامتی و محیط زیست، به حداقل رساندن ضایعات و جلوگیری از آلودگی به کار گرفته می شود.

استفاده از اصول ۱۲ گانه شیمی سبز، منجر به کاهش مصرف حلال های سمی و منیفلوها، بهبود طراحی محصولات با توجه به چرخه عمر و همچنین افزایش کارایی مواد و انرژی فرایندهای شیمیایی شده است. از سوی دیگر کاربردهای اصول شیمی سبز در علم نانو منجر به تسهیل فرایند سنتز و ایمن تر و سبزتر شدن آن می شود.

حال اینکه فناوری نانو سبز شامل کاربردهایی از شیمی سبز در جهت طراحی و توسعه روش های تولید نانومواد (در مقیاس های مختلف) و کاربرد آن ها در حوزه های گوناگون، می شود.

یکی از اهداف این علم ارائه دانش در خصوص خواص نانومواد (با تکیه به مسئله سمیت و طراحی چند جانبه نانومواد که قابلیت استفاده در محصولاتی با پتانسیل بالا را دارند و می توانند تهدیدی برای سلامتی انسان و محیط زیست باشد) است.

در این میان مهم تر از همه، تلاش برای توسعه سنتز یا روشی است که بتواند علاوه بر اینکه نیاز به مواد شیمیایی را برطرف سازد، کارایی روش های سنتزی موجود را نیز بهبود دهد.

بنابراین، فناوری نانو سبز یک نمای کلی از ایمن تر بودن نانومحصولات سنتز شده ارائه می دهد. علاوه بر این، فناوری نانو سبز کاربردهایی از این فناوری را دنبال می کند که با کاهش اثرات مخرب روی سلامتی و اکوسیستم، منافع اجتماعی گسترده تری دارد. پس می توان نتیجه گیری کرد، فناوری نانو سبز با توسعه مواد، کاربرد و فرایندشان در حین چرخه عمر، درست پس از شروع انتخاب مواد خام و عمر نهایی (رهایش ایمن تر در محیط زیست) کار خود را آغاز می کند. شکل ۳ مزایای فناوری نانو سبز را نشان می دهد.



شکل ۳- مزایای فناوری نانو سبز



## ۲. کاربردهایی از اصول فناوری نانو سبز

در علم نانو، نانومواد دارای نسبت سطح به حجم بالا و خواص قابل کنترلی است که بازدهی بالایی برای استفاده در طیف وسیعی از کاربردها، از مراقبت و سلامتی گرفته تا پالایش محیط زیست را فراهم می‌کند. نانومواد به دلیل خواص و کارکرد چندجانبه آن‌ها تقریباً در هر جایی وجود دارند.

کاربردهای فناوری نانو روز به روز در حال رشد است و مزایای محیط زیستی زیادی را نوید می‌دهد، به عنوان مثال می‌توان به نانوکاتالیست‌ها برای پالایش محیط زیست، مواد ترموالکتریک به منظور خنک‌سازی بدون استفاده از مبردها، خواص فوتوولتائیک اثربخش، سبک‌سازی نانومواد کامپوزیتی برای استفاده در وسایل نقلیه، کوچک‌سازی وسایل یا ابزار به منظور کاهش مواد مصرفی، نانوسنسورها که نیاز به تحلیل و آنالیزهای شیمیایی را برطرف می‌کنند (نانوسنسورها سرعت بیشتری دارند این در حالی است که محدودیت شناسایی کمتر آن‌ها امکان شناسایی درجا را فراهم می‌کند)، اشاره کرد. شایان ذکر است که فناوری‌های جدید نانو سودمند هستند اما ممکن است برای سلامتی انسان و محیط زیست اندکی مضر باشند؛ بنابراین این ضروری است که روش سنتز نانومواد سبز طراحی شود و همچنین توسعه یابد. پس در مرحله اول فرایند تولید، می‌بایست نانوشیمی سبز مورد بحث قرار گیرد و سپس بر روی کاربرد آن بحث شود. این یک واقعیت است که نانومواد دارای ساختار غنی و متفاوتی هستند و طیف وسیعی از فرصت‌ها را برای رسیدن به خواص شیمیایی، فیزیکی، اپتیکی و سم‌شناسی فراهم می‌کنند. حین طراحی و آنالیز آزمایشگاهی می‌بایست به پیچیدگی و تنوع نانومواد که بعداً می‌توانند مسئله رهاسازی مواد سمی را داشته باشند، توجه زیادی کرد. استفاده از روش‌های مختلف سنتز برای تولید محصولات مشابه به این معنی است که تفاوت در روش و مسیرهای واکنش، منجر به تفاوت قابل توجهی در خلوص و کمیت محصول میانی و نهایی شود. همچنین، نانومواد سنتز شده باید با جزئیات زیاد به طور مثال اندازه ذرات شناخته شده، شکل، توزیع اندازه، مساحت سطح ویژه، مورفولوژی، حلالیت، بلورینگی، خواص فیزیکی، خواص شیمیایی، خواص نوری و خواص الکترونیکی مشخص شوند. به خوبی مشخص شده است که استفاده از این نانومواد امکان ارزیابی دقیق اثرات بیولوژیکی و اکولوژیکی را فراهم می‌کند. این اصول بر تأثیر نانومواد که ممکن است پس از استفاده در کاربرد مشخص در محیط منتشر شوند، متمرکز شده است؛ بنابراین، در طراحی مواد باید بر این جنبه تمرکز شود که در اثر استفاده از مواد سازگار با محیط زیست، آسیب به آن کاهش می‌یابد. می‌توان اذعان کرد یکی از اهداف آن، طراحی آن دسته‌ای از مواد است که ایمن‌تر هستند و در محیط زیست بدون ایجاد سمیت مخرب و محصول نهایی خطرناک تجزیه می‌شوند. ارزیابی چرخه عمر و حیات نانومواد به منظور اجرای این اصول، ضروری است. اثرات متفاوت کوتاه‌مدت و بلندمدت نانومواد در آب، روغن، نفت و هوا می‌بایست از منظر سلامتی انسان در نظر گرفته شود چرا که مقاومت طولانی مدت نانومواد در محیط زیست، مسئله مرتبط با نانو سمیت را ایجاد می‌کند. هدف از فناوری

نانو توصیف خواص سم‌شناسی یک نانومواد مهندسی شده برای تصمیم‌گیری در مورد اینکه آیا نانومواد تهدیدی برای سلامتی انسان و محیط‌زیست محسوب می‌شوند؟ و چنانچه پاسخ بله است تا چه اندازه خطرناک هستند. اندازه نانوذرات و عدم وجود روش تشخیصی از نظر سرنوشت آن‌ها در بدن انسان و محیط‌زیست در مفهوم شناسایی و ارزیابی اشکال بزرگی را ایجاد می‌کند. این یک نکته ارزشمند است که همه نانومواد موجود برای محیط‌زیست سمی نیستند بلکه به غلظت، دوز و میزان در معرض قرار گرفتن آن بستگی دارد. سرنوشت، انتقال و سمیت نانومواد مهندسی شده در دهه‌های اخیر تمرکز اصلی تحقیقات ایمنی و محیط‌زیستی در سرتاسر جهان بوده است. خواص اساسی و اصلی مربوط به سرنوشت نانومواد به دلیل فقدان مطالعات تحقیقاتی به خوبی درک نشده است. همچنین تا به امروز به موضوع نگرانی‌های محیط‌زیستی، سم‌شناسی و اثرات مزمن نانومواد کمتر پرداخته شده است.

### تولید نانو

۱-۲

کاربرد اصول ۱۲ گانه شیمی سبز در تولید نانو/ فرایند سنتز نانو، یک حوزه نوظهور با هدف توسعه پایدار است.

در سال‌های اخیر به دلیل پتانسیل آن برای طراحی روش‌های سنتز کارآمد، چندمنظوره و غیرسمی توجه جهانی را به خود جلب کرده است. این فرایند با مواد شیمیایی و حلال‌های مورد استفاده در حین آماده‌سازی و سنتز آن‌ها همراه است. می‌توان گفت این بخش بر روی روش‌های سنتز نانومواد و نانو محصول با توجه ویژه بر تأثیرات چشمگیر آن‌ها بر محیط‌زیست تمرکز خواهد کرد. تمام محصولات نانو اعم از تولید ذرات، مواد و دستگاه‌ها، باید از مراحل مختلف توسعه در ابعاد نانو گذر کنند. تجزیه و تحلیل چرخه عمر تولید یک نانومواد و همچنین سرنوشت آن پس از رها سازی در محیط‌زیست تا پایان عمر، بررسی می‌شود.

انتظار می‌رود که مواد جدید توسعه یافته (الف) دارای عملکرد بالایی باشند، (ب) خواص وابسته به اندازه را نشان دهند و (ج) طیف وسیعی از مواد و ترکیبات عنصری را در خود جای دهند. ارزیابی این مواد قبل از پذیرش در عرصه تجاری، فرصتی برای کاهش تأثیر منفی این مواد است که امری ضروری است. تولید بسیار دقیق با ضایعات کم برای فرایند تولید مبتنی بر علم نانو برای تجاری‌سازی این محصولات ضروری است. از طرفی شیمی سبز بستری را برای افزایش درک عمومی از فناوری نانو فراهم می‌کند. به همین دلیل است که شیمی سبز می‌تواند نقش محوری در رشد فناوری نانو با هدف ارائه حداکثر سود از این محصولات به جامعه ایفا کند.

مزایای تولید نانو سبز به شرح زیر است:

- تولید نانومحصولات نسبتاً ایمن‌تر و سبزتر؛
- بی‌نیازی از مواد شیمیایی و حلال‌های خطرناک جهت سنتز؛
- فرایند نسبتاً ارزان‌تر و سازگار با محیط‌زیست؛
- ارائه محصول نهایی غیرسمی؛
- نیاز به تولید و کنترل ایمنی کمتر برای تولید.

فرایندهای تولید مبتنی بر فناوری نانو به طور گسترده با سلامتی انسان و اثرات محیط‌زیستی مرتبط هستند.

ارزیابی محصولات مبتنی بر فناوری نانو برای رویکردهای سبز آن‌ها مهم است. تجزیه و تحلیل ریسک و ارزیابی چرخه عمر با استفاده از رویکردهای تولید پایدار و استفاده از جایگزین‌های شیمی سبز راه‌حلی ممکن است. اساساً، برای تولید نانومواد، رویکردهای پرکاربرد پایین به بالا<sup>۶</sup> و بالا به پایین<sup>۷</sup> وجود دارد.

الف. رویکرد بالا به پایین: کاهش مواد از حجم به مقیاس نانو. روش سنتز ترجیحی نانومواد، قالب‌بندی است.

ب. رویکرد پایین به بالا: سنتز مواد آلی/ غیر آلی به نانو ساختارها، از سطح اتمی تا مقیاس نانو توسط خودآرایی.

فرایند از بالا به پایین شامل روش‌های فیزیکی سنتز نانومواد، مانند لیتوگرافی، آسیاب و استخراج<sup>۸</sup> است. رویکردهای بالا به پایین با میکروسیستم‌ها شروع می‌شود و در ادامه ساختارها را تا مقیاس نانو کوچک می‌کند. به عنوان مثال از طریق سنگ‌زنی، مواد بزرگ‌تر را تا زمانی که به ابعاد نانو برسند برش می‌دهند. از سوی دیگر، رویکردهای پایین به بالا



در مقیاس اتمی از طریق رشد و هسته‌زایی با استفاده از یک پیش‌ساز به‌وسیله واکنش‌های شیمیایی، مانند سل-ژل، خودآرایی و... ماده را ایجاد می‌کنند. رویکردهای بالا به پایین در مقایسه با روش از پایین به بالا برای سنتز نانومواد به دلیل سهولت و در دسترس بودن استفاده، رایج‌تر هستند.

با این حال، فرض بر این است که تکنیک‌های بالا به پایین در مقایسه با تکنیک‌های پایین به بالا، ضایعات بیشتری تولید می‌کنند.

بنابراین، تکنیک‌های پایین به بالا ابزاری نهایی برای تولید پایدار هستند زیرا طراحی سفارشی واکنش، روش‌شناسی و سنتز با اندازه و شکل کنترل‌شده را در سطح مولکولی با کاهش ضایعات ناخواسته ارائه می‌دهند.

جدول ۳ روش‌های کلی تولید نانو را با مثال‌هایی خلاصه می‌کند.

جدول ۳- روش‌های تولید مبتنی بر فناوری نانو رایج

| پایین به بالا                               | پایین به بالا           | پایین به بالا             |
|---------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| خودآرایی                                    | تکنیک‌های سنتز فاز مایع | آسیاب فیزیکی              |
| خودآرایی لانگمویر-بلاجت                     | روش سل-ژل               | آسیاب گلوله‌ای            |
| خودآرایی الکتروستاتیک                       | سنتز سونو شیمیایی       | آسیاب مکانیکی             |
| تک لایه‌های خودآر (SAMs)                    | سنتز سولوترمال          | آسیاب سرمایی              |
| <b>تکنیک‌های رسوب در فاز بخار</b>           | سنتز به کمک مایکروویو   | مکانیک شیمیایی            |
| برآرایی پرتو-مولکولی (MBE)                  | رسوب شیمیایی            | <b>الکتروریسی</b>         |
| لایه‌نشانی بخار شیمیایی تقویت شده با پلاسما | رسوب الکتریکی           | <b>حکاکی</b>              |
| رسوب‌نشانی لیزر اتمی                        | سنتز میسلار معکوس       | حکاکی خشک                 |
| رسوب‌نشانی لیزر پالسی                       | <b>سنتز بیولوژیکی</b>   | حکاکی پلاسما              |
| تبخیر                                       | <b>گیاهان</b>           | حکاکی یون فعال            |
| کندوپاش                                     | <b>باکتری‌ها</b>        | حکاکی مرطوب               |
| برآرایی فاز بخار                            | <b>قارچ‌ها</b>          | <b>لیتوگرافی</b>          |
| <b>تکنیک‌های سنتز مواد نانو ساختار</b>      | <b>ضایعات گیاهی</b>     | فوتولیتوگرافی             |
| سنتز شعله                                   |                         | لیتوگرافی پرتو الکترونی   |
| رسوب با قوس الکتریکی                        |                         | لیتوگرافی غوطه‌وری        |
| فرسایش لیزری                                |                         | X لیتوگرافی پرتو          |
| تبخیر                                       |                         | لیتوگرافی فرابنفش شدید    |
|                                             |                         | لیتوگرافی پرتو یون متمرکز |
|                                             |                         | لیتوگرافی نانو چاپی       |
|                                             |                         | لیتوگرافی نرم             |

نانومواد سنتز شده با استفاده از روش‌های ذکر شده در بالا معمولاً به عنوان نانوذرات مهندسی شده (ENPs) شناخته می‌شوند. نانومواد را می‌توان به صورت صفربعدی (0D)، یک بعدی (1D)، دوبعدی (2D) و سه بعدی (3D) طبقه‌بندی کرد. بسیاری از فرایندهای تولید مبتنی بر فناوری نانو، بازده محصول پایینی دارند که منجر به تولید ضایعات بیش از حد می‌شود. همچنین برخی از روش‌های سنتز، پتانسیل ایجاد اثرات ناخواسته بر سلامت انسان (حاد و مزمن) به دلیل انتشار تصادفی نانومواد در محیط را دارند.

نمونه‌های نانومواد در شکل ۴ خلاصه شده است. ماهیت این ENPها و استفاده از آنها دلایل قانع‌کننده‌ای برای استفاده از اصول شیمی سبز برای توسعه نانومواد جدید و کاربردهای آنها ارائه می‌دهد. در تولید هر محصول نانویی ما با میزان بالای مصرف انرژی، مواد شیمیایی خطرناک و تصفیه بیهوده و تکراری مواجه هستیم. سنتز سبزتر نانومواد توجه زیادی را در سراسر جهان به خود جلب کرده است. چندین مزیت برای سنتز سبز نانومواد نسبت به سنتز شیمیایی وجود دارد. از طریق سنتز سبز، سنتزی بسیار کارآمد، چندمنظوره و کم‌خطرتر از نانومواد را می‌توان با تولید میزان بیشتری از ذرات در زمان کمتر تحت شرایط واکنشی ساده به دست آورد.

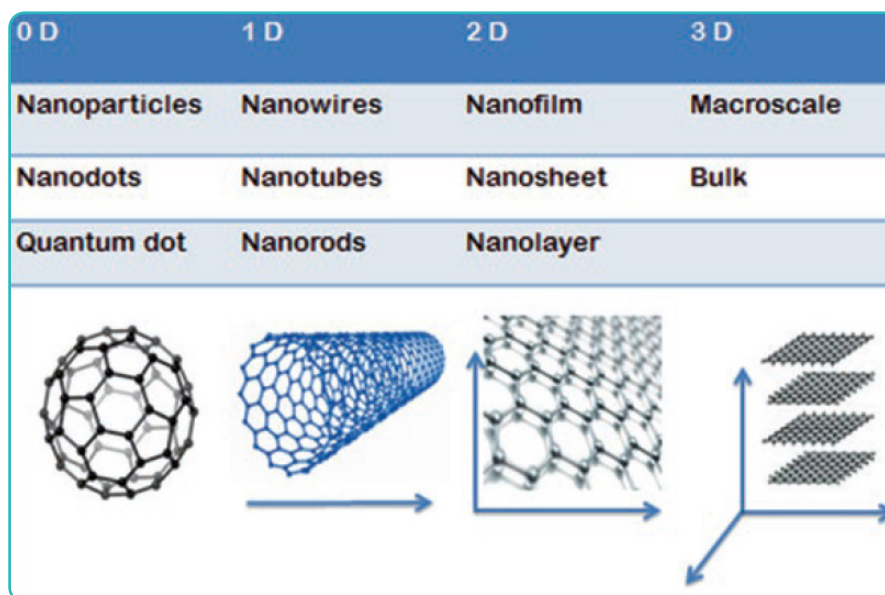
تحقیقات فناوری نانو می‌تواند بر نیاز به مواد شیمیایی خطرناک در طول فرایند سنتز نانو از طریق راه‌های پیشنهادی زیر غلبه کند:

الف. سنتز از پایین به بالا برای نانوکاتالیست جدید (در سطح اتمی یا مولکولی)؛

ب. خودآرایی مولکولی براساس مواد جدید؛

ج. افزودن اطلاعات به مولکول‌ها برای ایجاد مولکول‌های جدید؛

د. توسعه نانومواد در میکرو-راکتورها.



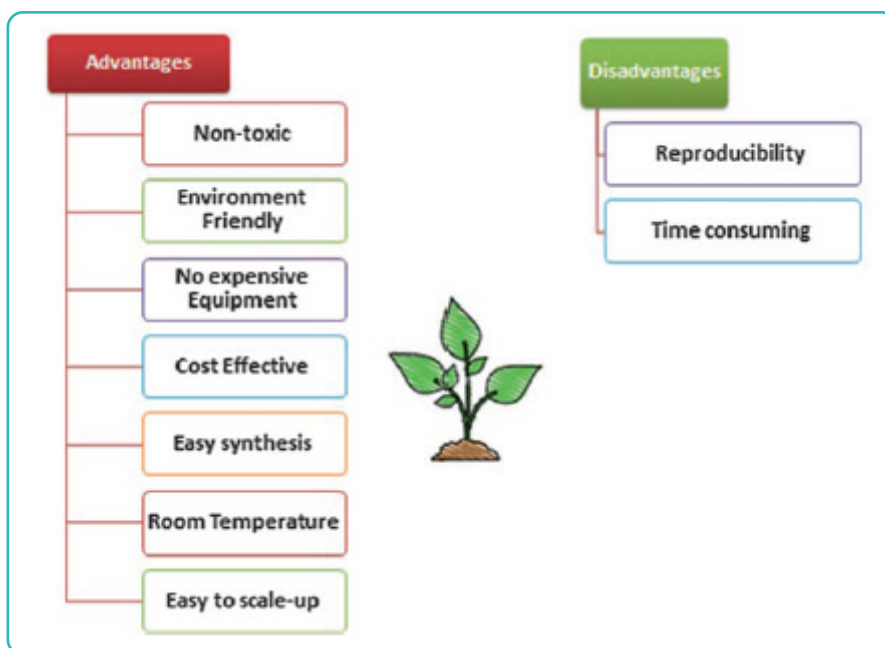
شکل ۴- نمونه‌های نانومواد

## سنتز سبز نانومواد

۲-۲

سنتز سبز با استفاده از اصول شیمی سبز، بستر جدیدی برای طراحی نانومواد فراهم می‌کند که برای سلامتی انسان و محیط‌زیست خطری ندارد و پتانسیل گسترده‌ای برای ایجاد تحول در فرایندهای تولید نانو در مقیاس بزرگ فراهم می‌کند. این نانومواد سبزتر در آینده نزدیک امکانات گسترده‌ای در زمینه نانوپزشکی به عنوان حامل‌های جدید دارو و... دارند.

سنتز سبزتر نانومواد معیاری را برای توسعه نانومحصولات و نانومواد پاک‌تر، ایمن‌تر و پایدارتر تعیین می‌کند. شکل ۵ مزایا و معایب استفاده از فرایندهای سنتز سبز را نشان می‌دهد. اصول اولیه شیمی سبز استفاده از منابع غیرسمی، زیست‌تخریب‌پذیر و مقرون به صرفه و واکنش‌های کارآمد از نظر مصرف انرژی است. نانومواد سنتز شده با استفاده از گیاهان، میکروب‌ها و سایر منابع طبیعی معمولاً نانومواد سنتز شده سبز نامیده می‌شوند. برخی از روش‌های شیمیایی نیز برای روش‌های سنتز مبتنی بر شیمی سبز واجد شرایط هستند. با این حال، استفاده از محصولات کاملاً طبیعی برای سنتز نانومواد توجه گسترده‌ای را در حوزه تولید نانو به خود جلب کرده است.



شکل ۵- مزایا و معایب استفاده از فرایندهای سنتز سبز

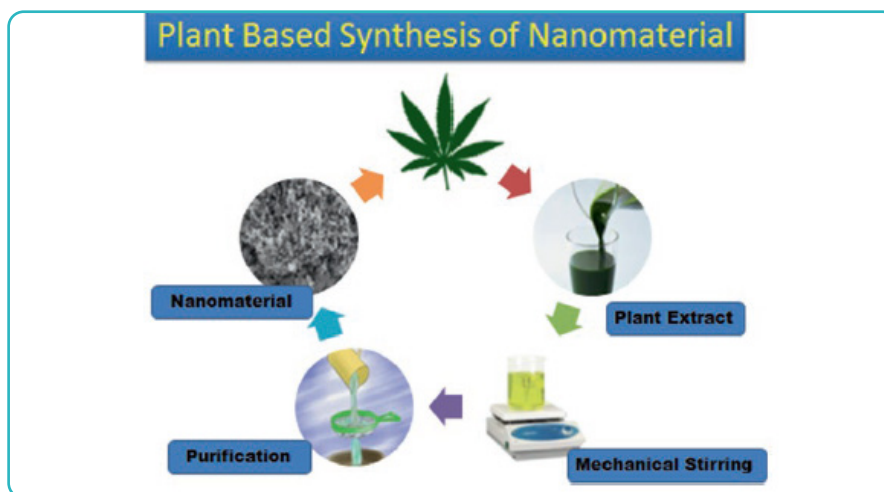
در مقالات مختلف گزارش شده است که نانومواد سنتز شده با استفاده از روش‌های سنتز سبز مشابه همتایان شیمیایی خود هستند و کارایی مشابهی دارند. روش‌های سنتز سبز نانوذرات در مقایسه با سنتز شیمیایی یا میکروبی ساده‌تر، ارزان‌تر، کارآمدتر و سازگار با محیط‌زیست هستند.

روش سنتز شیمیایی شامل استفاده از حلال‌های سمی، فشار بالا، انرژی بسیار و تبدیل در دمای بالا است. از سوی دیگر، سنتز با استفاده از میکروب به دلیل نگهداری آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ امکان‌پذیر نیست. همچنین می‌توان با کنترل شرایط واکنش، مانند دما، غلظت، pH و...، خواص نانومواد را به روشی مشابه سنتز شیمیایی تغییر داد.

کاربردهای عمده این نانومواد سبزتر در نانوحسگرها، نانوداروها، نانودرمان‌ها، ذخیره انرژی و... است. مهم‌تر از همه، رویکردهای سنتز سبزتر راه را برای فناوری نانو ایمن و پایدار هموار کرده است. بسیاری از چالش‌ها و مسائل مربوط به فناوری نانو سبز است، با این وجود پتانسیل رویکرد سبز و پایدار را کاهش نمی‌دهد. شکل ۶ روش کلی سنتز سبز نانومواد را نشان می‌دهد.

انواع نانومواد سبز با کاربردهای مختلف با ترکیب، اندازه، مورفولوژی و بلورینگی مشخص با روش‌های مختلف سنتز شده‌اند و کاربردهای بالقوه آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سنتز سبز نانومواد با استفاده از گیاهان در واقع نوعی رویکرد از پایین به بالا است که شامل اکسیداسیون و کاهش به عنوان واکنش اصلی است.

عصاره گیاه، حاوی چندین متابولیت اولیه و ثانویه مانند آلکالوئیدها، فلاونوئیدها، اسید فنولیک و ترپنوئیدها است. این ترکیبات مسئول کاهش/تبدیل حجم به نانوذرات هستند.



شکل ۶- روش کلی سنتز سبز نانومواد

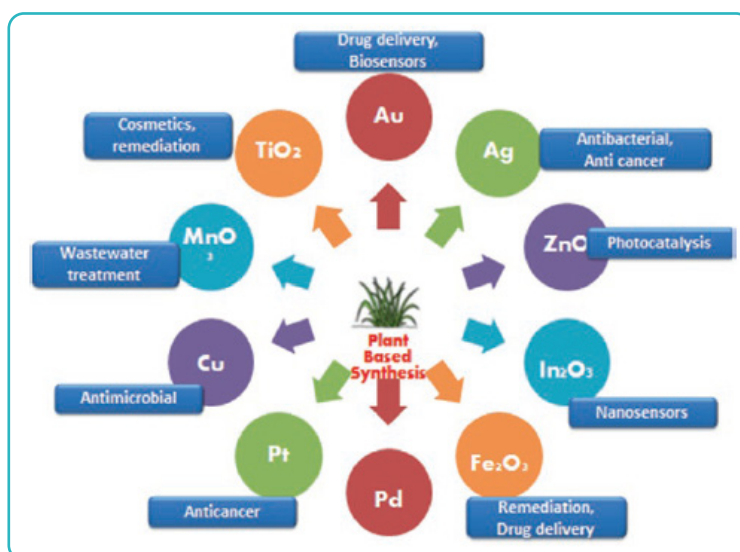
این متابولیت‌ها عمدتاً مسئول واکنش‌های آکسایش و کاهش برای سنتز نانومواد سبز دوستدار محیط‌زیست هستند. پس از بررسی مقالات، مشخص شد که سنتز سهم عمده‌ای در تأثیر چرخه زندگی نانومواد دارد، زیرا در این مرحله احتمال تولید زباله‌های سمی بیشتر است.

شفافیت کم و تناقضات زیاد در جمع‌آوری داده‌ها و روش‌شناسی‌های مختلف نیز توسط بسیاری از محققان بیان شده است. جدول ۴ گیاهان مورد استفاده برای سنتز نانوذرات مختلف را خلاصه می‌کند.

این یک واقعیت است که هر کشوری که با سنتز و استفاده از نانومواد در ارتباط است، از خطرات و سمیت احتمالی آن‌ها بسیار آگاه است، اگرچه تاکنون مقررات خاصی در مورد استفاده از نانومواد اعمال نشده است.

با این حال، سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا<sup>۱۸</sup> مجوز تولید محدود مواد جدید در مقیاس نانو را تحت قانون کنترل مواد سمی صادر می‌کند. نیاز فوری به کشورهای پیشگام مانند ژاپن، ایالات متحده آمریکا و اتحادیه اروپا برای اجرای مقررات در مورد رویکردهای سنتز سمی و محصولات خطرناک وجود دارد.

فرایندهای تولید بر پایه نانو با اثرات منفی بر روی انسان و محیط‌زیست باید در حین ارزیابی نانومواد از نظر سبز بودن آن‌ها برای توسعه پایدار، به طور کامل مورد بررسی قرار گیرند. شکل ۷ نانوذرات با واسطه گیاه و کاربردهای آن‌ها را نشان می‌دهد.



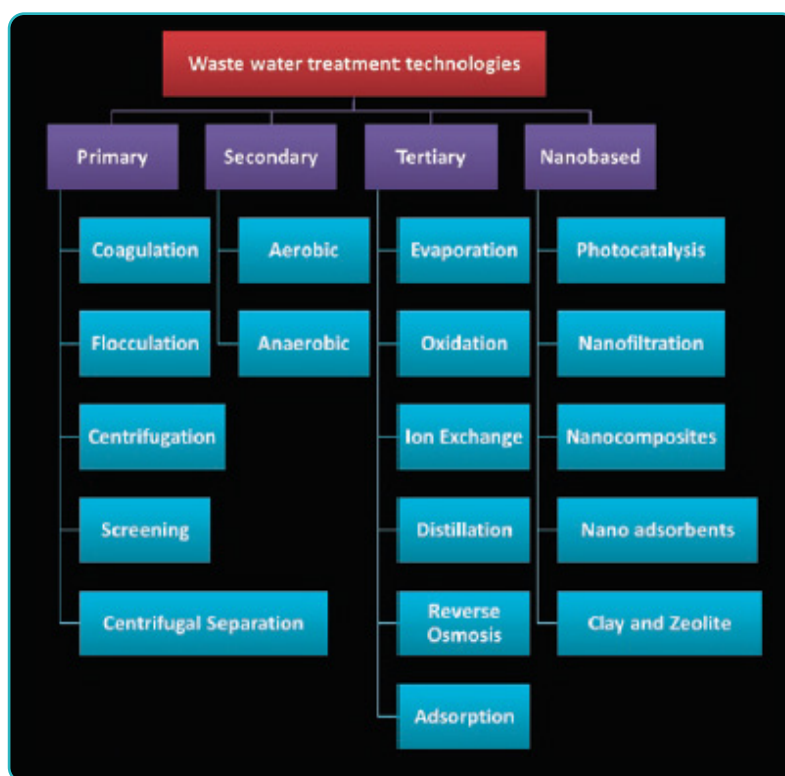
شکل ۷- نانوذرات با واسطه گیاه و کاربردهای آن‌ها



جدول ۴- گیاهان مورد استفاده برای سنتز نانوذرات مختلف

| Plant                   | Nanoparticle                   | Size(nm) | Shape     | PlantPart |
|-------------------------|--------------------------------|----------|-----------|-----------|
| Alovera                 | In <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 5-50     | Spherical | Leaf      |
| Alovera                 | Ag, Au                         | 10-30    | Spherical | Leaves    |
| Acalwha indica          | Ag                             | 40-50    | Spherical | Whole     |
| Alternanthera sessilis  | Ag                             | 20-50    | Spherical | Leaves    |
| A. magicana             | Ag                             | 70-90    | Spherical | Leaves    |
| Artemesia nilagirica    | Ag                             | 65-90    | Spherical | Leaves    |
| Andrographis panicalata | Ag                             | 10-30    | Spherical | Leaves    |
| Azadiricta indica       | Ag                             | 7-10     | Spherical | Gum       |
| Bonorilia serrata       | Au                             | 55       | Spherical | Stem      |
| Cassia fulida           | Ag                             | 15       | Spherical | Fruit     |
| Carta papaya            | Ag                             | 35       | Spherical | Peel      |
| Citnaus colocpuhis      | Ag                             | 5-80     | Triangle  | Callus    |
| Cinnamon zeganician     | Ag                             | 45       | Spherical | Leaves    |
| Dillinia indica         | Ag                             | 11-25    | Spherical | Fruit     |
| Euphorhia prostrata     | Ag                             | 52-55    | Rod       | Leaves    |
| Menthe piperita         | Ag                             | 90-150   | Spherical | Leaves    |
| Mirabilit jalapa        | Au                             | 100      | Spherical | Flowers   |
| Tinospora cordifolia    | Ag                             | 35       | Spherical | Leaves    |
| Withania somnifera      | Ag                             | 5-40     | Irregular | Leaves    |
| Melia azedarach         | Ag                             | 80       | Irregular | Leaves    |

یکی از چالش‌های موجود در سرتاسر جهان دسترسی به آب آشامیدنی پاک و ایمن است. روش‌های تصفیه آب و فاضلاب از نظر شیمیایی بسیار قدرتمند هستند و علاوه بر این هزینه زیادی را در برمی‌گیرند و تا حد زیادی برای محیط‌زیست مضر هستند. فناوری‌های رایجی که در فرایند تصفیه استفاده می‌شوند به سرمایه اولیه زیادی احتیاج دارند (به عنوان مثال فضای بزرگ، هزینه تعمیر و نگهداری زیاد) و آن‌ها به جای اینکه آلودگی‌های موجود را تماماً به مواد دوستدار محیط‌زیست تجزیه کنند، تنها کاری که می‌کنند این است که این آلودگی‌ها را فقط از یک فاز به فاز دیگر انتقال می‌دهند. شرایط ذکر شده ایجاب می‌کند که فناوری جایگزینی با استفاده از یک روش سبزتر با پایداری بالا، برای تصفیه فاضلاب در نظر گرفته شود. در حال حاضر بسیاری از روش‌های فیزیکی-شیمیایی برای تصفیه و خالص‌سازی فاضلاب استفاده می‌شوند که می‌توان به روش‌های جذب کربنی، تقطیر، تبادل یونی، نانو فیلتراسیون و اوسموز معکوس اشاره کرد. معایب عمده این روش‌ها، شامل تغییر شکل غشاها، صرف هزینه بالا، حمل و نقل، تشکیل لجن و مشکلات یک بار مصرف بودن آن‌ها است. از سوی دیگر آلودگی‌های تجزیه‌ناپذیر بیولوژیکی به عنوان تهدید جدی محسوب می‌شوند چرا که این نوع از آلودگی‌ها نیازمند تصفیه با اولویت بالایی هستند. این شرایط مستلزم این است که برای تصفیه فاضلاب از روش‌های سبزتر، پیشرفته‌تر و مقرون به صرفه‌تر استفاده شود. شکل ۸ نشان‌دهنده فناوری‌های مرسوم و پیشرفته تصفیه فاضلاب است. فناوری نانو برای حل معضلات موجود، راهکارهای خوبی ارائه می‌دهد. کاتالیست‌های مبتنی بر فناوری نانو، جاذب‌ها و غشاها راهکارهای دوستدار محیط‌زیست برای تصفیه فاضلاب ارائه می‌دهند. نانومواد به دلیل نسبت سطح به حجم زیاد، توجه بسیاری را در زمینه پاک‌سازی و اصلاح محیط به خود جلب کرده‌اند. سایر تغییرات ویژه در خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به دلیل اندازه آن‌ها خواص منحصر به فردی را اضافه می‌کند. لازم به ذکر است که همچنان تحقیقات زیادی برای توسعه نانومواد جدید، افزایش کارایی، انتخاب پذیری و ظرفیت آن‌ها به منظور استفاده از آن‌ها در تصفیه فاضلاب در حال انجام است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد استفاده از نانومواد به خاطر واکنش پذیری سطحی و نسبت سطح به حجم بالا فواید متعددی دارد که این خاصیت نانومواد در استفاده از آن‌ها برای خالص‌سازی آب نقش مهمی بازی می‌کند.



شکل ۸- فناوری‌های مرسوم و پیشرفته تصفیه فاضلاب

کاربرد فناوری نانو برای تصفیه فاضلاب را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- فیلتراسیون در مقیاس نانو، به عنوان مثال نانوفیلتراسیون مورد استفاده در غشاهای؛
- مواد نانوجاذب، به عنوان مثال جاذب‌ها، نانوکلی و زئولیت‌ها؛
- نانوفوتوکاتالیست‌های با استفاده از مواد نیمه‌هادی در ابعاد نانو برای پالایش محیط‌زیستی؛
- نانوکامپوزیت‌ها برای کاربردهای مختلف؛
- نانومواد جهت پالایش فلزات سنگین؛
- فلزات و اکسیدهای فلزی به منظور حذف میکروب‌های آب.

مطالعات تحقیقاتی بسیاری نشان می‌دهد که فناوری پالایش مبتنی بر فناوری نانو بسیار ایمن‌تر، اقتصادی‌تر و کارتر از روش‌های رایج است؛ زیرا از نانومواد می‌توان برای سنجش و تشخیص آلاینده‌ها و اصلاح و پیشگیری از آلودگی استفاده کرد. علاوه بر این، نانومواد می‌توانند برای بهبود فرایندهای جداسازی غشایی استفاده شوند که منجر به انتخاب‌پذیری بالاتر و کاهش هزینه‌ها می‌شود. نانومواد چندین مزیت دیگر نیز دارند که می‌توان به خواص منحصربه‌فرد وابسته به اندازه به دلیل اثر محصور شدن کوانتومی اشاره کرد. ویژگی‌های خاص، امکان توسعه نانومواد با کارایی بالا را به منظور تصفیه کارآمد پساب فراهم می‌کند. امیدوارکننده‌ترین کاربردهای نانومواد برای تصفیه فاضلاب در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- کاربردهای نانومواد برای تصفیه فاضلاب

| کاربردها                                   | ویژگی‌ها          | نانومواد         |
|--------------------------------------------|-------------------|------------------|
| تا حد زیادی برای اصلاح محیط استفاده می‌شود | فوتوکاتالیستی     | فلز و اکسید فلزی |
| راکتورهای دوغاب                            | غیرسمی            |                  |
| تصفیه فلزات سنگین، رنگ، پساب صنعتی         | مبتنی بر شیمی سبز |                  |
|                                            | قابل استفاده مجدد |                  |
| حذف فلزات سنگین                            | مساحت سطح بالاتر  | جاذب‌ها          |
| رنگ‌ها                                     | SVR بالاتر        |                  |
| تخریب آفت‌کش‌ها                            | نرخ جذب بالاتر    |                  |
| حذف آلاینده‌های آلی، باکتری‌ها             | اصلاح آسان        |                  |
| تصفیه آب و فاضلاب                          | قابل اعتماد       | غشا و فرایندها   |
| خالص‌سازی                                  | قابل اعتمادترین   |                  |
| جداسازی                                    | استفاده گسترده    |                  |
| تمامی زمینه‌های تصفیه آب و فاضلاب          | فرایند خودکار     |                  |

نانومواد به دلیل نسبت سطح به حجم بالا (SVR)، ظرفیت خوبی در حوزه تصفیه فاضلاب و خالص سازی آن پیشنهاد می دهند. غشاهای فوتوکاتالیستی جدید با پوشش نانومواد نیمه رسانا بر روی غشاهای معمولی برای فرایند تصفیه و پالایش استفاده می شوند. روش های متفاوتی برای حل مشکلات مربوط به تصفیه فاضلاب وجود دارد که به عنوان مثال می توان به فوتوکاتالیست، نانوفیلتراسیون، جاذب ها، استفاده از اکسید تیتانیوم، اکسیدروی و نانوذرات مغناطیسی، غشاهای پلیمری، غشاهای سرامیکی، نانولوله های کربنی و غشاهای نانو اشاره کرد. نانوذرات جدید فلز/اکسید فلز، نانوغشا و سایر نانومواد برای شناسایی و حذف آلاینده های شیمیایی و بیولوژیکی از جمله فلزات سنگین، ضایعات دارویی، آفت کش ها و مواد واسطه آن ها، سیانیدها، جلبک ها، ویروس ها، باکتری ها، انگل ها، مواد آلی، آنتی بیوتیک ها و... از فاضلاب ها استفاده می شوند. فرایند جداسازی با غشا یا مواد مبتنی بر نانو و ترکیب این دو، برای تصفیه فاضلاب با استفاده از فیلتراسیون و فوتوکاتالیست به صورت همزمان امکان گستره ای را فراهم می کند. در خصوص مسئله پایداری، محققان به سمت استفاده از روش های سبزتر تصفیه فاضلاب برای کاربردهای محیط زیستی متمرکز شده اند. بنابراین نانومواد سنتز شده با استفاده از روش مبتنی بر شیمی سبز که برای پاک سازی محیط زیست استفاده می شود ریسک خطر تجزیه و ایجاد زباله های خطرناک را کاهش می دهد و از سوی دیگر ریسک سمیت محصول نهایی را برطرف می کند.

### فوتوکاتالیست یا نانوکاتالیست

۴-۲

عدم کارایی فناوری های رایج در راستای پایداری محیط زیست منجر به تحقیقات در زمینه فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته (از جمله فناوری های تصفیه پساب بر پایه نانو) شده است.

هدف اصلی این AOP ها<sup>۱</sup> تولید گونه های بسیار واکنش پذیر (درجا) یا تولید ذرات باردار رادیکال آزاد برای تخریب و کانی سازی سریع ترکیبات و آلاینده های آلی غیرقابل مدیریت، پاتوژن های آب، سموم، آفت کش ها و محصولات جانبی ضد عفونی است. بعد از گذشت چند سال، فوتوکاتالیست های مبتنی بر فناوری نانو، پتانسیل خوبی به عنوان یک فناوری پالایش مبتنی بر شیمی سبز را نشان داده است. در میان چندین پروژه در حال اجرای مربوط به زمین سبز، نانوفوتوکاتالیست با استفاده از انرژی خورشیدی طبیعی و مصنوعی که به وفور در دسترس است به عنوان امیدوارکننده ترین فناوری تصفیه ظاهر شده است. در سال های اخیر از فوتوکاتالیست به صورت موفقیت آمیزی برای برطرف کردن آلودگی ها از فاضلاب استفاده شده است.

اکسیداسیون فوتوکاتالیستی، پتانسیل خود را برای تخریب ترکیبات مختلف مانند رنگ ها، داروها، ترکیبات مختل کننده غدد درون ریز، فنول ها و آفت کش ها از فاضلاب ثابت کرده است. فرایندهای فوتوکاتالیستی در تخریب و کانی سازی ترکیبات زیستی مقاوم موفق بوده و به عنوان مؤثرترین روش درمان ظاهر شده اند.

افزایش نگرانی عمومی در مورد چندین آلاینده محیط زیستی، نیاز به توسعه فناوری های پیشرفته در رابطه با تصفیه را برانگیخته است، جایی که اکسیداسیون پیشرفته، به عنوان مثال، فوتوکاتالیست، توجه زیادی را در زمینه اصلاح محیط زیستی به خود جلب کرده است.

استفاده از فوتوکاتالیست ها چند مزیت دارد که شامل موارد زیر می شود:

- غیرسمی بودن؛
- قیمت پایین؛
- کارایی بالاتر؛
- قابلیت استفاده چندباره؛
- خطرناک و سمی نبودن محصول نهایی؛
- اثرگذاری بر روی بسیاری از آلاینده ها؛
- واکنش پذیری بالا.



در مقایسه با سایر فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته به خصوص آن‌هایی که شامل استفاده از اکسیدکننده‌هایی مانند هیدروژن پراکسید و ازون هستند، فناوری نانو، امکانی را فراهم می‌آورد که دیگر به عامل اکسیدکننده گران قیمت نیازی نیست زیرا اکسیژن موجود در اتمسفر به عنوان اکسیدکننده عمل می‌کند. این موضوع به مزیت نانوفوتوکاتالیست‌ها افزوده است. از آنجایی که انتخاب و کارایی نانوکاتالیست‌ها تا حد زیادی به شکل، اندازه و ساختارهای سطحی بستگی دارد، سنتز نانوکاتالیست‌هایی با خواص فیزیوشیمیایی مطلوب برای دستیابی به هدف فناوری نانو سبز ضروری است.

## تصفیه آب با استفاده از نانوفیلتراسیون

۵-۲

فیلتراسیون غشایی که اغلب به عنوان «فناوری انتخابی»<sup>۳</sup> نامیده می‌شود، یک فرایند تصفیه با فناوری برتر و پذیرفته شده برای فاضلاب است که با ایجاد یک مانع (فیزیکی) که به طور مؤثر مولکول‌های ناخواسته را حذف می‌کند، اجرا می‌شود.

برای بیش از سه دهه، فناوری غشا در سراسر جهان برای جداسازی موفقیت‌آمیز طیف وسیعی از آلاینده‌ها از آب و فاضلاب شناخته شده است. غشا یک لایه نازک از یک ماده نیمه‌تراوا است که وقتی نیروی محرکه در سراسر غشا اعمال می‌شود، مواد موردنظر را جدا می‌کند.

غشاها مانع فیزیکی را فراهم می‌کنند که فقط به اجزا و مواد خاصی بر اساس خواص شیمیایی و فیزیکی آن‌ها اجازه عبور می‌دهد. در میان تمام فناوری‌های مرسوم دیگر که برای تصفیه آب استفاده می‌شود، فیلتراسیون غشایی به عنوان قابل اعتمادترین راه حل، ظاهر می‌شود، زیرا پیچیدگی کمتری دارد، بسیار مؤثر است، شامل استفاده از مواد شیمیایی و افزودنی نمی‌شود، افزایش مقیاس آن آسان است و مهم‌تر از همه به دلیل انعطاف‌پذیری آن برای ترکیب با سایر فناوری‌های پیشرفته، قابل استفاده است.

NF یک فناوری مبتنی بر فشار بالا است که برای حذف آلاینده‌های آلی، باکتریایی‌ها، ویروس‌ها از لبنیات، مواد آلی طبیعی و نمک‌ها استفاده می‌شود. همچنین برای نرم کردن آب سخت با حذف یون‌های چند ظرفیتی و دو ظرفیتی کاربرد دارد. اندازه منافذ غشا NF حدود  $0.001$  میکرون است.  $99/9\%$  حذف مولکول‌ها در محدوده  $1-100$  نانومتر در موارد آفت‌کش‌های مختلف با استفاده از غشاهای NF به دست آمد. NF برای حذف ترکیبات با وزن مولکولی کم، به اندازه  $100-200$  Da عالی است، بنابراین برای حذف آفت‌کش‌ها انتخاب شده است. تا به امروز، NF تنها فناوری فیلتراسیون شناخته شده برای حذف آلاینده‌های آلی و آفت‌کش‌ها است.

## تولید انرژی‌های تجدیدپذیر

۶-۲

حوزه اصلی تحقیقات در این زمینه، طراحی سلول‌های خورشیدی بر پایه نانو با استفاده از اصول شیمی سبز است. نانومواد جدید مورد استفاده برای سلول‌های خورشیدی، شامل دی‌اکسیدتیتانیوم، کوانتوم‌دات، تلورید کادمیوم و نقره با پلیمری است که می‌تواند بخش زیادی از انرژی خورشیدی را جذب کند.

هزینه سلول‌های خورشیدی مبتنی بر نانو در مقایسه با سلول‌های خورشیدی تجاری موجود بسیار کمتر خواهد بود. تحقیقات فشرده‌ای در این زمینه برای افزایش کارایی سلول‌های خورشیدی در حال انجام است. روش‌های دیگری مانند رسوب نانوکریستال‌ها، نانوذرات معلق در کوانتوم دات‌ها، نانوسیم‌ها و تولید لایه‌لایه‌ای بسیار پایدار، برای حفاظت از سلول‌های خورشیدی نیز برای توسعه محصول پایدار در نظر گرفته می‌شوند. تحقیقات فناوری نانو نیز در زمینه ذخیره‌سازی انرژی با توسعه دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی با ظرفیت بالا برای کاربرد در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر در حال انجام است. دستگاه‌های فوتوولتائیک مبتنی بر نانو پتانسیل قابل توجهی برای افزایش عملکرد و کاهش هزینه‌ها دارند.



### ۳. محدودیت‌های فناوری نانو سبز

فناوری نانو سبز یک حوزه نوظهور است و محدودیت‌ها و چالش‌های خاص خود را دارد که باید به آن پرداخت. بر اساس گزارش مؤسسه شیمی سبز ACS<sup>۱۳</sup>، چالش‌های کلیدی مرتبط با فناوری نانو سبز عبارتند از:

- رسیدگی به مسائل مربوط به سمیت نانومواد؛
- موانع فنی و اقتصادی؛
- سیاست‌های نظارتی در فرایندهای تولید نانو؛
- استقرار روش‌های افزایش مقیاس؛
- تجزیه و تحلیل چرخه عمر.

برای توسعه سبز و پایدار باید نکات ذکر شده در بالا مورد توجه قرار گیرد. فناوری نانو سبز محصولاتی را به ارمغان می‌آورد که آلاینده‌ها را کاهش داده و سازگار با محیط‌زیست هستند، اما محدودیت‌های اصلی هزینه‌ها و خطرات مرتبط با آن است.

تولید محصولات مبتنی بر نانو اگرچه منجر به پیشرفت‌هایی در توسعه فناوری نانو سبز شده است، اما سطح پایداری برای کاربردهای سبزتر فناوری نانو همیشه یک نگرانی است. محصولات سنتز شده با استفاده از فناوری نانو سبز کارآمد هستند، اما نگرانی اصلی، مربوط به پردازش بالادستی محصولات است.

تحقیقات برای سنتز و کاربرد نانومحصولات سبزتر در حال انجام است، اما وقتی در مورد تجاری‌سازی آن‌ها صحبت می‌شود تا به امروز محصولات بسیار کمی تجاری شده‌اند. این یک تصور کلی است که چند سال طول می‌کشد تا پتانسیل بازار برای فناوری نانو سبز را به طور کامل درک کنیم.



#### ۴. نتیجه‌گیری

فناوری نانو فرصتی برای یافتن راه‌حلی جهت مقابله با مشکلاتی که به طور قابل توجهی جامعه جهانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، ارائه می‌کند. همان‌طور که از نام آن پیداست، شیمی سبز هدف خاصی دارد. پس از بررسی پیشرفت‌ها و کاربردهای این رشته، تمرکز به سمت کاربردهای مبتنی بر نانو معطوف شده است، زیرا فناوری نانو چارچوبی را برای در نظر گرفتن کاربرد شیمی سبز فراهم می‌کند. فناوری نانو سبز پتانسیل قابل توجهی برای کمک به مقابله با چالش‌های محیط‌زیستی همراه با توسعه پایدار دارد. توسعه پایدار فناوری نانو مستلزم توجه به چرخه عمر برای تجزیه و تحلیل اثرات محیط‌زیستی محصولات نانو است. همچنین، نکات خاصی مانند ارزیابی چرخه عمر احتمالی نانومحصولات جدید سنتز شده از طریق تولید نانو قبل از عرضه به عرصه تجاری باید در دسترسی به سهم در رشد سبز جدی گرفته شود. استفاده از اصول شیمی سبز در فناوری نانو به شناسایی محصولات و فرایندهای بهتر کمک می‌کند و همیشه امید به بهبود وجود دارد.

#### پانوشت

- |                                         |              |                        |                               |
|-----------------------------------------|--------------|------------------------|-------------------------------|
| 1. Situ remediation                     | 4. Manifolds | 8. Top-down            | Processes                     |
| 2. Greener                              | 5. Anastas   | 9. Etching             | 12. Technology of choice      |
| 3. U.S. Environmental Protection Agency | 6. Warner    | 10. US-EPA             | 13. Green Chemistry Institute |
|                                         | 7. Bottom-up | 11. Advanced Oxidation |                               |

#### منبع

Khan, Samreen Heena. "Green nanotechnology for the environment and sustainable development." Green materials for wastewater treatment. Springer, Cham, 2020. 13-46.



