فناوری نانو در مهندسی شیمی

امیرحسین مشتاقی[۱]، ریحانه باباخانلو[۲]، مهدیه یاوری[۳]،
علی مؤذنی[۴] و مجتبی شریعتی نیاسر[۵]*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۷ ، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۷

DOI: 10.22047/ijee.2024.449986.2070

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.4.3

چکیده: نانومواد با خواص منحصربه‌فرد خود، انقلابی در زمینه‌های مختلف علم و فناوری ایجاد کرده‌اند زیرا استفاده از این مواد، عملکرد بسیاری از فرایندها را بهبود بخشیده است. این مقاله مروری در ابتدا به بررسی روش‌های ساخت و مشخصه‌یابی برای شناخت و استفاده از نانومواد می‌پردازد. برای ساخت نانومواد، روش‌های بالا به پایین و پایین به بالا، دو رویکرد اصلی مورد استفاده هستند. هر رویکرد، روش‌های متنوعی را با ملاحظاتی برای مقیاس‌پذیری ارائه می‌دهد. همچنین روش‌های مختلف میکروسکوپی و طیف‌سنجی را که برای تشخیص و شناسایی نانومواد، مشخص کردن اندازه، ریخت‌شناسی و ترکیب شیمیایی استفاده می‌شوند، در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرند. در ادامه، تمرکز این مقاله بر اثر فناوری نانو در مهندسی شیمی است. به عنوان مثال می‌توان به توسعه کاتالیزورها و جاذب‌های بسیار کارآمد برای صنعت نفت و گاز، ایجاد سامانه‌های پیشرفته دارورسانی و پیشرفت‌های تصفیه آب اشاره کرد. در ادامه مسیر این فناوری باید توجه داشت که آینده نانومواد در نانومعماری نهفته است و بر پایه فناوری نانو برای ایجاد سامانه‌های مواد پیچیده و کاربردی با ادغام با سایر رشته‌ها بنا شده است.

واژگان کلیدی: نانوفناوری، مهندسی شیمی، ساخت نانوذرات، کاربرد نانومواد

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. amir.moshtaghi@ut.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. babakhanlo.reyha@ut.ac.ir
۳- دکتری مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. mhyavari@ut.ac.ir
۴- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. moazzeni.ali@ut.ac.ir
۵- استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول). msharіat@ut.ac.ir

۱. مقدمه

فناوری نانو به سرعت در حال پیشرفت است و منجر به تغییرات چشمگیری در علم و ایجاد کالاهای مصرفی شده است و ظرفیت قابل توجهی برای طیف گسترده‌ای از محصولات نوآورانه در حوزه‌هایی مانند انرژی، الکترونیک، زیست‌مواد و پزشکی فراهم آورده است. هدف اصلی نانوفناوری، تولید مواد جدید در مقیاس نانو است که این هدف، با دستکاری اتم‌ها و مولکول‌ها برای ایجاد خواص و عملکردهای منحصربه‌فرد تأمین می‌شود. به بیان دیگر این فناوری امکان تغییر ماده در سطح اتمی را بررسی می‌کند که شامل مطالعه و دستکاری اتم‌ها و مولکول‌ها برای درک رفتار و کاربردهای بالقوه آنها می‌شود.

کلمه «نانو» برگرفته از واژه‌ای یونانی و به معنای «بسیار کوچک» است. علم نانو مربوط به مطالعه سامانه‌هایی با ابعاد کوچک است و علوم شیمی، مواد و زیست‌شناسی را ترکیب می‌کند. این علم را می‌توان این‌گونه تعریف کرد:

۱. مطالعه مواد با حداقل یک بعد، با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر

۲. نحوه طراحی، ساخت و کنترل سامانه‌های تولیدشده با موادی در مقیاس نانومتر.

تاریخچه دقیق فناوری نانو مشخص نیست، اگر چه ریچارد فاینمن به عنوان دانشمند پیشگام در این زمینه در نظر گرفته می‌شود، مطالعات نشان می‌دهند که قبل از فاینمن، نانومواد برای کاربردهای مختلفی مانند پزشکی استفاده می‌شده است. جان اوتینام در سال ۱۴۴۹، اختراع شیشه‌ای مبتنی بر نانوذرات طلا را به ثبت رساند. در قرن شانزدهم، تئوفراستوس فون هوهنهایم، پزشک سوئیسی، از نانوذرات طلا برای درمان بیماران مبتلا به بیماری‌های مختلف استفاده کرد. اگر چه فاینمن مفهوم نانوفناوری را برای اولین بار مطرح نکرده است اما در سال ۱۹۵۹، از طریق سخنرانی خود در یک کنفرانس بین‌المللی به تفصیل آن را بیان کرد (Hosseinpour, 2001).

نوریو تانیگوچی در سال ۱۹۷۴ اصطلاح «نانوفناوری» را برای توصیف سازوکارهای مختلف پردازش مواد با اندازه نانو و دقت مواد فوق نازک تا مقیاس نانو به‌کار برد. پس از آن دو دستاورد بشر، منجر به توسعه علمی نانوفناوری شده است. اول، اختراع میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی[1] (STM) در سال ۱۹۸۱ بود که به وسیله آن، اتم‌های منفرد برای اولین بار به راحتی شناسایی شدند و دیگری، نانولوله‌های کربنی بود که چند سال بعد کشف شد.

دستکاری مواد در ابعاد نانو، امکان توسعه مواد نوآورانه با خواص منحصربه‌فرد را فراهم می‌کند و در نتیجه، عملکرد را در کاربردهای مختلف، از جمله نانوزیست‌فناوری برای اهداف درمانی و تشخیصی، کاربردهای کاتالیستی و نانومواد جاذب انرژی، کاربردهای نانوانرژی مانند سلول‌های خورشیدی

1- Scanning tunneling microscope

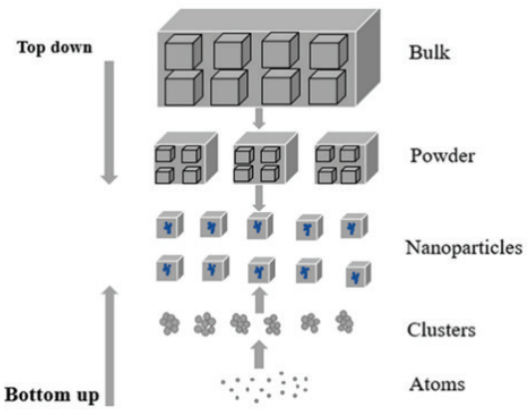
هیدروژن و فتوولتائیک و کاربرد در صنایع غذایی و کشاورزی را بهبود می‌بخشد.

اگر چه نانوفناوری این ظرفیت را دارد که صنایع مختلف را متحول کند اما پیامدهای سلامتی احتمالی نانومواد بر روی انسان، یک نگرانی قابل توجه است زیرا، اطلاعات سمیت قابل اعتماد و کافی در مورد این مواد در دسترس نیست. به عنوان مثال، برخی از پزشکان نگران هستند که نانوذرات با ابعاد بسیار کوچک خود از سد خونی مغزی عبور (غشایی که از مغز محافظت) عبور کنند. بنابراین اگر چه فناوری نانو مزایای مختلفی در زمینه‌های مختلف دارد، اما رسیدگی به خطرات بالقوه و تضمین مقررات مناسب برای اجرای اخلاقی و ایمن آن، بسیار مهم است. از این رو لازم است برای مصرف این مواد، معیارهایی مشخص و دستورالعمل‌های خاصی در نظر گرفته شوند تا از استفاده ایمن و مسئولانه آنها اطمینان حاصل شود.

مطالعه پیش رو دیدگاه جامعی را در زمینه تاریخچه نانوفناوری، رویکردها و کاربردهای اساسی آن در زمینه‌های مختلف ارائه می‌کند. علاوه بر این، نانومواد، مزایا، معایب و کاربردهای ممکن آنها را در صنایع مختلف را بررسی می‌کند.

۲. روش‌های ساخت

نانومواد به دلیل کاربردهای متعدد، در زندگی روزمره اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است و روش‌های مختلف ساخت آنها بر اساس کاربرد خاص هر کدام، توسعه یافته است. هنگام انتخاب روش ساخت نانومواد، باید دو موضوع اصلی، خواص مورد نظر و قابلیت کاربرد آنها در مقیاس‌های بزرگ در نظر گرفته شود. اگر چه بسیاری از روش‌های ساخت ممکن است در محیط‌های آزمایشگاهی کارآمد باشند، استفاده از آنها در مقیاس‌های بزرگ‌تر ممکن است با موانع متعددی روبه‌رو شود.



شکل ۱. رویکردهای پایین به بالا و از بالا به پایین (Abid et al., 2022)

به طور کلی، تمام روش‌های ساخت نانومواد را می‌توان به دو دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: رویکردهای پایین به بالا و رویکردهای بالا به پایین[۲] (شکل ۱). هر رویکرد شامل چندین روش است. در رویکرد از بالا به پایین، ساخت با مواد حجیم شروع می‌شود و از طریق آسیاب گام‌به‌گام مواد به نانوذرات ریز ختم می‌شود. برخی از روش‌های متداول از بالا به پایین مورد استفاده، شامل آسیاب مکانیکی، فوتولیتوگرافی، لیتوگرافی پرتو الکترونی، آنودیزاسیون و اچ پلاسما است.

در مقابل، روش پایین به بالا شامل مونتاژ نانومواد از پایین است، یعنی اتم به اتم، مولکول به مولکول و خوشه به خوشه. بسیاری از روش‌های ساخت نانومواد، از جمله روش‌های شیمیایی مختلف مانند رسوب‌شیمیایی، روش‌های سل‌ژل، رسوب‌شیمیایی بخار و همچنین روش‌های ساخت زیستی، در این دسته قرار می‌گیرند (جدول ۱).

جدول ۱. تقسیم‌بندی روش‌های ساخت

پایین به بالا	بالا به پایین
تهیه نانومواد با روش سل ژل	فرسایش لیزری
رسوب بخار فیزیکی	اچ[۳] کردن (زدایش)
تخریب حرارتی	تبخیر حرارتی
سولوترمال	فرز مکانیکی
ساخت گرمابی	کندوپاش کردن
رسوب بخار شیمیایی	لیتوگرافی
ریزامولسیون و مایسل معکوس	الکتروریسی

۲-۱. روش‌های بالا به پایین

روش‌های بالا به پایین شامل تجزیه مواد حجیم برای ایجاد مواد نانوساختار است. آسیاب مکانیکی، فرسایش لیزری، فروشویی، کندوپاش و انفجار الکتریکی برخی از رویکردهای بالا به پایین هستند. تبدیل مواد حجیم به ذرات کوچک در ابعاد نانو از طریق این رویکرد به دست می‌آید. اگرچه روش‌های بالا به پایین ساده هستند اما می‌توانند در تولید ذرات با شکل نامنظم و ریز، مؤثرتر باشند. نقطه ضعف اصلی این روش، دشواری در دستیابی به اندازه و شکل ذرات مورد نظر است.

۲-۱-۱. تبخیر حرارتی[۴]

تبخیر حرارتی یک فرایند گرماگیر است که در آن گرما باعث تجزیه شیمیایی می‌شود. این گرما

1- Bottom-up approach
2- Top-down approach
3- Etching
4- Thermal evaporation

یک پیوند شیمیایی را در مولکول می‌شکند. تبخیر حرارتی یکی از محبوب‌ترین روش‌ها برای تولید سوسپانسیون‌های تک پراکنده پایدار با قابلیت خودآرایی، در میان روش‌های متعدد برای تولید نانوذرات معدنی است لایه‌های نازک بر روی انواع زیرلایه‌ها با استفاده از تبخیر حرارتی ساخته می‌شوند.

۲-۱-۲. آسیاب مکانیکی[1]

آسیاب مکانیکی روشی مقرون‌به‌صرفه برای تولید مواد در سطح نانو از مواد حجیم است. آسیاب مکانیکی روشی مؤثر برای تولید مخلوط‌های فازهای مختلف است و در تولید نانوکامپوزیت‌ها مفید است. ساده‌ترین و کارآمدترین فرایند مکانیکی روش بالا به پایین، آسیاب گلوله‌ای است. این فرایند انتقال انرژی جنبشی از محیط آسیاب به مواد در حال کاهش است. نمونه‌های پودر آسیاب تأثیر برجسته‌ای بر اندازه کریستالیت، کاهش ذرات، اصلاح سطح و توسعه احتمالی فازهای فراپایدار دارند. همچنین امکان تولید انواع واکنش‌هایی وجود دارد که در دمای محیط رخ نمی‌دهند.

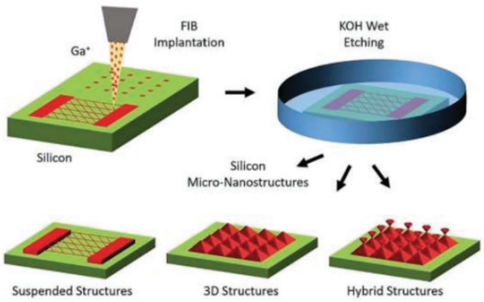
فرایند آسیاب برای اهداف بسیاری استفاده می‌شود که عناوین آنها در زیر آورده شده است:

- فشرده‌سازی در اندازه ذرات
- رشد اندازه ذرات
- تغییر در ساختار ذرات
- تراکم مناسب
- آلیاژسازی مکانیکی (آلیاژسازی حالت جامد)

۲-۱-۳. لیتوگرافی

لیتوگرافی فرایندی است که از یک پرتوی متمرکز نور یا الکترون برای توسعه نانومعماری استفاده می‌کند. دو نوع اصلی لیتوگرافی وجود دارد: لیتوگرافی ماسک‌دار و لیتوگرافی بدون ماسک. در نانولیتوگرافی ماسک‌دار، از یک ماسک یا قالب خاص برای انتقال نانوالگوها در سطح وسیعی استفاده می‌شود. فتولیتوگرافی، لیتوگرافی نانوایمپرنت و لیتوگرافی نرم همه اشکال لیتوگرافی ماسک‌دار هستند (شکل۲). در مقابل، لیتوگرافی بدون ماسک از **کاوشگر**، پرتویون متمرکز و لیتوگرافی پرتو الکترونی برای انجام نوشتن نانوالگوی دلخواه بدون استفاده از ماسک استفاده می‌کند. در نهایت، ساخت ریزنانو فرم آزاد سه‌بعدی را می‌توان از طریق کاشت یون با یک پرتو یون متمرکز، در ترکیب با فرایندهای مرطوب به دست آورد.

1- Mechanical milling



شکل ۲. نمودار شماتیک از ساخت ریز نانوساختارهای سه‌بعدی با یک پرتو یونی از طریق ساختار Si. این شامل کاشت در Si از طریق لیتوگرافی Ga FIB و حکاکی ماسک با وضوح نانومتر، حکاکی مرطوب ناهمسانگرد بعدی در محلول KOH و ساخت ریز نانوساختارهای Si از طریق حذف انتخابی ناحیه کاشته نشده است

در سال‌های اخیر، تحقیقات قابل توجهی در لیتوگرافی نانوچاپ انجام شده است و به دلیل ویژگی‌های متعدد آن، از جمله وضوح بالا، فناوری توان عملیاتی بالا و مقرون‌به‌صرفه بودن، در بخش‌های مختلفی مانند الکترونیک مولکولی، حسگرهای زیستی، الگوبرداری ماسک اچ و فوتونیک مورد استفاده قرار گرفته است. ساخت نانوذرات مرتب‌شده، برای کاربردهای علمی و فناوری اساسی مهم است. در بین تمام فرایندها، لیتوگرافی اصلی‌ترین مورد استفاده است. ایجاد آرایه‌های تحقق این معماری‌ها عمدتاً به توسعه روش‌های نانولیتوگرافی، از جمله فوتولیتوگرافی، لیتوگرافی پرتو الکترونی، چاپ جوهرافشان، لیتوگرافی نرم و چاپ نانو بستگی دارد. متأسفانه، این روش‌های لیتوگرافی، به ویژه هنگام تولید نمونه‌ها در مقیاس بزرگ، می‌توانند گران، پیچیده و زمان‌بر باشند. علاوه بر این، توان عملیاتی و کنترل‌پذیری این فرایندهای رسوبی می‌تواند بهتر باشد.

۲-۱-۴. الکتروریسی[1]

الکتروریسی یکی از ساده‌ترین روش‌های از بالا به پایین برای تولید مواد نانوساختار است. به طور کلی برای تولید نانوالیاف از مواد مختلف استفاده می‌شود. یکی از پیشرفت‌های حیاتی در الکتروریسی، الکتروریسی هم‌مرکز است. الکتروریسی هم‌مرکز، ریسنده از دو مویرگ هم‌محور تشکیل شده است. در این مویرگ‌ها، دو مایع چسبناک، یکی به عنوان پوسته و دیگری به عنوان هسته، می‌توانند نانومعماری هسته- پوسته را در یک میدان الکتریکی تشکیل دهند. الکتروریسی هم‌مرکز روشی عملی و ساده و از بالا به پایین برای دستیابی به الیاف فوق نازک هسته- پوسته در مقیاس بزرگ است. طول این نانومواد فوق نازک را می‌توان تا چندین سانتی‌متر افزایش داد. این روش مواد هسته- پوسته، بسپار توخالی، غیرآلی، آلی و ترکیبی را توسعه داده است.

1- Electrospinning

۲-۲. روش‌های پایین به بالا

روش سازنده اصطلاحی است که برای توصیف رویکرد پایین به بالا استفاده می‌شود. روش پایین به بالا، برعکس قطبی روش بالا به پایین است که در آن شکل، اندازه و ترکیب شیمیایی کاملاً مشخص از طریق رشد و خودآرایی تشکیل می‌شوند.

۲-۲-۱. سل‌ژل[1]

سل‌ژل یک روش نسبتاً جدید است که به ویژه برای ساخت نانوذرات اکسید فلزی استفاده می‌شود. حلال‌های آلی مانند الکل‌ها، کتون‌ها، آلدئیدها و غیره از نظر سطح واجد شرایط بیشتری هستند. روش سل‌ژل یک روش مرطوب شیمیایی است که به طور گسترده، برای توسعه نانومواد استفاده می‌شود. این روش برای توسعه انواع نانومواد باکیفیت بالا بر پایه اکسید فلزی استفاده می‌شود. این روش را روش سل‌ژل می‌نامند زیرا در طول ساخت نانوذرات اکسید فلز، پیش‌ماده مایع به یک سل تبدیل می‌شود و در نهایت، سل به یک ماده تبدیل می‌شود.

ساختار شبکه‌ای که ژل نامیده می‌شود، پیش‌سازهای معمولی برای تولید نانومواد با استفاده از روش سل-ژل آلکوکسیدهای فلزی هستند. فرایند این روش را می‌توان در سه مرحله، شامل فرایندهای آبکافت، تراکم و خشک‌کردن تکمیل کرد:

- مرحله ۱: نمک پیش‌ساز تحت فرایند آبکافت قرار می‌گیرد که منجر به تشکیل ماده مورد نظر می‌شود.
- مرحله ۲: محلول هیدروکسید به راحتی متراکم می‌شود، به‌طوری‌که ساختار ژل سه‌بعدی شکل گرفته شود.
- مرحله ۳: ژل آماده‌شده تحت فرایند خشک شدن قرار می‌گیرد و در نتیجه تشکیل می‌شود.

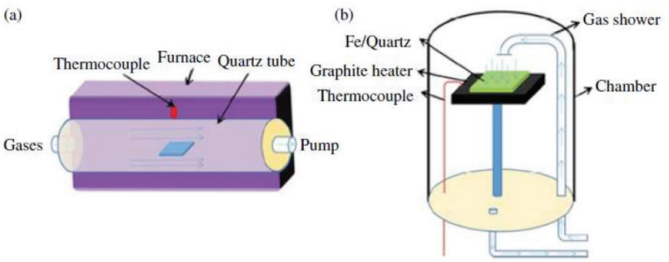
۲-۲-۲. رسوب‌شیمیایی بخار[2]

رسوب‌شیمیایی بخار یک روش مهم و پرکاربرد برای تولید نانومواد، مبتنی بر کربن است. این فرایند شامل واکنش شیمیایی پیش‌سازهای فاز بخار برای تشکیل یک‌لایه نازک بر روی سطح بستر است. برای رسوب‌شیمیایی بخاری که مناسب باشد، یک پیش‌ماده باید فراریت کافی، خلوص شیمیایی بالا، پایداری خوب در طول تبخیر، هزینه کم، ماهیت غیرخطرناک و ماندگاری طولانی داشته باشد. علاوه بر این، تجزیه آن نباید منجر به ناخالصی‌های باقی‌مانده شود. تولید پوشش‌های لایه نازک جامد بر

1- Sol-gel method
2- Chemical vapor deposition

روی سطوح و همچنین مواد حجیم، پودرها و مواد کامپوزیتی با خلوص بالا هدف اصلی استفاده از این روش است. کیفیت مواد ته‌نشین‌شده تحت تأثیر چندین عامل، مانند نوع رآکتور (دیوار داغ یا دیوار سرد)، دمای واکنش (از ۲۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد)، فشار واکنش (از زیر ۱ torr تا فشار بالای اتمسفر) است. در یک فرایند رسوب‌شیمیایی بخار معمولی، یک گاز پیش‌ساز به محفظه‌ای حاوی یک یا چند ماده برای پوشش‌دهی وارد می‌شود. این مواد تا دمای بالا گرم می‌شوند و باعث واکنش‌های شیمیایی روی سطوح آنها می‌شود و در نتیجه لایه‌های نازکی تشکیل می‌شود. فراورده‌های فرّار و گازهای پیش‌ساز واکنش نمی‌دهند و همراه جریان گاز از محفظه واکنش خارج می‌شوند. فرایندهای پیشرفته رسوب‌شیمیایی بخار از روش‌هایی مانند پلاسما، یون‌ها، فوتون‌ها، لیزرها، رشته‌های داغ و واکنش‌های احتراق برای افزایش نرخ رسوب لایه‌های نازک و کاهش دمای واکنش استفاده می‌کنند.

در تولید نانولوله‌های کربنی از طریق رسوب‌شیمیایی بخار، یک بستر در یک اجاق قرار می‌گیرد و تا دمای بالا گرم می‌شود. سپس، یک گاز حاوی کربن، مانند هیدروکربن‌ها، به‌آرامی به عنوان یک پیش‌ساز به سامانه معرفی می‌شود. در دماهای بالا، تجزیه گاز اتم‌های کربن آزاد می‌کند که دوباره با هم ترکیب می‌شوند و نانولوله‌های کربنی روی زیرلایه تشکیل می‌دهند. با این حال، انتخاب کاتالیزور نقش مهمی در ریخت‌شناسی نوع نانومواد به‌دست‌آمده دارد. در تهیه گرافن مبتنی بر رسوب‌شیمیایی بخار، کاتالیزورهای Co ، Niو گرافن چند لایه را تولید می‌کنند، در حالی که کاتالیزور مس گرافن تک‌لایه را فراهم می‌کند. به طور کلی، رسوب‌شیمیایی بخار یک روش عالی برای تولید نانومواد باکیفیت بالا است و برای تولید نانومواد دوبعدی، به خوبی شناخته شده است (Abid et al., 2022).



شکل ۳. تصویر شماتیک روش سنتز گرمابی (Abid et al., 2022)

۲-۲-۳. رسوب بخار فیزیکی[1]

رسوب بخار فیزیکی یک روش رسوب در خلأ است. معمولاً در نیمه‌هادی‌ها برای ایجاد لایه‌ها و پوشش‌های نازک استفاده می‌شود. این فرایند شامل تبخیر یک ماده منبع جامد یا مایع از یک کاتد

1- Physical vapor deposition

است که به عنوان منبع تبخیر عمل می‌کند. سپس این ماده با استفاده از یک پرتو الکترونی گرم می‌شود که باعث می‌شود ذرات به اندازه اتمی تبخیر شوند. این ذرات با مولکول‌های گاز واردشده به محفظه برخورد می‌کنند و پلاسما ایجاد می‌کنند که از محفظه رسوب و سپس یک پمپ خلأ عبور می‌کند. این پلاسما در نهایت بر روی سطح متراکم می‌شود و یک لایه نازک تشکیل می‌دهد. رسوب بخار فیزیکی می‌تواند هم لایه‌های نازک و هم پوشش‌های چندلایه تولید کند که ضخامت این لایه‌ها می‌تواند در محدوده چند تا هزاران نانومتر باشد.

رسوب فیزیکی بخار روشی برای ایجاد یک پوشش تبخیراست که شامل انتقال مواد در سطح اتمی است. این فرایند مشابه رسوب‌شیمیایی بخار است با این تفاوت اصلی که در رسوب بخار فیزیکی، مواد اولیه یا پیش‌سازهایی که رسوب خواهند کرد به صورت جامد شروع می‌شوند. در مقابل، رسوب‌شیمیایی بخار شامل معرفی پیش‌سازها به محفظه واکنش در حالت گازی است. روش‌های رسوب بخار فیزیکی مانند کندوپاش و رسوب لیزرپالسی[1] (PLD) معمولاً استفاده می‌شود (Srivastava et al., 2020).

۲-۲-۴. تخریب حرارتی[2]

روش تجزیه حرارتی یک فرایند تجزیه شیمیایی است که نانوذرات باکیفیت با توزیع اندازه باریک تولید می‌کند. این در اثر گرما ایجاد می‌شود و شامل تجزیه ترکیبات آلی فلزی در دماهای بالا در حلال‌هایی با نقطه‌جوش بالا، به کمک مواد فعال سطحی‌های تثبیت‌کننده می‌شود. این روش به طور گسترده برای ساخت نانومواد اکسید فلزی، ازجمله ZnO استفاده می‌شود.

روش تجزیه شیمیایی معمولاً برای ساخت نانومواد استفاده می‌شود و نیاز به یک تنظیم آزمایشی خاص دارد. این مجموعه شامل یک فلاسک ته‌گرد سه‌گردنی است که روی یک همزن حرارتی قرار می‌گیرد و مجهز به کندانسور آب شیشه‌ای است. یک دماسنج در یک فنجان حاوی روغن سیلیکون که بر روی صفحه همزن حرارتی نصب شده است، غوطه‌ور می‌شود و برای نظارت بر دما در طول واکنش استفاده می‌شود. برای حفظ یک اتمسفر بی‌اثر، گازهای آرگون یا نیتروژن به طور مداوم در داخل سامانه در طول واکنش جریان دارند (Srivastava et al., 2020).

۲-۲-۵. سولوترمال[3]

از روش حل گرمایی برای ایجاد نانومواد مختلف با خواص شیمیایی و فیزیکی خاص استفاده می‌شود که می‌تواند در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی، این روش در دماهای بالای ۳۰۰

1- Pulsed laser deposition 2- The thermal decomposition 3- The solvothermal method

درجه سانتی‌گراد در رژیم فوق بحرانی انجام می‌شود. با این حال، برخی از مطالعات اخیر نشان داده‌اند که با استفاده از این روش می‌توان نانوکریستال‌ها را در دماهای پایین‌تر، یعنی زیر ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید کرد. روش حل گرمایی با موفقیت نانومواد مختلفی مانند فلزات، اکسیدهای فلزی و نیمه‌هادی‌ها را تولید کرده است. انواع مختلفی از نانومیله‌ها از طریق روش حل گرمایی ساخت شده‌اند. در این روش از حلال‌های آلی مختلف و آب به عنوان محیط واکنش استفاده می‌شود. امکان ساخت مواد جدید با استفاده از این روش نسبتاً زیاد است. انتخاب یک حلال مناسب بسیار مهم است زیرا حلال‌های آلی، نقش دوگانه‌ای در تأمین محیط واکنش و تشکیل مجتمع حلال- واکنش‌دهنده دارند. هنگام انتخاب حلال برای این روش، عامل‌های مختلفی ازجمله وزن مولکولی، چگالی، نقطه ذوب، نقطه جوش، گرمای تبخیر، ممان دوقطبی، قطبیت و ثابت دی‌الکتریک باید در نظر گرفته شود. حلالیت حلال بیشتر به قطبیت حلال بستگی دارد که به عنوان مجموع نیروهای برهمکنش، بین حلال و املاح تعریف می‌شود. حلال‌های آلی رایج مورد استفاده در روش سولوترمال عبارتند از متیل الکل، اتیل الکل، پروپانول، بوتانول، هپتانول، بنزیل الکل و اتیلن گلیکول (Srivastava et al., 2020).

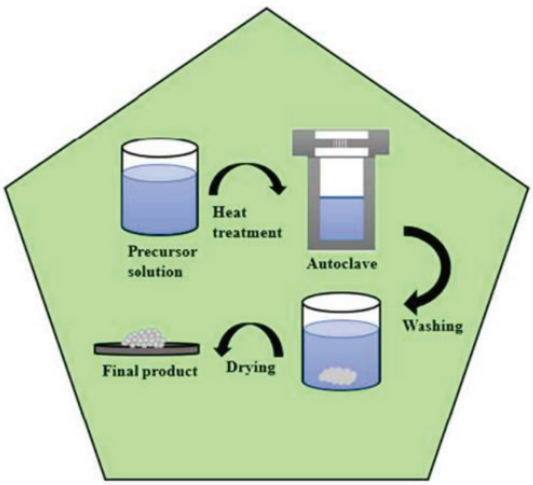
۲-۲-۶. روش‌های سنتز گرمابی[1]

فرایند سنتز گرمابی یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین روش‌هایی است که برای تولید مواد نانوساختار استفاده می‌شود. در روش گرمابی، از طریق یک واکنش ناهمگن که در یک محیط آبی در فشار و دمای بالا در اطراف نقطه بحرانی در یک ظرف مهروموم‌شده انجام می‌شود، مواد نانوساختار به دست می‌آیند. روش حل گرمایی مانند روش سنتز گرمابی است. تنها تفاوت این است که در یک محیط غیرآبی انجام می‌شود. روش‌های سنتز گرمابی و حلال گرمایی عموماً در سامانه‌های بسته انجام می‌شود. در روش سنتز گرمابی به کمک مایکروویو، اخیراً به نانومواد مهندسی‌شده توجه شایانی گردیده است که مزایای هر دو روش سنتز گرمابی و مایکروویو را با هم ترکیب می‌کند. روش‌های سنتزگرمابی و حل‌گرمایی روش‌های مفیدی برای تولید نانو هندسه‌های مختلف مواد، مانند نانوسیم‌ها، نانومیله‌ها، نانوصفحات و نانوکره‌ها هستند. روش سنتز گرمابی به دلیل هزینه کم، محیط مناسب، مقیاس‌پذیری آسان و محصول نهایی خالص، سهم زیادی در علم و فناوری مدرن دارد. این روش برای ساخت دی‌اکسید تیتانیوم نانوساختار، گرافن، کربن و سایر نانومواد برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای فنّاورانه مانند الکترونیک، الکترونیک نوری، ذخیره داده‌های مغناطیسی، زیست‌پزشکی و زیست‌فوتونیک استفاده شده است.

رشد کریستال از طریق روش ساخت گرمابی شامل مراحل زیر است: مرحله ۱: در این فرایند، یک

1- The hydrothermal process

پیش‌ماده با یک حلال در یک محلول مخلوط می‌شود، جایی که هیدروکسید فلز به عنوان کانی‌ساز عمل می‌کند و آلکوکسیدهای فلز به عنوان منبع یون‌های فلزی عمل می‌کنند. مرحله ۲: عملیات سنتز گرمابی در یک رآکتور مهروموم‌شده به نام اتوکلاو انجام می‌شود، جایی که ماده مغذی همراه با آب تأمین می‌شود. اختلاف دما بین قسمت‌های بالایی و پایینی محفظه باید حفظ شود. یون‌ها به سمت منطقه با دمای پایین منتقل می‌شوند و کریستال‌های دانه در انتها برای جمع‌آوری کریستال مورد نظر رسوب می‌کنند. مرحله ۳: پس از گریزانه، نمونه شسته و در دماهای مختلف خشک می‌شود تا محصول نهایی به دست آید (شکل ۴). ریخت‌شناسی کریستال در شرایط ساخت گرمابی ارتباط نزدیکی با شرایط رشد دارد. سازوکار رشد کریستال را می‌توان با مطالعه ریخت‌شناسی پیش‌بینی کرد. برای واپایش ریخت‌شناسی مواد آماده‌شده، بسته به فشار بخار ترکیب اصلی واکنش، می‌توان از حالت کم‌فشار یا فشار بالا استفاده کرد. ساخت گرمابی، جامدات قابل وجهی، مانند فسفرهای شب‌تاب، هادی‌های فوق یونی و کریستال‌های ریزمتخلخل را تهیه می‌کند (Abid et al., 2022).



شکل ۴. نمودار شماتیک روش سنتز گرمابی (Abid et al., 2022)

۲-۲-۷. روش‌های ریزامولسیون و مایسل معکوس[1]

روش مایسل معکوس برای تولید نانومواد با اشکال و اندازه‌های دلخواه ارزشمند است. در یک مایسل معمولی، امولسیون روغن در آب باعث می‌شود که دم‌های آب‌گریز به سمت هسته‌ای با قطرات روغن به دام افتاده باشد. با این حال، مایسل‌های معکوس در مورد امولسیون آب در روغن

1- The reverse micelle method

تشکیل می‌شوند که در آن سرهای آبدوست به سمت هسته‌ای حاوی آب قرار می‌گیرند. هسته مایسل‌های معکوس به عنوان یک نانورآکتور برای ساخت نانوذرات با عمل به‌عنوان حوضچه آب برای توسعه نانومواد عمل می‌کند. اندازه این نانورآکتورها را می‌توان با تغییر نسبت آب به مواد فعال سطحی واپایش کرد که در نهایت بر اندازه نانوذرات ساخته‌شده از طریق این روش تأثیر می‌گذارد. کاهش غلظت آب منجر به قطرات کوچک‌تر آب می‌شود که به نوبه خود منجر به تشکیل نانوذرات کوچک‌تر می‌شود. بنابراین روش مایسل معکوس، یک مسیر آسان را برای ساخت نانوذرات یکنواخت با اندازه‌های دقیق واپایش‌شده فراهم می‌کند. نانوذرات توسعه‌یافته از طریق روش مایسل معکوس بسیار مناسب هستند.

۳. تشخیص و شناسایی

همان‌طور که اکتشاف نانومواد افزایش می‌یابد، نیاز به روش‌های پیشرفته مشخصه‌یابی حیاتی‌تر می‌شود. روش‌های مختلفی برای تجزیه و تحلیل خواص فیزیکی و شیمیایی نانومواد، از جمله اندازه، ریخت‌شناسی، ساختار بلوری و ترکیب عنصری توسعه یافته است. انتخاب مناسب‌ترین روش برای به دست آوردن نتایج دقیق، ضروری است. روش‌های مبتنی بر میکروسکوپ، مانند میکروسکوپ الکترون عبوری ، میکروسکوپ الکترون روبشی و میکروسکوپ نیروی اتمی، اطلاعات ارزشمندی در مورد اندازه و ریخت‌شناسی نانومواد ارائه می‌دهند. اشعه ایکس، طیف‌سنجی، پراکندگی و روش‌های مشابه برای تعیین ترکیب شیمیایی و عنصری، خواص نوری و سایر ویژگی‌های رایج نانومواد استفاده می‌شوند. برای اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نانومواد از روش‌های خاصی مانند مغناطیس‌سنج ارتعاشی، میکروسکوپ نیروی مغناطیسی استفاده می‌شود. در بخش‌های بعدی، روش‌های تحلیلی استاندارد مختلفی که هنوز برای توصیف نانومواد مورد استفاده قرار نگرفته‌اند، به تفصیل شرح داده می‌شوند (Srivastava et al., 2020).

۳-۱. روش‌های میکروسکوپی

میکروسکوپ الکترونی یک روش قدرتمند برای مطالعه ساختار و خواص مواد در مقیاس نانو است. از یک پرتو الکترون برای روشن کردن یک نمونه و تولید تصویری با وضوح بسیار بالاتر از آن چیزی که با میکروسکوپ نوری سنتی می‌توان به دست آورد، استفاده می‌کند. از پرتوی از الکترون‌های شتاب‌دار برای ایجاد تصاویری از نمونه مورد مطالعه استفاده می‌کند و محققان را قادر می‌سازد تا اجسامی را در مقیاس‌هایی ببینند که با میکروسکوپ نوری سنتی امکان‌پذیر نیست (Sapsford et al., 2011).

میکروسکوپ‌های الکترونی به ما امکان می‌دهند که جزئیات ساختاری نانومواد را که با

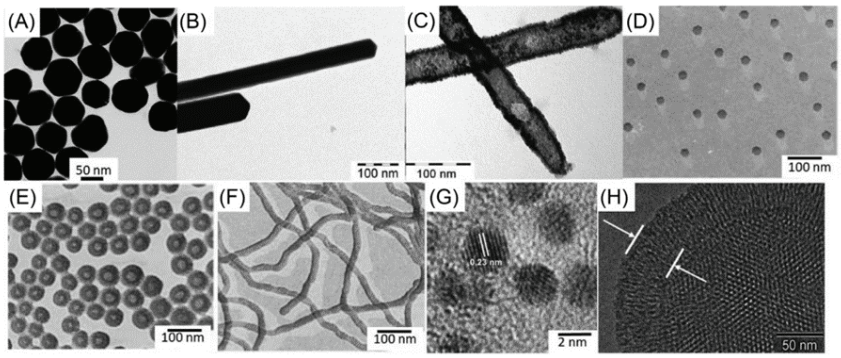
چشم غیرمسلح قابل مشاهده نیستند، بررسی و تجسم کنیم. این روش‌ها، بسته به ویژگی‌ها و روش نمونه، امکان تجسم نانوذرات و ساختارها را در داخل یا روی سطح آنها فراهم می‌کنند. بر خلاف میکروسکوپ‌های نوری که از منابع نور مرئی و عدسی‌ها برای تولید تصاویر بزرگ‌نمایی‌شده در مقیاس میکرومتر استفاده می‌کنند، میکروسکوپ‌های الکترونی (EM)[1] از پرتوهای الکترون‌های شتاب‌دار و عدسی‌های الکترواستاتیک یا الکترومغناطیسی برای تولید تصاویری با وضوح بسیار بالاتر بر اساس طول‌موج‌های بسیار کوتاه‌تر الکترون‌ها در مقایسه با فوتون‌های نور استفاده می‌کنند (Kaliva & Vamvakaki, 2020).

۳-۱-۱. میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)[2]

میکروسکوپ الکترونی عبوری شامل انتقال الکترون‌های تولیدشده از یک تفنگ الکترونی از طریق نمونه است که سپس برای تشکیل تصاویر با استفاده از عدسی‌های نوری الکترونی متمرکز می‌شوند. آماده‌سازی نمونه مرحله مهمی برای تحلیل میکروسکوپ الکترونی عبوری است و از روش‌های مانند پرداخت شیمیایی، پولیش الکتریکی و پرداخت مکانیکی برای نازک کردن نمونه تا ۴۰-۱۵۰ نانومتر استفاده می‌شود (Khalid et al., 2014). میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) به طور گسترده برای مشخص کردن نانومواد در وضوحی برابر با ابعاد اتمی استفاده می‌شود. میکروسکوپ الکترونی عبوری اطلاعات شیمیایی و تصاویری از نانومواد ارائه می‌دهد و اندازه ذرات دقیق و جزئیات مربوط به نانوذرات را ارائه می‌دهد. در مقایسه با میکروسکوپ الکترونی روبشی، میکروسکوپ الکترونی عبوری وضوح مکانی و اندازه‌گیری‌های تحلیلی با کیفیت بالا و عملکردهای مبتنی بر اصل میکروسکوپ نوری را ارائه می‌کند. از مزایای میکروسکوپ الکترونی عبوری می‌توان به بزرگ‌نمایی قدرتمند و ارائه اطلاعات در مورد ساختارهای ترکیبی و عناصر اشاره کرد. با این حال، تعمیر و نگهداری ویژه مورد نیاز است و خروجی تصاویر سیاه و سفید گران‌قیمت است (Kumar et al., 2019).

روش‌های میکروسکوپ پیشرفته مانند اسکن کردن و میکروسکوپ الکترونی عبوری جزئیات ساختاری نانومواد را که با چشم غیرمسلح قابل مشاهده نیستند، نشان می‌دهند. میکروسکوپ الکترونی عبوری تصاویر مستقیم و اطلاعات شیمیایی نانومواد را با وضوح سطح اتمی ارائه می‌دهد. با این حال، معایب میکروسکوپ الکترونی عبوری، شامل نیاز به خلأ بالا و بخش نمونه نازک برای نفوذ پرتو الکترون، تخریب نمونه و اندازه‌گیری در شرایط غیرطبیعی است. برخی از نمونه تصاویر گرفته‌شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی عبوری را در (شکل ۵) مشاهده می‌شود (Lin et al., 2014).

1- Electron microscope
2- Transmission electron microscopy



شکل ۵ . تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از الف) نانوذرات طلا، ب) نانومیله‌های مسی، پ) مایسل‌های بسپاری، ت) وزیکول‌ها، ث) مایسل کرم مانند، ج) تصویر-میکروسکوپ الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا از تیول پوشیده با نانودرات طلا و چ) یک نانومواد مزوپور می‌شود (D.R. Baer, May 2010)

۳-۱-۲. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)[1]

میکروسکوپ الکترونی یک روش قدرتمند است که از پرتوهای الکترون‌های شتاب‌دار و عدسی‌های الکترواستاتیک یا الکترومغناطیسی برای تولید تصاویر با وضوح بالا از نمونه‌ها استفاده می‌کند. میکروسکوپ الکترونی روبشی یک روش تصویربرداری سطحی است که سیگنال‌هایی را تولید می‌کند که ترکیب اتمی و جزئیات توپوگرافی سطح نمونه را منعکس می‌کند. این می‌تواند وضوح کمتر از ۱ نانومتر را به دست آورد و امکان دستیابی مستقیم به اندازه، توزیع اندازه و شکل نانومواد را فراهم می‌کند. با این حال، فرایند آماده‌سازی نمونه برای میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌تواند باعث انقباض نمونه و تغییر ویژگی‌های نانومواد شود. پوشاندن زیست‌مولکول‌ها با یک لایه فوق نازک از مواد رسانای الکتریکی اغلب برای نمونه‌های نارسانا مورد نیاز است (Lin et al., 2014).

میکروسکوپ الکترونی روبشی یک روش همه‌کاره برای تجزیه و تحلیل ریز و نانوساختارها است که اطلاعاتی در مورد ترکیب و توپوگرافی سطوح ارائه می‌دهد و دستیابی به ویژگی‌هایی مانند توپوگرافی، ریخت‌شناسی، ترکیب و اطلاعات کریستالوگرافی را امکان‌پذیر می‌کند و دارای بزرگ‌نمایی قابل تنظیم است که امکان تجسم ساختارها در مقیاس میکرو و نانو را فراهم می‌کند. میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح نمونه را در با پرتوهای الکترونی اسکن می‌کند و سیگنال‌هایی را تولید می‌کند که جزئیات توپوگرافی و ترکیب اتمی را منعکس می‌کند. وضوح به‌دست‌آمده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی حدود ۱ نانومتر است و عمدتاً به عامل‌های عملیاتی و خواص نمونه مشخص شده بستگی دارد. این روش بر اساس الکترون‌های تولیدشده، شتاب‌گرفته و متمرکزشده به سمت نمونه کار می‌کند و جزئیات و دقت بالایی را ارائه می‌دهد (Kumar et al., 2019).

1- Scanning electron microscopy

۳-۱-۳. میکروسکوپ نیروی اتمی[1] (AFM)

میکروسکوپ نیروی اتمی بر اساس اصل قانون هوک کار می‌کند که در آن کاوشگر نزدیک سطح نمونه حرکت می‌کند. میکروسکوپ نیروی اتمی بر تعامل بین سوزن و سطح نمونه برای تشکیل یک تصویر متکی است. میکروسکوپ سطح نمونه را با استفاده از یک سوزن تیز با قطر در حدود نانومتر اسکن می‌کند. انتهای دیگر سوزن به یک بازوی پیزوالکتریک متصل است. همان طور که سوزن روی سطح نمونه حرکت می‌کند، تغییرات ارتفاع سطح باعث ایجاد نیرویی روی سوزن می‌شود که باعث خم شدن یا انحراف سوزن می‌گردد. این انحرافات با نیروی واردشده به سوزن، نسبت مستقیم دارند. با اندازه‌گیری این انحرافات در حین اسکن سطح توسط آشکارساز، نقشه‌ای از ارتفاعات سطح ایجاد می‌شود که رایانه از آن برای تولید تصویر استفاده می‌کند (Kumar et al., 2019).

بر خلاف روش‌های دیگر مانند میکروسکوپ تونلی روبشی ، میکروسکوپ نیروی اتمی برای اندازه‌گیری به سطوح بدون اکسید و رسانای الکتریکی نیاز ندارد. برای تشخیص انحراف نوک کنسول ناشی از دافعه الکترواستاتیکی و واندروالسی و همچنین جاذبه بین اتم‌ها در نوک و روی سطح اندازه‌گیری‌شده، از یک سوزن میکرو با نوک‌تیز استفاده می‌کند. این امکان تصویربرداری با وضوح بالا از سطوح با وضوح عمودی حدود ۰٫۵ نانومتر را فراهم می‌کند. از میکروسکوپ نیروی اتمی می‌توان برای بررسی اندازه، شکل، ساختار، جذب، پراکندگی و تجمع نانومواد استفاده کرد و برای این منظور می‌توان از حالت‌های مختلف اسکن استفاده کرد. یکی از مزایای اصلی میکروسکوپ نیروی اتمی توانایی آن در تصویربرداری از انواع زیست‌مواد در مقیاس زیر نانومتری در مایعات آبی بدون ایجاد آسیب قابل ملاحظه به بسیاری از انواع سطوح بومی است. با این حال، یک اشکال مهم این است که اندازه نوک سوزن به‌طورکلی مهم‌تر از ابعاد نانومواد مورد بررسی است که منجر به تخمین بیش از حد نامطلوب ابعاد جانبی نمونه‌ها می‌شود (Lin et al., 2014).

۳-۱-۴. میکروسکوپ تونلی روبشی (STM)[2]

میکروسکوپ تونلی روبشی یک روش تصویربرداری قدرتمند است که محققان را قادر می‌سازد تا تصاویری با وضوح فوق‌العاده بالا در مقیاس اتمی بدون استفاده از نور یا پرتوهای الکترونی به دست آورند. این اجازه می‌دهد تا مشخصه‌های تفکیک اتمی مواد مانند گرافن و گرافن چند لایه، روی هر دو لایه فلزی و عایق، مشخصه زبری سطح، عیوب و اندازه و ترکیب مولکول‌ها روی سطح را مشخص کند. همچنین برای اسکن طیف‌سنجی تونل‌زنی (STS)[3] استفاده می‌شود که اطلاعاتی را در مورد ساختار الکترونیکی در یک مکان مشخص در نمونه ارائه می‌دهد (Kumar et al., 2019). در میکروسکوپ‌های

1- Atomic force microscopy 2- Scanning tunneling microscope 3- Scanning tunneling spectroscopy

تونلی روبشی ولتاژ مورد نظر بین یک سوزن تیز و بسیار نازک که برای روبش استفاده می‌شود و سطح مورد بررسی ایجاد می‌شود و وقتی‌که فاصله سوزن و سطح بسیار کم شد و به حدود صد نانومتر برسد پدیده‌ای به نام تونل‌زنی رخ می‌دهد که در اثر این پدیده، بدون هیچ تماسی، جریانی بین سطح و سوزن برقرار می‌شود و پس از تغییر جریان عملیات روبش توسط سوزن بر روی سطح انجام می‌شود. میکروسکوپ تونلی روبشی، تنها می‌تواند جهت مطالعه سطوحی که از لحاظ الکتریکی رسانایی قابل قبولی دارند، مورد استفاده واقع شود (Lin et al., 2014).

۳-۲. روش‌های طیف‌سنجی

روش‌های طیف‌سنجی از برهمکنش تابش الکترومغناطیسی با یک ماده نمونه استفاده می‌کنند که منجر به جذب وابسته به طول‌موج یا انتشار فلورسانس می‌شود و اطلاعاتی در مورد ساختار و ترکیب مواد ارائه می‌دهند. روش‌های طیف‌سنجی به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مانند شیمی، فیزیک و زیست‌شناسی برای مطالعه خواص مواد از جمله خواص الکترونیکی، مغناطیسی و شیمیایی آنها استفاده می‌شود. برخی از انواع رایج روش‌های طیف‌سنجی عبارتند از طیف‌سنجی مادون‌قرمز، طیف‌سنجی مرئی- فرابنفش و طیف‌سنجی تشدید مغناطیسی هسته‌ای (Sapsford et al., 2011).

۳-۲-۱. طیف‌سنجی فوتوالکترونی اشعه ایکس[1] (XPS)

طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس یک روش طیف‌سنجی کمی حساس به سطح است که برای تعیین ترکیب عنصری، حالت شیمیایی و ساختار الکترونیکی سطح یک ماده استفاده می‌شود. طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس یک روش اندازه‌گیری قدرتمند است زیرا نه‌تنها نشان می‌دهد که چه عناصری وجود دارند، بلکه همچنین نشان می‌دهد که آنها به چه عناصر دیگری متصل هستند. طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس برای تجزیه و تحلیل خارجی‌ترین سطح یک ماده استفاده می‌شود و آن را به ابزاری ارزشمند برای علوم سطح تبدیل می‌کند. طیف فوتوالکترون اشعه ایکس با تابش یک سطح جامد با پرتوهای اشعه ایکس و اندازه‌گیری انرژی جنبشی و شدت الکترون‌های پرتاب‌شده به دست می‌آید. انرژی‌ها و شدت پیک‌های فوتوالکترونی امکان شناسایی و تعیین کمیت عناصر موجود در سطح را فراهم می‌کند. طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس در طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله مشخصه‌یابی سطح، علم مواد و تجزیه و تحلیل بسپار استفاده می‌شود (D.R. Baer, May 2010).

1- X-ray photoelectron spectroscopy

۳-۲-۲. طیف‌سنجی رامان (RS)[1]

پراکندگی رامان روشی است که برای توصیف ساختاری نانومواد استفاده می‌شود. این پراکندگی غیرالاستیک فوتون‌ها با فرکانس‌های متفاوت از نور فرودی پس از برهمکنش با دوقطبی‌های الکتریکی مولکول را اندازه‌گیری می‌کند. پراکندگی رامان مکمل طیف‌سنجی فروسرخ (IR)[2] است و مزایایی مانند تجزیه و تحلیل اندازه متوسط و توزیع اندازه دارد. با این حال، دارای معایبی مانند تأخیر در تفکیک مکانی در ترسیم کاربردها در فناوری نانو، مقاطع عرضی کوچک‌تر و نیاز به تحریک شدید لیزر و مقادیر زیاد نمونه برای ارائه سیگنال‌های پراکندگی رامان کافی است. علاوه بر پراکندگی رامان، از پراکندگی رامان ارتقایافته سطحی (SERS)[3] و طیف‌سنجی رامان با نوک افزایش‌یافته (TERS)[4] نیز استفاده می‌شود. پراکندگی رامان اطلاعاتی در مورد داده‌های توپولوژیکی، ساختار نانومواد و خواص شیمیایی و الکترونیکی مورد نظر ارائه می‌دهد (Kumar et al., 2019).

۳-۲-۳. طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه (FT-IR)[5]

روش طیف‌سنجی FT-IR)) معمولاً برای نشان دادن اتصال نانومواد به مولکول‌های زیستی استفاده می‌شود. با اندازه‌گیری فرکانس‌های ارتعاشی ناشی از حالت‌های کشش و خمش ارتعاشی مولکول، به شناسایی گروه‌های عاملی روی سطح نمونه کمک می‌کند. این روش برای مطالعه اتصال مولکول‌های زیستی مختلف به نانومواد مانند لیزوزیم به نانوذرات الماس، آلبومین و پپتیدها به نانوذره طلا و هموپروتئین‌های جذب‌شده روی نانوذرات طلا و نقره و غیره استفاده شده است. علاوه بر این، طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه می‌تواند اطلاعات ساختاری ثانویه پروتئین متصل‌شده، به ویژه در مناطق آمیدی را فراهم کند. این روش می‌تواند وضعیت ساختاری پروتئین متصل را تعیین کند که می‌تواند در درک سازوکار اتصال مفید باشد (Sapsford et al., 2011).

۳-۲-۴. طیف‌سنجی فلورسانس

یک اسپکتروفلورومتر برای اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل انتشارات فلورسانس استفاده می‌شود که شامل یک منبع نور (لامپ زئون یا جیوه)، یک مونوکروماتور و فیلتر برای انتخاب طول‌موج‌های تحریک، یک نگهدارنده نمونه، یک مونوکروماتور و فیلتر برای انتخاب طول موج‌های انتشار، یک فتودتکتور که نور انتشاری را به یک سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند و یک واحد برای جمع‌آوری داده و تحلیل است. طیف‌سنجی فلورسانس روش ارزشمندی برای مشخص‌کردن نانوذرات فلورسانت، نقاط کوانتومی و نانوکریستال‌های نیمه‌رسانا که اثر محدودیت کوانتومی را نشان می‌دهند، جذب نور و لومینسانس را

1- Raman spectroscopy
2- Infrared spectroscopy
3- Surface-enhanced raman spectroscopy
4- Tip-enhanced raman spectroscopy
5- Fourier-transform infrared spectroscopy

افزایش می‌دهد. تغییر در طول موج فلورسانس می‌تواند برای بررسی گاف باند و خلوص نانومواد استفاده شود که اجازه تعیین اندازه نقاط کوانتومی را با اندازه‌گیری رنگی که از نانوذرات همان بلوک ساختاری اما اندازه‌های مختلف منتشر می‌شود، بدهد. علاوه بر این، طیف‌سنجی فلورسانس می‌تواند برای مطالعه تعاملات بین مولکول‌ها، مانند پروتئین‌ها و نانوذرات فلزی که درکی از تشکیل پیچیده‌های پروتئینی نانوذرات و خاموش شدن فلورسانس را فراهم می‌کند، استفاده شود (Kaliva & Vamvakaki, 2020).

۳-۲-۵. طیف‌سنجی مرئی- فرابنفش

طیف‌سنجی مرئی- فرابنفش (UV-visible) یک روش تجزیه‌وتحلیل قدرتمند است که به طور معمول در زمینه علوم مواد برای شناسایی، توصیف و مطالعه گسترده‌ای از مواد آلی، غیرآلی و زیستی استفاده می‌شود. اصل اساسی این روش اندازه‌گیری مقدار نوری است که از طریق یک نمونه عبور می‌کند و اطلاعات ارزشمندی در مورد ترکیب، ساختار و ویژگی‌های آن ارائه می‌دهد. یکی از کاربردهای اصلی طیف‌سنجی مرئی- فرابنفش در زمینه تحقیقات نانومواد است. با تحلیل رابطه بین طیف جذب و توزیع اندازه ذرات نانوکریستال‌های کوانتومی، پژوهشگران می‌توانند درکی از رفتار این مواد در مقیاس نانو به دست آورند. این در مطالعه نانوذرات فلزی بسیار مفید است، جایی که طیف‌سنجی مرئی- فرابنفش برای تحلیل اندازه، شکل و ویژگی‌های سطحی آنها به صورت سامانه‌های پراکندگی کولوئیدال استفاده می‌شود. علاوه بر این، طیف‌سنجی مرئی- فرابنفش می‌تواند مقدار یون‌های فلزی پیش‌ماده مورد استفاده در فرایند تشکیل این نانوذرات را تشخیص دهد.

مزایای طیف‌سنجی مرئی- فرابنفش شامل آسانی استفاده و تجزیه‌وتحلیل سریع مواد است. اسپکترومترهای مرئی- فرابنفش به طور گسترده در انواع زمینه‌ها از جمله پزشکی، تحقیقات، تجزیه و تحلیل جنایی و غیره استفاده می‌شوند. با این حال، لازم به ذکر است که عملکرد یک اسپکترومتر مرئی- فرابنفش دو پرتویی می‌تواند تحت تأثیر منفی گردوخاک روی آینه‌های آن قرار گیرد. نگهداری و تمیزکاری منظم این وسایل بسیار حیاتی است تا نتایج دقیق و قابل اعتماد تضمین شود (Kumar et al., 2019).

۳-۲-۶. کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC)[1]

کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا روشی است که در شیمی تجزیه برای جداسازی، شناسایی و تعیین کمیت اجزای خاص در مخلوط‌ها استفاده می‌شود. بر اساس اصل کروماتوگرافی مایع، از یک سامانه تزریق فشار بالا برای پمپاژ یک حلال یا بافر به عنوان فاز متحرک از طریق یک ستون کروماتوگرافی با

1- High performance liquid chromatography

یک فاز ثابت با بازده بالا استفاده می‌کند. کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا معمولاً برای تجزیه و تحلیل ترکیبات محلول در یک نمونه مایع استفاده می‌شود که امکان تجزیه و تحلیل کیفی و کمی اجزا و غلظت آنها را فراهم می‌کند. مزایایی مانند حساسیت بالا، اندازه نمونه کوچک، سرعت تجزیه و تحلیل سریع و بازده جداسازی بالا را ارائه می‌دهد.

در صنعت داروسازی، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا نقش مهمی در تضمین ایمنی، اثربخشی و ثبات دارو ایفا می‌کند. کاربردهای حیاتی آن عبارت‌اند از:

- ارزیابی کیفی و تحلیل کمی
- توسعه فرمولاسیون
- کنترل کیفیت مواد اولیه و محصولات نهایی
- تعیین مدت ماندگاری
- تشخیص پزشکی
- تشخیص مواد مخدر
- تجزیه و تحلیل بقایای آفت‌کش‌ها و شیمیایی

کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا یک روشی همه‌کاره است که می‌تواند به محققان و تولیدکنندگان دارویی کمک کند تا خلوص و کیفیت مواد خام را ارزیابی کنند، پایداری دارو را تحت شرایط مختلف بررسی کنند و آثار دارو را در مایعات زیستی تشخیص دهند. با پیشرفت فنّاوری، قابلیت‌ها و کاربردهای کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا احتمالاً گسترش‌یافته و تکامل می‌یابد و نقش آن را در صنعت داروسازی بیشتر می‌کند (Nikolin et al., 2004).

۳-۲-۷. طیف‌سنجی جرمی (MS)[1]

طیف‌سنجی جرمی (MS) یک روش تحلیلی است که برای تعیین جرم، ترکیب عنصری و ساختار شیمیایی مولکول‌ها استفاده می‌شود. اصل طیف‌سنجی جرمی متکی بر تمایز ذرات باردار با جرم‌های مختلف با استفاده از نسبت جرم به بار آنها است که دقت و حساسیت بالایی در تشخیص ارائه می‌دهد. روش‌های مختلف طیف‌سنجی جرمی را می‌توان برای تعیین چندین ویژگی فیزیکی و شیمیایی نانومواد، مانند جرم، ترکیب و ساختار استفاده کرد. طیف‌سنجی جرمی در حال حاضر در مطالعات نانوفناوری، زیست‌محیطی و سم‌شناسی برای تعیین خصوصیات و کمیت استفاده می‌شود. پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP)[2] طیف‌سنجی جرمی عناصر را تبخیر، اتمیزه و یونیزه می‌کند و تجزیه

1- Mass spectrometry
2- Inductively coupled plasma

و تحلیل شیمیایی عنصری را ارائه می‌دهد. این ترکیب، کمیت و ترکیب عنصری قابل‌اعتماد نانوذرات فلزی و ناخالصی‌های موجود در نانوذرات غیرفلزی را با دقت و دقت اندازه‌گیری بالا ارائه می‌کند. با این حال، برخی از چالش‌ها، مانند هزینه تجهیزات و نیاز به پایگاه‌های اطلاعاتی برای شناسایی گونه‌ها، شناسایی شده‌اند (Kumar et al., 2019).

۳-۳. بررسی خواص شیمیایی ماده

بررسی خواص شیمیایی یک ماده شامل تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی، ساختار و رفتار آن در شرایط مختلف است که به درک چگونگی تعامل آن با سایر مواد و نحوه رفتار آن در محیط‌های مختلف کمک می‌کند. بررسی خواص شیمیایی یک ماده در زمینه‌های مختلف مانند علم مواد، شیمی و زیست‌شناسی ضروری است و می‌تواند به توسعه مواد جدید با خواص مطلوب، درک رفتار مواد در محیط‌های مختلف و طراحی داروهای جدید کمک کند.

۳-۳-۱. پراکندگی نور دینامیکی (DLS)[1]

نانومواد دارای چندین ویژگی فیزیکی و شیمیایی هستند که با استفاده از روش‌های پراکندگی تشعشع قابل بررسی هستند. پراکندگی نور دینامیکی روشی است که می‌تواند توزیع اندازه ذرات کوچک، مولکول‌ها یا بسپارها را در یک محلول یا سوسپانسیون با استفاده از لیزر به عنوان منبع نور بررسی کند. اصل پراکندگی نور دینامیکی نظارت بر نوسانات زمانی شدت پراکندگی الاستیک نور ناشی از حرکت براونی ذرات/ مولکول‌ها است. برای توصیف فیزیکی و شیمیایی نانومواد، نقاط قوت اصلی پراکندگی نور دینامیکی شامل روش غیرتهاجمی، مدت آزمایش کوتاه و دقت در تعیین اندازه هیدرودینامیکی نمونه‌های تک پراکنده است. علاوه بر این، پراکندگی نور دینامیکی کاربرد محدودی برای تجزیه و تحلیل نمونه‌هایی با توزیع اندازه ناهمگن و حل و فصل ابعاد یک جمعیت نمونه مختلط با اندازه کمتر از سه عامل دارد. در نهایت، پراکندگی نور دینامیکی برای اندازه‌گیری دقیق اندازه‌های نانومواد غیر کروی مناسب نیست زیرا ماهیت کروی ذرات قبلاً در تحلیل فرض شده است (Lin et al., 2014).

۳-۳-۲. رزونانس مغناطیسی هسته‌ای [2] (NMR)

رزونانس مغناطیسی هسته‌ای برای مطالعه هسته‌های اتمی دارای گشتاورهای مغناطیسی و تکانه زاویه‌ای در هنگام قرارگرفتن در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی استفاده می‌شود. این جزئیات استثنایی در مورد محیط‌های شیمیایی هسته‌های تشکیل‌دهنده اتم، از جمله ساختار شیمیایی،

1- Dynamic light scattering
2- Nuclear magnetic resonance spectroscopy

واکنش‌ها و دینامیک ارائه می‌دهد. رزونانس مغناطیسی هسته‌ای به محیط مغناطیسی هسته‌ها بسیار حساس است و خطوط طیفی منفرد هسته‌ها را در محیط های مختلف مشاهده می‌کند و آن را به ابزاری ارزشمند برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند ساختار، خلوص و عملکرد در دندریمرها و مشتقات فولرن تبدیل می‌کند. رزونانس مغناطیسی هسته‌ای به صورت مغناطیسی مواد را مرتب می‌کند و با هسته‌های اتمی دارای گشتاورهای مغناطیسی و تکانه زاویه‌ای که تحت یک میدان مغناطیسی قرار دارند، سروکار دارد. پدیده رزونانس مغناطیسی هسته‌ای به هسته اتم‌هایی بستگی دارد که دارای خواص مغناطیسی هستند و می‌توان از آنها برای به دست آوردن اطلاعات شیمیایی استفاده کرد. در مطالعات اخیر، رزونانس مغناطیسی هسته‌ای گرادیان میدان پالسی برای ارزیابی نفوذپذیری نانومواد اجرا شده است که امکان بررسی در اندازه و تعامل گونه‌ها را فراهم می‌کند. با این حال، مقادیر کمتری از آماده‌سازی نمونه، حساسیت تشخیص کم و مصرف زمان برخی از اشکالات این روش را نشان می‌دهد (Kumar et al., 2019; Lin et al., 2014).

۳-۳-۳. پراش اشعه ایکس (XRD)[1]

پراش اشعه ایکس یک روش بسیار مؤثر و خوب است که تصاویر با وضوح بالا در مقیاس اتمی ارائه می‌دهد. این روش به طور گسترده برای تعیین اندازه متوسط ذرات و ساختارها استفاده می‌شود و اطلاعاتی در مورد تغییرات در ساختار بلور، تعیین فاز و شناسایی، شکل و اندازه بلورها، انحراف تگرگ، اندازه و جهت به ما می‌دهد. از پراش اشعه ایکس برای مشخص کردن مواد حاوی مؤلفه‌های نانوسایز درون یک ماتریس زیستی گسترده مانند آنهایی که در چارچوب بافت و استخوان یافت می‌شوند، استفاده می‌شود، جایی که تجزیه و تحلیل تغییرات فاصله بین لایه‌های نانومواد می‌تواند برای ارزیابی کامل واکنش یا بررسی جهت زیست‌مولکولی مورد استفاده قرار گیرد. پراش اشعه ایکس ابزار ضروری برای پژوهشگرانی است که با مواد لایه‌ای نانوبیوکنژوگیت، مانند نانوبیوهیبریدها و نانوذرات چربی جامد، کار می‌کنند.

طبق قانون براگ، امواج به طور سازنده در جهات خاصی اضافه می‌شوند.

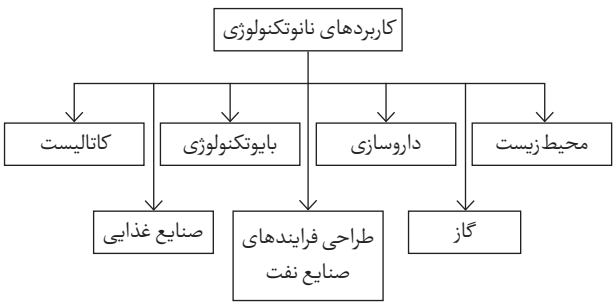
$$n\lambda=2d\sin(\theta)$$

که در آن فاصله بین زوایای پراش، زاویه برخورد، یک عدد صحیح و طول موج پرتو است. پراش اشعه ایکس یک روش به خوبی تثبیت شده است که تصاویری با وضوح بالا در مقیاس اتمی ارائه می‌دهد. با این حال، محدودیت‌هایی مانند تنها یک حالت تأیید قابل دسترسی در نمونه و شدت کم در مقایسه با پراش الکترونی دارد (Lin et al., 2014).

1- X-Ray diffraction

۴. کاربردها

قبل از پیشرفت علم نانو، مهندسین شیمی در حوزه‌های مختلف با چالش‌ها و کاستی‌هایی روبه‌رو بودند، برای مثال در طراحی فرایندهای صنایع نفتی با چالش‌هایی نظیر کاهش کارایی فرایندها، افزایش هزینه‌ها و کاهش بهره‌وری دست و پنجه نرم می‌کردند. مثلاً در فرایند جذب، مواد جاذبی استفاده می‌شد که کارایی پایین و هزینه بالایی داشت. همچنین مواد استفاده‌شده در فرایندهای کاتالیستی دارای بازدهی پایین و طول عمر کوتاه بودند. با پیشرفت علم نانو، مهندسین شیمی توانستند، جاذب‌ها و کاتالیست‌هایی با خصوصیات و کارایی بالا طراحی کنند. به طوری که مواد کاتالیستی با خصوصیات و کاربردهای مختلف در صنایع نفت و گاز تولید می‌شود که می‌توانند در فرایندهای هیدروژناسیون، اکسیداسیون و هیدروکربناسیون استفاده شوند. با استفاده از نانوذرات، فرایندهای تصفیه آب با کارایی بالاتر و هزینه کمتر طراحی می‌شود؛ بنابراین، با پیشرفت علم نانو، مهندسین شیمی قادر به حل چالش‌های موجود در طراحی فرایندهای صنایع نفت شده‌اند و سطح کارایی و کاربرد این فرایندها را ارتقاء بخشیده‌اند. همچنین مهندسین شیمی با به‌کارگیری فناوری نانو توانستند علم دارورسانی را متحول کنند و با ساخت حامل‌های دارویی و تغییروتحول در روش‌های دارورسانی، به ویژه در درمان سرطان‌های مختلف کمک شایانی به علم پزشکی بکنند. به طور کلی مطالعات امروز نشان می‌دهد که فناوری نانو می‌تواند به هر پدیده‌ای در سطح نانو و به هر رشته‌ای از شاخه‌های علوم مربوط شود، اعم از علوم پایه (فیزیک، شیمی، ریاضی، زیست‌شناسی و...)، علوم انسانی (حقوق، ارتباطات و...) و علوم مهندسی (مهندسی برق، مهندسی مواد، مهندسی عمران، مهندسی مکانیک و...) و بالاخره مهندسی شیمی که موضوع این نوشتار است. در ادامه به بررسی دقیق‌تر کاربرد فناوری نانو در گرایش‌های مختلف مهندسی شیمی می‌پردازیم. (شکل ۶)



شکل ۶. کاربرد نانوفناوری در گرایش‌های مختلف مهندسی شیمی

۴-۱. کاتالیست

کاتالیز یک فناوری حیاتی است که امکان عملکرد و استفاده از تعداد بی‌شماری از مواد خام را فراهم می‌کند که می‌توانند برای تشکیل محصولات با ارزش بالا مورد استفاده قرار گیرند. کاتالیز در یک

فصل‌مشترک را، کاتالیز ناهمگن می‌نامند که در آن واکنش‌دهنده‌ها و کاتالیزور در فازهای مختلف قرار دارند. در بیشتر موارد، کاتالیزورهای مورد استفاده در کاتالیز ناهمگن جامد یا پودر و واکنش‌دهنده‌ها گاز یا مایع هستند (Tahir et al., 2022). کاتالیز یکی از پیشگامان استفاده از نانوذرات است. اجزا و مواد مختلف مانند آلومینیوم، آهن، دی‌اکسید تیتانیوم و سیلیس، همگی به‌عنوان کاتالیزور در مقیاس نانو در دهه‌های گذشته مورد استفاده قرارگرفته‌اند (Somwanshi et al., 2020).

با کاهش اندازه یک ماده در محدوده نانو، درصد اتم‌ها در سطح آن قابل توجه می‌شود. بنابراین، نسبت سطح به حجم بعدی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که بر خواص مربوط به سطح ماده تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، ویژگی‌های جالب و سودمند نانوذرات عبارتند از:

- نسبت‌های سطح به حجم بالا که تعداد زیادی مکان فعال در واحد سطح را در مقایسه با همتایان حجیم خود فراهم می‌کند.
- پتانسیل زتا بالاتر، از تجمع نانوخوشه‌ها در محلول جلوگیری می‌کند.
- جداسازی و بازیافت احتمالی، کاهش احتمال آلودگی کاتالیزور به محصول و مقرون‌به‌صرفه ساختن آنها.

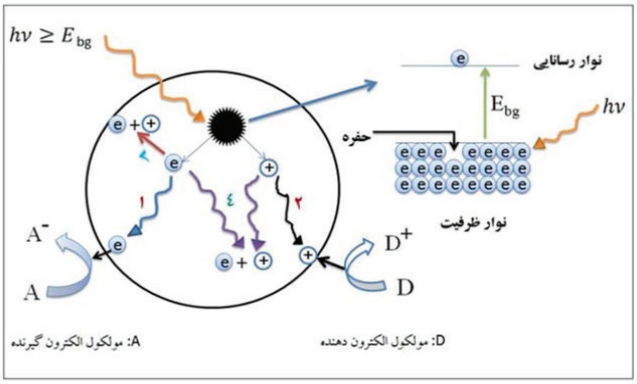
نانوذرات فلزی انتقالی دارای ویژگی‌های مختلف یک کاتالیزور کارآمد هستند. نانوذرات فلزی کلوئیدی به عنوان کاتالیزور در سامانه‌های همگن استفاده می‌شوند یا می‌توانند با استفاده از تکیه‌گاه‌هایی، مانند آلومینا، سیلیس، تیتانیا، مواد کربنی یا زئولیت ناهمگن شوند. تکیه‌گاه می‌تواند یک پودر یا یک جامد ارزان‌قیمت از پیش شکل با سطح بالایی باشد که معمولاً به خودی خود، فعالیت کاتالیزوری نشان نمی‌دهد.

نانوذرات فلزی انتقالی دارای نقشی اساسی در کاتالیز هستند زیرا فعال‌سازی سطح فلز و کاتالیز را در مقیاس نانوسکوپی تقلید می‌کنند و بنابراین کارایی و گزینش‌پذیری را برای کاتالیز ناهمگن به ارمغان می‌آورند (Tahir et al., 2022). نانوذرات به عنوان مهم‌ترین کاتالیزور مدرن تلقی می‌شوند و کاربرد گسترده‌تری دارند که از تولید شیمیایی تا کاربردهای تبدیل انرژی و ذخیره‌سازی را شامل می‌شود (Somwanshi et al., 2020).

نسبت سطح به حجم نانوذرات فلزی، به ویژه به عنوان یک کاتالیزور، باعث افزایش صددرصدی بازده در مقایسه با مواد حجیم می‌شود. نانومواد دارای خواص قابل توجهی مانند خاصیت فتوکاتالیزوری، مساحت سطح بالا، نسبت ابعاد بالا، خواص الکترواستاتیکی، تراکم‌پذیری بدون تغییر در سطح، حجم منافذ قابل تنظیم، خاصیت مغناطیسی، آب‌گریزی و آب‌دوستی و غیره هستند. ویژگی نسبت سطح به حجم نانومواد، برهمکنش با باکتری‌ها و آلاینده‌ها را کنترل می‌کند.

نمونه‌هایی از نانوکاتالیست‌ها، نانوذرات TIO_2 و Zn هستند که به دلیل فعالیت فوتوکاتالیستی

قوی، در زمره نانومواد نیمه‌هادی قرار می‌گیرند. آنها برای تجزیه آلاینده‌های آلی در آب‌وهوا و همچنین به عنوان عوامل ضدمیکربی استفاده می‌شوند. به طور خلاصه، کاتالیزور نوری در اثر تابش نور از طریق کاهش انرژی فعال‌سازی واکنش، منجر به بروز یا سرعت بخشیدن به واکنش‌های شیمیایی می‌شوند در حالی‌که خود، بدون تغییر باقی می‌مانند. در شکل ۷ فرایند رخ‌داده در یک کاتالیزور نوری نشان داده شده است (Tahir et al., 2022).



شکل ۷. تصویر عملکرد یک کاتالیزور نوری در اثر جذب نور فرابنفش، الکترون‌های لایه ظرفیت(Abid et al., 2022)

برخی از امیدوارکننده‌ترین نانومواد برای کاربردهای کاتالیزور شامل نانومواد فلزی مانند نقره، طلا، پلاتین و پالادیوم و همچنین نانومواد مبتنی بر کربن است. این مواد ظرفیت عظیمی را به‌عنوان مواد فعال برای کاربردهای کاتالیز و سنجش نشان داده‌اند و برای توسعه کاتالیزورها و حسگرهای کارآمد برای تشخیص زودهنگام و دقیق مولکول‌های زیستی، داروها و آلاینده‌ها در حال بررسی هستند. علاوه بر این، نانومواد کاربردی، مانند نانوذرات مغناطیسی، به دلیل خواص کاتالیزوری در کاربردهای مختلف زیستی، مورد بررسی قرارگرفته‌اند. نانومواد کمک قابل توجهی به توسعه کاتالیزورها و حسگرهای پیشرفته برای طیف گسترده‌ای از کاربردها، ازجمله تشخیص بالینی، داروسازی، نظارت بر محیط زیست و صنایع فراوری مواد غذایی دارند. خواص منحصربه‌فرد نانومواد، آنها را برای کاربردهای مختلف کاتالیزور و حسی ایده‌آل می‌کند و تحقیقات در حال انجام در این زمینه بر افزایش بیشتر قابلیت‌های کاتالیزوری و حسی آن‌ها متمرکز است (Leonte et al., 2017).

۴-۲. بسپار و نانوکامپوزیت‌ها

نانوکامپوزیت‌ها موادی هستند که حداقل یک بعد دارند که نانومتر است. عملکرد سطح بالایی را نشان می‌دهد و ترکیبی از کامپوزیت‌ها دارای ویژگی‌های غیرمعمول و منحصربه‌فرد در امکانات طراحی

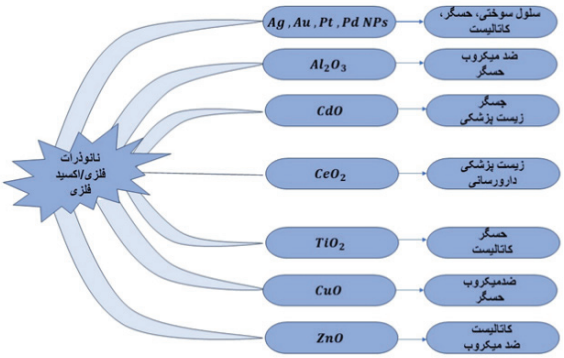
هستند. آنها از دو یا چند کامپوزیت مختلف با خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت تشکیل‌شده‌اند و عمدتاً دارای فازهای مختلفی هستند که به وسیله فصل مشترک از هم جدا شده‌اند. با توجه به این، منحصربه‌فرد بودن در خواص توسط هیچ یک از اجزای تشکیل‌دهنده به دست نمی‌آید. مقدار بیشتر اجزای تشکیل‌دهنده، ماتریس نامیده می‌شود. تقویت فرایند، بهبود خواص نانوکامپوزیت‌ها با افزودن مواد تشکیل‌دهنده به مواد ماتریس است. نانوکامپوزیت‌ها به دلیل ترکیبات خود ازنظر خواص تقویتی و ناهمسانگردی، از خود ناهمگنی نشان می‌دهند. مواد نانوکامپوزیت جایگزین‌هایی برای غلبه بر محدودیت‌ها در استوکیومتری و واپایش ترکیب عنصری کامپوزیت‌های ریز و یکپارچه هستند. نانوکامپوزیت‌ها بر اساس ساختارشان طبقه‌بندی می‌شوند. برای تشکیل نانوکامپوزیت از انواع نانو ذرات و مواد ماتریسی استفاده می‌شود. سه دسته از نانوکامپوزیت‌ها بر اساس ماتریس یا ماده میزبان استفاده شده وجود دارد. آنها نانوکامپوزیت‌های زمینه سرامیکی(CMC)[1]، نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC)[2] و نانوکامپوزیت‌های زمینه بسپاری [3](PMC) هستند (Shameem et al., 2021).

یکی از جذاب‌ترین جنبه‌های نانوبسپارها، رفتار وابسته به اندازه آنها است. این مواد در مقایسه با همتایان ماکروسکوپی خود، دارای سطح بسیار بزرگ‌تر در مقیاس نانو هستند. این افزایش نسبت سطح به حجم، نانوبسپارها را با خواص کاتالیزوری، نوری و الکتریکی تقویت می‌کند. به عنوان مثال، نانوذرات مواد بسپاری می‌توانند به دلیل افزایش تحرک حامل بار، رسانایی افزایش‌یافته‌ای از خود نشان دهند که آن‌ها را برای توسعه دستگاه‌های الکترونیکی پیشرفته ارزشمند می‌کند.

علاوه بر این، فراوانی مکان‌های سطحی روی نانوبسپارها امکان اتصال گروه‌های عاملی را فراهم می‌کند و آنها را برای سامانه‌های دارورسانی، حسگرها و سایر کاربردها مناسب می‌سازد. ساخت و خصوصیات نانوبسپارها به دلیل اندازه و نیاز به واپایش دقیق بر ساختار آن‌ها چالش‌های جذابی را ایجاد می‌کند. روش‌های استاندارد تولید نانوبسپار شامل بسپارسازی امولسیونی، نانورسوب‌گذاری و ساخت به کمک الگو است. این روش‌ها تولید نانوبسپارهایی با اندازه‌ها، ترکیبات و شکل‌های واپایش‌شده را امکان‌پذیر می‌سازد. شکل ۸ برخی از کاربردهای نانوکامپوزیت‌های فلزی و اکسید فلزی را نشان می‌دهد.

درک کیفیت منحصربه‌فرد نانوبسپارها بسیار مهم است زیرا ظرفیت کاربرد گسترده آنها از سامانه‌های دارورسانی و دستگاه‌های الکترونیک نوری گرفته تا اصلاح محیطی و ذخیره انرژی و پزشکی را شامل می‌شود. ساخت و شناسایی نانوبسپارها نیازمند واپایش دقیق و روش‌های پیشرفته است. کاوش بیشتر در رفتار نانوبسپار و توسعه مستمر روش‌های ساخت جدید قفل برنامه‌های جدید را باز می‌کند و پیشرفت‌ها را در بخش‌های مختلف فناوری ممکن می‌سازد (Iqbal et al., 2022).

1- Ceramic matrix composite 2- Metal matrix composite 3- Polymer matrix composite



شکل ۸. کاربردهای نانومواد اکسید فلزی

۴-۳. محیط زیست

متأسفانه آلودگی محیط زیست به یک معضل شدید جهانی تبدیل شده است و هر روز خسارات جبران‌ناپذیری به آن وارد می‌شود. سرعت سریع شهرنشینی و صنعتی شدن، تعادل محیط زیست ما را از بین برده و منجر به انتشار مواد خطرناک، گازهای مضر و دود شده است. اینها باعث ایجاد اثرات سمی بر موجودات زنده و آلوده کردن خاک، آب‌وهوا، به خطر انداختن بوم‌سازگان‌ها و ایجاد مشکلات سلامتی مانند آلزایمر، زوال عقل و ناشنوایی می‌شوند. با این حال، با توسعه فناوری‌های جدید برای اصلاح و پاک‌سازی محیط، امید وجود دارد. نانوفناوری، به ویژه در توسعه روش‌های جدید و مقرون‌به‌صرفه برای شناسایی و پایش آلاینده‌ها، تخریب کاتالیزوری، حذف جذبی و پاک‌سازی آلاینده‌های محیطی، نوید بزرگی را نشان می‌دهد. محصولات نانوفناوری به دلیل اندازه کوچک‌تر، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصربه‌فردی در مقایسه با مواد حجیم دارند. با توسعه مداوم نانوفناوری، ممکن است بتوانیم به طور مؤثر با موضوع رو به رشد آلودگی محیط‌زیست مبارزه کنیم (Javed et al., 2020).

با توجه به نگرانی فزاینده برای اقتصاد دوستدار محیط زیست، بسیاری از سازمان‌های تحقیقاتی زیست‌محیطی فعالانه به دنبال عوامل اصلاحی سازگار با محیط‌زیست برای احیای خاک و آب آلوده هستند. مطالعات اخیر بر روی فناوری‌های الکترومبران، برای حذف اجزای باردار از محلول‌ها، مانند تولید آب شیرین از آب شور متمرکزشده‌اند. نانومواد همچنین در تصفیه فاضلاب و فناوری نانو فوتوکاتالیستی برای اکسید کردن ترکیبات آلی در آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، مواد نانوساختار مختلف در دییونیزاسیون خازنی (CDI)[1]، یک فناوری نوظهور برای تصفیه آب استفاده شده

1- Capacitive deionization

است. شایان ذکر است که نانومواد رفتارهای متفاوتی را در محیط های آبی از خود نشان می‌دهند که برخی قابلیت بهتری برای اصلاح آلودگی آب نشان می‌دهند.

نانومواد نقش مهمی در تصفیه فاضلاب ایفا کرده‌اند. فناوری غشای نانوفیلتراسیون برای جداسازی مواد در فاضلاب استفاده‌شده است، در حالی که نانومواد خاص اثر جذب بر روی مواد آلی یا یون‌های فلزی دارند. به عنوان مثال، نانوذرات کربن در شرایط اسیدی یا قلیایی پایداری برتری از خود نشان می‌دهند و عملکرد اصلاحی عالی را نشان می‌دهند. نانومواد دیگری، مانند گرافن، نانولوله‌های کربنی، نانوذرات نقره، نانوذرات ZnO، نانوذرات TiO2، مواد نانوالیافی نیز در اصلاح آلودگی آب مفید هستند (Saleem & Zaidi, 2020).

۴-۴. نانورآکتورها

یک راهبرد نوظهور برای ساخت نانوخوشه‌ها و نانوذرات شامل محصورکردن پیش‌سازهای ذرات در حجم‌های کوچک و کاهش و تجمع بعدی آن پیش‌سازها به ذرات مجزا است. این حجم‌های جدا شده از نظر فضایی، نانورآکتور نامیده می‌شوند و موانعی را ایجاد می‌کنند که حرکت اتم‌های فلز و سایر واکنش‌دهنده‌ها را محدود می‌کند و شرایط واکنش متمایز از شرایط محیط اطراف را فراهم می‌کند. نانورآکتورها را می‌توان با راهبردهای مختلفی تهیه کرد که به طور کلی در دسته‌های مبتنی بر محلول و بستر محدود قرار می‌گیرند. نانورآکتورهای مبتنی بر محلول به طور کلی به عنوان کپسول‌های سه‌بعدی که می‌توانند در محلول دست‌کاری شوند، تعریف می‌شوند در حالی که نانورآکتورهای محصور در بستر، حجم‌های ایزوله‌شده روی یک بستر یا سطح ماکروسکوپی هستند (Swisher et al., 2022).

دو نوع نانورآکتور وجود دارد، طبیعی و مصنوعی. گروه اول عملکرد انتخابی‌تر و ساختار پیچیده‌تری دارد در حالی که گروه دوم، دارای تنوع بیشتر و ساختار ساده‌تری است. فضای داخل نانورآکتورها محیطی مناسب برای تولید نانوساختارهای مختلف و طیف وسیعی از واکنش‌های شیمیایی است. تغییر سینتیک و کل مسیر فرایند زمانی امکان‌پذیر است که واکنش‌های شیمیایی در فضاهای محدود با ابعاد نانومتری و حجم میکرومتر انجام شود (Syah et al., 2021).

نانورآکتورها در نانوفناوری و نانوزیست‌فناوری استفاده می‌شوند و می‌توانند از کاتالیزورها در برابر اثرات خارجی محافظت کنند، بنابراین نرخ واکنش و سازوکارها را بهبود می‌بخشند. نانورآکتورها می‌توانند طبیعی یا مصنوعی باشند که نانورآکتورهای مصنوعی با انواع مختلف و گسترده مولکول‌ها ساخته می‌شوند. آنها کاربردهای بالقوه‌ای در هیدروژناسیون زیست‌توده، ذرات ویروس مانند برای کاتالیز و کاربردهای زیستی و فناوری‌های ذخیره‌سازی گاز دارند. نانورآکتورها را می‌توان با استفاده از مواد مختلفی، مانند سیلیس، بسپار و نانوذرات کربن تشکیل داد و از کاربرد بالقوه آنها در تحویل دارو/ژن و کاتالیز استفاده کرد (Syah et al., 2021).

۴-۵. زیست‌فناوری و داروسازی

زیست‌فناوری، استفاده از زیست‌شناسی برای توسعه محصولات، روش‌ها و اندامگان‌های جدید است که برای بهبود سلامت انسان و جامعه در نظر گرفته شده است. کاربردهای اولیه زیست‌فناوری منجر به توسعه محصولاتی مانند نان و واکسن گردید. این رشته در حد قابل توجهی در طول قرن گذشته به روش‌هایی که ساختارهای ژنتیکی و فرایندهای زیست‌مولکولی موجودات زنده را دست‌کاری می‌کند، تکامل یافته است. کاربردهای مدرن زیست‌فناوری اغلب از طریق مهندسی ژنتیک که به عنوان فناوری DNA نوترکیب نیز شناخته می‌شود، مطرح شده است. مهندسی ژنتیک با تغییر یا تعامل با ساختارهای سلولی ژنتیکی کار می‌کند.

نانوزیست‌فناوری ترکیبی از رشته‌های نانوفناوری و زیست‌فناوری است که برای بهبود روش‌های سنتی زیست‌فناوری و غلبه بر محدودیت آنها، مانند عوارض جانبی ناشی از درمان‌های مرسوم، توسعه یافته‌اند. این حوزه دانشی شامل ادغام فناوری نانو و زیست‌فناوری برای ایجاد دستگاه‌ها، مواد و سامانه‌هایی در مقیاس نانو برای تشخیص، درمان و پیشگیری از بیماری‌ها است. نانوزیست‌فناوری از خواص منحصربه‌فرد مواد (در مقیاس نانو) مانند سطح بالا، واکنش‌پذیری بالا و اندازه کوچک برای ایجاد ابزارهای جدید در تحقیقات زیستی و کاربردهای پزشکی، بهره می‌برد. برخی از نمونه‌های کاربردهای نانوزیست‌فناوری شامل سامانه‌های دارورسانی در مقیاس نانو، عوامل تصویربرداری در مقیاس نانو برای تشخیص سرطان و نانوحسگرهای زیستی برای تشخیص بیماری‌ها می‌شود.

استفاده از نانوزیست‌فناوری در رساندن داروهای شیمیایی یا عوامل اصلاح‌کننده ژن به سلول‌های هدف، کارایی درمان‌ها را افزایش داده و عوارض جانبی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. انتظار می‌رود که این رویکردها در درمان و پیشگیری از بیماری‌های مختلف، مانند سرطان‌ها، اختلالات ژنتیکی، دیابت، بیماری‌های التهابی و بیماری‌های عصبی مؤثر باشند (Gong et al., 2018).

دارورسانی، استفاده از اصول شیمیایی و زیستی برای واپایش مکان-زمانی و مکان-مولکولی دارو در داخل بدن است که برای منافع بالینی مورد توجه است. درمان‌های مرسوم سرطان مانند جراحی، شیمی‌درمانی و پرتودرمانی ممکن است برای بیمار عوارض جانبی شدیدی به همراه داشته باشد. بارگذاری داروهای ضدسرطان بر نانومواد، در یک سامانه دارورسانی مبتنی بر نانو، می‌تواند اثرات و عوارض منفی را کاهش دهد. دانشمندان به دنبال به حداکثر رساندن فعالیت دارو و به حداقل رساندن عوارض جانبی آن هستند که می‌توان با استفاده از نانوسامانه‌ها، توزیع داروها را واپایش و هدفمند نمود. یک مثال رایج از این رویکرد استفاده از لیپوزوم‌ها[1] است که می‌توانند توزیع زیستی شیمی‌درمانی‌های ضد سرطان را هدایت کنند، به طوری که در هر مقطع زمانی، نسبت بیشتری از دارو

1- Liposome

در داخل تومور و نسبت کمتری از دارو در بافت سالم قرار می‌گیرد. حتی کپسوله‌کردن داروهای پلتین در لیپوزوم‌ها، یک سامانه دارورسانی مبتنی بر نانو را برای درمان سرطان می‌سازد.

نانوذرات طلا گزینه‌های سودمندی برای درمان و تشخیص سرطان هستند چون قابلیت زیستی بالایی دارند و الگوهای کنترل‌شده‌ای از انتشار دارو را در فرایند دارورسانی نشان می‌دهند. نانوذرات طلا از الکترون‌های رسانایی، روی سطوح خود تشکیل‌شده‌اند که توسط طول‌موج‌های خاصی از نور برانگیخته می‌شوند. این ویژگی، نانوذرات طلا را قادر می‌سازد تا نور را جذب کرده و گرمایی تولید کنند که برای سلول‌های سرطانی کشنده است. از بین بردن این سلول‌ها به وسیله گرمای آزادشده تحت تابش، درمان فتوترمال[1] یا درمان فتودینامیک[2] نامیده می‌شود (Fernandes et al., 2020).

۴-۶. صنایع غذایی

از آن جایی که نانومواد دارای خواص متفاوتی هستند، می‌توانند خطرات سمی برای بدن انسان داشته باشند، یکی دیگر از نگرانی‌های قابل توجه، توانایی نانوذرات، به دلیل مقیاس بسیار کوچک، برای نفوذ به سلول‌هاست اما با وجود همه نگرانی‌های فزاینده در مورد اثرات نامطلوب بالقوه بر سلامت انسان، کاربردهای نانوفناوری در صنایع غذایی گسترده است. به عنوان مثال، نانوذرات مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی برای سلامت انسان مضر نیستند، اما ممکن است زمانی که در خود محصولات غذایی قرار می‌گیرد، خطراتی را به همراه داشته باشند. ابعاد دیگری از موضوع کاربرد نانوفناوری در صنایع غذایی درخور تأمل است که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود (Angelopoulou et al., 2022).

۴-۶-۱. تشخیص آلاینده‌ها

سامانه‌های بسته‌بندی هوشمند عمدتاً از نانوحسگرهایی برای شناسایی آلاینده‌های مواد غذایی تشکیل شده‌اند. نانوحسگرهای مبتنی بر نانوذرات، قابلیت ردیابی تغییرات شیمیایی، فیزیکی و زیستی در طول پردازش و نگهداری مواد غذایی دارند. استفاده از این حسگرها در صنایع بسته‌بندی به شناسایی مواد شیمیایی، سموم و عوامل بیماری‌زا کمک می‌کند. یکی از دلایل خراب شدن احتمالی مواد غذایی، اکسیژن است. اکسیژن داخل بسته‌بندی مواد غذایی باعث اکسیداسیون چربی‌ها و روغن‌ها می‌شود. همچنین مسئول تغییر رنگ، تغییر در بافت، ترشیدگی، بوی بد و مشکلات مربوط به طعم است. نانوذرات تعبیه‌شده در بطری‌های پلاستیکی و نایلونی، بسته‌بندی را متراکم می‌کند و نفوذپذیری گاز را کاهش می‌دهد. سد تقویت‌شده با نانومواد، مواد غذایی حساس به اکسیژن را تازه‌تر نگه می‌دارد و می‌تواند هزینه‌های بسته‌بندی را برای تولیدکنندگان کاهش دهد (Angelopoulou et al., 2022).

1- Photothermal therapy (PTT)

2- Photodynamic therapy (PDT)

۴-۶-۲. بررسی کیفی محصولات

بسته‌بندی هوشمند با نانوحسگرها و نشانگرها به ردیابی آسان اطلاعات مربوط به کیفیت محصولات غذایی در حین حمل و نقل، نگهداری و توزیع کمک می‌کند زیرا حسگرهای متصل در بسته‌بندی، تمام واکنش‌های مربوط به تغییرات مرتبط با محیط داخلی یا خارجی را ثبت می‌کند. مصرف‌کنندگان می‌توانند با کمک نانوحسگرهای تعبیه شده در بسته‌بندی، از وضعیت مواد غذایی داخل آن مطلع شوند (شکل ۹). نشانگرهای مذکور اطلاعات بصری و کیفی فوری مربوط به غذای بسته‌بندی‌شده را از طریق تغییر رنگ یا شدت آن ارائه می‌دهند. اجزای فعال این مواد در بسته‌بندی‌های هوشمند، عملکردهای مهمی مانند خواص ضدمیکربی، آنتی‌اکسیدانی یا دفع کننده حشرات یا جوندگان دارند. مهم‌ترین تأثیر مثبت استفاده از نانوذرات در حفظ کیفیت مواد غذایی و پایداری ذخیره‌سازی، کاهش میزان استفاده از افزودنی‌ها و مواد نگهدارنده است (Singh et al., 2017).

شکل ۹. با فاسد شدن محصولات درون این نوع از بسته‌بندی، بر روی سنسور تشخیص سلامت محصول یک خط به نشانه فاسد بودن محصول ظاهر می‌شود (Singh et al., 2017)

۴-۶-۳. نانو پوشش‌های خوراکی

نانوپوشش‌های خوراکی (پوشش‌های نازک ۵ نانومتری) در صنایع فراوری گوشت، میوه، سبزی‌ها، لبنیات و نان کاربرد دارد. مواد جاذب مختلفی مانند پلی‌الکترولیت‌های طبیعی)پروتئین‌ها و پلیساکاریدها)، لیپیدهای باردار (فسفولیپیدها و مواد فعال سطحی‌ها) و ذرات کلوئیدی (مایسل ها و وزیکول‌ها) را می‌توان برای تهیه نانوپوشش‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده نمود. بسپارهای زیستی در تهیه لایه‌های پوششی زیست‌تخریب‌پذیر برای بسته‌بندی مواد غذایی کاربرد دارند. برای نمونه می‌توان از پلی‌ساکاریدهایی مانند سلولز، کیتوزان، نشاسته، پکتین، آلژینات، کاراگینان، پولولان و

کفیران نام برد که بیشتر موردمطالعه قرار می‌گیرند. اینها می‌توانند لایه‌های پوششی مناسبی با خاصیت بازدارندگی خوب در برابر انتقال اکسیژن و دی‌اکسیدکربن تشکیل دهند (Primožič et al., 2021).

۴-۷. فرایندهای انرژی

امروزه اهمیت انرژی و نقش اساس آن به عنوان حرکت دهنده بخش‌های اقتصادی یک کشور بر کسی پوشیده نیست. محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی که عمده‌ترین منبع تولید انرژی در جهان به شمار می‌رود از یک‌سو و آثار مخرب زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه انرژی، آن را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های حال حاضر دنیا تبدیل کرده است (Panjee Shahi, 2001). نانوفناوری در حال تقویت منابع انرژی جایگزین و استفاده از منابع انرژی موجود برای کمک به تقاضای رو به رشد انرژی در جهان است. افزایش بازده تولید سوخت از مواد خام مبتنی بر نفت به لطف کاتالیزور، بهبود یافته است و از طریق بهبود احتراق و اصطکاک کمتر، شاهد کاهش مصرف سوخت در خودروها و نیروگاه‌ها هستیم. همچنین از دیگر کاربردهای نانو در جهان امروزی می‌توان به استفاده ارزان‌تر برای تولید و نصب ساده‌تر سلول‌های خورشیدی نانوساختار برای تبدیل نور خورشید به الکتریسیته، استفاده از نانولوله‌های کربنی برای ایجاد تیغه‌های آسیاب بادی بلندتر و در عین حال قوی‌تر و سبک‌تر و نیز، صفحات نازک خورشیدی که می‌توانند روی جعبه‌های رایانه نصب شوند، اشاره کرد.

نانوذرات و روش‌های تولید نانو امکان ایجاد تحول در توسعه و استفاده از سامانه‌های انتقال انرژی را فراهم آورده‌اند. به عنوان مثال، فناوری نانو می‌تواند کارایی سوخت‌های حمل و نقل را افزایش داده و درنتیجه تقاضا برای سوخت‌های مایع مورد استفاده برای سفرهای طولانی را کاهش دهد. علاوه بر این، استفاده از نانوذرات در مصالح ساختمانی می‌تواند منجر به قوی‌تر و کوچک‌تر شدن خطوط لوله و خطوط انتقال الکتریکی شود و ابعاد مورد نیاز برای نصب و نگهداری آنها کاهش یابد.

منابع انرژی تجدیدپذیر که به راه‌حل اصلی بسیاری از مسائل زیست‌محیطی تبدیل‌شده‌اند. این امر صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر را به بخشی ضروری از صنعت زیست‌محیطی تبدیل کرده است. برای دستیابی به نتایج بهتر، فناوری نانو باید در امور انرژی جهان مورد توجه قرار گیرد. فناوری نانو به طور فزاینده‌ای در تولید انرژی خورشیدی، هیدروژن، زیست‌توده، زمین‌گرمایی و انرژی امواج جزرومدی استفاده می‌شود. بااین‌حال، دانشمندان بر این باورند که هنوز تا تحقق کامل مزایای استفاده از فناوری نانو و انرژی‌های تجدیدپذیر، راه درازی در پیش است.

نانوفناوری انواع مختلفی از صفحات خورشیدی مانند صفحات خورشیدی تخت، صفحات جذب مستقیم، فرورفتگی‌های سهموی، صفحات موج‌دار ولوله‌های حرارتی وجود دارد. این پنل‌های خورشیدی را می‌توان با استفاده از نانوسیال‌ها بهبود بخشید که می‌تواند بازده کاری آنها را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. با این حال، در مورد کاربرد عملی نانومواد در تولید پنل‌های خورشیدی

تحقیقات کافی وجود ندارد. همچنین لازم است تحلیل‌های مقرون‌به‌صرفه و کارایی دستگاه‌های خورشیدی سنتی و مبتنی بر فناوری نانو انجام شود تا بهترین رویکرد برای توسعه کلکتورهای نانو خورشیدی در آینده تعیین شود.

۴-۸. کاربردهای حوزه نفت و گاز

در صنعت نفت و گاز، از فناوری نانو برای بهبود فرایندهای مختلف و افزایش کارایی عملیات استفاده شده است. یکی از حوزه‌های حیاتی که در آن فناوری نانو به کار گرفته شده است، اکتشاف و تولید ذخایر نفت و گاز است. نانوحسگرها و نانومواد برای شناسایی و نظارت بر وجود هیدروکربن‌ها در مخازن توسعه‌یافته‌اند که امکان استخراج دقیق و کارآمدتر را فراهم می‌کند. نانوذرات همچنین می‌توانند با تغییر خواص سنگ مخزن و بهبود جریان نفت، بازیافت نفت را افزایش دهند. نانوکاتالیست‌ها در عملیات پالایش و فراوری برای بهبود کارایی واکنش‌های شیمیایی و کاهش مصرف انرژی توسعه‌یافته‌اند. همچنین می‌توان از نانومواد برای حذف ناخالصی‌ها و آلاینده‌ها از نفت خام استفاده کرد و کیفیت محصولات نهایی را بهبود بخشید. نانوپوشش‌ها را می‌توان در حمل‌ونقل خط لوله برای جلوگیری از خوردگی و کاهش اصطکاک، بهبود ایمنی و کارایی استفاده کرد. نانوفناوری همچنین برای توسعه مواد پیشرفته برای ذخیره و انتقال هیدروژن که یک منبع سوخت جایگزین امیدوارکننده است، مورد بررسی قرارگرفته است. به طور کلی، استفاده از فناوری نانو در صنعت نفت و گاز قابلیت بهبود کارایی، کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش پایداری صنعت را دارد.

۵. آینده در نانو

نانومعماری اصطلاحی است که برای توصیف ایجاد سامانه‌های مواد کاربردی با استفاده از واحدهای مقیاس نانو استفاده می‌شود. این مفهومی است که بعد از فناوری نانو آمده است و شامل ترکیب فناوری نانو با سایر رشته‌های تحقیقاتی برای توسعه مواد نوآورانه است. در حالی که نانوفناوری بر دستکاری و واپایش ماده در مقیاس نانو تمرکز دارد، نانومعماری با استفاده از این واحدهای مقیاس نانو برای ایجاد سامانه‌های مواد کاربردی، قدمی فراتر می‌گذارد. این ادغام فناوری نانو با سایر رشته‌های علمی، امکانات نانوفناوری را گسترش می‌دهد و امکان توسعه مواد پیچیده‌تر و پیشرفته‌تر را فراهم می‌کند. نانومعماری فاز بعدی توسعه در حوزه فناوری نانو است، زیرا بر پایه فناوری نانو بناشده و راه‌های جدیدی را برای ایجاد مواد کاربردی بررسی می‌کند.

نانومعماری و نانوفناوری دو مفهومی هستند که اغلب به‌جای یکدیگر استفاده می‌شوند اما درواقع، رویکردهای متفاوتی برای مصالح ساختمانی در مقیاس نانو هستند. در حالی که نانوفناوری بر دستکاری و واپایش ماده در مقیاس نانو برای ایجاد مواد و دستگاه‌های جدید با ویژگی‌های

منحصربه‌فرد متمرکز است، نانومعماری با استفاده از واحدهای نانومقیاس برای معماری مواد کاربردی، همه چیز را یک‌قدم جلوتر می‌برد. این امکان ترکیبات و انتخاب‌های بی‌حدوحصر در تولید مواد را فراهم می‌کند، حتی با استفاده از فرایندهای غیرتعادلی با مجموعه‌های تعادلی معمولی. از سوی دیگر، نانوفناوری اساساً بر ساخت، مشخصه‌یابی و کاربرد نانومواد و دستگاه‌های نانو متمرکز است و پیشرفت‌های موفقیت‌آمیزی در زمینه‌های مختلف تحقیقات علمی، مانند شیمی مصنوعی، مونتاژ فوق‌مولکولی، پردازش مواد و فناوری‌های مرتبط با زیستی ایجاد می‌کند. هدف نانومعماری ساخت ساختارهای مصالح نامتقارن و سلسله‌مراتبی است که نیازهای تولید مواد برای نیازهای اجتماعی را برآورده می‌کند.

نانومعماری با ایجاد امکان ایجاد سامانه‌های مواد کاربردی با استفاده از واحدهای مقیاس نانو، چندین مزیت را ارائه می‌دهد. این فناوری، نانو را با سایر رشته‌های تحقیقاتی ادغام می‌کند و امکان ایجاد ساختارهای مواد نامتقارن و سلسله‌مراتبی را فراهم می‌کند و نیازهای تولید مواد برای نیازهای اجتماعی را برآورده می‌کند. همچنین این امکان را برای استفاده از فرایندهای غیرتعادلی در ترکیب با مجموعه‌های تعادلی معمولی را فراهم آورده و طیف وسیعی از گزینه‌های تولید مواد را ارائه می‌دهد. نانومعماری همچنین فرصت‌هایی را برای توسعه مواد و دستگاه‌های جدید با ویژگی‌ها و عملکردهای منحصربه‌فرد ایجاد می‌کند. این امکان را برای نانومعماری سطحی گسترش می‌دهد و امکان تبدیل نانومعماری سطح زنجیره بسپاری به معماری سلولی در سطح اندام را فراهم می‌کند. علاوه بر این، انعطاف‌پذیری را برای در نظر گرفتن مایعات غیرآبی مختلف، دماها و اجزای فیلم در ترکیبات مناسب ارائه می‌دهد و بر محدودیت‌های روش‌های سنتی غلبه می‌کند.

حوزه نانومعماری اهداف خود را توسعه سوئیچ‌های اتمی، عملیات سیناپسی مصنوعی و دستگاه‌های شبکه نورومورفیک تعیین کرده است. هدف نهایی تبدیل اشیای فیزیکی و شیمیایی به موجودات زنده است که می‌تواند منجر به پیشرفت قابل توجهی در زیست‌شناسی مصنوعی شود. نانومعماری همه‌چیز در مورد ایجاد مواد کاربردی با واحدهای مقیاس نانو بر اساس اصول فناوری نانو است. در آینده، محققان در این زمینه ممکن است رویکردها و روش‌های جدیدی را برای تولید مواد، مانند استفاده از فرایندهای غیرتعادلی و مجموعه‌های نامتعارف بررسی کنند. هدف در اینجا ساختن سامانه‌های مواد کاربردی پیشرفته با ساختارهای نامتقارن و سلسله‌مراتبی است که بتواند نیازهای روزافزون جامعه برای تولید مواد را برآورده کند.

۶. نتیجه‌گیری

نانومواد ظرفیت قابل توجهی را برای پیشرفت در زمینه‌های مختلف علمی و مهندسی ارائه می‌دهند. هدف از این مقاله شناخت بهتر این مواد و کاربردهای آنها با تمرکز بر مهندسی شیمی و همچنین

معرفی آینده این شاخه از علم است. در این راستا به تفصیل به شرح موارد زیر پرداخته شده است:

۱. روش‌های کلیدی ساخت (بالا به پایین و پایین به بالا) برای ساخت نانومواد و اهمیت روش‌های مشخصه‌یابی برای تجزیه و تحلیل خواص آنها معرفی شده‌اند.

۲. از نقطه نظر مهندسی شیمی، نشان داده شده که چگونه فناوری نانو به چالش‌های دیرینه در زمینه‌هایی مانند کاتالیز، تحویل دارو و تصفیه آب می‌پردازد.

۳. نانومعماری به عنوان آینده در انتظاری معرفی شده که فناوری نانو را با سایر رشته‌ها ادغام می‌کند تا سامانه‌های مواد پیچیده‌تر و کاربردی‌تری را ایجاد نماید. تحقیقات انجام شده مؤید قابلیت غیر قابل انکار نانومواد برای متحول کردن جنبه‌های مختلف فناوری در زندگی بشر است.

References

- Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., Imran, M., Haider, J., Khan, M., Khan, Q., & Maqbool, M. (2022). Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, Influencing Factors, Advantages, And Disadvantages: a review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 300, 102597.
- Angelopoulou, P., Giaouris, E., & Gardikis, K. (2022). Applications and prospects of nanotechnology in food and cosmetics preservation, *Nanomaterials*, 12(7), 1196.
- D.R. Baer, M. H. E. (2010). XPS analysis of nanostructured materials and biological surfaces, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena volumes*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.elspec.2009.09.003.
- Fernandes, N., Rodrigues, C. F., Moreira, A. F., & Correia, I. J. (2020). Overview of the application of inorganic nanomaterials in cancer photothermal therapy, *Biomaterials Science*, 8(11), 2990-3020.
- Gong, X., Huang, D., Liu, Y., Peng, Z., Zeng, G., Xu, P., Cheng, M., Wang, R., & Wan, J. (2018). Remediation of contaminated soils by biotechnology with nanomaterials: bio-behavior, applications, and perspectives, *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(3), 455-468.
- Hosseinpour, P., (2004). A new approach to science and technologies, nano- technology and nano - science , *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(22), 11-99 [In Persian].
- Iqbal, A., Raza, M., & Jadoon, H. (2022). Applications of nanomaterials for health and environment protection, *Moj Eco Environ Sci*, 7(3), 84-87.
- Javed, R., Zia, M., Naz, S., Aisida, S. O., Ain, N. u., & Ao, Q. (2020). Role of capping agents in the application of nanoparticles in biomedicine and environmental remediation: recent trends and future prospects, *Journal of Nanobiotechnology*, 18, 1-15.
- Kaliva, M., & Vamvakaki, M. (2020). Nanomaterials characterization, In *Polymer Science and Nanotechnology* (pp. 401-433), Elsevier.
- Khalid, P., Suman, V., Shameema, S., Vinodini, N., SHELA, R., & Chattergee, P. K. (2014), Analytical methods for nanomaterial characterization, *International Journal of Nano Dimensions*, 5(9), 309-320.
- Kumar, P. S., Pavithra, K. G., & Naushad, M. (2019). Characterization techniques for nanomaterials, In *Nanomaterials for solar cell applications* (pp. 97-124), Elsevier.
- Leonte, O., Soleymani, L., & Sanabria, B. (2017). Application of nanomaterials to catalysis and energy, *231st ECS Meeting* (May 28-June 1, 2017).
- Lin, P.-C., Lin, S., Wang, P. C., & Sridhar, R. (2014). Techniques for physicochemical characterization of nanomaterials, *Biotechnology Advances*, 32(4), 711-726.
- Nikolin, B., Imamović, B., Medanhodžić-Vuk, S., & Sober, M. (2004). High perfomance liquid chromatography in pharmaceutical analyses, *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*, 4(2), 5.

- Panjee shahi, M. H., (2001). Chemical engineering and energy, *Iranian Journal of Engineering Education*, 2(8), 55-70 [In Persian].
- Primožič, M., Knez, Ž., & Leitgeb, M. (2021). (Bio) Nanotechnology in food science-food packaging. *Nanomaterials*, 11(2), 292.
- Saleem, H., & Zaidi, S. J. (2020). Developments in the application of nanomaterials for water treatment and their impact on the environment, *Nanomaterials*, 10(9), 1764.
- Sapsford, K. E., Tyner, K. M., Dair, B. J., Deschamps, J. R., & Medintz, I. L. (2011). Analyzing nanomaterial bioconjugates: a review of current and emerging purification and characterization techniques, *Analytical Chemistry*, 83(12), 4453-4488.
- Shameem, M. M., Sasikanth, S., Annamalai, R., & Raman, R. G. (2021). A brief review on polymer nanocomposites and its applications, *Materials Today: Proceedings*, 45, 2536-2539.
- Singh, T., Shukla, S., Kumar, P., Wahla, V., Bajpai, V. K., & Rather, I. A. (2017). Application of nanotechnology in food science: perception and overview, *Frontiers In Microbiology*, 8, 1501.
- Somwanshi, S. B., Somvanshi, S. B., & Kharat, P. B. (2020). Nanocatalyst: A brief review on synthesis to applications, *Journal of Physics: Conference Series*.
- Srivastava, N., Srivastava, M., Mishra, P., & Gupta, V. K. (2020). *Green synthesis of nanomaterials for bioenergy applications*, John Wiley & Sons.
- Swisher, J. H., Jibril, L., Petrosko, S. H., & Mirkin, C. A. (2022)., Nanoreactors for particle synthesis. *Nature Reviews Materials*, 7(6), 428-448.
- Syah, R., Zahar, M., & Kianfar, E. (2021). Nanoreactors: properties, applications and characterization, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 19(10), 981-1007.
- Tahir, M. B., Sohaib, M., Sagir, M., & Rafique, M. (2022). Role of nanotechnology in photocatalysis, *Encyclopedia of Smart Materials*, 578.

مجتبی شریعتی نیاسر: عضو هیئت علمی، استاد تمام و رئیس دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تهران است. ایشان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در دانشگاه‌های یومیست و ویلز انگلستان به اتمام رسانده‌اند. علاوه بر فعالیت در حوزه آینده آموزش عالی، ایشان دارای فعالیت‌های پژوهشی در زمینه فرایندهای انتقال، غشا و نانوفناوری و سرپرست آزمایشگاه پدیده‌های انتقال و فناوری نانو هستند.

مهدیه یاوری: دانش‌آموخته دکتری مهندسی شیمی از دانشگاه تهران است. ایشان دوره تحصیلات خود در دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد در دانشگاه امیرکبیر گذرانده‌اند. حوزه پژوهشی ایشان پدیده‌های انتقال و نانوفناوری است و در این راستا علاوه بر تدریس، مطالعات تجربی و همچنین مدل‌سازی‌های ریاضی و رایانه‌ای از جمله فعالیت‌های انجام شده توسط ایشان است.

- **علی مؤذنی**: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی شیمی از دانشگاه تهران است. ایشان تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در دانشگاه محقق اردبیلی را با کسب رتبه اول به انجام رسانده و در دوره کارشناسی ارشد در حوزه پژوهشی نانوذرات ژانوس و کاربرد آنها در غشاهای بسپاری به فعالیت پرداخته است.

- **امیرحسین مشتاقی**: دانشجوی کارشناسی رشته مهندسی شیمی در دانشگاه تهران است. ایشان در سال ۱۴۰۱ رتبه اول یازدهمین دوره المپیاد دانشجویی نانو را کسب کرده و در حال حاضر دبیر نهاد ترویجی نانو در دانشکده مهندسی شیمی و بسپار دانشگاه تهران است

- **ریحانه باباخانلو**: دانشجوی کارشناسی رشته مهندسی شیمی در دانشگاه تهران است. ایشان ضمن عضویت در نهاد نانو دانشکده مهندسی شیمی و بسپار، در انجمن علمی این دانشکده نیز فعال است.