



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال پانزدهم، شماره‌ی ۵۸
تابستان ۱۴۰۳، صفحات ۱۲-۱

"مقاله پژوهشی"

بررسی سیستماتیک اثرات زیست محیطی انتشار گاز متان در معادن زغال سنگ

آینور ناصری*

استادیار، گروه مهندسی معدن، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
* نویسنده مسئول مکاتبات: E-mail: aynur.nasseri@gmail.com, Ay.Nasseri@iau.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶)

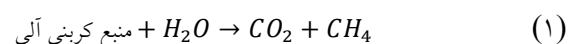
چکیده

گاز متان یکی از اصلی‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که در فرآیند استخراج و تولید زغال از معادن زغال سنگ انتشار می‌یابد. در دهه‌های اخیر، مسئله انتشار گاز متان از معادن زغال سنگ به عنوان یکی از چالش‌های مهم محیط‌زیستی مطرح شده است. این گاز به عنوان یک گاز گلخانه‌ای قوی، نقش مهمی در افزایش گرمایش زمین ایفا می‌کند و عدم کنترل انتشار آن به مشکلات جدی محیط‌زیستی و اقتصادی منجر می‌شود. همچنین، پتانسیل خودسوزی گاز متان در معادن زغال سنگ، به عنوان یک پدیده خطرناک، نیازمند بررسی و مطالعه عمیق‌تر زیست محیطی است. با توجه به اهمیت حفظ محیط زیست و کاهش گازهای گلخانه‌ای، شناخت دقیق این اثرات و اتخاذ تدابیر مناسب جهت کاهش آن‌ها ضروری است. این مقاله به بررسی اثرات زیست محیطی انتشار گاز متان در معادن زغال سنگ پرداخته و راهکارهای کاهش این اثرات را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد ارتقاء فرآیندها و استفاده از تکنولوژی‌های پاک و پایدار، می‌تواند در کاهش انتشار گاز متان از معادن زغال سنگ مؤثر باشد. بطوری که استفاده از فناوری‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و باد، به جای سوخت‌های فسیلی، و تشویق به استفاده از فناوری‌های پاک و کم‌اثر بر محیط‌زیست در فرآیندهای استخراج و تولید زغال سنگ بسیار مؤثر خواهد بود.

کلمات کلیدی: گاز متان، معادن زغال سنگ، گازهای گلخانه‌ای، اثرات زیست محیطی.

مقدمه

معادن زغال سنگ به عنوان یک منبع اساسی انرژی در بسیاری از کشورها مورد بهره‌برداری واقع می‌شوند. با این حال، یکی از مسائل مهم زیست محیطی مرتبط با این صنعت، انتشار گاز متان به عنوان یک فرآیند فراصنعتی غیرقابل اجتناب از معادن زغال سنگ است. گاز متان، که در فرآیند پایدار استخراج زغال سنگ از زمین آزاد می‌شود، تأثیرات منفی زیادی بر تغییرات اقلیم و افزایش گرمایش زمین دارد. گاز متان همراه با فرآیندهای تشکیل ذخایر زغال سنگ، طی مراحل متوالی تبدیل بی‌هوازی مواد گیاهی به زغال سنگ در دماها و فشارهای بالا در طول فرآیند کربونیزه شدن (زغال شدگی) بدون حضور اکسیژن شکل می‌گیرد. در طول فرآیند متامورفیسم، مقادیر H، C و O تغییر می‌کند بطوری که با افزایش محتوای کربن، کاهش هیدروژن و اکسیژن و ثابت ماندن محتوای نیتروژن و سولفور همراه است. طی این فرآیند متامورفیسم، آب و دی‌اکسید کربن تولید می‌شوند. در فرآیند اکسیداسیون کند، تشکیل محصولات گازی به ویژه متان و دی‌اکسید کربن طی فرماتاسیون تحریک شده توسط باکتری‌های متانوژنیک به دلیل استفاده از محتوای اکسیژن موجود در گیاهان، در شرایط بی‌هوازی در لایه‌های زیرزمینی اتفاق می‌افتد. گاز متان از این فرآیند به صورت طبیعی آزاد می‌شود. نمونه‌ای از واکنش شیمیایی این فرآیند به شکل زیر است:



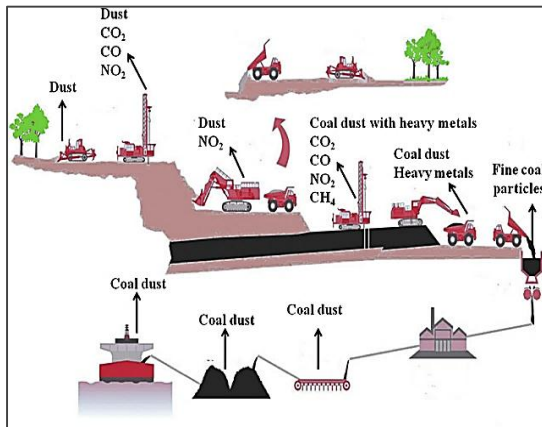
این واکنش نشان‌دهنده تجزیه مواد کربنی آلی (مانند رسته‌های گیاهی) به دو گاز دی‌اکسید کربن و

متان است و در این فرآیند باکتری‌ها از منابع زغالی و آلی موجود در لایه‌های زمین به عنوان منابع اصلی کربن خود استفاده می‌کنند. این واکنش نشان‌دهنده تجزیه یا تخریب مواد آلی طی دو مرحله مهم است. در ابتدا، گاز دی‌اکسید کربن تولید می‌شود که یکی از مراحل تخلیه انرژی از مواد آلی است. در مرحله بعد، گاز متان تولید می‌شود که به عنوان یک منبع انرژی قابل استفاده محسوب می‌شود. سپس این گاز متان از لایه‌های زغالی به سطح زمین حرکت می‌کند. این تخلیه ممکن است به صورت طبیعی از طریق کانال‌ها و فضاهای خالی در لایه‌های زغالی صورت گیرد و یا از لایه‌های زغالی به سمت سطح زمین نفوذ کند و در مواردی به صورت حباب‌های گاز در آب‌های زیرزمینی یا آب‌های سطحی آزاد شود. در برخی موارد در صورتی که میزان گاز متان تولیدی از لایه‌های زغالی به میزان قابل توجهی باشد، به عنوان یک منبع انرژی، استخراج و به منظور استفاده تجاری از این گاز، عملیات حفاری چاه‌ها و استخراج گاز متان آغاز می‌شود. لازم به ذکر است که در برخی مناطق و مواقع، این گاز متان به طور غیرمنتظره و ناگهانی از لایه‌های زغالی آزاد شده و ممکن است منجر به مشکلات ایمنی و زیست‌محیطی شود. بطوریکه انفجارهای متان در معادن زغال‌سنگ ممکن است منجر به آسیب‌ها و تلفات جانی معدنچیان شود. این حوادث ممکن است به دلیل عوامل مختلفی مانند تهویه نامناسب، اشتعال متان و نقص در تدابیر ایمنی ایجاد شود. لذا مدیریت مناسب و کنترل این فرآیندها حائز اهمیت است.

متانی که پس از استخراج زغال سنگ در جو انتشار می‌یابد، تأثیر اکولوژیک دوگانه دارد بطوری که در

کاهش اثرات گازهای گلخانه‌ای بر محیط زیست بود. که دو جهت اصلی تأثیر متان بر محیط زیرزمینی، بر ایمنی و سلامت کارگران از یک سو و تأثیر متان حاصل از معادن زغال سنگ بر گرم شدن جهانی اتمسفر را از سوی دیگر بررسی نموده است. در این معدن متان زهکشی شده در برنامه‌های تأمین انرژی جهت پوشش دادن جزئی از نیاز انرژی حرارتی اپراتورهای معدن در نظر گرفته شده است. تجزیه و تحلیل تقریباً کاملی از امکان‌سنجی فناوری‌های مدرن برای بازیابی متان از معادن زغال سنگ در سراسر جهان انجام شده است [۷]. بر این اساس، امکانات کاهش تأثیر متان بر محیط زیست از طریق بهره‌برداری از گاز متان در معادن دره جیو میسر گردیده است. از سوی دیگر، طبق گزارش جهانی درباره تغییرات آب و هوا، حدود ۱۷٪ از تأثیر کلی گرم شدن جهانی مربوط به متان است. منشأ متان اتمسفری، منابع غیر بیوژنیک و بیوژنیک می‌باشد. بیش از ۷۰٪ از کل انتشار جوی متان از منابع بیوژنیک مانند زمین‌های مرطوب، شالیزارها، دامداری، دفن پسماندها، جنگل‌ها، اقیانوس‌ها و حشرات حاصل می‌گردد. متان غیر بیوژنیک شامل انتشار از معادن سوخت‌های فسیلی، سوزاندن biomass، تجزیه پسماندها و منابع زمین‌شناسی است. از دیدگاه دیگر، منابع انتشار گاز متان همچنین می‌تواند به منابع آنتروپوژنیک و طبیعی تقسیم شوند که منابع آنتروپوژنیک شامل شالیزارها، دامداری، تجزیه و دفن پسماندها، سوزاندن بیومس و سوخت فسیلی است. متان طبیعی از منابعی مانند زمین‌های مرطوب، اقیانوس‌ها، جنگل‌ها، آتش، حشرات و منابع زمین‌شناسی [۸-۳] منتشر می‌شود. هر دو نوع منبع به افزایش غلظت جوی متان کمک می‌کنند، اما

تخریب لایه اوزون و تقویت اثر گلخانه‌ای تأثیر قابل توجهی دارد [۱]. بر اساس تحقیقات K. Patteisky [۲]، هنگام تشکیل یک متر مکعب زغال سنگ ممکن است تا ۳۵۰ متر مکعب گاز متان و تا ۲۰۰ متر مکعب دی‌اکسید کربن تشکیل شود. پیچیدگی تشکیل بسیاری از منابع مختلف و تبدیلات شیمیایی متان موجب دشواری در درک و ارزیابی سهم این گاز در گرم شدن جهانی شده است. اگرچه، به دلیل ارزش بالای پتانسیل گرمایش جهانی متان، تأثیر آن در گرمایش جهانی دارای اهمیت معنی‌دار است [۲]. متان، این گاز حاصل از استخراج زغال سنگ، به مرور زمان بعنوان اصلی‌ترین منبع خطر و موضوع نگرانی‌های اصلی در تحقیقات و در راستای حصول شرایط ایمنی بالا در معادن است. متان یک گاز گلخانه‌ای قوی، با ظرفیت گرمایش جهانی بیست و پنج برابر دی‌اکسید کربن است [۳]. آزاد شدن متان در حین فعالیت‌های معدن‌کاری زغال‌سنگ می‌تواند منجر به آلودگی هوا و خطرات انفجار گاز می‌شود. با این حال، فرصت‌هایی برای کاهش این تأثیرات محیطی وجود دارد. می‌توان متان را زهکشی و به عنوان یک منبع انرژی نوین مورد بهره‌برداری قرار داد و از انتشار فراری آن کاست و منافع اقتصادی فراهم کرد [۴]. علاوه بر این، روش‌های مؤثر بازیابی متان و تکنیک‌های کاهش سرعت انتشار متان می‌تواند به کاهش آلودگی هوا و بهبود وضعیت محیطی کمک کند [۵-۶]. فرآیند بسته شدن معادن زیرزمینی زغال‌سنگ نیز نیازمند ملاحظه‌ی دقیق به خطرات متان است تا از مسمومیت، خفقان و انفجارها جلوگیری شود. نمونه‌ای از تحقیقات انجام شده برای کاهش تأثیر متان از معادن زغال سنگ در دره جیو [۴]، در ارتباط با تأمین ایمنی و سلامت کارگران و

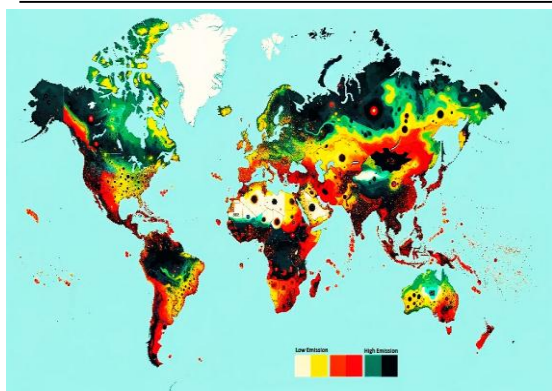


شکل (۱): آلودگی هوا طی فرآیندهای مختلف مربوط به معدن کاری سطحی زغال سنگ [۹]

حدود ۸۵-۹۰٪ از کل انتشار گاز متان در چین از معادن زیرزمینی زغال سنگ صادر می‌شود و گاز متان موجود در هوای تهویه سهم قابل توجهی دارد. متان معدن زغال سنگ همزمان هم پتانسیل انرژی و هم منبع مهم جهت ایجاد خطر ایمنی در معدن است. گاز متان حدود ۲۸-۳۶ برابر قوی‌تر از دی‌اکسید کربن در طول ۱۰۰ سال است. تلاش‌ها برای کاهش انتشار آن می‌تواند شامل زهکشی متان از طریق سیستم‌های گاززدایی و استفاده از آن برای تولید برق، گرمایش منطقه‌ای یا به عنوان سوخت صنعتی باشد. در ایالات متحده، اکثراً متان معدن زغال سنگ بازیابی شده و به سیستم‌های لوله‌کشی گاز طبیعی فروخته می‌شود. همچنین سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده چند هزار معدن زغال سنگ متروکه را شناسایی کرده است که برخی از آن‌ها به طور قابل توجهی پتانسیل گازی خیزی دارند. بنابراین تلاش‌های جامع برای بهره‌برداری از انتشار متان از هر دو معدن فعال و متروکه برای کاهش تأثیرات زیست محیطی ضروری

بیشترین مشارکت مربوط به منابع طبیعی است. داده‌های مجمع بین‌المللی تغییرات اقلیم نشان می‌دهد که انتشار تخمینی متان ۵۸۲ Tg است [۳-۸]. ۴۸٪ از این مقدار به اندازه‌گیری منابع آنتروپوژنیک تعلق دارد. در این خصوص، استخراج زغال سنگ بخش کوچکی از انتشار متان حاصل را فعالیت‌های آنتروپوژنیک را به خود اختصاص می‌دهد. متان به طور معمول بخش اساسی از گازهای حاصل از استخراج زغال سنگ است. تخمین زده می‌شود که انتشار گاز متان حاصل از معدن زغال سنگ^۱ (CMM) رو به افزایش است. تخمین‌های انتشار گاز متان نشان می‌دهد که میزان انتشار جهانی گاز CMM حدود ۸/۹-۱۲/۸ درصد از کل منابع آنتروپوژنیک را تشکیل می‌دهد [۸]. شایان ذکر است که منابع انتشار گاز متان مربوط به فرآیند استخراج زغال سنگ عبارتند از: سیستم‌های گاززدایی در معدن زیرزمینی زغال سنگ که به عنوان سیستم‌های زهکشی شناخته می‌شوند. هوای تهویه از معدن زیرزمینی که شامل غلظت‌های محلول متان است. معدن متروکه یا بسته که ممکن است گازخیزی داشته و متان از طریق حفاریات و تونل‌های تهویه یا از طریق شکاف‌ها یا ترک‌ها و شکستگی‌ها در زمین نشت کند. معدن سطحی که متان در لایه‌های زغال سنگ به طور مستقیم به اتمسفر وارد می‌شود (شکل ۱). انتشار فرار از عملیات بعد استخراج، که در آن زغال سنگ همچنان متان را در مخازن نگهداری و حمل و نقل شده تولید و منتشر می‌کند. دو منبع اولیه زهکشی و تهویه، بیش‌ترین انتشار گازهای مخرب معدن زغال سنگ را تشکیل می‌دهند.

¹ Coal Mine Methane



شکل (۲): توزیع جهانی میزان انتشار گاز متان از معادن زغال سنگ

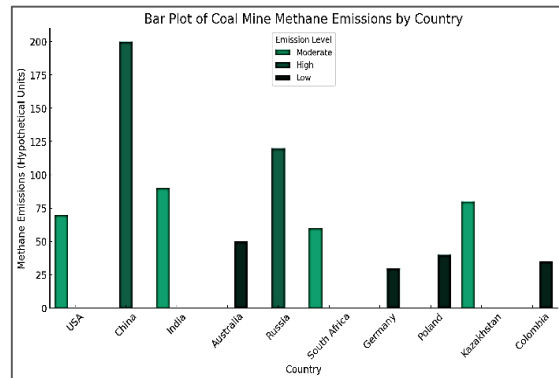
نقشه فوق، یک تصویر کامل از توزیع میزان انتشار گاز متان معادن زغال سنگ به صورت جهانی را ارائه می‌دهد. کشورهایی که صنایع معدن زغال سنگ مهمی دارند، به طور مشخص برجسته شده‌اند و سطوح تخمینی گاز متان برای مقایسه مشخص شده است. شدت انتشار و مناطق کلیدی معدن زغال سنگ در هر کشور مشخص شده‌اند. با توجه به شدت انتشار، مناطق سبز رنگ نشان دهنده مناطقی با انتشار کم متان از معادن زغال سنگ هستند. مناطق زرد رنگ، مناطقی با انتشار متوسط متان هستند. مناطق با انتشار بالای متان با رنگ قرمز مشخص شده‌اند و هر نقطه سیاه یک منطقه مهم معدنی زغال سنگ در کشورهای مختلف است. این نقاط مکان‌های خاصی را نشان می‌دهند که استخراج زغال سنگ تمرکز دارد و بنابراین انتشار متان احتمالاً معنادار است. شکل ۳ کشورها را بر اساس شدت انتشار گاز متان حاصل از معادن زغال سنگ کلاس بندی می‌کند و امکان مقایسه آسان انتشار متان در آنها را میسر می‌سازد.

است و مدیریت انتشار این گاز از نظر محیط‌زیستی و بهره‌وری انرژی، حیاتی است.

توزیع میزان انتشار گاز متان حاصل از معادن زغال سنگ

گاز متان، بعنوان یکی از اجزای اساسی در فرآیندهای استخراج معادن زغال سنگ، بخش مهمی از صنعت معدن است که اهمیت بالقوه و تأثیرات گسترده‌ای در توسعه جوامع دارد. با توجه به رشد روزافزون جمعیت و توسعه صنایع مختلف، استخراج و استفاده از زغال سنگ به عنوان یک منبع انرژی بسیار حیاتی است که همواره در تولید انرژی جهانی نقش مهمی داشته است. اما، همراه با این مزایا، در طول سالیان انتشار گاز متان به عنوان یک فرآیند ثانویه حاصل از استخراج زغال سنگ، باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی و ایمنی جدی شده است. بنابراین با توجه به اهمیت اقتصادی و زیست محیطی این موضوع، آگاهی از الگوها و روندهای انتشار متان از معادن زغال سنگ، گام اساسی برای اتخاذ سیاست‌ها و راهکارهای مؤثر در جهت کاهش اثرات منفی آن می‌باشد. این مطالعه با توجه به اطلاعات منابع معتبر جهانی، تحلیل موثری از وضعیت فعلی و چشم‌اندازهای آینده در خصوص انتشار متان ارائه می‌دهد. امید است که نتایج حاصله مسیری برای اقدامات عملی و سیاست‌گذاری‌های مؤثر در جهت مدیریت بهتر انتشار متان از معادن زغال سنگ به ارمغان آورد. شکل ۲ توزیع جهانی میزان انتشار گاز متان از معادن زغال سنگ را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مقایسه بزرگ‌ترین فاجعه‌های معدن‌کاری زغال سنگ در قرن بیستم را نشان می‌دهد که توزیع مکانی آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۳): تفکیک کشورها بر اساس شدت انتشار گاز متان حاصل از معادن زغال سنگ

جدول (۱): مقایسه بزرگ‌ترین فاجعه‌های معدن‌کاری زغال سنگ در قرن بیستم

مکان حادثه	کشور	تعداد تلفات	حادثه	اثرات و توصیف حادثه
Benxihu Colliery (1942)	چین	۱۵۴۹	انفجار گاز و گرد زغال	حوادث معدنی مرگ بار جهانی
Courrieres Mine (1906)	فرانسه	۱۰۹۹	انفجار گرد زغال	بدترین فاجعه معدنی در اروپا
Mitsubishi Hojyo (1914)	ژاپن	۶۸۷	انفجار گاز متان و گرد زغال	بدترین حادثه معدنکاری در ژاپن
Laobaidong Colliery (1960)	چین	۶۸۴	انفجار گاز متان	مرگ بارترین حادثه در چین
Mitsui Miike (1963)	ژاپن	۴۵۸	انفجار گاز متان در تونل	آسیب شدید مغزی در بازماندگان حادثه
Senghenydd Colliery (1913)	انگلستان	۴۳۹	انفجار گرد زغال	بدترین حادثه در انگلستان، نقض قانون ایمنی
Coalbrook Mine (1960)	آفریقای جنوبی	۴۳۵	ریزش معدن	بدترین حادثه در تاریخ معدن آفریقای جنوبی

سنگ و گاز متان منجر به انفجار شد که منجر به خسارت و تلفات جانی شدیدی شد. همچنین حادثه معدن زغال سنگ لائوبایدونگ در سال ۱۹۶۰ در استان شان‌شی چین منجر به فوت ۶۸۴ نفر شد. این حادثه ناشی از انفجار گاز متان بود و بیش از سه دهه مجهول ماند. حادثه معدن زغال سنگ میتسوی میک در سال ۱۹۶۳ در اوموتا ژاپن، منجر به فوت ۴۵۸ نفر و زخمی شدن ۸۳۳ نفر شد. یک انفجار در تونل داخل معدن باعث ریزش در آن و گسترش منواکسید کربن شد که مرگ و میر بیش‌تری به همراه داشت منجر شد. حادثه معدن زغال سنگ منطقه سنگ هند در انگلستان بدترین فاجعه معدنی در سال ۱۹۱۳ در ولز رخ داد که به فوت ۴۳۹ معدنچی منجر شد. علت انفجار، گرد و غبار زغال

با توجه به جدول، حادثه معدن زغال سنگ بنخیوو (۱۹۴۲) در چین به عنوان بدترین حادثه معدنی در تاریخ شناخته می‌شود. در سال ۱۹۴۲ در استان لیائونینگ چین رخ داد و منجر به فوت ۱۵۴۹ نفر شد که ناشی از ترکیب انفجار گاز و زغال سنگ بود. حادثه معدن زغال سنگ کوریرز (۱۹۰۶) فرانسه که منجر به فوت ۱۰۹۹ نفر شد، ناشی از انفجار گرد و غبار زغال سنگ بود که احتمالاً به دلیل انفجار مواد منفجره در معدن یا اشتعال گاز متان توسط چراغ در معدن بود.

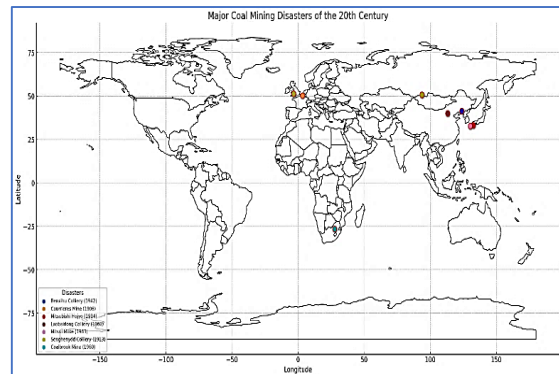
حادثه معدن زغال سنگ میتسوی‌شی هوچیو در (۱۹۱۴) در جزیره کیوشو ژاپن رخ داد و منجر به فوت ۶۸۷ نفر شد. منشأ فاجعه ترکیبی از گرد و غبار زغال

مقررات ایمنی داشت. به عنوان مثال، فاجعه معدن زغال سنگ، سنگ هند، در انگلستان منجر به شناخت نقض قوانین ایمنی شد، در حالی که فاجعه معدن زغال سنگ لائوبایدونگ در چین برای سال‌ها مجهول ماند، که نشان‌دهنده عملکردهای متفاوت به حوادث معدن است. همچنین این رویدادها اهمیت تاریخی قابل توجهی دارند و به عنوان عامل تحول در مقررات و روش‌های ایمنی معدن کاری عمل کرده‌اند. آن‌ها درس‌های حیاتی را برای عملیات کنونی و آینده معدن کاری ارائه می‌دهند و نیاز به پروتکل‌های ایمنی سخت و نظارت بر خطرات احتمالی را تأکید می‌کنند. بطور خلاصه، نتایج فوق، نه تنها دلایل تلخ فقدان زندگی را ثبت می‌کند، بلکه بینش‌هایی را نیز درباره طبیعت تکاملی ایمنی در صنعت معدنکاری، انواع خطرات مرتبط و اهمیت یادگیری از تجربیات گذشته جهت جلوگیری از فجایع را آینده ارائه می‌دهد. این داده‌ها نشان‌دهنده تلاش‌های مستمر برای بهبود ایمنی در صنعت استخراج زغال‌سنگ هستند و یک دیدگاه تاریخی از اثربخشی این تدابیر را ارائه می‌دهند.

تأثیر متان بر تغییر اقلیم

شناخت عمیق‌تر نقش متان در تغییرات اقلیمی، کمک می‌کند که منابع طبیعی را به طور مؤثرتر مدیریت شود، سیاست‌های زیست محیطی مناسب‌تری تدوین گردد و اثرات اقتصادی و اجتماعی این تغییرات، بهتر درک شود. از این رو، تحقیقات در این زمینه می‌توانند در طراحی و اجرای برنامه‌ها و سیاست‌هایی برای مقابله با چالش‌های زیست محیطی و اقتصادی که از انتشار متان ناشی می‌شوند، مؤثر واقع گردند. تأثیرات زیست محیطی گاز متانی که از معادن زغال سنگ آزاد

سنگ همراه با متان بود. حادثه معدن زغال سنگ کول بروک آفریقای جنوبی در سال ۱۹۶۰، در اثر ریزش معدن حدود ۴۳۵ تلفات جانی در برداشت.



شکل (۴): مقایسه بزرگترین فاجعه‌ها و تلفات معدن کاری زغال سنگ

با توجه به جدول ۱ و شکل ۴ مشاهده می‌شود که این فاجعه‌های بزرگ حاصل از انفجار متان در معادن در سراسر قاره‌های مختلف رخ داده‌اند که بیانگر این است که خطرات معدن کاری یک مسئله جهانی است. همچنین علل اصلی این فاجعه‌ها، از انفجار گاز و ذرات زغال سنگ تا ریزش معادن متغیر است. انفجارها (به دلیل گاز، ذرات زغال سنگ یا ترکیبی از آن دو) علت رایج‌تر بودند که حاکی از آن است که این خطرات بطور قابل توجهی در عملیات معدن کاری در طول این دوره رخ داده‌اند. تعداد تلفات با تفاوت‌های قابل توجهی بود که فاجعه معدن زغال سنگ بنخیوو در چین بیش‌ترین تعداد تلفات را داشت. این حوادث از اوایل قرن بیستم تا نیمه قرن بیستم را در بر می‌گیرند که نشان‌دهنده پیشرفت تاریخی استانداردهای ایمنی در معدن کاری می‌باشد. هر فاجعه تأثیر منحصر به فرد خود را، نه تنها از نظر تلفات بلکه از نظر تأثیرات بر روی روش‌های معدن کاری و

می‌شود، یکی از موارد مهم نگرانی است زیرا متان نقش گاز گلخانه‌ای قوی دارد. اثر گلخانه‌ای یک ویژگی طبیعی سیستم زمین است که در طول دوران‌های مختلف زمین‌شناسی در تاریخ زمین تاثیر گذار بوده و به وجود گازهایی مانند دی‌اکسید کربن (CO_2)، اکسید نیتروژن (N_2O)، متان (CH_4)، اوزون (O_3) و بخار آب در اتمسفر مربوط می‌شود. اثر گلخانه‌ای به طور کلی تعیین‌کننده حفظ دمای نسبتاً ثابت سطح زمین و توسعه حیات است که مهم‌ترین عامل آن، نیروی تابشی است. در این اثر، گازهای گلخانه‌ای مذکور جزئی از انرژی تابشی خورشید با امواج کوتاه را جذب و به سطح زمین منتقل می‌کنند و در نتیجه، سطح زمین آن را به صورت تابش گرمایی با امواج بلند منعکس می‌کند. به این ترتیب هوا و سطح زمین گرم‌تر از حالتی هستند که غلظت گازهای گلخانه‌ای مانند بخار آب و دی‌اکسید کربن وجود نداشت. در صورت عدم وجود گازهای گلخانه‌ای (به‌خصوص بخار آب و دی‌اکسید کربن)، جو زمین ۳۳ درجه سانتی‌گراد سردتر خواهد بود. بنابراین در این فرآیند، گازهای گلخانه‌ای انرژی را یک‌سو به فضا و از سوی دیگر به سمت زمین انتشار می‌دهند. با اینکه افزایش دما در طول بیش از ۱۰۰ سال مشاهده شده است، اما در ۳۰ سال گذشته، افزایش میانگین دمای جهانی بر روی یک منحنی صعودی شدید قرار گرفته است. از سال ۱۹۷۶ به بعد، میانگین دمای جهانی به اندازه ۰/۱۸ درجه سلسیوس در هر دهه افزایش یافته است. دی‌اکسید کربن از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای است (حدود ۵۰٪ از تأثیر گلخانه‌ای انسانی را تشکیل می‌دهد). طبق تحقیقات، برای تغییرات اقلیم در سال ۲۰۰۱، از سال ۱۷۵۰ به بعد، غلظت دی‌اکسید کربن در جو از ۳۱٪ افزایش

یافته است و در ۲۰ سال گذشته حدود ۷۵٪ از انتشار گاز دی‌اکسید کربن در اتمسفر ناشی از سوخت‌های فسیلی است. متان بعنوان یک گاز گلخانه‌ای قوی، دارای ظرفیت گرمایش جهانی بسیار بالاتری نسبت به دی‌اکسید کربن است و معادن زغال سنگ منبع قابل توجهی از انتشار متان بوده و بالطبع تأثیر متان متشکل از معادن زغال سنگ بر تغییرات آب و هوا قابل توجه می‌باشد. بطوری که متان با حبس گرما در اتمسفر، منجر به گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوا می‌شود. انتشار متان از معادن زغال سنگ به بار کلی گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر افزوده شده و مشکلات تغییر آب و هوا را تشدید می‌کند. غلظت گاز متان در اتمسفر از سال ۱۷۵۰ به اندازه ۱۵۱٪ افزایش یافته و همچنان در حال افزایش است [۱]. با توجه به اینکه مولکول‌های گاز متان دارای ظرفیت جذب حرارت بالایی هستند، بنابراین غلظت‌های پایین آن نیز نقش قابل توجهی در تولید اثر گلخانه‌ای ایفا می‌کنند. منشأ دیگر آزاد شدن متان در جو، گرم شدن سیاره زمین می‌باشد که می‌تواند منجر به افزایش انتشار این گاز از رسوبات اقیانوس‌ها، مرداب‌ها، تالاب‌ها و یخچال‌های دائمی شود. در این مناطق، مقدار قابل توجهی از متان محبوس بین مولکول‌های آب می‌تواند در اثر افزایش دما آزاد شود. میانگین عمر متان در جو (۱۲ سال) نسبت به دی‌اکسید کربن (۵۰-۲۰۰ سال) و دیگر گازهای گلخانه‌ای کوتاه است. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده و اینکه گرمایش جهانی زمین در طول زمان ممکن است توجیهی برای همه پدیده‌های طبیعی حاد همچون حرکت استوایی، گسترش بیابان‌ها، موج سرمایی و به تازگی تشدید شدت توفان‌ها باشد

که می‌تواند با جمع‌آوری متان و استفاده از آن به عنوان منبع سوخت، به کاهش انتشار کمک کند.

- تدابیر نظارتی و سیاستی: مقررات و سیاست‌های دولت هم می‌توانند بر میزان گاز متانی که از معادن زغال سنگ آزاد می‌شود، تأثیر بگذارند. مقررات تدوین شده ممکن است نیاز به اجرای فناوری‌های خاص کاهش متان داشته باشد یا سیاست‌هایی که ایجاد انگیزه برای کاهش انتشارات متان دارند، مانند قیمت‌گذاری کربن یا طرح‌های معاملات انتشار متان، می‌توانند معادن زغال سنگ را تشویق کنند تا در فناوری‌های کاهش متان سرمایه‌گذاری کنند.

- پیشرفت‌های فناوری: پیشرفت‌های فناوری‌های فن‌اورانه نیز می‌توانند نقش مهمی در کاهش انتشارات متان از معادن زغال سنگ ایفا کنند. به عنوان مثال، توسعه سیستم‌های موثر تخلیه گاز، فناوری‌های بهینه برای زهکشی متان و استفاده از منابع انرژی جایگزین برای عملیات معدن‌کاری، همه می‌توانند به کاهش انتشارات متان کمک کنند.

- عوامل اقتصادی: قابلیت اقتصادی اقدامات کاهش متان می‌تواند بر اجرای آن‌ها تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، هزینه اجرای فناوری‌های زهکشی و استفاده از متان می‌تواند بر تمایل معادن زغال سنگ به سرمایه‌گذاری در این اقدامات تأثیر بگذارد. انگیزه‌های اقتصادی، مانند یارانه‌ها یا اعتبارات مالیاتی برای پروژه‌های کاهش متان، می‌تواند به کاهش هزینه‌ها کمک کرده و به اجرای این فناوری‌ها تشویق کند.

لذا مدیریت بهینه محیط زیستی در این مورد بسیار حائز اهمیت است.

بنابراین تأثیر متان حاصل از معادن زغال سنگ بر تغییرات آب و هوا مهم است و کاهش انتشار آن برای کاهش تأثیرات تغییرات آب و هوا اساسی است. در این راستا ترکیبی از عوامل از جمله روش‌های استخراج، ویژگی‌های لایه‌های زغال سنگ، سیستم‌های تهویه و زهکشی گاز، پیشرفت‌های فناوریانه، عوامل اقتصادی و آگاهی عمومی، همه در مقدار گاز متان آزاد شده و کاهش پتانسیل انتشار آن بصورت زیر می‌توانند مؤثر واقع گردند.

- روش‌های استخراج: روش استفاده شده برای استخراج زغال سنگ از زمین می‌تواند بر مقدار متان منتشر شده تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، استخراج زیرزمینی ممکن است به دلیل فشار و دمای بالاتر زیرزمینی نسبت به معدنکاری سطحی متان بیشتری آزاد کند.

- ویژگی لایه‌های زغال سنگ: ترکیب و خصوصیات تراکمی زغال سنگ می‌تواند بر مقدار متان آزاد شده تأثیر بگذارد. برخی زغال سنگ‌های متراکم حاوی متان بیشتری هستند و حضور شکستگی‌های طبیعی نیز می‌تواند بر انتشار متان تأثیر بگذارد.

- تهویه و گاززدایی: سامانه‌های مناسب تهویه و گاززدایی در معادن زغال سنگ می‌توانند به کاهش انتشار متان کمک کنند. این سامانه‌ها، متان را از معدن جمع‌آوری و حذف می‌کنند و مقداری از آن را که وارد اتمسفر می‌شود کاهش می‌دهند.

- ذخیره و استفاده از متان: برخی معادن زغال سنگ فناوری‌های ذخیره و استفاده از متان را اجرا کرده‌اند

نتیجه گیری

دولت‌ها به ارائه تسهیلات و حمایت‌های مالی برای شرکت‌ها و محققان در زمینه تحقیقات مرتبط با کاهش انتشار گاز متان و پیشگیری از خودسوزی در معادن زغال سنگ هدایت شود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسنده مقاله تشکر و قدردانی خود را از ادیتور محترم مجله و داوران ارجمند اعلام می‌دارد.

منابع

- [1] Ianc, N., Boantă, C., Gherghe, I., Tomescu C., 2020, Environmental impact of methane released from coal mines. MATEC Web of Conferences: EDP Sciences;
- [2] Matei, I., Moraru, R., Samoilă, M., Băbuț G., 2000, Environmental engineering and underground ventilation. Technical Publishing House, Bucharest, Romania.
- [3] Prather, M., Ehhalt, D., Dentener, F., Derwent, R., Dlugokencky, E., Holland, E., 2001, Atmospheric chemistry and greenhouse gases.
- [4] Yuan, H., Richter, F., Rein, G., 2021, A multi-step reaction scheme to simulate self-heating ignition of coal: Effects of oxygen adsorption and smouldering combustion. Proceedings of the Combustion Institute; 38:4717-25.
- [5] Spirjakin, D., Baranov, A., Ivanov, I., Karami, H., Gharehpetian, GB., 2022, Environment explosiveness level evaluation improvement using machine learning. 2022 11th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO): IEEE; p. 1-6.
- [6] Spirjakin, D., Baranov, A., Ivanov, I., Karami, H., Gharehpetian, GB., 2023, Gases and mixtures explosiveness estimation using a model trained by limited sets of gases. 2023 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO): IEEE; p. 1-6.
- [7] Mine, NS., 2013, Pre-feasibility Study for Coal Mine Methane Recovery and Utilization.
- [8] Menon, S., Denman, KL., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, PM., 2007, Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. Lawrence

انتشار گاز متان حاصل از معادن زغال سنگ بدلیل تأثیرات اکولوژیکی قابل توجه از جمله تخریب لایه اوزون و تقویت اثر گلخانه‌ای و همچنین حوادث و انفجارهای مختلف حاصل از تهویه نامناسب، اشتعال متان و نقص در اقدامات ایمنی می‌تواند پیامدهای محیطی قابل توجهی داشته باشد. بنابراین مسئله انتشار گاز متان از معادن زغال سنگ نیازمند توجه و مدیریت جدی است. با استفاده از روش‌های پیشرفته در فرآیند استخراج و بهره برداری مناسب، می‌توان این مسئله را به یک فرصت برای بهبود عملکرد محیط‌زیستی و کاهش اثرات منفی تبدیل کرد. برای بهبود مدیریت انتشار گاز متان و پیشگیری از پدیده خودسوزی در معادن زغال سنگ و کاهش اثرات گلخانه‌ای آن، مطالعات آینده می‌تواند به سمت مواردی همچون ارتقاء فرآیندهای استخراج زغال سنگ با هدف کاهش آزادسازی گاز متان و بهبود کارایی انرژی، ارزیابی تاثیر تکنولوژی‌های نوین در کاهش انتشار گاز متان و ایمن‌سازی در معادن زغال سنگ، بررسی هزینه‌ها و سودهای اقتصادی مرتبط با استفاده از تکنولوژی‌های جدید در کاهش انتشار گاز متان، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی مختلف و تعیین تأثیر اقدامات اصلاحی بر اکوسیستم‌های محلی، ارتقاء سامانه‌های هوشمند و خودکار جهت مانیتورینگ و کنترل انتشار گاز متان، ترویج و پشتیبانی از استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان جایگزینی برای زغال سنگ به منظور کاهش نیاز به استخراج زغال سنگ و انتشار گاز متان، تشویق به تبادل دانش و تجربیات مرتبط با مدیریت گاز متان در معادن زغال سنگ بین کشورها و همکاری در ترویج استانداردها و راهکارهای جهانی، تشویق

Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States.

[9] Pandey, B., Gautam, M., Agrawal, M., 2018, Greenhouse gas emissions from coal mining activities and their possible mitigation strategies. Environmental carbon footprints: Elsevier; 2018. p. 259-94.

“Research article”

Systematic Review of Environmental Impacts of Methane Gas Emission in Coal Mines

Aynur Nasseri^{1*}

¹ Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran.

*Corresponding Author: Ay.Nasseri@iau.ac.ir, aynur.nasseri80@gmail.com

Abstract

Methane gas is one of the main greenhouse gases that is released during the exploitation and production of coal from coal mines. In recent decades, the issue of methane emissions from coal mines has emerged as a major environmental challenge. This gas plays an important role in increasing global warming as a potent greenhouse gas, and uncontrolled emissions lead to serious environmental and economic problems. Also, the potential for methane self-ignition in coal mines, as a dangerous phenomenon, requires further environmental investigation and study. Given the importance of environmental protection and reducing greenhouse gases, a precise understanding of these effects and taking appropriate measures to reduce them is essential. Therefore, this article examines the environmental effects of methane emissions in coal mines and discusses strategies to reduce these effects. The results indicate that upgrading processes and using clean and sustainable technologies can be effective in reducing methane emissions from coal mines. For instance, the use of renewable technologies such as solar and wind energy instead of fossil fuels, and the promotion of clean and environmentally friendly technologies in the processes of coal exploitation and production, will be highly effective.

Keywords: Methane gas, coal mines, greenhouse gases, environmental impact



"مقاله پژوهشی"

سنتز و کارایی نانو کاتالیست Co-Ru و Co بر پایه گرافن در فرآیند فیشر - تروپش

سارا علی نیا^۱، میراسمعیل معصومی^{۲*}، علی حق طلب^۳، مریم اوتادی^۴، فریدون یاری پور^۵

^۱ گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ گروه مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۴ گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۵ گروه پژوهش‌های کاتالیستی، شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی، شرکت ملی صنایع پتروشیمی، تهران، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: m_masoumi@iau-tnb.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵)

چکیده

در این تحقیق، برای بهبود کارایی و پایداری زیست‌محیطی فرآیند فیشر-تروپش، از نانوصفحات گرافن به‌عنوان پایه برای سنتز کاتالیست‌های کبالت استفاده شد. این کاتالیست‌ها با روش تلقیح مرطوب تهیه شده و خصوصیات آن‌ها با تکنیک‌های مختلفی مانند FTIR، TEM، EDX، XRD، BET، JCP و TPR بررسی گردید. تأثیر تغییر درصد وزنی کبالت (از ۱۰٪ تا ۳۰٪) بر فعالیت کاتالیست‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد کاتالیست حاوی ۳۰٪ کبالت دارای بیش‌ترین فعالیت است. برای بهینه‌سازی بیش‌تر، ۱٪ وزنی روتنیوم به این کاتالیست افزوده شد. عملکرد این کاتالیست‌ها در یک راکتور بستر ثابت تحت فشار ۲۵ بار و دماهای ۲۲۰ و ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد با جریان گاز سنتز بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که استفاده از نانوصفحات گرافن به‌عنوان پایه کاتالیست، علاوه بر بهبود کارایی فرآیند، منجر به کاهش انتشار آلاینده‌ها و تولید سوخت‌های پاک‌تر می‌شود. داده‌های آزمایشگاهی نشان دادند که این کاتالیست‌ها به بهبود تبدیل مونوکسید کربن، گزینش‌پذیری متان و توزیع محصولات کمک می‌کنند و می‌توانند تأثیرات مثبت زیست‌محیطی به همراه داشته باشند.

کلمات کلیدی: سنتز فیشر تروپش، کاتالیست کبالت، کاتالیست کبالت - روتنیوم، نانو صفحات گرافن، راکتور بستر ثابت.

مقدمه

تبدیل گاز به مایع (Gas-to-liquid: GTL) یک فرآیند کاتالیستی مهم است که در آن گاز طبیعی به هیدروکربن‌های مایع متنوعی مانند نفتا، کروزن، دیزل، بنزین، واکس و روغن تبدیل می‌شود (۱) این فرآیند با هدف تبدیل گاز طبیعی به محصولات مایع که حمل و نقل و فروش آن‌ها آسان‌تر و سازگارتر با محیط زیست هستند، توسعه یافته است. یکی از روش‌های کلیدی در این زمینه، فرآیند فیشر-تروپش است که نقش حیاتی در تولید سوخت‌های پاک و با انتشار کمتر دارد. این فرآیند از کاتالیست‌های کبالت، آهن و روتنیوم استفاده می‌کند که به کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و افزایش بازدهی تولید سوخت‌های سبز کمک می‌کنند (۲). کاتالیست‌های کبالت به دلیل کارایی بالا، عمر طولانی و توانایی تولید هیدروکربن‌های سنگین‌تر، به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها در فرآیند فیشر-تروپش شناخته می‌شوند. استفاده از این کاتالیست‌ها منجر به تولید سوخت‌های با کیفیت و کم آلاینده می‌شود که می‌تواند به بهبود کیفیت هوا و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی کمک کند. یکی از عوامل حیاتی در کارایی کاتالیست، نوع پایه مورد استفاده در ساختار آن است. پایه‌های با سطح ویژه و حجم حفره بالا، قابلیت بارگذاری بیش‌تری برای کبالت فراهم می‌کنند، که منجر به بهبود عملکرد و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود (۳). در این زمینه، مواد کربنی به دلیل ویژگی‌های خاص خود مانند مقاومت در برابر شرایط محیطی سخت، قابلیت بازیافت فلزات و پایداری شیمیایی، انتخاب مناسبی برای پایه کاتالیست‌های ناهمگن هستند (۴).

گرافن، به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین مواد در نانوتکنولوژی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. ویژگی‌های منحصر به فرد گرافن از جمله سطح ویژه بالا، زیست‌سازگاری عالی و توانایی جذب بالا، آن را به یک پایه فوق‌العاده برای کاتالیست‌های ناهمگن تبدیل کرده است. استفاده از گرافن به عنوان پایه کاتالیست در فرآیند فیشر-تروپش نه تنها باعث افزایش فعالیت و گزینش‌پذیری کاتالیست‌ها می‌شود، بلکه به کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی فرآیند نیز کمک می‌کند (۶-۵). مطالعات قبلی نشان داده‌اند که نانوصفحات گرافن به دلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد خود، می‌توانند فعالیت کاتالیستی را بهبود بخشند و منجر به تولید سوخت‌های باکیفیت‌تر و دوستدار محیط زیست شوند (۷).

در این مطالعه، هدف ما سنتز کاتالیست‌های Co و Co-Ru با استفاده از روش تلقیح مرطوب و پایه گرافن است. خواص شیمی-فیزیکی این کاتالیست‌ها با استفاده از روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد آن‌ها در فرآیند فیشر-تروپش از نظر تبدیل مونوکسید کربن و گزینش‌پذیری محصولات سبک و سنگین ارزیابی شده است. این تحقیق به دنبال ارائه راهکارهای پایدارتر و کارآمدتر برای تولید سوخت‌های پاک از گاز طبیعی است که تأثیرات مثبتی بر محیط زیست دارد.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

برای تهیه کاتالیست‌ها از نیترات کبالت $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ و نیترات نیتروزیل

استفاده شد. ترکیب کاتالیست‌ها با استفاده از دستگاه EDX مدل JED-2300 JEOL تعیین شد. بارگذاری کبالت و روتنیوم در کاتالیست‌های سنتز شده با استفاده از روش ICP-AES اندازه‌گیری شد. سطح ویژه، حجم حفره و شعاع متوسط حفره‌های پایه‌ها و کاتالیست‌های کلسینه شده از طریق ایزوترم‌های جذب/واجذب نیتروژن با استفاده از دستگاه ASAP, Micromeritics, 2010 اندازه‌گیری شد. برای تعیین فازهای موجود در کاتالیست‌های تهیه شده، از روش XRD با استفاده از دستگاه Philips PW1840 استفاده شد. مورفولوژی کاتالیست‌ها با استفاده از دستگاه TEM مدل Zeiss EM10C و ولتاژ 100 kV مورد بررسی قرار گرفت. آزمون‌های TPR کاتالیست‌های تهیه شده با استفاده از دستگاه TPD-TPR 2900 اندازه‌گیری شد. این روش مقدار هیدروژن جذب شده برای کاهش کاتالیست‌ها را در محدوده دمایی ۲۵-۹۰۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری می‌کند. برای این آزمون، ۰/۲۵ گرم از کاتالیست‌های کلسینه شده تحت جریان هیدروژن در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ ساعت احیا شد. سپس دمای نمونه تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد تحت جریان هیدروژن کاهش یافت و پس از آن جریان آرگون جایگزین هیدروژن شد و این جریان به مدت ۳۰ دقیقه ادامه یافت تا هیدروژن فیزیکی جذب شده از بین برود. پس از این، دما تحت جریان آرگون با نرخ ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. طیف هیدروژن خروجی در یک کروماتوگراف گازی مجهز به آشکارساز هدایت حرارتی (TCD) تشخیص داده شد.

روتنیوم $\text{Ru}(\text{NO})(\text{NO}_3)_3$ با خلوص بیش از ۹۹/۹٪ از شرکت Sigma-Aldrich به عنوان پیش‌ماده‌ها و بهبود دهنده‌ها استفاده شد. نانوصفحات گرافن عاملی شده GNS از پژوهشگاه صنعت نفت تهران، ایران تهیه شد.

تهیه کاتالیست

کاتالیست‌ها با استفاده از روش تلقیح همزمان بر روی نانوصفحات گرافن با بارگذاری وزنی کبالت به میزان ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد وزنی و روتنیوم به میزان ۱ درصد وزنی سنتز شد، فهرست کاتالیست‌ها در جدول ۱ قابل مشاهده است. پیش‌ماده‌های نیترات کبالت و نیترات نیتروزیل روتنیوم به طور جداگانه یا همزمان با نسبت‌های مشخص وزنی بر روی نانوصفحات گرافن تلقیح شدند. پس از تلقیح، نمونه‌های کاتالیست به مدت یک شب در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند تا رطوبت اضافی از بین برود. سپس کاتالیست‌ها تحت جریان گاز نیتروژن در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت و با نرخ افزایش دما 3 min^{-1} کلسینه شد.

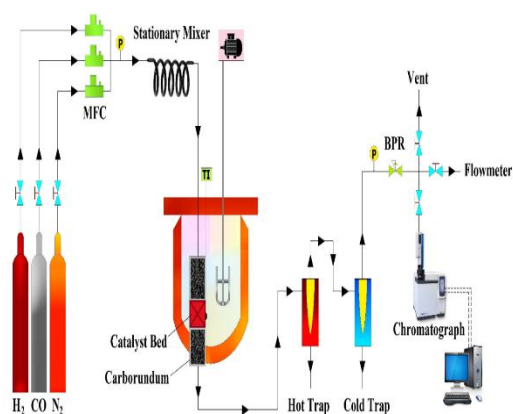
جدول (۱): مشخصات و ترکیب درصد کاتالیست‌ها.

نسبت روتنیوم به کبالت	مقدار روتنیوم (wt %)	مقدار کبالت (wt %)	شماره کاتالیست	کاتالیست
-	-	۱۰	C1	Co/GNS
-	-	۲۰	C2	Co/GNS
-	-	۳۰	C3	Co/GNS
۰/۰۳۳۳	۱	۳۰	C4	Co-Ru/GNS

شناسایی کاتالیست

طیف‌سنجی مادون قرمز (FTIR) توسط دستگاه Perkin Elmer FT-IR برای شناسایی گروه‌های عاملی موجود بر سطح نانوصفحات گرافن عامل دار شده

واکنش‌های اصلی در فرآیند فیشر-تروپش شامل تبدیل مونوکسید کربن و هیدروژن به هیدروکربن‌های سبک و سنگین و آب است. برای ارزیابی عملکرد کاتالیست‌ها از نظر فعالیت در فرآیند، تبدیل مونوکسید کربن، انتخاب‌پذیری هیدروکربن‌ها و تولید هیدروکربن‌های زنجیره بلند C_5^+ مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۱. شماتیک فرآیند فیشر-تروپش مورد مطالعه در این پژوهش.

نتایج و بحث

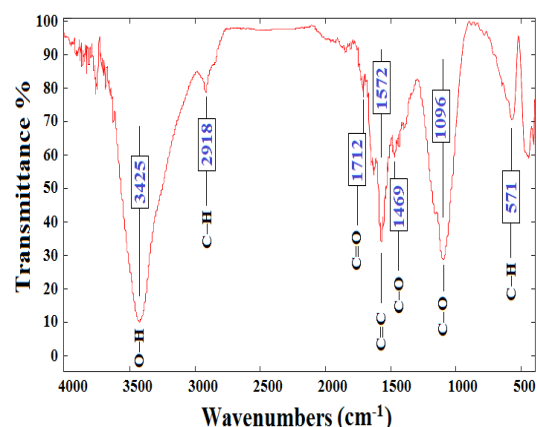
FTIR

شکل ۲ تحلیل FTIR گروه‌های عاملی موجود بر سطح گرافن را نشان می‌دهد. باندهای جذبی مربوط به نوسان پیوند گروه کربوکسیل با طول موج cm^{-1} ۱۰۹۶ و پیوند حلقه آروماتیک در ناحیه cm^{-1} ۱۴۶۹ مشاهده شد. کشش‌های متقارن و نامتقارن C-H برای CH_3 و CH_2 در طول موج‌های cm^{-1} ۲۹۱۸ و C-H در cm^{-1} ۵۷۱ مشاهده شد. پیک‌های مشاهده شده در cm^{-1} ۱۷۱۲ و cm^{-1} ۳۴۲۵ به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های کربونیل و گروه‌های هیدروکسیل در اسیدهای کربوکسیلیک هستند. این نتایج نشان می‌دهند که تیمار گرافن با اسید نیتریک

سنتر هیدروکربن‌ها در سیستم واکنش

شماتیک فرآیند فیشر-تروپش که برای بررسی فعالیت کاتالیست‌ها استفاده شد، در شکل ۱ نشان داده شده است. در این سیستم، یک راکتور بستر ثابت لوله‌ای عمودی با قطر داخلی ۱/۲۷ سانتی‌متر و ارتفاع بستر کاتالیست ۴/۵ سانتی‌متر است. جریان گاز سنتر (هیدروژن + مونوکسید کربن) از بالا وارد می‌شود. برای گرم کردن راکتور، از حمام نمک مذاب استفاده شد، بخش میانی شامل کاتالیست مخلوط با ماده بی‌اثر بود. ابتدا کاتالیست‌ها در راکتور بارگذاری شده و عملیات احیا قبل از شروع واکنش با استفاده از هیدروژن خالص در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۱۶ ساعت و تحت فشار اتمسفری انجام شد. سپس دمای راکتور به ۲۲۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. پس از مرحله فعال‌سازی، گاز سنتر با نسبت هیدروژن به مونوکسید کربن ۲ به ۱ و با سرعت فضایی مشخص (Gas Hourly Space Velocity: GHSV) وارد راکتور شد که منجر به افزایش فشار راکتور تا ۲ مگاپاسکال (۲۵ بار) گردید. آزمایش‌های فیشر-تروپش برای همه کاتالیست‌ها انجام شد و محصولات فرآیند (یعنی کندانسیت) از طریق تله‌های گرم و سرد در دمای ۸۰ و ۰ درجه سانتی‌گراد جمع‌آوری شد. ترکیب و نوع محصولات گازی غیر قابل تقطیر به عنوان جریان خروجی گاز توسط دستگاه آنالیزور گاز Agilent 7890A با آشکارساز هدایت حرارتی بررسی شد. همچنین، برای تحلیل محصولات مایع جمع‌آوری شده از تله‌های گرم و سرد، از دستگاه آنالیزور Agilent DHA استفاده شد و جریان گاز اضافی غیر قابل تقطیر به اتمسفر تخلیه شد.

باعث تشکیل گروه‌های کربوکسیل بر سطح گرافن شده است. علاوه بر این، پیک مشاهده شده در طول موج 1572 cm^{-1} به پیوندهای دوگانه در ساختار گرافن مرتبط است (۸).



شکل ۲. طیف FTIR از گرافن نانو صفحه عامل دار شده به عنوان پایه ی کاتالیست.

BET
 آزمایش BET برای اندازه‌گیری سطح ویژه برحسب مترمربع بر گرم، شعاع متوسط منافذ بر حسب نانومتر، و حجم منافذ برحسب سانتی متر مکعب بر گرم برای پایه‌ها و کاتالیست‌ها انجام شد و نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. مقدار هر سه پارامتر در کاتالیست‌های کلسینه شده کم‌تر از پایه‌ها است که این کاهش به دلیل پوشش سایت‌های فعال و انسداد منافذ توسط فلزات فعال (کبالت و روتنیوم) در طول فرآیند سنتز کاتالیست رخ داده است (Fang و همکاران، ۲۰۲۱؛ Li و همکاران، ۲۰۲۲). با افزایش مقدار روتنیوم در کاتالیست دوفلزی، تفاوت قابل توجهی در حجم منافذ و اندازه متوسط منافذ مشاهده نمی‌شود، اما سطح ویژه BET در کاتالیست افزایش می‌یابد که این موضوع می‌تواند به علت وجود ذرات کوچک‌تر کبالت در کاتالیست باشد.

جدول (۳): نتایج آزمون مطالعه سطح ویژه BET.

شماره کاتالیست	سطح ویژه (m^2/g)	حجم منافذ (cm^3/g)	قطر منافذ (nm)
GNS	۶۹۰	۲/۰۴	-
C1	۶۲۴	۱/۵۴	۰/۰۴۶
C2	۵۷۷	۰/۴۴	۰/۳۸۳
C3	۵۶۰	۰/۴۲	۰/۳۸۲
C4	۵۹۰	۰/۵۰	۰/۴۰۰

XRD

آنالیز XRD برای شناسایی فازهای کریستالی کاتالیست‌های کبالت و کبالت-روتنیوم بر روی گرافن استفاده شد. طبق شکل ۳، پیک‌های مشاهده شده در زوایای $25/73^\circ$ و $43/53^\circ$ درجه مربوط به گرافن هستند.

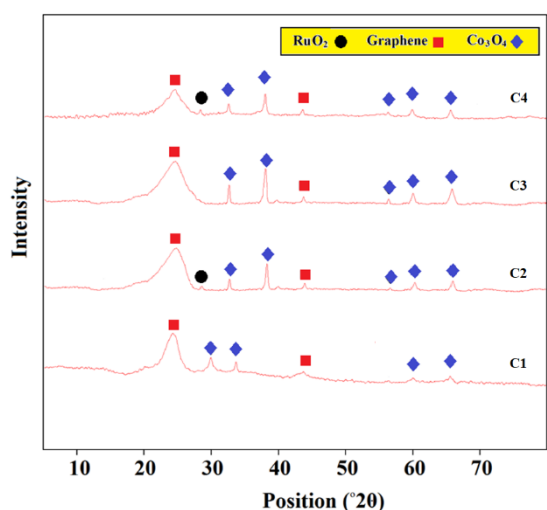
ICP

ترکیب کاتالیست‌ها با استفاده از تحلیل ICP در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقدار بارگذاری کبالت و روتنیوم به مقادیر تئوریک نزدیک است بنابراین این داده‌ها صحت سنتز کاتالیست‌ها را اثبات می‌کنند (۹).

جدول (۲): مقایسه ی مقادیر کبالت و روتنیوم تئوری و واقعی

حاصل از آنالیز ICP.

شماره کاتالیست	مقدار روتنیوم (wt %)		مقدار کبالت (wt %)	
	ICP	تئوری	ICP	تئوری
C1	-	-	۹/۵۲	۱۰
C2	-	-	۱۹/۳۵	۲۰
C3	-	-	۲۸/۶۳	۳۰
C4	۰/۸۴	۱	۲۸/۶۲	۳۰



شکل (۳): الگوی پراش پرتو ایکس برای کاتالیست های C1-C4.

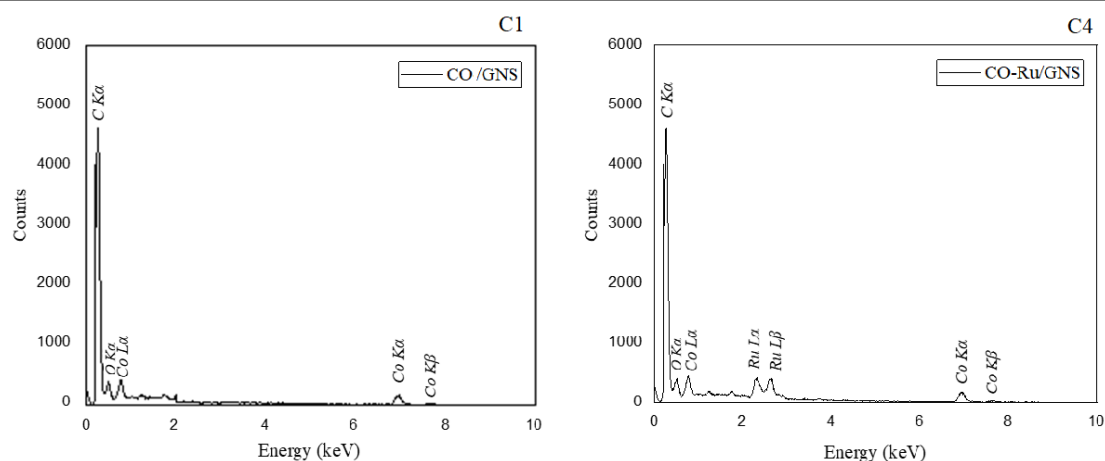
جدول (۴): اندازه ذرات CO_2O_4 بر اساس معادله شرر.

شماره کاتالیست	$d_{Co_3O_4}$ (nm)
C1	۵/۲
C2	۶/۷
C3	۸/۱
C4	۶/۶

EDX و TPR

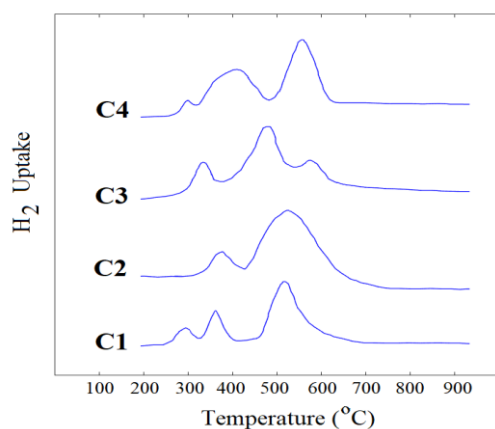
برای اطمینان از حضور تمامی عناصر در کاتالیست ها، طیف‌های EDX بررسی شد. در طیف‌های EDX مربوط به کاتالیست‌های C1 و C2، پیک‌های مربوط به عناصر کربن، اکسیژن، کبالت و همچنین در کاتالیست C4، پیک‌های مربوط به روتنیوم مشاهده شد. حضور اکسیژن در نمونه‌ها نشان‌دهنده اکسیداسیون اتم‌های فلز بر سطح کاتالیست است. این مشاهده در شکل ۴ نمایش داده شده است.

پیک‌های اکسید کبالت که بر سطح گرافن تشکیل شده‌اند، در زوایای ۱۸، ۳۲/۳۶، ۳۶/۹، ۴۶/۶، ۵۹/۳۵ و ۶۵/۲۱ درجه مشاهده شد. واضح‌ترین پیک در زاویه ۳۶/۹ درجه مشاهده می‌شود. بر اساس مطالعات قبلی (۱۰) اکسید کبالت در الگوی XRD معمولاً به شکل Co_3O_4 تشکیل می‌شود. پیک مشخص شده اکسید کبالت برای تعیین اندازه ذرات کبالت با استفاده از معادله شرر استفاده شد و نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است. با افزایش میزان درصد کبالت (۱۰-۳۰٪)، در کاتالیست‌های تک فلزی اندازه بلور افزایش یافت. در یک کاتالیست دو فلزی (C4)، اندازه نانوبلورهای اکسید کبالت ۱٫۵ نانومتر در مقایسه با یک کاتالیست فلزی منفرد (C3) کمتر بود (۱۱-۱۲). روتنیوم با کاهش میزان برهم کنش ذرات ریزتر با پایه برای شکل گیری این ذرات کوچکتر روی سطح و در نهایت افزایش تعداد ذرات ریز روی سطح به عنوان ذرات مستقل که قابلیت احیای بالاتری دارند عمل می‌کند. وجود این ذرات کوچک اضافه شده روی سطح کاتالیست میانگین اندازه ذرات را کاهش می‌دهد.



شکل (۴): آنالیز EDX برای کاتالیست C1 و C4.

کاتالیست شدت نسبی پیک احیای دوم را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد که نشان دهنده افزایش درجه احیا است (۱۳). در کاتالیست دو فلزی با افزایش ۱٪ روتنیوم، پیک های اول و دوم احیا به دماهای پایین‌تر منتقل شدند و همچنین میزان احیای کاتالیست افزایش می‌یابد. با افزودن روتنیوم میزان احیای مرحله اول افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. احیای اکسید روتنیوم در دماهای پایین‌تر از احیای اکسید کبالت رخ می‌دهد و روتنیوم احیا شده، احیای کبالت را بهبود می‌بخشد، همچنین روتنیوم می‌تواند احیای ذرات ریز کبالت را بهتر کند (۱۴).



شکل (۵): الگوی TPR برای کاتالیست‌های C1-C4.

آزمایش TPR در شکل ۵ الگوهای TPR کاتالیست‌های C1 تا C4 ارائه شده است. در کاتالیست با درصد‌های متفاوت کبالت، پیک‌های اول و دوم احیا به ترتیب در گستره دماهای ۲۹۱-۳۷۱ و ۳۵۰-۵۵۰ درجه سانتی‌گراد ظاهر شد، همچنین در پیک‌های TPR تعدادی پیک‌های اضافی مشاهده شد که وجود این پیک‌ها نشان دهنده وجود تعدادی ذرات کبالت است که در دماهای متفاوت احیا می‌شوند. همان‌گونه که در نتایج XRD نشان داده شد، کاتالیست با درصد وزنی پایین‌تر کبالت، ساختار آمورف تری داشته و میزان نقص‌های ساختاری موجود در سطح کاتالیست بیش‌تر است و با افزایش درصد وزنی کبالت تعداد این نقص‌های ساختاری کم‌تر می‌شود و با افزایش مقدار کبالت موجود روی سطح کاتالیست، فرآیند احیا سخت‌تر شده و احیا در دمای بالاتری انجام خواهد شد. معمولاً نسبت هیدروژن مصرف شده در مرحله اول احیا به مرحله دوم ۱ به ۳ است. میزان هیدروژن مصرف شده در مرحله اول کم‌تر از مقدار مورد انتظار است و این مساله را می‌توان به احیای نیترات بیش‌تر از احیای CO_3O_4 نسبت داد. افزایش میزان کبالت در

می‌دهد با افزایش درصد کبالت موجود در کاتالیست میزان هیدروژن مصرفی و درصد احیای کاتالیست افزایش یافته و میزان پراکندگی ذرات کبالت روی سطح پایه کاهش پیدا می‌کند و با افزایش میزان کبالت در کاتالیست اندازه ذرات کبالت افزایش پیدا می‌کند که می‌توان آن را به کلوخه شدن ذرات کبالت نسبت داد (۱۶-۱۵).

جدول (۵): نتایج آنالیز TPR کاتالیست‌های C1-C4.

شماره کاتالیست	TPR پیک‌های		
	1 st (°C)	2 nd (°C)	3 rd (°C)
C1	۳۰۰	۳۵۰	۵۲۰
C2	۳۷۱	۵۱۹/۸	-
C3	۳۳۱	۵۰۲/۵	۵۶۲/۶
C4	۲۹۱/۲	۴۳۳	۵۵۰/۲

TPD

نتایج TPD نمونه‌های کاتالیست کبالت توسط اکسیژن در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان

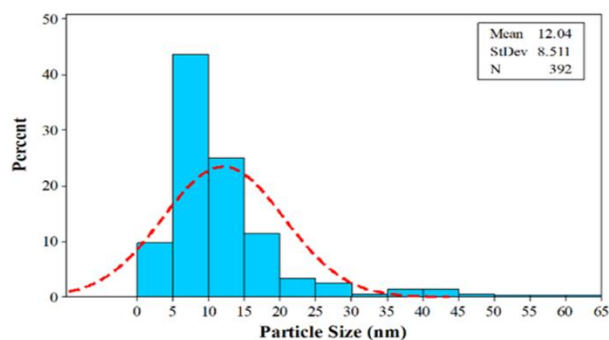
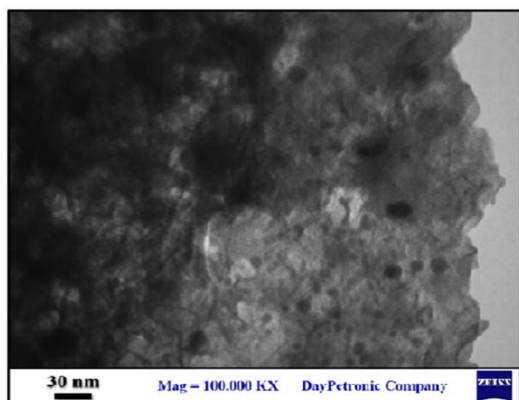
جدول (۶): نتایج آنالیز TPD برای کاتالیست‌های C1-C4.

شماره کاتالیست	H ₂ desorption (μmol/g _{Cat})	O ₂ desorption (μmol/g _{Cat})	Dispersion (%)	particles (nm)
C1	۶۵۷	۱۴۶۳	۳۰/۹۳	۴/۸
C2	۱۴۸۴	۱۹۵۲	۱۷/۵۵	۶/۵
C3	۲۳۴۷	۲۵۳۰	۱۵/۰۵	۷/۷
C4	۳۴۵۷	۲۶۳۶	۳۲/۹۵	۴/۵

TEM

با نتایج آنالیز XRD مطابقت دارد. همچنین، توزیع اندازه ذرات کبالت در نمودار توزیع اندازه ذرات در شکل ۷ نشان داده شده است. لازم به ذکر است مقادیر به دست آمده از نتایج آزمون TEM بزرگ‌تر از نتایج XRD به دلیل تجمع ذرات در طول سنتز است (۱۷).

شکل ۶ نتایج TEM کاتالیست (Co-Ru/GNS) را نشان می‌دهد. لکه‌های تیره شکل کروی نانوذرات اکسید کبالت روی سطح گرافن هستند. تصویر TEM به وضوح نشان می‌دهد که نانوذرات کبالت با اندازه ذرات ۵-۱۵ نانومتر به خوبی بر روی سطح پایه کاتالیست پراکنده شده‌اند. میانگین اندازه ذرات اکسید کبالت برای کاتالیست حدود ۱۲/۰۴ نانومتر است که



شکل (۶): تصاویر TEM کاتالیست Co-RuGNS و نمودار توزیع اندازه ذرات اکسید کبالت.

مایع در تله‌های سرد و گرم جمع آوری گشت. محصولات گازی و همچنین گازهای واکنش نداده از خروجی گاز خارج شد. سرعت جریان گاز خروجی از سیستم هر ساعت با یک فلومتر اندازه‌گیری شده، توسط یک سرنگ گاز خاص نمونه برداری انجام شد و برای تجزیه و تحلیل نتایج به دستگاه کروماتوگرافی تزریق می‌شود. همچنین پس از ۲۴ ساعت فرایند پیوسته، محصولات مایع در تله‌های سرد و گرم جمع آوری و استخراج شد. در نهایت، راکتور خاموش و برای بارگیری کاتالیست بعدی آماده شد.

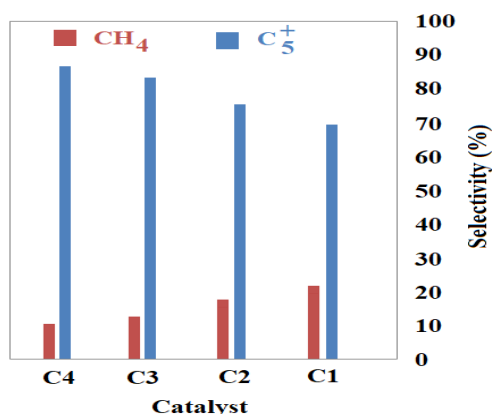
تغییرات درصد تبدیل و فعالیت کاتالیست‌ها با تغییر میزان کبالت در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج، درصد تبدیل و فعالیت به تعداد سایت‌های فعال کبالت بستگی دارد. با افزایش میزان کبالت موجود در کاتالیست تعداد سایت‌های فعال کبالت روی سطح کاتالیست افزایش یافته و در نتیجه درصد تبدیل افزایش پیدا می‌کند.

نتایج فرایند کاتالیستی

برای آزمایش کاتالیست‌ها در راکتور، ۱/۵ گرم از هر کاتالیست در راکتور بارگذاری شد. برای کاهش کاتالیست‌ها، دما به آرامی به ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و هیدروژن در فشار اتمسفر به راکتور وارد شد. مرحله کاهش ۱۶ ساعت به طول انجامید، سپس دمای راکتور به ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای واکنش) کاهش یافت و واکنش در حضور خوراک حاوی گازهای هیدروژن و مونوکسید کربن (H_2/CO) با نسبت ۲ در فشار ۲۵ بار آغاز شد. ترموکوپل نصب شده در بدنه راکتور در نزدیکی منطقه بارگیری کاتالیست نشان داد که اختلاف دما بین این قسمت و ورودی راکتور حدود ۳ درجه سانتی‌گراد است و پس از آن هیچ نقطه‌ی داغ با تجمع حرارتی در بستر کاتالیست دیده نمی‌شود. گازها و محصولات واکنش نداده وارد بخش جداسازی محصول شد و محصولات

جدول (۷): نتایج فرایند فیشر-تروپش با کاتالیست‌های سنتر شده در شرایط ثابت (فشار ۲۵ بار، نسبت H_2/CO برابر ۲ و GHSV برابر $3 L/h.g$).

شماره کاتالیست	دما (°C)	درصد تبدیل CO	انتخاب پذیری		
			CH ₄	C ₂ - C ₄	C ₅ ⁺
C1	۲۲۰	۵۱/۷	۲۰/۴۰	۱۰/۵۰	۶۹/۴۰
	۲۴۰	۴۵۷/۴	۲۴/۳۰	۱۶/۷۰	۶۲/۸۰
C2	۲۲۰	۶۲/۰۴	۱۶/۳۲	۸/۴۰	۷۴/۹۵
	۲۴۰	۶۸/۸۸	۱۹/۴۴	۱۳/۶۳	۶۷/۴۶
C3	۲۲۰	۷۴/۴۵	۱۱/۴۲	۶/۷۲	۸۲/۹۵
	۲۴۰	۸۲/۶۶	۱۳/۶۱	۱۰/۶۹	۷۲/۱۸
C4	۲۲۰	۸۴/۸۷	۹/۱۴	۵/۰۴	۸۶/۶۱
	۲۴۰	۹۴/۲۳	۱۲/۲۵	۸/۰۲	۷۷/۹۵



شکل (۷): انتخاب‌پذیری سنتر CH_4 و C_5^+ در فرایند فیشر-تروپش با کاتالیست‌های C₁-C₄.

همچنین در جدول ۷ نتایج مربوط به درصد تبدیل و گزینش‌پذیری فرآورده‌ها با افزودن ارتقاءدهنده روتنیوم ذکر شده است. قبلاً در نتایج TPR نشان داده شد که با افزودن روتنیوم درصد احیای کاتالیست افزایش پیدا می‌کند و به این ترتیب تعداد سایت‌های فعال کبالت افزایش پیدا می‌کند و با توجه به اینکه میزان فعالیت کاتالیست در فرایند فیشر-تروپش تابعی از سایت‌های احیا شده کبالت فلزی است، فعالیت کاتالیست C₄ نسبت به کاتالیست C₃ افزایش یافت و

تغییرات گزینش‌پذیری کاتالیست‌ها در شکل ۷ ارائه شده است. نتایج مطالعات نشان داد در فرآیند فیشر-تروپش ذرات بزرگ‌تر کبالت گزینش‌پذیری بالاتری نسبت به هیدروکربن‌های سنگین‌تر داشته و ذرات کوچک‌تر نسبت به فرآورده‌های سبک‌تر گزینش‌پذیرتر می‌باشند. این تغییرات را می‌توان با توجه به ساختار ذرات کبالت به این شکل توجیه کرد که در ذرات بزرگ‌تر ممانعت فضایی برای جذب جدایشی مونوکسیدکربن، تشکیل مونومرهای $-CH_2-$ و افزوده شدن این مونومر به زنجیره در حال رشد کم‌تر است، بنابراین رشد زنجیره افزایش پیدا می‌کند، با افزایش میزان کبالت اندازه ذرات کبالت افزایش یافته و در نهایت گزینش‌پذیری فرآورده‌ها به سمت فرآورده‌های هیدروکربنی سنگین C_5^+ پیش می‌رود (۱۸).

نتیجه‌گیری

مساحت سطح بسیار بالای پایه گرافن، سبب پراکندگی بهتر نانوذرات فلز بر سطح پایه، کوچک‌تر شدن اندازه ذرات فلز و افزایش تعداد جایگاه‌های فعال فلزی و افزایش فعالیت کاتالیست می‌شود. این عوامل از کلوخه شدن ذرات فلزی و غیرفعال شدن کاتالیست در حین واکنش فیشر-تروپش جلوگیری می‌کند. احیاءپذیری بهتر کاتالیست سبب افزایش تعداد ذرات فلزی احیاءشده، افزایش تعداد جایگاه‌های فعال فلزی و به دنبال آن افزایش فعالیت کاتالیست می‌شود.

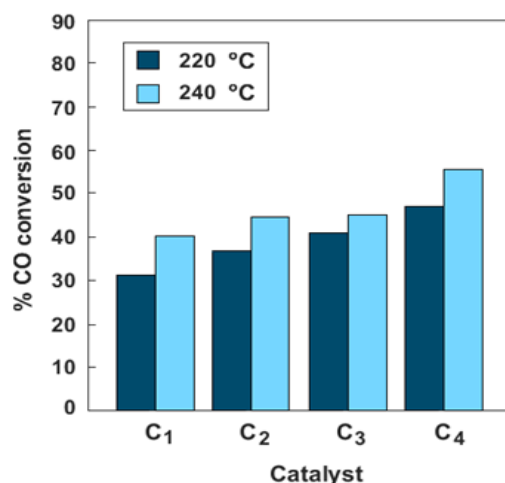
بررسی نتایج حاصل از کاتالیست‌های Co/GNS نشان می‌دهد که فعالیت کاتالیست با افزایش مقدار بارگذاری فلز کبالت از ۱۰٪-۳۰٪ به صورت خطی افزایش می‌یابد. فعالیت کاتالیستی متناسب با تعداد جایگاه‌های فعال سطح است، در نتیجه با افزایش مقدار کبالت بارگذاری شده تعداد جایگاه‌های فعال سطح افزایش یافته و درصد تبدیل مونوکسید کربن نیز افزایش می‌یابد. انتخاب‌پذیری متان و هیدروکربن‌های سبک با افزایش درصد وزنی کبالت کاهش و انتخاب-پذیری C_5^+ افزایش می‌یابد.

گزینش‌پذیری متان برای کاتالیست دو فلزی C_4 کم‌تر از کاتالیست‌های تک فلزی C_3 می‌باشد، درحالی‌که برای گزینش‌پذیری هیدروکربن‌های سنگین C_5^+ عکس این مطلب صادق است و با اضافه شدن روتنیوم گزینش‌پذیری C_5^+ افزایش می‌یابد. در این ساختار، روتنیوم نقش اساسی در خواص کاتالیستی واکنش فیشر-تروپش ایفا می‌کند. علاوه بر این، روتنیوم در قیاس با کبالت تمایل زیادی برای تولید C_5^+ و بلعکس تمایل کمتری برای تولید متان

با توجه به نتایج این فعالیت به میزان ۱۰٪ افزایش پیدا کرد.

همچنین با افزودن روتنیوم گزینش‌پذیری فرآورده‌های سنگین C_5^+ از ۸۲/۹۵ به ۸۶/۶۱ افزایش پیدا می‌کند و گزینش‌پذیری متان از ۱۱/۴۲ به ۹/۱۴ کاهش پیدا می‌کند. روتنیوم نسبت به کبالت گزینش‌پذیری بالاتری نسبت به هیدروکربن‌های سنگین‌تر C_5^+ دارد. بنابراین بالاتر بودن میزان محصولات سنگین‌تر در کاتالیست C_4 نسبت به C_3 را می‌توان به غنی شدن سطح بلورهای کبالت از فلز روتنیوم نسبت داد (۱۹).

همانطور که از شکل ۸ مشاهده می‌شود، افزایش دما موجب افزایش درصد تبدیل CO شد. برای همه کاتالیست‌ها، با افزایش دما در محدوده ۲۲۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد، درصد تبدیل مونوکسید کربن افزایش پیدا کرد. به طور کلی سرعت واکنش فیشر تروپش در دماهای بالا افزایش می‌یابد و در نتیجه سرعت مصرف گاز مونوکسید کربن بیش‌تر می‌شود.



شکل (۸): درصد تبدیل مونوکسید کربن در فرایند فیشر-تروپش با کاتالیست‌های C₁-C₄.

to promote dry reforming of methane (DRM) to syngas production via bimetallic catalyst formulations. *Appl Catal B Environ.*;296(February):120210.

[8] Vasseghian, Y., Le VT, Joo SW, Dragoi EN, Kamyab, H., Chelliapan, S., 2022, et al. Spotlighting graphene-based catalysts for the mitigation of environmentally hazardous pollutants to cleaner production: A review. *J Clean Prod*;365(May).

[9] Pereira Lopes, R., Astruc, D., 2021, Biochar as a support for nanocatalysts and other reagents: Recent advances and applications. Vol. 426, *Coordination Chemistry Reviews*. Elsevier B.V.; 213585 p.

[10] Sasson Bitters, J., He, T., Nestler, E., Senanayake, SD., Chen, JG., Zhang, C., 2022, Utilizing bimetallic catalysts to mitigate coke formation in dry reforming of methane. *J Energy Chem*;68:124–42.

[11] Yang, X., Wang, W., Wu, L., Li, X., Wang, T., Liao, S., 2016, Effect of confinement of TiO₂ nanotubes over the Ru nanoparticles on Fischer-Tropsch synthesis. *Appl Catal A Gen*; 526:45–52.

[12] Ruiz, ON., Brown, NA., 2015, Shiral Fernando KA, Harruff-Miller BA, Gunasekera TS, Bunker CE. Graphene oxide-based nanofilters efficiently remove bacteria from fuel. *Int Biodeterior Biodegrad*; 97:168–78.

[13] Ma, W., Jacobs, G., Sparks, DE., Todici, B., Bukur, DB., Davis, BH., 2020, Quantitative comparison of iron and cobalt based catalysts for the Fischer-Tropsch synthesis under clean and poisoning conditions. *Catal Today*;343(April 2019):125–36.

[14] Li, F., Jiang, X., Zhao, J., Zhang, S., 2015, Graphene oxide: A promising nanomaterial for energy and environmental applications. *Nano Energy*;16:488–515.

[15] Zhang, F., Li, YH., Qi, MY., Yamada, YMA., Anpo, M., Tang, ZR., 2021, et al. Photothermal catalytic CO₂ reduction over nanomaterials. *Chem Catal.*;1(2):272–97.

[16] Wolf, M., Fischer, N., Claeys, M., 2021, Formation of metal-support compounds in cobalt-based Fischer-Tropsch synthesis: A review. *Chem Catal*;1(5):1014–41.

[17] Ghogia, AC., Nzihou, A., Serp, P., Soulantica, K., Pham Minh, D., 2021, Cobalt catalysts on carbon-based materials for Fischer-Tropsch synthesis: a review. *Appl Catal A*

دارد. همچنین با افزایش دما، فعالیت کاتالیست افزایش پیدا می‌کند. افزایش دمای واکنش باعث افزایش غلظت هیدروژن روی سطح کاتالیست شده و به دلیل افزایش تحرک هیدروژن، سرعت واکنش‌های اختتام زنجیره افزایش یافته و تولید هیدروکربن‌های سنگین‌تر، کاهش خواهد یافت.

منابع

[1] Kazemnejad, I., Feizbakhsh, A., Niazi, A., Tavasoli, A., 2019, Highly dispersed cobalt Fischer-Tropsch synthesis catalysts supported on γ -Al₂O₃, CNTs, and graphene nanosheet using chemical vapor deposition. *Int J Ind Chem*;10(4):321–33.

[2] Chernyak, SA., Stolbov, DN., Ivanov, AS., Klokov, S V., Egorova, TB., Maslakov, KI., 2019, et al. Effect of type and localization of nitrogen in graphene nanoflake support on structure and catalytic performance of Co-based Fischer-Tropsch catalysts. *Catal Today*. 2020;357:193–202.

[3] Chernyak, SA., Stolbov, DN., Maslakov, KI., Kazantsev, R.V., Eliseev, OL., Moskovskikh, DO., 2022, et al. Graphene Nanoflake- and Carbon Nanotube-Supported Iron-Potassium 3D-Catalysts for Hydrocarbon Synthesis from Syngas. *Nanomaterials*. 12(24).

[4] Karimi, S., Tavasoli, A., Mortazavi, Y., Karimi, A., 2015, Cobalt supported on Graphene - A promising novel Fischer-Tropsch synthesis catalyst. *Appl Catal A Gen*. 499:188–96.

[5] Taghavi, S., Asghari, A., Tavasoli, A., 2017, Enhancement of performance and stability of Graphene nano sheets supported cobalt catalyst in Fischer-Tropsch synthesis using Graphene functionalization. *Chem Eng Res Des*. 2017;119:198–208.

[6] Li, X., Lu, L., Ru, S., Eom, J., Wang, D., 2022, Samreen, et al. Nanoplastics induce more severe multigenerational life-history trait changes and metabolic responses in marine rotifer *Brachionus plicatilis*: Comparison with microplastics. *J Hazard Mater*. 2023; 449: 131070.

[7] Yentekakis, I.V., Panagiotopoulou, P., Artemakis, G., 2021, A review of recent efforts

Gen.;609(October 2020):117906.

[18] Navalon, S., Dhakshinamoorthy, A., Alvaro, M., Garcia, H., 2016, Metal nanoparticles supported on two-dimensional graphenes as heterogeneous catalysts. *Coord Chem Rev*; 312:99-148.

“Research article”

Synthesis and efficiency of Co and Co-Ru nano catalyst based on graphene in Fischer-Tropsch process

Sara Alinia, Mira Sameil Masoumi*, Ali Haqtalab, Maryam Otadi, Fereydon Yaripour

¹ Department of Chemical Engineering, Technical and Engineering Faculty, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Chemical Engineering, Technical and Engineering Faculty, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³ Department of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

⁴ Department of Chemical Engineering, Technical and Engineering Faculty, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

⁵ Catalytic Research Group, Petrochemical Research and Technology Company, National Petrochemical Industry Company, Tehran, Iran

*Corresponding author: m_masoumi@iau-tnb.ac.ir

Abstract

In this research, to improve the efficiency and environmental sustainability of the Fischer-Tropsch process, graphene nanosheets were used as a base for the synthesis of cobalt catalysts. These catalysts were prepared by wet inoculation method and their properties were investigated by various techniques such as FTIR, ICP, BET, XRD, EDX, TPR and TEM. The effect of changing the weight percentage of cobalt (from 10% to 30%) on the activity of the catalysts was studied. The results showed that the catalyst containing 30% cobalt has the highest activity. For further optimization, 1% by weight of ruthenium was added to this catalyst. The performance of these catalysts was investigated in a fixed bed reactor under 25 bar pressure and temperatures of 220 °C and 240 °C with synthesis gas flow. The results indicate that the use of graphene nanosheets as a catalyst base, in addition to improving the efficiency of the process, leads to the reduction of pollutant emissions and the production of cleaner fuels. Laboratory data showed that these catalysts help to improve carbon monoxide conversion, methane selectivity and product distribution and can have positive environmental impacts.

Keywords: Fischer-Tropsch synthesis, Cobalt catalyst, Cobalt-ruthenium catalyst, Graphene nanoplates, Fixed bed reactor



"مقاله مروری"

مروری بر کاربرد نانومواد در تبدیل زیست توده به بیوسوخت

مجید میرزایی*^۱، طیبه محبی^۲

^۱استادیار گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
^۲دانشجوی دکتری تخصصی، گروه شیمی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
* نویسنده مسئول مکاتبات: mjmirzaei@nri.ac.ir

(دریافت مقاله: ۲۸/۰۲/۱۴۰۳، پذیرش مقاله: ۲۸/۰۵/۱۴۰۳)

چکیده

تولید انرژی جهانی که به شدت تحت تأثیر استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی قرار گرفته، اهمیت یافتن منابع جایگزین انرژی با پتانسیل بالا را برجسته کرده است. تلاش‌های مداومی در جریان است تا به چالش‌های مربوط به مراحل ابتدایی قبل از تبدیل به بیوانرژی نظیر پیش‌تیمار، هیدرولیز آنزیمی و پرورش زیست توده پاسخ داده شود. نانوفناوری قادر است با استفاده از سایت‌های فعال منحصر به فرد خود برای انواع واکنش‌ها و فرآیندها، مشکلات مرتبط با این منابع زیست توده را مرتفع سازد. در این مقاله مروری، پتانسیل نانوفناوری که به عنوان کمک یا افزودنی در این زیست توده‌ها برای تقویت کارایی تولید بیوانرژی ادغام شده، بررسی شده است. مبانی نانومواد به همراه کاربردهای متنوع آن‌ها در زمینه بیوانرژی به طور مفصل مورد بحث قرار گرفته‌اند. همچنین، بهینه‌سازی و افزایش تولید بیوانرژی از لیگنوسلولز، میکروجلبک‌ها و فاضلاب با استفاده از نانومواد به طور کامل ارزیابی شده است. ویژگی‌های برجسته این نانومواد که به بهبود عملکرد بیوسوخت‌ها، بیودیزل، آنزیم‌ها و سلول‌های سوختی میکروبی کمک می‌کنند نیز به طور دقیق مورد نقد و بررسی قرار گرفته‌اند. در پایان، بر اساس مطالعات موجود، روندهای آینده و نیازهای تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی: انرژی زیستی، زیست توده، بیوسوخت، فناوری نانو

مقدمه

مصرف اولیه انرژی در حال حاضر به طور عمده توسط سوخت‌های فسیلی سنتی مانند زغال سنگ، نفت و گاز انجام می‌شود (۱)، که این امر به مشکلاتی در زمینه پایداری مانند کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، تأثیرات منفی بر محیط زیست و نوسانات شدید قیمت منجر می‌گردد. افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرات اقلیمی جهانی و نیاز فزاینده به انرژی، متخصصان را به فکر توسعه راه‌حل‌های جدید برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی انداخته است. در میان منابع انرژی جایگزین، زیست توده تقریباً ۸۰٪ از انرژی تولیدی توسط حامل‌های انرژی تجدیدپذیر جهانی را به خود اختصاص داده است (۲). زیست توده قابلیت ذخیره‌سازی دارد و می‌توان از آن برای تولید گرما، سوخت و برق در زمان نیاز استفاده کرد. این نوع انرژی به بیوانرژی معروف است که شامل سوخت‌های جامد، مایع یا گازی تولید شده از منابع بیولوژیکی می‌باشد (۳).

بیوالکل‌های به دست آمده از ذرت، گندم، چغندر قند و نیشکر و بیودیزل‌های تولیدی از طریق ترانس استریفیکاسیون روغن‌های استخراجی از کلزا، نخل، سویا و آفتابگردان، نمونه‌هایی از بیوانرژی‌های تولید شده از مواد اولیه نسل اول هستند. مواد اولیه غیرغذایی مانند زیست توده لیگنوسلولزی و میکروجلبک‌ها به ترتیب به عنوان مواد اولیه نسل دوم و سوم برای تولید بیوانرژی به کار می‌روند. زیست توده می‌تواند با استفاده از فناوری‌های تبدیل حرارتی مانند احتراق، گازی‌سازی و پیرولیز پردازش شود که

در نتیجه آن به بیو-نفت (سوخت مایع) و بیوچار (باقیمانده جامد) تبدیل می‌شود، در حالی که سین‌گاز، که می‌تواند به بیوسوخت‌ها و برق تبدیل شود، از طریق گازی‌سازی زیست توده به دست می‌آید (۴). همچنین، هضم بی‌هوازی به صورت تجاری برای تولید بیوگاز، که یک نوع دیگر از بیوانرژی است، به کار گرفته شده است. بیوگاز تولیدی برای تأمین گرما و برق مورد استفاده قرار می‌گیرد و نقش مهمی در تأمین انرژی لازم برای مناطق روستایی جهت پخت و پز و روشنایی دارد (۴). علاوه بر این، بیوانرژی می‌تواند توسط سلول‌های سوختی میکروبی (MFCها) که از میکروارگانیسم‌های طبیعی با توانایی تولید برق بیولوژیکی استفاده می‌کنند، تولید شود. با وجود پیشرفت‌های علمی فراوان، همچنان چالش‌های فنی متعددی بر سر راه تولید بیوانرژی وجود دارد که باید برطرف شوند تا بتواند با سوخت‌های فسیلی رقابت کند. به عنوان مثال، در زمینه تولید بیوسوخت‌های میکروجلبکی، مسائلی مانند کشت مؤثر و کارآمد جلبک‌ها در مقیاس بزرگ، حفظ فرهنگ مورد نظر در برابر گونه‌های بیگانه، هزینه برداشت جلبک‌ها، کارایی انرژی و بهترین روش تبدیل به بیوسوخت‌ها هنوز مبهم است (۴). علاوه بر این، قبل از ادامه به فرآیندهای تولید بیوسوخت، نیاز به روش‌های پیش‌تیمار برای استخراج قندهای قابل تخمیر از زیست توده لیگنوسلولزی است (۵). چالش‌هایی مانند کمبود زیرساخت‌های موجود برای فرآیند تولید و هزینه‌های بالای تولید در مقایسه با بیوسوخت‌های نسل مربوط به پیش‌تیمار، آنزیم‌ها و تخمیر می‌تواند تولید بیوانرژی را کارآمدتر و اقتصادی‌تر سازد (۶).

می‌کنند، تقویت شده‌اند. نانوذرات علاوه بر عوامل کاتالیزوری که به کار می‌روند، در افزایش فعالیت کنسرسیون‌های بی‌هوازی، کاهش ترکیبات مهارکننده و انتقال الکترون‌ها برای بهبود بازده فرآیندها نقش دارند. نانوموادى مانند نانوکریستال‌ها، نانوقطرات و نانواهنرباها نیز به عنوان نانوافزودنی‌ها برای افزایش کارایی ترکیب بیوسوخت با بنزین و دیزل استفاده می‌شوند (۱۲).

این مقاله به طور جامع رویکردها و کاربردهای اخیر مرتبط با فرآیندهای تولید بیوانرژی که نانوفناوری در آنها ادغام شده است را مرور می‌کند. اصول نانوفناوری به همراه کاربردها و مزایای انواع نانوذرات معرفی می‌شوند. سپس بخش بعدی به کاربردهای نانوفناوری در زیست توده از جمله زیست توده میکروجلبکی و لیگنوسلولزی می‌پردازد. پس از آن، پیشرفت‌های اخیر در صنعت بیوسوخت مبتنی بر نانوفناوری از جمله نانوکاتالیزورها برای بازدهی بالاتر بیوسوخت و نانوافزودنی‌ها برای عملکرد بهتر ترکیبات سوخت ارائه می‌شوند. تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی از طریق سلول‌های سوختی میکروبی با کمک نانوذرات نیز بحث می‌شود. علاوه بر این، کارهای آینده و چالش‌ها برجسته شده‌اند تا بینش‌هایی برای توسعه آینده تولید بیوانرژی با استفاده از نانومواد فراهم کنند. این پژوهش با بررسی دقیق و تحلیل مقایسه‌ای، به پیشرفت عرصه انرژی زیستی کمک شایانی می‌کند و با ارائه یک چهارچوب شفاف، راهنمایی‌های لازم را به پژوهشگران علاقه‌مند در زمینه بهره‌گیری از فناوری نانو برای افزایش تولید انرژی زیستی ارائه می‌دهد.

نانومواد، ستون فقرات نانوعلم و کاربردهای نانوفناوری به شمار می‌آیند. کاربرد علم و فناوری نانساختار، حوزه‌ای وسیع و چندرشته‌ای از فعالیت‌های تحقیقاتی و توسعه‌ای را در بر می‌گیرد که در دهه‌های اخیر به شکل چشمگیری در سراسر جهان گسترش یافته است. مواد نانومقیاس به مجموعه‌ای از موادی گفته می‌شود که حداقل یک بعد آن‌ها کم‌تر از حدود ۱۰۰ نانومتر باشد. این ابعاد بسیار ریز، نسبت سطح به حجم بالایی را فراهم می‌کند و تعداد سایت‌های فعال برای واکنش‌ها و فرآیندهای متنوع را افزایش می‌دهد (۷). این نانوذرات همچنین قادر به ارائه مورفولوژی‌های متفاوتی هستند که کاربردهای آن‌ها را در زمینه‌های مختلف توسعه داده است. علاوه بر این، مواد نانساختاری در مقایسه با ذرات بزرگتر، واکنش‌های سریع‌تری با مولکول‌های دیگر دارند (۸). وجود نانومواد تأثیر گسترده‌ای بر بازارهای تجاری داشته و با توجه به خواص منحصر به فرد مقیاس نوری آن‌ها که در زمینه‌هایی مانند بیوانرژی، الکترونیک، میکاترونیک، پزشکی، داروسازی، مایعات یونی، پلیمر و بسیاری دیگر مؤثر است، آگاهی از نانومواد افزایش خواهد یافت (۹).

کاربردهای مستقیم و غیرمستقیم متعددی از نانومواد در تولید بیوانرژی گزارش شده است. نانومواد به دلیل داشتن سطوح وسیع (۹) و ویژگی‌های خاصی مانند فعالیت کاتالیزوری بالا، بلورینگی، دوام، ذخیره‌سازی مؤثر (۱۰)، ثبات و ظرفیت جذب (۱۱)، گزینه‌های برجسته‌ای در سیستم‌های مختلف بیوسوخت به شمار می‌روند. تأثیرات نانوذرات مانند نانوفیبرها، نانوذرات فلزی و نانولوله‌ها بر واکنش‌های متابولیکی فرآیندهای بیولوژیکی که بیوسوخت تولید

اصول نانومواد

بازطراحی یک ماده در سطح مولکولی، که به آن نانومواد مهندسی شده هم گفته می‌شود، فرآیندی است که در آن ماده‌ای به خاطر اندازه کوچک و خواص منحصر به فردش تغییر می‌کند، خواصی که معمولاً در حالت‌های متعارف و بالک آن مشاهده نمی‌شوند. ویژگی‌های خاص این مواد در مقیاس نانو، مانند سطح نسبتاً بزرگ‌شان، باعث پدید آمدن نظریه‌های جدیدی در مورد اثرات کوانتومی می‌شود. نانومواد به دلیل داشتن نسبت سطح به حجم بسیار بالاتر نسبت به حالت‌های متعارف، می‌توانند واکنش‌های شیمیایی قوی‌تری ایجاد کنند که این خود نتیجه‌ی تخصصی‌شان است. در نظر گرفتن واکنش‌ها در سطح نانو، خواص و ویژگی‌های مواد مانند رفتارهای نوین نوری، الکتریکی و مغناطیسی به دلیل اثرات کوانتومی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند (۱۳). اصطلاحات رایج برای توصیف مواد نانو ساختار شامل نانو ساختارهای صفر بعدی (0-D)، یک بعدی (1-D)، دو بعدی (2-D) و سه بعدی (3-D) است. این بعدیت‌های نانومواد با استفاده از دانه‌های بسیار ریز با اندازه کم‌تر از ۵۰ نانومتر یا محدود به ۵۰ نانومتر مشخص می‌شوند. می‌توان ابعاد مختلفی را شکل داد، مانند صفر بعدی (مثل خوشه‌های اتمی، فیلامنت‌ها و مجموعه‌های خوشه‌ای)، یک بعدی (مثل چندلایه‌ها)، دو بعدی (مثل لایه‌های رویی بسیار ریز یا لایه‌های دهن شده) و سه بعدی (مثل مواد نانوفازی که از دانه‌های نانومتری مساوی تشکیل شده‌اند). نانولوله‌ها، دندریمرها، نقاط کوانتومی و فولرن‌ها از انواع رایج نانومواد هستند. نانومواد کاربردهایی در زمینه نانو تکنولوژی دارند که در آن

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوتی از مواد شیمیایی با اندازه عادی نشان می‌دهند (۱۴). اصلی‌ترین عنصر در ساختار نانو، نانوذرات هستند. نانوذرات (NPs) با اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت می‌توانند از طریق روش‌های سنتزی متعددی تولید شوند که کیفیت بالایی از NPs را به ارمغان می‌آورند، اما فرآیندهای تولید مانند بیوسنتز همچنان در حال پیشرفت برای بهبود یافتگی هستند (۱۵). تاکنون، نانوذرات آلی به طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، با استفاده از لیپوزوم‌ها، پلیمرزوم‌ها، ساختارهای پلیمری و میسل‌ها در روش‌های تصویربرداری یا انتقال دارو و ژن. در عین حال، نانوذرات غیرآلی نیز در چند سال اخیر به دلیل داشتن خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد که به مواد و اندازه‌شان بستگی دارد و با نانوذرات سنتی لیپیدی یا پلیمری قابل مقایسه نیستند، مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از دلایل جذابیت نانوذرات غیرآلی، خواص فیزیکی آن‌ها مانند نوری و مغناطیسی است، به علاوه خواص شیمیایی مانند بی‌تأثیری، پایداری و آسانی در افزودن عملکردهای جدید (۱۶). بنابراین، نانوذرات غیرآلی مانند مغناطیسی، طلا، نقاط کوانتومی و نانولوله‌های کربنی، پتانسیل وسیعی در کاربردهای نوین مختلف دارند. به عنوان نمونه، نانولوله‌های کربنی، نانوذرات اکسید فلز و نانوذرات مغناطیسی (MNPs) در تولید انرژی زیستی به کار گرفته می‌شوند. جدول ۱ مزایا و معایب نانوذرات مغناطیسی را به اختصار بیان می‌کند.

محیط زیست به یک موضوع مهم در جستجو برای یافتن منابع جایگزین برای تولید بیوانرژی تبدیل شده است. زیست توده لیگنوسلولزی شامل گیاهان و باقیمانده‌های کشاورزی می‌شود که از سلولز، همی سلولز، لیگنین و دیگر اجزاء (مانند پروتئین‌ها، پکتین‌ها و مواد استخراجی) تشکیل شده‌اند. برآورد شده که تنها ۳ درصد از ۱۳ میلیارد تن باقیمانده‌های گیاهی در سال به محصولات تولیدی تبدیل شده و بقیه برای تجزیه رها شده‌اند (۱۹). بنابراین، باید این باقیمانده‌های لیگنوسلولزی را با تبدیل آن‌ها به بیوانرژی به شکل مناسبی مدیریت کرد، که محققان نشان داده‌اند ترکیب لیگنوسلولز توانایی تبدیل مونومرها یا بلوک‌های سازنده خود به بیوسوخت‌ها مانند بیواتانول و بیودیزل را دارد. از سوی دیگر، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که میکروارگانیسم‌های فیلامنتوس میکروسکوپی فتوسنتزی، که به عنوان "میکروجلبک‌ها" شناخته می‌شوند، قادر به تبدیل لیسیدهای جلبکی به بیوسوخت‌ها هستند. این بیوسوخت‌های مبتنی بر میکروجلبک‌ها دارای خواص شیمیایی مشابه با سوخت‌های فسیلی هستند و به عنوان یک منبع طبیعی بسیار امیدوارکننده برای تولید بیوانرژی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، استفاده از نانوتکنولوژی در این زیست توده‌های جایگزین می‌تواند به طور چشمگیری به تولید بیوانرژی کمک کند و به عنوان یک ابزار کمکی برای افزایش کارایی در زمینه‌های مختلف مانند تولید، منابع انرژی، حمل و نقل، مکاترونیک، مراقبت‌های بهداشتی و فناوری‌های دارویی عمل کند.

استفاده از لیگنوسلولز برای تبدیل سلولز به بیوسوخت

مزایا	معایب
قابلیت تجزیه زیستی عالی	توانایی پراکندگی ضعیف
آماده برای سفارشی‌سازی	
سهولت در جداسازی	هزینه بالای مواد سنتز
سهولت در سنتز	
توانایی اتصال به ترکیبات هدف	محدودیت در فرآیندهای
چندگانه	تولید انبوه
سمیت پایین سلولی برای زیست توده	
نسبت سطح به حجم بالا	حرکت وابسته به
حفظ ثبات پس از تغییرات مکانیکی،	سازگاری‌های محیط
فیزیکی و شیمیایی	

نانوذرات مغناطیسی (MNPs) که دارای یک هسته مغناطیسی هستند، مانند مگنتیت (Fe_3O_4) یا ماگمیت ($\gamma-Fe_2O_3$)، از جمله نانومواد غیرآلی بسیار مهم به شمار می‌روند. این نانوذرات به دلیل خواص مغناطیسی که دارند و بازیابی آسانی که فراهم می‌کنند، بیش‌ترین کاربرد را در میان تمام نانوذرات مورد بررسی برای تولید بیوانرژی دارند. آنزیم‌هایی که در تولید بیودیزل یا بیواتانول به کار می‌روند، می‌توانند روی MNPs به عنوان حامل ثابت شوند. خاصیت جبرانی بالا و ویژگی‌های پارامغناطیسی عالی MNPs در فرآیند تولید متان، آن‌ها را برای تولید بیوگاز نیز مفید می‌سازد (۱۷). اما فلزاتی مانند کبالت و نیکل که در ساخت این نانوذرات به کار می‌روند، ممکن است در فرآیند اکسیداسیون ترکیبات سمی و حساسی تولید کنند، به همین دلیل نیاز به تحقیقات بیش‌تری است تا این مشکلات حل شوند (۱۸).

زیست توده

افزایش شدید تولید CO_2 در جهان به دلیل استفاده از سوخت‌های فسیلی در حال اتمام است. علاوه بر این، دغدغه‌های مربوط به امنیت انرژی و آلودگی

تبدیل سلولز به بیوسوخت‌ها با چالش‌هایی مانند ساختار مقاوم سلولز و سختی دیواره سلولی در زیست توده لیگنوسلولزی مواجه است. اولین گام شامل تجزیه پلیمر سلولز به مونومرهای تشکیل‌دهنده، جداسازی لیگنین از سلولز و تبدیل آن به آنزیم‌های سلولولیتیک، شکستن آنزیم‌های سلولولیتیک به کربوهیدرات‌ها و تبدیل قندهای هیدرولیز شده به بیوسوخت در فرآیند تخمیر است (۲۰). در برخی موارد، فرآیندهای هیدرولیز آنزیمی و تخمیر، مانند هضم همزمان (SS)، هضم همزمان و هم‌تخمیر (SSCF) و فرآیند بیوپردازش یکپارچه (CB)، با هم ترکیب می‌شوند تا مراحل اصلی درگیر در تولید بیوسوخت از زیست توده لیگنوسلولزی کاهش پیدا کنند.

یک مطالعه قابلیت‌های نانو تکنولوژی را به نمایش گذاشته که در آن از نانوذرات مغناطیسی (MNPs) با پوشش اسیدی به عنوان کاتالیزورهایی برای تجزیه سلوبیوز (β -گلوکز) از زیست توده لیگنوسلولزی استفاده می‌شود (۲۱). با این حال، یکی از مشکلات پراکندگی برخی نانوذرات، سختی پراکنده شدن آن‌ها در محلول‌های آبی است، جایی که یون‌های هیدرونیوم به دلیل خاصیت خیس‌پذیری نمونه کارایی ندارند. نتایج نشان داد که MNPs با پوشش اسیدی و دارای ۶ درصد گوگرد، تبدیل سلوبیوز را تا ۹۶ درصد افزایش می‌دهند که این میزان بسیار بیشتر از تبدیل معمولی (۳۲/۸ درصد) بدون کاتالیزور است (۲۱). وجود این MNPs با پوشش اسیدی می‌تواند واکنش هیدرولیز را با خصوصیات نانویوکاتالیزوری خود برای ثابت‌سازی آنزیم‌های متفاوت بهبود بخشد. علاوه بر این، نسبت

² Lai

³ Erdem

⁴ Su

داده‌اند که دو نانوذره سیلیکای مزوپور (MS-NPs) را روی سلولز تجاری مورد ارزیابی قرار دادند. این MS-NPs قابلیت پیوند شیمیایی برای ثابت‌سازی سلولاز روی سطح منافذی خود را دارند که می‌توانند تبدیل سلولز به گلوکز را تا ۸۰ درصد انجام دهند. به طور متناوب، نانوذرات مبتنی بر نیکل (Ni-NPs) نیز به طور معمول برای فرآیند هیدروژناسیون و تبدیل گلوکز به مولکول سوربیتول استفاده می‌شوند (۲۷). گازی‌سازی زیست توده برای تولید گاز سنتز، که به عنوان سین‌گاز (CO + H₂) شناخته می‌شود، می‌تواند به عنوان واسطه‌هایی که به بیوسوخت‌ها تبدیل می‌شوند، مفید باشد. قرار دادن این آنزیم‌های ناپایدار در فرآیندهای کاتالیزوری با دما و فشار عملیاتی بالا ممکن است منجر به کاهش بازده تولید بیوسوخت‌ها شود.

ترتیب ۵۸/۳، ۳۵/۶ و ۳۵/۸٪ بوده است. جدول ۲ کارایی‌های MNPs در هیدرولیز زیست توده لیگنوسلولزی را به اختصار نشان می‌دهد. با این حال، محدودیت‌های MNPs با پیشرفت‌هایی در نانوبیوکاتالیزورها با استفاده از نانوذرات مبتنی بر سیلیکا (Si-NPs)، نانوذرات مبتنی بر نیکل (Ni-NPs) و نانولوله‌های کربنی برطرف شده‌اند. Si-NPs معمولاً برای پوشش سطح نانوذرات به کار می‌روند و وظیفه ثابت‌سازی آنزیم‌های لیگنوسلولولیتیک مانند سلولاز را دارند. گزارش‌ها نشان می‌دهند که Si-NPs فعالیت کاتالیزوری را در واکنش هضم همزمان برای تولید بیواتانول از سلولاز *Trichoderma viride* بهبود می‌بخشند (۲۵). عواملی مانند اندازه ذره، اندازه منافذ و مساحت سطح نیز به عنوان نکات کلیدی مطرح شده‌اند، همانطور که چانگ^۵ و همکاران (۲۶) نشان

جدول (۲): مقایسه مطالعاتی درباره کارآمدی نانو ذرات مغناطیسی

مراجع	بازده (%)	شرایط کاری	نوع زیست توده	نانو ذرات مغناطیسی
[۲۲]	۵۰	۱/۰ گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۳ ساعت	سلولز بدون شکل	نانو ذرات سیلیکای حمایت‌شده با سولفونات، Fe ₃ O ₄ -SBA-SO ₃ H
[۲۲]	۲۶	۱/۰ گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۳ ساعت	سلولز	نانو ذرات سیلیکای حمایت‌شده با سولفونات، Fe ₃ O ₄ -SBA-SO ₃ H
[۲۲]	۹۵	۱/۰ گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۳ ساعت	نشاسته	نانو ذرات سیلیکای حمایت‌شده با سولفونات، Fe ₃ O ₄ -SBA-SO ₃ H
[۲۲]	۴۵	۱/۵ گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۳ ساعت	کلوخه ذرت	نانو ذرات سیلیکای حمایت‌شده با سولفونات، Fe ₃ O ₄ -SBA-SO ₃ H
[۲۱]	±۰/۹ ۶۶/۳	۲/۵٪ (وزن/حجم) بیوماس، در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت	کاه گندم	نانو ذرات پرفلوآکیل سولفونیک، PFS-MNPs
[۲۱]	۶۱ ±۱/۲	۲/۵٪ (وزن/حجم) بیوماس، در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت	کاه گندم	نانو ذرات آکیل سولفونیک، AS-MNPs
[۲۴]	۵۸/۳	۰/۰۲۷ گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب، ۱۶۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد	بگاس نیشکر	نانو ذرات اسید کربنی، C-SO ₃ H-Fe ₃ O ₄ -MNPs
[۲۴]	۵۸/۳	۰/۰۲۷ گرم، ۱۵ میلی‌لیتر آب، ۱۶۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد	پوست جاتروفا	نانو ذرات اسید کربنی، C-SO ₃ H-Fe ₃ O ₄ -MNPs

نسبت به زیست توده‌های لیگنوسلولزی تبدیل کرده است (۳۱). با این وجود، تولید سوخت‌های زیستی بر پایه جلبک‌های میکروسکوپی با چالش‌هایی همچون دشواری در مدیریت تولید در مقیاس صنعتی و هزینه‌های بالای تولید و برداشت زیست توده روبرو است، که این امر نیازمند به‌کارگیری فناوری‌های کارآمد برای تبدیل به سوخت‌های زیستی می‌باشد.

مطالعات پیشین امکان استفاده از نانوذرات مغناطیسی برای شکستن دیواره سلولی میکروجلبک‌ها را با قرار دادن آنزیم سلولاز روی این نانوذرات و پس از آن استخراج چربی‌ها نشان داده‌اند (۳۲). این فرآیند به دیواره سلولی میکروجلبک‌ها که از سلولز تشکیل شده است اجازه می‌دهد تا هیدرولیز شود و چربی‌های موجود آزاد گردند. در شرایط بهینه، بالاترین بازده بیودیزل (۹۳/۵۶٪) به دست آمد. یک مطالعه مشابه نیز از نانوذرات مغناطیسی استفاده کرد که با اکسید فلزی MgO جایگزین شده بود و به آنزیم سلولاز متصل شده بود تا فرآیند هیدرولیز سلولز از جلبک *Chlorella sp. CYB2* را بهبود بخشد. نتایج نشان داد که بازده گلوکز به دست آمده ۹۱٪ بود که توسط فرآیندهای اکسید فلزی انجام شده بود. در همین راستا، نعمتیان و همکاران (۳۳) استفاده از نانوکاتالیزورهای فوق‌پارامغناطیسی برای تبدیل روغن‌های زیستی استخراج شده از جلبک *Chlorella vulgaris* به بیودیزل را گزارش کرده‌اند. نتایج نشان داد که واکنش ترانس‌استریفیکاسیون با استفاده از ۳-آمینوپروپیل تری‌اتیلن‌سیلان-گلو تار آلدئید (MNPs-AP-GA) ۶۹/۸ درصد وزنی بود. این مطالعه همچنین نشان داد که پیوند کووالانسی لپاز به عنوان یک روش مطمئن برای افزایش بارگذاری آنزیم و بهره‌وری عمل می‌کند.

یک تحقیق جدید نشان داده است که استفاده از نانوذرات نیکل-کبالتیت بر روی ثبات آنزیم‌های قارچ *آسپرژیلوس فومیگاتوس* در غلظت‌های مختلفی از نانوذرات تأثیر دارد. مطالعه نشان داد که با اضافه کردن ۱ میلی‌مولار نانوذرات نیکل-کبالتیت، فعالیت آنزیم‌های اندوگلوکاناز، بتا-گلوکوزیداز و زایلاناز به ترتیب ۴۹٪، ۵۳٪ و ۱۹/۸٪ افزایش یافته است (۲۸). در مقابل، نانولوله‌های کربنی به دلیل ویژگی‌های برجسته‌شان در زمینه‌های الکتریکی، حرارتی و مقاومت مکانیکی معروف هستند (۲۹). اکثر تحقیقات نشان داده‌اند که نانولوله‌های کربنی چنددیواره نسبت به نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره به دلیل هماهنگی بهتر با ساختار آن‌ها، که باعث بهبود فعالیت‌های کاتالیزوری آنزیم‌های ثابت شده، عملکرد بهتری داشته‌اند (۲۹). این نانولوله‌های چند دیواره در تجزیه سلولز از قارچ *آسپرژیلوس نیجر* با کارایی ۸۵٪ تا ۹۷٪ برتری نشان داده و توانسته‌اند فعالیت قابل بازیافت خود را پس از شش دوره تجزیه در ۵۲٪ تا ۷۵٪ حفظ کنند (۳۰).

کاربرد نانوتکنولوژی در تولید انرژی زیستی از جلبک‌های میکروسکوپی

جلبک‌های میکروسکوپی به عنوان ماده خام سوخت‌های زیستی نسل سوم با تنوع بالای گونه‌هایی که قابلیت فتوسنتز دارند، مورد توجه وسیع پژوهشگران قرار گرفته‌اند (۳۰). قابلیت رشد این جلبک‌ها در شرایط سخت محیطی، جذب بالای دی‌اکسید کربن و تولید سریع، آن‌ها را به یک گزینه جایگزین برای تولید سوخت‌های زیستی تبدیل کرده است. همچنین، ترکیبات غنی جلبک‌های میکروسکوپی شامل پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها، چربی‌ها و کاروتنوئیدها، آن‌ها را به گزینه‌ای برتر

جلبک‌ها و تسهیل فرآیند بازکشت از این میکرو جلبک‌های استخراج شده می‌باشد (۳۵).

به‌کارگیری نانومواد به عنوان نانوکاتالیزور در پردازش میکرو جلبک‌ها

این نانومواد خاص با ایجاد یک وضعیت استرس خفیف، فرآیند فتوسنتز و رشد میکرو جلبک‌ها را تقویت می‌کنند و در عین حال باعث انباشت چربی‌ها می‌شوند بدون اینکه به سلول‌ها آسیب برسانند. تحقیقات متعددی نانوذرات را به عنوان یک نوع ماده مغذی در محیط کشت‌ها (مانند آهن و منیزیم) مورد استفاده قرار داده‌اند. نانوذرات آهن همچنین انواع متفاوتی از گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) را از طریق واکنشی شبیه به فتون تولید می‌کنند که استرس اکسیداتیو را بر میکرو جلبک‌ها وارد می‌آورد. اما، مطالعه‌ای از کانگ^۷ و همکاران (۳۶) نشان داده است که غلظت بالای نانوذرات TiO_2 در حضور نور می‌تواند به حیات سلول کمک کند. از سوی دیگر، نانوذرات Mg-aminoclay نیز برای رشد گونه‌های *Chlorella vulgaris* و *Chlorella sp. KR-1* به صورت مثبت آزمایش شده‌اند، چرا که این نانوذرات آمینو کلی از کاتیون‌های فلزی مانند Ca^{2+} ، Mg^{2+} و Fe^{3+} تشکیل شده‌اند که به صورت کووالانسی در مرکز نانوذرات پیوند خورده‌اند. استفاده از مکمل‌های $MgSO_4$ -NPs نشان داده است که در بهبود فرآیند فتوسنتز و کاهش مصرف گلیسرول در کشت میکسوتروفیک *C. vulgaris* مؤثر است. به‌کارگیری $MgSO_4$ -NPs باعث فلوکولاسیون میکرو جلبک‌ها می‌شود، نفوذ نور را کاهش می‌دهد و محتوای کلروفیل را افزایش می‌دهد. تأثیر این نانوذرات نیز در قالب

علاوه بر این، تقویت تولید بیوگاز و بیوهیدروژن از میکرو جلبک‌ها با کمک نانوذرات مغناطیسی و فرآیندهای مایکروویو نیز مورد بررسی قرار گرفته است. تولید بیوگاز و هیدروژن به ترتیب ۳۲۸ میلی‌لیتر و ۵۱٫۵٪ بوده‌اند (۳۴). با این حال، هنوز مطالعات کافی در مورد امکان‌سنجی و تجزیه و تحلیل اقتصادی این نانوذرات در تولیدات مقیاس بزرگ وجود ندارد، که این یک فرصت برای پژوهشگران در زمینه نانومواد است.

نقش نانومواد در ارتقاء تولید سوخت‌های زیستی

پیشرفت‌های حاصل در زمینه نانومواد با افزودن گروه‌های عملکردی متنوع (مانند گروه‌های مبتنی بر آمینو، نیکل، هیدروفوبیک، طلا) به منظور تقویت تولید سوخت‌های زیستی صورت گرفته است. نانومواد همچنین توانایی افزایش فعالیت آنزیم‌ها را دارند که با ورود آن‌ها به محیط کشت امکان‌پذیر می‌شود. خصوصیات این نانومواد نشان داده‌اند که می‌توانند در شرایط کشت، تنش ایجاد کنند، مانند وجود غلظت بالای فلزات (مانند آهن) که بر تجمع چربی‌ها در جلبک‌های *Chlorella vulgaris* تأثیر می‌گذارد. ورود این نانوذرات با ترکیبات سیلیکا و اکسید آهن به محیط کشت باعث ایجاد برش قوی بین نانوذرات و سلول‌ها می‌شود، چرا که این نانوذرات به عنوان رقبایی برای جذب مواد مغذی عمل می‌کنند. در زمینه استخراج و بازیابی چربی‌ها، این نانوذرات توانایی برجسته‌ای در استخراج به جای استفاده از حلال‌های سنتی (مانند کلروفرم، متانول و هگزان) نشان داده‌اند. مزیت‌های استفاده از این نانوذرات شامل جلوگیری از مرگ

تصفیه‌ای معادل ۳/۳ برابر و بازیابی ۶۶ درصدی دست یافته است (۳۹). این غشاء نانوفیبری تغییر یافته با کیتوسان قادر است پروتئین‌های آلوده را از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی به خود ببندد و در طول فرآیند جداسازی، مولکول‌های C-phycoyanin مورد نظر را تصفیه کند. در یک مطالعه اخیر توسط چیا^۹ و همکاران (۴۰)، غشاء نانوفیبری تغییر یافته با کیتوسان در فعالیت ضد باکتریایی علیه باکتری *Escherichia coli* مورد استفاده قرار گرفته که تا ۹۹/۵ درصد به طور مؤثر فعالیت ضدباکتریایی اعمال کرده است. بار پلی‌کاتیونی موجود در این غشاء نانوفیبری تغییر یافته با کیتوسان می‌تواند با سایت‌های بار منفی روی دیواره سلول باکتریایی پیوند الکترواستاتیکی ایجاد کند، که این امر به تغییر شکل تراوایی دیواره سلول و در نهایت به لیز و مرگ سلول منجر می‌شود. نانومواد دیگری مانند نانولوله‌های کربنی، مزوپوروس‌ها، نانوفیبرها، نانوفیبرهای الکترواسپان، سیلیکا-آهنی و پشتیان‌های مبتنی بر طلا نیز به عنوان نانوذرات مهندسی شده برای افزایش ثابت‌سازی آنزیم‌ها و ارتقاء تولید سوخت‌های زیستی به کار رفته‌اند (۴۱). با این حال، همچنان کمبود دانش و تحقیقات در مورد شرایط بهینه برای آنزیم‌های ثابت شده ایده‌آل جهت تبدیل به بیودیزل وجود دارد. استفاده از نانومواد، به خصوص نانولوله‌های کربنی مانند CuO ، Al_2O_3 ، ZnO و TiO_2 ، با چالش‌هایی مواجه است که از جمله آن‌ها سمیت برای میکروارگانیسم‌ها است که شامل استرس اکسیداتیو، تجمع و عدم تأمین یکنواخت مواد مغذی و هزینه‌های بالای سنتز این نانومواد می‌شود. علاوه بر این، در سطح

آنزیم‌های ثابت شده از طریق پیوندهای کووالانسی برای تولید بیودیزل مورد استفاده قرار گرفته است. گزارش‌های پیشین نشان داده‌اند که لیپازهای موجود در پانکراس خوک، لیپاز *Candida rugosa* و لیپاز *Pseudomonas cepacia* تحت تأثیر نانوذرات مغناطیسی که با گروه‌های آمینو تغییر یافته‌اند برای واکنش ترانس‌استریفیکاسیون^۸ آنزیمی قرار گرفته و توانسته‌اند تبدیل بیودیزل را تا ۶۷٪ افزایش دهند (۳۷). در یک مطالعه مشابه، نانوذرات مغناطیسی تغییر یافته با آمینو با استفاده از گلو تار آلدئید به عنوان عامل اتصال مورد استفاده قرار گرفته که به افزایش لیپاز ثابت شده بر روی سطح نانوذرات کمک کرده است. نتایج نشان داده‌اند که حضور این عامل اتصال روی نانوذرات در دستیابی به تبدیل بیودیزل تا ۹۰٪ مؤثر بوده و خواص برجسته گلو تار آلدئید سطح دسترسی برای ثابت‌سازی آنزیم را فعال کرده است. همچنین، نانوذرات مغناطیسی هیدروفوبیک برای ترانس‌استریفیکاسیون لیپاز ثابت شده به بیودیزل مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این نانوذرات هیدروفوبیک می‌توانند لیپازها را جذب کنند یا لیپاز را بر روی سطوح هیدروفوبیک خود با استفاده از درپوش‌ها و زنجیره‌های پروتئینی ثابت کنند. تبدیل روغن استخراج شده به استرهای متیل اسید چرب تا ۷۰٪ بوده و نرخ تولید بیودیزل تا ۴۳/۵ گرم در لیتر در ساعت در شرایط بهینه‌سازی شده به دست آمده است (۳۸).

تقویت و جداسازی پروتئین C-phycoyanin از میکروارگانیسم *Spirulina platensis* با استفاده از یک غشاء نانوفیبری تغییر یافته با کیتوسان نیز به ضریب

^۹ Cheah

^۸ استری شدن یا استریفیکاسیون یک نام عمومی برای واکنشی است که دو ماده یک مولکول استر را ایجاد می‌نمایند

شیمی مولکولی، مکانیزم‌های داخلی‌سازی این نانوذرات عملکردی هنوز به طور کامل شناخته شده نیستند. این مسئله از محققان می‌خواهد که به ارزیابی بیشتر این مشکلات بپردازند، که تاکنون تحلیل‌های اقتصادی، ایمنی زیست‌محیطی و تحلیل چرخه حیات (LCA) به عنوان موضوعات مورد توجه و فرآیندهای استاندارد برای ارزیابی مناسب این کمبودها مطرح هستند.

استفاده از بیودیزل مخلوط با نانو-افزودنی‌ها در موتورهای دیزل

نانومواد به عنوان نانو-افزودنی‌هایی برای خواص سوخت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، زیرا خواص بارز نانوسیال آن‌ها می‌تواند خواص متعددی مانند ویسکوزیته، نقطه اشتعال، چگالی و عدد ستان را بهبود بخشد. یک آزمایش تأثیر خواص فیزیکوشیمیایی بیودیزل را با استفاده از نانوذرات اکسید فلزی به عنوان افزودنی سوخت مورد بررسی قرار داده است. این نانوذرات اکسید فلزی به عنوان یک بافر اکسیژن عمل می‌کنند که منجر به فرآیند اکسیداسیون همزمان هیدروکربن‌ها می‌شود و در نتیجه انتشار اکسیدهای نیتروژن را کاهش می‌دهد. نانوذرات اکسید فلزی دارای نسبت سطح به حجم بالایی هستند که بازدهی سوخت بیودیزل را در مقایسه با فرم‌های پودری معمولی بهبود می‌بخشد. نتایج نشان داده‌اند که مقدار بیش‌تری از نانوذرات اکسید سریم مقاومت لایه مایع و ویسکوزیته را افزایش می‌دهد، در حالی که ویسکوزیته پایین سوخت نمی‌تواند پمپ تزریق سوخت را روانکاری کند که منجر به نشی و فرسودگی آسان می‌شود و در نهایت باعث کاهش

عملکرد تحویل سوخت می‌گردد. این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که نانوذرات اکسید فلزی از ثبات حرارتی برخوردارند که به اکسیداسیون هیدروکربن‌ها و کاهش اکسید نیتروژن کمک می‌کنند. با افزودن نانو-افزودنی‌ها به سوخت، شاهد بهبود شماره ستان و ارزش حرارتی هستیم که این امر منجر به افزایش کارایی احتراق می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که نانوذرات مبتنی بر آلومینیوم و سیلیکون به بهبود کیفیت احتراق در موتورهای بیودیزل کمک می‌کنند (۴۲). مطالعه‌ای دیگر نیز با استفاده از نانوذرات اکسید روی در ترکیب با بیودیزل حاوی استئارین موم دیزل، بهبود قابل توجهی در ارزش حرارتی و شاخص ستان را گزارش کرده است (۴۳). استفاده از نانولوله‌های کربنی توسط سینگ^{۱۰} نیز نشان داد که با افزایش غلظت این نانولوله‌ها، شاخص ستان بهبود می‌یابد. نانوذرات دیگری مانند نانوذرات اکسید آهن نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که مزایای آن‌ها در افزایش شماره ستان و ارزش حرارتی برای دستیابی به کیفیت احتراق ایده‌آل و کاهش انتشار آلاینده‌ها از موتورهای دیزل را نشان می‌دهد (۴۴). نانوسیال‌ها به عنوان افزودنی‌ها نیز برای بهبود کارایی حرارتی ترمز موتورهای دیزل بسیار امیدوارکننده هستند، چرا که باعث احتراق کاملتر به دلیل نرخ تبخیر بالاتر، کاهش تأخیر در اشتعال، دمای شعله بالا و حفظ طولانی مدت شعله می‌شوند. افزودن این نانو-افزودنی‌ها به سوخت بیودیزل می‌تواند مشکلاتی مانند انتشار مونواکسید کربن، انتشار هیدروکربن، انتشار NO_x، احتراق و تبخیر را بهبود بخشد. با تمام فوایدی که دارند، هزینه‌های بالای تولید نانوذرات همچنان یکی از موانع اصلی برای ورود

MFC چیست؟

در سال ۱۹۱۱، پاتر برای اولین بار ایده تولید برق از طریق میکروب‌ها را مطرح کرد و پس از آن، کوهن در سال ۱۹۳۱ اولین نیم‌سلول‌های سوختی میکروبی را توسعه داد. MFC فرآیندی است که در آن میکروارگانیسم‌ها یا میکروب‌های تولیدکننده الکتروسیسته با مواد آلی واکنش‌های الکتروشیمیایی دارند و الکترون‌ها از ماده اولیه به الکتروُد آند منتقل می‌شوند. این فرآیند به نام انتقال الکترون خارج سلولی (EET) شناخته می‌شود (۴۸). میکروب‌های تولیدکننده الکتروسیسته، میکروارگانیسم‌هایی هستند که به عنوان کاتالیزورهای اصلی بیولوژیکی عمل می‌کنند و الکترون‌های حاصل از متابولیسم ترکیبات آلی را از طریق واکنش‌های شیمیایی متعدد به الکتروُد منتقل می‌کنند، مثلاً از طریق سیتوکروم‌های نوع c یا نانوسیم‌های باکتریایی [۴۹]. نمونه‌هایی از این میکروب‌ها شامل باکتری‌هایی مانند *Geobacter sulfurreducens*، *Shewanella putrefaciens*، *Enterobacter Clostridium cellulolyticum*، *Rhodospirillum rubrum*، *Clostridium butyricum* و قارچ‌هایی مانند *Aspergillus niger*، *Aspergillus awamori*، *Phanerochaete chrysosporium* هستند. میکروب‌های روی آند وظیفه تولید الکترون و پروتون را با استفاده از مواد آلی بر عهده دارند. پروتون‌های تولید شده از طریق غشاء عبور کرده و الکترون‌ها از طریق مدار الکتریکی به سمت کاتد حرکت می‌کنند، جایی که واکنش کاهش اکسیژن (ORR) اتفاق می‌افتد (۵۰). در نهایت، این فرآیند منجر به تولید بیوالکترسیسته می‌شود. یک سلول سوختی میکروبی استاندارد (شکل ۱) از دو الکتروُد

نانوسیال‌ها به بازار است. تحقیقات در زمینه استفاده از نانوذرات به عنوان افزودنی‌های سوخت هنوز به حدی نرسیده‌اند که بتوانند به طور کامل اجرایی شوند. مسائلی مانند تجمع، ته‌نشینی و سایش نانوذرات همچنان بدون راه‌حل باقی مانده‌اند و برای بهبود استفاده از نانوسیال‌ها نیاز به شناسایی دقیق‌تری داریم. علاوه بر این، کمبود داده‌های تجربی و درک ناکافی از مکانیزم‌های نظری انتقال حرارت از جمله مواردی هستند که باید قبل از تجاری‌سازی این نانو-افزودنی‌ها در موتورهای دیزل حل شوند (۴۵).

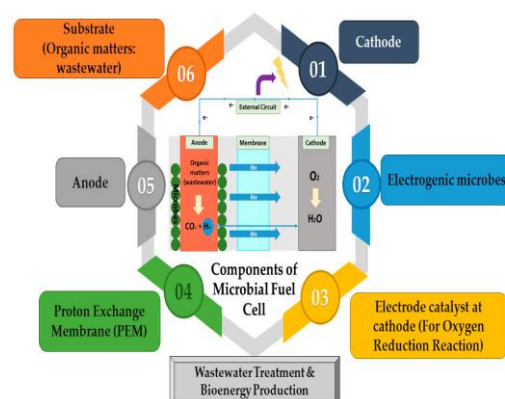
سیستم بیوالکتروشیمیایی (BES)

سیستم بیوالکتروشیمیایی (BES) ترکیبی از فرآیندهای زیستی و الکتروشیمیایی است که در آن از باکتری‌های فعال الکتروشیمیایی برای تجزیه مواد آلی در منابع متنوعی مانند پساب‌های صنعتی و زباله‌های زیست توده استفاده می‌شود. محصولات نهایی شامل برق، هیدروژن یا ترکیبات با ارزش دیگری مانند اتانول، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و اسید فرمیک (CH_2O_2) هستند. BES به طور گسترده برای تصفیه فاضلاب و همزمان تولید بیوانرژی به کار می‌رود. از این رو، BES به عنوان یک فناوری بسیار امیدبخش برای مقابله با آلودگی آب و بحران انرژی جهانی شناخته می‌شود (۴۶). سلول‌های سوختی میکروبی اولیه (MFC)، MFC فتوسنتزی، MFC گیاهی و بیوفتولتائیک‌ها از انواع مختلف BES هستند (۴۷). به دلیل عملیات ساده و شرایط ملایم، MFC امروزه به عنوان یک منبع جدید و جذاب از بیوانرژی تجدیدپذیر آینده، توجه زیادی از محققان در سراسر جهان را به خود جذب کرده است.

است. آند که مهم‌ترین بخش MFC به شمار می‌رود و باکتری‌هایی که به آن متصل هستند، امکان جریان یافتن الکترون‌ها را از طریق واکنش‌های الکتروشیمیایی باکتری‌ها در هنگام تجزیه زیرلایه‌ها فراهم می‌کند. یکی از جنبه‌های حیاتی آند، توانایی باکتری‌ها در تسهیل تشکیل بیوفیلم‌ها و افزایش احتمال وقوع انتقال الکترون خارج سلولی (EET) است. متداول‌ترین موادی که در ساخت آند به کار می‌روند، گرافیت یا کربن هستند که در اشکال و اندازه‌های مختلفی مانند نانولوله‌های کربنی، میله‌ها، نمد، پارچه، کاغذ و صفحات موجودند (۵۲). در مقابل، کاتد الکترودی است که واکنش کاهش اکسیژن (ORR) در آن اتفاق می‌افتد. به طور کلی، ORR که در کاتد رخ می‌دهد، عامل محدودکننده‌ای برای MFC است و بر دانسیته توان حداکثر، کارایی و عملکرد کل MFC تأثیر می‌گذارد. کاتالیزورها برای بهبود ORR کاتدی ادغام شده‌اند. کاتالیزور مورد ترجیح برای کاتد پلاتین (Pt) است که علت آن مساحت سطح بالا است، اما هزینه تولید آن بالاست. به همین دلیل، گرافیت که ارزان‌تر از پلاتین است و دارای مساحت سطح بزرگی است به عنوان ماده کاتدی برای افزایش کارایی MFC استفاده می‌شود (۵۳). جزء دیگر MFC، غشاء تبادل پروتون (PEM) است که یک غشاء فیزیکی است که آند و کاتد را از هم جدا می‌کند. انواع مختلفی از غشاءها وجود دارند؛ به عنوان مثال، غشاء تبادل کاتیونی یا آنیونی، الیاف نایلونی، غشاء تترافلتراسیون، غشاء میکروفیلتراسیون، الیاف شیشه‌ای و پارچه‌های متخلخل، اما اکثر غشاءها از نظر هزینه مقرون به صرفه نیستند. این امر محققان را به جستجو برای مواد کم‌هزینه برای استفاده در تولید غشاء و همزمان افزایش

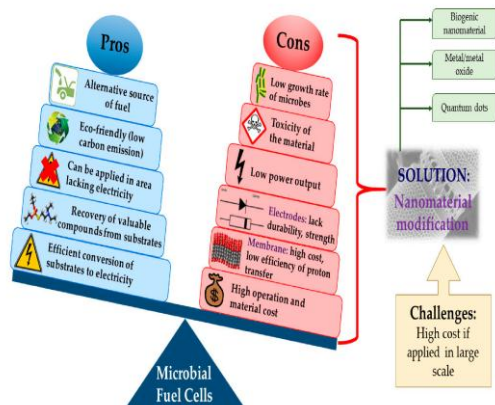
(آند و کاتد) و یک غشاء نیمه‌تراوا که به آن غشاء تبادل پروتون گفته می‌شود، ساخته شده است. مواد مختلفی مانند فلزات برای ساخت الکترودها به کار رفته‌اند. پرکاربردترین مواد برای الکترودها، کربن و گرافیت هستند. در ساخت الکترودهای بدون کربن، فلزاتی مانند استیل ضدزنگ، کبالت، مس، نقره، نیکل، تیتانیوم و طلا استفاده می‌شوند. عوامل متعددی وجود دارند که بر تولید بیوالکتریسته توسط MFC تأثیر می‌گذارند، از جمله مساحت سطح، پایداری، تخلخل و دوام آند، کاتد و غشاء. الکترودهای ایده‌آل باید دارای ویژگی‌های زیر باشند (۵۱):

- رسانایی الکتریکی عالی
- پایداری حرارتی بالا
- مقاومت پایین
- سازگاری بیولوژیکی مناسب با سیستم
- پایداری قوی و مقاومت در برابر خوردگی ناشی از مواد شیمیایی مورد استفاده در MFC
- مساحت سطح وسیع
- استحکام مکانیکی مناسب
- هزینه اقتصادی



شکل (۱): اجزای پیل سوختی میکروبی

محفظه آندی یک سلول سوختی میکروبی از یک آند، باکتری‌ها و یک زیرلایه مانند پساب تشکیل شده



شکل (۲): مزایا و معایب پیل های سوختی

به تازگی، نانوتکنولوژی و استفاده از نانومواد تحولی در ساخت اجزای سلول های سوختی میکروبی ایجاد کرده اند تا عملکرد و کارآمدی MFC های سنتی را از جنبه هایی مانند رسانایی الکترونی، دانسیته توان، هزینه، پایداری حرارتی، سرعت واکنش کاهش اکسیژن (ORR) و مقاومت در برابر خوردگی بهبود ببخشند (۵۶)، به خصوص در زمینه بهبود الکترودها (آند و کاتد) با استفاده از نانومواد. این امر به این دلیل است که مواد به کار رفته در ساخت الکترودها، که جزء اصلی MFC به شمار می روند، نقش مهمی در تعیین کلی عملکرد MFC دارند. در نتیجه، تولید بیوانرژی از طریق MFC بهبود خواهد یافت. نمونه هایی از نانومواد که می توانند عملکرد MFC را بهبود ببخشند شامل نانوذرات فلزی (مثل مس، طلا، پلاتین، پالادیوم و نقره)، نقاط کوانتومی (مثل CdS، CdSe، ZnS، اکسیدهای فلزی) مثل TiO_2 ، CeO_2 ، ZnO ، SiO_2 ، Al_2O_3 و MnO_2 ، گرافن (نانومواد دوبعدی)، نانولوله های کربنی و نانوکامپوزیت ها (مواد چندفازی) می باشند (۵۷). با این حال، استفاده از نانومواد برای بهبود اجزای MFC در مقیاس آزمایشی

کارایی آن به عنوان مانع بین آند و کاتد و نرخ انتقال پروتون ترغیب می کند.

بهبود اجزای MFC با استفاده از نانومواد

برای تولید بیوانرژی در مقیاس آزمایشی با استفاده از سلول های سوختی میکروبی، چندین چالش وجود دارد که باید حل شوند. اولین و مهم ترین مشکل، دانسیته توان پایین است که برای تأمین انرژی یک جمعیت بزرگ کافی نیست. حداکثر تراکم قدرتی که توسط الکترودهای سنتی به دست آمده، حدود 26 mw/m^2 برای میله های گرافیتی سه بعدی و $611/5 \pm 6 \text{ mw/m}^2$ برای پارچه کربنی دوبعدی است (۵۴). دما نیز بر عملکرد MFC تأثیر می گذارد، زیرا میکروبها نمی توانند در دماهای بسیار پایین یا بسیار بالا رشد کرده و فعالیت های خود را انجام دهند. بنابراین، MFC باید در دمایی ایده آل که برای میکروبها مناسب باشد، اجرا شود. علاوه بر این، فرآیند تولید اجزای MFC که پیچیده، سمی و پرهزینه است، می تواند مانع از کاربردهای عملی و استفاده اقتصادی از MFC شود (۵۵). به همین دلیل، محققان در جستجوی مواد جایگزین یا جدید برای تولید اجزای اصلی MFC مانند آند، کاتد و جداکننده هستند تا عملکرد را بهبود بخشیده و رسانایی الکترون ها را افزایش دهند. شکل ۲ مزایا و معایب MFC را به تصویر می کشد.

به دلیل هزینه‌های بالای تولید هنوز در مرحله توسعه قرار دارد.

پژوهش‌های آتی

برای ایجاد یک سیستم تولید بیوانرژی که از نظر اقتصادی به صرفه باشد، باید ارزیابی‌های فنی و اقتصادی انجام شود که در آن هزینه‌های سنتز نانوذرات، که می‌تواند بر کل فرآیند تولید تأثیر بگذارد، در نظر گرفته شود. این موضوع همچنین بر توسعه نانوذراتی با قابلیت اجرای اقتصادی تأکید دارد تا کل فرآیند برای تجاری‌سازی از نظر اقتصادی ممکن باشد. انجام تحقیقات در مقیاس پایلوت برای بررسی امکان‌پذیری استفاده از نانوذرات در تولید بیوانرژی در مقیاس بزرگ ضروری است. علاوه بر این، تحقیقات آینده تنها به منابع و تولید بیوانرژی محدود نمی‌شوند، بلکه نانو تکنولوژی می‌تواند با کمک به زمینه‌های تبدیل، حمل‌ونقل، کارایی انرژی و ذخیره‌سازی، و همچنین استفاده از محصول نهایی بیوانرژی، محدودیت‌های فنی در علوم و مهندسی را برطرف کند. از طرف دیگر، هنوز مطالعات محدودی در استفاده از نانوذرات به عنوان افزودنی‌های سوخت وجود دارد و روش‌هایی برای حل مشکلات تجمع، فرسایش و ته‌نشینی نانوذرات همچنان مورد نیاز است. کمبود نتایج عملی و درک مکانیزم‌های انتقال حرارت برای تجاری‌سازی این نانو افزودنی‌ها در موتورهای دیزل وجود دارد. علاوه بر این، باید ارزیابی‌های ایمنی انجام شود، زیرا با افزایش استفاده از نانوذرات در کاربردهای بیوسوخت، اثرات قرار گرفتن در معرض آن‌ها از نظر انسان و محیط زیست بیش‌تر مشهود شده است. سمیت نانوذرات با استفاده از روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که در آن بیش‌تر

تحقیقات *in vitro* نانوسمیت شامل می‌شود (۵۸). با این حال، باید تعاملات *in vivo* به طور گسترده مورد مطالعه قرار گیرند، به ویژه بر روی نانوذراتی که برای تولید بیوانرژی و بیوسوخت استفاده می‌شوند، تمرکز کند. این مسئله برای میکروارگانیسم‌ها نیز صدق می‌کند، زیرا نیاز است نانوذراتی تولید شوند که از نظر ایمنی بالا، عدم سمیت و سازگاری با آنزیم‌ها و میکروب‌ها مناسب باشند. به عنوان نمونه، نانوذرات برای میکروجلبک‌ها مضر هستند چون باعث تجمع، تنش اکسیداتیو و عدم تعادل در تأمین مواد مغذی می‌شوند. از این رو، انجام مطالعات غربالگری برای نانوذرات ضروری است تا تأثیرات متنوع آن‌ها بر فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی را در طیف وسیعی از غلظت‌ها مورد بررسی قرار دهیم. همچنین، باید تحقیقاتی در سطح مولکولی صورت گیرد تا مکانیزم‌های درگیر بین نانوذرات و پروتئین‌ها در فرآیند تولید را کشف کنیم. در نهایت، این امکان را خواهیم داشت که شرایط بهینه‌ای برای فرآیند تولید انرژی زیستی تعیین کنیم.

نتیجه‌گیری

کمبود سوخت‌های فسیلی و تقاضای بالای انرژی باعث شده تا محققان به دنبال توسعه منابع جایگزین انرژی باشند. در میان فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر، بیوانرژی حاصل از زیست توده مزایای ویژه‌ای دارد. برای پاسخگویی به نیازهای انرژی آینده و غلبه بر چالش‌های فناوری تولید بیوانرژی، استفاده از نانومواد در تولید بیوانرژی مورد مطالعه قرار گرفته است، زیرا می‌تواند هم کیفیت و هم میزان بیوانرژی تولید شده از زیست توده، بیوسوخت و سلول‌های سوختی میکروبی را بهبود ببخشد. فرآیند تولید بیوانرژی

in Germany, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 801-820.

[4] Li, Y., Khanal, S.K., 2016, *Bioenergy: principles and applications*, John Wiley & Sons.

[5] Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., Li, Y., 2014, Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production, *Progress in energy and combustion science*, 42, 35-53.

[6] Patumsawad, S., 2011, 2nd generation biofuels: technical challenge and R&D opportunity in Thailand, *J Sustain Energy Environ (Special Issue)*, 1, 47-50.

[7] Hosseinpour, A., Abadchi, M.R., Mirzaee, M., Tabar, F.A., Ramezanzadeh, B., 2021, Recent advances and future perspectives for carbon nanostructures reinforced organic coating for anti-corrosion application, *Surfaces and Interfaces*, 23, 100994.

[8] Contreras, J., Rodriguez, E., Taha-Tijerina, J., 2017, Nanotechnology applications for electrical transformers—A review, *Electric Power Systems Research*, 143, 573-584.

[9] Mirzaee, M., Vaezi, M., Palizdar, Y., 2016, Synthesis and characterization of silver doped hydroxyapatite nanocomposite coatings and evaluation of their antibacterial and corrosion resistance properties in simulated body fluid, *Materials Science and Engineering: C*, 69, 675-684.

[10] Mirzaee, M., Dehghanian, C., Bokati, K.S., 2018, One-step electrodeposition of reduced graphene oxide on three-dimensional porous nano nickel-copper foam electrode and its use in supercapacitor, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 813, 152-162.

[11] Mirzaee, M., Dehghanian, C., Bokati, K.S., 2018, ERGO grown on Ni-Cu foam frameworks by constant potential method as high performance electrodes for supercapacitors, *Applied Surface Science*, 436, 1050-1060.

[12] Palaniappan, K., 2017, An overview of applications of nanotechnology in biofuel production, *World Appl Sci J*, 35, 1305-1311.

[13] Bogani, L., Wernsdorfer, W., 2008, Molecular spintronics using single-molecule magnets, *Nature materials*, 7, 179-186.

می‌تواند با استفاده از نانوذرات به روش‌های مختلف تقویت شود. به عنوان مثال، استفاده از نانوذرات مغناطیسی با عملکرد اسیدی می‌تواند واکنش هیدرولیز زیست توده را با استفاده از آنزیم‌های متصل شده بهبود ببخشد. همچنین، نانوذرات اکسید فلزی به عنوان نانوافزودنی‌ها برای افزایش عملکرد احتراق و ترکیب بیوسوخت با دیزل معمولی آزمایش شده‌اند. BES یا به طور دقیق‌تر MFC، که برای تصفیه فاضلاب و تولید بیوانرژی به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود، نیز با ساخت اجزای آن با استفاده از نانومواد برای بهبود عملکرد و کارایی اصلاح شده است. با این حال، هنوز شکاف‌های فنی در زمینه بیوانرژی مبتنی بر نانوتکنولوژی وجود دارد، که در آن تعداد محدودی مطالعه در مورد استفاده از نانوذرات به عنوان افزودنی‌های سوخت، سمیت *in vitro* نانوذرات و مکانیزم‌های مولکولی نانوذرات-پروتئین انجام شده است. در نهایت، تحلیل‌های اقتصادی، ارزیابی‌های ایمنی و تحلیل چرخه حیات (LCA) برای استفاده از نانومواد در تولید بیوانرژی برای فراهم کردن دیدگاه‌ها و راهنمایی‌های تحقیقات آینده ضروری هستند.

منابع

[1] Senjyu, T., Howlader, A.M., 2016, Operational aspects of distribution systems with massive DER penetrations, *Integration of distributed energy resources in power systems*, pp. 51-76.

[2] Lijó, L., González-García, S., Lovarelli, D., Moreira, M.T., Feijoo, G., Bacenetti, J., 2019, Life cycle assessment of renewable energy production from biomass, *Life Cycle Assessment of Energy Systems and Sustainable Energy Technologies: The Italian Experience*, 81-98.

[3] Strzalka, R., Schneider, D., Eicker, U., 2017, Current status of bioenergy technologies

- wastes catalyzed by a magnetic carbonaceous acid with microwave, *Scientific Reports*, 5, 17538.
- [25] Papadopoulou, A., D. Zarafeta, A.P. Galanopoulou, Stamatis, H., 2019, Enhanced catalytic performance of *Trichoderma reesei* cellulase immobilized on magnetic hierarchical porous carbon nanoparticles, *The Protein Journal*, 38, 640-648.
- [26] Chang, R.H.-Y., J. Jang, Wu, K.C.-W., 2011, Cellulase immobilized mesoporous silica nanocatalysts for efficient cellulose-to-glucose conversion, *Green Chemistry*, 13.
- [27] Kobayashi, H., Y. Hosaka, K. Hara, B. Feng, Y. Hirosaki, Fukuoka, A., 2014, Control of selectivity, activity and durability of simple supported nickel catalysts for hydrolytic hydrogenation of cellulose, *Green chemistry*, 16, 637-644.
- [28] Srivastava, N., R. Rawat, R. Sharma, H.S. Oberoi, M. Srivastava, Singh, J., 2014, Effect of nickel-cobaltite nanoparticles on production and thermostability of cellulases from newly isolated thermotolerant *Aspergillus fumigatus* NS (Class: Eurotiomycetes), *Applied biochemistry and biotechnology*, 174, 1092-1103.
- [29] Ahmad, R., Khare, S.K., 2018, Immobilization of *Aspergillus niger* cellulase on multiwall carbon nanotubes for cellulose hydrolysis, *Bioresource technology*, 252, 72-75.
- [30] Mubarak, N., J. Wong, K. Tan, J. Sahu, E. Abdullah, N. Jayakumar, Ganesan, P., 2014, Immobilization of cellulase enzyme on functionalized multiwall carbon nanotubes, *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 107, 124-131.
- [31] Khoo, K.S., S.Y. Lee, C.W. Ooi, X. Fu, X. Miao, T.C. Ling, Show, P.L., 2019, Recent advances in biorefinery of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*, *Bioresource technology*, 288, 121606.
- [32] Durairasan, S., S.A. Razack, A. Manickam, A. Munusamy, M.B. Syed, M.Y. Ali, G.M. Ahmed, Mohiuddin, M.S., 2016, Direct conversion of lipids from marine microalga *C. salina* to biodiesel with
- [14] Tiwari, J.N., Tiwari, R.N., Kim, K.S., 2012, Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices, *Progress in Materials Science*, 57, 724-803.
- [15] Siddiqi, K.S., Husen, A., 2016, Fabrication of metal and metal oxide nanoparticles by algae and their toxic effects, *Nanoscale research letters*, 11, 1-11.
- [16] Lohse, S.E., Murphy, C.J., 2012, Applications of colloidal inorganic nanoparticles: from medicine to energy, *Journal of the American Chemical Society*, 134, 15607-15620.
- [17] Antunes, F.A.F., Gaikwad, S., A.P. Ingle, R. Pandit, J.C. dos Santos, M. Rai, S.S. da Silva., 2017, Bioenergy and biofuels: nanotechnological solutions for sustainable production, *Nanotechnology for bioenergy and biofuel production*, 3-18.
- [18] Valko, M., H. Morris, Cronin, M., 2005, Metals, toxicity and oxidative stress, *Current medicinal chemistry*, 12, 1161-1208.
- [19] Morganti, P., 2013, Saving the environment by nanotechnology and waste raw materials: Use of chitin nanofibrils by EU research projects, *J. Appl. Cosmetol*, 31, 89-96.
- [20] Rahim, A.H.A., K.S. Khoo, N.M. Yunus, Hamzah, W.S.W., 2019, Ether-functionalized ionic liquids as solvent for *Gigantochloa scortechini* dissolution, *AIP conference proceedings*, AIP Publishing.
- [21] Peña, L., K. Hohn, J. Li, X. Sun, Wang, D., 2014, Synthesis of propyl-sulfonic acid-functionalized nanoparticles as catalysts for cellobiose hydrolysis, *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 5, 241.
- [22] Lai, D.-m., L. Deng, Q.-x. Guo, Fu, Y., 2011, Hydrolysis of biomass by magnetic solid acid, *Energy & Environmental Science*, 4, 3552-3557.
- [23] Erdem, S., B. Erdem, Öksüzoğlu, R.M., 2018, Magnetic nano-sized solid acid catalyst bearing sulfonic acid groups for biodiesel synthesis, *Open Chemistry*, 16, 923-929.
- [24] Su, T.-C., Z. Fang, F. Zhang, J. Luo, X.-K. Li., 2015, Hydrolysis of selected tropical plant

- journal of biological macromolecules, 126, 569-577.
- [41] Tran, D.-T., C.-L. Chen, Chang, J.-S., 2012, Immobilization of Burkholderia sp. lipase on a ferric silica nanocomposite for biodiesel production, Journal of biotechnology, 158, 112-119.
- [42] Mehta, R.N., M. Chakraborty, Parikh, P.A., 2014, Impact of hydrogen generated by splitting water with nano-silicon and nano-aluminum on diesel engine performance, International journal of hydrogen energy, 39, 8098-8105.
- [43] Karthikeyan, S., A. Elango, Prathima, A., 2014, Performance and emission study on zinc oxide nano particles addition with pomolion stearin wax biodiesel of CI engine.
- [44] Singh, N., Bharj, R., 2015, Effect of CNT-emulsified fuel on performance emission and combustion characteristics of four stroke diesel engine, International Journal of Current Engineering and Technology, 5, 477-485.
- [45] Mehta, R.N., M. Chakraborty, Parikh, P.A., 2014, Nanofuels: Combustion, engine performance and emissions, Fuel, 120, 91-97.
- [46] Li, Z., Q. Fu, H. Kobayashi, Xiao, S., 2018, Biofuel production from bioelectrochemical systems, Bioreactors for microbial biomass and energy conversion, 435-461.
- [47] Gul, M.M., Ahmad, K.S., 2019, Bioelectrochemical systems: sustainable bio-energy powerhouses, Biosensors and Bioelectronics, 142, 111576.
- [48] Kalathil, S., Pant, D., 2016, Nanotechnology to rescue bacterial bidirectional extracellular electron transfer in bioelectrochemical systems, RSC advances, 6, 30582-30597.
- [49] Quan, X., B. Sun, Xu, H., 2015, Anode decoration with biogenic Pd nanoparticles improved power generation in microbial fuel cells, Electrochimica Acta, 182, 815-820.
- [50] Rahimnejad, M., A. Adhami, S. Darvari, A. Zirepour, Oh, S.-E., 2015, Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review, Alexandria Engineering Journal, 54, 745-756.
- immobilised enzymes using magnetic nanoparticle, Journal of environmental chemical engineering, 4, 1393-1398.
- [33] Nematian, T., Z. Salehi, Shakeri, A., 2020, Conversion of bio-oil extracted from *Chlorella vulgaris* micro algae to biodiesel via modified superparamagnetic nano-biocatalyst, Renewable Energy, 146, 1796-1804.
- [34] Zaidi, A.A., R. Feng, A. Malik, S.Z. Khan, Y. Shi, A.J. Bhutta, Shah, A.H., 2019, Combining microwave pretreatment with iron oxide nanoparticles enhanced biogas and hydrogen yield from green algae, Processes, 7, 24.
- [35] Lin, V., P. Mahoney, Gibson, K., 2009, Nanofarming technology extracts biofuel oil without harming algae, News released from Office of Public Affairs.
- [36] Kang, N.K., B. Lee, G.-G. Choi, M. Moon, M.S. Park, J. Lim, Yang, J.-W., 2014, Enhancing lipid productivity of *Chlorella vulgaris* using oxidative stress by TiO₂ nanoparticles, Korean Journal of Chemical Engineering, 31, 861-867.
- [37] Wang, X., P. Dou, P. Zhao, C. Zhao, Y. Ding, Xu, P., 2009, Immobilization of lipases onto magnetic Fe₃O₄ nanoparticles for application in biodiesel production, ChemSusChem: Chemistry & Sustainability Energy & Materials, 2, 947-950.
- [38] Liu, C.-H., C.-C. Huang, Y.-W. Wang, D.-J. Lee, Chang, J.-S., 2012, Biodiesel production by enzymatic transesterification catalyzed by Burkholderia lipase immobilized on hydrophobic magnetic particles, Applied Energy, 100, 41-46.
- [39] Ng, I.-S., M.S. Tang, P.L. Show, Z.-M. Chiou, J.-C. Tsai, Chang, Y.-K., 2019, Enhancement of C-phycoerythrin purity using negative chromatography with chitosan-modified nanofiber membrane, International journal of biological macromolecules, 132, 615-628.
- [40] Cheah, W.Y., P.-L. Show, I.-S. Ng, G.-Y. Lin, C.-Y. Chiu, Chang, Y.-K., 2019, Antibacterial activity of quaternized chitosan modified nanofiber membrane, International

- [51] Logan, B.E., B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, W. Verstraete, Rabaey, K., 2006, Microbial fuel cells: methodology and technology, *Environmental science & technology*, 40 , 5181-5192.
- [52] Erbay, C., X. Pu, W. Choi, M.-J. Choi, Y. Ryu, H. Hou, F. Lin, P. de Figueiredo, C. Yu, Han, A., 2015, Control of geometrical properties of carbon nanotube electrodes towards high-performance microbial fuel cells, *Journal of Power Sources*, 280, 347-354.
- [53] Zhang, Y., J. Sun, Y. Hu, S. Li, Q. Xu., 2012, Bio-cathode materials evaluation in microbial fuel cells: a comparison of graphite felt, carbon paper and stainless steel mesh materials, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 16935-16942.
- [54] Liu, W., S. Cheng, Guo, J., 2014, Anode modification with formic acid: A simple and effective method to improve the power generation of microbial fuel cells, *Applied surface science*, 320, 281-286.
- [55] Zhang, D., Z. Li, C. Zhang, X. Zhou, Z. Xiao, T. Awata, Katayama, A., 2017, Phenol-degrading anode biofilm with high coulombic efficiency in graphite electrodes microbial fuel cell, *Journal of bioscience and bioengineering*, 123, 364-369.
- [56] Zou, L., Z. Lu, Y. Huang, Z.-e. Long, Qiao, Y., 2017, Nanoporous Mo₂C functionalized 3D carbon architecture anode for boosting flavins mediated interfacial bioelectrocatalysis in microbial fuel cells, *Journal of Power Sources*, 359, 549-555.
- [57] Lead, J.R., Valsami-Jones, E., 2014, *Nanoscience and the Environment*, Elsevier.
- [58] Malorni, L., V. Guida, M. Sirignano, G. Genovese, C. Petrarca, Pedata, P., 2017, Exposure to sub-10 nm particles emitted from a biodiesel-fueled diesel engine: In vitro toxicity and inflammatory potential, *Toxicology letters*, 270, 51-61.

“Review article”

A Review of the application of nanomaterials in biomass conversion to biofuel

Majid Mirzaee^{1*}, Tayyebah Mohebbi²

¹Assistant professor, Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.

²Ph.D Student, Department of Chemistry, Kashan University, Kashan, Iran

*Corresponding author: mjmirzaei@nri.ac.ir

Abstract

Global energy production, heavily influenced by the widespread use of fossil fuels, has highlighted the importance of finding alternative energy sources with high potential. continuous efforts are underway to address challenges related to the initial stages before conversion to bioenergy, such as pretreatment, enzymatic hydrolysis, and biomass cultivation. nanotechnology can overcome problems associated with these biomass sources by using its unique active sites for various reactions and processes. in this review article, the potential of nanotechnology, which has been integrated as an aid or additive in these biomasses to enhance the efficiency of bioenergy production, is examined. the fundamentals of nanomaterials along with their diverse applications in the field of bioenergy are discussed in detail. Furthermore, the optimization and enhancement of bioenergy production from lignocelluloses, microalgae, and wastewater using nanomaterials have been fully evaluated. the prominent features of these nanomaterials that contribute to the improvement of the performance of biofuels, biodiesel, enzymes, and microbial fuel cells have also been critically reviewed. finally, based on existing studies, future trends and research needs have been considered.

Keywords: Bioenergy, Biomass, Biofuel, Nanotechnology



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال پانزدهم، شماره‌ی ۵۸
تابستان ۱۴۰۳، صفحات ۵۹-۴۷

"مقاله پژوهشی"

کاربرد فناوری نانو در تصفیه آب و حذف آلاینده‌ها

مجتبی جمعیتی*

گروه فیزیک، واحد نراق، دانشگاه آزاد اسلامی، نراق، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: drmjamiati@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۶ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۶/۱۴)

چکیده

آب یکی از ضروری‌ترین عناصر حیات بر روی زمین است و اگر چه بیش از ۷۰ درصد از سطح کره زمین با آب پوشیده شده است اما کم‌تر از ۳ درصد از آن آب شیرین می‌باشد. از این مقدار ۷۹ درصد به قله‌های یخی تعلق دارد، ۲۰ درصد آن آب‌های زیرزمینی است که به راحتی قابل دسترسی نمی‌باشد و در مجموع در هر زمان تنها یک ده هزارم از کل آب‌های کره زمین به سادگی در دسترس انسان قرار دارد. در دسترس بودن آب سالم و پاک یکی از مهم‌ترین مسایل پیش روی بشر می‌باشد و به تدریج که مقدار مصرف آب بیش‌تر می‌شود، مواد آلاینده نیز به طرق مختلف باعث آلوده کردن منابع آبی می‌گردند و این مساله در آینده بحرانی‌تر خواهد شد. پذیرش حق برخورداری از آب به عنوان یک حق برای بشر ممکن است مهم‌ترین گام در برطرف کردن دشواری تامین این بنیادی‌ترین عنصر زندگی مردم باشد. فقدان دسترسی به آب تمیز و بهداشتی در کشورهای در حال توسعه، اولویت توسعه و استفاده از فن‌آوری جدید را بیش از پیش مطرح می‌کند. فن‌آوری نانو با راه‌کارهای نوین و جدید خود اظهار می‌دارد که مواد با پایه نانو می‌توانند به فن‌آوری‌های تصفیه آب ارزان قیمت‌تر، بادوام‌تر و مؤثرتری منجر شوند، که با این وجود بخشی از نیازهای کشورهای در حال توسعه را می‌توانند به نوعی برآورده سازند. فرایندهای تصفیه آب مبتنی بر نانوفناوری در مقایسه با روش‌های سنتی بسیار کارآمدتر هستند، زیرا این محلول‌ها می‌توانند با ویژگی‌هایی ساخته شوند که می‌توانند میزان جذب مواد را از آب افزایش دهند.

کلمات کلیدی: نانو تکنولوژی، کاتالیست، آلاینده‌ها، غشاء، نانو فیلتر.

مقدمه

حدود دو سوم کره زمین را آب فرا گرفته است، که از این میزان آب حدود ۹۷ درصد آن غیر قابل آشامیدن هست. بر اساس پیش بینی سازمان ملل در سال ۲۰۳۵ میلادی حدود ۴۸ کشور (یعنی ۳۲ درصد جمعیت جهان) دچار کمبود آب آشامیدنی می‌شوند. کمبود منابع آب هم از نظر کیفی و هم از نظر کمی تهدیدی جدی برای جمعیت دنیا به ویژه برای کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود. ۱۳٪ از جمعیت جهان هنوز به منابع آب سالم دسترسی ندارند. آلودگی محیط زیست و منابع آب در کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته یکی از مهم ترین نگرانی‌های دنیای امروز است. فعالیت‌های انسانی علت اصلی آلودگی منابع آب مانند اقیانوس‌ها، رودخانه‌ها و ... هستند که نتیجه این آلودگی، کاهش کیفیت منابع آب سالم خانگی و صنعتی تا حد زیادی است. مواد شیمیایی سمی مانند فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها، مواد شیمیایی دارویی، هیدروکربن‌های پلی آروماتیک، حلال‌های آلی و معدنی، پاتوژن‌ها و سایر آلاینده‌ها به آب‌ها نفوذ کرده و در آن‌ها حل می‌شوند و در آب ایجاد رسوب می‌کنند. آلودگی صنعتی، همراه با پساب‌های خانگی، روان آب‌های کشاورزی و شهری، رودخانه‌ها را آلوده کرده و تصفیه آب را برای حذف همه آلاینده‌ها دشوار می‌کند. این آلودگی می‌تواند بر کیفیت رودخانه‌ها و کیفیت زندگی آبزیان تأثیر بگذارد و از طریق مصرف آب بر سلامت انسان نیز تأثیر بگذارد (۱-۳).

به منظور بهبود کیفیت آب، منابع طبیعی و تأمین آب مناسب برای استفاده انسان، روش‌های مختلفی به کار گرفته شده است. در آغاز قرن بیست و یکم

نانوتکنولوژی به عنوان جایگزینی برای حذف بهتر آلاینده‌ها مانند فلزات سنگین، جداسازی آب روغنی و فعالیت ضد میکروبی مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر این، با افزایش صنعتی شدن همراه با آلودگی رودخانه‌ها، آب دریا می‌تواند جایگزین جالبی برای منبع آب آشامیدنی پس از تصفیه کافی باشد. نانومواد به عنوان امکانی برای حذف نمک از آب دریا مورد مطالعه قرار می‌گیرند و نوشیدن آن را ممکن می‌کند. با این حال، نیاز به روشن شدن خطرات بالقوه که این نانومواد می‌تواند برای محیط زیست ایجاد کند، وجود دارد. بنابراین، هدف از این بررسی، توصیف کاربرد فناوری نانو در تصفیه فاضلاب در خصوص فلزات، حذف روغن از آب، فعالیت ضد میکروبی و نمک‌زدایی به منظور بهبود کیفیت آب و همچنین بحث در مورد خطر بالقوه آنها برای محیط زیست است (۴). این فناوری برای اولین بار حدود چهل سال پیش مطرح شد. البته روش‌های دیگری نیز برای دسترسی به آب قابل شرب وجود دارد که از جمله آن می‌توان به استفاده از دستگاه آب شیرین کن اشاره کرد که این سامانه بروی آب‌های شور دریا و یا رودخانه‌ها قرار گرفته و آب قابل شرب را برای ما تأمین می‌کند. در ذیل به معایب استفاده از این سامانه و برتری فناوری نوین نانو بر این روش اشاره خواهیم کرد. در سال‌های اخیر ذرات نانو جهت تصفیه آب در سراسر دنیا توسعه یافته‌اند. تصفیه آب به دو بخش فیلتراسیون و گندزدایی تقسیم می‌شود که نانوتکنولوژی در هر دو بخش کاربرد دارد. نانوتکنولوژی مواد نانویی بسیاری را برای تصفیه آب‌های سطحی، زیرزمینی و پساب‌ها و حذف آلودگی‌های فلزی سمی و آلی، غیرآلی و

در کشورمان ایران، مشکل آب به ویژه آب شیرین با توجه به وضعیت جغرافیایی و قرار گرفتن آن در منطقه خشک و نیمه خشک از حساسیت زیادی برخوردار است. همچنین ذخایر آب کشور در حال کاهش و شور شدن است و آب‌های سطحی نیز با انواع آلودگی‌ها آلوده می‌شوند. بنابراین با نگاهی به مشکلات تامین آب در ایران و همچنین اهمیت تصفیه پساب‌های خانگی و صنعتی، استفاده از فناوری‌های نوین ضروری به نظر می‌رسد.

روش‌های تصفیه پساب با استفاده از نانو مواد

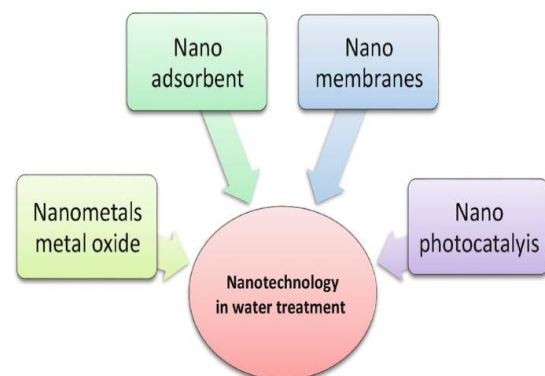
فاضلاب یکی از مهمترین چالش‌های زیست محیطی در جهان است. فاضلاب حاوی طیف وسیعی از آلاینده‌ها، از جمله مواد آلی، فلزات سنگین و میکرو ارگانیسم‌ها است که می‌توانند به محیط زیست و سلامت انسان آسیب برسانند. فناوری نانو می‌تواند راه حل‌های جدیدی برای تصفیه فاضلاب ارائه دهد. ذرات نانو دارای خواص و ویژگی‌های منحصر به فردی هستند که می‌توانند برای حذف طیف وسیعی از آلاینده‌ها از فاضلاب استفاده شوند. مزایای تصفیه فاضلاب با فناوری نانو عبارت است از:

حذف موثر آلاینده‌ها: ذرات نانو به دلیل اندازه کوچک خود می‌توانند به راحتی با آلاینده‌ها پیوند برقرار کرده و آنها را از فاضلاب جدا کنند. این امر باعث می‌شود که فناوری نانو برای حذف آلاینده‌های مقاوم به روش‌های تصفیه سنتی، مانند فلزات سنگین، مواد آلی و میکروارگانیسم‌ها، بسیار موثر باشد.

کاهش هزینه‌ها: فناوری نانو می‌تواند هزینه‌های تصفیه فاضلاب را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. این

میکروارگانیسم‌ها ارایه می‌دهد. به وسیله فیلتراسیون نانو می‌توان مواد آلی طبیعی، آلودگی‌های میکروبی و آلی، نیترات و آرسنیک را از آب‌های سطحی و زیر زمینی حذف کرد. به وسیله اسمز معکوس می‌توان ترکیبات آلی، غیرآلی و آلودگی‌های میکروبی را از آب حذف و همچنین نمک‌زدایی کرد. با کمک جاذب‌های نانو، کاتالیزورها و غشاهای نانو می‌توان آلودگی‌های میکروبی و شیمیایی آب را حذف کرد. اما مواد نانو دارای اثرات سو نیز می‌باشند و برای تک سلولی‌ها و جانوران دریایی (دلفین و ماهی) سمی است (۵-۶).

نانو مواد مورد استفاده در سیستم تصفیه آب و پساب شامل نانو جاذب‌های پایه کربنی مثل نانولوله‌های کربنی، نانو ذرات پایه فلزی، نانو ذرات پلیمری و زئولیت‌ها هستند که به علت سطح فعال بالا، پتانسیل بالایی در جذب دارند و میزان جاذب در مقایسه با جاذب‌های متداول کاهش می‌یابد، بنابراین امکان استفاده از تجهیزات کوچک‌تر در سیستم‌های تصفیه پساب میسر می‌گردد. با توجه به مواد نانو، نانوتکنولوژی تصفیه آب به چهار گروه اصلی نانو فوتوکاتالیز، نانو جاذب‌ها، غشاهای نانو و نانو فلزات یا اکسیدهای فلزی تقسیم می‌شوند (۷):



شکل (۱): چهار گروه اصلی نانوتکنولوژی تصفیه آب

قادر به برهمکنش با گروه‌های شیمیایی مختلف به منظور افزایش میل ترکیبی آن‌ها با ترکیبات ویژه می‌باشند. همچنین نانومواد به عنوان لیگاندهای قابل بازیافت با ظرفیت و عملکرد انتخابی بسیار بالا، برای یون‌های فلزی سمی به هسته‌های رایواکتیو، حلال‌های آلی و معدنی به شمار می‌آیند. تصفیه فاضلاب به کمک نانو کاتالیزور می‌تواند جایگزین سومین مرحله تصفیه یعنی ضد عفونی با کلر شود تا موجودات زنده و ترکیبات آلی را به طور همزمان حذف و فاضلاب را به یک منبع آب مناسب تبدیل کند. موجودات زنده ریز به طور طبیعی ترکیبات ارگانیک بزرگ را به ذرات کوچک‌تری تبدیل می‌کنند، اما از آنجایی که این ترکیبات از نظر زیستی تجزیه ناپذیرند، برای تجزیه آن‌ها باید از نوعی انرژی استفاده کنیم. این انرژی از اشعه فرابنفش نور خورشید تامین شده و به همراه کاتالیزورهای نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. انرژی آزاد شده از واکنش سلول کاتالیزور نوری می‌تواند موجودات زنده ریز را از میان برده و ترکیبات تجزیه ناپذیر را تجزیه کند. این فرایند به دلیل امکان استفاده مجدد از کاتالیزورهای نوری از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. ذرات کاتالیزوری یا به صورت همگن در محلول پراکنده می‌شوند، یا به صورت ساختارهای غشایی رسوب داده شده هستند که تجزیه شیمیایی آلاینده‌ها را امکان پذیر می‌کنند. با توجه به کاربردها و قابلیت‌های فناوری نانو در صنعت آب و فاضلاب بسیاری از شرکت‌ها از این فناوری در تصفیه آب و فاضلاب استفاده می‌کنند و به همین دلیل امروزه استفاده از محصولات و تولیدات بر پایه فناوری نانو افزایش یافته است. این محصولات اغلب شامل نانوفیلترها و انواع حسگرهایی است که به منظور

امر به دلیل استفاده از مواد کم‌تر و فرآیندهای ساده‌تر است.

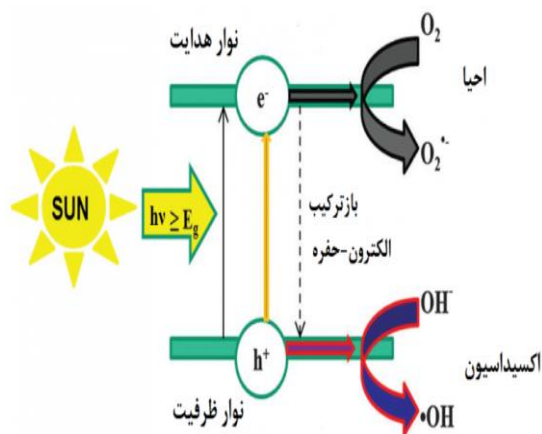
حفظ محیط زیست: فناوری نانو می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و مواد شیمیایی در فرآیندهای تصفیه فاضلاب کمک کند. این امر باعث کاهش اثرات زیست‌محیطی تصفیه فاضلاب می‌شود (۵).

نانو مواد برای بهبود کارایی فرایندهای فتوکاتالیستی و شیمیایی

ذرات ریز آلاینده تاثیر بسیار بدی بر منابع آبی ما دارند و حذف آن‌ها از چرخه آبی نیازمند به منابع و دانش فنی بالایی است. تصفیه سریع مواد شیمیایی باقی مانده در فاضلاب به کمک نانوکاتالیست‌ها روش و رویکرد جدید محققان است. در زندگی روزمره، همه ما از بسیاری از مواد و محصولات شیمیایی، از جمله مواد آرایشی، داروها، قرص‌های ضد بارداری، کودهای گیاهی و مواد شوینده استفاده می‌کنیم و همه اینها، به سهولت زندگی ما کمک می‌کنند. با این حال، استفاده از چنین محصولاتی تأثیر منفی بر محیط زیست دارد، زیرا در کارخانه‌های تصفیه آب امروزی ریز آلاینده‌ها و ریز پلاستیک‌ها را در بسیاری از مواقع، نمی‌توان به طور کامل از فاضلاب جدا کرد. آن‌ها نهایتاً به محیط زیست وارد می‌شوند و زندگی جانوران و گیاهان را تحت تاثیر می‌دهند. همین جانوران و گیاهان، به ویژه آبزیان، تحت عنوان غذا وارد بدن انسان می‌شوند و به این شکل، ما انسان‌ها مستقیماً تحت تاثیر ریز آلاینده و ریز پلاستیک‌ها قرار می‌گیریم (۸).

نانومواد در مقایسه با مواد در ابعاد بزرگ دارای سطوح بسیار بزرگ‌تری هستند. علاوه بر این، این مواد

برانگیخته شده انرژی اضافی خود را در قالب نشر فوتونی با انرژی تقریباً برابر با شکاف انرژی نیمه‌رسانا آزاد می‌کند. این انرژی اضافی می‌تواند به صورت تابش گرمایی نیز آزاد شود (۸).



شکل (۲): شمایی از واکنش‌های فوتوکاتالیستی در سطح نیمه-رسانا با تابش فوتونی با انرژی برابر یا بیشتر از شکاف انرژی نیمه-رسانا [۸].

حذف موثر آلاینده‌ها: نانو کاتالیزورها می‌توانند طیف وسیعی از آلاینده‌ها را از آب حذف کنند. این آلاینده‌ها شامل فلزات سنگین، مواد آلی و میکروارگانسیم‌ها هستند.

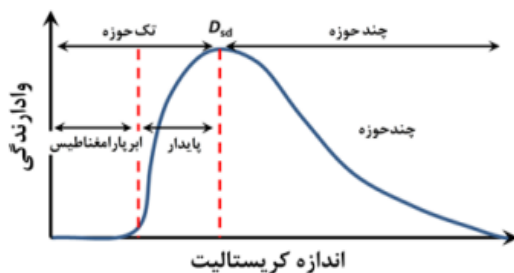
کاهش هزینه‌ها: نانو کاتالیزورها می‌توانند هزینه‌های تصفیه آب را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. این امر به دلیل استفاده از مواد کمتر و فرآیندهای ساده‌تر است. حفظ محیط زیست: نانو کاتالیزورها می‌توانند به کاهش مصرف انرژی و مواد شیمیایی در فرآیندهای تصفیه آب کمک کنند. این امر باعث کاهش اثرات زیست‌محیطی تصفیه آب می‌شود (۹-۱).

تشخیص مواد و ذرات موجود در آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. نانو کاتالیزورها در زمینه‌های مختلفی از تصفیه آب، از جمله تصفیه آب آشامیدنی، تصفیه فاضلاب و نمک‌زدایی آب دریا، کاربرد دارند.

این فرآیند تصفیه فعالیت‌های فتوکاتالیستی را شامل می‌شود که عبارت است از برهمکنش انرژی نور با نانوذرات فلزی (نانوفلزات و نانوذرات اکسید فلز، مانند نانوذرات نقره، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2), نانوذرات مغناطیسی و غیره). فعالیت‌های فتوکاتالیستی، میکروارگانسیم‌ها (باکتری‌ها) و مواد آلی را از راه واکنش با رادیکال‌های هیدروکسیل از بین می‌برد. این نوع تصفیه به دلیل فعالیت‌های فتوکاتالیستی زیاد و گسترده مورد توجه قرار گرفته است. فعالیت‌های فتوکاتالیست بر اساس تخریب باکتری‌ها و مواد آلی توسط واکنش با رادیکال‌های هیدروکسیل است. مواد مورد استفاده در نانوکاتالیست‌ها عموماً مواد معدنی مانند نیمه‌رساناها و اکسیدهای فلزی هستند. با این حال، برای در نظر گرفتن نانو فتوکاتالیستی، باید برخی از الزامات را رعایت کنند. مزایای نانو کاتالیزورها در تصفیه آب در این قسمت بررسی شده است.

شکل (۲) شمایی از سازوکار فرآیند فتوکاتالیستی را نشان می‌دهد. ماده نیمه‌رسانا با جذب تابش موج الکترومغناطیسی با انرژی برابر یا بزرگ‌تر از شکاف انرژی (band gap) آن برانگیخته می‌شود و به موجب آن الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش انتقال می‌یابد و در نتیجه به طور همزمان یک محل خالی از الکترون (h^+) در نوار ظرفیت به نام حفره ایجاد می‌شود. بازترکیب زوج الکترون-حفره با مسیر انتقال بار رقابت می‌کند. حین فرآیند بازترکیب، الکترون

مخلوط نانوساختار و نانوذرات اکسید فلزی تقسیم بندی می‌شوند. از ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین نانوجاذب‌های مغناطیسی می‌توان به نانوذرات اشاره کرد که حداقل یک جز از هر نانوکامپوزیت مغناطیسی را تشکیل می‌دهند. نانوذرات مغناطیسی به دلیل خواص ویژه‌ای که در خود دارند مطالعات بسیاری را در سال‌های اخیر متوجه خود کرده‌اند و در زمینه تصفیه آب و جذب انواع آلاینده‌ها بسیار مورد استفاده قرار گرفته است. نخستین بار دو فیزیکدان روسی، فرنکلن و آمریکایی، دورفمن پیش‌بینی کردند در صورتی که در ماده‌ای با خاصیت فرومغناطیسی ابعاد ذرات به کمتر از حد بحرانی برسند همانطور که در شکل ۳ مشخص است باعث ایجاد خاصیت انفرادی مغناطیسی در ذرات شده که در صورت حضور درمیدان مغناطیسی هم جهت شده و در صورت حذف میدان، خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند. به این خاصیت، سوپراپارامغناطیس می‌گویند که وادارندگی مغناطیسی وجود نخواهد داشت [۱۱].



شکل (۳): وابستگی خاصیت وادارندگی به اندازه نانوذرات [۱۱].

مواد مبتنی بر کربن نیز به عنوان جاذب مورد استفاده قرار می‌گیرند، آن‌ها یک نمونه نانولوله‌های کربنی (CNTs)^{۱۲} هستند و نسبت سطح به حجم و

نانوجاذب‌ها سازگار با محیط زیست جهت تصفیه آب‌های زیر زمینی به وسیله اجزای معدنی و آلی این روش تصفیه، از نانومواد آلی یا معدنی که میل ترکیبی زیادی نسبت به مواد جاذب دارند استفاده می‌کند، به عبارت دیگر، قابلیت حذف بسیاری از آلاینده‌ها را دارند. این نانوذرات برای حذف انواع مختلف آلاینده‌ها توسعه یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نانو جاذب‌های ایده‌آل، دارای ویژگی‌های مهمی مانند پتانسیل کاتالیزوری، اندازه کوچک، واکنش‌پذیری بالا و انرژی سطحی بزرگ هستند. گاهی اوقات تصفیه معمولی آب نمی‌تواند در حذف برخی از آلاینده‌ها مانند فلزات و میکروارگانیسم‌ها بسیار مؤثر باشد. مشکل دیگر تشکیل محصولات جانبی ضد عفونی (DPBs)^{۱۱} است که برای سلامت انسان خطرناک است.

فلزات سنگین و همچنین برخی از آنیون‌ها سمیت بالایی دارند و این خاصیت می‌تواند باعث آسیب واقعی به انسان و اکوسیستم شود بر این اساس، محققان کارایی نانو فروسیال مغناطیسی را که به عنوان یک منعقدکننده در آب عمل می‌کند، به عنوان جاذب احتمالی فلزات سنگین مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش pH از ۴ به ۸، راندمان حذف فلز به تقریباً ۱۰۰ درصد افزایش یافت، این فلزات سنگین Fe^{2+} ، Pb^{2+} ، Zn^{2+} و Cu^{2+} بودند. سایر فلزات مورد تجزیه و تحلیل (Ni^{2+} ، Mn^{2+} ، Co^{2+} ، Cd^{2+}) نیز افزایشی در راندمان حذف فلز داشتند، اما آن‌ها کم‌تر از ۹۰٪ باقی می‌مانند.

نانوجاذب‌ها بر اساس فرآیند جذب خود به نانوذرات فلزی، نانوذرات مغناطیسی، اکسیدهای

از طریق ساختار ذرات GO جذب کرده و ضمن اینکه حرارت خورشید را جذب می‌کنند تا تشکیل بخار را تشدید نمایند، آب از طریق ساختار گرافن اکسید بیرون کشیده می‌شود. این روش در نمک‌زدایی از آب شور با انرژی خورشیدی استفاده می‌شود. نانوذرات سیلیکا فلئوئورینه^{۱۵} سطح انرژی کمی تولید می‌کند که مقاومت بالایی در برابر چربی نشان می‌دهد. این امر در عملیات تصفیه پساب حاوی روغن، پالایش نفت و صنایع فرآوری مواد غذایی بسیار مفید است. نانومواد لایه‌ای^{۱۶} حاوی گرافن و گرافن اکسید، مولیدن دی‌سولفید و مکسین‌ها^{۱۷} (کربونیت‌ریدها، کاربیدها و نیت‌ریدهای فلزات واسطه فوق‌العاده نازک) به طور گسترده در تصفیه آب صنعتی استفاده می‌شوند (۱). در جدول (۱) مزایا، معایب و کاربردهای این نانوذرات ارائه شده است (۸-۷).

توزیع اندازه منافذ بالایی دارند. با این ویژگی‌ها، CNTs قابلیت جذب مهمی را در مقایسه با کربن فعال دانه‌ای یا پودری ارائه می‌دهد. یکی دیگر از مواد مبتنی بر کربن، گرافن است، آن‌ها به دلیل محیط غنی از الکترون، جاذب‌های کارآمدی در نظر گرفته می‌شوند. اکسید گرافن همچنین ظرفیت جاذب بالایی به دلیل گروه‌های عملکردی قوی خود دارد.

نانولوله‌های کربنی غشاهای رسانای الکتریکی ایجاد می‌کنند. اندازه حفرات لایه به نوع پلیمرهای کاربردی مورد استفاده در اتصال عرضی نانولوله‌های کربنی وابسته است. اندازه منافذ غشاء از ۱۰۰ نانومتر تا زیر نانومتر متفاوت است. این نانوغشاها به طور گسترده برای تصفیه بیولوژیکی پساب صنعتی و نمک‌زدایی از آب شور صنعتی بهره‌برداری می‌شود. نانوذرات گرافن اکسید (GO)^{۱۳} بر اساس همان اصل فرآیند تعرق^{۱۴} یک برگ درخت عمل می‌کنند، به این معنا که، آب را

جدول (۱): خواص، کاربردها و جنبه‌های نوآورانه نانو جاذب‌ها (۸).

نوآوری‌ها	کاربرد	خصوصیات		نانو جاذب
		معایب	مزایا	
افزایش سطح فعال	حذف مواد آلی و فلزات سنگین	احتمال ریسک سلامتی	سطح جذب بالا، واکنش پذیری انتخابی	نانو جاذبهای فلزی
نانولوله‌های کربنی فوق بلند با جذب نمک بسیار بالا	الاینده‌های قابل تجزیه (داروها، آنتی‌بیوتیک‌ها)	هزینه تولید زیاد احتمال ریسک سلامتی	سطح جذب بالا، ضد باکتری، قابلیت استفاده مجدد	نانولوله‌های کربنی
زیست تجزیه پذیر، زیست سازگار، بیو جاذب غیر سمی (ترکیبی از کیتوسان و دندریت)	حذف مواد آلی و فلزات سنگین	فرآیند تولید چند مرحله‌ای پیچیده	عملکرد دوگانه (پوسته داخلی جذب ترکیبات آلی، شاخه‌های خارجی جذب فلزات سنگین)، قابل استفاده مجدد	نانوجاذبهای پلیمری (دندریمرها)
نانو زئولیت‌ها با شکستگی القایی لیزر	فرآیندهای ضد عفونی	کاهش سطوح فعال بعلت بی تحرکی نانوسیلور	رهایش کنترل شده نانوسیلور، ضد باکتری	زئولیتها

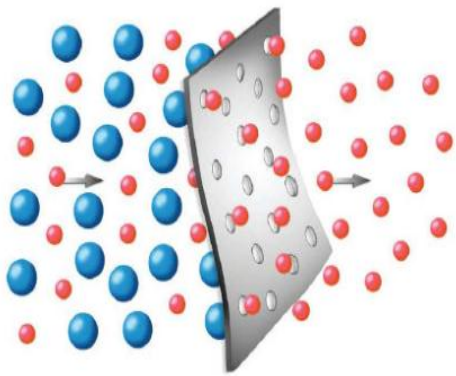
¹⁶ . Layered nanomaterials

¹⁷ . MXenes

¹³ . Graphene Oxide

¹⁴ . transpiration

¹⁵ . Fluorinated silica



شکل (۴): شمای کلی از نانوفیلتر

نانوذرات نقره، عوامل ضد میکروبی می‌باشند که در طول تصفیه فاضلاب آلاینده‌های باکتریایی بسیاری را در خود جای می‌دهند. نانوذرات نقره و اکسید گرافن دو نقش را ایفا می‌کنند؛ اول با غیرفعال کردن سلول‌های باکتریایی از آلودگی بیولوژیکی جلوگیری می‌کنند و سپس به علت ماهیت آب‌دوستی که دارند می‌توانند با تشکیل یک لایه قوی آبی، اتصال میکروبی را کاهش دهند (۱۳-۱).

نانو فیلتراسیون یک فناوری امیدوارکننده برای بهبود کیفیت آب است. این فناوری می‌تواند طیف وسیعی از آلاینده‌ها را از آب حذف کند و به کاهش هزینه‌های تصفیه آب و حفظ محیط زیست کمک کند. با این حال، نانو فیلتراسیون هنوز در مراحل اولیه توسعه است. چالش‌هایی در زمینه بهبود کارایی، پایداری و هزینه‌های نانو فیلتراسیون وجود دارد (۱۴).

حذف آرسنیک

امروزه با توجه به آلودگی آب‌های سطحی توسط انواع آلاینده‌ها مانند صنایع، بسیاری از این آب‌ها در واقع به نوعی پساب تبدیل شده‌اند که باید با استفاده از انواع فرایندهای تصفیه آب برای استفاده به حدود کیفی مورد نظر برسند. در میان این آلاینده‌ها فلزات سنگین به دلیل عدم تجزیه و هم‌بند شدن اثرات مخرب بر روی

غشاهای فیلتراسیون نانو متری به منظور افزایش

بازیابی آب

در این روش تصفیه، نانو غشاهای (به‌عنوان مثال، نانوفیلتراسیون، غشاهای خودآرا، نانو کامپوزیتی و غشاهای مبتنی بر نانو لوله‌ها، نانو روبان‌ها و نانو الیاف) قادرند آلاینده‌ها را از فاضلاب جدا کنند. نانو غشاهای وظیفه جداسازی ذرات از فاضلاب را بر عهده دارند. آنها می‌توانند در حذف رنگ‌ها، فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها بسیار کارآمد باشند.

نانو فیلتراسیون در زمینه‌های مختلفی از تصفیه آب، از جمله تصفیه آب آشامیدنی، تصفیه فاضلاب و نمک‌زدایی آب دریا، کاربرد دارد. با استفاده از نانو فیلترها، مواد معدنی مورد نیاز برای سلامت انسان در آب باقی می‌ماند و مواد سمی و مضر از آنها حذف می‌شود. استفاده از نانولوله‌های کربنی در ساخت فیلترها سبب سهولت در پاکسازی، افزایش استحکام و قابلیت استفاده مجدد و مقاومت در برابر گرما می‌شود. این فیلترها از دقت بسیار زیادی برخوردارند و می‌توانند ویروس‌هایی به اندازه ۲۵ نانومتر و عوامل بیماری‌زای بزرگ‌تر مانند باکتری کولای را به خوبی از آب حذف کنند. نانوفیلترها برای حذف محدوده وسیعی از ترکیبات به کار گرفته شده‌اند. از جمله حذف آفت‌کش‌ها مانند آترازین، سیمارین، دیورن، ایزپرتورن، ترکیبات آلی فرار مانند مشتقات کلردار آلی سبک مثل کلروفرو، تریکلرواتیلن، تتراکلرواتیلن، حذف محصولات جانبی حاصل از واکنش گندزدا با ترکیبات آلی آب از جمله هالومتان‌ها، حذف کاتیون‌ها و سختی، حذف کروم، اورانیوم، آرسنیک، نیون‌ها، پاتوژن‌ها. کنترل مقدار آلاینده‌ها در آب تصفیه شده از دیگر مزایای کاربرد این روش به شمار می‌آید (۱۲).

آرسنات قدرت واکنش پذیری بالاتری داشته و به همین دلیل لازم است با انجام اکسیداسیون، آرسنیت به آرسنات تبدیل شود. برای این منظور از ترکیبات متعددی از قبیل پرمنگنات، هیپوکلریت و پراکسید هیدروژن و ازن استفاده می‌شود. پس از اکسید شدن آرسنیت، قدرت رسوب شدن و جذب بر سطوح جامد آن تا حد زیادی افزایش پیدا خواهد کرد.

در روش‌های تصفیه و حذف ذرات کلوئیدی، یکی از تکنیک‌هایی که در تصفیه شیمیایی فاضلاب و آب مورد استفاده قرار می‌گیرد، انعقاد و لخته‌سازی می‌باشد. برای پیاده سازی این روش به منظور حذف آرسنیک از ترکیباتی همچون آلوم، سولفات آهن و کلرید آهن استفاده می‌شود. اضافه شدن این ترکیبات به آب باعث می‌شود در مدت زمان بسیار کوتاه و حدود یک دقیقه، ذرات و یون‌ها با بار منفی به هم متصل شده و در نهایت منجر به اتصال آرسنیک به این رشته‌ها خواهند شد. در نهایت لخته‌های ایجاد شده به کمک تجهیزات مختلف از قبیل فیلترها جمع آوری خواهند شد.

به منظور افزایش راندمان حذف آرسنیک با کمک انعقاد، لازم است به PH آب توجه شود. چون هر یک از این ترکیبات از قبیل آلوم و کلرید آهن در PHهای متفاوتی بهتر فرآیند انعقاد و لخته سازی را انجام می‌دهند. به عنوان مثال، آلوم در PH حدود ۶ تا ۸ بسیار خوب عمل نموده و این در حالیکه برای کلرید آهن باید PH کم‌تر از ۸ باشد. علاوه بر این، در برخی از شرایط نیاز به دوزهای بسیار بالایی از مواد منعقد کننده می‌باشد که می‌تواند منجر به بروز مشکلات دیگری گردند. در پژوهش هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) که برای حذف آرسنیک به روش انعقاد و لخته‌سازی از آب آشامیدنی صورت گرفت، بیش‌ترین درصد حذف آرسنیک ۷۹

سلامت انسان‌ها و موجودات زنده از اهمیت بالایی برخوردار هستند. وجود فلزات سنگین در منابع آب به صورت طبیعی و یا بر اثر فعالیت‌های بشر صورت می‌گیرد. آب‌های سطحی ناشی از آب کشاورزی دارای نیترات، فسفات و آرسنیک هستند، به خصوص در مناطقی که از آفت‌کش‌ها و کودهای شیمیایی در کشاورزی استفاده می‌شود. یکی از آلاینده‌ها آرسنیک است که بر اثر فعالیت‌های بشری و یا طبیعی موجب آلودگی منابع آب برخی مناطق شده است. آرسنیک یک شبه فلز موجود در پوسته زمین است که جزء اصلی بیش از ۲۰۰ ماده معدنی را تشکیل می‌دهد. این عنصر شبه فلزی است که برای انسان، گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها سمی است. متوسط غلظت آن بین ۲ تا ۵ ppm است که یکی از آلاینده‌های غیر آلی آب آشامیدنی است (۱۵).

آرسنیک در اثر انحلال مواد معدنی موجود در سنگ‌ها و خاک‌هایی که تحت تاثیر عوامل فرساینده طبیعی قرار گرفته‌اند، در لایه‌های زمین پخش می‌گردد. این ماده بی بو، بی مزه و بسیار سمی و سرطان‌زا می‌باشد که استفاده دراز مدت از آب آلوده به آن باعث ایجاد سرطان‌های پوستی، لنفاوی، کلیوی، صفراوی و ریوی می‌شود. بنابراین کاربرد فناوری‌های نوین برای حذف این عنصر از آب‌های آشامیدنی حائز اهمیت است. از میان روش‌های حذف آرسنیک فناوری جذب به دلیل مزایای آن مانند راه‌اندازی ساده‌تر، بازسازی آسان‌تر و راندمان حذف بالاتر به طور گسترده‌ای استفاده شده است. در این بین اکسیداسیون، انعقاد و ته‌نشینی، قدیمی‌ترین روش‌های شناخته شده برای حذف فلزات از آب است. از جمله ترکیبات آرسنیک موجود در آب As^{5+} (آرسنات) و As^{3+} (آرسنیت) می‌باشند. در حالت کلی

نظر هزینه انرژی دفع یون و ابعاد حفره‌ها در بین روش‌های دیگر شرایط بهینه‌ای را ایجاد کرده است. از غشاءهای نانوفیلتراسیون جهت رنگزدایی، تصفیه پساب‌های نساجی و غیره استفاده می‌شود (۱۹-۱۶-۱).

حذف فلزات سنگین و مواد آلی:

نانوذرات TiO_2 از جمله فوتوکاتالیست‌های نوظهور و امیدوارکننده برای تصفیه آب هستند. مکانیسم اساسی فوتوکاتالیست‌های نیمه‌رسانا مانند TiO_2 کم‌هزینه که دارای نور فعالی خوب و غیرسمی هستند شامل تولید اکسیدان‌های بسیار واکنش‌پذیر، مانند رادیکال‌های OH ، برای ضدعفونی میکروارگانیسم‌ها، باکتری‌ها، قارچ‌ها، جلبک‌ها، ویروس‌ها و غیره است. فیلم‌ها و غشاهای نانوساختار TiO_2 علاوه بر تجزیه آلاینده‌های آلی تحت تابش اشعه ماوراء بنفش و نور مرئی، قادر به ضد عفونی میکروارگانیسم‌ها هستند. به دلیل پایداری آن در آب، TiO_2 می‌تواند در لایه‌های نازک یا فیلترهای غشایی برای فیلتراسیون آب گنجانده شود. نانومیله‌ها و نانوفیلم‌های TiO_2 به ترتیب فعالیت فوتوکاتالیستی بالاتری نسبت به نانوذرات تجاری TiO_2 و لایه‌های نازک TiO_2 برای غیرفعال‌سازی فوتوکاتالیستی نشان دادند. نانوذرات TiO_2 به دلیل ویژگی‌های نوری، دی‌الکتریک و فوتوکاتالیستی، ماده جذابی هستند. این خواص آن را قادر می‌سازد تا باکتری‌ها و مواد آلی مضر را از آب و هوا حذف کند. TiO_2 یک فوتوکاتالیست است که به طور گسترده به عنوان یک ماده خود تمیز شونده و خود ضدعفونی کننده برای پوشش سطح در بسیاری از کاربردها استفاده می‌شود، زیرا غیر سمی است و خاصیت فوق‌العاده آبریزی ناشی از نور را

درصد محاسبه شد. در سیستم‌های تصفیه آب‌های سطحی با فرآیند متداول با استفاده از مواد منعقدکننده فریک یا آلوم، آرسنیک به آسانی در طول فرآیند انعقاد ته‌نشینی حذف می‌شود (۱۵-۱۸).

حذف رنگ

رنگ موجود در آب آشامیدنی نه تنها به خاطر ظاهر آن باید زدوده شود، بلکه چون این رنگ‌ها می‌توانند منشاء تولید تری هالومتان‌ها مانند ($CHCl_3$) نیز باشند، خطرناک محسوب می‌شوند. این ماده هنگام ترکیب با کلر موجب تشکیل کلروفرم و دیگر ترکیبات هالوژنه مضر و سرطان‌زا می‌شود. رنگ موجود در آب طبیعی معمولاً ناشی از وجود اسیدهای معدنی با جرم مولکولی $\frac{mol}{gr}$ ۲۰۰۰-۸۰۰ است. اسیدهای مذکور در اثر تجزیه مواد آلی موجود در آب حاصل می‌شوند. اغلب روش‌های متداول برای تصفیه آب قادر به جداسازی مواد فوق نیستند، لیکن با استفاده از غشاهای نانو می‌توان تا ۹۹ درصد این گونه مواد را به سهولت از آب جدا کرد. نانوفیلتراسیون یکی از روش‌های تصفیه غشایی می‌باشد که بسیاری از ترکیبات با جرم مولکولی بالا و محلول در آب را حذف می‌کند. مهم‌ترین مزیت فناوری‌های غشایی عملکرد انتخابی آن‌ها می‌باشد. فناوری‌های غشایی شامل روش‌هایی از قبیل میکروفیلتراسیون، ترافیلتراسیون و نانوفیلتراسیون است. نانوفیلتراسیون یکی از اقسام روش‌های فیلتراسیون غشایی است که توانایی حذف ذراتی با ابعاد بیش‌تر از ۱ نانومتر (۱۰ آنگستروم) را دارد. این غشاءها با کمک بارسطحی خود و اندازه حفره‌هایی که دارند سبب جداسازی یون‌ها از محلول خوراک می‌شوند. نانوفیلتراسیون از

استفاده کرد. راه‌حل‌های مبتنی بر نانو، نویدهای زیادی برای بهبود کارایی و مقرون به صرفه بودن تصفیه فاضلاب صنعتی ارائه می‌دهند، اما تحقیقات بیش‌تری در مقیاس بزرگ مورد نیاز است. زیرا هزینه ساخت پایین برای استفاده گسترده از نانومواد حیاتی است. استفاده از این محصولات که به صورت تجاری در دسترس هستند، از یک طرف می‌تواند منجر به افزایش بازیابی آب و در نتیجه کاهش میزان هدر رفت آب در این صنایع شده و از طرف دیگر استفاده از برخی منابع آب غیرمتعارف را نیز برای این صنایع به ارمغان آورد. بنابراین مقایسه‌ای بین توزیع پژوهش‌های داخلی و خارجی انجام شده بر روی کاربرد نانو ذرات در تصفیه آب و پساب، انجام شد که در شکل (۲) نمایش داده شده است.

منابع

- [1] Mohammadi, S., 2013, Nano technology applications in water industry and environment. Proceedings of the 8th Iran Chemistry Education Seminar 2013 August 28-29, Faculty of Chemistry, Semnan University.
- [2] McCarthy, A.A., 2005, Dendritic NanoTechnologies, inc. Chem. Biol., 12 (5), 499-501.
- [3] Ponomarev, P., 2009, Study and application of flotation in schemes for waste water purification. Environmental Research, Engineering and Management, 50 (4), 51-56.
- [4] Jamiati, M., 2021, Modeling of Maximum Solar Power Tracking by Genetic Algorithm Method. Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment, 12(2), 118-124.
- [5] Malode, S. J., Prabhu, K. K., Shetti, N. P., 2020, Electrocatalytic behavior of a heterostructured nanocomposite sensor for aminotriazole. New J. Chem, 44(44), 19376-19384.
- [6] Zhao Z., Zheng J., Wang M., Zhang H. & Han C. C., 2012, High performance ultrafiltration membrane based on modified chitosan coating

نشان می‌دهد و به طور گسترده به عنوان یک عامل ضد آلودگی محیطی استفاده می‌شود. نانو ذرات TiO_2 برای اکسید کردن آلاینده‌های آلی و به صورت دام‌های نانو مقیاس برای جذب فلزات سنگین در مکان‌های آلوده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت ذکر شده این ذرات می‌توانند عامل اکساینده باشند و تولید آب یا دی اکسید کربن می‌کنند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که از TiO_2 در مقیاس نانو می‌توان برای رفع آلاینده‌ها؛ ویروس‌ها و مواد شیمیایی آلی خطرناک استفاده کرد. ذرات نانو با سطوح مناسب (لیگاندها و معرف‌ها) می‌توانند برای جداسازی فلزات سنگین و برای غیر فعال کردن سطوح آلوده استفاده شوند. بدیهی است که فرآیندهای شیمیایی با کارایی بالاتر مواد آلاینده و ضایعات کم‌تری تولید می‌کنند (۲۰-۱۵).

نتیجه‌گیری

در بررسی حاضر، کاربرد فناوری نانو در تصفیه فاضلاب و آب تا حدودی توضیح داده شد. تصفیه معمولی آب گاهی اوقات در حذف برخی از آلاینده‌ها مانند فلزات سنگین، روغن و میکروارگانیزم‌ها چندان مؤثر نیست. برای بهبود این تصفیه، نانومواد به عنوان جایگزین احتمالی برای حذف این آلاینده‌ها در حال مطالعه هستند. همچنین با رشد شهرنشینی و صنعتی شدن به دنبال آن آلودگی آب، در آینده استفاده از منبع دیگری به عنوان آب آشامیدنی ضروری خواهد بود. یک احتمال آب دریا است و نمک‌زدایی که توسط نانومواد انجام می‌شود جایگزین جالبی برای حذف نمک از آب است. از فناوری نانو در میان فناوری‌های پیشرفته می‌توان برای این هدف و همچنین تصفیه آلاینده‌های غیرقابل درمان و خطرناک

- [18] Lv, P., Xie, D., Zhang, Z., 2018, Magnetic carbon dots based molecularly imprinted polymers for fluorescent detection of bovine hemoglobin. *Talanta*, 188, 145-151.
- [19] Shon, H. K., Phuntsho, S., Chaudhary, D. S., Vigneswaran, S., Cho, J., 2013, Nanofiltration for water and wastewater treatment – a mini review. *Drinking Water Engineering and Science*, 6, 47-53.
- [20] Rahmati, H. S., Mohamadbeigy, K., Bagheri, R., Sadati Kiadehi, M. S., 2022, An Overview of Nano Adsorbents Application in Water and Wastewater Treatment System. *Human and Environment*, 61, 71-84.
- and electrospun nanofibrous PVDF scaffolds. *J. Membr. Sci.*, 394–395, 209–217.
- [7] Aliofkhaezaei, M., Ali, N., 2014, Recent Developments in Miniaturization of Sensor Technologies and Their Applications, *Comprehensive Materials Processing*, 13, 245-306.
- [8] Nagar, A., Pradeep, T., 2020 Clean Water through Nanotechnology: Needs, Gaps, and Fulfillment, *ACS Nano*, 14(6), 6420-6435.
- [9] Jassby, D., Cath., T.Y. and Buisson, H., 2018, The role of nanotechnology in industrial water treatment. *Nature Nanotech*, 13, 670–672.
- [10] Wu, L., Mendoza Garci, A., Li, Q., Sun, S., 2016, Organic Phase Synthesis of Magnetic Nanoparticles and Their Application. *Chemical Reviews*, 116(18), 10473–10512.
- [11] Mehrmohammadi, M., Yoon, K. Y., Qu, M., Johnston, K. P., Emelianov, S. Y., 2011, Enhanced pulsed magneto-motive ultrasound imaging using superparamagnetic nanoclusters. *Nanotechnology*, 22(4), 045502.
- [12] Ghadboland, A., Zahedkarkaj, S., Haji Mohammadi, R., 2014, A brief review on wastewater treatment by using nano materials. *The Application of Chemistry in Environment*, 22(6), 1-4.
- [13] Schertel, L., Vignolini, S., 2020, Nanotechnology in a Shrimp Eye's View. *Nature Nanotechnology*, 15, 87-88.
- [14] Barman J., Tirkey A., Batra S., Paul A.A., Panda K., Deka R., Babu P.J., 2022, The role of nanotechnology based wearable electronic textiles in biomedical and healthcare applications. *Mater. Today Commun*, 32, 104055.
- [15] Karimi, S., Ramezani Etedali, H., Sotoodehnia, A., 2024, Investigation of Arsenic Removal from Drinking Water Using Alum Coagulant. *Journal of Water and Wastewater Science and Technology (JWWSE)*, 8(4), 4-10.
- [16] Patil, A., Mishra, V., Thakur, S., Riyaz, B., Kaur, A., Khursheed, R., Patil, K., Sathe, B., 2019, Nanotechnology Derived Nanotools in Biomedical Perspectives: An update. *Current Nanoscience*, 15, 137-146.
- [17] Jamiati, M., Mehdipour, K. P., 2020, The calculation of total fragment excitation energy for photofission of Uranium isotopes. *Turkish Journal of Physics*, 44(4), 364–372.

“Research article”

Application of nanotechnology in water purification and removal of pollutants

Mojtaba Jamiati *

Department of Physics, Naragh Branch, Islamic Azad University, Naragh, Iran

*Corresponding author: drnjamiati@gmail.com

Abstract

Water is one of the most essential elements of life on earth, and although more than 70% of the earth's surface is covered with water, less than 3% of it is fresh water. of this amount, 79% belongs to the ice peaks, 20% of which are easily accessible groundwater, and in total, only one ten thousandth of the total water on earth is simply available to humans at any time. the availability of safe and clean water is one of the most important issues facing mankind, and gradually, as the amount of water consumption increases, pollutants also contaminate water sources in various ways, and this issue will become more critical in the future. accepting the right to water as a right for humanity may be the most important step in addressing the difficulty of supplying this most fundamental element of people's lives. the lack of access to clean and sanitary water in developing countries is a priority for the development and use of new technology. nanotechnology, with its new and innovative solutions, states that nano-based materials can lead to cheaper, more durable and more effective water treatment technologies, which can nevertheless meet some of the needs of developing countries in some way. nanotechnology based water treatment processes are much more efficient compared to traditional methods as these solutions can be made with features that can increase the amount of material absorbed from water.

Keywords: Nano technology, Catalyst, Pollutants, Membrane, Nano fil



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شبیهی در محیط زیست

سال پانزدهم، شماره‌ی ۵۸
تابستان ۱۴۰۳، صفحات ۸۳-۶۱

"مقاله مروری"

بررسی جامع زیست حسگرهای نوری

نوشین داداش زاده^{۱*}، ناصر مصلحی میلانی^۲

^۱ استادیار، گروه آموزشی برق، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران

^۲ استادیار، گروه آموزشی فیزیک، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: noushindadashzadeh@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴)

چکیده

حسگرها، عملکرد ارزشمندی را در مطالعات زیست محیطی، کشاورزی، بازرسی و ایمنی مواد غذایی، پاسخ سریع و مقرون به صرفه در بیوتکنولوژی، تشخیص بیماری و خدمات پزشکی و ... از خود نشان داده‌اند. از میان بسیاری از دسته‌های حسگرها، حسگرهای زیستی نوری به دلیل اندازه‌گیری‌های انتخابی، سریع و بسیار حساس خود، دارای مزایای اضافی مانند استحکام، قابلیت اطمینان و پتانسیل ادغام بر روی تراشه هستند. در مورد حسگرهای زیستی نوری، آنالیت با استفاده از نور با تکنیک‌های مبتنی بر برچسب یا بدون برچسب شناسایی می‌شود. در این مقاله برخی از پیشرفت‌های قابل توجه در دهه گذشته در زمینه حسگرهای زیستی نوری با تأکید بر رویکردهای ساخت آنها و حوزه‌های کاربردی رو به رشد، بررسی شده است. همراه با برخی از مقاله‌های با دقت انتخاب شده در مورد پیشرفت‌های جدید در حسگرهای زیستی نوری مروری کوتاه از حسگرهای زیستی نوری از زمان پیشرفت نیز ارائه شده است. همچنین چالش‌ها و آینده فناوری‌های حسگر زیستی نوری در حال ظهور در دهه جاری ارائه شده است.

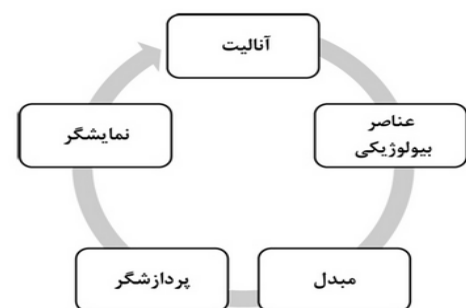
کلمات کلیدی: انواع زیست حسگرهای نوری، کاربرد زیست حسگرهای نوری، تشدید پلاسمون سطحی

مقدمه

حسگرهای زیستی ابزارهای تحلیلی هستند که برای تشخیص آنالیت‌های خاص مانند کلسترول، اوره، پنی سیلین، اتانول و غیره استفاده می‌شوند که دارای مولکول‌های زیستی مانند اسیدهای نوکلئیک، پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها به عنوان عنصر کلیدی برای تشخیص این آنالیت‌ها هستند. سایر عناصر کلیدی حسگرهای زیستی یک مبدل و یک ابزار تجزیه و تحلیل داده‌ها هستند. طبق طبقه‌بندی بر اساس مبدل‌های مورد استفاده، یک حسگر می‌تواند پیزوالکتریک، کالریمتری، ترموالکتریک، پیروالکتریک، مغناطیسی، الکترونی، نوری و الکتروشیمیایی باشد (۱). حسگرهای زیستی نوری به دلیل اندازه‌گیری‌های انتخابی، سریع و بسیار حساس، مزیت زیادی در بیوتکنولوژی، مطالعات زیست‌محیطی، تشخیص بیماری‌ها و ابزارهای پزشکی ایجاد کرده‌اند (۲).



شکل (۱): مراحل کلیدی در سنجش زیست



شکل (۲): اجزای کلیدی یک حسگر زیستی

شکل ۱ مراحل کلیدی در سنجش زیستی را نشان می‌دهد که شامل چهار مرحله اصلی از آماده‌سازی نمونه تا تجزیه، تحلیل و نتیجه است. جداسازی، استخراج و شناسایی مراحل کلیدی هستند که معمولاً برای طبقه‌بندی حسگرها استفاده می‌شود.

شکل ۲ اجزای کلیدی یک حسگر زیستی را نشان می‌دهد. عنصر حسگر زیستی می‌تواند یک آنتی‌بادی، آنزیم، پروتئین و غیره باشد. اندازه‌گیری‌ها معمولاً با استفاده از مبدل انجام می‌شود و در نهایت داده‌ها تجزیه و تحلیل می‌شوند. حسگرهای زیستی نوری منحصربه‌فرد هستند زیرا از رویکرد اندازه‌گیری نوری استفاده می‌کنند، یعنی از مبدل‌های نوری برای اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌کنند. اصل عملکرد و در نتیجه معیارهای کلیدی عملکرد این حسگرهای زیستی نوری بر اساس مبدل نوری مورد استفاده، متفاوت است. به همین دلیل طبقه‌بندی حسگرهای زیستی نوری بر اساس مبدل‌هایشان مهم است. یکی دیگر از روش‌های رایج طبقه‌بندی حسگرهای زیستی نوری، علامت‌گذاری آن‌ها به عنوان مبتنی بر برچسب و بدون برچسب است (۳). در حسگرهای زیستی مبتنی بر برچسب، از یک برچسب فلورسنت یا یک برچسب رنگ سنجی استفاده می‌شود و شدت فلورسانس یا تغییر رنگ به ترتیب برای تشخیص یک آنالیت مشاهده می‌شود (۴). بوریس جی آندریوکوف و همکاران^۱ حسگرهای زیستی بدون برچسب در تشخیص عفونت را بررسی کرده‌اند (۵).

حسگرهای زیستی مبتنی بر نانومواد نوری با نشانگرهای زیستی آگروزومی برای تشخیص

¹ Boris G Andryukov et al

بخش ۲ حسگرهای زیستی نوری، کاربردهای نوظهور در دهه گذشته، همراه با برخی از مقاله‌هایی که با دقت انتخاب شده‌اند در مورد پیشرفت‌های جدید در حسگرهای زیستی نوری در دهه گذشته بررسی شده‌اند. زمینه‌های کاربردی اصلی و کاربردهای نوظهور در دهه گذشته برای ارائه تصویری واضح از تطبیق‌پذیری حسگرهای زیستی نوری ترسیم شده است و در نهایت، چالش‌ها و آینده فناوری‌های حسگر زیستی نوری در حال ظهور در دهه جاری ارائه می‌شود.

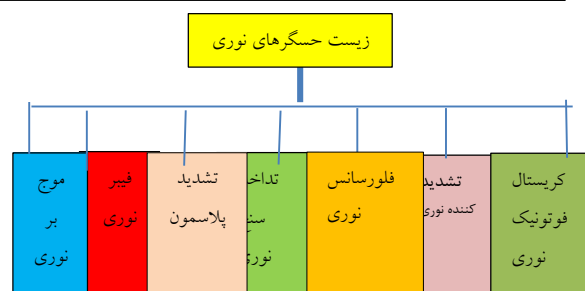
طبقه بندی زیست حسگرهای نوری

پیشینه تاریخی مختصری از حسگرهای زیستی نوری در بخش مقدمه ارائه شده است. در این بخش بر طبقه‌بندی بیوسنسورهای نوری، ساختارهای معمولی همراه با پیشرفت‌های نوظهور در حسگر زیستی نوری تمرکز می‌کنیم، که احتمالاً دهه جاری را تحت تأثیر قرار خواهد داد. بر اساس جنبه‌های طراحی، شکل ۳ انواع عمده حسگرهای زیستی نوری، یعنی فیبر نوری، تشدید کننده حلقه، تداخل سنج، موج‌بر نوری، کریستال‌های فوتونی، فلورسانس، تشدید پلاسمون سطحی را نشان می‌دهد. تاکنون، محققان تلاش‌های زیادی را در زمینه حسگر زیستی انجام داده‌اند و قبلاً پیکربندی‌های مختلفی را فرموله کرده‌اند. در این‌جا، شرح انواع مختلف حسگرهای زیستی نوری را با توجه به اصول کار، ویژگی‌ها و همچنین چشم‌انداز آن‌ها توضیح خواهیم داد.

زود هنگام سرطان طراحی شده‌اند (۶). حسگرهای زیستی مبتنی بر انتقال انرژی تشدید فلورسانس^۲ (FRET) به طور مداوم برای تشخیص مولکول‌های فعال زیستی و برای نظارت بر رفتار سلول استفاده می‌شوند (۷). از بین تمام حسگرهای زیستی نوری رایج‌ترین و پرکاربردترین حسگرهای زیستی نوری رزونانس پلاسمون سطحی است. همچنین با نگاهی به گذشته اولین پیشرفت بزرگ در بیوسنسورهای نوری زمانی رخ داد که روش تشدید پلاسمون سطحی برای اولین بار توسط کرچمن (۸) ارائه شد. متعاقباً چندین کار تحقیقاتی از اوایل دهه ۱۹۸۰ بر روی توسعه حسگرهای زیستی نوری به‌ویژه موج‌بر و تشدید پلاسمون سطحی متمرکز شد. با این حال با ادامه کار در دهه ۱۹۸۰ اولین تشدید پلاسمون سطحی که به صورت تجاری در سال ۱۹۹۰ در دسترس بود هر ساله زیست‌حسگرهای مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی پیشرفته‌تر وارد بازار می‌شوند (۹). با پیشرفت تکنولوژی به تدریج مبدل‌های نوری جدیدتر مانند کریستال‌های فوتونی، تداخل سنج و غیره برای کار در حسگر زیستی نوری توسعه یافته‌اند. در دهه گذشته، محققان بر روی کوچک‌سازی، ویژگی، پاسخگویی و اثربخشی زیست‌حسگرهای نوری تمرکز کرده‌اند. پیشرفت‌های جدید در زیست‌حسگرهای نوری در زمینه‌های بیوتکنولوژی، مطالعات زیست‌محیطی، کشاورزی، بازرسی و ایمنی مواد غذایی، تشخیص بیماری‌ها و خدمات پزشکی کمک شایان توجهی کرده است. در بخش ۱ طبقه‌بندی حسگرهای زیستی نوری در دهه گذشته با تأکید بر رویکردهای ساخت آن‌ها و حوزه‌های کاربردی رو به رشد بررسی شده‌اند. در

² Fluorescence resonance energy transfer

تشخیص پروتئین‌ها، DNA و باکتری‌ها انجام شده است. طیف گسترده‌ای از حسگرهای زیستی فیبر نوری مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی، حسگرهای شیمیایی، پلاسمونیک به طور گسترده گزارش شده است (۱۱). شکل ۴(ب) یک فیبر نوری پلاستیکی پوشیده شده با گرافن و نانولوله‌ها کربنی چند جداره را برای تشخیص تقلب در روغن خوراکی نشان می‌دهد (۱۲). حسگر زیستی فیبر نوری شیشه‌ای بوروسیلیکات کم هزینه و قابل حمل با استفاده از تغییر در ضریب شکست فیبر شیشه نشان داده شده است (۱۳). یک زیست حسگر فیبر نوری بدون آنزیم و بدون برچسب بر اساس واکنش مونتاژ کاتالیزوری و نانوکامپوزیت‌های گرافن اکساید احیا شده برای تشخیص مواد غذایی اصلاح شده ژنتیکی توسعه یافته است (۱۴). فابری فیبر نوری تداخل سنج پروت با فیلم‌های دی‌الکتریک دی‌اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم به عنوان حسگرهای زیستی برای اندازه‌گیری گلوکز و هموگلوبین استفاده شده‌اند (۱۵). النا بنیتو پنا و همکاران^۳ پیکربندی‌ها و روش‌های فلورسانس را در حسگرهای زیستی فیبر نوری و موجبر مسطح بر اساس فلورسانس بررسی کرده‌اند (۱۶). زیست حسگرهای فیبر نوری دارای اندازه کوچک، انتقال کم تلفات از راه دور، بدون تداخل الکترومغناطیسی هستند و برای تشخیص گازها، مواد آلی، مواد منفجره و غیره استفاده می‌شوند (۱۷). زیست حسگرهای فیبر نوری تداخل سنج فابری پرو، با استفاده از پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان ساخته شده با پوشش غوطه‌وری برای توسعه تحلیل لپیدومی استفاده شده



شکل (۳): انواع زیست حسگرهای نوری

حسگرهای زیستی فیبر نوری

یک فیبر نوری از هسته و روکش تشکیل شده است و ضریب شکست هسته کمی بالاتر از روکش است تا نور فرودی را هدایت کند. لایه‌های اضافی به‌عنوان روکش ثانویه برای محافظت از فیبر و یک لایه حساس برای تشخیص آنالیت‌ها تشکیل شده که در شکل ۴(الف) نشان داده شده است. نور طبق قانون بازتاب اسنل از طریق فیبر نوری منتشر می‌شود. بر این اساس فیبر نوری به عنوان "موج نوری" نیز شناخته می‌شود. هنگامی که تنها یک حالت می‌تواند در فیبر نوری هدایت شود، به آن فیبر تک حالت می‌گویند. هنگامی که بیش از دو حالت می‌توانند به طور همزمان در فیبر نوری منتشر شوند، به آن فیبر چند حالت می‌گویند. حسگرهای مبتنی بر فیبر نوری به دلیل ماهیت فیبرهای نوری که حساس نیستند، توجه زیادی را در زمینه‌های مختلف تحلیلی به خود جلب کرده‌اند و می‌تواند در محیط‌های خشن و دماهای شدید زنده بماند (۱۰).

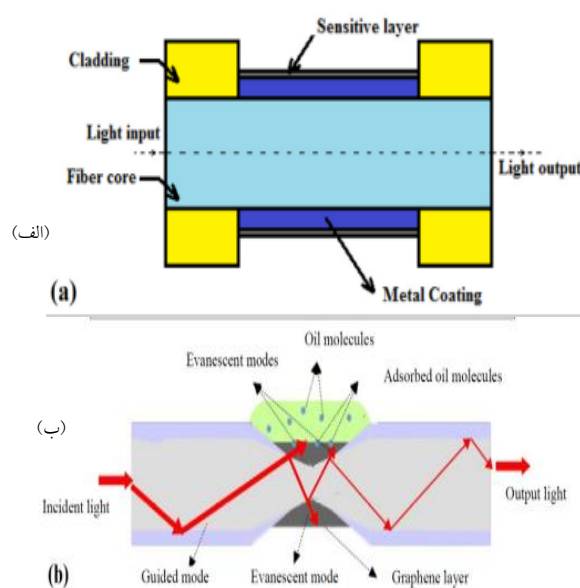
عناصر حسگر زیستی (آنتی‌بادی‌ها و غیره) روی هسته فیبر بی‌حرکت می‌شوند تا با آنالیت واکنش دهند. حسگرهای زیستی فیبر نوری ارزان‌تر، کوچک‌تر و آسان‌تر برای استفاده هستند. اخیراً چندین فعالیت تحقیقاتی روی حسگرهای زیستی فیبر نوری برای

³ Elena Benito-Pena et al

عمل کند، که در درجه اول از تغییر در هندسه یا مواد حفره استفاده می‌کند (ممکن است در اثر تغییر شکل یا گرم کردن حفره و در نتیجه تغییر پارامترهای تشدید ایجاد شود) که در نهایت به تغییر در شدت نور تبدیل می‌شود. حفره‌های نوری را می‌توان به ریزحفره‌های فابری پرو، تشدیدگرهای حالت گالری پیچ‌پیچ^۴ (WGM)، حفره‌های نامتقارن و حفره‌های کریستال فوتونیک طبقه‌بندی کرد. ضریب Q به طور گسترده در ارزیابی یک حفره نوری به کار گرفته شده است. حفره فابری پرو دارای ضریب Q بالاتری است. با این حال، آینه حفره‌ای گران قیمت و تثبیت کننده پیچیده، به طور جدی توسعه و کاربردهای آن را مختل می‌کند. اخیراً تشدید کننده‌های WGM در بیوپزشکی و تشخیص بالینی رایج شده‌اند. با پیشرفت در فناوری نانو، مواد مختلفی برای ساخت تشدیدگرهای WGM، مانند شیشه، پلیمر، و مواد نیمه‌هادی استفاده شده است.

شکل ۵ یک تشدید کننده حلقه نوری سیال را نشان می‌دهد که از میکروسیال و رزوناتور حلقه نوری برای دستیابی به تشخیص سریع سرطان پستان بدون برچسب استفاده می‌شود (۲۱). حسگرهای زیستی تشدید کننده حلقه نوری زمان پاسخ سریع و ارزان‌تری دارند. تشدید کننده‌های حلقه نوری به طور فزاینده‌ای برای توسعه حسگرهای زیستی در تشخیص بیماری‌هایی مانند سرطان استفاده می‌شوند (۲۲). چالش‌های پیش روی اجرای بیوسنسورهای تشدید کننده حلقه نوری در زمینه‌های مختلف مانند داروسازی، پزشکی و ایمنی مواد غذایی و غیره مورد بحث قرار گرفته است (۲۳). تشدید کننده حلقه موجب فراماده که برهمکنش بین میدان نوری و آنالیت‌ها را

است (۱۸). بیوسنسور فیبر نوری فسفر سیاه با آرایش نانو نوری برای تشخیص فوق حساس سرطان پیشنهاد شده است (۱۹). فیبر نوری به طور گسترده در طراحی و توسعه حسگرهای زیستی برای تشخیص حسگر زیستی گلوکز استفاده می‌شود (۲۰).



شکل (۴): (الف) حسگر زیستی فیبر نوری [۱۰]. (ب) شماتیک انتشار نور در فیبر نوری پلاستیکی مخروطی با پوشش گرافن [۱۲].

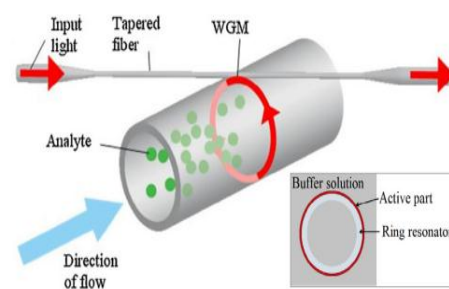
زیست حسگرهای تشدید کننده حلقه نوری

حفره‌ای که نور را در مدار نوری نوسان می‌دهد دارای چندین ویژگی مانند سرعت بالا، انعطاف‌پذیری، هزینه کم، قابلیت تشخیص چند آنالیت و سازگاری با عناصر نوری اضافی است. هنگامی که نور محدود می‌شود و در داخل یک حفره با خود تداخل پیدا می‌کند، فقط فرکانس‌های نوری خاصی که فرکانس‌های تشدید نامیده می‌شوند، می‌توانند در داخل حفره بدون تلفات زیاد پشتیبانی شوند. یک ریزحفره می‌تواند به عنوان یک مبدل سیگنال نوری

⁴ Whispering gallery mode

یکپارچه پلیمری را با دو بازو با عرض نابرابر و شکل ۶ (ب) مقطع دو بازوی حسگر موجبر را نشان می‌دهد (۲۸). تداخل‌سنج‌های ماخ زندر، تداخل‌سنج‌های ساگاناک، موجبر موج دو وجهی و تداخل‌سنج‌های فابری پرو از پرکاربردترین بیوسنسورهای تداخل‌سنج نوری هستند. نیتیش مودگال و همکاران^۵ نمایی مقایسه‌ای از حسگرهای زیستی تداخل‌سنجی و تشدید کننده حلقه‌ای ارائه کرده‌اند (۲۹). حسگرهای عمودی از نظر سهولت ساخت و اتصال نور برتر هستند. اسید نوکلئیک با استفاده از تداخل‌سنج ماخ زندر با حساسیت فوق‌العاده بالا شناسایی شده است (۳۰). یک تداخل‌سنج سیلیکونی ماخ‌زندر با حساسیت بالا برای سنجش زیستی نوری پیشنهاد شده است (۳۱). مطالعه محاسباتی مدل یک بیوسنسور نوری تداخل‌سنج ارائه شده است (۳۲). تداخل‌سنج ساگاناک با حساسیت بالا دارای مزایای متعددی از جمله هزینه کم‌تر و سهولت ساخت برای تشخیص استرپتائویدین است (۳۳). تشخیص پاتوژن بیمارستانی با استفاده از یک بیوسنسور تداخل‌سنجی دو وجهی انجام شده است (۳۴). اسپینوزا و همکاران^۶ با استفاده از حسگر زیستی تداخل‌سنجی فابری پرو توانسته‌اند با موفقیت به تشخیص کامپوننت ایمونوگلوبولین‌های خاص E به آلرژن‌های مولکولی دست یابند. تداخل‌سنجی میکروفیبر سیلیس برای تشخیص بیومارکرهای^۷ (HER2) برای تشخیص (بدون برچسب) سرطان سینه ارائه شده است (۳۵).

افزایش می‌دهد ارائه شده است (۲۴). یک تشدید کننده حلقه پلاسمونیک آسان برای ساخت با گذر نور کم تلفات پیشنهاد شده است (۲۵). تشدیدگرهای نانو حلقه اخیراً با استفاده از کریستال فوتونی برای کاربردهای مختلف حسگر زیستی طراحی شده‌اند (۲۶). تشدید کننده‌های میکرو حلقه بسیار حساس برای تشخیص مولکول‌های زیستی نشان داده شده‌اند (۲۷).



شکل (۵): زیست حسگر تشدید کننده حلقه نوری سیال (۲۱).

حسگرهای زیستی تداخل‌سنج نوری

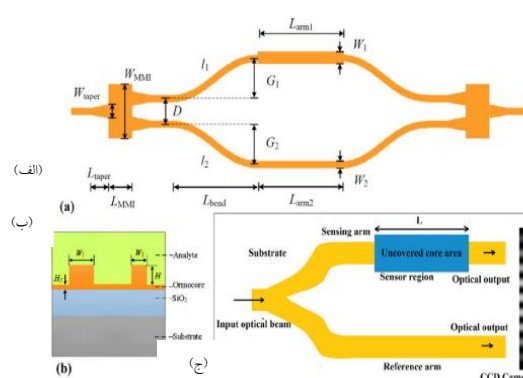
در تداخل‌سنجی، تفاوت‌های حس شده توسط دو پرتو نور که در امتداد مسیرهای یکسان حرکت می‌کنند، اساس سنجش آنالیت‌ها را تشکیل می‌دهد که در شکل ۶ نشان داده شده است. یک تداخل‌سنج معمولی ماخ زندر دارای یک بازوی مرجع و یک بازوی حسگر به همراه یک دوربین است. یک پرتو نوری ورودی واحد وجود دارد، در حالی که دو خروجی نوری از بازوی مرجع و بازوی حسگر خارج می‌شوند. بازوی حسگر دارای یک ناحیه هسته بدون پوشش است که برای تشخیص آنالیت‌ها طراحی شده است. شکل ۶ (الف) ساختار یک حسگر نوری موجبر

⁵ Nitesh Mudgal et al

⁶ Espinosa et al

⁷ Human epidermal growth factor receptor 2

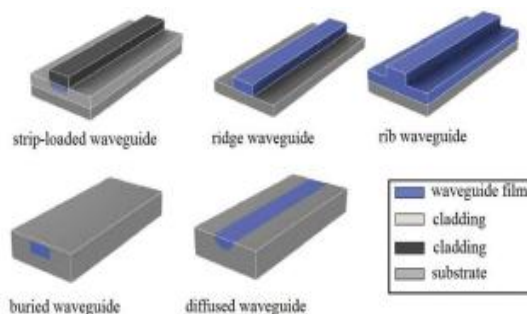
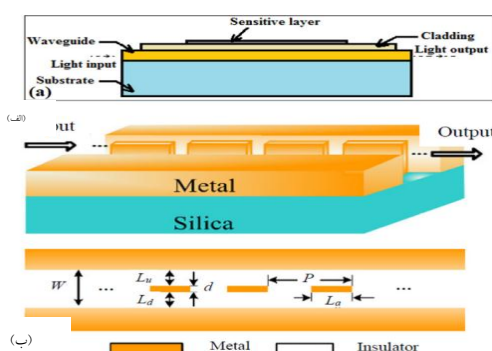
در حسگرهای زیستی موج‌بر نوری استفاده می‌شود. یک حسگر زیستی موج‌بر نوری معمولی بسیار حساس است، حسگرهای زیستی موج‌بر نوری انعطاف‌پذیر و با وضوح بالا اخیراً توسعه یافته‌اند. پیشینه تاریخی و بررسی و بحث قرار گرفته است (۳۸). حسگرهای طبقه‌بندی حسگرهای زیستی موج‌بر نوری مورد بررسی و بحث قرار گرفته است (۳۸). حسگرهای زیستی موج‌بر نوری با موفقیت در تشخیص و درمان بالینی، تصویربرداری و غیره استفاده می‌شوند (۳۹). تداخل ماخ-زندر بر اساس عایق فلز-فلز مبتنی بر بازتاب براگ برای کاربردهای حسی و ارتباطی طراحی شده است که در شکل ۸ (ب) نشان داده شده است. تشخیص حساسیت بالای مایکروتوکسین‌ها با استفاده از حسگر زیستی نوری مبتنی بر یک موج‌بر مسطح گزارش شده است (۴۰). حسگر زیستی موج‌بر نوری مبتنی بر فیلم دی اکسید تیتانیوم نقره حساسیت بالاتری نسبت به حسگر زیستی مبتنی بر طلا دارد (۴۱). طراحی حسگر زیستی موج‌بر نوری شاخه Y سیلیکون نیتريد از طریق شبیه‌سازی برای حساسیت بالا بهینه شده است (۴۲). بیوسنسور سطحی موج‌بر پلاسمون پلاریتون برای تشخیص حمله قلبی از طریق تروپونین I قلب انسان ارائه شده است (۴۳).



شکل (۶): (الف) ساختار یک بیوسنسور نوری موج‌بر یکپارچه پلیمری با دو بازو با عرض نابرابر (ب) مقطع دو بازوی حسگر. (ج) یک تداخل سنج معمولی ماخ زندر (۳۶).

حسگرهای زیستی موج‌بر نوری

موج‌بر نوری معمولاً بر روی بستری با ضخامت کم و ضریب شکست کم با استفاده از مواد سیلیس یا پلیمر ساخته می‌شود. بر اساس مورفولوژی، موج‌بر نوری را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد: موج‌بر تیغه‌ای و موج‌بر راه‌راه. در ساختار دوم، نور فقط می‌تواند به صورت طولی در امتداد موج‌بر منتشر شود. موج‌بر راه راه را می‌توان به موج‌بر بارگذاری شده نواری، موج‌بر دنده‌ای، موج‌بر مدفون و موج‌بر پخش شده تقسیم کرد که می‌تواند توسط فناوری‌های استاندارد میکرو و نانو ساخت اجرا شود (شکل ۷).



شکل (۷): تصویر شماتیک از انواع مختلف موج‌برهای راه‌راه [۳۷].

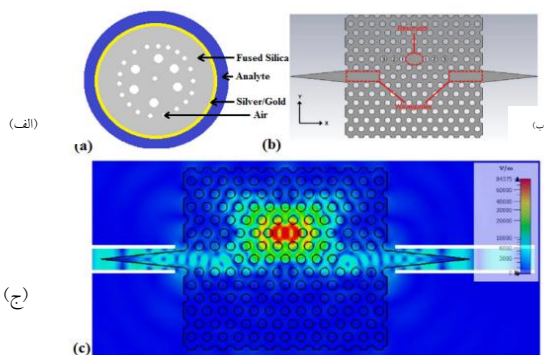
شکل (۸): (الف) زیست حسگر موج‌بر نوری (ب) موج‌بر پلاسمونی MIM (فلز- عایق فلز): نمای سه بعدی و دو بعدی (۴۴).

تغییر نوری در مجاورت سطح هدایت کننده ناشی از پراکندگی موج ناپایدار به عنوان مکانیسم تشخیص

حسگرهای زیستی کریستال فوتونیک نوری

تغییرات در ضریب شکست و تناوب که منجر به تغییر در رفتار نوری می‌شود به عنوان مکانیزم سنجش در حسگرهای نوری کریستال فوتونی استفاده می‌شود. شکل ۹ (الف) ساختار معمولی حسگر کریستال فوتونی با سیلیس ذوب شده و لایه نقره، طلا را نشان می‌دهد. حسگرهای زیستی کریستال فوتونیک کاربردهای بسیار زیادی در پزشکی دارند. زیست حسگر کریستال فوتونیک با قابلیت‌های بیشتری تکامل یافته‌اند، با این حال آن‌ها فقط به آنالیت‌های خاص محدود شده‌اند و با چالش‌های مرتبط با حساسیت مواجه هستند (۴۵). شکل ۹ (ب) یک تشدید کننده کریستال فوتونی را نشان می‌دهد که با استفاده از ویفر سیلیکونی با مقاومت بالا برای تشخیص سریع طراحی شده است و شکل ۹ (ج) توزیع میدان الکتریکی تشدید کننده کریستال فوتونی را در صفحه xy نشان می‌دهد (۴۶). حساسیت حجمی و حسی قابل توجهی در تشدید کننده ریز حلقه کریستال فوتونی در مقایسه با حسگرهای میکرو حلقه معمولی گزارش شده است (۴۷). حسگرهای بلور فوتونیک اندازه کوچکتر، حساسیت بالا و به راحتی قابل ادغام هستند (۴۸). اخیراً حسگرهای زیستی کریستال فوتونی دوبعدی طراحی شده با استفاده از موج‌برها و یک نانوحفره ارائه شده است (۴۹). یک بیوسنسور کریستال فوتونیک دو بعدی با ابعاد کوچکتر و حساسیت خوب ارائه شده است (۵۰). یک حسگر زیستی حساس بر اساس کریستال‌های فوتونی دی اکسید تیتانیوم با استفاده از رسوب فاز مایع^۸ (LPD) توسعه

یافته است (۵۱). یک بیوسنسور کریستال فوتونیک تک بعدی با لایه‌های نازک چندلایه که برای حساسیت بالا مورد بررسی قرار گرفته است (۵۲). فیبر کریستال فوتونیک مارپیچی دوقطبی که از نظر تئوری با استفاده از روش اجزا محدود بررسی شده است، حساسیت بالایی نشان داده است (۵۳). یک بیوسنسور فیبر کریستال فوتونیک چند کاناله فشرده و یکپارچه با حساسیت بالا پیشنهاد شده است (۵۴).



شکل ۹: (الف). تشدید کننده بلور فوتونیک در محدوده میلی متر/تراهرتز (ب) یک بیوسنسور کریستال فوتونی معمولی (ج) توزیع میدان الکتریکی تشدید کننده کریستال فوتونیک در صفحه xy (۴۶).

فلورسانس نوری، بیوسنسورهای لومینسانس

در بیوسنسورهای نوری مبتنی بر فلورسانس و لومینسانس، نوری که پس از برانگیختگی فلورسنت ساطع می‌شود، به طور معمول با استفاده از آشکارسازهایی مانند فتودیودها یا لوله‌های فوتومولتی‌پلایر تشخیص داده می‌شود. شکل ۱۰ ساختار کلی یک بیوسنسور نوری را به همراه ارتباط آن با پلتفرم‌های فلورسنت تقویت شده فلزی به تصویر می‌کشد. این نوع بیوسنسورها به دلیل پیشرفت‌های

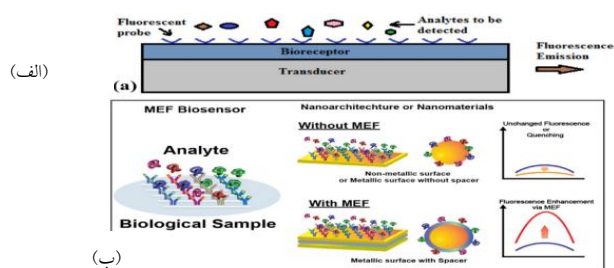
⁸ liquid phase deposition

سریع و حساس برای تشخیص DNA منتشر شده از نواحی مرئی به نزدیک مادون قرمز طراحی کرده اند (۵۹). یک بیوسنسور فلورسنت کدگذاری شده ژنتیکی برای بررسی ردوکس تیوردوکسین مفید در زیست شناسی ردوکس ارائه شده است (۶۰). تشخیص یون مس به طور موثر توسط بیوسنسور فلورسنت مبتنی بر پیپورین انجام شده است (۶۱).

زیست حسگرهای نوری تشدید پلاسمون (SPR)^{۱۰}
(SPR) مسلماً بیشترین مطالعه و استفاده را در میان زیست حسگرهای نوری شامل می‌شود. زیست حسگرهای نوری SPR خاص، حساس و مقرون به صرفه هستند. شکل ۱۱ (الف) زیست حسگرهای نوری پلاسمون سطحی معمولی را با لایه طلائی روی منشور نشان می‌دهد، جایی که نور فرودی به یک آشکارساز منعکس می‌شود.

تشدید پلاسمون سطحی ناشی از نوسانات چگالی بار سطحی الکترون‌های آزاد در سطح مشترک فلز-دی الکتریک است. می‌توان آن را به طور موثر توسط پرتوی از نور فرودی برانگیخت که امواج ناپایدار تولید می‌کند. در تکنیک مبتنی بر منشور، از یک منشور شیشه‌ای با ضریب شکست بالا استفاده می‌شود که سیگنال نوری فرود را در سطح فلز-دی الکتریک جفت می‌کند. شدت نور منعکس شده از سطح را می‌توان برای اندازه‌گیری حساسیت دستگاه استفاده کرد. تغییر در ضریب شکست در ناحیه تشخیص، سطح حسگر که به‌عنوان تغییر در زاویه تشدید ارزیابی می‌شود، برای هدف حسگر زیستی استفاده می‌شود. بررسی اخیر توسط اوا گورودکیویچ و زنون لوکاس

قابل توجه در زمینه فلورسانس و لومینسانس، به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مواد دوبعدی مانند گرافن و دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه (TMDs) به دلیل خواص منحصر به فرد الکتریکی، نوری و مکانیکی خود، به عنوان بسترهای بسیار مناسبی برای طراحی حسگرهای زیستی فلورسنت نوین مطرح شده‌اند. این مواد با فراهم کردن محیطی پایدار و با سطح تماس بالا، امکان تشخیص دقیق و حساس انواع مختلف بیومولکول‌ها را فراهم می‌آورند.



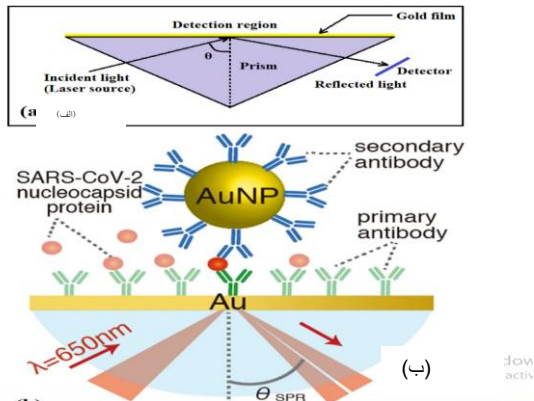
شکل (۱۰): (الف) ساختار معمولی یک بیوسنسور فلورسنت (ب) حسگر زیستی نوری معمولی و ارتباط آن با پلت فرم‌های فلورسانس افزایش‌یافته فلزی (۵۵).

کریستال‌های مایع کلستریک بدون برچسب، ارزان و نشان‌دهنده رنگ جدید برای تشخیص مولکول‌های زیستی نشان داده شده است (۵۶). حسگرهای ایمنی بدون برچسب مبتنی بر نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با نورولومینسانس ناحیه مرئی شدید برای تجزیه و تحلیل سریع عفونت‌های سالمونلا وجود دارد (۵۷). الیگودئوکسی‌ریبونوکلوئوتید و اکسید گرافن نشاندار شده با نقاط کربن برای طراحی یک حسگر زیستی فلورسنت برای تشخیص جیوه (II) استفاده شده است (۵۸). رونگ هو و همکاران^۹ یک بیوسنسور فلورسنت

¹⁰ Surface plasmon resonance

⁹ Rong Hu et al

عملکرد بهتری نسبت به حسگر زیستی SPR مبتنی بر گرافن مولیبدن دی سولفید دارند (۷۰).



شکل (۱۱): (الف) یک بیوسنسور رزونانس پلاسمون سطحی معمولی. (ب) اندازه‌گیری پروتئین نوکلئوکپسید SARS-CoV-2 (پروتئین N) با استفاده از نانوذرات طلا (AuNPs) (۶۶).

کاربردهای زیست حسگرهای نوری، در دهه اخیر

زیست حسگرهای نوری امروزه تمام جنبه‌های زندگی روزمره را تحت تاثیر قرار داده‌اند. امروزه از آن‌ها در تشخیص پزشکی، بازرسی مواد غذایی صنایع شیمیایی، مانیتورینگ محیط زیست، تولید محصولات دارویی، بهداشتی و... استفاده می‌کنند. در این بخش، زمینه‌های کاربردی اصلی و کاربردهای نوظهور در دهه گذشته برای ارائه تصویری واضح از تطبیق‌پذیری زیست حسگرهای نوری ترسیم شده است. زمینه‌های کاربردی اصلی حسگرهای نوری را در داروسازی و پزشکی، بازرسی و ایمنی غذا و نوشیدنی، نظارت بر فرآیندهای صنعتی، دامپزشکی و کشاورزی، تشخیص بیماری و مراقبت‌های بهداشتی، بیوتکنولوژی و علوم

زوسک^{۱۱} (۶۲) آخرین پیشرفت‌های بیوسنسورهای تشدید پلاسمون سطح نوری را با جزئیات پوشش می‌دهد. گتولینگ لیانگ و همکاران^{۱۲} حسگرهای زیستی فیبر نوری SPR، تکنیک‌های ساخت، کاربردها و چشم‌اندازهای آینده آن‌ها را مورد بحث قرار داده‌اند (۶۳). بیوسنسور تشدید پلاسمون سطحی بر اساس انواع مواد، نانوکوره‌های طلا و نانومیله‌های طلا، فیلم گرافن/طلا/فیبر نوری پلاستیک، پوشش‌دهی شده با گرافن - تنگستن دی سولفید، لایه‌های نازک اکسید روی (۶۴) اخیراً طراحی شده است. پیشرفت‌ها در رسوب فیلم و رویکردهای جدید طراحی منشور (۶۵) برای بهبود عملکرد حسگرهای زیستی SPR هدف قرار گرفته‌اند. شکل ۱۰ (ب) شماتیک سیستم اندازه‌گیری SPR پروتئین نوکلئوکپسید (پروتئین N) SARS-CoV-2 را با استفاده از نانوذرات طلا نشان می‌دهد (۶۶). فتن بشار کمال الدین و یاپ وینگ فن^{۱۳} مروری بر بیوسنسورهای SPR مبتنی بر نانومواد (۶۷) ارائه کرده‌اند. ویروس ضد دنگی در سرم انسانی به سرعت با استفاده از یک آزمایش جدید تشخیصی دنگی مبتنی بر ایمونوگلوبولین با استفاده از تشدید پلاسمون سطحی (SPR) شناسایی شد (۶۸). یک زیست‌حسگر رزونانس پلاسمون سطحی حساس (SPR) برای تشخیص گلوکز ادرار با استفاده از نیتريد بور شش ضلعی به عنوان پوشش روی لایه مولیبدن دی سولفید ایجاد شده است (۶۹). مشاهده شده است که حسگر زیستی لایه‌های اکسید روی و نقره و طلا پلاسمون سطحی (SPR) با تیتانات باریم و گرافن

¹¹ Ewa Gorodkiewicz and Zenon Lukas zewsk

¹² Gaoling Liang et al

¹³ Faten Bashar Kamal Eddin and Yap Wing Fen

زیستی، بازرسی و ایمنی نظامی و دفاعی و محیطی بررسی می‌کنیم.

داروسازی و پزشکی

زیست حسگرهای نوری کاربردهای بسیار زیادی در زمینه داروسازی برای توسعه داروها و ابزارهای زیست پزشکی دارند. تشخیص سریع و مطمئن عوامل بیماری‌زای متعدد در تمام زمینه‌های مربوط به بهداشت و سلامت نیاز روز است. کاربردهای پزشکی زیست حسگرها در تشخیص و پایش مواد شیمیایی سرطان‌زا و عوامل بیماری‌زا و طبقه‌بندی آن‌ها مورد بحث قرار گرفته است. اخیراً پیشرفت‌های جدید در حسگرهای نوری برای تشخیص پاتوژن، آنتی‌بادی‌ها و بیومارکرها بررسی شده است (۷۱). زیست حسگرهای نوری مبتنی بر سلولز به دلیل زیست سازگاری آنها به طور گسترده برای استفاده در علوم پزشکی قانونی و تشخیص پزشکی توسعه یافته‌اند (۷۲). انواع مختلفی از حسگرهای نوری در نظارت و تشخیص بیماری‌های عفونی، سرطان و اختلالات عصبی کاربرد دارند (۷۳). ویژگی‌های زیست حسگرهای نوری، محدوده تشخیص و کاربردها در نظارت بر داروهای درمانی توسط ویویان گارزون و همکاران^{۱۴} جدول‌بندی و بحث شده است (۷۴). آدریان فرناندز گاولا و همکاران^{۱۵} حسگرهای نوری بدون برچسب مبتنی بر سیلیکون برای کاربردهای بیوانالیتیکی و روش‌های جدیدتر و پیشرفته‌تر عملکرد زیستی (۷۵) را مورد بحث قرار داده‌اند. فسفات غیر آلی با استفاده از زیست حسگر فیبر نوری در نمونه‌های ادرار شناسایی شد

(۷۶). سروتونین، یک هارمون با استفاده از روش غیر آنزیمی و انتشار فسفرسنت مورد بررسی قرار گرفته است (۷۷). فیلم بلور فوتونیک دو بعدی مبتنی بر پلیمر برای تشخیص پروتئین واکنشی C تولید شده توسط کبد استفاده شده است (۷۸). نظارت بر سطح گلوکز با استفاده از بزاق با تشخیص غلظت گلوکز در محدوده (۵۱۶ - ۳۲) میلی گرم در دسی لیتر با استفاده از زیست حسگر نوری نشان داده شده است (۷۹). لیوپلی ساکارید باکتریایی (اندوتوکسین) که باعث سپسیس و شوک سپتیک می‌شود، با استفاده از زیست حسگر نوری در سلول زنده شناسایی شده است (۸۰). آنتی بیوتیک‌های آمفینیکل در کلیه گاو توسط زیست حسگر نوری شناسایی شده است (۸۱). تشخیص سریع و دقیق بیومارکرهای مولکولی با استفاده از حسگر زیستی نوری نانوذرات تبدیل شونده نشان داده شده است (۸۲).

بازرسی و ایمنی مواد غذایی و آشامیدنی

زیست حسگرهای نوری در بازرسی اقلام غذایی و تضمین ایمنی مرتبط با عوامل بیماری‌زا استفاده می‌شوند. پیشرفت‌ها در حسگرهای نوری که در پردازش و کنترل مواد غذایی، تشخیص پاتوژن‌ها و آفت‌کش‌ها استفاده می‌شوند، تشریح شده است (۸۳). حسگرهای نوری به طور فزاینده‌ای برای نظارت بر بهداشت، تشخیص آفت‌کش‌ها، داروها، پاتوژن‌ها و سایر مواد شیمیایی سمی در غذا و نوشیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۸۴). ای‌کول^{۱۶} و سالمونلا^{۱۷} در مواد غذایی بر اساس حسگر زیستی تشدید پلاسمون

¹⁶ E. coli

¹⁷ Salmonella

¹⁴ Vivian Garzon et al

¹⁵ Adrian Fernandez Gavela et al

صنعت طیور با مقاومت آنتی‌بیوتیکی مواجه است و تشخیص دقیق و سریع آنتی‌بیوتیک‌ها در طیور با استفاده از حسگرهای زیستی مختلف نوری انجام می‌شود. زیست حسگرهای نوری در بسته‌بندی و نظارت بر کیفیت مواد غذایی برای بررسی تازگی، پاتوژن‌ها، آلرژن‌ها و مواد تقلبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۹۰). زیست حسگر نوری گلوکز به عنوان حسگر گلوکز در کاربردهای صنایع غذایی پیشنهاد شده است (۹۱).

دامپزشکی و کشاورزی

حسگرهای نوری برای تشخیص سریع و در محل پاتوژن‌های دامپزشکی و برای نظارت بر کیفیت شیر و گوشت استفاده می‌شود. علاوه بر این، زیست حسگرهای نوری در تشخیص باقیمانده‌های آفت‌کش‌ها در خاک و محصولات، عوامل بیماری‌زا، کنترل کیفیت میوه‌ها و سبزیجات، تولید با کیفیت محصولات و بررسی بقایای دارو استفاده می‌شوند. تاثیر و کاربردهای حسگرهای نوری در تامین چالش‌های پیش‌روی کشاورزی و صنایع غذایی مورد بررسی قرار گرفته است (۹۲). حسگرهای نوری برای تشخیص پاتوژن در گاو و طیور بررسی شده است (۹۳). از آنزیم آرژنین دیمیناز برای تشخیص ال-آرژنین در آب میوه با زمان پاسخ کم‌تر از ۳۰ ثانیه استفاده شده است (۹۴). متیل پاراتیون، یک آفت‌کش ارگانوفسفره از طریق آنزیم استیل کولین استراز با استفاده از زیست حسگر فیبر نوری مخروطی شناسایی شده است (۹۵). محتوای بیوتین در شیر و پودر شیر با استفاده از روش ایمونواسی حسگر زیستی با ارزیابی

سطحی با رسوب کم شناسایی شده‌اند (۸۵) گونه‌های باکتریایی از آب در صنایع غذایی با استفاده از حسگرهای زیستی متخلخل مبتنی بر سیلیکون شناسایی شده‌اند (۸۶). تترودوتوکسین که نوروتوکسین در آب‌های دریا است با استفاده از زیست حسگر نوری شناسایی شده است (۸۷). پنی‌سیلیوم دیگیتاتوم^{۱۸} نام قارچی است که در مرکبات باعث به وجود آمدن پوسیدگی کپکی آبی می‌شود با استفاده از حسگرهای زیستی قبل از ظاهر شدن مورد بررسی قرار گرفته است (۸۸). بیوسنسور نوری برای تعیین جیوه (Hg) که یک آلاینده آب است پیشنهاد شده است (۸۹).

نظارت بر فرآیندهای صنعتی

زیست حسگرهای نوری در حال حاضر برای نظارت بر فرآیندهای زیستی، فاضلاب صنعتی، دارو، فرآوری مواد غذایی و فرآیندهای مختلف صنعتی دیگر استفاده می‌شوند. نظارت بر فرآیندهای صنعتی از طریق زیست حسگرهای نوری نقش کلیدی در تضمین کیفیت و حفظ استانداردهای صنعتی ایفا می‌کند. در مهندسی بافت برای نظارت بر زمان واقعی فعالیت‌های سلولی استفاده می‌شوند. زیست حسگرهای نوری در صنعت داروسازی برای کشف دارو و در صنایع فرآوری مواد غذایی برای حفظ کیفیت و ایمنی کالاها کاربرد دارند. زیست حسگرهای نوری کاربردهایی را در ساخت دستگاه‌های نوری زیست‌پزشکی در مقیاس نانو پیدا می‌کنند. پیشرفت‌ها و چالش‌ها در بیوسنسور نوری در نظارت بر فرآیند صنعتی و سایر زمینه‌ها تشریح شده است.

¹⁸ Penicillium digitatum

تشخیص بیماری‌های عفونی از ویروس‌ها و باکتری‌ها پیدا کرده‌اند. فناوری بدون برچسب برای توسعه داروها توسط جولیا ام هیلگر و همکاران^{۲۰} به کار گرفته شده است (۱۰۲). حسگرهای زیستی فلورسنت برای تشخیص هورمون‌ها، انتقال‌دهنده‌های عصبی و برخی از متابولیت‌های اصلی انسان استفاده شده‌اند (۵۶). انواع مختلف حسگرهای فیبر نوری و کاربردهای اخیر آن‌ها در مراقبت‌های بهداشتی به تفصیل بررسی شده است. تعیین میزان داروی آدالیموماب در بیماری کرون با استفاده از روش تشدید پلاسما نوری (۱۰۳) انجام شده است. یک زیست حسگر نوری برای تشخیص کاتپسین B که مربوط به بیماری سرطان است طراحی شده است (۱۰۴).

بیوتکنولوژی و علوم زیستی

زیست حسگرهای نوری کاربردهای بسیار زیادی در بیوتکنولوژی و علوم زیستی دارند. از آن‌ها برای مهندسی سلول‌های حیوانی، درمان بیماری‌ها، تحقیقات میکروبیولوژی، ایمونولوژی کاربردی، جنین شناسی، بیوشیمی، ژنتیک و غیره استفاده می‌شوند. حسگرهای زیستی به‌عنوان حسگرهای ایمنی برای تشخیص آنتی‌بادی‌ها و مواد سمی، حسگرهای DNA برای تشخیص ترکیبات غیرماکرومولکولی و پروتئینی و کاربردهای دیگر مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۰۵]. تشخیص نوری سریع و بدون برچسب آنتی‌بادی‌های مربوط به خودایمنی با طیف‌سنجی تداخل بازتاب‌سنجی انجام شده است.

چندین فاکتور بررسی شده است (۹۶). تشخیص بی‌درنگ، سریع و بدون برچسب آلبومین سرم گاو در محصولات شیر با استفاده از روش تشدید پلاسما نوری سطحی انجام شده است (۹۷).

سوء مصرف سولفادیمیدین در آب و محصولات لبنی، که یک نگرانی عمده برای سلامت انسان است، توسط یک حسگر نوری ارزان قیمت موج ناپدید کننده شناسایی شده است (۹۸). به منظور جلوگیری از آسیب به محصولات زراعی، تشخیص زودهنگام عوامل بیماری‌زا ضروری است. یک زیست حسگر نوری مبتنی بر میکروکتیلهور بسیار حساس برای تشخیص زودهنگام پاتوژن‌های کشاورزی ارائه شده است (۹۹). زیست حسگرهای نوری فشرده و حساس مبتنی بر کریستال فوتونیک برای تشخیص غلظت اوره توسط زینب غرس الله و همکاران^{۱۹} گزارش شده است (۱۰۰). غلظت اوره با استفاده از یک فیبر نوری مخروطی از طریق اوره آز در ژئولیت ایمیدازولات (۱۰۱) به دست آمده است.

تشخیص بیماری و مراقبت‌های بهداشتی

زیست حسگرهای نوری کاربردهای بسیار زیادی در تشخیص بیماری و مراقبت‌های بهداشتی دارند. اساس کار آن‌ها در تشخیص بیماری و مراقبت‌های بهداشتی و کاربردشان در کشف و آزمایش دارو و غیره مورد بحث قرار گرفته است. روش‌های سنتی تشخیص بیماری‌های عفونی با چالش‌های متعددی روبرو هستند، حسگرهای تشخیص سریع را برای درمان زودهنگام انجام می‌دهند و کاربرد بسیار زیادی در

²⁰ Julia M Hillger et al

¹⁹ Zaineb Gharsallah et al

برای مطالعه زیست شناسی رشد گیاهان، و نظارت بر متابولیت‌ها در حال حاضر از چندین حسگر زیستی استفاده می‌شود. تجزیه و تحلیل میکروبیولوژیکی، تشخیص پاتوژن‌های مواد غذایی، روش‌های تحلیلی و فناوری مورد بحث قرار گرفته است (۱۰۶). فاطمه حکیمیان و همکاران یک زیست حسگر نوری بسیار حساس برای تشخیص زودهنگام سرطان پستان با استفاده از نانوذرات طلا طراحی کرده‌اند (۱۰۷). میکروسیستین‌ها با استفاده از زیست حسگر نوری برای اطلاعات اولیه در مورد سویه‌های سیانوباکتری اندازه‌گیری شده‌اند (۱۰۸). یک تشخیص ویروس منفرد با استفاده از یک حسگر زیستی مبتنی بر تشدیدگر نوری انجام شده است (۱۰۹). کای سونگ و همکاران^{۲۱} یک بیوسنسور نوری مبتنی بر نانوذرات بیوکونژوگه‌های تبدیل آپتامر پیشنهاد کردند (۱۱۰). پروتکلی برای بررسی فعالیت پروتئین در جنین‌های زنده با استفاده از انتقال انرژی تشدید فلورسانس ارائه شده است (۱۱۱). یک بیوسنسور فلورسنت برای تشخیص وضعیت سلامت جنین‌های در حال رشد ارائه شده است (۱۱۲).

نظامی و دفاعی

ارتش هر ملتی باید به خوبی برای مقابله با هر موقعیتی که ناشی از حملات بیولوژیکی یا شیمیایی باشد آماده شوند. زیست حسگرهای نوری برای حس کردن محیط برای حملات بیولوژیکی یا شیمیایی طراحی شده‌اند. زیست حسگرهای نوری در نظارت بر وضعیت سلامت سربازان که یکی از جنبه‌های بسیار مهم در ارتش امروز است، بسیار پیشرفت کرده‌اند.

تحقیقات در زمینه زیست حسگرهای نوری برای افزایش قابلیت‌های رزمی ارتش مسیرهای جدیدی را باز می‌کند. برخی از باکتری‌ها و ویروس‌ها ممکن است به عنوان عوامل بیولوژیکی در جنگ استفاده شوند. کشف این عوامل یکی از دغدغه‌های اصلی ارتش است. باسیلوس آنتراسیس هم بر حیوانات و هم بر انسان تأثیر می‌گذارد، هاگ سیاه زخم با استفاده از زیست حسگرهای نوری شناسایی شده است (۱۱۳). باسیلوس آنتراسیس از طریق آنتی ژن محافظ با استفاده از حسگر زیستی تشدید سطح پلاسما شناسایی شده است و این روش در طی یک جنگ بیولوژیکی مناسب است (۱۱۴). میکروارگانیزم‌های بیماری‌زا، ویروس‌ها و سموم با استفاده از لومینسانس، فلورسانس، موج ناپایدار، تشدید پلاسما سطحی و دیگر زیست حسگرهای نوری شناسایی شده‌اند (۱۱۵). الکسی نابوک^{۲۲} مقایسه‌ای از زیست حسگرهای نوری مختلف مورد استفاده در تشخیص سموم زیستی را ارائه کرده است (۱۱۶). زیست حسگر نوری اکسید گرافن با عملکرد زیستی برای تشخیص ماده منفجره تری نیتروتولون (TNT) از طریق تشخیص جذب فرابنفش استفاده شده است. از حسگرهای زیستی برای تشخیص مواد منفجره استفاده می‌شود. تشخیص بسیار حساس ماده منفجره تری نیتروتولون (TNT) با استفاده از نانولوله‌های کربنی تک جداره زیست حسگرهای نوری گزارش شده است (۱۱۷).

بازرسی و ایمنی محیط زیست

زیست حسگرهای نوری کاربردهای مختلفی در بازرسی و ایمنی محیط پیدا کرده‌اند. فنگ لانگ و

پیشرفت بیشتر در روش‌های طراحی و ساخت، انتخاب‌پذیری بالا، حساسیت کم و تکرارپذیری خوب، گزینه‌ای ایده‌آل به عنوان جایگزینی برای روش‌های فعلی خواهد بود. انتظارات از زیست حسگرهای نوری آماده کووید-۱۹ در آینده نیز شامل مدیریت نمونه، جمع‌آوری نمونه و گزارش‌های سریع است.

چالش‌ها و آینده زیست حسگر نوری

در دهه جاری حسگرهای نوری از اهمیت بالایی برخوردار هستند و شگفتی‌های زیادی انجام داده‌اند. کاربردهای نوظهور بسیار زیادی در پزشکی، دستگاه‌های سموم در ارتش و دفاع، نظارت بر کیفیت خاک و مواد غذایی و غیره پیدا کرده‌اند. شکل ۱۲ حوزه‌های کاربردی کلیدی زیست حسگرهای نوری را نشان می‌دهد. انتظار می‌رود که آن‌ها در آینده نزدیک با زمان‌های اندازه‌گیری سریع، حساسیت و انتخاب‌پذیری بالاتر و کاهش هزینه ساخت تولید شوند. با این حال، استفاده از تمام ایده‌ها و دستگاه‌های پیشنهادی، علاوه بر داشتن امکانات ساخت خوب، همچنان یک چالش است. به منظور بهبود دامنه کاربردها، حساسیت، ویژگی، و تکرارپذیری آن‌ها و همچنین طراحی و اجرای مشخصاتی که امکان استفاده از آن‌ها را در شرایطی که معمولاً در نقطه مورد نیاز یافت می‌شوند، بسیار مهم است. عواملی مانند استحکام، هزینه و رابط کاربری و توانایی انتقال داده‌ها نیز چالشی برای رسیدگی است. زمان‌های تشخیص طولانی‌تر و مقدار زیاد معرف‌ها چالش اصلی در طراحی حسگر زیستی است حسگرهای زیستی بدون

همکاران^{۲۳} زیست حسگرهای نوری و کاربردهای زیست محیطی آن‌ها را بررسی کرده‌اند (۱۱۸). تعدادی از آن‌ها برای تشخیص آفت‌کش‌ها، آلاینده‌های محیطی، فلزات سنگین در آب و غیره توسعه یافته‌اند. نوعی حسگر نوری برای اندازه‌گیری آلاینده‌های دریایی توسعه یافته است.

پاندمی کووید ۱۹

پس از پاندمی کووید-۱۹ و تهدیدات بزرگی که برای سلامت جهانیان ایجاد کرد، محققان زیادی به مطالعه در این زمینه روی آوردند و یافته‌های زیادی نیز کشف شده است. تحقیقات گسترده و کسب اطلاعات دقیق اهمیت بسزایی دارد. در این مطالعه با مرور مطالعات و شواهد منتشر شده در پایگاه‌های اطلاعاتی، جدیدترین یافته‌ها را ارائه داده‌اند. آزمایش کووید ۱۹ را می‌توان از نظر هزینه، سرعت و حساسیت با کمک زیست حسگرهای نوری بهینه کرد. بحث‌های زیادی در سرتاسر جهان برای اجرای بیدرنگ حسگرهای نوری کووید ۱۹ وجود دارد. هیمانث مدالی و همکاران^{۲۴} مروری مفصل از تکنیک‌های نوری مختلف برای تشخیص ویروس ارائه کرده‌اند (۱۱۹). به نظر می‌رسد روش‌های آزمایش نوری مبتنی بر تکنیک تصویربرداری کمی گران‌تر از روش‌های موجود است، اما می‌تواند نتایج دقیق‌تر و روشن‌تری ارائه دهد. حسگرهای نوری این قابلیت را دارند که بر اساس اتصال مولکول‌ها دستگاه‌هایی ایجاد کنند که در هر توالی ویروسی خاصی را تشخیص دهد.

نیاز به حسگرهای زیستی جدید همیشه در حال افزایش است. حسگر نوری مبتنی بر نانومواد به دلیل

²³ Feng Long et al

²⁴ Hemanth Maddali et al

با طیف وسیعی از کاربردها، بیشترین استفاده را دارند. کاربرد زیست حسگرهای نوری از بازرسی مواد غذایی و نوشیدنی گرفته تا نظامی و دفاعی را شامل می‌شود. نیاز روزافزونی به حسگرهای نوری کم هزینه، بادوام، دقیق و حساس در زمینه‌های کاربردی مانند تشخیص بیماری، داروسازی و پزشکی وجود دارد. پیشرفت در فناوری‌های نانوساخت و مواد جدید در حال حاضر منجر به کوچک‌سازی و گشودن ابعاد مختلف جدیدی در زیست حسگرهای نوری شده است.



شکل (۱۲): حوزه کاربرد بیوسنسورهای نوری

برچسب مقرون به صرفه هستند و نتایج تحلیلی بالا و عملکرد آسان‌تری ارائه می‌دهند. طراحی و ساخت حسگرهای نوری حساس و مقرون به صرفه نیاز به بررسی دقیق مواد و فرآیند توسعه دارد. لیگلر و گودینگ و همکاران^{۲۵} رویکردهای مختلف برای رسیدگی به چالش‌های مختلف در توسعه حسگرهای زیستی نوری عملی ارائه داده‌اند (۱۲۰).

مزایای نانوحسگرها باعث شده است که به عنوان فرصتی وسوسه‌انگیز برای بازار تلقی شوند. نانوحسگرها به‌طور ذاتی کوچک‌تر و حساس‌تر از سایر حسگرها می‌باشند. همچنین این ظرفیت را دارند که قیمت تمام شده آن‌ها کم‌تر از قیمت تمام‌شده حسگرهای موجود در بازار باشد. نقاط کوانتومی، نانولوله‌های کربنی و انواع مختلف نانوذرات به‌طور پیوسته در طراحی حسگرهای زیستی استفاده می‌شوند. می‌توان انتظار داشت که در آینده با ترکیب محرک‌ها و نانوحسگرها بتوان مواد هوشمندی ساخت که در فرایندهای تولید سیستم‌های پیچیده نقش‌های مهمی ایفا کرده و فناوری جدید دیگری را پایه ریزی کنند.

نتیجه‌گیری

در دهه گذشته، فناوری زیست حسگرهای نوری پیشرفت‌های شگرفی در پیکربندی حسگرها داشته است. حسگرهای زیستی نوری در تشخیص انواع آنالیت‌های شیمیایی و بیولوژیکی استفاده شده‌اند، و عملکرد آن‌ها به‌طور مداوم در حال تکامل است. در این مقاله، پیشرفت‌های اخیر در انواع زیست حسگرهای نوری بر اساس جنبه‌های طراحی آن‌ها و کاربردهای آن‌ها بررسی شده است. تشدید پلاسمون سطحی

منابع

- [1] Malhotra, BD., Md. Azahar., 2018, Nanomaterials in biosensors: Fundamentals and applications, Nanomaterials for Biosensors 1–74.
- [2] Singh, P., plasmon., S, 2017, resonance: a boon for viral diagnostics. Reference Module, Life Sci.
- [3] Schaferling, M., 2016, Fluorescence-based biosensors, Encyclop. Anal. Chem. 1–52.
- [4] Damborsky, P., 2016, Juraj Švitel, Jaroslav Katrlík, Optical biosensors. Essays Biochem. 60 (1) 91–100.
- [5] Boris, G., Andryukov, N., Besednova, V., Romashko, TS., Zaporozhets, TA., Efimov,

²⁵ Ligler and Gooding et al

- [17] Ming-jie, Y., Gu, Bo., Quan-Fu, An., Chengbin, Y., Yong Liang, G., Ken-Tye, Y., 2018, Recent development of fiber optic chemical sensors and biosensors: Mechanisms, materials, micro/nano-fabrications and applications, *Coord. Chem. Rev.* 376 348–392.
- [18] Mildred, S., Cano-Vela, z., Luz M, L., Juan, HC., 2020, Fiber optic biosensor based on polydimethylsiloxane (pdms) and bioactive lipids, *Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XX*, volume 11233, International Society for Optics and Photonics, p. 112330Y.
- [19] Lin, Z., Chen, L., Zhengbo, S., Hongju, M., Lin, Z., Yu, X., Jianlong, Z., Xianfeng, C., 2019, Black phosphorus based fiber optic biosensor for ultrasensitive cancer diagnosis, *Biosens. Bioelectron.* 137 140–147.
- [20] Rahaman Khan, Md., Watekar, AV., Kang, SW., 2017, Fiber-optic biosensor to detect ph and glucose, *IEEE Sens. J.* 18 (4) (2017) 1528–1538.
- [21] Gohring, JT., Dale, PS., Xudong, F., 2010, Detection of her2 breast cancer biomarker using the opto-fluidic ring resonator biosensor, *Sens. Actuat. B: Chem.* 146 (1) 226–230.
- [22] Liaquat, A., Mahmood Uddin, M., Mahrukh, K., Bin Yousuf, AH., Chowdhury, MH., 2019, Highquality optical ring resonator-based biosensor for cancer detection, *IEEE Sens. J.* 20 (4) 1867–1875.
- [23] Steglich, Pa., Hu'lsemann, M., Dietzel, B., Andreas, M., 2019, Optical biosensors based on silicon-on-insulator ring resonators: A review, *Molecules* 24 (3) 519.
- [24] Chang, CW., Xiaochuan, X., Chakravarty, S., Huang, HC., Li-Wei, T., Yungung Chen, Q., Dalir, H., Krainak, MA., Chen, RT., 2019, Pedestal subwavelength grating metamaterial waveguide ring resonator for ultra-sensitive label-free biosensing, *Biosens. Bioelectron.* 141 111396.
- [25] Voronin, KV., Stebunov, YV., Voronov, AA., Arsenin, AV., Volkov, VS., 2020, Vertically coupled plasmonic racetrack ring resonator for biosensor applications, *Sensors* 20 (1) 203.
- [26] Geidel, S., Llopis, SP., Rodrigo, M., Diego-Castilla, D., Sousa, A., Nestler, J., Otto, T., Gessner, T., Parro, V., et al., 2016, Integration of an optical ring resonator biosensor into a self-contained microfluidic
- 2020, Label-free biosensors for laboratory-based diagnostics of infections: current achievements and new trends, *Biosensors* 10 (2) 11.
- [6] Baoyi, S., Zhongdang, X., 2020, Recent achievements in exosomal biomarkers detection by nanomaterials-based optical biosensors-a review, *Anal. Chim. Acta.*
- [7] Eishu. H., Etsuko, K., 2016, Future perspective of single molecule fret biosensors and intravital fret microscopy, *Biophys. J.* 111 (6) (2016) 1103–1111.
- [8] Kretschmann, E., 1971, Die bestimmung optischer konstanten von metallen durch anregung von oberflä" chenplasm aschwingungen, *Zeitschrift fu'r Physik A Hadrons and nuclei* 241 (4) 313–324.
- [9] Liedberg, B., Nylander, C., Lunstro"m, I., 1983, Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing, *Sens. Actuat.* 4 299–304.
- [11] Esfahani Monfared, Y., 2020, Overview of recent advances in the design of plasmonic fiber-optic biosensors, *Biosensors* 10 (7) 77.
- [12] Puspita, I., Irawati, N., Anoraga Madurani, K., Kurniawan, F., Koentjoro, S., Hatta, A.M., 2022, Graphene-and multi-walled carbon nanotubes-coated tapered plastic optical fiber for detection of lard adulteration in olive oil, *Photon. Sens.* 12 (4) 1–10.
- [13] Maas, MB., Maybery, GH.C., Perold, WJ., Neveling, DP., Dicks, L.M.T., 2018, Borosilicate glass fiber-optic biosensor for the detection of escherichia coli, *Curr. Microbiol.* 75 (2) 150–155.
- [14] Chen, Z., Chengjun, S., Zewei, L., Kunping, L., Xijian, Y., Haimin, Z., Yongxin, L., Yixiang, D., 2018, Fiber optic biosensor for detection of genetically modified food based on catalytic hairpin assembly reaction and nanocomposites assisted signal amplification, *Sens. Actuat. B: Chem.* 254 956–965.
- [15] Marzena, H., Majchrowicz, D., Wierzba, P., Matthieu, W., Bechelany, M., 2017, Małgorzata Jedrzejewska Szczerska, Low-coherence interferometric fiber-optic sensors with potential applications as biosensors, *Sensors*, 17(2) 261.
- [16] Benito-Pen˜a, E., Valde's, MG., Martı'nez, BG., MariaC, MB., 2016, Fluorescence based fiber optic and planar waveguide biosensors. a review, *Anal. Chim. Acta* 943. 17–40.

- [37] Kozma, P., Kehl, F., Ehrentreich-Förster, E., Stamm, C., Bier, FF., 2014, *Biosens. Bioelectron.*, 58, 287.
- [38] Gauglitz, G., 2020, Critical assessment of relevant methods in the field of biosensors with direct optical detection based on fibers and waveguides using plasmonic, resonance, and interference effects, *Anal. Bioanal. Chem.* 1–33.
- [39] Valery, N., Konopsky, EV., 2019, Alieva, Imaging biosensor based on planar optical waveguide, *Opt. Laser Technol.* 115 171–175.
- [40] Al-Jawdah, A., Nabok, A., Jarrah, R., Holloway, A., Tsargorodska, A., Eszter, T., Andras, S., 2018, Mycotoxin biosensor based on optical planar waveguide, *Toxins* 10 (7) 272.
- [41] Zhao, J., Weiming, G., Chang, L., Tianyu, X., Qiyu, W., Weitao, Z., Xiaoqiang, C., 2016, A stable and high resolution optical waveguide biosensor based on dense tio₂/ag multilayer film, *Appl. Surf. Sci.* 377 207–212.
- [42] Nan, K.K., Shahimin, M.M., Adikan, F.R.M., 2014, Optimization of silicon nitride y-branch optical waveguide for evanescent field biosensor, *Advanced Materials Research*, volume 875, Trans Tech Publ, pp. 1183–1188.
- [43] Oleksiy, K., Pierre, B., 2019, Long-range surface plasmonpolariton waveguide biosensors for human cardiac troponin i detection, *Sensors* 19 (3) 631.
- [44] Liang, Z., Jiaqi, L., Chengyi, C., Xudong, L., Xinyuan, Z., Quanhao, Y., Kunhua, W., 2022, Jun Yang, Yuwen Qin, An integrated-plasmonic chip of bragg reflection and mach zehnder interference based on metal-insulator-metal waveguide, *Photon. Sens.* 12 (3) 1–10.
- [45] Fathi, F., Rashidi, M.R., Samadi Pakchin, P., Ahmadi-Kandjani, S., Nikniazi, A., 2020, Photonic crystal based biosensors: Emerging inverse opals for biomarker detection. *Talanta*, page 121615.
- [46] Yixiong, Z., Kunj, V., Xuan. L., 2022, Gerd vom Bo`gel, Karsten Seidl, Jan C. Balzer, Photonic crystal resonator in the millimeter/terahertz range as a thin film sensor for future biosensor applications, *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* 1–19.
- [47] Stanley, M.L., Shuren, H., Girija, G., Yiorgos, K., Sharon, M., Philippe, M., 2017, Photonic crystal microring resonator for label-free biosensing, *Opt. Exp.* 25 (6) 7046–7054.
- cartridge with active, single-shot micropumps, *Micromachines* 7 (9) 153.
- [27] Yong, L., Yang, L., Mingyu, L., Jian-Jun, H., 2017, High-sensitivity and wide-range optical sensor based on three cascaded ring resonators, *Opt. Exp.* 25 (2) 972–978.
- [28] Xiaonan, H., Xiuyou, H., Yuchen, S., Zhenlin, W., Yuxin, L., Jie, T., Shuhui, B., Geert, M., Mingshan, Z., 2017, Polymer integrated waveguide optical biosensor by using spectral splitting effect, *Photon. Sens.* 7 (2) 131–139.
- [29] Nitesh, M., Ankit, A., Ankur, S., Sourabh, S., Ashish, KG., Ghanshyam, S., 2020, Comparative study of interferometer and ring resonator based biosensors: A review, in: *Optical and Wireless Technologies*, Springer, pp. 419–427.
- [30] Kun Qin, H., Shuren, ST., Retterer, I., Kravchenko, SM., Weiss, S., 2016, light mach-zehnder interferometer as label-free biosensor with scalable sensitivity, *Opt. Lett.* 41 (4) 753–756.
- [31] Soichiro, Y., Shintaro, I., Taro, A., Yasuo, K., 2017, Highly sensitive optical biosensor based on silicon microring-resonator-loaded mach-zehnder interferometer, *Jpn. J. Appl. Phys.* 56(4S):04CH08.
- [32] Marek, B., 2020, Model of the broadband interferometric optical biosensor in a planar configuration, *Photon. Lett. Poland* 12 (2) 28–30.
- [33] Xuegang, L., Linh, VN., Yong, Z., Heike, E., Stephen, C., 2018, High-sensitivity sagnac interferometer biosensor based on exposed core microstructured optical fiber, *Sens. Actuat. B: Chem.* 269 103–109.
- [34] Maldonado, J., Este´vez, M., Fern´andezGavela, A., Gonza´lez-Lo´pez, J., Gonza´lezGuerrero, AB., Lechuga, LM., 2020, Label-free detection of nosocomial bacteria using a nanophotonic interferometric biosensor, *Analyst*, 145 (2):497–506
- [35] Dandan, S., Yongming, F., Yukun, Y., 2020, Label-free detection of breast cancer biomarker using silica microfiber interferometry, *Opt. Commun.* 463 125375.
- [36] Enxiao, L., Hossam, S., Ratner, DM., Cheung, KC., Lukas, C., 2018, Silicon photonic biosensors using label-free detection, *Sensors* 18 (10) 3519.

- [58] Xin, C., Lei, Z., Jing, W., Hou, Y., Peiyao, W., Zhenni, W., Mei, Y., 2015, A fluorescent biosensor based on carbon dots-labeled oligodeoxyribonucleotide and graphene oxide for mercury (ii) detection, *Biosens. Bioelectron.* 63 506–512.
- [59] Rong, H., Tao, L., Xiao-Bing, Z., Shuang-Yan, H., Cuichen, W., Ting, F., Weihong, T., 2014, Multicolor fluorescent biosensor for multiplexed detection of dna, *Anal. Chem.* 86 (10) 5009–5016.
- [60] Yichong, F., Merna, M., Michael, X., Huiwang, A., 2017, Monitoring thio redoxin redox with a genetically encoded red fluorescent biosensor, *Nat. Chem. Biol.*, 13(9):1045.
- [61] Kun, Y., Yixuan, W., Shasha, W., Lingxin, C., 2016, A sensitive fluorescent biosensor for the detection of copper ion inspired by biological recognition element pyoverdine, *Sens. Actuat. B: Chem.* 232 257–263.
- [62] Gorodkiewicz, E., Lukaszewski, Z., 2018, Recent progress in surface plasmon resonance biosensors (2016 to mid-2018), *Biosensors* 8 (4) 132.
- [63] Gaoling, L., Zewei, L., Kunping, L., Yimin, W., Jianxiong, D., Yixiang, D., 2016, Fiber optic surface plasmon resonance-based biosensor technique: fabrication, advancement, and application, *Critical reviews in analytical chemistry* 46 (3) 213–223.
- [64] Angad, S., Kushwaha, A., Rajeev, K., Monika, S., Srivastava, S.K., 2018, Zinc oxide, gold and graphene based surface plasmon resonance (spr) biosensor for detection of pseudomonas like bacteria: a comparative study, *Optik* 172 697–707.
- [65] Chandra, P., Amit-Kumar, S., 2022, Recent advancements in the applications of zno: A versatile material. In *Nanotechnology*, pages 175–188. CRC Press.
- [66] Taka-aki, Y., Taira, K., Masayuki, O., Yoshiya, M., Yuichi, H., Atsushi, S., Kunihiko, O., Ayuko, S., Takuya, S., Koji, Y., 2022, et al, Ultrasensitive detection of sars-cov-2 nucleocapsid protein using large gold nanoparticle-enhanced surface plasmon resonance, *Scientific reports* 12 (1) 1–8.
- [67] Faten, B., Kamal, E., Yap-Wing, F., 2020, The principle of nanomaterials based surface plasmon resonance biosensors and its potential for dopamine detection. *Molecules*, 25 (12):2769.
- [48] Silvia, R., Annalisa, L., Mariorosario, M., Erika Penzo, Stefano, C., Ivo, R., Vito, M., 2018, Optical biosensors based on photonic crystals supporting bound states in the continuum, *Materials* 11 (4) 526.
- [49] Divya, J., Selvendran, S., Sivanantha Raja, A., 2018, Photonic crystal based optical biosensor: a brief investigation, *Laser Phys.* 28 (6) 066206.
- [50] Mohsenirad, H., Olyae, S., Seifouri, M., 2016, Design of a new two-dimensional optical biosensor using photonic crystal waveguides and a nanocavity, *Photon. Lasers Med.* 5 (1) 51–56.
- [51] Keigo, A., Shoma, A., Kenji, S., Hideaki, H., Tatsuro, E., 2016, Development of optical biosensor based on photonic crystal made of tio2 using liquid phase deposition, *Jpn. J. Appl. Phys.* 55 (8S3) 08RE01.
- [52] Bouras, M., Charik, H., 2019, Allal Saïd, Abdesselam Hocini, Analysis of highly sensitive biosensor for glucose based on a one-dimensional photonic crystal nanocavity, *Opt. Eng.* 58 (2) 027102.
- [53] Md-Rabiul, H., Sanjida, A., Rifat, A., Sohel, R., Kawsar, A., Rajib, A., Harish, S., Derek, A., 2017, Spiral photonic crystal fiber-based dualpolarized surface plasmon resonance biosensor, *IEEE Sens. J.* 18 (1) 133–140.
- [54] Farhat, O.M., Yassmin, K.A., Hameed, A.A., Alrayk, W., El, D., Salah, S.A., 2016, Obayya, Design of highly sensitive multichannel bimetallic photonic crystal fiber biosensor, *J. Nanophoton.* 10 (4) 046016.
- [55] Yoon, J., Yun-Min, K., Kangwon, L., Won-Gun, K., 2018, Metal enhanced fluorescence (mef) for biosensors: General approaches and a review of recent developments, *Biosens. Bioelectron.* 111 102–116.
- [56] Fu-Lun, C., Yu-Jui, F., Jia-De, L., Yu-Cheng, H., Label-free, c., 2019, sensitive biosensors of cholesteric liquid crystals on a single vertically aligned substrate, *Biomed. Opt. Exp.* 10 (9) 4636–4642.
- [57] Roman, V., Tereshchenko, A., Valentyn, S., Julia, O., Nickolay, S., Rositsa, Y., Volodymyr, K., Arunas, R., 2017, Toward development of optical biosensors based on photoluminescence of tio2 nanoparticles for the detection of salmonella, *Sens. Actuat. B: Chem.* 252 95–102.

- [78] Tatsuro, E., Hiroshi, K., Kawaguchi, Y., Terumasa, K., Toshiyuki, H., 2016, Label-free optical detection of creactive protein by nanoimprint lithography-based 2d-photonic crystal film, *Biotechnol. J.* 11 (6) 831–837.
- [79] Amit-Kumar, S., Sandeep, K.J., 2019, Fabrication and validation of a handheld non-invasive, optical biosensor for self-monitoring of glucose using saliva, *IEEE Sens. J.* 19 (18) 8332–8339.
- [80] Hui, J., Donglei, J., Jingdong, S., Xiulan, S., Jiasheng, W., 2016, High-throughput living cell-based optical biosensor for detection of bacterial lipopolysaccharide (lps) using a red fluorescent protein reporter system, *Scientific reports* 6 36987.
- [81] Colin, S., Thompson, I., Traynor, T., Fodey, L., Dermot, V. F., Steven, R.H., 2017, Crooks, Screening method for the detection of residues of amphenicol antibiotics in bovine, ovine and porcine kidney by optical biosensor, *Talanta* 172 120–125.
- [82] Yinghui, C., 2019, Upconversion nanoparticle based optical biosensor for the detection of molecular biomarkers. PhD thesis, School of Mathematical and Physical Sciences, Faculty of Science, University of Technology Sydney, 2019.
- [83] Akdogan, E., Mehmet, M., 2010, Basic principles of optical biosensors in food engineering. *Biosensors in food processing, safety, and quality control*, pages 53–70.
- [84] Nishtha, K., Gurdeep, R., Prayaga, M., Krishna, 2018, Labelfree optical biosensors for food and biological sensor applications, *Sensors and Actuators B: Chemical* 265 35–49.
- [85] Vaisocherova-Lisalova, H., Vissova, I., Laura-Ermini, M., Tomas Springer, X., Chadtova, S., Mrazek, J., Josefi na Lamacova, N., Scott Lynn, J., Petr Sediva k, Homola, J., 2016, Low-fouling surface plasmon resonance biosensor for multi-step detection of foodborne bacterial pathogens in complex food samples. *Biosensors and Bioelectronics*, 80:84– 90.
- [86] Massad-Ivanir, N., Shtenberg, G., Nitzan, R., Christel, G., Budding, D., Martine, PB., Ester, S., 2016, Porous silicon-based biosensors: Towards real-time optical detection of target bacteria in the food industry. *Scientific reports*, 6:38099.
- [68] Jahanshahi, P., Zalnezhad, E., Sekaran, S.D., Rafiq-Mahamd-Adikan, F., 2014, Rapid immunoglobulin m-based dengue diagnostic test using surface plasmon resonance biosensor, *Scientific reports* 4 3851.
- [69] Mudgal, N., Ankur, S., Ankit, A., Jalil, A., 2020, Preecha Yupapin, G. Singh, Modeling of highly sensitive surface plasmon resonance (spr) sensor for urine glucose detection, *Opt. Quant. Electron.* 52 (6) 1–14.
- [70] Mudgal, N., Ankur, S., Ankit, A., Singh, G., 2020, Zn and bi-metallic (ag–au) layers based surface plasmon resonance (spr) biosensor with batio3 and graphene for biosensing applications, *IETE Journal of Research* 1–8.
- [71] Seung, M.Y., Sang-Yup, L., 2016, Optical biosensors for the detection of pathogenic microorganisms, *Trends in biotechnology* 34 (1) 7–25.
- [72] Sha, Y., Liyun, D., Haitao, L., Wei, W., Huang, J., 2019, A novel optical fiber glucose biosensor based on carbon quantum dots/glucose oxidase/cellulose acetate complex sensitive film, *Biosens. Bioelectron.* 146 111760.
- [73] Gharatape, A., Yari Khosroushahi, A., 2019, Optical biomarker-based biosensors for cancer/infectious disease medical diagnoses, *Applied Immunohistochemistry & Molecular Morphology* 27 (4) 278–286.
- [74] Vivian, G., Daniel, G., Pinacho, R.H., Bustos, Gustavo, G., 2019, Sandra Bustamante, Optical biosensors for therapeutic drug monitoring, *Biosensors* 9 (4) 132.
- [75] Fernandez A., Gavela, D., Grajales, G., Jhonattan, C., Ramirez, L.M., 2016, Lechuga. Last advances in siliconbased optical biosensors. *sensors*, 16(3):285.
- [76] Kulkarni, S.d.J., Meena, S., 2020, Karve Fabrication of enzymebased optical biosensor for estimation of inorganic phosphate in a urine sample. *SN, Applied Sciences* 2 1–8.
- [77] Ramon-Marquez, T., Antonio, L., Medina-Castillo, Fernandez-Gutierrez, A., Jorge, F., 2016, Fernandez-Sanchez, A novel optical biosensor for direct and selective determination of serotonin in serum by solid surface-room temperature phosphorescence, *Biosens. Bioelectron.* 82 217–223.

- formulae, early lactation milk and seasonal bovine milk powders by biosensor immunoassay, *Int. Dairy J.* 35 (1) 25–31.
- [97] Harvey, E., Indyk, BD., Gill, DC., 2015, Woollard, An optical biosensor-based immunoassay for the determination of bovine serum albumin in milk and milk products, *Int. Dairy J.* 4772–78.
- [98] Lan-hua, L., Xiao-hong, Z., Wei-qi, X., 2014, Bao-dong Song, Han-chang Shi, Highly sensitive detection of sulfadimidine in water and dairy products by means of an evanescent wave optical biosensor, *RSC Advances* 4 (104) 60227–60233.
- [99] Rajul, P., Mamta, A., Madhuri, V., Andrea, A., Flavio, G., Leandro, L., Baghini, MS., Ramgopal, R., 2018, Microcantilever based dual mode optical biosensor for agricultural pathogen detection. In 2018 IEEE SENSORS, pages 1–3. IEEE.
- [100] Gharsallah, Z., Najjar, M., Bhuvneshwer, S., Vijay, J., 2018, High sensitivity and ultra-compact optical biosensor for detection of urea concentration, *Opt. Quant. Electron.* 50 (6) 249.
- [101] Guixian, Z., Cheng, L., Ruogu, Q., Mizhen, Z., Jiahao, Z., Lianqing, Z., Mingli, D., 2020, A metal-organic zeolitic framework with immobilized urease for use in a tapered optical fiber urea biosensor, *Microchim. Acta* 187 (1) 72.
- [102] Julia, M., Hillger, W., Lieuw, LH., Heitman, AP., zerman, IJ., 2017, Label-free technology and patient cells: from early drug development to precision medicine, *Drug Discovery Today* 22 (12) 1808–1815.
- [103] Sumin-Bian, L., Jiadi, F., Vermeire, S., Dragana, S., Lammertyn, J., 2018, Ann Gils, Development and validation of an optical biosensor for rapid monitoring of adalimumab in serum of patients with crohn's disease, *Drug Test. Anal.* 10 (3) 592–596.
- [104] Amouzadeh-Tabrizi, M., Ferre´-Borrull, J., Lluís, F., 2020, Marsal, An optical biosensor for the determination of cathepsin b as a cancer-associated enzyme using nanoporous anodic alumina modified with human serum albumin-thionine, *Microchim. Acta* 187 (4) 1–9.
- [105] Simranjeet, S., Vijay, K., Daljeet-Singh D., Shivika, D., Prasad, R., Joginder, S., 2020, Biological biosensors for monitoring and diagnosis. In *Microbial Biotechnology: Basic*
- [87] Campbell, K., Barnes, P., Simon, A., Haughey, C.H., Kentaro, K., Vasconcelos, V., Christopher, T., 2013, Elliott, Development and single laboratory validation of an optical biosensor assay for tetrodotoxin detection as a tool to combat emerging risks in european seafood, *Analytical and bioanalytical chemistry* 405 (24) 7753–7763.
- [88] Chalupowicz, D., Veltman, B., Samir, D., Evgeni. E., 2020, Evaluating the use of biosensors for monitoring of penicillium digitatum infection in citrus fruit, *Sensors and Actuators B: Chemical* 311 127896.
- [89] Saurabh, G., Sounik, S., Alexandros, K., Bhattacharya, J., 2019, Development of a cell-free optical biosensor for detection of a broad range of mercury contaminants in water: a plasmid dna-based approach, *ACS omega* 4 (5) 9480–9487.
- [90] Mustafa, F., Andreescu, S., 2018, Chemical and biological sensors for food-quality monitoring and smart packaging, *Foods* 7 (10) 168.
- [91] Mircea, T., Lederle, M., Neuner, L., Dolgowjasow, I., Wiedemann, P., Wo'fl, S., Tobias, W., 2017, Optical biosensor optimized for continuous in-line glucose monitoring in animal cell culture, *Anal. Bioanal. Chem.* 409 (24) 5711–5721.
- [92] Kundu, M., Krishnan, P., Kotnala, RK., Gajjala, S., 2019, Recent developments in biosensors to combat agricultural challenges and their future prospects. *Trends in food science & technology*, 88:157–178.
- [93] Jasmina, V., Marisa, M., Chung-Ming, C., Jaffrezic-Renault, N., 2017, Advanced biosensors for detection of pathogens related to livestock and poultry, *Veterinary research* 48 (1) 1–22.
- [94] Neelam, V., Ashish, KS., Pawanjit, K., 2015, Biosensor based on ion selective electrode for detection of larginine in fruit juices, *Journal of analytical chemistry* 70 (9) 1111–1115.
- [95] Arjmand, M., Saghafifar, H., Alijanianzadeh, M., Soltanolkotabi, M., 2017, A sensitive tapered-fiber optic biosensor for the label-free detection of organophosphate pesticides, *Sensors and Actuators B: Chemical* 249 523–532
- [96] Harvey, E., Indyk, BD., Gill, DC., 2014, Woollard, Biotin content of paediatric

- protective antigen, *Indian journal of microbiology* 53 (1) 48–55.
- [115] Nickolaj, F., Starodub, YA., Ogorodniichuk, YA., Sitnik, NF., 2012, Slishik, Biosensors for the control of some toxins, viral and microbial infections to prevent actions of bioterrorists, in: *Portable Chemical Sensors*, Springer, pp. 95–117.
- [116] Alexei, N., 2016, Comparative studies on optical biosensors for detection of bio-toxins, in: *Biosensors for Security and Bioterrorism Applications*, Springer, pp. 491–508.
- [117] Wang, J., 2018, Near infrared optical biosensor based on peptide functionalized single-walled carbon nanotubes hybrids for 2, 4, 6-trinitrotoluene (tnt) explosive detection, *Analytical biochemistry* 550 49–53.
- [118] Feng, L., Anna, Z., Hanchang, S., 2013, Recent advances in optical biosensors for environmental monitoring and early warning, *Sensors* 13 (10) 13928–13948.
- [119] Maddali, H., Catherine, E., Joachim Kohn, M., Deirdre, M., 2021, O'Carroll, Optical biosensors for virus detection: Prospects for sars-cov-2/covid-19, *ChemBioChem* 22 (7) 1176–1189.
- [120] Frances, S., Ligler, J., Justin, G., 2019, Lighting up biosensors: Now and the decade to come, *Analytical chemistry* 91 (14) 8732–8738.
- Research and Applications, pages 317– 335. Springer.
- [106] Tortorello, ML., Gendel, SM., 1997, *Food Microbiology and Analytical Methods: New Technologies*, CRC Press.
- [107] Hakimian, F., Ghourchian, H., Hashemi, A., Arastoo, MR., Behnam Rad, M., 2018, Ultrasensitive optical biosensor for detection of mirna 155 using positively charged au nanoparticles, *Scientific reports* 8 (1) 1–9.
- [108] Jinchuan, L., Xiaohong, Z., Hanchang, S., 2018, An optical biosensor-based quantification of the microcystin synthetase a gene: early warning of toxic cyanobacterial blooming, *Analytical chemistry* 90 (3) 2362–2368.
- [109] Ahmadi, H., Heidarzadeh, H., Taghipour, A., Rostami, A., Baghban, H., Dolatyari, M., Rostami, G., 2014, Evaluation of single virus detection through optical biosensor based on microsphere resonator, *Optik* 125 (14) 3599–3602.
- [110] Xianggui-Kong, KS., Xiaomin, L., Zhang, Y., Qinghui, Z., Langping, T., Zhan, S., Hong, Z., 2012, Aptamer optical biosensor without bio-breakage using upconversion nanoparticles as donors, *Chem. Commun.* 48 (8) 1156–1158.
- [111] Kardash, E., Bandemer, J., Erez, R., 2011, Imaging protein activity in live embryos using fluorescence resonance energy transfer biosensors, *Nature protocols* 6 (12) 1835.
- [112] Malcolm, S., Purdey, AS., Hanna, J., cLennan, M., Benjamin, J., Pullen, EP., Schartner, ML., McDowall, S., Jeremy, G., Thompson, TM., Monro, SJ., Nicholls, A., Abell, D., 2016, Biosensors for detecting stress in developing embryos, *SPIE BioPhotonics Australasia*, volume 10013, International Society for Optics and Photonics. 100130B.
- [113] Le'onid, M., Ireng, JG., 2012, Rapid detection methods for bacillus anthracis in environmental samples: a review, *Applied microbiology and biotechnology* 93 (4) 1411–1422.
- [114] Ghosh, N., Gupta, G., Boopathi, M., Pal, V., Singh, A.K., Gopalan, N., Goel, A.K., 2013, Surface plasmon resonance biosensor for detection of bacillus anthracis, the causative agent of anthrax from soil samples targeting

“Review article”

A comprehensive review of optical biosensors

Noushin Dadashzadeh^{1*}, Naser Moslehi Milani²¹ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Aras Branch, Islamic Azad University, Jolfa, Iran² Assistant Professor, Department of physics, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

*Corresponding author: noushindadashzadeh@yahoo.com

Abstract

Sensors have demonstrated valuable performance in environmental studies, agriculture, food inspection and safety, rapid and cost-effective responses in biotechnology, disease diagnosis, and medical services, among others. Among the many categories of sensors, optical biosensors, due to their selective, rapid, and highly sensitive measurements, offer additional advantages such as robustness, reliability, and the potential for on-chip integration. In optical biosensors, analytes are detected using light, with either label-based or label-free techniques. This article reviews some of the significant advancements in optical biosensors over the past decade, with a focus on their fabrication approaches and growing application areas. Along with a brief overview of the history of optical biosensors, some carefully selected papers on recent advances in optical biosensors are also presented. Additionally, the challenges and future of emerging optical biosensor technologies in the current decade are discussed.

Keywords: Types of optical biosensors, Application of optical biosensors, Surface plasmon resonanc



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال پانزدهم، شماره‌ی ۵۸
تابستان ۱۴۰۳، صفحات ۹۹-۸۵

"مقاله پژوهشی"

کاربردهای نانوزیست مواد در ارتوپدی

بهزاد یثربی^۱، سعیده ابراهیمی اصل^{۲*}

^۱ استادیار گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، تبریز، ایران

^{۲*} دانشیار گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: ebrahimi.nano@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱)

چکیده

پیشرفت‌های اخیر در نانوبیوتکنولوژی، انقلابی را در توانایی ما برای درک پیچیدگی‌های بیولوژیکی و حل مشکلات در حوزه پزشکی همراه با توسعه تکنیک‌ها و مواد بیومتریکی ایجاد کرده است. اعتقاد بر این است که نانوکامپوزیت‌ها و مواد نانوساختار با ویژگی‌های خاص ساختاری و فیزیکی و شیمیایی، نقشی محوری در تحقیقات ارتوپدی ایفا می‌کنند، زیرا خود استخوان نمونه‌ای معمولی از نانوکامپوزیت‌ها است. این مقاله به بررسی تحقیقات اخیر در استفاده از نانوزیست کامپوزیت‌ها برای بهبود مواد مورد نیاز ارتوپدی می‌پردازد و کاربرد آن‌ها را در مهندسی بافت استخوان و نیز به عنوان رابط‌های تاندون- استخوان بررسی می‌کند. تحقیقات اولیه پتانسیل نانوزیست مواد را برای کاربردهای ارتوپدی نشان می‌دهد. ولیکن با توجه به گستره قابل توجه کاربردی این مواد در این حوزه و نیاز به بررسی بالینی این کامپوزیت‌ها تحقیقات همچنان ضروری است. لذا بررسی‌های بیش‌تری در این حوزه و کاربردهای پزشکی این مواد پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: ارتوپدی، نانوزیست مواد، مهندسی بافت، استخوان

مقدمه

فناوری نانوموج چهارم انقلاب صنعتی^۱، پدیده‌ای عظیم می‌باشد که در تمامی گرایش‌های علمی راه یافته است تا جایی که در یک دهه آینده برتری فرایندها وابسته به این تحول خواهد بود (۱). ماهیت فناوری نانو توانایی کارکردن در تراز اتمی، مولکولی و فراتر از آن در ابعاد بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، با هدف ساخت و دخل و تصرف در چگونگی آرایش اتم‌ها یا مولکول‌ها با استفاده از مواد، وسایل و سیستم‌هایی با توانایی‌های جدید و با تغییر این ساختارها و رسیدن به بازدهی بیشتر- تر مواد می‌باشد. در واقع اگر همه مواد و سیستم‌ها ساختار زیربنایی خود را در مقیاس نانوترتیب دهند؛ آنگاه تمام واکنش‌ها سریع‌تر و بهینه‌تر صورت می‌گیرد و توسعه پایدار پیش گرفته می‌شود (۲).

برهم‌کنش مولکولی در مقیاس نانومتر، رفتار سیستم‌های زیستی را مدیریت می‌کند. یعنی مقیاسی که شیمی، فیزیک، زیست‌شناسی و شبیه‌سازی کامپیوتری، همگی به آن سمت در حال گرایش هستند. فراتر از سهل شدن استفاده بهینه از دارو، نانوتکنولوژی می‌تواند فرمولاسیون و مسیرهایی برای رهایش دارو مهیا کند، که به نحو حیرت‌انگیزی توان درمانی در بافت‌ها را افزایش می‌دهد (۳).

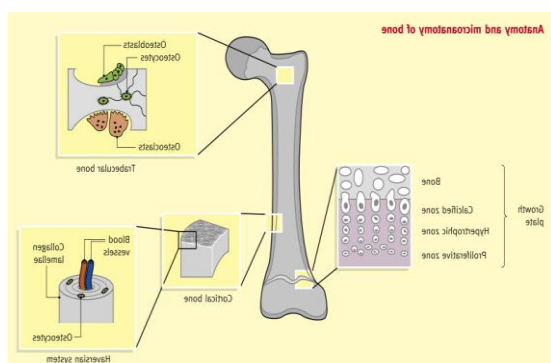
مواد زیست سازگار با کارایی بالا، از توانایی بشر در کنترل نانو ساختارها حاصل خواهد شد. نانومواد سنتزی معدنی و آلی را مثل اجزای فعال، می‌توان برای اعمال نقش تشخیصی (مثل ذرات کوانتومی که برای مرئی‌سازی به کار می‌رود) درون سلول‌ها وارد نمود (۴).

افزایش توان محاسباتی بوسیله نانوتکنولوژی، ترسیم وضعیت شبکه‌های ماکرومولکولی را در محیط‌های واقعی ممکن می‌سازد. اینگونه شبیه‌سازی‌ها برای بهبود قطعات کاشته شده زیست سازگار در بدن الزامی خواهد بود (۵).

با توسعه تکنیک‌های مدرن متعدد برای تشخیص، پیشگیری و درمان بیماری‌های متعدد مانند درمان سرطان، تحویل دارو، تصویر برداری پزشکی، داربست برای مهندسی بافت، و ایمونوتراپی، استفاده از فناوری نانو در پزشکی (به عنوان مثال، نانوپزشکی) آشکارتر شده است.

کلیاتی در مورد استخوان

استخوان یک بافت همبند تخصصی است که برای مقاومت در برابر جاذبه و تسهیل حرکت طراحی شده است. همچنین برای محافظت از اندام‌های داخلی، عمل می‌کند و فضایی را برای قرار دادن عناصر خون‌ساز فراهم می‌نماید. برای انجام بهترین عملکردهای مقاومتی و حرکتی در بافت استخوانی باید استخوان، به اندازه کافی قوی و مستحکم باشد. شکل ۱ ساختار و متابولیسم استخوان را نشان می‌دهد.



شکل (۱): ساختار و متابولیسم استخوان (۶)

¹ Industrial revolution

وجود می‌آید، زمین خوردن است که در بسیاری موارد منجر به شکستگی‌های مربوط به مفصل لگن می‌شود. این امر باعث ایجاد ترس از افتادن در سالمندان می‌شود که غالباً منجر به کاهش بسیار شدید عملکرد فرد می‌گردد. همین موضوع موجب می‌گردد تا الگوی راه رفتن در سالمندان تغییر کرده و فرد برای جلوگیری از آسیب و زمین خوردن دوباره به استفاده از وسایل حمایتی مانند واکر، عصا و ویلچر روی آورد (۱۱).

سیاه شدن استخوان (نکروز استخوانی)

نکروز استخوانی شرایطی دردناک است و زمانی اتفاق می‌افتد که خون‌رسانی در استخوان دچار مشکل می‌گردد. از آنجایی که سلول‌های استخوانی برای زنده ماندن و عملکرد صحیح احتیاج به تغذیه مناسب دارند، قطع خون‌رسانی موجب ایجاد نکروز و سیاه شدگی استخوان بخصوص در انتها و ابتدای استخوان می‌گردد. این مشکل باعث آرتريت مزمن شدید می‌شود. نکروز استخوانی، آواسکولار نکروزیس و نکروز بدون عفونت نیز نامیده می‌شود (۱۱). شکل ۲ نکروز آواسکولار سر استخوان ران را نشان می‌دهد. قطع خون‌رسانی باعث ایجاد یک محیط هیپوکسیک در سر استخوان ران می‌شود که منجر به نکروز و فروپاشی استخوان ساب غضروفی می‌شود. این مشکل در نهایت منجر به فروپاشی غضروف پوشاننده سر استخوان ران و شروع آرتروز سر استخوان ران و استابولوم^۲ می‌شود. (۱۲) البته این مشکل ممکن است در هر استخوانی رخ دهد اما معمولاً این نکروز بیش‌تر سر استخوان فمور را درگیر می‌نماید. در بسیاری از نمونه‌ها که به این اختلال دچار شده‌اند، هر دو لگن باهم درگیر می‌شوند

ساختار کامپوزیت استخوان شامل یک بخش آلی، عمدتاً کلاژن نوع I، که ۲۵ درصد از جرم آن را تشکیل می‌دهد، و یک بخش معدنی، که ماده معدنی هیدروکسی آپاتیت است و ۷۵ درصد از جرم آن را تشکیل می‌دهد. بخش کلاژنی مسئول استحکام کششی استخوان است در حالی که سفتی آن از محتوای مواد معدنی آن ناشی می‌شود. این ساختار و عملکرد بطور قابل ملاحظه‌ای شبیه بتن مسلح است که در آن میله‌های تقویت‌کننده فولادی (میلگردها) استحکام کششی به بخش سیمانی سفت اما ناسازگار می‌دهد (۷).

در استخوان، هیدروکسی آپاتیت کریستالی سطح الیاف کلاژن را پوشانده و نیز بین آن‌ها را پر می‌کند. عملکرد طبیعی استخوان در تحمل وزن به شدت با حفظ نسبت مناسب هر دو جزء معدنی و آلی مرتبط است. اگر محتوای مواد معدنی نسبت به اجزای آلی خیلی زیاد باشد، استخوان نه تنها سفت‌تر، بلکه شکننده‌تر نیز می‌شود. اگر محتوای معدنی نسبت به جزء آلی خیلی کم باشد، استحکام کششی حفظ می‌شود اما استخوان به راحتی در شرایط بارگذاری تغییر شکل می‌دهد (۸-۹).

ناهنجاری‌های استخوان

از شایع‌ترین نوع شکستگی در استخوان، شکستن و آسیب دیدن بافت استخوان‌هاست که با بالا رفتن سن و همچنین مبتلا شدن به پوکی استخوان، آسیب‌های استخوانی راحت‌تر اتفاق می‌افتند. لازم به ذکر است که این نوع شکستگی در زنان شایع‌تر می‌باشد (۱۰).

یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی که برای سالمندان به

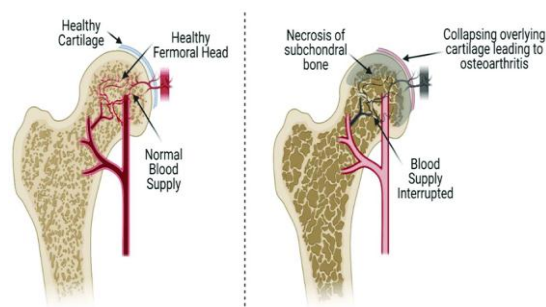
² acetabulum

(۱۴-۱۳).

سرامیک و پلیمرها نشان می‌دهد نانومواد ممکن است یکپارچگی استخوانی را بهبود بخشد که برای کارایی طولانی مدت ایمپلنت‌ها بسیار مهم است (۱۶).

استخوان طبیعی یک ماده بیولوژیکی معدنی است که یک چارچوب حمایتی و محافظ برای بدن محسوب می‌شود (۱۷). با بررسی ساختار استخوان و کاربرد بالقوه فناوری‌های نانو می‌توان به طراحی ساختارهای بیومتریال جدید برای ترمیم و بازسازی استخوان کمک کرد (۱۸). استفاده از نانومواد به عنوان داربست برای ایجاد تعامل مطلوب‌تر بین ایمپلنت‌های ارتوپدی و استخوان می‌تواند انقلابی در تشخیص و درمان جراحی ارتوپدی ایجاد کند.

روندهای فعلی در نانوبیوتکنولوژی آینده روشنی را از طریق استفاده از نانو بیومواد در حوزه ارتوپدی را نشان می‌دهد. نیاز تکنولوژیکی و بالینی به مواد جایگزین ارتوپدی منجر به پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه نانوپزشکی شده است. تقلید از بافت استخوانی زنده هنوز یک چالش است. پیشنهاد می‌شود که مواد نانوفاز را می‌توان به گونه‌ای سنتز کرد که ابعاد نانویی مشابه با اجزای بافت استخوانی داشته باشند تا در مقایسه با مواد کاشت ارتوپدی معمولی، استخوان‌سازی را تقویت کنند و در درمان بیماری‌هایی مانند نکروز استخوانی کارایی زیادی را نشان دهند. مواد نانوفاز ممکن است یک ماده جایگزین موفق و هیجان‌انگیز برای ایمپلنت ارتوپدی باشند و توانایی نانومواد جدید باعث تقویت استخوان‌سازی می‌شوند. نانومواد که خواص استخوان را تکرار می‌کنند و عملکردهای منحصر به فردی را ارائه می‌دهند به مهندسی بافت استخوان کمک می‌کنند (۱۹).



شکل (۲): نکروز آواسکولار سر استخوان ران. (۱۲)

کاربرد نانو در استخوان

یکی از مهم‌ترین ایده‌هایی که تاکنون با کاربرد علم مواد در حوزه پزشکی تولید شده است، مفهوم نانو بیومواد است (۱۵). مواد زیستی نانو ساختار نقش مهمی در توسعه استراتژی‌های درمانی جدید دارند. آن‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با بافت‌های آسیب دیده تعامل داشته باشند، بنابراین باید از نظر میکرو محیطی حساس باشند. مواد موجود کنونی محدودیت‌های زیادی از جمله اختلال در اتصال سلولی، تکثیر و سمیت برای استفاده دارند. نانوتکنولوژی ممکن است با تشکیل مجموعه‌های جدیدی مشابه با ساختار استخوان، راه‌های جدیدی را به روی مهندسی بافت استخوان بگشاید.

نانوزیست مواد آلی و معدنی به طور فزاینده‌ای برای کاربردهای مهندسی بافت استخوان مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا ممکن است بتوانند بر برخی از محدودیت‌های فعلی ناشی از روش‌های بازسازی استخوان غلبه کنند. بررسی عملکرد سلول‌های استخوان ساز *in vitro* و *in vivo* مانند چسبندگی، تکثیر، سنتز پروتئین‌های مرتبط با استخوان و رسوب مواد معدنی حاوی کلسیم بر روی فلزات نانو ساختار،

بررسی نانو بیومواد در ساختار سلولی

نانوزیست مواد دارای تعداد اتم‌ها و دانه‌های کریستالی در سطوح خود هستند و نسبت سطح به حجم بالاتری نسبت به مواد زیستی معمولی در مقیاس میکرو دارند. این تفاوت در توپوگرافی سطح انرژی سطح مربوطه را برای جذب پروتئین تغییر می‌دهد. گزارش‌ها نشان می‌دهد که جذب تجمع پروتئین‌ها از مایعات بدن در مواد کوچک‌تر و اندازه دانه‌ای نانومتری به طور قابل توجهی بالاتر است. به ویژه، نشان داده شده است که تعامل پروتئین‌های شناخته شده برای تقویت عملکرد استئوبلاست-فیبرونکتین، ویترونکتین، لامینین و کلاژن در نانوبیومتریال به میزان زیادی افزایش یافته است. علاوه بر تعدیل جذب پروتئین، استراتژی‌هایی برای کنترل چگالی، خوشه بندی و جهت‌گیری اپیتوپ‌های^۳ سیگنال دهنده سلولی برای پروتئین‌های جذب شده در حال بررسی هستند. برای مثال، نشان داده شده است که استئوبلاست‌ها به توالی‌های اسید آمینه انتخابی (مانند آرژنین-گلیسین-اسپارتیک اسید یا RGD) در پروتئین‌های جذب شده روی سطوح زیست مواد می‌چسبند. از آنجایی که چسبندگی استئوبلاست روی سطح ارتوپدی تازه کاشته شده برای شروع سنتز استخوان ضروری است، لذا بهینه‌سازی رویدادهای جذب پروتئین اولیه برای موفقیت ایمپلنت بسیار مهم و کانی‌سازی نیز در طراحی ایمپلنت‌ها ضروری است (۲۰-۲۱).

نانوکامپوزیت‌های بیومیمتیک

پتانسیل تعدیل رفتار سلولی با نانو زیست مواد تحقیقات گسترده‌ای را در حوزه ارتوپدی ایجاد کرده است. استفاده از فناوری نانو برای کاربردهای ارتوپدی سطوح ایمپلنت از ساختار نانومقیاس ماتریس خارج سلولی (ECM)^۴ ناشی می‌شود. جزء معدنی ECM استخوان از بلورهای فسفات کلسیم در مقیاس نانو (CaP) مشابه هیدروکسی آپاتیت تشکیل شده است. با توجه به اجزای طبیعی استخوان، مواد CaP انتخاب-های منطقی به عنوان مواد زیستی هستند. در واقع، سرامیک‌های CaP خواص بیولوژیکی خوبی از خود نشان می‌دهند، زیرا ظرفیت ایجاد یک رابط شیمیایی با استخوان را دارند (۲۲). با این حال، خواص مکانیکی مواد توده‌ای سنتز شده CaP برای استفاده از آن‌ها در باربری و سایت‌های ارتوپدی کافی نیست. در نتیجه، CaP‌ها بیشتر به عنوان پوشش روی مواد فلزی (بیشتر تیتانیوم و آلیاژهای آن) استفاده می‌شوند.

چندین تکنیک برای رسوب پوشش‌های CaP روی فلزات از جمله پاشش پلاسما^۵ در دسترس است که عبارت از رسوب بیومیمتیک^۶، رسوب لیزر، رسوب پرتو یون^۷، رسوب کندوپاش مگنترون، رادیو فرکانس (RF) و رسوب گذاری اسپری الکترواستاتیک (ESD) هستند. اگرچه اسپری پلاسما اغلب برای رسوب پوشش‌های CaP روی ایمپلنت‌های ارتوپدی و دندان استفاده می‌شود، محدودیت‌های این روش شامل عدم

^۴ Extra cellule matrix^۵ Plasma sputtering^۶ Biomimetic deposition^۷ ion beam deposition^۳ Epitopes

بایو مواد نانو ساختار

کاهش اندازه دانه‌های سرامیکی با افزایش عملکرد سلول‌های استخوانی رابطه مستقیم دارد. به طوری که، در مقایسه با فرمولاسیون‌های سرامیکی معمولی (اندازه دانه میکرو)، سرامیک‌های ساخته شده از ذرات نانومتریکی، روی آلومینا، تیتانیا و هیدروکسی آپاتیت، چسبندگی استئوبلاست‌ها را در شرایط آزمایشگاهی افزایش می‌دهند. افزایش عملکرد استئوبلاست نیز در اندازه دانه‌های کروی سرامیکی زیر ۶۰ نانومتر مشاهده شد (۳۰). بنابراین، شواهدی ارائه شد که توانایی سرامیک‌های نانوفاز برای ارتقای عملکرد سلول‌های استخوانی در واقع به کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر محدود شده بود. مطالعات بیش‌تر افزایش رسوب کلسیم در شرایط آزمایشگاهی توسط استئوبلاست‌ها و همچنین افزایش عملکرد استئوکلاست‌ها (سلول‌های جذب کننده استخوان) در سرامیک‌های نانوفاز را گزارش کردند (۳۱). سنتز استئوکلاست اسید فسفاتاز مقاوم به تارتارات و تشکیل حفره‌های جذب متعاقب آن نیز در نانوفاز در مقایسه با سرامیک‌های معمولی افزایش می‌یابد (۳۱).

یکی دیگر از پارامترهای طراحی که باید برای نانومواد ارتوپدی در نظر گرفته شود، مورفولوژی ذرات است. بسترهای تلفیقی فرموله شده از نانوالیاف آلومینا (با قطر ۲ نانومتر و طول بیش از ۵۰ نانومتر) عملکردهای استئوبلاست آزمایشگاهی را در مقایسه با بسترهای آلومینا مشابه فرموله شده از ذرات نانوکره به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که نه تنها اندازه دانه استخوان برای تقلید در سرامیک‌های نانوفاز مهم است، بلکه نسبت ابعاد فیبری

کنترل ساختار پوشش، چسبندگی نسبتاً کم در پوشش‌های ضخیم (۵۰ میلی‌متر) و استحکام باند محدود است.

دهه گذشته تحقیقات بر روی رسوب پوشش‌های CaP در مقیاس نانو با استفاده از RF رسوب کندوپاش مگنترون، ESD و خود مونتاژ الکترواستاتیکی (ESA). کندوپاش مگنترون RF متمرکز بوده است و توانسته است با موفقیت پوشش‌های CaP با ضخامت نانومتری را بر روی مواد فلزی و همچنین پلیمری رسوب دهد (۲۳-۲۵). روش ESD امکان ساخت پوشش‌های CaP متخلخل را فراهم می‌کند که دارای سطح بزرگ‌تری برای برهم‌کنش با پروتئین‌های جذب شده هستند. فعل و انفعالات این پروتئین‌های متصل به سطح با گیرنده‌های سلولی می‌تواند رفتار سلولی را تعدیل کند. همچنین، این افزایش سطح، پتانسیل پوشش‌های CaP متخلخل را برای تحویل دارو افزایش می‌دهد. آزمایش‌های فعلی بر روی اثرات این پوشش‌های CaP متخلخل در شرایط *in vitro* و *in vivo* و نیز بر ظرفیت دارورسانی آن‌ها متمرکز شده است. یکی دیگر از کاربردهای تکنیک ESD، اسپری کردن سوسپانسیون‌های حاوی ذرات CaP در اندازه نانو است (۲۶-۲۷). روش ESA تکنیک قدرتمند دیگری برای اصلاح سطوح زیست مواد است. این تکنیک از پلی‌الکترولیت‌هایی با بار مخالف برای تشکیل یک ساختار چند لایه استفاده می‌کند (۲۸-۲۹). با توجه به تنوع پلی‌الکترولیت‌های موجود (طبیعی و مصنوعی)، خواص سطحی مطلوب را می‌توان برای کاربردهای خاص تنظیم کرد.

برای کاربرد نانوتکنولوژی در ارتوپدی نشان داده است (۳۷).

آلیاژهای منیزیم به دلیل زیست سازگاری و خواص مکانیکی قابل قبول در حال حاضر به موضوع تحقیقات داغ تبدیل شده‌اند. هالوگ و همکاران تحلیل یکنواخت در مواضع بالینی حین عمل استخوان انسان را که با پیچ‌های منیزیم محکم شده بودند و نیز رابط رضایت‌بخش بین استخوان و ایمپلنت با منیزیم را مورد بررسی قرار دادند. اعمال پوشش بر روی بسترهایی که به جز شستشو تحت هیچ گونه عملیات درمانی قرار نگرفته بودند، انجام شد. تکنیک فوق‌الذکر از نظر سرعت (فقط نیاز به یک گذر بدون نیاز به پیش‌فرآوری بستر)، دوام (حذف استفاده از مواد مضر) و مقرون‌به‌صرفه بودن (کاهش زمان فرآیند و مصرف معرف) نسبت به روش‌های پیشنهادی، کارایی بالاتری را نشان می‌دهد (۳۸).

نانو زیست مواد به عنوان داربست‌های مهندسی بافت استخوانی

مهندسی بافت به عنوان یک جایگزین بالقوه برای درمان‌های فعلی برای ترمیم نقایص استخوانی در حال ظهور است. علاوه بر افزایش فعالیت زیستی و مهندسی بافت، از مواد نانوفاز می‌توان همچنین برای بهبود خواص مکانیکی داربست‌ها استفاده کرد.

سازه‌های نانوکامپوزیت

پیوندهای استخوانی نانوکامپوزیت ساخته شده از هیدروکسی آپاتیت-کلاژن برخی از ویژگی‌های استخوان طبیعی را در ترکیب و ساختار نشان می‌دهند (۳۹). هیدروکسی آپاتیت (HA) به عنوان یک ماده داربست، هدایت استخوانی و عملکردهای مرتبط

آن نیز ممکن است برای تقلید در سرامیک‌های مصنوعی مهم باشد (۳۲).

علاوه بر سرامیک‌ها، فلزات نانوفاز (مانند تیتانیوم، Ti_6Al_4V و آلیاژهای $CoCr$) و پلیمرها نیز ویژگی‌های جدیدی را نشان داده‌اند که عملکرد سلول‌های استخوانی را در سرامیک‌ها ارتقا می‌دهند. به طور خاص، چسبندگی سلول‌های استخوانی در شرایط آزمایشگاهی به طور قابل توجهی در نانوفاز در مقایسه با مواد معمولی بیشتر می‌باشد (۳۳) دریک مطالعه، محققان افزایش عملکرد استئوبلاست آزمایشگاهی در نانوفاز را در مقایسه با سلنیوم معمولی گزارش کرده‌اند (۳۴). نتایج نشان داده که استفاده بالقوه از سلنیوم خاصیت ضد سرطانی دارد (۳۵).

بر اساس تحقیقات، نانوذرات سریا یا نانوسریا (CeO_2-NPs) هم قابلیت کاربرد بیشتری در ارتوپدی دارند (۳۶). پتانسیل زتا سطحی سرامیک زیست فعال شیشه‌ای $BGC1$ و نمونه‌های عامل‌دار $BGC1@PDA@Ag$ و $BGC1@PDA$ همگی به‌طور قابل توجهی منفی بودند، همان گونه که برای زیست سازگاری آزمایشگاهی مورد نظر است. با استفاده از رده سلولی MG-63، خواص غیر سمی برای $BGC1$ و $BGC1@PDA$ بدست آمد. زیست سازگاری $BGC1@PDA@Ag$ در حد متوسط بود. طبق آزمایشات ضد باکتریایی، $BGC1@PDA@Ag$ اثر ضد میکروبی قوی بر روی هر دو سویه باکتریایی گرم منفی و گرم مثبت نشان داد. یافته‌های تجربی اخیر هیچ خاصیت ضد باکتریایی قابل مشاهده برای PDA را نشان ندادند. ویژگی‌های ذاتی نقره به کاربرده شده در درون شیشه‌های زیست فعال، پتانسیل قابل توجهی را

که خواص مکانیکی منحصر به فرد استخوان را تقلید می‌کند. سیمان تقویت کننده نانوفاز پتانسیل بهبود مواد موجود را برای دستیابی به استحکام مکانیکی قابل مقایسه با بافت مورد نظر دارد. اخیراً نانولوله‌های کربنی و نانوذرات آلوموکسان به عنوان پرکننده‌های تقویت کننده پلیمرهای زیست تخریب پذیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۴۸). اثر پرکننده بر خواص مکانیکی به اندازه، شکل و پراکندگی پرکننده بستگی دارد. علاوه بر این، تعامل بین پرکننده و ماتریس آلی نیز می‌تواند بر میزان تقویت تاثیر بگذارد. بنابراین، عملکرد بهینه زمانی حاصل می‌شود که ذرات کوچک به طور یکنواخت در سراسر پلیمر پراکنده شوند و به شدت با ماتریس آلی تعامل داشته باشند (۴۹).

در یک مطالعه اخیر، از اصلاح سطحی نانوذرات آلوموکسان کربوکسیلات برای بهبود پراکندگی بهینه در مواد زیست تخریب پذیر استفاده شد. پراکندگی ریز نانوذرات و افزایش برهمکنش بین زنجیره‌های پلیمری و نانوذرات منجر به افزایش سه برابری مدول فلکسورال، بدون کاهش قابل توجه در استحکام فشاری یا خمشی شد (۵۰). اصلاح نانولوله‌های کربنی تک جداره (SWNTs) نیز برای بهبود پراکندگی آنها در پلی (پروپیلن فومارات) مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه بهبود در خواص مکانیکی فشاری و خمشی در غلظت‌های پایین SWNTs مشاهده شد، غلظت‌های بالاتر بدون در نظر گرفتن سورفکتانت یا عامل‌سازی، منجر به تجمع قابل توجهی SWNTs شد. این نتایج نشان می‌دهد که SWNTs می‌توانند برای بهبود خواص مکانیکی یک پلیمر زیست تخریب پذیر استفاده شوند. البته بهینه‌سازی لازم برای بهترین غلظت لازم است (۵۱).

بیش‌تری را نسبت به مواد معمولی تسهیل می‌کند (۴۰) برای بهبود عملکرد هیدروکسی آپاتیت میتوان از پلیمرهای زیست تخریب پذیر (به عنوان مثال، کلاژن) برای ساخت کامپوزیت در ارتباط با سلول‌های بالقوه استخوان‌سازی و فاکتورهای رشد استخوان‌سازی استفاده کرد (۴۱).

در مطالعات بعدی، سیستم استئوبلاست در ارتباط با پلی (اسید لاکتیک) توسعه یافت. این ساختار برای حمایت از چسبندگی سلولی، تکثیر و مهاجرت در یک مدل خرگوش در مطالعه *in vivo* اثر بخشی زیادی نشان داد. نتایج شواهدی از تشکیل بافت استخوانی جدید را نشان داد که بیانگر پتانسیل بالای سیستم برای ترمیم بالینی نقایص استخوانی بزرگ طبق اصول مهندسی بافت استخوانی بود. بنابراین استفاده از نانوزیست مواد در *in vivo* و *in vitro* نوع جدیدی از پیوند استخوان را پشتیبانی می‌کنند (۴۲).

مطالعات نشان می‌دهد، هنگامی که ذرات نانو فاز سرامیک در کامپوزیت‌های پلیمری گنجانده شوند، عملکرد سلول‌های استخوانی افزایش می‌یابد. به طور خاص، در مقایسه با تیتانیای معمولی با نسبت وزنی یکسان، در تیتانیای نانوفاز تا سه برابر استئوبلاست‌ها بیشتر به PLGA می‌چسبند (۴۳-۴۴) علاوه بر این، عملکردهای آزمایشگاهی استئوپلاست منجر به رسوب بیش‌تر مواد معدنی بر روی الیاف نانومتری کربنی در مقایسه با مواد معمولی می‌شود. چنین ویژگی‌های جدید نانوالیاف کربنی / نانولوله‌های کربنی به کامپوزیت‌های پلیمری منتقل شده است (۴۵-۴۷). علاوه بر تعدیل عملکرد سلولی که باعث بازسازی بافت می‌شود، محققان همچنین بر چالش طراحی داربست‌های مهندسی بافت استخوانی تمرکز کرده‌اند

مختلفی مانند پلی (لاکتیک-کوگلیکولیک اسید) (PLGA)، کلاژن، پلی (ال-لاکتیک اسید) (PLLA) و پلی (کاپرولاکتون) (PCL) در ساخت نانوالیاف استفاده شده است (۵۶-۵۸).

تکنیک‌های مختلف ساخت برای به دست آوردن داربست‌های نانو مهندسی متشکل از پلیمرهای طبیعی و مصنوعی مانند PLLA، PCL، PLGA، کلاژن، ابریشم، هیالورونیک اسید، فیبرین و آلژینات استفاده می‌شود. به طور معمول، این بیومواد برای کاربردهای عملی دستخوش تغییراتی شده‌اند. در موارد خاص، آن‌ها با سایر پلیمرها و نانوذرات (مانند فسفات کلسیم و هیدروکسی آپاتیت‌ها) ترکیب می‌شوند تا خواص مکانیکی و زیست فعال خود را افزایش دهند (۵۹-۶۱).

نتایج نشان می‌دهد که سلول‌های بنیادی مزانشیمی تحت تمایز استخوان‌زایی با حضور داربست‌های نانوالیافی تقویت می‌شوند. سلول‌های استرومایی مغز استخوان انسان به خوبی روی داربست‌های نانوالیافی پلیمری می‌چسبند و تکثیر می‌شوند (۶۲). سلول‌ها، نانوالیاف را در ماتریس به هم متصل می‌کنند و با الیاف اطراف یکپارچه می‌شوند تا یک شبکه سلولی سه بعدی را تشکیل دهند. اگرچه قطر منافذ یک ماتریس نانوالیاف کوچک است، اما مشخص شده است که یک معماری پویا به سلول‌های کشت ارائه می‌کند. سلول‌ها با بهینه‌سازی اندازه منافذ از طریق کنار زدن الیاف اطراف از میان ماتریس مهاجرت می‌کنند، زیرا الیاف در مقیاس نانو مقاومت بسیار کمی در برابر حرکت آمیپوئیدی سلول ارائه می‌کنند (۶۳).

برای باز تولید ساختارهای بیولوژیکی با ویژگی‌های خاص، امکان ساخت هندسه‌های پیچیده‌تر نانو مانند الیاف، ورق‌ها، کره‌ها، شبکه‌ها و لوله‌های توخالی وجود دارد. ادغام نانو سیلیکات‌ها در هیدروژل‌ها منجر به افزایش خواص مکانیکی شده و آن‌ها را برای استفاده در داربست‌های استخوانی مناسب می‌کند. نانوسیلیکات‌ها به طور فزاینده‌ای به عنوان یک ماده امیدوارکننده برای ترمیم استخوان شناخته می‌شوند، اگرچه تحقیقات کم‌تری در مورد آن‌ها در مقایسه با Hap صورت گرفته است. نانوذرات سرامیکی ساختارهای معدنی پیچیده‌ای را نشان می‌دهند که ثابت شده است به طور موثر به بافت استخوانی مجاور می‌چسبند و روند بازسازی استخوان را تحریک می‌کنند (۵۲). در سال‌های اخیر، چندین نانو ساختار مبتنی بر کربن، مانند گرافن، نانوالماس‌ها (NDs)، و نانولوله‌های کربنی (CNTs)، برای مهندسی بافت استخوان (TE) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مشخص شده است که گرافن تمایز استخوان زایی سلول‌های بنیادی را تحریک می‌کند (۵۳) و اکسید گرافن توانایی قابل مقایسه‌ای را در این مورد نشان می‌دهد (۵۴). تعداد کمی از نانوذرات برای درمان بافت‌های ارتوپدی ظریف مانند تاندون‌ها، غضروف‌ها و رباط‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نانوصفحات دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) برای بافت غضروف مورد بررسی قرار گرفته‌اند (۵۵). این نانوصفحات با یک هیدروژل آکریل آمید ترکیب شدند تا یک نانوکامپوزیت با خواص فیزیکی و شیمیایی قابل مقایسه با غضروف مفصلی طبیعی تولید کنند. نانوالیاف به دلیل ساختار فیبری آن‌ها معمولاً برای بافت‌های رباط و تاندون استفاده می‌شود. بیومواد پلیمری

رابط استخوان- تاندون مهندسی شده با نانو

تاندون‌ها به منظور اتصال ماهیچه‌ها به استخوان‌ها و نشان دادن شباهت‌های ساختاری به رباط‌ها عمل می‌کنند. اکثر آسیب‌ها یا پارگی‌های تاندون معمولاً در مفاصلی مانند زانو یا شانه ظاهر می‌شوند و آسیب ناشی از آن می‌تواند آنقدر شدید باشد که رباط بین تاندون و استخوان را مختل کند. این آسیب‌ها از طریق مداخله جراحی تثبیت می‌شوند اما همانطور که قبلاً اشاره شد، به طور بالقوه می‌توانند منجر به عوارض بیش‌تری شوند. تکنیک‌های غالب مورد استفاده برای بهبود تاندون معمولاً شامل استفاده از ایمپلنت‌های مصنوعی تاندون و همچنین کاشت آلژینیک یا بیگانه ژئینک است (۶۴). با این روش قدرت و دوام مواد ترمیم مصنوعی جراحی را با زیست‌سازگاری اجزای طبیعی و پلی‌پروپیلن مخلوط می‌کنند (۶۵-۶۶). ولی با توجه به منشأ و بیگانه‌زایی این پیوندها، افراد ممکن است اثرات ایمنی‌زایی شدیدی را تجربه کنند. علاوه بر این، مدول الاستیک تاندون‌هایی که با این داربست‌ها بازسازی شده‌اند در مقایسه با بافت طبیعی کم‌تر است (۶۷).

رابط استخوان و تاندون شامل فیبر و غضروف معدنی در طرف استخوان و فیبر و غضروف غیر معدنی در طرف تاندون است. بافت طبیعی در این منطقه یک ساختار گرادیان را نشان می‌دهد و تحقیقات علمی اخیر بر روی تکرار این ساختارهای پلکانی از طریق استفاده از سلول‌ها یا نانومواد متعدد متمرکز شده‌اند (۶۸).

سازماندهی نواحی سطحی استخوان-تاندون معمولاً با فیبرهای کلاژنی که در راستای طولی قرار دارند صورت می‌گیرد. این الیاف از سلول‌هایی تشکیل شده

اند که در داخل ماتریس مرتب شده‌اند (۶۹). این استراتژی در یک مطالعه برای تولید داربست نانوفیبری PLGA مورد استفاده قرار گرفت و مشخص شد که هم سویی الیاف بر مورفولوژی سلولی تأثیر می‌گذارد. فیبروبلاست‌های کاشته شده روی الیاف متحد به طور یکنواخت توزیع می‌شوند، در حالی که فیبروبلاست‌های کشت شده روی الیاف تصادفی یک شکل چند ضلعی غیر معمول را نشان می‌دهند (۷۰). علاوه بر این، مدول الاستیک الیافی که به طور متقارن مرتب شده‌اند، مقدار بالاتری (۰/۳۴ گیگا پاسکال) در مقایسه با الیاف نامتقارن نشان دادند (۰/۱۰۷ گیگا پاسکال). در شرایط آزمایشگاهی، برای الیافی که در یک راستا قرار نگرفته بودند، نمایه تخریب تسریع شده‌ای مشاهده شد (۷۰).

بحث و نتیجه‌گیری

نانوتوپوگرافی می‌تواند مستقیماً فعالیت‌های سلولی درمان استئوبلاستی را تعدیل کند تا تمایز استخوانی را افزایش دهد. الگوی ریزساختاری می‌تواند بستری برای اتصال سلول‌های استئوبلاستیک برای رشد، تکثیر، تمایز استخوان‌زایی، کانی‌سازی و در نهایت تشکیل استخوان فراهم کند. واضح است که سیگنال‌های شیمیایی می‌توانند تشکیل استخوان را با تنظیم بیان ژن استخوانی تسهیل کنند. تاکید روزافزونی بر داربست‌های چند منظوره مملو از نانوذرات یا مولکول‌های مختلف برای استفاده به عنوان ابزاری برای تحریک همزمان تکثیر و تمایز سلول‌های استئوبلاستی وجود دارد.

از آنجایی که بافت‌های طبیعی از نظرابعاد نانومتری هستند و سلول‌ها مستقیماً با ماتریس‌های خارج سلولی

پایدار". همایش ملی معماری پایدار و توسعه شهری، بوکان، اردیبهشت.

[3] Shetab Boushehri, MA., Dietrich, D., 2020, Alf Lamprecht1 Nanotechnology as a Platform for the Development of Injectable Parenteral Formulations: A Comprehensive Review of the Know-Hows and State of the Art. 12(6).

[4] Khalid, I., Idrees, S., 2019, Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. Arabian Journal of Chemistry. Volume 12, Issue 7 P. 908-931.

[5] Ming-qi Recent Advances and Perspective of Nanotechnology-Based Implants for Orthopedic Applications. 2022; 10: 878257.

[6] Ralston, SH., structure, B., 2013, metabolism. Journal of Medicine. volume 41, issue 10 October Pages 581-585

[7] McManus, LM., Richard, N., 2014, Mitchell Pathobiology of Human Diseases , A Dynamic Encyclopedia of Disease Mechanisms.

[8] Boese, C.K., et al., 2016, The femoral neck-shaft angle on plain radiographs: a systematic review. Skeletal Radiology. 45(1): p. 19-28.

[9] Reynolds, A., 2013, The fractured femur. Radiologic technology. 84(3): p. 273-291.

[10] LeBoff, M.S., corresponding-author, S.L., Greenspan, K.L., Insogna, E.M., Lewiecki, K.G., Saag, A.J., Singer, Siris, E.S., 2022, The clinician's guide to prevention and treatment of osteoporosis Osteoporosis Int; 33(10): 2243.

[11] Marks, R., John, A., MacKenzie, R., 2003, Joseph M Lane Hip fractures among the elderly: causes, consequences and control Ageing Research Reviews Volume 2, Issue 1, January Pages 57-93.

[12] Fondi, C., Franchi, A., 2007, Definition of bone necrosis by the pathologist Clinical Cases in Miner Bone Metabolism; 4(1): 21-26.

[13] Sumit, M., Teresa, H., Snyder, A., Sydney, H., Meghana, T., Patrick, W., 2021, Tissue Engineering Strategies for Treating Avascular Necrosis of the Femoral Head. Bioengineering 8, 200

[14] Van-Arkel, R., et al., 2015, The capsular ligaments provide more hip rotational restraint than the acetabular labrum and the ligamentum teres: an experimental study. The bone & joint journal. 97(4): p. 484-491.

نانوساختار تعامل دارند، ویژگی‌های بیومیمتیک و خواص فیزیکوشیمیایی عالی نانومواد نقش مهمی در تحریک رشد سلولی و همچنین بازسازی بافت دارند. با این حال، پیشرفت‌ها هنوز برای دستیابی به استفاده بالینی ضروری است.

مطلوب‌ترین حالت، ساخت داربست‌های فعال زیستی است که برای بازسازی استخوان طراحی شده‌اند و به‌طور موقت جایگزین بافت‌های طبیعی می‌شوند. این داربست‌های زیستی درحالی که با محیط اطراف خود تعامل دارند، به تغییرات محیطی پاسخ می‌دهند و به‌طور فعال رویدادهای سلولی را برای تشکیل سریع‌تر استخوان، کاهش زمان بهبودی و بازیابی سریع برای عملکرد هدایت می‌کنند. در آینده روش‌های طراحی پیشرفته‌تری برای بهره‌گیری از نانومواد و فناوری ساخت جدید ابداع خواهند شد. در این تحقیقات درک مکانیسم‌های مولکولی و برهمکنش‌های سلول-نانوبیومواد و نیز اعتبارسنجی ایمنی زیستی نانومواد و به حداقل رساندن اثرات جانبی آن‌ها باید به‌طور جدی مورد توجه قرارگیرد. به‌طور کلی، روندهای فعلی در فناوری نانو آینده روشنی را از طریق استفاده از نانوبیومواد در حوزه ارتوپدی پیش‌بینی می‌کند.

منابع

[۱] کرامت آذر، ز، بیگی، ف، حاجب، س، ۱۳۹۲، "بررسی جایگاه مصالح هوشمند و خود ترمیم در معماری پایدار". اولین همایش ملی معماری، مرمت، شهرسازی و محیط زیست پایدار، همدان، دانشکده فنی شهید مفتاح همدان، شهریور.

[۲] عابدینی، ف؛ و همکاران، ۱۳۹۲، "بررسی و تحلیل چگونگی بهره‌گیری از فناوری نانو در توسعه معماری

- nanomaterials for bone repair and regeneration. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*;101(2):387–397.
- [26] Huang, J., Jayasinghe, SN., Best, SM., et al, 2005, Novel deposition of nano-sized silicon substituted hydroxyapatite by electrostatic spraying. *J Biomed Mater Res* 16:1137–1142.
- [27] Huang, J., Best, SM., Bonfield, W., et al, 2004, In vitro assessment of the biological response to nano-sized hydro-xyapatite. *J Mater Sci Mater Med*;15:441–445.
- [28] Decher, G., 1997, Fuzzy nanoassemblies: toward layered polymeric multicomposites. *Science* 277:1232–1237.
- [29] Decher, G., Hong, JD., Schmitt, J., 1992, Buildup of ultrathin multilayer films by a self-assembly process: III. Consecutively alternating adsorption of anionic and cationic polyelectrolytes on charged surfaces. *Thin Solid Films*; 210: 831–835.
- [30] Webster, TJ., Siegel, RW., Bizios, R., 1999, Osteoblast adhesion on nanophase ceramics. *Biomaterials*; 20:1221–1222.
- [31] Webster, TJ., Ergun, C., Doremus, RH., et al, 2001, Enhanced functions of osteoclast-like cells on nanophase ceramics. *Biomaterials* 22:1327–1333.
- [32] Webster, TJ., Ergun, C., Doremus, RH., et al, 2000, Enhanced functions of osteoblasts on nanophase ceramics. *Biomaterials*.181-21:18.3.
- [33] Price, RL., Gutwein, LG., Kaledin, L., et al, 2003, Osteoblast function on nanophase alumina materials: influence of chemistry, phase and topography. *J Biomed Mater Res* 67A:1284–1293.
- [34] Leeuwenburgh, S., Wolke, J., Schoonman, J., et al, 2003, Electrostatic spray deposition (ESD) of calcium phosphate coatings. *J Biomed Mater Res* 66A:330–334.
- [35] Perla, V., Webster, TJ., 2005, Better osteoblast adhesion on nanoparticulate selenium—a promising orthopedic implant material. *J Biomed Mater Res* 75:356–364.
- [36] Luo, J., Zhu, S., Tong, Y., Zhang, Y., Li, Y., Cao, L., et al, 2023, Cerium oxide nanoparticles promote osteoplastic precursor differentiation by activating the Wnt pathway. *Biol. Trace Elem. Res.* 201 (2), 865–873.
- [15] Ratner, BD., Hoffman, AS., Schoen, FJ., Jack, E., 2013, *Lemons Introduction - Biomaterials Science: An Evolving, Multidisciplinary Endeavor Biomaterials Science (Third Edition)*.
- [16] Webster, TJ., 2009, *Nanotechnology for bone materials. Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol*;1(3):336–351.
- [17] Florencio-Silva, R., Silva Sasso, G.R., Sasso-Cerri, E., Jesus-Simões, M., Sérgio-Cerri P., 2015, *Biology of Bone Tissue: Structure, Function, and Factors That Influence Bone Cells* *Biomed Res Int.* 2015; 421746.
- [18] Lisha, Z., Dan, L., 2020, Liu Effect of the nano/microscale structure of biomaterial scaffolds on bone regeneration *Int J Oral Sci.* 12: 6.
- [19] Balasundaram. G., Webster, TJ., 2006, A perspective on nanophase materials for orthopedic implant applications *Journal of Materials Chemistry* September: 16(38):3737-3745.
- [۲۰] اشرف‌نیا، س.ع، جمشیدیان، م.، ۱۳۹۸، محاسبه انرژی سطح وابسته به اندازه نانوذرات و نانوحفرات کرومفلزی به روش دینامیک مولکولی. مهندسی مکانیک مدرس، ۱۹(۴)، ۱۰۰۱–۱۰۰۷.
- [21] McMahon, RE., Wang, L., Skoracki, R., Mathur, AB., 2012, Development of nanomaterials for bone repair and regeneration. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 101B(2):387–397.
- [22] Ducheyne, P., Bianco, P., Radin, S., et al, 1992, Bioactive materials: mechanisms and bioengineering considerations. In: Ducheyne P, Kokubo T, VanBlitterswijk CA, editors. *Bone-bonding biomaterials. Liederderp, the Netherlands: Reed Healthcare Communications*, p 1–112.
- [23] Wolke, JG., VanDijk, K., Schaeken, HG., et al, 1994, Study of the surface characteristics of magnetron-sputter calcium phosphate coatings. *J Biomed Mater Res.* 28:1477–1484.19.
- [24] Feddes, B., Wolke, JG., Jansen, JA., 2003, Initial deposition of calcium phosphate ceramic on polystyrene and polytetra-fluoroethylene by rf magnetron sputtering deposition. *J Vac Sci Technol A*; 21:363–368.
- [25] McMahon, RE., Wang, L., Skoracki, R., Mathur, AB., 2013, Development of

- [45] Smith, T.A., Webster, T.J., 2005, Increased osteoblast function on PLGA composites containing nanophase titania. *J Biomed Mater Res*. 74A:677-686
- [46] Elias, K.L., Price, R.L., Webster, T.J., 2002, Enhanced functions of osteoblasts on carbon nanofiber compacts. *Biomaterials*. 23:3279-3287.
- [47] Price, R.L., Webster, T.J., 2004, Increased osteoblast viability in the presence of smaller nano-dimensioned carbon fibers. *Nanotechnology*. 15:892-900.
- [48] Horch, R.A., Shahid, N., Mistry, A.S., et al, 2004, Nanoreinforcement of poly(propylene fumarate)-based networks with surface modified alumoxane nanoparticles for bone tissue engineering. *Biomacromolecules*. 5:1990-1998.
- [۴۹] رازی، ا.، عامل، ف.، بیرجندی نژاد، س.، پارسا، ع.، پیوندی، ع.، حسینی حسن آبادی، م.، ۱۳۹۷، سلول‌های بنیادی مزانشیمی و ارتوپدی. مجله جراحی استخوان و مفاصل ایران، ۱۶، ۲ (مسلسل ۶۱)، ۱۷۸-۱۸۴.
- [50] Horch, R.A., Shahid, N., Mistry, A.S., et al, 1990, Nanoreinforcement of poly(propylene fumarate)-based networks with surface modified alumoxane nanoparticles for bone tissue engineering *Biomacromolecules*. 2004. 5.
- [51] Shi, X., Hudson, J.L., Spicer, P.P., et al, 2005, Rheological behavior and mechanical characterization of injectable poly(propylene fumarate)/single-walled carbon nanotube composites for bone tissue engineering. *Nanotechnology*. 16:S531-S538.
- [52] Xavier, J.R., Thakur, T., Desai, P., Jaiswal, M. K., Sears, N., Cosgriff-Hernandez, E., et al, 2015, Bioactive nanoengineered hydrogels for bone tissue engineering: A growth-factor-free approach. *ACS Nano* 9 (3), 3109-18. doi:10.1021/nn507488s
- [53] Nayak, T.R., Andersen, H., Makam, V.S., Khaw, C., Bae, S., Xu, X., et al, 2011, Graphene for controlled and accelerated osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells. *ACS Nano* 5 (6), 4670-4678. doi:10.1021/nn200500h
- [54] Tatavarty, R., Ding, H., Lu, G., Taylor, R.J., Bi, X., 2014, Synergistic acceleration on the osteogenesis of human mesenchymal stem cells by graphene oxide-calcium phosphate
- [37] Tejido-Rastrilla, R., Ferraris, S., Goldmann, W. H., Grünewald, A., Detsch, R., Baldi, G., et al. 2019. Studies on cell compatibility, antibacterial behavior, and zeta potential of Ag-containing polydopamine-coated bioactive glass-ceramic. *Materials* 12 (3), 500
- [38] Holweg, P., Labmayr, V., Schwarze, U., Sommer, N. G., Ornig, M., Leithner, A., 2022, Osteotomy after medial malleolus fracture fixed with magnesium screws ZX00-A case report. *Trauma Case Rep*. 42, 100706.
- [39] Zhou, W., Xiaoxia, Z., Xiaochen, W., Luqi, Y., Zhuncheng, Z., Hui, W., Yuxing, X., Yuanyong, F., Jie, H., 2006, Wangtao Chen The effect of surface roughness and wettability of nanostructured TiO₂ film on TCA-8113 epithelial-like cells *Surface and Coatings Technology* Volume 200, Issues 20-21, 22. P(6155-6160)
- [۴۰] افتخاری، ه.، جهان‌نیده، ع.، اصغری، ا.، اکبرزاده، ا.، حصارکی، س.، ۱۳۹۷، ارزیابی آسیب شناسی بافتی نانوکامپوزیت تری کلسیم فسفات در مقایسه با نانوکامپوزیت هیدروکسی آپاتیت بر روند التیام نقیصه ایجاد شده در استخوان ران خرگوش. پاتوبیولوژی مقایسه ای ایران، ۱۵ (۴) (پیاپی ۶۳) .
- [41] Kikuchi, M., Itoh, S., Ichinose, S., et al, 2001, Self-organization mechanism in a bone-like hydroxyapatite/collagen nanocomposite synthesized in vitro and its biological reaction in vivo. *Biomaterials*. 22:1705-1711.
- [42] Liao, S.S., Cui, F.Z., Zhu, X.D., 2004, Osteoblasts adherence and migration through three-dimensional porous mineralized collagen based composite: nHAC/PLA. *J Bioact Compat Polym*. 19:117-130.
- [43] Mistry, A.S., Mikos, A.G., Jansen, J.A., 2006, In vitro cytotoxicity and in vivo biocompatibility of a poly(propylene fumarate)-based/alumoxane nanocomposite for bone tissue engineering. *J Biomed Mater Res* (in press).
- [44] Shi, X., Hudson, J.L., Spicer, P.P., et al, 2005, Rheological behavior and mechanical characterization of injectable poly(propylene fumarate) /single-walled carbon nanotube composites for bone tissue engineering. *Nanotechnology*. 16:S531-S538.

- [65] Harper, C., 2001, Permacol: Clinical experience with a new biomaterial. *Hosp. Med.* 62 (2), 90–95.
- [66] Ueno, T., Pickett, L.C., de la Fuente, S.G., Lawson, D.C., Pappas, T.N., 2004, Clinical application of porcine small intestinal infected or defects. *J. Gastrointest. Surg: official journal of the Society for Surgery of the Alimentary Tract.* 8 (1), 109–112.
- [67] Derwin, K. A., Baker, A.R., Spragg, R.K., Leigh, D.R., Iannotti, J.P., 2006, Commercial extracellularmatrix scaffolds for rotator cuff tendon repair: Biomechanical, biochemical, and cellular properties. *JBJS.* 88 (12), 2665–2672.
- [68] Seidi, A., Ramalingam, M., Elloumi-Hannachi, I., Ostrovidov, S., Khademhosseini, A., 2011, Gradient biomaterials for soft-to-hard interface tissue engineering. *Acta biomater.* 7(4), 1441–1451.
- [68] Butler, D.L., Juncosa-Melvin, N., Boivin, G.P., Galloway, M.T., Shearn, J.T., Gooch, C., 2008, Functional tissue engineering for tendon repair: A multidisciplinary strategy using mesenchymal stem cells, bioscaffolds, and mechanical stimulation. *J. Orthop. Res.* 26 (1), 1–9.
- [69] Moffat, K.L., Kwei, A.S. P., Spalazzi, J. P., Doty, S.B., Levine, W.N., Lu, H.H., 2009, Novel nanofiber-based scaffold for rotator cuff repair and augmentation. *Tissue Eng. Part A.* 15 (1), 115–126.
- nanocomposites. *Chem. Commun.* 50 (62), 8484–8487. doi:10.1039/c4cc02442g
- [55] Liu, C., Han, Z., Czernuszka, J., 2009, Gradient collagen/nanohydroxyapatite composite scaffold: Development and characterization. *Acta biomater.* 5 (2), 661669.
- [56] Moffat, K.L., Kwei, A.S.P., Spalazzi, J.P., Doty, S.B., Levine, W.N., Lu, H.H., 2009, Novel nanofiber-based scaffold for rotator cuff repair and augmentation. *Tissue Eng. Part A.* 15 (1), 115–126. doi:10.1089/ten.tea.2008.0014.
- [57] Xie, J., Li, X., Lipner, J., Manning, C. N., Schwartz, A. G., Thomopoulos, S., et al, 2010, “Aligned-to-random” nanofiber scaffolds for mimicking the structure of the tendon-to-bone insertion site. *Nanoscale.* 2 (6), 923–926. doi:10.1039/c0nr00192a
- [58] Liu, M., Ishida, Y., Ebina, Y., Sasaki, T., Hikima, T., Takata, M., et al, 2015, An anisotropic hydrogel with electrostatic repulsion between cofacially aligned nanosheets. *Nature.* 517 (7532), 68–72. doi:10.1038/nature14060.
- [59] Gaharwar, A.K., Peppas, N.A., Khademhosseini, A., 2014, Nanocomposite hydrogels for biomedical applications. *Biotechnol. Bioeng.* 111 (3), 441–453. doi:10.1002/bit.25160
- [60] Carrow, J.K., Gaharwar, A.K., 2015, Bioinspired polymeric nanocomposites for regenerative medicine. *Macromol. Chem. Phys.* 216 (3), 248–264. doi: 10.1002 /macp. 201400427.
- [61] Kerativitayanan, P., Carrow, J. K., Gaharwar, A.K., 2015, Nanomaterials form engineering stem cell responses. *Adv. Healthc. Mater.* 4 (11), 1600–1627. doi: 10. 1002/ adhm. 201500272.
- [62] George, J., Kuboki, Y., Miyata, T., 2006, Differentiation of mesenchymal stem cells into osteoblasts on honeycomb collagen scaffolds. *Biotechnol Bioeng.* 95(3):404-11.
- [63] Bhattarai, N., Edmondson, D., Veisoh, O., 2005, Electrospun chitosan-based nanofibers and their cellular compatibility. *Biomaterials.* 26:6176–6184.
- [64] Bond, J.L., Dopirak, R.M., Higgins, J., Burns, J., Snyder, S.J., 2008, Arthroscopic eplacement of massive, irreparable rotator cuff tears using a GraftJacket allograft: echnique and preliminary results. *Arthrosc. J. Arthrosc. Relat. Surg.* 24 (4), 403.1–e403.e8.

“Research article”

Applications of nano biomaterials in orthopedics**Siamak Haghypour¹, Saeideh Ebrahimi asl^{2*}**¹ Assistant Professor, Faculty of Medical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran² Associate Professor, Faculty of Basic Sciences, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

*Corresponding author: ebrahimi.nano@yahoo.com

Abstract

Recent advances in nanobiotechnology have created a revolution in our ability to understand biological complexities and solve medical problems by developing sophisticated biometric techniques and materials. It is believed that nanocomposites and nanostructured materials with special structural, physical and chemical characteristics play a central role in orthopedic research because bone itself is a typical example of nanocomposites. This article reviewed recent researches on the use of nanobiomaterials to improve orthopedic materials and their application in bone tissue engineering and tendon-bone interfaces. Preliminary research supports the potential of nanobiomaterials for orthopedic applications. However, considering the significant range of applications of these materials in this field and the need for clinical examination of these composites, research is still necessary. Therefore, more investigations in this field and medical applications of these substances are suggested.

Keywords: Orthopedics, Nanobiomaterials, Tissue engineering, Bone.

