

آشنایی با روش‌های ساخت و مشخصه‌یابی

نانو مواد

نویسندگان:

دکتر جواد ملکوتی خواه

دکتر سید صابر میرحسینی

دکتر مرضیه آزادفلاح

مهندس پریسا قسمتی



انتشارات دانشگاهی فرهمند

.....

نام کتاب : آشنایی با روش های ساخت و مشخصه یابی نانو مواد
نویسندگان : دکتر جواد ملکوتی خواه / دکتر سید صابر میرحسینی / دکتر مرضیه آزاد فلاح /
مهندس پریسا قسمتی
تاریخ و نوبت چاپ : اول ۱۴۰۴
شمارگان : ۱۰۰ نسخه
بها : ۳۵۰۰۰۰۰ ریال
شابک : ۹۷۸-۶۲۲-۴۹۸۰-۵۱-۹

.....

حق چاپ برای نشر دانشگاهی فرهمند محفوظ می باشد

نشانی : تهران، خیابان انقلاب، روبروی دانشگاه تهران ، پاساژ فروزنده ، طبقه اول ، پلاک ۴۱۹
تلفن : ۶۶۴۱۰۶۸۸ - ۶۶۹۶۸۶۱۴

WWW.FARBOOK.IR

Farbook.pub@gmail.com

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
پیشگفتار.....	۱۷
فصل اول: معرفی فناوری نانو.....	۱۹
مقدمه.....	۱۹
تعریف فناوری نانو.....	۲۰
تقسیم‌بندی نانوساختارها براساس ابعاد.....	۲۲
نانومواد صفر بعدی (D^0).....	۲۲
نانومواد تک بعدی ($1D$).....	۲۳
نانومواد دو بعدی ($2D$).....	۲۵
نانومواد سه بعدی ($3D$).....	۲۶
فصل دوم: روش‌های تولید نانو ذرات.....	۲۸
مقدمه.....	۲۸
روش پایین به بالا.....	۲۹
روش بالا به پایین.....	۳۰
روشهای سنتز نانوذرات (نانومواد صفر بعدی).....	۳۲
روشهای بالا به پایین.....	۳۲
سنتز نانومواد با استفاده از روش آسیاب مکانیکی.....	۳۲
آسیاب گلوله‌ای - ارتعاشی.....	۳۲
آسیاب افقی غلتان.....	۳۴
آسیاب سیاره‌ای.....	۳۵
روش‌های تولید پایین به بالا.....	۳۶
سنتز نانوذرات به روش سل - ژل:.....	۳۶
مراحل فرایند سل - ژل.....	۳۷
تهیه محلول همگن.....	۳۸
تشکیل سل.....	۳۸
تشکیل ژل.....	۴۰

ویژگی های محصولات روش سل - ژل	۴۱
سنتز نانومواد با استفاده از روشهای سونوشیمیایی (فراصوت)	۴۱
کاربرد درصنایع پلیمرسازی	۴۳
روش عملکرد فرآیند سونوشیمی	۴۵
عوامل موثر بر فرآیند سونوشیمی	۴۵
مزایای روش سونوشیمی	۴۵
معایب روش سونوشیمی	۴۶
سنتز نانومواد با استفاده از مایکروویو	۴۶
سنتز نانومواد با استفاده از الکتروشیمی و واکنش های اکسایش-کاهش	۴۷
انواع لایه های اکسیدی	۵۰
سنتز نانومواد به روش پلاسمای RF	۵۲
روش هیدروترمال	۵۳
روش های مبتنی بر استفاده از افزودنی های آلی	۵۶
روش های مبتنی بر استفاده از قالب	۵۷
روش رسوبدهی شیمیایی از فاز بخار	۵۸
رسوبدهی شیمیایی بخار چیست؟	۵۸
روش لیزر پالسی	۶۰
روش احتراق محلول	۶۱
روش سنتز سبز	۶۲
روشهای سنتز نانومواد تک بعدی	۶۴
روشهای سنتز نانولوله ها	۶۴
سنتز بر پایه قالب	۶۴
روشهای ساخت بر پایه قالب:	۶۶
رسوبدهی الکتروشیمیایی	۶۶
رسوبدهی بدون الکتروود	۶۷
رسوبدهی الکتروفورتیک	۶۷
نانولوله های کربنی	۶۹
روشهای سنتز نانولوله های کربنی	۶۹
روش تخلیه قوس الکتریکی	۷۰

۷۱	روش سایش لیزری.....
۷۲	رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار به کمک حرارت (CVD).....
۷۳	روشهای سنتز نانو الیاف.....
۷۴	تولید از قالب.....
۷۴	الکتروریسی.....
۷۵	روش های سنتز نانومواد دوبعدی.....
۷۷	روش های بالا به پایین.....
۷۷	سنتز نانومواد با استفاده از لیتوگرافی.....
۷۷	لیتوگرافی نوری.....
۸۰	تغییر شکل پلاستیک شدید.....
۸۲	روش های تغییر شکل پلاستیک شدید.....
۸۲	تغییر شکل پلاستیک شدید مواد بالک.....
۸۲	فرآیند پرس در کانال زاویه دار.....
۸۴	فرآیند فورج چند جهته.....
۸۵	فرآیند اکستروژن- فشردن تناوبی.....
۸۶	فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید برای ورق‌ها.....
۸۶	فرآیند پیوند نوردی انباشتی.....
۸۷	روش کنگره‌دار کردن و صاف کردن متوالی.....
۸۸	روشهای پایین به بالا.....
۸۸	سنتز نانومواد دوبعدی با استفاده از روش اسپاترینگ (کند و پاش).....
۹۱	کاربردهای اسپاترینگ.....
۹۳	روش پوسته پوسته کردن میکرومکانیکی.....
۹۳	روش رشد همبافته.....
۹۳	روش رسوب نشانی بخار شیمیایی.....
۹۴	روش تهیه گرافن از اکسید گرافیت.....
۹۵	سنتز نانوامولسیون.....
۹۶	مزایای نانو امولسیون.....
۹۶	اجزای نانو امولسیون.....
۹۷	روش تهیه نانوامولسیون.....

۹۷	الف) امولسیون سازی با انرژی بالا.....
۹۷	امولسیون سازی اولتراسونیک
۹۸	همگن سازی با فشار بالا
۹۹	میکروسیال سازی
۱۰۰	ب) امولسیون سازی با انرژی پایین
۱۰۰	امولسیون سازی خود به خود
۱۰۱	فصل سوم: روش های شناسایی نانو مواد
۱۰۱	مقدمه
۱۰۲	روش آنالیز کمی پراش پرتو اشعه ایکس XRD
۱۰۵	محاسبه اندازه دانه های پودر توسط XRD
۱۰۶	کاربردهای آنالیز XRD
۱۰۷	روش طیف سنجی فلئوئورسانس پرتو ایکس XRF
۱۱۰	کاربردهای آنالیز XRF
۱۱۲	روش طیف سنجی الکترونی برای آنالیز شیمیایی ESCA
۱۱۵	کاربردهای آنالیز XPS
۱۱۵	آنالیز طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز FT-IR
۱۱۸	کاربردهای آنالیز FT-IR
۱۲۰	آنالیز طیف سنجی رامان
۱۲۲	کاربردهای آنالیز رامان
۱۲۳	آنالیز میکروسکوپ نیروی اتمی AFM
۱۲۷	مدهای مختلف AFM
۱۲۸	مدهای تماسی
۱۲۸	الف) مد نیرو ثابت
۱۲۹	ب) مد ارتفاع ثابت
۱۲۹	مد شبه تماسی
۱۳۰	الف) مد دامنه ثابت
۱۳۱	مد غیر تماسی
۱۳۲	هندسه تیرک
۱۳۲	سوزن ها

کاربردهای آنالیز AFM	۱۳۳
میکروسکوپ روبشی تونلی (STM)	۱۳۳
مد جریان ثابت	۱۳۵
مد ارتفاع ثابت	۱۳۶
میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)	۱۳۷
اجزای دستگاه SEM	۱۳۹
تفنگ الکترونی	۱۴۱
انواع نشانه‌های الکتریکی	۱۴۲
الکترون‌های ثانویه	۱۴۲
الکترون‌های برگشتی	۱۴۴
الکترون‌های اوژه	۱۴۵
پرتوهای X مشخصه	۱۴۵
عدسی‌های جمع‌کننده	۱۴۶
عدسی‌های همگرا کننده	۱۴۶
عدسی شیئی	۱۴۶
سیستم خلأ	۱۴۷
دلایل نیاز به خلأ بالا در SEM	۱۴۷
محفظه نمونه	۱۴۷
مراحل آماده‌سازی سطح نمونه	۱۴۹
وسایل آماده‌سازی سطح نمونه	۱۴۹
پوشش دادن سطح نمونه	۱۴۹
آشکارسازهای الکترونی	۱۵۱
آشکار ساز E-T	۱۵۱
آشکارسازهای انحصاری الکترون‌های برگشتی	۱۵۲
آشکارساز کاتدولومینسانس	۱۵۳
محدودیت‌های SEM	۱۵۴
کاربردهای SEM	۱۵۴
میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)	۱۵۴
اجزای دستگاه TEM	۱۵۶

تفنگ الکترونی	۱۵۷
فیلامنت تنگستن	۱۵۷
سیستم عدسی های الکترومغناطیس	۱۶۰
عدسی های چگالنده	۱۶۱
عدسی شیئی	۱۶۲
عدسی های میانی	۱۶۳
عدسی تصویری (نمایشی)	۱۶۴
محفظه نگه داری نمونه	۱۶۴
پمپ های خلا	۱۶۵
دوربین و صفحه نمایش	۱۶۵
سیستم تامین انرژی میکروسکوپ	۱۶۵
سیستم کاهش آلودگی	۱۶۶
تشکیل تصویر در TEM	۱۶۶
تصاویر زمینه روشن	۱۶۷
تصاویر زمینه تاریک	۱۶۸
تصاویر میکروسکوپ الکترونی رزولوشن بالا	۱۶۹
آماده سازی نمونه برای میکروسکوپ TEM	۱۶۹
الکتروپولیش و پولیش شیمیایی	۱۷۰
پولیش مکانیکی	۱۷۱
سایش یونی و اتمی	۱۷۲
اولترامیکروتومی	۱۷۳
استفاده از رپلیکا	۱۷۳
کاربردهای آنالیز TEM	۱۷۴
میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی	۱۷۴
میکروسکوپ الکترونی با قدرت تفکیک بالا	۱۷۵
روش آنالیز حرارتی	۱۷۵
آنالیز توزین حرارتی (TGA)	۱۷۶
ویژگی های نمونه TGA	۱۷۸
کاربردهای آنالیز TGA	۱۷۹

دیلاتومتری	۱۷۹
آنالیز ترمومکانیکی (TMA)	۱۸۰
کاربردهای TMA	۱۸۰
آنالیز مکانیکی دینامیکی (DMA)	۱۸۱
کاربردهای DMA	۱۸۱
آنالیز حرارتی افتراقی (DTA)	۱۸۱
عوامل موثر بر نتایج آنالیز حرارتی افتراقی	۱۸۳
پویش گرماسنجی افتراقی DSC	۱۸۳
کاربردهای آنالیز حرارتی افتراقی و پویش گرماسنجی افتراقی	۱۸۴
روش آنالیز DLS	۱۸۵
کاربردهای DLS	۱۸۷
روش آنالیز UV-Vis	۱۸۹
کاربردهای آنالیز UV-Vis	۱۹۰
آنالیز BET	۱۹۱
کاربردهای آنالیز BET	۱۹۳
منابع	۱۹۳

فهرست شکل ها، نمودارها و جدول ها

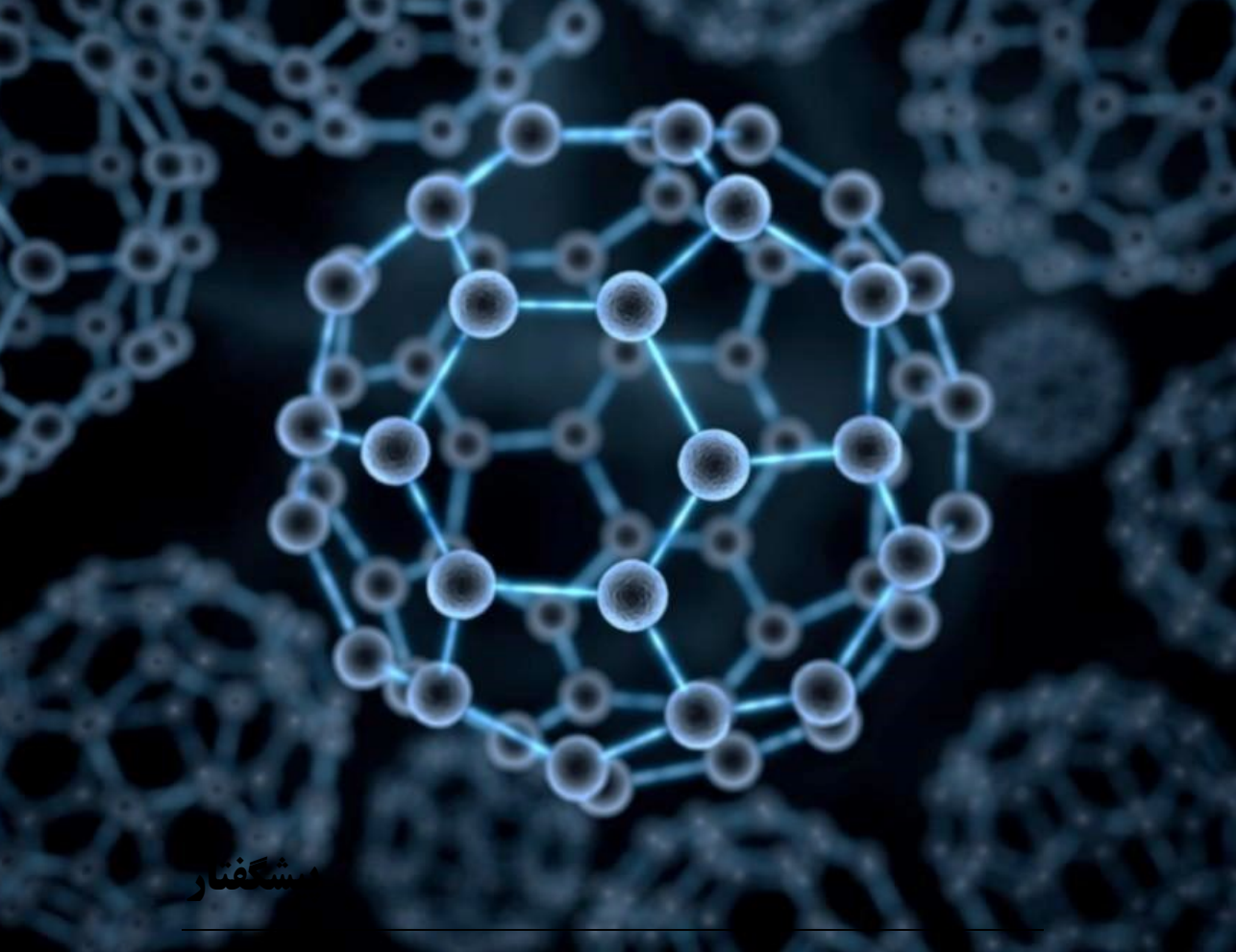
عنوان	شماره صفحه
شکل ۱-۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوساختار صفربعدی.....	۲۴
شکل ۲-۱: مورفولوژی های مختلف نانوساختارهای تک بعدی TiO_2 سنتز شده.....	۲۵
شکل ۳-۱: نانو پوشش ZnO.....	۲۶
شکل ۴-۱: مقایسه انواع نانوساختارها.....	۲۷
شکل ۱-۲: شماتیک روش پایین به بالا.....	۲۹
شکل ۲-۲: مقایسه روش بالا به پایین و پایین به بالا.....	۳۲
شکل ۳-۲: آسیاب نوع SPEX۸۰۰۰ و محفظه کاربید تنگستن.....	۳۴
شکل ۴-۲: تصاویر آسیاب افقی غلتان.....	۳۵
شکل ۵-۲: تصاویر آسیاب سیاره ای.....	۳۶
شکل ۶-۲: مراحل سنتز نانوذرات به روش سل-ژل.....	۳۸
شکل ۷-۲: تصاویر شماتیک فرآیند سل-ژل.....	۳۸
شکل ۸-۲: فرآیند هیدرولیز در روش سل-ژل.....	۳۹
شکل ۹-۲: واکنش تراکم در فرآیند سل-ژل.....	۴۰
شکل ۱۰-۲: محدوده امواج صوتی.....	۴۲
شکل ۱۱-۲: نمودار مراحل تشکیل حباب.....	۴۴
شکل ۱۲-۲: شماتیک فرآیند سونوشیمیایی.....	۴۵
شکل ۱۳-۲: تصویری از آبکاری نقره.....	۴۹
شکل ۱۴-۲: تصویر شماتیک فرآیند اکسایش - کاهش.....	۵۰
شکل ۱۵-۲: لایه اکسیدی از نوع سدی.....	۵۱
شکل ۱۶-۲: لایه اکسیدی از نوع متخلخل.....	۵۲
شکل ۱۷-۲: تصویر شماتیک دستگاه پلاسمای RF.....	۵۳
شکل ۱۸-۲: تصویری از یک دستگاه اتوکلاو.....	۵۵
شکل ۱۹-۲: تاثیر فرآیند هیدروترمال بر انجام واکنش.....	۵۵

- شکل ۲-۲۰: تشکیل مایسل توسط سورفکتانت..... ۵۶
- شکل ۲-۲۱: تصویر شماتیک استفاده از قالب ب: تصاویر SEM استفاده از قالب..... ۵۸
- شکل ۲-۲۲: تصویر شماتیک فرآیند CVD..... ۵۹
- شکل ۲-۲۳: مراحل انجام فرآیند CVD..... ۵۹
- شکل ۲-۲۴: تصویر شماتیک لیزر پالسی الف: نمونه جامد، ب: نمونه مایع..... ۶۱
- شکل ۲-۲۵: مراحل احتراق محلول و تشکیل نانوذرات..... ۶۲
- شکل ۲-۲۶: نمونه ای از سنتز نانوذرات نقره به روش سنتز سبز..... ۶۴
- شکل ۲-۲۷: تصاویر SEM الف: نانومیله ب: نانوالیاف ج: نانولوله..... ۶۴
- شکل ۲-۲۸: مقایسه ساختار مواد کریستال، پلی کریستال و آمورف..... ۶۵
- شکل ۲-۲۹: دستگاه شماتیک رسوبدهی الکتروشیمیایی..... ۶۷
- شکل ۲-۳۰: تصویر شماتیک رسوبدهی الکتروفوریتیک..... ۶۷
- شکل ۲-۳۱: تصویر شماتیک دستگاه تخلیه قوس الکتریکی..... ۷۰
- شکل ۲-۳۲: تصویر شماتیک دستگاه سایش لیزری..... ۷۲
- شکل ۲-۳۳: قالب آلومینیوم اکسید آندی در سنتز نانوالیاف..... ۷۴
- شکل ۲-۳۴: فرآیند الکترورسی و تصویر SEM نانوالیاف..... ۷۵
- شکل ۲-۳۵: دسته‌بندی نانومواد دوبعدی..... ۷۶
- شکل ۲-۳۶: مکانیزم روش لیتوگرافی..... ۷۹
- شکل ۲-۳۷: نمودار تنش - کرنش..... ۸۱
- شکل ۲-۳۸: روش های تغییر شکل پلاستیک شدید..... ۸۲
- شکل ۲-۳۹: تصویر شماتیک فرآیند پرس در کانال زاویه دار..... ۸۴
- شکل ۲-۴۰: تصویر شماتیک فورج چند جهته..... ۸۵
- شکل ۲-۴۱: تصویر شماتیک فشردن تناوبی..... ۸۶
- شکل ۲-۴۲: تصویر شماتیک و مراحل فرآیند ARB..... ۸۷
- شکل ۲-۴۳: تصویر شماتیک کنگره‌دار کردن و صاف کردن متوالی..... ۸۸
- شکل ۲-۴۴: طرح‌واره سیستم لایه نشانی کندوپاش..... ۹۰
- شکل ۲-۴۵: تصویر دستگاه اسپراترینگ..... ۹۱

- شکل ۲-۴۶: تشکیل گرافن با استفاده از AFM..... ۹۳
- شکل ۲-۴۷: تشکیل گرافن الف: از گرافیت ب: از متان..... ۹۵
- شکل ۲-۴۸: تصویر شماتیک امولسیون پایه آبی و پایه روغنی..... ۹۶
- شکل ۲-۴۹: شماتیک امولسیونسازی با دستگاه التراسونیک..... ۹۸
- شکل ۲-۵۰: تصاویر شماتیک دستگاه همگنساز با فشار بالا..... ۹۹
- شکل ۲-۵۱: تصویر شماتیک دستگاه میکروسیالاساز..... ۱۰۰
- شکل ۳-۱: پراش پرتو x توسط یک بلور..... ۱۰۴
- شکل ۳-۲: شمای کلی عملیات انجام گرفته در XRD..... ۱۰۴
- شکل ۳-۳: نمونه اطلاعات ثبت شده از یک پراش..... ۱۰۵
- شکل ۳-۴: شماتیک کلی فیزیک XRF و اساس کار دستگاه فلورسانس..... ۱۰۸
- شکل ۳-۵: نمایی از طیف سنجی پرتو ایکس سرب..... ۱۰۹
- شکل ۳-۶: اصول XPS و مکانیزم تولید فوتوالکترون در اثر تابش اشعه X..... ۱۱۳
- شکل ۳-۷: طیف XPS فویل آلومینیومی اکسید شده..... ۱۱۴
- شکل ۳-۸: نمونه اطلاعات ثبت شده از یک طیف FTIR..... ۱۱۷
- شکل ۳-۹: نمونه اطلاعات ثبت شده از یک طیف رامان مربوط به گرافن..... ۱۲۲
- شکل ۳-۱۰: اجزاء کلی میکروسکوپ نیروی اتمی و عملکرد آنها..... ۱۲۴
- شکل ۳-۱۱: منحنی تابعیت نیروی وارد بر سوزن از فاصله سوزن از سطح..... ۱۲۵
- شکل ۳-۱۲: ساختار هندسه سه بعدی سطح قسمتی از یک مدار مجتمع..... ۱۲۶
- شکل ۳-۱۳: ساختار هندسه سه بعدی حافظه CD تهیه شده توسط AFM..... ۱۲۶
- شکل ۳-۱۴: نیروهای وارد بر تیرک در فاصله های مختلف از سطح نمونه..... ۱۲۷
- شکل ۳-۱۵: مقایسه نمادین بین حالت تماسی و حالت غیر تماسی..... ۱۲۸
- شکل ۳-۱۶: نمونه ای از تیرک های بازو مثلثی و نمونه ای از تیرک های تخته گونه..... ۱۳۲
- شکل ۳-۱۷: شکل های سوزن شامل نوک تیز، نوک T، نوک کروی و نوک تخت..... ۱۳۲
- شکل ۳-۱۸: مقایسه بین سوزن های نوک تیز و T شکل..... ۱۳۳
- شکل ۳-۱۹: نمایش نمادین اجزای اصلی و اصول عملکرد دستگاه STM..... ۱۳۴
- شکل ۳-۲۰: مسیر سوزن در مد جریان ثابت..... ۱۳۵

- شکل ۳-۲۱: ساختار اتمی سیلیکون و ساختار اتمی یک نانو تیوپ تک جداره ۱۳۶
- شکل ۳-۲۲: مسیر سوزن در مد ارتفاع ثابت ۱۳۷
- شکل ۳-۲۳: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ۱۳۸
- شکل ۳-۲۴: تصاویر گرفته شده توسط SEM ۱۳۸
- شکل ۳-۲۵: اجزای دستگاه SEM ۱۴۰
- شکل ۳-۲۶: شماتیک لنزهای دستگاه SEM ۱۴۱
- شکل ۳-۲۷: سیگنال‌های دریافتی از نمونه در اثر برخورد باریکه الکترونی ۱۴۲
- شکل ۳-۲۸: الکترون ثانویه ۱۴۳
- شکل ۳-۲۹: اثر لبه‌ها در سهولت خروج الکترون‌های ثانویه از سطح ۱۴۳
- شکل ۳-۳۰: الکترون برگشتی ۱۴۴
- شکل ۳-۳۱: نمایی از الکترون‌های ثانویه نوع ۱، ۲، ۳ و الکترون‌های برگشتی ۱۴۴
- شکل ۳-۳۲: نمایش خروج الکترون اوژه از سطوح انرژی یک اتم ۱۴۵
- شکل ۳-۳۳: تصویر جا نمونه‌ای و حالات مختلف حرکت آن ۱۴۸
- شکل ۳-۳۴: آماده سازی سطح نمونه ۱۴۹
- شکل ۳-۳۵: پوشش‌دهی به روش تخلیه پلاسمایی گاز ۱۵۰
- شکل ۳-۳۶: آشکارساز Everhart-Thornley ۱۵۲
- شکل ۳-۳۷: آشکارساز کاتدولومینسانس ۱۵۳
- شکل ۳-۳۸: میکروسکوپ الکترونی عبوری ۱۵۵
- شکل ۳-۳۹: تصاویر گرفته شده توسط TEM ۱۵۶
- شکل ۳-۴۰: شماتیک فیلامنت تنگستن ۱۵۸
- شکل ۳-۴۱: تفنگ الکترونی گسیل میدانی ۱۵۹
- شکل ۳-۴۲: تصویر عدسی‌های مغناطیسی ۱۶۱
- شکل ۳-۴۳: اپتیک عدسی شیئی و اولین عدسی میانی ۱۶۴
- شکل ۳-۴۴: تصاویر زمینه روشن ۱۶۷
- شکل ۳-۴۵: تصاویر زمینه تاریک و زمینه روشن ۱۶۹
- شکل ۳-۴۶: صفحه ضخیم و ناصاف، نازک‌تر و صاف‌تر شده و نهایتاً سوراخ شده ۱۷۱

- شکل ۳-۴۷: شبکه توری ساده، شبکه یابنده و شبکه شکاف دار برای نمونه های بزرگ..... ۱۷۱
- شکل ۳-۴۸: شماتیک سایش یونی و اتمی..... ۱۷۳
- شکل ۳-۴۹: شماتیک فرایند آنالیز حرارتی..... ۱۷۶
- شکل ۳-۵۰: نمودار آنالیز حرارتی TGA..... ۱۷۷
- شکل ۳-۵۱: نمودار مشتق توزین حرارتی DTG..... ۱۷۹
- شکل ۳-۵۲: منحنی دیلاتومتری یک ترکیب پلیمری..... ۱۸۰
- شکل ۳-۵۳: تجزیه حرارتی کائولن..... ۱۸۲
- شکل ۳-۵۴: آنالیز DLS مربوط به نمونه بیوپلیمر کیتوسان..... ۱۸۷
- شکل ۳-۵۵: طیف آنالیز UV-Vis مربوط به نمونه متیلن بلو..... ۱۹۰
- شکل ۳-۵۶: ایزوترم جذب و واجذب نمونه چهارچوب فلز- آلی..... ۱۹۲
- جدول ۳-۱: آمار توصیفی مربوط به نمونه بیوپلیمر کیتوسان..... ۱۸۷
- نمودار ۲-۱: انواع روش های سنتز نانو مواد..... ۲۹



میشگفتار

فناوری نانو به عنوان یکی از نوآورانه‌ترین و پرکاربردترین فناوری‌های عصر حاضر شناخته می‌شود که تأثیرات شگرفی در حوزه‌های مختلف علمی، صنعتی و زندگی روزمره به جا گذاشته است. با توانایی تغییر خواص مواد در ابعاد نانومتری، این فناوری امکان دستیابی به خواصی مانند افزایش استحکام، بهبود خواص الکتریکی و مغناطیسی، و بهبود واکنش‌های شیمیایی را فراهم کرده است. از همین رو، شناخت دقیق روش‌های ساخت و شناسایی نانومواد از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که این مواد، اساس بسیاری از دستاوردهای علمی و فناوری نوین را تشکیل می‌دهند.

کتاب حاضر با عنوان "روش‌های ساخت و شناسایی نانومواد" به هدف ارائه مرجعی جامع و کاربردی برای دانشجویان، پژوهشگران و فعالان حوزه فناوری نانو نگاشته شده است. در این کتاب، ابتدا به معرفی مفاهیم بنیادین نانوفناوری و تاریخچه آن پرداخته می‌شود تا خواننده درک

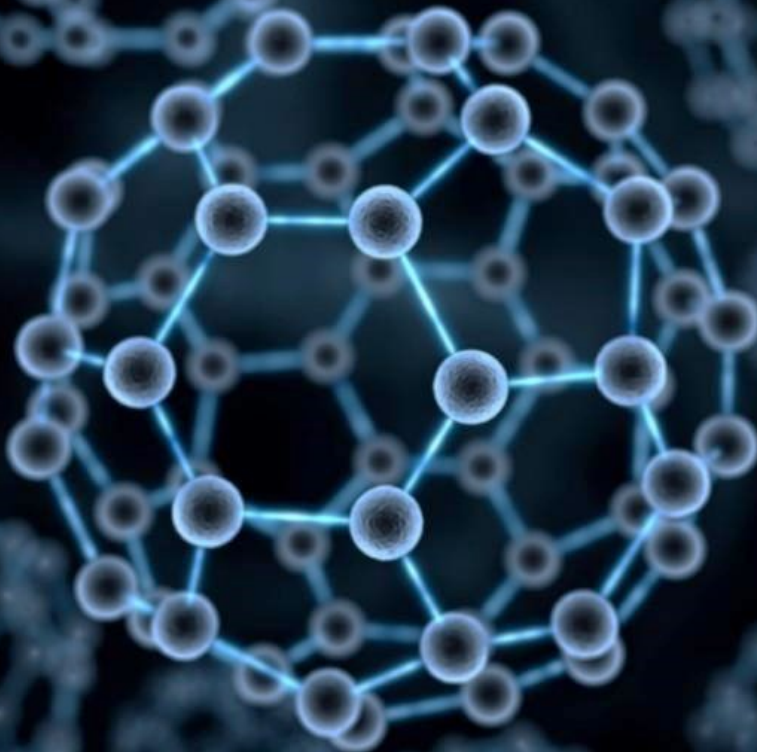
بهتری از مسیر تکامل این فناوری داشته باشد. سپس، روش های مختلف تولید نانوذرات که یکی از بخش های مهم و اساسی این علم است، مورد بررسی قرار می گیرد. این روش ها به دو دسته اصلی روش های بالا به پایین و روش های پایین به بالا تقسیم می شوند که هر یک از این روش ها بر مبنای اصول علمی و فنی خاصی استوارند و در کاربردهای مختلف، مورد استفاده قرار می گیرند.

در ادامه، به روش های شناسایی نانوذرات پرداخته شده است. با توجه به ابعاد بسیار کوچک نانوذرات، شناسایی و تحلیل دقیق ویژگی های آنها نیازمند ابزارهای پیشرفته و روش های میکروسکوپی مدرنی است که در این بخش به تفصیل معرفی و تشریح شده اند. ابزارهایی مانند میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از جمله ابزارهای کلیدی برای بررسی ساختار، اندازه و ویژگی های نانوذرات محسوب می شوند.

این کتاب با ارائه اطلاعاتی جامع و عملی درباره ی روش های تولید و شناسایی نانومواد، می تواند به عنوان یک منبع ارزشمند در مسیر تحقیقات و توسعه فناوری های نوین در این حوزه مفید باشد. امید است که این اثر، گامی مؤثر در راستای توسعه دانش نانوفناوری و کاربردهای آن بردارد و برای خوانندگان خود سودمند و الهام بخش باشد.

جواد ملکوتی خواه و همکاران

پاییز ۱۴۰۴



۱. اصل اول

معرفی به نانو

مقدمه

نانو علمی است که به بررسی ویژگی‌های نانومواد، فرآیند تولید آن‌ها و کاربردها در بهبود خواص مواد می‌پردازد. دلیل این موضوع آن است که بسیاری از ویژگی‌های مواد در ابعاد نانومتری با خواص آن‌ها در مقیاس ماکروسکوپی^۱ متفاوت است. فناوری نانو امکان کنترل دقیق ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و نوری مواد را در سطح اتمی فراهم می‌کند.

هرچند که علم نانو به شکل امروزی نسبتاً جدید به نظر می‌رسد، اما ریشه‌های آن به صدها سال پیش بازمی‌گردد. برای مثال، شیمیدانان در گذشته از روش‌هایی بهره می‌گرفتند که

^۱ ماکروسکوپی عموماً برای توصیف اشیاء فیزیکی قابل مشاهده و اندازه‌گیری توسط چشم غیر مسلح بکار می‌رود. مقیاس ماکروسکوپی معمولاً در برابر مقیاس میکروسکوپی (ریزمقیاس) مطرح می‌شود که به اشیاء دارای ابعاد هندسی ریز می‌پردازد.

شباهتهایی با فناوری های نانو امروزی دارند. نمونه هایی مانند شیشه های رنگارنگ کلیساهای قرون وسطی یا شمشیرهایی که در کاوش های باستان شناسی در سرزمین های اسلامی کشف شده اند، نشان می دهند که انسان از دیرباز با استفاده از برخی تکنیک های مشابه فناوری نانو، به بهبود فرایندها و ساخت ابزارهای باکیفیت تر پرداخته است. با این حال، به دلیل محدودیت فناوری در گذشته و عدم دسترسی به ابزارهایی مانند میکروسکوپ های نیروی اتمی و تونلی پیمایشی، این دانش به طور مشخص تعریف نشده بود.

تعریف فناوری نانو

فناوری نانو یک حوزه میان رشته ای است که در علوم کاربردی گوناگونی مانند فیزیک، مهندسی مواد، الکترونیک و سایر حوزه ها نفوذ کرده است. این فناوری به تنهایی یک علم مستقل محسوب نمی شود، بلکه به عنوان ابزاری برای کاربردی کردن علوم مختلف عمل می کند. فناوری نانو را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

- فناوری نانو شامل تحقیق و مطالعه ویژگی ها و خواص مواد در ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است.
- با استفاده از این فناوری، می توان ساختارهای نانویی ایجاد کرد که ویژگی های آن ها با ساختارهای ماکروسکوپی همان مواد تفاوت دارند.
- همچنین، از طریق کنترل ویژگی ها در مقیاس نانومتری، می توان تغییرات قابل توجهی در رفتار اتم ها ایجاد کرد.

در ابعاد نانومتری، مواد ممکن است خواص منحصر به فرد و غیر عادی از خود نشان دهند. برای مثال، تغییر اندازه یک ذره می تواند رنگ آن را تغییر دهد. دلیل این تغییر، نحوه بازتاب نور توسط آرایش اتم ها در مقیاس نانومتری است. به عنوان نمونه، نانوذرات طلا می توانند به رنگ قرمز تیره یا بنفش دیده شوند (که این پدیده به دلیل نوسانات پلاسمون های سطحی محلی در اثر تابش نور است)، در حالی که نقره می تواند زرد یا کهربایی به نظر برسد. در نمونه ای دیگر، فناوری نانو می تواند سطح یک ماده را افزایش دهد. این افزایش سطح، منجر به تعامل

بیشتر اتم‌ها با مواد دیگر می‌شود که به خواصی مانند افزایش مقاومت، رسانایی بیشتر و دوام بالاتر مواد نانومتری نسبت به همتایان ماکروسکوپی آن‌ها منجر می‌گردد. به منظور درک دقیق‌تر مقیاس نانو، می‌توان به مثال‌های ملموسی اشاره کرد که ابعاد و ویژگی‌های این فناوری را به‌وضوح نشان می‌دهند.

- طول پیوند کربن-کربن معمولی، یا فاصله بین این اتم‌ها در یک مولکول، در محدوده ۰/۱۲ - ۰/۱۵ نانومتر است.
 - قطر دو مارپیچ DNA حدود ۲ نانومتر است.
 - کوچک‌ترین اشکال حیات سلولی، باکتری‌های جنس مایکوپلاسما، حدود ۲۰۰ نانومتر طول دارند.
- به منظور درک بهتر مفاهیم نانو و مطالب ذکر شده در این کتاب، تعاریف زیر برای اصطلاحات کلی پیشنهاد شده است:
- مقیاس نانو: دارای یک یا چند بعد در حد ۱۰۰ نانومتر یا کمتر.
 - علم نانو: مطالعه پدیده‌ها و دستکاری مواد در مقیاس اتمی، مولکولی و ماکرومولکولی، که در آن خواص به‌طور قابل توجهی با مقیاس بزرگتر متفاوت است.
 - نانوتکنولوژی: طراحی، شناسایی، تولید و کاربرد ساختارها، دستگاه‌ها و سیستم‌ها با کنترل شکل و اندازه در مقیاس نانو.
 - نانومواد: موادی با یک یا چند بعد خارجی یا ساختار داخلی که می‌تواند ویژگی‌های جدیدی را در مقایسه با مواد مشابه بدون ویژگی‌های نانومقیاس نشان دهد.
 - نانوذرات: ذرات با یک یا چند بعد در مقیاس نانو (توجه: در گزارش حاضر نانوذرات دارای دو یا چند بعد در مقیاس نانو در نظر گرفته شده‌اند).
 - نانوکامپوزیت: کامپوزیتی که در آن حداقل یکی از فازها دارای حداقل یک بعد در مقیاس نانو باشد.

- نانوساختار: داشتن ساختار در مقیاس نانو.

فناوری نانو با قابلیت های متنوع خود پتانسیل ایجاد تأثیرات چشمگیری بر جامعه دارد. صنایع مختلفی از جمله اطلاعات و ارتباطات (به ویژه در حوزه های الکترونیک و الکترونیک نوری)، فناوری غذا، انرژی، و محصولات پزشکی تحت تأثیر این فناوری قرار گرفته اند. در بخش پزشکی، نانوپزشکی و بیونانوتکنولوژی به طور خاص مورد توجه قرار گرفته اند و کاربردهای متنوعی در داروسازی، سیستم های تحویل دارو، فناوری های تشخیصی، و پزشکی پیشرفته دارند. علاوه بر این، محصولات مبتنی بر فناوری نانو می توانند راه حل های نوآورانه ای برای کاهش آلودگی محیط زیست ارائه دهند.

بررسی روش های سنتز مواد نانومتری و شناسایی ویژگی های منحصر به فرد آن ها، گامی کلیدی در جهت بهره برداری از این مواد در صنایع مختلف است. در این راستا، این کتاب به منظور دستیابی آسان تر و سریع تر به روش های سنتز ترکیبات نانومتری، روش های موجود را بر اساس ابعاد نانوساختارها دسته بندی کرده است. برای شروع، ابتدا تقسیم بندی نانوساختارها بر اساس ابعاد آن ها ارائه شده است تا مخاطبان با اصول پایه آشنا شوند.

تقسیم بندی نانوساختارها بر اساس ابعاد

تمام اجسام در جهان از سه بعد اصلی تشکیل شده اند. زمانی که حداقل یکی از این ابعاد در محدوده نانومتری (بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) قرار گیرد، آن ماده به عنوان یک ماده نانوساختار شناخته می شود. در این میان، ابعادی که در مقیاس نانو نیستند، به عنوان "بعد آزاد" شناخته می شوند، زیرا محدودیتی در اندازه ندارند. نانومواد بر اساس تعداد ابعاد آزادی که دارند، طبقه بندی می شوند.

نانومواد صفر بعدی (D۰)

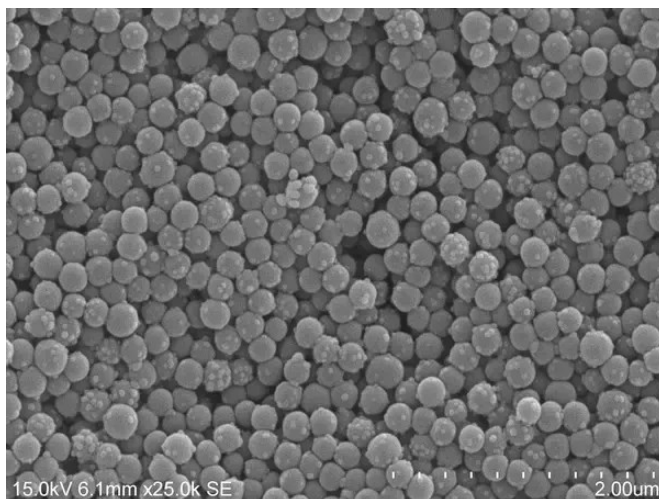
موادی که در هر سه بعد اندازه‌ای در مقیاس نانومتری دارند و هیچ بعد آزادی ندارند، نانومواد صفر بعدی نامیده می‌شوند. این دسته از مواد، که گاهی به آن‌ها نانوذرات نیز گفته می‌شود، ویژگی‌هایشان تحت تأثیر اندازه و جنس ذرات است.

در شکل (۱-۱)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوساختارهای صفر بعدی نشان داده شده است. نانوذرات بسته به نوع کاربردشان، می‌توانند اشکال مختلفی مانند کروی، بیضوی، مکعبی، منشوری یا ستونی داشته باشند. این ذرات ممکن است از یک ماده یا ترکیبی از چند ماده تشکیل شده باشند و به صورت خالص یا مخلوط وجود داشته باشند. کاربردهای نانوذرات:

- صنایع خودروسازی: ساخت بدنه‌های ضد خش، شیشه‌های ضد بخار و لاستیک‌های مقاوم.
- پزشکی: تولید داروهای نوین و ابزارهای تشخیصی پیشرفته.
- محیط‌زیست: تصفیه آب و فاضلاب.
- الکترونیک و صنایع نظامی: تولید تجهیزات پیشرفته و مقاوم.

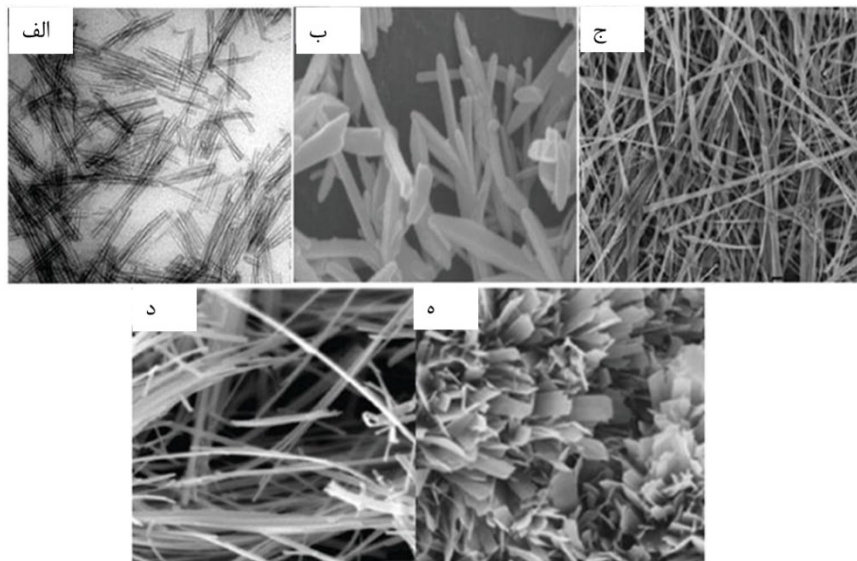
نانومواد تک بعدی (۱D)

نانومواد تک بعدی دارای دو بعد در مقیاس نانو و یک بعد آزاد هستند. نمونه‌هایی از این دسته شامل نانوسیم‌ها، نانومیله‌ها، نانولوله‌ها و نانوالیاف می‌شود. این مواد به دلیل خواص ویژه مکانیکی، الکتریکی و شیمیایی‌شان کاربردهای گسترده‌ای دارند. در شکل (۱-۲)، نمونه‌هایی از نانوساختارهای تک بعدی ارائه شده است که نمایانگر تنوع و قابلیت‌های این مواد در حوزه‌های مختلف صنعتی هستند.



شکل ۱-۱: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نانوساختار صفربعدی

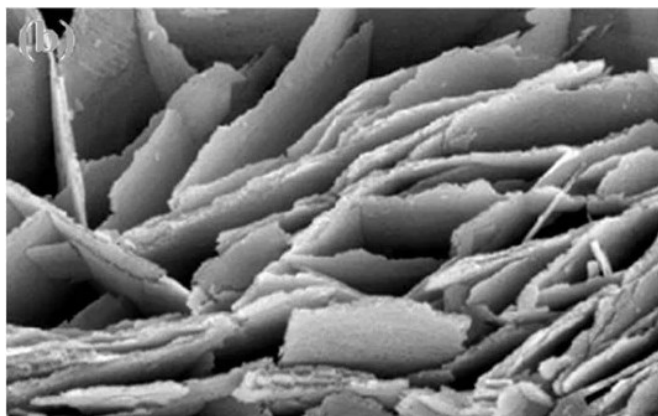
عوامل تاثیرگذار بر خواص نانوساختارهای تک بعدی عبارتند از جنس و نسبت طول به قطر. مهم ترین ویژگی نانوساختارهای تک بعدی فلزی هدایت الکتریکی آنها در راستای محور سیم است. نانوسیم ها کاربردهای زیادی در بخش های مختلف مانند ساخت رایانه های بسیار کوچک با سرعت بسیار بالا، ساخت لیزرهای بسیار کوچک، تشخیص بیماری ها، حافظه های مغناطیسی و... دارند. همانند نانو مواد تک بعدی، نانوسیم ها نیز می توانند به صورت خالص و یا ترکیبی از چند نوع ماده مختلف باشند.



شکل ۱-۲: مورفولوژی های مختلف نانوساختارهای تک بعدی TiO₂ سنتز شده به روش هیدروترمال: (الف) نانولوله، (ب) نانومیل، (ج) نانو کمربند، (د) نانوسیم، و (ه) نانوصفحات.

نانومواد دو بعدی (۲D)

نانومواد دو بعدی دارای دو بعد آزاد و یک بعد در مقیاس نانومتری هستند. این دسته از مواد معمولاً به شکل لایه های نازک یا پوشش های سطحی تولید می شوند. در شکل (۱-۳)، نمونه ای از نانوساختار دو بعدی با عنوان نانوپوشش ZnO نشان داده شده است. به همین دلیل، این مواد گاهی با نام "نانوپوشش" نیز شناخته می شوند.



شکل ۱-۳: نانو پوشش ZnO

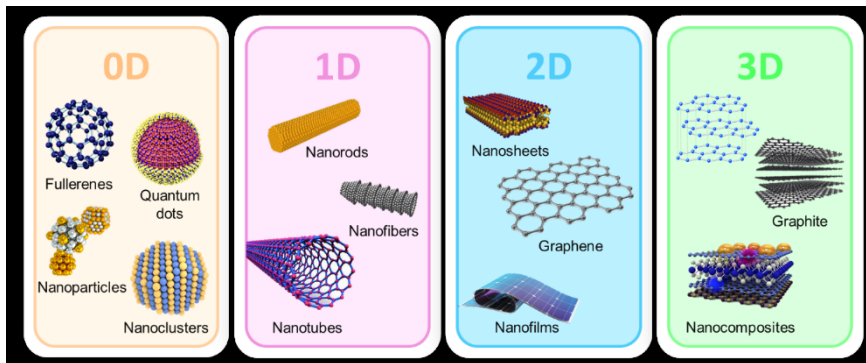
عوامل مؤثر بر ویژگی های نانوپوشش ها (نانومواد دو بعدی) شامل جنس و ضخامت آنها هستند. به عنوان نمونه، سلفون هایی که برای نگهداری مواد غذایی استفاده می شوند، نوعی پوشش محسوب می گردند. اگر ضخامت این سلفون ها به ابعاد نانومتری برسد، به آنها نانوپوشش گفته می شود. نانوپوشش ها لایه هایی هستند که ضخامت آنها بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر است و به صورت پوشش بر روی مواد دیگر اعمال می شوند. این لایه ها قادرند خواص و ویژگی های ماده زیرین را تغییر دهند. همانند نانومواد صفر و تک بعدی، نانوپوشش ها نیز می توانند از یک ماده خالص یا ترکیبی از چند ماده مختلف ساخته شوند.

نانومواد سه بعدی (۳D)

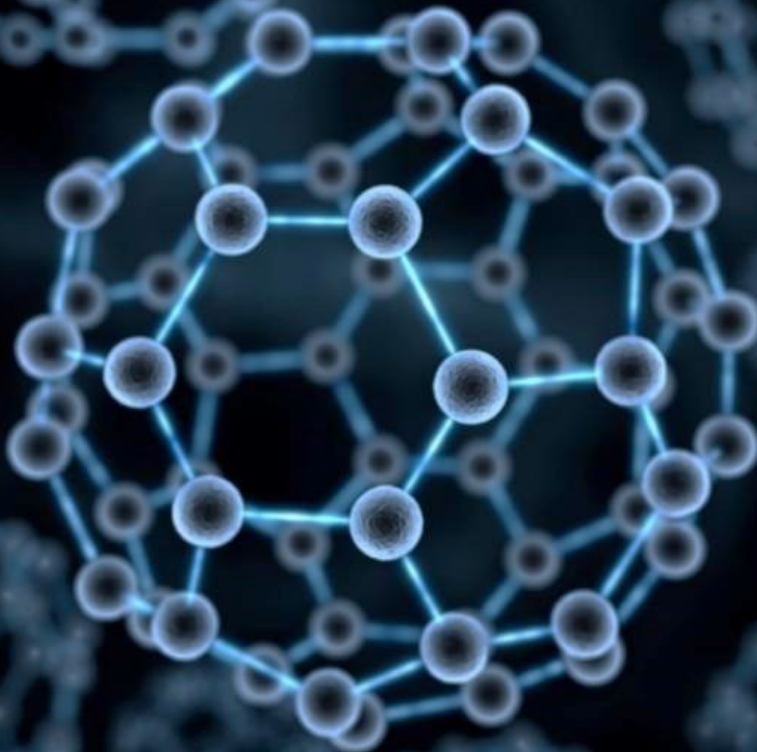
بنابر تعریفی که ارائه شده است، موادی که هر سه بعد آنها در مقیاس آزاد قرار دارند، نانومواد سه بعدی نامیده می شوند. در این نوع مواد، هرچند ابعاد کلی در مقیاس ماکرو هستند، اما اجزای سازنده آنها (مانند دانه های بلوری یا ذرات تقویت کننده) در مقیاس نانو قرار دارند. بنابراین، این مواد از نظر ساختاری، نانو ساختار محسوب می شوند. با این حال، این تعریف با تعریف نانومواد نانو ساختار تناقض دارد، زیرا هیچ یک از سه بعد این مواد در مقیاس نانو نیست. این گروه شامل نانوکامپوزیت ها (مواد مرکبی که از چندین جزء تشکیل شده اند) و مواد حجیم نانو ساختار (یا مواد توده ای نانو ساختار) هستند.

مواد حجیم نانو ساختار به موادی گفته می شود که اندازه واحدهای سازنده مجزای آنها حداقل در یک بعد، کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد. یکی از روش های بهبود خواص مواد، افزودن ترکیبات دیگر به آنها است. در این روش، ماده نهایی تولید شده را کامپوزیت یا ماده مرکب می نامند. به عنوان مثال، پلاستیک به طور طبیعی خاصیت رسانایی الکتریکی ندارد، اما با افزودن ذرات فلزی رسانا، می توان ماده ای با خاصیت رسانایی تولید کرد. در این حالت، ماده مرکب ممکن است از بیش از دو جزء تشکیل شده باشد که هر یک از اجزای اضافه شده، توانایی تقویت یکی از خواص ماده را دارد.

چنانچه حداقل یکی از اجزای این کامپوزیت، نانوساختار باشد، به ماده تولید شده نانوکامپوزیت گفته می‌شود. در شکل (۱-۴)، مقایسه‌ای از چهار نوع نانوماده نانوساختار ارائه شده است که تفاوت‌ها و ویژگی‌های آن‌ها را به تصویر می‌کشد.



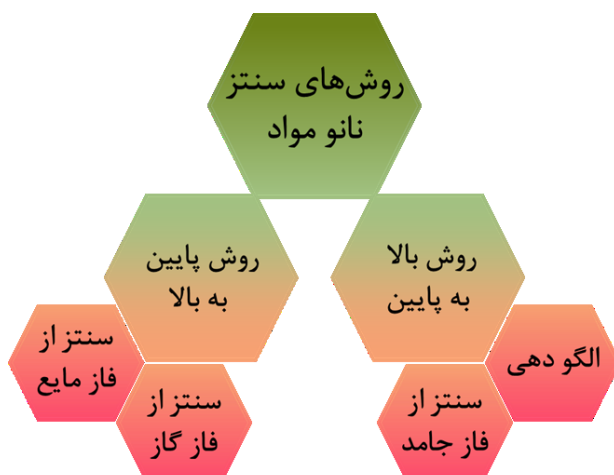
شکل ۱-۴: مقایسه انواع نانوساختارها



فصل دوم روش‌های تولید نانوساختار

مقدمه

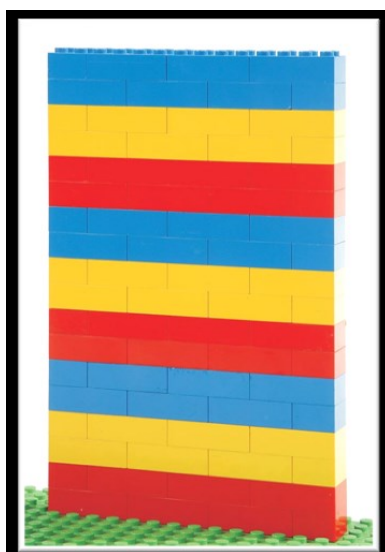
روش‌های تولید مواد نانوساختار بسیار متنوع و گسترده هستند. به طور کلی، این روش‌ها به دو دسته اصلی بالا به پایین و پایین به بالا تقسیم‌بندی می‌شوند. سایر روش‌های تولید نیز به عنوان زیرمجموعه‌ای از این دو دسته در نظر گرفته می‌شوند که می‌توان آن‌ها را در نمودار (۱-۲) مشاهده کرد. در روش بالا به پایین، ساخت نانوساختارها با کاهش ابعاد مواد موجود به مقیاس نانو انجام می‌گیرد، در حالی که در روش پایین به بالا، ساختارهای نانومتری با استفاده از کنار هم قرار دادن واحدهای کوچک‌تر، مانند اتم‌ها یا مولکول‌ها، شکل می‌گیرند. در ادامه، تمامی این روش‌ها با جزئیات بیشتری بررسی خواهند شد.



شکل ۲-۱: انواع روش‌های سنتز نانو مواد

روش پایین به بالا

روش پایین به بالا یکی از اهداف اصلی فناوری نانو را دنبال می‌کند، یعنی ایجاد ساختارهایی که در آن‌ها آرایش مولکول‌ها به صورت دقیق و از پیش تعیین شده طراحی شده باشد. اما چگونه می‌توان چنین ساختارهایی را ایجاد کرد؟ فرض کنید می‌خواهید با تعدادی آجر خانه سازی، «ساختاری» مانند شکل (۲-۲) را بسازید.



شکل ۲-۲: شماتیک روش پایین به بالا

برای این منظور، باید هر آجر به صورت جداگانه در جای مناسب خود قرار گیرد تا در نهایت، ساختار نهایی شکل بگیرد. اگر این مثال را به ساختارهای نانومتری تعمیم دهیم، می توانیم مفهوم روش های پایین به بالا را بهتر درک کنیم. در این روش، هر یک از آجرها به عنوان یک اتم در نظر گرفته می شود که با کنار هم قرار دادن آن ها، ساختارهایی با ابعاد و آرایش مختلف ایجاد می گردد.

روش های پایین به بالا به این صورت عمل می کنند که اتم ها در شرایط خاص گرد هم می آیند و از ابتدا، به صورت اتم به اتم، ساختار نهایی را شکل می دهند. در بسیاری از این روش ها، فرآیند رشد نانوذرات با پدیده هایی مانند خودآرایی (self-assembly) و خودسازمان دهی (self-organization) همراه است، که در آن ها اتم ها یا مولکول ها تحت تأثیر نیروهای فیزیکی و شیمیایی، ساختارهای منظم و بلوری تشکیل می دهند.

اکثر این روش ها از مکانیزم هسته زایی و رشد پیروی می کنند، به این معنا که ابتدا یک هسته کوچک تشکیل می شود و سپس سایر بخش های ساختار از آن نشأت گرفته و رشد می کنند. اگرچه برخی از روش های پایین به بالا برای تولید نانوذرات به صورت تجاری مورد استفاده قرار می گیرند، بازده آن ها نسبت به روش های بالا به پایین معمولاً کمتر است. این روش ها بیشتر برای کاربردهای خاص، یا به عنوان راه حلی برای یک مشکل خاص به کار می روند.

با وجود این محدودیت ها، فرآیندهای پایین به بالا معمولاً کنترل پذیری بیشتری نسبت به روش های بالا به پایین دارند. این کنترل پذیری منجر به تولید نانومواد با کیفیت بالا، توزیع یکنواخت اندازه ذرات (تک پخش)، و خلوص بیشتر می شود. در مقایسه با روش های بالا به پایین، این دسته از روش ها تنوع بیشتری داشته و محصولات خالص تر و دقیق تری تولید می کنند.

روش بالا به پایین

در روش بالا به پایین، به جای استفاده از مواد اولیه کوچک برای ساختن ساختار دلخواه، از مواد حجیم تر یا توده ای استفاده می شود و با فرآیندهایی مانند تراشیدن، برش دادن یا شکستن،

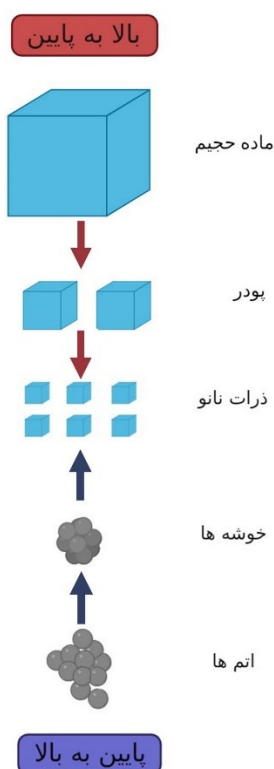
ماده به ابعاد کوچکتر تبدیل می‌گردد. در این روش، همان‌طور که در مثال ساخت بنا مشاهده شد، یک مکعب بزرگ پیش‌ساخته وجود دارد که برای دستیابی به ساختار مورد نظر، باید از آن قسمت‌هایی جدا شود. این رویکرد در علم و فناوری نانو با نام روش سنتز بالا به پایین شناخته می‌شود. برای انجام چنین فرآیندهایی معمولاً به مقدار زیادی انرژی مکانیکی، حرارتی یا شیمیایی نیاز است تا ماده به ذراتی در مقیاس نانو تبدیل شود.

روش بالا به پایین اغلب برای تولید حجم زیادی از نانوذرات استفاده می‌شود و به دلیل مقیاس‌پذیری بالا، در تولیدات صنعتی کاربرد فراوانی دارد. با این وجود، این روش در مقایسه با روش پایین به بالا، کنترل‌پذیری کمتری دارد و معمولاً ذرات تولیدشده از نظر اندازه یکنواخت نیستند، به‌طوری‌که دامنه ابعاد ذرات گسترده‌تر است. همچنین، یکی از معایب این روش تولید ضایعات زیاد است، چرا که بخش‌های اضافی ماده در حین فرآیند تراش و برش دور ریخته می‌شوند. در روش‌های بالا به پایین، احتمال ایجاد نقص‌های ساختاری (defects) و آلودگی سطحی بیشتر است.

در این روش از تکنیک‌های مختلفی استفاده می‌شود. روش‌های پیشرفته‌تر مانند لیتوگرافی و زدایش، نه تنها برای حذف مواد اضافی به کار می‌روند، بلکه امکان الگوبرداری دقیق از مواد نانویی را نیز فراهم می‌کنند. از سوی دیگر، روش‌های قدیمی‌تر مانند ساییدن، برش یا آسیاب گلوله‌ای، به‌عنوان روش‌های فیزیکی مرسوم برای خرد کردن مواد حجیم شناخته می‌شوند. در کنار این‌ها، روش لایه‌برداری نیز به‌عنوان روشی شناخته می‌شود که در مواد با ساختار لایه‌ای مثل گرافیت قابل استفاده است. در این روش می‌توان از انرژی مکانیکی، حرارتی، تابش خورشیدی یا مواد شیمیایی اسیدی برای جدا کردن لایه‌ها بهره برد.

در شکل (۲-۳)، شماتیکی از مقایسه دو روش بالا به پایین و پایین به بالا ارائه شده است. در روش بالا به پایین، ضایعات بیشتری تولید می‌شود و زمان و انرژی مصرفی نیز بالاتر است.

در مقابل، روش پایین به بالا ضایعات کمتری داشته و پیوندهای قوی تری بین ذرات ایجاد می کند که منجر به افزایش استحکام ماده نهایی می شود.



شکل ۲-۳: مقایسه روش بالا به پایین و پایین به بالا

روش های سنتز نانو ذرات (نانومواد صفر بعدی)

روش های بالا به پایین

سنتز نانومواد با استفاده از روش آسیاب مکانیکی

آسیاب مکانیکی یکی از روش های رایج و شناخته شده در سنتز نانومواد است که به عنوان نمونه ای از روش های بالا به پایین شناخته می شود. برخلاف روش های پایین به بالا که در آن ها مواد از خوشه های اتمی اولیه تشکیل می شوند، در این روش مواد از طریق خرد شدن و تغییر

شکل پلاستیکی شدید به نانوذرات تبدیل می‌شوند. در این فرایند، با استفاده از انواع مختلف آسیاب‌های مکانیکی، ذرات با اندازه‌های میکرومتری به ذرات نانومتری بسیار ریز تبدیل می‌گردند. معمولاً از آسیاب‌های گلوله‌ای برای انجام این فرآیند استفاده می‌شود، اما انواع دیگر آسیاب‌ها نیز موجود است که از نظر ظرفیت، بازدهی و تجهیزات جانبی مانند سیستم‌های گرم‌کننده یا خنک‌کننده با یکدیگر تفاوت دارند.

کیفیت و خواص نانومواد تولیدی در این روش به شدت به تجهیزات و شرایط آسیاب‌کاری بستگی دارد. یکی از مزایای این روش، سهولت اجرا و هزینه نسبتاً پایین آن در مقیاس آزمایشگاهی است، به طوری که این ویژگی باعث شده است که در بسیاری از زمینه‌ها کاربرد گسترده‌ای پیدا کند. همچنین، این روش به راحتی قابل توسعه برای تولید در مقیاس صنعتی است. با این حال، از جمله محدودیت‌های عمده این روش می‌توان به آلودگی ناشی از محیط و اتمسفر آسیاب، و همچنین متراکم شدن و تجمع ذرات در حین فرآیند آسیاب اشاره کرد. در مجموع، روش‌های مکانیکی جزو فرآیندهای تولید در حالت جامد به شمار می‌آیند.

آسیاب گلوله‌ای - ارتعاشی^۱

آسیاب گلوله‌ای - ارتعاشی یکی از انواع آسیاب‌های پرانرژی است که در آن حجم محفظه بسیار کوچک (حدود ۱۰ میلی‌لیتر) بوده و محتویات آن شامل پودر و گلوله‌ها در سه جهت عمود بر هم با سرعت بسیار بالا، تقریباً ۱۲۰۰ دور در دقیقه^۲، نوسان می‌کنند. یکی از معروف‌ترین آسیاب‌های گلوله‌ای - ارتعاشی که در تحقیقات آزمایشگاهی استفاده می‌شود، آسیاب SPEX۸۰۰۰ است. این دستگاه معمولاً ظرفیت آسیاب‌کاری ۲۰ گرم پودر را در هر دوره دارد.

آسیاب گلوله‌ای - ارتعاشی معمولاً شامل یک محفظه حاوی نمونه و گلوله است که در یک گیره قرار می‌گیرد و این مجموعه تقریباً ۱۰۰ بار در دقیقه به جلو و عقب حرکت می‌کند. در

^۱ Vibratory Ball Mill

^۲ rpm

انتهای محفظه حرکت جانبی وجود دارد که باعث برخورد ذرات پودر و گلوله ها می شود. این برخوردها در نهایت باعث آسیاب کاری و مخلوط شدن مواد می شوند. به دلیل دامنه حرکتی حدود ۵ سانتیمتر و سرعت چرخشی ۱۲۰۰ دور در دقیقه، سرعت خطی گلوله ها بالا (حدود ۵ متر بر ثانیه) و انرژی ناشی از برخورد گلوله ها بسیار زیاد است. به همین دلیل، این نوع آسیاب در دسته آسیاب های پرانرژی قرار می گیرد.

برای افزایش ظرفیت آسیاب، به طور هم زمان از دو محفظه برای آسیاب کاری پودر استفاده می شود. محفظه های این نوع آسیاب معمولاً از مواد مختلفی چون فولادهای سخت شده، اکسید آلومینیوم، کاربید تنگستن، اکسید زیرکونیوم، فولاد ضد زنگ، نیتريد سیلیکون، پلاستیک، عقیق^۱ و متاکریلیت^۲ ساخته می شوند. شکل ۲-۴ نمایی از آسیاب نوع SPEX۸۰۰۰ و محفظه کاربید تنگستن به همراه گلوله و واشر جهت آب بندی آن را نشان می دهد.



شکل ۲-۴: a - آسیاب نوع SPEX۸۰۰۰ و b - محفظه کاربید تنگستن به همراه گلوله و واشر جهت آب بندی آن

آسیاب افقی غلتان^۳

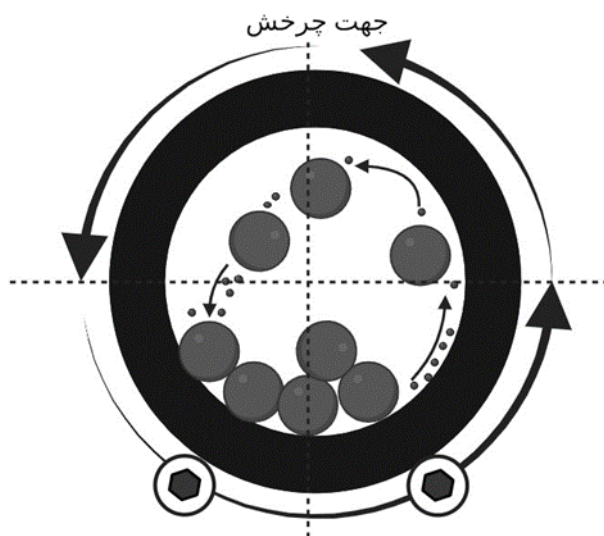
این نوع آسیاب ها بطور عمده برای آلیاژسازی مکانیکی و آسیاب پودر در حجم بالا مورد استفاده قرار می گیرند. آسیاب های صنعتی مورد استفاده در آلیاژسازی مکانیکی از نظر اندازه

^۱ Agate

^۲ Methacrylate

^۳ Tumbler Horizontal Mill

بسیار بزرگ هستند و قادر به آسیاب کردن صدها کیلوگرم پودر در هر نوبت کاری می‌باشند. ظرفیت این نوع آسیاب‌ها معمولاً بالا و در حدود ۱۲۵۰ کیلوگرم است. یکی از اصلاحات مهمی که روی این نوع آسیاب‌ها صورت گرفته، استفاده از میدان‌های مغناطیسی برای کنترل حرکت گلوله‌ها است. با تغییر فاصله میان آهنرباها و گلوله‌ها، انرژی ضربه‌ای که از برخورد گلوله‌ها با یکدیگر ایجاد می‌شود، قابل کنترل می‌باشد. براساس موقعیت آهنرباها و بزرگی میدان مغناطیسی، میزان انرژی منتقل شده به ذرات پودر نیز تغییر می‌کند. در شکل ۲-۵ تصویر آسیاب افقی غلتان مشاهده می‌شود.



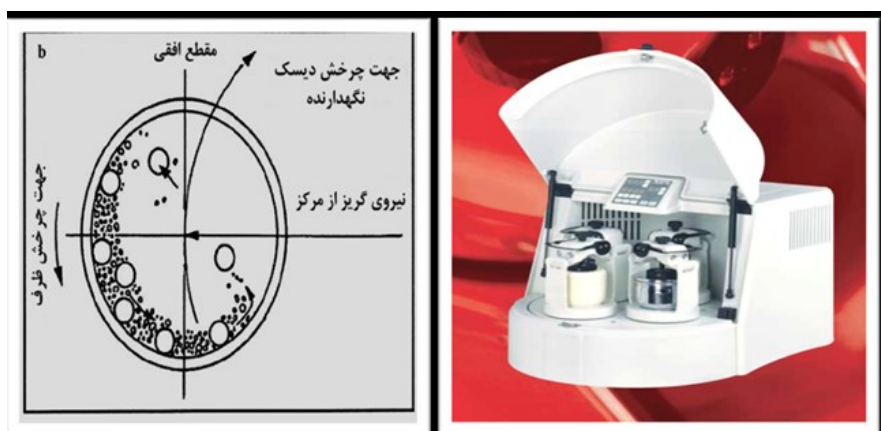
شکل ۲-۵: تصویر آسیاب افقی غلتان

آسیاب سیاره‌ای^۱

یکی دیگر از آسیاب‌های مورد استفاده در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی، آسیاب سیاره‌ای است که در آن تنها چند صد گرم پودر در یک مرحله آسیاب می‌شود و برای تحقیقات آزمایشگاهی مناسب است. حجم محفظه این نوع آسیاب بین ۴۵ تا ۵۰۰ میلی‌لیتر است. این آسیاب شامل یک صفحه دوار به همراه چهار، دو و یا یک محفظه است. صفحه دوار در یک جهت چرخیده

^۱ Planetary Mill

و محفظه بر اساس مکانیزمی در جهت خلاف حرکت صفحه دوار، حرکت دورانی انجام می دهد. چرخش محفظه و صفحه دوار به دور یک محور، باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز می شود که بزرگی این نیرو می تواند تا ۲۰ برابر شتاب جاذبه زمین برسد. گلوله و پودر به صورت متناوب روی دیواره داخلی غلتیده و ساییده می شوند. سپس با سرعت زیادی (حدود ۲۵۰rpm) از جداره محفظه جدا و دوباره به جداره روبرویی برخورد می کنند. در این حالت ذرات پودر تحت انرژی ضربه بالا به صورت مداوم جوش خورده و می شکنند. این فرآیند در شکل ۲-۶ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۶: تصاویر آسیاب سیاره ای

روش های تولید پایین به بالا

همان طور که اشاره شد، روش های پایین به بالا به گونه ای هستند که با تجمع اتم ها در شرایط خاص ساختار اتمی را از ابتدا و اتم به اتم تشکیل می دهند و شامل روش هایی همچون رسوب دهی بخار شیمیایی، رسوب بخار فیزیکی، سل-ژل، عمل آوری استوالد، و روش های هیدروترمال و... هستند که در ادامه به تشریح هر یک از این روش ها پرداخته می شود.

سنتز نانوذرات به روش سل-ژل:

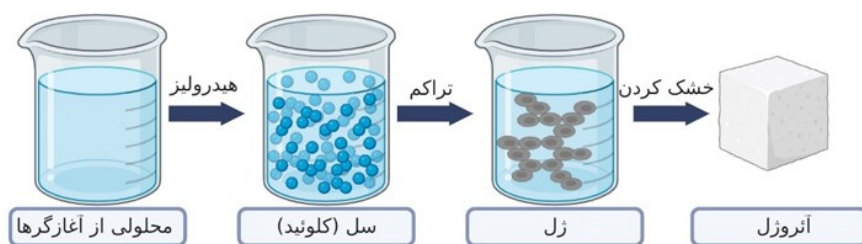
روش سل-ژل یکی از روش‌های ساده و اقتصادی است که با استفاده از آن می‌توان نانوذرات مختلف را سنتز نمود. این روش با ساخت یک سل همگن از پیش‌ماده‌ها شروع شده و سپس با تحریک شیمیایی سل به ژل تبدیل می‌شود. بعد از آن با یکی از روش‌های معمول، حلال را از ساختار ژل بیرون کشیده و آن را خشک می‌کنند. بسته به نوع روش خشک کردن، محصول به‌دست آمده مورفولوژی و خواص متفاوتی خواهد داشت. محصولات به‌دست آمده کاربردهای متنوعی در پوشش‌دهی سطوح، عایق‌کاری ساختمان، ابزارهای اپتیکی و... دارند.

فرآیند سل-ژل یک روش سنتز پایین به بالا است. در این فرآیند، محصول حاصل از تعدادی واکنش‌های شیمیایی برگشت‌ناپذیر است. در حقیقت این واکنش‌ها باعث تبدیل مولکول‌های محلول همگن اولیه به عنوان سل، به یک مولکول نامحدود، سنگین و سه‌بعدی پلیمری به عنوان ژل می‌شوند. بطور نمونه، می‌توان واکنش هیدرولیز که به‌دنبال آن واکنش تراکم رخ می‌دهد و محصول نهایی به‌دست می‌آید را به صورت زیر خلاصه کرد:

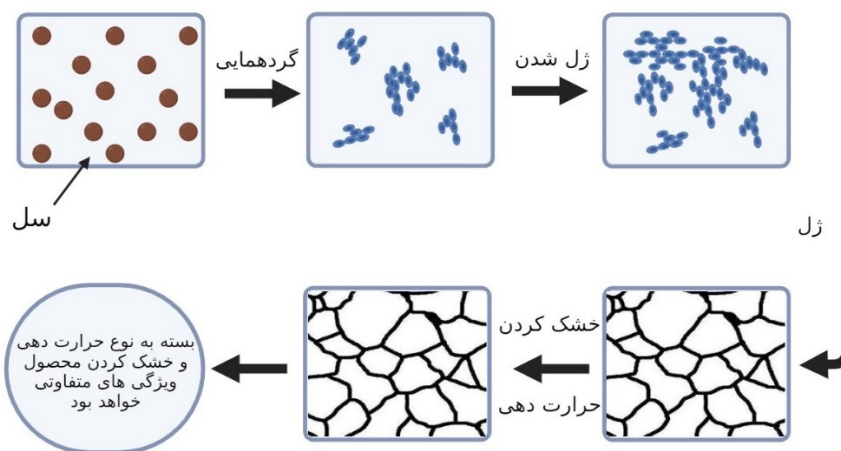
مراحل فرایند سل-ژل

۱. تهیه محلول همگن
۲. تشکیل سل
۳. تشکیل ژل
۴. خشک کردن

مراحل سنتز نانوذرات به روش سل-ژل و فرآیند سل-ژل در شکل‌های ۲-۷ و ۲-۸ به نمایش گذاشته شده‌اند.



شکل ۷-۲: مراحل سنتز نانوذرات به روش سل-ژل



شکل ۸-۲: تصاویر شماتیک فرآیند سل-ژل

تهیه محلول همگن

ابتدا یک محلول همگن شامل حلال و پیش ماده ای که محصول نهایی را شکل می دهند، تهیه می شود. برای این منظور، حلال (مانند آب، الکل، حلال های آلی یا ترکیبی از آنها) با پیش ماده ترکیب شده و حلولی همگن ایجاد می شود. گاهی برای تشکیل یک محلول کاملاً همگن و حل شدن کامل پیش ماده، از ترکیب دو حلال با نسبت های معین استفاده می شود. به عنوان مثال، برخی از پیش ماده های آلی فلزی ابتدا باید در حلال آلی قابل امتزاج با آب حل شوند و سپس محلول حاصل در آب حل گردد. در بین انواع پیش ماده ها، پیش ماده های آلکوکسیدی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند.