

“Research article”

Nanotechnology and its applications in various parts of life

Mojtaba Jamiati*

Department of Physics, Nar.C., Islamic Azad University, Naragh, Iran

*Corresponding author: drmjamiati@gmail.com

(Received: 26 May 2025, Accepted: 15 July 2025)

Abstract

Nanotechnology means improving the performance or production of materials, equipment and systems in dimensions of 1 to 100 nanometers. the science of nanotechnology is the study and use of very small devices and can be used in all fields of other sciences, such as chemistry, biology, physics, materials science and engineering. in fact, nanotechnology is the understanding and application of new properties of materials and systems in these dimensions that exhibit new physical effects, often influenced by the dominance of quantum properties over classical properties. nanotechnology is a field of applied science and technology that covers a wide range of topics. the role of nanotechnology in downstream industries is more prominent due to lower costs and the presence of private industries in that area, while nanotechnology has many applications in upstream industries. in fact, nanotechnology is the understanding and application of new properties of materials and systems in these dimensions that exhibit new physical effects - mainly influenced by the dominance of quantum properties over classical properties. nanotechnology, the manipulation of matter at the atomic and molecular scale to create materials with completely new and diverse properties, is a rapidly expanding field of research with great potential in many sectors, from healthcare to construction and electronics. Nanotechnology is a highly interdisciplinary field of knowledge and is related to fields such as materials engineering, medicine, pharmacy and drug design, veterinary medicine, biology, applied physics, semiconductor devices, supramolecular chemistry and even mechanical engineering, electrical engineering, chemical engineering and agricultural engineering. this article describes what nanotechnology is and some of its application areas in various industries. given the importance of nanotechnology and the need to pay attention to it, this study, which is a review study, was conducted. library and Internet sources, as well as reports from the Presidential Nanotechnology Task Force, were used to collect materials.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Nanotechnology, Industries, Electrical Industry, Nanomaterials, Environment, Solar Panels



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال شانزدهم، شماره‌ی ۶۲
تابستان ۱۴۰۴، صفحات ۱۵-۱

"مقاله پژوهشی"

نانو تکنولوژی و کاربردهای آن در بخش‌های مختلف زندگی

مجتبی جمعیتی *

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

* نویسنده مسئول مکاتبات: drmjamiati@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴)

چکیده

نانوتکنولوژی به معنای بهبود عملکرد یا تولید مواد، تجهیزات و سامانه‌ها در ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. علم فناوری نانو مطالعه و استفاده از ابزارهای بسیار کوچک است و می‌تواند در تمام زمینه‌های علوم دیگر، مانند شیمی، زیست‌شناسی، فیزیک، علم مواد و مهندسی مورد استفاده قرار گیرد. در حقیقت نانو تکنولوژی فهم و به کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستم‌هایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی غالباً متأثر از غلبه خواص کوانتومی بر خواص کلاسیک از خود نشان می‌دهند. نانوتکنولوژی رشته‌ای از دانش کاربردی و فناوری است که جستارهای گسترده‌ای را پوشش می‌دهد. نقش فناوری نانو در صنایع پایین دستی به دلیل هزینه‌های پایین‌تر و حضور صنایع خصوصی در آن قسمت پررنگ‌تر است درحالی که فناوری نانو در صنایع بالادستی کاربردهای فراوانی دارد. در واقع نانوتکنولوژی، فهم و به کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستم‌هایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی - عمدتاً متأثر از غلبه خواص کوانتومی بر خواص کلاسیک - از خود نشان می‌دهند. فناوری نانو، دستکاری ماده در مقیاس اتمی و مولکولی برای ایجاد موادی با ویژگی‌های کاملاً متنوع و جدید، یک حوزه تحقیقاتیست که به سرعت در حال گسترش است و دارای پتانسیل بسیار زیادی در بسیاری از بخش‌ها، از مراقبت‌های بهداشتی گرفته تا ساختمان و الکترونیک است. نانوفناوری یک دانش به شدت میان‌رشته‌ای است و به رشته‌هایی چون مهندسی مواد، پزشکی، داروسازی و طراحی دارو، دامپزشکی، زیست‌شناسی، فیزیک کاربردی، ابزارهای نیم‌رسانا، شیمی ابرمولکول و حتی مهندسی مکانیک، مهندسی برق، مهندسی شیمی و مهندسی کشاورزی نیز مربوط می‌شود. در این مقاله چستی و برخی زمینه‌های کاربردی فناوری نانو در صنایع مختلف تشریح شده است. با توجه به اهمیت فناوری نانو و لزوم توجه به آن، این مطالعه که از نوع مطالعات مروری می‌باشد صورت پذیرفته است. جهت گردآوری مطالب از منابع کتابخانه‌ای و اینترنتی همچنین گزارشات ستاد ویژ فناوری نانو ریاست جمهوری نیز استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: فناوری نانو، صنایع، صنعت برق، نانوماده، محیط زیست، صفحه‌های خورشیدی

مقدمه

مفهوم فناوری نانو، نانو فناوری یا نانوتکنولوژی^۱ مدرن فرزند مغزی ریچارد فاینمن^۲ برنده جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۶۵ بود. هنگامی که در سال ۱۹۵۹ ریچارد فاینمن گفت: "تا آنجائی که من می‌دانم قوانین فیزیکی هیچ تناقضی با امکان آرایش اتم به اتم مواد ندارد. ما باید این مفهوم را که تأثیراتش در مقیاس میکروسکوپی به اثبات رسیده است در مقیاس مولکولی نیز به کار ببریم. تولید قطعات به جایی می‌رود که ما می‌خواهیم. البته با قرار دادن آن‌ها در جایی که می‌خواهیم!" نمی‌دانست که اولین سنگ بنای نانوتکنولوژی را پایه‌گذاری می‌کند عبارت نانو تکنولوژی اولین بار توسط نوریو تانیگوچی^۳ استاد دانشگاه علوم توکیو در سال ۱۹۷۴ مورد استفاده قرار گرفت اگر چه شناخته شده نبود. تعریف او از نانوتکنولوژی اینگونه بود: "نانوتکنولوژی عمدتاً شامل فرایندهای؛ جداسازی، ادغام و تغییر شکل مواد بوسیله یک اتم یا یک مولکول است." با این حال دوباره واژه ی نانوتکنولوژی تا سال ۱۹۸۱ استفاده نگردید، (۱) تا اینکه در این سال کی اریک درکسلر^۴ با الهام که بی خبر از به کارگیری این واژه توسط تانیگوچی بود، نخستین مقاله خود با موضوع نانوتکنولوژی را منتشر کرد. درکسلر مفهوم نانوتکنولوژی را بسط داده و معروف کرد و رشته نانوتکنولوژی مولکولی را بنیان نهاد. در دهه ۱۹۸۰ معنی نانوتکنولوژی بصورت قطعی (نه تصادفی و اتفاقی) در ارتباط با اتم‌ها و مولکول‌های مجرد بصورت مفهومی و عمیق توسط اریک درکسلر

شرح داده شد. وی اهمیت تکنولوژیکی پدیده‌ها و دستگاه‌ها در مقیاس نانو را از طریق سخنرانی‌ها و دو کتاب تأثیر گذار رواج داد. در سال ۱۹۸۰، درکسلر از سخنرانی انگیزشی فاینمن با عنوان "فضای کافی در پایین دست وجود دارد" که در سال ۱۹۵۹ ایراد کرده بود، آگاه شد. واژه نانوتکنولوژی (که همانند واژه نانو-تکنولوژی تانیگوچی است) بصورت مستقل، توسط درکسلر در سال ۱۹۸۶ با الهام از مفهوم مطرح شده توسط فاینمن، در کتابی تحت عنوان: «موتور آفرینش: آغاز دوران فناوری نانو» بازآفرینی و تعریف مجدد شد. وی این واژه را به شکل عمیق‌تری در رساله دکترای خود مورد بررسی قرار داده و بعدها آنرا در کتابی تحت عنوان «نانوسیستم‌ها ماشین‌های مولکولی چگونگی ساخت و محاسبات آن‌ها» توسعه داد و با تاسیس انستیتو فورسایت^۵ به افزایش دانش و آگاهی عموم در رابطه با فناوری نانو کمک نمود. لذا در نتیجه تلاش‌های بعمل آمده، این فن‌آوری بعنوان یک زمینه جدید در دهه ۱۹۸۰ مطرح گردید. در حدود ۴۰۰ سال پیش از میلاد مسیح، دموکریتوس^۶ فیلسوف یونانی، برای اولین بار واژه اتم را که در زبان یونانی به معنی تقسیم نشدنی است، برای توصیف ذرات سازنده مواد به کار برد. از این رو شاید بتوان او را پدر فناوری و علوم نانو دانست (۲).

نانو از ریشه یونانی "نانس" به معنی کوتوله می‌باشد. فناوری نانو موج چهارم انقلاب صنعتی، پدیده‌ای عظیم می‌باشد که در تمامی گرایش‌های علمی راه یافته است تا جایی که در یک دهه آینده برتری فرایندها،

^۵ Foresight Institute

^۶ Democritus

^۱ Nanotechnology

^۲ Richard Phillips Feynman

^۳ Taniguchi Norio

^۴ K. Eric Drexler

لاعلاج از قبیل ایدز، هپاتیت و سرطان تحولی بزرگ ایجاد کرده است. از سوی دیگر، نانو تکنولوژی، به سبب بهبود کیفی ابزارها، مصرف کم‌تر مواد اولیه، مصرف کم‌تر انرژی، کاهش تولید مواد زائد و افزایش سرعت تولید در کشورهای پیشرفته به عنوان مهم‌ترین روش تولید و ساخت این ابزارها، مطرح است. همچنین به کمک این فناوری گام‌های موثری در جهت کاهش آلودگی زیست‌محیطی حاصل از سوخت‌های فسیلی، برداشته شده است (۵ و ۶).

فن‌آوری نانو به تکنیک‌هایی اطلاق می‌گردد که با در دست گرفتن کنترل ساختار ماده در مقیاس اتمی و مولکولی ساختارهای فوق‌العاده ریز ایجاد می‌نماید. برخی از پدیده‌ها با کاهش اندازه سیستم تشدید می‌گردند. از جمله این پدیده‌ها اثرات مکانیک کوانتومی می‌باشد. بعنوان مثال خواص الکترونیکی جامدات با کاهش اندازه آن‌ها تغییر می‌کند. این اثرات در اندازه‌های ماکرو تا میکرو مشاهده نمی‌شود. همچنین برخی از خواص مکانیکی، الکتریکی، نوری و غیره در مقایسه با سیستم‌های ماکروسکوپی تغییر می‌نماید. بعنوان مثال نسبت سطح به حجم ماده افزایش پیدا کرده و خواص مکانیکی، حرارتی و کاتالیتیک مواد را تغییر می‌دهد. فلذا مواد در مقیاس نانو خواص دیگری از خود بروز می‌دهند. مثلاً مواد کدر می‌توانند شفاف بشوند. مواد غیرقابل حل می‌توانند قابل حل گردند و مواد خنثی می‌توانند به عنوان کاتالیست عمل نمایند. با استفاده از مواد نانو تجهیزاتی تولید می‌گردد که از جنبه‌های مختلف از قبیل دوام، طول عمر، هزینه تمام شده، کارایی و ... نسبت به انواع مرسوم ارجحیت دارد (۷).

وابسته به این تحول خواهد بود. 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 مواد می‌باشد.

بحث نانوتکنولوژی یکی از رایج‌ترین مباحث در مجامع علمی دنیاست و کشورهایی که نتوانند در این فناوری موقعیت مناسبی بدست آورند، در آینده در بسیاری زمینه‌ها از گردونه رقابت اقتصادی خارج می‌شوند چرا که از جمله مهم‌ترین شاخصه‌های قابلیت اقتصادی در آینده، توانایی خروج موفقیت‌آمیز از بحران انرژی است و از نانوتکنولوژی به منزله سلاحی جدید برای مقابله با این بحران یاد می‌شود (۳-۱).

از ابتدای دهه ۱۹۸۰ میلادی گستره طراحی و ساخت ساختمان‌ها هر روزه شاهد نوآوری‌های جدیدی در زمینه مصالح کارآمدتر و پربازده‌تر در مقاومت، شکل‌پذیری، دوام و توانایی بیش‌تر نسبت به مصالح سنتی است.

فناوری نانو واژه‌ای است که به تمام فناوری‌های پیشرفته در عرصه کار با مقیاس نانو اطلاق می‌شود. این فناوری در علوم مختلف توانسته به عنوان تکنولوژی برتر تحولات شگرف را رقم بزند. در این میان علوم پزشکی نیز از این تحولات مستثنا نبوده و این فناوری توانسته انقلابی را در عرصه پزشکی ایجاد کند. امروزه نانو در بحث دارو رسانی، درمان داروهای نامحلول در آب، امکان استنشاقی یا خوراکی شدن داروهای تزریقی، حذف اثرات جانبی داروها، تشخیص زود هنگام بیماری‌ها و درمان بیماری‌های

بسیاری از کاربردهای نانو تکنولوژی شامل مواد جدیدی می‌شود که نسبت به مواد مشابه ساخته شده در اندازه‌های بزرگ‌تر دارای خواص بسیار متفاوت و اثرات جدیدی هستند. علت این مساله نسبت سطح به حجم بسیار بالای نانو ذرات در مقایسه با ذرات بزرگ و ناشی از اثراتی است که در مقیاس کوچک ظاهر می‌شوند اما در مقیاس‌های بزرگ‌تر مشاهده نمی‌شوند. فناوری نانو امکان ساخت موادی را فراهم می‌کند که می‌توانند بسیاری از حوزه‌های تولید را متحول کنند. به عنوان مثال، نانولوله‌ها و نانوذره‌ها (لوله‌ها و ذراتی به عرض فقط چند اتم) و آئروژل‌ها (مواد بسیار سبک و قوی با ویژگی‌های عایق‌کنندگی قابل توجه) می‌توانند راه را برای توسعه تکنیک‌های جدید و محصولات برتر هموار کنند. علاوه بر این، ربات‌هایی که طول آن‌ها می‌تواند فقط چند نانومتر باشد و نانوربات نامیده می‌شوند و همچنین نانوکارخانه‌ها که می‌توانند به ساخت مواد و اشیاء جدید کمک کنند، از دیگر کاربردهای نانوفناوری هستند. نانوفکتوری یا نانوکارخانه سیستم پیشنهادی است که در آن نانوماشین‌ها (چیزی شبیه مونتاژکننده‌های مولکولی یا بازوهای ربات صنعتی) مولکول‌های واکنش‌پذیر را از طریق سنتز مکانیکی با هم ترکیب می‌کنند تا قطعات اتمی دقیق بزرگ‌تری را بسازند (۵).

نانو تکنولوژی، توانمندی تولید مواد، ابزارها و سیستم‌های جدید با در دست گرفتن کنترل در سطوح ملکولی و اتمی و استفاده از خواص است که در آن سطوح ظاهر می‌شود. از همین تعریف ساده برمی‌آید که نانو تکنولوژی یک رشته جدید نیست، بلکه رویکردی جدید در تمام رشته‌هاست. برای نانو تکنولوژی کاربردهایی را در حوزه‌های مختلف از

غذا، دارو، تشخیص پزشکی و بیوتکنولوژی تا الکترونیک، کامپیوتر، ارتباطات، حمل و نقل، انرژی، محیط‌زیست، مواد، هوافضا و امنیت ملی برشمرده‌اند. کاربردهای وسیع این عرصه به همراه پیامدهای اجتماعی، سیاسی و حقوقی آن، این فناوری را به عنوان یک زمینه فرا رشته‌ای و فرابخشی مطرح نموده است. هر چند آزمایش‌ها و تحقیقات پیرامون نانو تکنولوژی از ابتدای دهه ۸۰ قرن بیستم به طور جدی پیگیری شد، اما اثرات تحول آفرین، معجزه‌آسا و باور نکردنی نانو تکنولوژی در روند تحقیق و توسعه باعث گردید که نظر تمامی کشورهای بزرگ به این موضوع جلب گردد و فناوری نانو را به عنوان یکی از مهم‌ترین اولویت‌های تحقیقاتی خویش طی دهه اول قرن بیست و یکم محسوب نمایند.

استفاده از این فناوری در کلیه علوم پزشکی، پتروشیمی، علوم مواد، صنایع دفاعی، الکترونیک، کامپوترهای کوانتومی و ... باعث شده که تحقیقات در زمینه نانو به عنوان یک چالش اصلی علمی و صنعتی پیش روی جهانیان باشد. لذا محققین، اساتید و صنعتگران ایرانی نیز باید در یک بسیج همگانی، جایگاه، موقعیت و وضعیت خویش را در خصوص این موضوع مشخص نمایند و با یک برنامه‌ریزی علمی دقیق و کارشناسانه به حضوری فعال و حتی رقابتی سالم در این جایگاه، عرض اندام و ابراز وجود نمایند و برای چنین کاری طراحی یک برنامه منسجم، فراگیر و همه جانبه اجتناب ناپذیر است.

امروزه از طرفی به دلیل کاهش یافتن منابع اولیه انرژی‌های فسیلی در دنیا و از طرف دیگر به دلیل ایجاد آلودگی‌های شدید زیست‌محیطی در اثر افزایش مصرف این منابع، توجه خاصی به منابع جدید تامین

کاهش تولید مواد زائد و افزایش سرعت تولید در کشورهای پیشرفته به عنوان مهم‌ترین روش تولید و ساخت این ابزارها، مطرح است. همچنین به کمک این فناوری گام‌های موثری در جهت کاهش آلودگی زیست محیطی حاصل از سوخت‌های فسیلی، برداشته شده است.

از این رو از مهم‌ترین بسترهای بکارگیری نانوتکنولوژی در ساخت و تولید مبدل‌های انرژی‌های نو (مثل سل‌های خورشیدی و پیل‌های سوختی)، کاهش آلاینده‌های زیست محیطی نیروگاه‌های گازسوز (با استفاده از کاتالیست‌های احتراق) و افزایش راندمان این نیروگاه‌ها (با بکارگیری نانوپوشش‌ها و نانومگنت‌ها) است (۵-۷).

نانوتکنولوژی و کاربردهای آن

کاربرد نانو تکنولوژی در کشاورزی و صنایع غذایی (۷-۸)

نانوفناوری می‌تواند به عنوان ادامه دانش کنونی به ابعاد نانو یا طرح‌ریزی دانش کنونی بر پایه‌هایی جدیدتر و امروزی‌تر باشد نانو تکنولوژی از دیدگاه صنایع غذایی نانو تکنولوژی یک افق عمیق علمی با قدرت بالا در تولید محصولات و روش‌های جدید فراوری است.

مفاهیم نانو تکنولوژی چهارچوبی منطقی را برای توسعه درک واکنش‌ها و رفتار خود آرایی اجزای غذایی در مقیاس کوچک ایجاد می‌کند این موضوع در ساختمان، رئولوژی و خصوصیات زیست فعالی مواد غذایی در مقیاس بزرگ اثر دارد. پیشرفت در فرایندهای تولید نانو ساختارها و نانو مواد با خصوصیات فرمولی مناسب احتمال تولید نانو ذرات پایدار با قابلیت کاربرد در صنایع غذایی و صنایع

انرژی مانند انرژی‌های خورشیدی، بادی و ... می‌شود. اما استفاده از این منابع مستلزم دستیابی به تکنولوژی تبدیل کننده این پتانسیل‌ها به انرژی‌های الکتریکی، مکانیکی و ... است.

شناخت نانومواد، خواص و کاربردهای آن‌ها به ما کمک می‌کند که در کاربردهای مختلف قابلیت آن‌ها را بررسی نماییم و یا تهیه نانوذرات متناسب با یک کارایی خاص را مورد ارزیابی قرار دهیم. خصوصیات مربوط به نانومواد مشخص و ثابت نمی‌باشند، برای مثال نقاط کوانتومی ۲۰ نانومتری، خصوصیتی دارند که کاملاً متفاوت با نقاط کوانتومی ۳۰ نانومتری است. اما آن‌چه که در ابعاد نانومتری مهم است، قابلیت و توانایی بهره‌گیری از این خصوصیات است. خصوصیات نانومواد آن‌ها را مستعد برای ساخت محصولاتی مفید می‌کند. کارایی نانومواد در کاربردهای مختلف است که از آن جمله می‌توان به بهبود خواص کاتالیستی، جذب، عبوردهی یونی، عبوردهی حرارتی، قابلیت جداسازی، سبک سازی، راندمان، قابلیت قطع و وصل خواص، کاهش آلودگی و قابلیت‌های نوری اشاره کرد (۳).

بحث نانوتکنولوژی یکی از رایج‌ترین مباحث در مجامع علمی دنیاست و کشورهایی که نتوانند در این فناوری موقعیت مناسبی بدست آورند، در آینده در بسیاری زمینه‌ها از گردونه رقابت اقتصادی خارج می‌شوند چرا که از جمله مهم‌ترین شاخصه‌های قابلیت اقتصادی در آینده، توانایی خروج موفقیت آمیز از بحران انرژی است و از نانوتکنولوژی به منزله سلاحی جدید برای مقابله با این بحران یاد می‌شود.

از سوی دیگر، نانو تکنولوژی، به سبب بهبود کیفی ابزارها، مصرف کم‌تر مواد اولیه، مصرف کم‌تر انرژی،

وابسته را فراهم می‌سازد. نانو تکنولوژی در ارتباط با نگهداری و مخصوصاً بسته‌بندی مواد غذایی کاربرد زیادی دارد و در برخی از موارد دستاوردهای نانو در عمل بکار گرفته شده است.

نانو حسگرهای زیستی ابزارهایی هستند که که از تلفیق ابزارهای شیمیایی، فیزیکی و زیستی بدست آمده‌اند. این حسگرها شامل ترکیبات زیستی مانند یک سلول، آنزیم و یا آنتی بادی متصل به یک مبدل انرژی هستند و قادرند که تغییرات ایجاد شده در مولکول‌های اطراف خود را گزارش دهند. این گزارش‌ها توسط سیگنال‌هایی که مبدل انرژی به تناسب با مقدار آلودگی تولید می‌کند دریافت می‌شوند. بنابراین اگر تجمع زیادی از عامل بیماری در اطراف این حسگرها وجود داشته باشد سیگنال‌های قوی فرستاده می‌شوند. ارزیابی حضور آلاینده‌ها در محیط توسط حسگرها در چند دقیقه میسر است اما با استفاده از روش‌های رایج حداقل ۴۸ ساعت زمان برای تشخیص نیاز است. استفاده از نانوحسگرهای زیستی در بسته‌های غذایی نیز کاربرد دارند که در صورت شروع فساد مواد غذایی می‌توانند هشدار دهنده باشند.

از دیگر کاربرد نانو تکنولوژی در صنایع غذایی ایجاد پلاستیک‌های جدید در صنعت بسته‌بندی مواد غذایی است. در تولید این پلاستیک‌ها از فناوری نانو ذرات استفاده شده است. اکسیژن مسئله‌سازترین عامل در بسته‌بندی مواد غذایی است زیرا این عنصر باعث فساد چربی مواد غذایی و همچنین تغییر رنگ آن‌ها می‌شود. در این نوع پلاستیک جدید، نانوذرات به صورت زیگزاگ قرار گرفته‌اند و مانند سدی مانع از نفوذ اکسیژن می‌شوند. به بیان دیگر مسیری که گاز باید برای ورود به بسته طی کند طولانی می‌شود. به همین

خاطر مواد غذایی در این بسته‌ها تازگی خود را بیش‌تر حفظ می‌کنند.

کاربرد فناوری نانو در پزشکی

تا به امروز صنعت پزشکی بسیار تحت تأثیر فناوری نانو قرار گرفته است و بسیاری از محققان و دانشمندان به وسیله این علم، روش‌ها و دستگاه‌های خاصی را ابداع کرده‌اند. مانند استفاده از نانو ذرات طلا به عنوان درمان بالقوه سلول‌های سرطانی و یا ساخت واکسن‌هایی که بدون سوزن ماده مؤثره را به داخل بدن تزریق می‌کنند.

نانو تکنولوژی در زمینه پزشکی بیش‌تر به نام نانو پزشکی شناخته می‌شود. در حال حاضر این تکنولوژی در بخش‌های مختلف پزشکی کاربرد دارد ولی یکی از مهم‌ترین بخش‌های نانو در پزشکی مربوط به مشکلات قلبی است، چرا که تا به الان تأثیرات بسیار مثبتی را بر آن گذاشته است. از جمله بخش‌هایی که به کمک نانو در علم کاردیولوژی، حل یا بهبود یافته‌اند، می‌توان به وجود نقص در دریچه قلب و همچنین درمان پلاک‌های شریانی قلب که در بروز بیماری‌هایی مثل سکته قلبی دخیل هستند، اشاره کرد. تحقیقات اخیر توسط دانشمندان دانشگاه باث و بریستول بر روی فناوری نانو، منجر به تولید دستگاه ضربان‌سازی شده است که می‌تواند به جلوگیری از نارسایی‌های قلبی و افزایش طول عمر بیمارهای قلبی عروقی کمک کند. مطالعات نشان داده است که ارتباط ضربان قلب و ریه‌ها، باعث ایجاد یک الگوی ریتمیک می‌شود. به این معنی که سرعت تنفس ما بر ضربان قلب ما تأثیر می‌گذارد. دستگاه‌های ضربان‌ساز سستی ضربان قلب را در یک سرعت مشخص نگه می‌دارند، در حالی که قلب به صورت طبیعی این گونه کار نمی‌کند. دستگاه

جدیدی که توسط دانشمندان ساخته شده است با ریه‌ها هماهنگ‌تر عمل می‌کند، خون را به صورت مؤثر پمپاژ و در مصرف انرژی عضله قلب صرفه‌جویی می‌کند.

فناوری نانو در ساخت لوازم پزشکی منجر به تولید لوازمی با کارایی بالاتر و ساختار مناسب‌تر شده است. سیلیکون کریید از نانو کریستال‌های سبک با مقاومت بالاست که با اعضای بدن انسان نیز سازگاری دارد. ساخت دریچه‌های مصنوعی قلب با نانو ذرات بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

استفاده از نانو تکنولوژی بجای عمل جراحی که یک عمل تهاجمی است، بسیار کم خطرتر است و نیازی نیست تا بافت‌های بزرگ بدن را برای رفع بیماری جراحی کنیم. در صورتی که با وجود نانو داروها این اتفاق بسیار ساده‌تر حل می‌شود. برای مثال، در افرادی که دارای بیماری قلبی هستند یا دچار حمله قلبی شده‌اند، قلب‌شان ضعیف است و گاهی دچار نارسایی است اما این مشکل به قدری حاد نیست که نیاز به جراحی داشته باشد. به همین منظور استفاده از نانو داروها مناسب‌ترین گزینه است (۷-۹).

از موارد دیگر کاربرد نانو تکنولوژی که گروهی از مهندسين، پزشکان و دانشمندان مواد در دانشگاه MIT انجام داده‌اند، در ترمیم قلب است که با همکاری مهندسين بافت و با کمک نانو سیم‌های طلا توانسته‌اند قسمت آسیب دیده قلب را ترمیم کنند و بافت غیر عملکردی و مرده را جایگزین کنند. همچنین از نانو ذرات منیزیم نیز استفاده می‌شود که توانایی عبور از بافت را دارد و به سمت بافت آسیب دیده رفته و آن را ترمیم می‌کند. با وجود تاثیر زیاد این کار اما باید بدانیم که انجام آن به این سادگی‌ها هم نیست.

سلول‌های قلب به سادگی در آزمایشگاه قابل ساخت نیستند و اضافه کردن نانو مواد برای بازسازی سلول‌های قلب و همچنین همگام سازی سلول‌ها با یکدیگر برای جلوگیری از رد سلول‌ها توسط بدن مساله بسیار مهمی است. حتی بعد از گذر از مرحله ساخت سلول‌ها لازم است که سلول‌های جدید دقیقاً در جهت درست و در راستای سلول‌های قبلی کار کنند و هماهنگی در فعالیت بافت‌ها ایجاد نشود. در نمونه‌های اولیه از این فرآیند، بخاطر آنکه بافت ساخته شده رسانای خوبی نبود، باعث ایجاد مشکلاتی شده بود و نمی‌شد به خوبی از آن استفاده کرد؛ اما در تلاش‌های بعدی و با اضافه کردن نانو سیم‌های طلا، مشکل رسانا بودن که رابطه مستقیمی با انبساط و انقباض قلب دارد نیز تا حد زیادی حل شد.

نوع دیگری از سیستم‌های دارو رسانی که در آن نانو فناوری راه‌حل‌های جدیدی را ارائه کرده است، این است که نانو برای موادی طراحی شدند که داروها را به محل‌های مشخص‌شان انتقال دهند و دارای فعالیت نیز باشند. این ساختارهای نانو می‌توانند به یک دارو، یک مولکول هدف یا یک ماده عکس برداری متصل شده و سپس سلول‌های خاصی را جذب کرده و در این حالت آن چه را حمل می‌کنند هر زمان لازم باشد آزاد سازند به خاطر اندازه نانو، این ترکیبات این قابلیت را دارند که وارد سلول‌ها شوند چرا که در حالت معمول ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر به وسیله سلول‌ها بلعیده می‌شوند. بعضی از ساختارهای نانو که در این خصوص مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فولرین‌ها دندریمر (درخت سان‌ها) و نانو لوله‌های کربنی می‌باشند (۱۰).

به این شکل که این نانو ذرات به دیواره شریان‌های مورد نظر می‌چسبند و به مرور زمان و به آرامی دارو را در داخل بدن آزاد می‌کنند. از مهم‌ترین ویژگی‌های این نانو ذرات این است که می‌توانند بافت آسیب دیده را پیدا کنند، به آن متصل شوند و محموله داروی خود را به آرامی به آن وارد کنند. این ذرات برای حمل دارو از سه لایه تشکیل شده‌اند و حدود ۶۰ نانومتر قطر دارند. لایه بیرونی پوششی از پلیمر به نام PEG دارد و وظیفه آن محافظت از تجزیه دارو است. لایه میانی از جنس چربی است و هسته داخلی نیز حاوی دارو به همراه زنجیره پلیمر است که نقش کنترل زمان انتشار دارو را دارد (۱۰).

کاربرد نانو تکنولوژی در الکترونیک

نانو تکنولوژی یک رشته وابسته به ابزار است ابزاری که به مرور در حال بهتر شدن است نانو تکنولوژی و شاخه‌های کاربردی آن مانند نانو الکترونیک در واقع تولید کارآمد دستگاه‌ها و سیستم‌ها با کنترل ماده در مقیاس طولی نانو است و بهره برداری از خواص و پدیده‌های نوظهوری است که در این مقیاس توسعه یافته است. صنعت الکترونیک امروزی مبتنی بر سیلیکون است، سن این صنعت به حدود ۵۰ سال می‌رسد و اکنون به مرحله ای رسیده است که از لحاظ تکنولوژی، صنعتی و تجاری به بلوغ رسیده است. در مقابل این فناوری، الکترونیک مولکولی قرار دارد که در مراحل کاملاً ابتدایی است و قرار است این فناوری به عنوان آینده و نسل بعدی صنعت الکترونیک سیلیکونی مطرح شود. الکترونیک مولکولی دانشی است که مبتنی بر فناوری نانو بوده و کاربردهای

وسعی در صنعت الکترونیک دارد. با توجه به کاربرد-های وسیع الکترونیک در محصولات تجاری بازار می‌توان با سرمایه گذاری و تامل بیشتر در فناوری نانو الکترونیک در آینده ای نه چندان دور شاهد سوددهی کلان محصولاتی خواهد بود که جایگزین فناوری الکترونیک سیلیکونی شده‌اند. میل، اشتیاق و علاقه مصرف‌کنندگان و نیاز بازار به محصولات جدید با قابلیت‌های بالای سازندگان و صنعتگران را بر آن می‌دارد که با سرمایه‌گذاری در این فناوری شاهد رشد و شکوفایی اقتصادی هر چه بیشتر باشند، و لیکن با توجه به اهمیت نانو الکترونیک که به عنوان یک شاخه کاربردی از نانو تکنولوژی مطرح است لزوم سرمایه‌گذاری کلان دراز مدت و ریسک‌پذیری و تشکیل مراکز دانش بنیان توسط دولت مردان پیش از پیش احساس می‌شود (۱۲-۱۱).

نانو الکترونیک شاخه‌ای از فناوری نانو است که از تاثیر نانو فناوری بر دانش و صنعت برق و الکترونیک ایجاد شده است. تاریخچه این دانش به تلاش برای کوچک کردن هرچه بیشتر ترانزیستورها بر می‌گردد. نانو الکترونیک از نظر ساخت وسایل الکتریکی کوچک‌تر، سریع‌تر و کم مصرف‌تر نقش بسیار مهمی در تکنولوژی جهانی دارد. افزایش میزان ذخیره اطلاعات، محاسبه‌گرهای رایانه‌ای کوچک‌تر، طراحی مدارهای منطقی، نانو سیم‌ها از زمینه‌های کاربرد نانو الکترونیک هستند. در سال ۱۹۵۶ گوردون مور^۷ بنیان‌گذار اینتل، خالق قانون مور و دنیای مدرن تحلیلی ارایه کرد که بر طبق آن هر ۱۸ ماه تعداد ترانزیستورهای بکار رفته در ریزپردازنده‌های اینتل دو برابر می‌شود که نصف شدن ابعاد گیت ترانزیستورها

^۷ Gordon Moore

با شرط ثابت بودن اندازه تراشه سیلیکونی در آن می‌تواند نتیجه این قوانین باشد، این قاعده به قانون مور موسوم شد. این نصف شدن در واقع پیام‌آور ابعاد اقتصادی بود یعنی هر چه گیت کوچک‌تر می‌شد می‌توانست سریع‌تر سوئیچ کند و در نتیجه انرژی کمتری مصرف شده و تعداد بیش‌تری ترانزیستور در یک تراشه سیلیکون جای می‌گرفت. افزایش تعداد ترانزیستورها و بازدهی آن‌ها، هزینه را کاهش داده، بنابراین مقرون به صرفه این بود که هر ترانزیستور تا حد امکان کوچک‌تر شود، این کوچک‌سازی بالاخره در نقطه‌ای متوقف می‌شد. بنابراین برای ادامه رشد صنعت الکترونیک باید به فکر فناوری‌های جایگزین بود، فناوری که مشکلات گذشته را حل کرده و توجیه اقتصادی داشته باشد و این بار نانو تکنولوژی بود که توانست به کمک الکترونیک بیاید و فناوری الکترونیک مولکولی یا همان نانو الکترونیک بنا نهاده شد (۱۴ و ۱۳).



شکل ۱: نانو تکنولوژی و کیت‌های الکترونیکی (۱۵).

از آن زمان تاکنون اندازه ترانزیستورها به ۱۰ نانومتر نیز رسیده است. هدف علم نانو الکترونیک امکان تولید دستگاه‌های الکترونیکی در مقیاس نانو یا ساخت دستگاه‌های الکترونیکی که دارای اجزای نانو هستند را مطرح می‌کند (۱۴).

پرهزینه‌ترین و پرکاربردترین بخش برق، صنعت تولید برق است. این صنعت از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است. کاربرد نانو در هر یک از این بخش‌ها منجر به بهبود بازدهی، افزایش تولید برق، کاهش هدر رفت انرژی، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و بهبود اقتصاد یک کشور می‌شود. صنعت تولید برق یکی از جنبه‌های تعیین کننده قدرت اقتصادی یک کشور است. هدف از کاربرد نانو در این زمینه افزایش تولید میزان برق تولیدی در یک محل مشخص است. تاثیر نانو در این زمینه فقط مختص به سوخت‌های فسیلی نمی‌شود. سایر روش‌های تولید برق مثل پیل‌های سوختی و صفحه‌های خورشیدی را نیز در بر می‌گیرد. برخی از کاربردها و مزایای کاربرد نانو که در تولید برق موثرند؛ در جدول زیر لیست شده‌اند (۱۳).

برق و تکنولوژی آن قسمت‌های مختلفی را در صنعت شامل می‌شود. از فرایند تولید آن گرفته تا همه وسایلی که از انرژی الکتریسیته استفاده می‌کنند زیر مجموعه تکنولوژی برق شناخته می‌شوند. آن چه امروزه بیش‌تر به این صنعت مربوط می‌شود، کاربرد آن در صنایع سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، سیستم‌های عملیاتی، اطلاعات و کاربردهای شبکه، تلفن و وسایل ارتباطی، تجهیزات ویدیویی و چند رسانه‌ای و محصولات اداری است. به طور کلی کاربرد فناوری نانو در حوزه برق و انرژی را می‌توان به بخش‌های زیر تقسیم کرد: ساخت و تولید تجهیزات مورد نیاز صنعت برق با کارایی و خواص بهتر و هزینه کم‌تر؛ ساخت و تولید تجهیزاتی که با فناوری‌های مرسوم امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ توسعه روش‌های بهره‌برداری، تعمیرات، نگهداری، بهسازی و نوسازی تاسیسات و تجهیزات صنعت برق؛ کاهش تلفات برق در شبکه‌های انتقال و

توزیع؛ افزایش راندمان تجهیزات در صنعت برق؛ افزایش توان تولید.

خواص و ساخت نانو مواد

شناخت نانومواد، خواص و کاربردهای آن‌ها به ما کمک می‌کند که در کاربردهای مختلف قابلیت آن‌ها را بررسی نماییم و یا تهیه نانوذرات متناسب با یک کارآیی خاص را مورد ارزیابی قرار دهیم. یکی از روش‌های تولید نانو ساختارها روش‌های رایج رشد فیلم‌های نازک نانویی است که به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند و از میان آن‌ها دو روش اصلی برای لایه نشانی وجود دارد. در روش پایین به بالا که همیشه مورد توجه شیمی‌دانان و زیست‌شناسان بوده است، تلاش می‌شود که ساختار مولکولی از یک ساختار زیرین رشد داده شود و به مقیاس نانومتری (نانوساختار ریز) انتقال یابد. در روش بالا به پایین که بیش‌تر مورد توجه فیزیک‌دانان است تلاش می‌شود که مواد از ساختار ماکروسکوپی به ساختار ریز (نانومتری) تبدیل شوند. البته روش بالا به پایین از اهمیت و رواج بیش‌تری برخوردار است. در روش پایین به بالا نیاز به آن است که مواد به سه فاز بخار یا محلول شیمیایی یا محلول باشند. لایه نشانی از یک فاز این تقدم را دارد که ماده اولیه ابتدا به حالت بخار یا محلول تبدیل و سپس به صورت یک زیر لایه (بستر) روکش می‌شود. برای این کار به روش‌های الکتریکی و حرارتی واکنش‌های شیمیایی نیاز است (۷). گاز پس از ورود به محفظه کند و پاش تحت یک میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، اگر میدان به قدر کافی قوی باشد، درصد بالایی از اتم‌های گازیونیزه می‌شوند. گازیونیزه شده منفجر و انرژی الکترون‌های آزاد شده مجموعاً شامل گاز پلاسما یا پلاسما می‌باشد. اتم‌های گازیونیزه شده

انرژی جنبشی نسبتاً کمی دارند، مگر در مواردی که از میدان الکتریکی عبور کنند و تسریع شوند. هنگامی که این اتم‌ها تسریع می‌شوند سطح هدف را با یک نیروی کافی بمباران نموده و اتم‌ها را از سطح ماده جدا می‌کنند. کند و پاش در اساس از جای خود بیرون کردن اتم‌ها از سطح ماده یا نشان دادن یک فیلم نازک بر روی یک ماده است. کند و پاش یک تکنیک قدیمی است که در سال ۱۸۵۰ میلادی کشف شد. نخستین مقاله‌ها در مورد دستگاه کند و پاش مغناطیسی در سال ۱۹۶۰ میلادی گزارش ارائه شده است. از آنجا که کند و پاش‌های مغناطیسی به عنوان یک پیشرفت در میدان‌های صنعتی مختلف شناخته شده‌اند به طور ویژه در پروژه‌های سطح، میکروالکترونیک و به طور وسیع برای انباشت فیلم‌های نازک استفاده می‌شوند (۱۴).

سیم‌ها و کابل‌ها برای جامعه مدرن ضروری هستند و همیشه فرصت‌هایی برای تولید مواد جدید با کاهش مقاومت، جرم و یا حساسیت به خوردگی در این صنعت وجود دارد. نانولوله‌های کربنی (CNT) به دلیل خواص فیزیکی و الکترونیکی منحصربه‌فردشان، فرصت‌هایی عالی را برای ادغام در سیم‌ها و کابل‌ها برای انتقال نیرو و داده‌ها ارائه می‌کنند. سیم‌ها و روبان‌های CNT ماکروسکوپی در حال حاضر به عنوان جایگزینی مناسب برای هادی‌های فلزی در عملکردهای آزمایشگاهی کابل‌های کوکسیال، USB و اترنت نشان داده‌اند.

در کاربردهای خاص، مانند هادی بیرونی کابل کوکسیال، مواد CNT ممکن است برای جابجایی فلزات برای دستیابی به مزایای قابل توجه مانند کاهش جرم کابل در واحد طول تا ۵۰٪ در برخی موارد مورد استفاده قرار گیرند. مواد CNT حجیم دارای چندین

ویژگی منحصر به فرد هستند که ممکن است مزایایی نسبت به هادی‌های فلزی مانند تحمل خمشی و پایداری محیطی داشته باشد. به طور خاص، مشاهده می‌شود که سیم‌های CNT بیش از ۲۰۰۰۰۰ چرخه خمشی را بدون افزایش مقاومت تحمل می‌کنند. علاوه بر این، سیم‌های CNT پس از ۸۰ روز در یک محیط خورنده هیچ افزایشی در مقاومت نشان نمی‌دهند نانولوله‌های کربنی علاوه بر رسانایی الکتریکی، مقاومت مکانیکی خیلی خوبی (در حد مستحکم‌ترین نوع فولادها) نیز دارند که منجر به خواص مکانیکی مناسب این ماده نیز می‌شود (۱۲).

برای بهبود خواص عایقی روکش کابل‌های الکتریکی، نیز می‌توان از نانوکامپوزیت‌ها، بر پایه مواد پلیمری و نانوذرات خاک رس استفاده کرد. این مواد علاوه بر خواص مکانیکی مناسب، ویژگی‌های دیگری مانند مقاومت بالا در برابر آتش‌سوزی را برای عایق سیم به همراه دارد (۸).

با استفاده از نانو تکنولوژی می‌توان لوله‌های کربنی ایجاد کرد که از آن‌ها در موارد زیر در صنایع مختلف استفاده می‌شود:

- اتصالات سیم کوانتوم
- دیودها و ترانزیستورهای محاسباتی
- ذخیره اطلاعات، خازن‌ها، نوسانگرهای تراهرتری و صفحات نمایشگر تخت، حافظه‌های رایانه‌ای غیرفرار
- نمایشگرهای تلویزیونی با عملکرد بهتر از انواع امروزی موجود در بازار
- محلولی برای اتصال درونی تراشه‌های بسیار سریع
- ساختار نانولوله‌های کربنی به گونه‌ای است که می‌توان از آن‌ها در تولید کامپوزیت‌هایی با استحکام بالا، کابل‌ها، پرتوها، موادی با وظایف چندگانه،

مبدل‌های حرارتی، رادیاتورها، سدهای حرارتی، مخزن سرما، سپر پرتوهای خطرناک، لباس‌های فضایی، زره، انواع جدیدی از بسته بندی و محصولاتی برای مدیریت گرمایی و غشاء صافی، در حسگرها و ماشین-های مولکولی، تولید میکروسکوپ‌هایی بر مبنای CNT AFM, ST، حسگرهای ارزان اما فوق العاده حساس، بیوحسگرها، موتورها، محرک‌ها و چرخنده‌های مولکولی، کانال‌های یونی و راکتورهای در ابعاد نانو، باتری و سلول‌های انرژی، ذخیره لیتیم و هیدروژن و بیو مواد از آن‌ها استفاده کرد (۱۴).

از فواید نانولوله‌های کربنی می‌توان به قطر کوچک، استحکام مکانیکی بالا، نسبت صفحه زیاد و رسانایی محوری بالا اشاره کرد. ماهیت ویژه کربن با نانولوله‌های کربنی تک جداره کامل می‌شود. هیچ عنصر دیگری مثل کربن شبکه‌ای از عناصر با پیوندهای بسیار محکم را این چنین ایجاد نمی‌کند. نانولوله‌ها، نمونه‌ای از نانوتکنولوژی حقیقی هستند، قطری به اندازه تنها یک نانومتر اما با مولکول‌هایی دارند که می‌تواند بصورت فیزیکی و شیمیایی کنترل شوند بعضی از آن‌ها الکترون‌ها را درست مثل فلزات در طول لوله منتقل می‌کنند اما بدون حتی یک اتم فلزی در ساختارشان، چنین رفتاری در یک مولکول بی‌سابقه است.

سنسورهای نانو برای تشخیص مشکلات کابل‌های زیرزمینی از سنسورهای نانو می‌توان برای شبکه‌های کابلی هوشمند استفاده کرد تا مشکلات را قبل از وقوع تشخیص دهد. اندازه‌گیری تخریب کابل‌های زیرزمینی یا پایین آوردن قیمت سنسورهای شیمیایی که قبلاً برای ترانسفورماتورها در دسترس بود از فواید این تکنولوژی است (۱۳).

نانوتکنولوژی احتمالاً برای تحقق کامل شبکه هوشمند در آینده نزدیک ضروری خواهد بود. بهره‌وری انرژی روشی برای مدیریت و محدود کردن رشد مصرف انرژی است. این یکی از ساده‌ترین و به صرفه‌ترین راه‌های مقابله با تغییرات آب و هوا، بهبود رقابت در مشاغل و کاهش هزینه‌های انرژی برای مصرف‌کنندگان است. سنسورهای مبتنی بر نانو مواد، دارای حساسیت و ویژگی‌های خاصی نسبت به سنسورهای سایر مواد صنعتی هستند (۱۲).

نانو روکش به ماده‌ای گفته می‌شود که در مقیاس نانو ساخته شده و به عنوان پوشاننده یا محافظ برای دیگر مواد به کار می‌رود. زمینه‌هایی که در آن از نانو روکش‌ها استفاده می‌شود شامل الکترونیک، مواد غذایی و وسایل نقلیه و ... می‌باشد.

از فناوری نانو برای تکثیر اثر نیلوفر آبی بر روی روکش‌های کابل برای کاهش آلودگی و تماس با کابل برای افزایش طول عمر و عملکرد استفاده می‌شود و از چسبندگی مواد مضر مانند روغن، گریس، رنگ و لجن جلوگیری می‌کند. این سطح باعث می‌شود قطرات آب و ذرات خاکی با تماس محدودی مواجه شوند و از چسبندگی جلوگیری می‌کنند. قطرات آب کروی از بین می‌روند و هرگونه ذرات خاک به هم متصل می‌شوند و توسط روکش جذب نمی‌شوند.

معایب و مزایا

الف) معایب:

با افزایش تکنولوژی نانو آلودگی‌های محیطی ناشی از آن نیز افزایش می‌یابد. بسیاری از بیماری‌هایی که این مواد ایجاد می‌کنند، سلامت بسیاری از موجودات زنده را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد.

همچنین با توجه به اثر فناوری بر علم و تکنولوژی بسیاری از مشاغل کاهش می‌یابند و نیاز به کارگر کم می‌شود.

ارائه چنین محصولات نوینی منجر به کاهش ارزش نفت و الماس می‌شود. کاهش ارزش موادی که برای مدت طولانی تعیین کننده اقتصاد هستند؛ همه مشاغل را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

با وجود تاثیرات مطلوب نانو در زمینه الکترونیته، کاربرد مواد خام مرغوب و کاربرد آن در تکنولوژی‌های قدیمی به سرمایه‌گذاری اولیه بالایی نیاز دارد.

سلامت انسان به شدت تحت تاثیر تشعشعات هسته‌ای و گازهای خطرناک است. هر فناوری که با کمک به تجهیزات جنگی بتواند آن‌ها را مجهزتر کند، اثرات منفی را در جنگ افزایش می‌دهد. مانند بمب اتم و یا حادثه چرنوبیل که اثر آن تا چند قرن باقی خواهد ماند.

الف) مزایا:

ایجاد تغییرات عمده در کالاهای برقی، اغلب وسایل الکترونیکی که امروزه استفاده می‌شوند، با تکنولوژی نانو تکامل یافته‌اند. تولید چیپ‌های چند سانتی متری که حاوی هزاران داده است، از مزایای ترکیب دو علم برق و نانو است.

برخلاف چند دهه گذشته که از ابر رایانه‌های برای محاسبات استفاده می‌شد؛ ما امروزه از تلفن‌های همراه هوشمند استفاده می‌کنیم.

ایجاد پیشرفت در زمینه‌های پزشکی، یکی از مثال‌های کاربرد این شاخه امکان شناسایی بیماری‌های مختلف در زمان بسیار کوتاه است.

سرعت زیاد در خدمات درمانی، هزینه‌های پائین‌تر، درمان دقیق و اختصاصی‌تر بویژه در دارو رسانی توانسته فناوری نانو را به عنوان فناوری برتر در ابتدای قرن حاضر تبدیل کند. این امر باعث شده کشورهای مختلف با سرعتی هر چه تمام‌تر در این حوزه قدم گذاشته و به پیش بروند. با توجه به اینکه این تکنولوژی در مراحل ابتدائی گسترش و شکوفائی است لذا، لازم است دست‌اندرکاران امر سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی در کشور جهت گیری‌های توسعه‌ای در این زمینه را جدی تر در نظر بگیرند.

منابع

- [1] Buzea, C., Pacheco, I. I., Robbie, K., 2007, Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity. *Biointerphases*, 2(4), MR17–MR71.
- [2] Drexler, K. E., 1989, *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation*. John Wiley & Sons, New York, NY.
- [3] Kelly, D. J., 1998, The physiology and metabolism of the human gastric pathogen *Helicobacter pylori*. *Adv. Microb. Physiol*, 40, 137-189.
- [4] W. Ahmad, W., Kalra, D., 2020, Green synthesis, characterization and anti microbial activities of ZnO nanoparticles using *Euphorbia hirta* leaf extract. *Journal of King Saud University Science*, 32(4), 2358–2364.
- [5] Jamiati, M., 2020, Kinetic Energy Distribution for Neutron-Induced Fission of Thorium Isotopes. *Physics of Atomic Nuclei*, 83, 859–865.
- [6] Pourmoslemi, S., Seif, F., Mahjub, R., 2021, Enhanced antibacterial activity of Ag-doped ZnS nanoparticles synthesised by a microwave-assisted polyol method. *J. Adv. Sci. Materials Research Innovations*, 25(7), 399–403.
- [7] Jamiati, M., 2021, Modeling of Maximum Solar Power Tracking by Genetic Algorithm Method. *Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment*, 12(2), 118–124.
- [8] Raj S., Jose S., Sumod U.S., Sabitha M., 2012, Nanotechnology in cosmetics: Opportunities and challenges. *J. Pharm. Bioallied Sci.*, 4, 186–193.

حفظ و تولید انرژی، بسیاری از نانو سیم‌ها و نانولوله‌ها می‌توانند به ایزوله کردن و ذخیره انرژی کمک کنند (۹).

آینده نانو تکنولوژی

به نظر می‌رسد اولین حلقه‌های علم در حال ظهور است و آیه شریفه قرآن که در آن به طور صریح و آشکار خلقت را مسخر انسان قرار داده است در حال عملی شدن است و بعد از انقلاب نانو که یک انقلاب فرا صنعتی است صورت می‌گیرد سفر به ناشاخته‌های فضا و روشن شدن تاریکی‌های دنیای بیرون کشف و ساختن قوانین جدید درون سلولی و ملکوتی و اتم تغییر آن‌ها، غالب شدن بر بسیاری از بیمارها، و جوان نگه داشتن سلول‌ها عمرهای بسیار طولانی که قبلاً هم آرزوی بشر بوده است در حال تحقق است (۱۲).

با این حال، این علم حتی پتانسیل ایجاد مزایای مهمی مانند بهبود سلامت، استفاده بیش‌تر از منابع طبیعی و کاهش آلودگی زیست‌محیطی را دارد و این به طور مؤثری جهان را به گونه‌ای بهبود می‌بخشد که ما حتی نمی‌توانیم تصور کنیم (۹).

دنیای آینده، دنیای قابل پیش‌بینی فعلی افکار نیست بیاییم در این مسیر رقابت کنیم و به ملت بزرگ و اثر گذار تبدیل گردیم.

بحث و نتیجه‌گیری

مقاله‌ی فوق به بررسی نانو تکنولوژی، شیوه‌های تولید و برخی کاربردهای آن پرداخته است. این تکنولوژی نو پا به سرعت در حال رشد در زمینه‌های گوناگون علمی است و امید است با توجه به رشد این تکنولوژی در کشور شاهد کاربرد روز افزون آن به فناوری در حوزه‌های صنعت، پزشکی، کشاورزی و ... به دست متخصصان توانمند ایرانی باشیم.

- [9] 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.
- [10] Zhou, J.; Chang, Q.; Wang, Y.; Wang, J.; Meng, G., 2010, Separation of Stable Oil-Water Emulsion by the Hydrophilic Nano-Sized ZrO₂Modified Al₂O₃Microfiltration Membrane. *Sep. Purif. Technol.*, 75 (3), 243–248.
- [11] Javadian, S.; Sadrpoor, S. M., 2020, Demulsification of Water in Oil Emulsion by Surface Modified SiO₂ Nanoparticle. *J. Pet. Sci. Eng.*, 184, 106547.
- [12] Hussein, A. K., 2016, Applications of nanotechnology to improve the performance of solar collectors Recent advances and overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 767-792.
- [13] Contreras, J. E., Rodriguez, E. A., Taha-Tijerina, J., 2017, Nanotechnology applications for electrical transformers A review. *Electric Power Systems Research*, 143, 573-584.
- [14] Abdin, Z., Alim, M. A., Saidur, R., Islam, M. R., Rashmi, W., Mekhilef, S., Wadi, A., 2013, Solar energy harvesting with the application of nanotechnology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 837-852.
- [15]https://www.americanelements.com/news_10_03_07.htm.

“Research article”

Assessing the impacts of thermal stratification on water quality and strategies for and reducing cold water emissions

Nasim Mosakhani¹, Ahmad Asl Hashemi², Gholam Hossein Safari^{2, 3*}

¹Student Research Committee, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

²Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

³Health & Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

*Corresponding author: hsafari13@yahoo.com

(Received: 13 January 2025, Accepted: 6 September 2025)

Abstract

Thermal stratification is one of the critical challenges in reservoir management, arising from temperature gradients in the water column that lead to the formation of distinct layers with varying physical and chemical properties. this phenomenon significantly reduces dissolved oxygen levels in deeper water layers and contributes to several environmental issues, including the release of cold water downstream, increased concentrations of heavy metals such as iron and manganese, and the proliferation of cyanobacterial blooms. this article presents a systematic review aimed at collecting, analyzing, and comprehensively evaluating current technologies and methods for mitigating cold-water release from reservoirs caused by thermal stratification. a thorough literature search was conducted using reputable databases such as Web of Science, Scopus, Google Scholar, and specialized databases in water and environmental engineering. Relevant keywords—such as “reservoir destratification,” “cold-water release from dams,” “bubble columns,” “surface mixers,” “multi-level selective withdrawal,” and “GELI technology”—were used in both Persian and English. The study begins by reviewing natural processes of thermal stratification and destratification in reservoirs. It then assesses the impacts of stratification on water quality, including dissolved oxygen depletion, cold-water discharge, elevated heavy metal concentrations, and toxic algal growth. Subsequently, three common technical approaches for mitigating stratification and cold-water release are introduced and compared: selective withdrawal using multi-level intake structures, the use of bubble plume systems, and surface mixing devices. the findings suggest that the selection of an appropriate method depends on reservoir characteristics, management objectives, and implementation costs. among the options, bubble plume systems are often considered an effective and practical solution due to their ability to enhance oxygenation, reduce metal concentrations, and suppress algal blooms.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Thermal stratification, reservoir water quality, cold-water release, cyanobacterial blooms, selective withdrawal, bubble plume systems, surface mixers



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال شانزدهم، شماره‌ی ۶۲
تابستان ۱۴۰۴، صفحات ۳۷-۱۷

"مقاله پژوهشی"

ارزیابی اثرات پدیده لایه‌بندی حرارتی بر کیفیت آب و راهکارهای کاهش انتشار آب

سرد

ارزیابی اثرات پدیده لایه‌بندی حرارتی

نسیم موسی‌خانی^۱، احمد اصل‌هاشمی^۲، غلام حسین صفری^{۳،*}

^۱ کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

^۲ گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

^۳ مرکز تحقیقات سلامت و محیط‌زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: hsafari13@yahoo.com

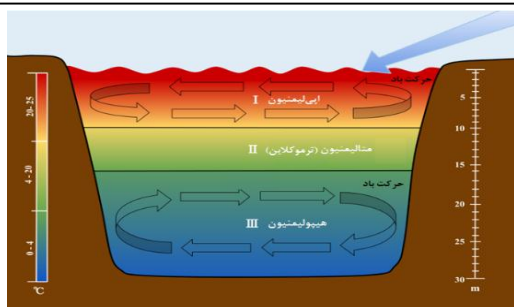
(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵)

چکیده

پدیده لایه‌بندی حرارتی یکی از چالش‌های مهم در مدیریت مخازن سدها است که به واسطه‌ی تغییرات دمایی در ستون آب، منجر به تشکیل لایه‌های جداگانه با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت می‌شود. این فرآیند نه تنها باعث کاهش شدید اکسیژن محلول در لایه‌های عمیق‌تر آب می‌گردد، بلکه منجر به بروز مشکلاتی همچون انتشار آب سرد از مخازن سدها در پایین‌دست، افزایش غلظت فلزات سنگین نظیر آهن و منگنز و شکوفایی سیانوباکتری‌ها می‌شود. این مقاله به صورت یک مطالعه مروری نظام‌مند طراحی شده است که با هدف جمع‌آوری، تحلیل و ارزیابی جامع فناوری‌ها و روش‌های موجود برای کاهش انتشار آب سرد از سد ناشی از لایه‌بندی در مخازن آب انجام شده است. جستجوی منابع علمی از طریق پایگاه‌های داده معتبر شامل Scopus، Web of Science و Google Scholar و پایگاه‌های تخصصی مهندسی آب و محیط زیست انجام شد. کلمات کلیدی مرتبط با موضوع، از جمله «لایه‌زدایی مخازن»، «انتشار آب سرد از سدها»، «ستون‌های حبابی»، «اختلاط دهنده‌های سطحی»، «برداشت انتخابی چند سطحی» و «فناوری GELI به زبان‌های فارسی و انگلیسی به کار گرفته شدند. در این مقاله، ابتدا فرآیندهای طبیعی لایه‌بندی و لایه‌زدایی در مخازن بررسی شده است. سپس تأثیرات لایه‌بندی بر کیفیت آب از جنبه‌های مختلف، از جمله کاهش اکسیژن محلول، انتشار آب سرد از سدها، افزایش فلزات سنگین، و رشد جلبک‌های سمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه، سه راهکار فنی متداول برای کاهش اثرات لایه‌بندی و انتشار آب سرد از مخازن سد شامل: برداشت انتخابی با استفاده از سازه‌های برداشت چندسطحی، استفاده از ستون‌های حباب‌دار، و بهره‌گیری از اختلاط‌دهنده‌های سطحی معرفی و مقایسه شده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب راهکار مناسب باید با توجه به ویژگی‌های مخزن، اهداف مدیریتی، و هزینه‌های اجرایی صورت گیرد. لایه‌زدایی با ستون‌های حباب‌دار، به دلیل توانایی در بهبود اکسیژن، کاهش فلزات و مهار رشد جلبک‌ها، در اغلب موارد گزینه‌ای مؤثر و کاربردی محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی: لایه‌بندی حرارتی، کیفیت آب مخازن، انتشار آب سرد، شکوفایی سیانوباکتری‌ها، برداشت انتخابی، ستون‌های حباب‌دار، اختلاط دهنده‌های سطحی

مقدمه



شکل (۱): بخش‌های مختلف یک دریاچه لایه‌بندی شده

از آنجا که دمای آب در طول ستون مخزن متفاوت است، در برخی ماه‌های سال در مخازن و دریاچه‌ها، لایه‌بندی حرارتی رخ می‌دهد. این پدیده حرارتی تحت تأثیر عوامل متعددی است و موجب کاهش میزان اکسیژن محلول در دریاچه می‌شود که به تبع آن مشکلاتی چون کاهش کیفیت آب، کاهش جمعیت ماهیان و رشد جلبک‌ها به وجود می‌آید (۴). در هنگام لایه‌بندی حرارتی، اپی‌لیمنیون حاوی اکسیژن فراوان است، متالیمنیون دمای آب را به طور چشمگیری در عمق تغییر می‌دهد و هیپولیمنیون اکسیژن کمی دارد. در لایه‌های بالا و پایین تغییرات دمایی در عمق ناچیز است. به دلیل کمبود اکسیژن در لایه زیرین، جمعیت ماهیان در آن کاهش می‌یابد. با توجه به تغییرات چگالی آب وابسته به دما، در زمان وقوع لایه‌بندی حرارتی، لایه‌بندی چگالی نیز شکل می‌گیرد. در تابستان‌های گرم و زمستان‌های بسیار سرد، لایه‌های سطحی به ترتیب گرم‌تر یا سردتر از ۴ درجه سلسیوس می‌شوند که منجر به قرارگیری لایه‌های سبک‌تر در بالا و تشکیل لایه‌بندی قوی می‌گردد که حتی با تلاطم باد نیز از بین نمی‌رود. این تغییرات دمایی باعث تغییر چگالی آب در عمق شده و در نهایت منجر به ایجاد

در دهه‌های اخیر و با آغاز قرن جدید، موضوع آب به یکی از دغدغه‌های اساسی مردم جهان، به‌ویژه ساکنان مناطق خشک مانند کشور ما، تبدیل شده است؛ به گونه‌ای که دسترسی به آب با کمیت و کیفیت مناسب به چالشی مهم بدل شده است (۱). یکی از اهداف اصلی ساخت سدها، ذخیره آب در ماه‌های پرآبی و استفاده بهینه از آن در فصول کم‌آب است. ساخت و بهره‌برداری از مخازن سدها معمولاً منجر به افزایش زمان ماند آب و ایجاد پدیده لایه‌بندی در مخزن می‌شود. لایه‌بندی آب به معنای تشکیل لایه‌هایی از جرم‌های سیال است که به دلیل اختلاف در چگالی، دما و مواد محلول یا معلق شکل می‌گیرد (۲). لایه‌بندی دریاچه‌ها به تمایل تشکیل لایه‌های حرارتی جداگانه در فصل‌های گرم گفته می‌شود. به طور معمول، دریاچه‌های لایه‌بندی‌شده سه لایه مجزا دارند: اپی‌لیمنیون^۱ (لایه گرم بالایی)، ترموکلاین^۲ یا متالیمنیون^۳ (لایه میانی با عمق متغیر در طول روز) و هیپولیمنیون (لایه سرد زیرین که تا کف دریاچه ادامه دارد) (۳). در شکل (۱) بخش‌های جداگانه یک دریاچه لایه‌بندی نشان داده شده است. از مقیاس‌ها برای مرتبط کردن هر بخش از لایه‌بندی به عمق و دمای وابسته به آن استفاده می‌شود. از فلش برای نشان دادن حرکت باد بر روی سطح آب استفاده می‌شود که آغاز گردش در اپی‌لیمنیون و هیپولیمنیون است.

¹ Epilimnion

² Metalimnion

³ Hypolimnion

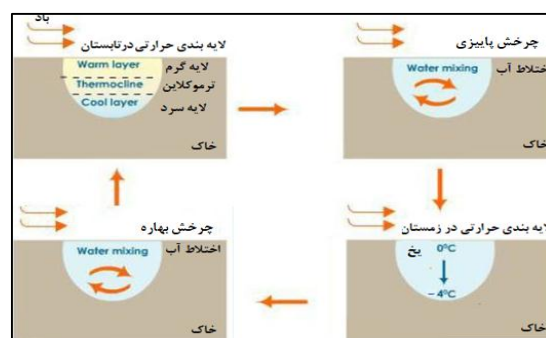
بیش‌تر اکسیژن می‌شود. کاهش غلظت اکسیژن و دمای پایین آب تخلیه‌شده از لایه زیرین ممکن است تأثیرات زیان‌باری بر مصرف‌کنندگان آب در پایین‌دست داشته باشد. شرایط بی‌هوازی، محیط بیوشیمیایی لایه زیرین را به شدت تغییر می‌دهد (۲). تولید سولفید هیدروژن (H_2S)، احیای آهن و منگنز، تولید متان و آزادسازی فسفر از رسوبات از جمله پدیده‌های شایع در این شرایط هستند. تجمع این محصولات واکنش‌های بی‌هوازی می‌تواند اثرات نامطلوبی ایجاد کند؛ سولفید هیدروژن برای آبریان سمی و منبع بوی نامطبوع است. تخلیه آب بی‌هوازی حاوی سولفید هیدروژن و آمونیاک از لایه زیرین، که در طول چرخش سالانه در کل دریاچه منتشر می‌شود، می‌تواند منجر به مرگ ماهیان شود. همچنین، حضور آهن و منگنز احیا شده موجب ایجاد طعم و بوی نامطلوب در آب شرب می‌شود. در طول چرخش‌های پاییزی و بهاری، مواد مغذی تجمع یافته در لایه زیرین، در کل حجم دریاچه پخش شده و در معرض تابش نور قرار می‌گیرند که باعث شکوفایی جلبک‌ها می‌شود (۷ و ۲).

مواد و روش‌ها

نوع مطالعه

این مقاله به صورت یک مطالعه مروری نظام‌مند طراحی شده است که با هدف جمع‌آوری، تحلیل و ارزیابی جامع فناوری‌ها و روش‌های موجود برای کاهش انتشار آب سرد از سدها ناشی از لایه‌بندی در مخازن آب انجام شده است. این نوع مطالعه با گردآوری و بررسی نظام‌مند مطالعات پیشین، به شناسایی نقاط قوت، ضعف و خلأهای علمی در این حوزه می‌پردازد و چارچوبی کلی برای درک بهتر و کاربرد عملی فناوری‌ها ارائه می‌دهد.

لایه‌بندی کیفیت آب می‌شود. برای مثال، در تابستان‌ها، لایه‌بندی حرارتی می‌تواند موجب کاهش شدید اکسیژن محلول در لایه‌های زیرین مخزن شده و به مرگ آبریان و افت شدید کیفیت آب منجر شود (۵). لایه‌بندی حرارتی در تابستان و زمستان و چرخش بهاره و پاییزی مخازن آب در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): لایه‌بندی حرارتی در تابستان و زمستان و چرخش بهاره و پاییزی مخازن آب

لایه‌بندی حرارتی مانع انتقال اکسیژن از منابع خارجی به داخل مخزن می‌شود و کمبود اکسیژن و ایجاد شرایط بی‌هوازی، فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی مخزن را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این شرایط، رهاسازی جریان از زیر لایه در زمان لایه‌بندی موجب آزاد شدن جریان آب سردتر نسبت به جریان پایه می‌شود. این جریان آب سرد از مخازن بالادست، به ویژه در فصل گرم تابستان، می‌تواند باعث تقویت یا حتی القای لایه‌بندی در مخازن پایین‌دست گردد (۶). به دلیل سرعت پایین انتقال جرم در لایه میانی، اکسیژن مصرف‌شده در لایه زیرین توسط فرآیندهای بیوشیمیایی جایگزین نمی‌شود. همچنین نفوذ نور به لایه زیرین بسیار محدود است، بنابراین جلبک‌های ته‌نشین شده نمی‌توانند فتوسنتز کنند و در نهایت می‌میرند؛ تجزیه این جلبک‌ها باعث کاهش

روش جستجو و گردآوری داده‌ها

جستجوی منابع علمی از طریق پایگاه‌های داده معتبر شامل Google Scholar، Scopus، Web of Science و پایگاه‌های تخصصی مهندسی آب و محیط زیست انجام شد. کلمات کلیدی مرتبط با موضوع، از جمله «لایه زدایی مخازن»، «انتشار آب سرد از سدها»، «ستون‌های حبابی»، «اختلاط دهنده‌های سطحی»، «برداشت انتخابی چند سطحی» و «فناوری GELI» به زبان‌های فارسی و انگلیسی به کار گرفته شدند. مطالعات انتخاب شده در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفتند تا تحولات جدید و پیشرفت‌های فناورانه به طور کامل پوشش داده شوند. علاوه بر مقالات علمی، گزارش‌های فنی، مستندات پروژه‌های اجرایی و منابع مروری نیز در صورت برخورداری از اعتبار و مرتبط بودن، در نظر گرفته شدند.

مقدمه‌ای بر مخازن

مخازن، سازه‌های آبی مصنوعی و بزرگی هستند که با احداث سدها و انسداد جریان طبیعی رودخانه‌ها ایجاد می‌شوند. این مخازن از نظر ویژگی‌های لیمونولوژیکی شباهت زیادی به دریاچه‌های طبیعی دارند (۸). در حالی که دریاچه‌ها معمولاً بر اساس منشأ زمین‌شناسی، وضعیت تغذیه‌ای، رژیم حرارتی یا عملکرد هیدرولوژیکی طبقه‌بندی می‌شوند (۹)، مخازن عمدتاً بر اساس اهداف بهره‌برداری آن‌ها دسته‌بندی می‌گردند (۱۰). رایج‌ترین نوع مخازن، مخازن ذخیره‌سازی هستند که برای نگهداری حجم قابل توجهی آب در طولانی‌مدت طراحی می‌شوند. اپراتورهای سد، زمان‌بندی و حجم رهاسازی آب را برای اهداف مختلفی مانند آبیاری، تولید برق‌آبی، تأمین

آب و کنترل سیلاب مدیریت می‌کنند (۱۱ و ۱۰). علاوه بر این، مخازن اغلب به عنوان مکان‌های تفریحی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند که این موضوع می‌تواند بر سیاست‌ها و پروتکل‌های مدیریت آن‌ها تأثیرگذار باشد (۱۲). وضعیت تغذیه‌ای و رژیم‌های حرارتی مخازن تحت تأثیر شرایط اقلیمی، مانند تابش خورشیدی و باد، و نیز ویژگی‌های فیزیکی مخزن مانند ظرفیت ذخیره‌سازی، مساحت سطح و عمق قرار دارد. درک فرآیندهای طبیعی لایه‌بندی حرارتی و لایه زدایی مخازن، برای کنترل و کاهش انتشار آب سرد از سدها در جریان‌های پایین‌دست از اهمیت بالایی برخوردار است (۱۳ و ۱۲).

لایه‌بندی حرارتی طبیعی مخازن

لایه‌بندی حرارتی در آب‌های بزرگ، پدیده‌ای شناخته‌شده است که بیش از پنجاه سال مورد مطالعه قرار گرفته است. این فرآیند طبیعی، ناشی از تغییرات دما و شیب چگالی عمودی در ستون آب است که تحت تأثیر عوامل محیطی خارجی و جریان‌های ورودی به مخزن شکل می‌گیرد (۱۵ و ۱۴). عواملی مانند تابش مستقیم خورشید (۱۶) و افزایش دمای هوا در فصل تابستان (۱۲) موجب گرم شدن لایه‌های سطحی و در نتیجه ایجاد آب با چگالی کم‌تر در بالای مخزن می‌شوند. لایه‌بندی به‌ویژه در مخازن عمیق اهمیت دارد، چرا که اختلاط طبیعی معمولاً نمی‌تواند بر کل عمق مخزن غلبه کند (۱۷). این پدیده باعث ایجاد مناطق مجزایی در ستون آب می‌شود که از نظر چگالی و دما با یکدیگر متفاوت هستند. این لایه‌ها به ترتیب از بالا به پایین عبارت‌اند از: اپی‌لیمنیون (لایه سطحی)، متالیمنیون (لایه میانی) و هیپولیمنیون (لایه زیرین). متالیمنیون دارای گرادیان دمایی شدید یا

منظور مقابله با اثرات لایه‌بندی انجام می‌شود که در مخازن مختلف در سطح جهان با موفقیت به کار گرفته شده‌اند (۲۱).

اثرات لایه‌بندی در مخازن

- انتشار آب سرد از سدها

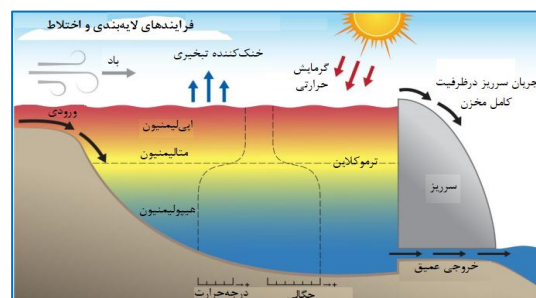
یکی از پیامدهای مهم لایه‌بندی حرارتی در مخازن، بروز پدیده‌ای به نام انتشار آب سرد از سدها است. در اغلب سدها، آب از طریق آب‌گیرهایی که در نزدیکی بستر یا کف مخزن قرار دارند، برداشت می‌شود. در مخازن لایه‌بندی‌شده، این آب عمیق‌تر به‌طور قابل‌توجهی سردتر از آب‌های سطحی و جریان‌های طبیعی پایین‌دست است، به‌ویژه هنگامی که از زیر ترموکلاین برداشت شود (شکل ۳). رهاسازی این آب سرد می‌تواند دمای رودخانه‌های پایین‌دست را تا صدها کیلومتر تحت تأثیر قرار دهد و به‌عنوان یک مشکل جدی زیست‌محیطی مطرح است. مطالعات انجام‌شده در مخازن استرالیا نشان می‌دهد که در فصل تابستان، اختلاف دمایی بین سطح و بستر می‌تواند بین ۸ تا ۱۲ درجه سلسیوس و در برخی مخازن عمیق‌تر حتی بیش از ۱۲ درجه باشد (۲۱). چنین اختلاف دمایی موجب بروز اثرات محیطی متعددی در پایین‌دست می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از (۲۱ و ۲۲):

- کاهش محسوس دمای رودخانه‌های

پایین‌دست در تابستان

کاهش دامنه نوسانات حرارتی روزانه و فصلی اختلال در افزایش طبیعی دمای آب در بهار تأخیر در رسیدن به اوج دمای تابستان تا چند هفته یا ماه افت ناگهانی و شدید دما در اثر رهاسازی‌های بزرگ برای

ترموکلاین است که آب گرم و سبک اپی‌لیمنیون را از آب سرد و سنگین هیپولیمنیون جدا می‌کند (۱۶). این لایه میانی به عنوان مانعی عمل کرده و اختلاط طبیعی در مخزن را محدود می‌سازد (۱۸). فرآیندهای لایه‌بندی و اختلاط طبیعی مخازن در شکل (۳) به‌صورت شماتیک نمایش داده شده‌اند.



شکل (۳): فرآیندهای لایه‌بندی حرارتی طبیعی و اختلاط در مخازن

لایه‌زدایی طبیعی مخازن

مخازن به صورت دوره‌ای تجربه لایه‌زدایی طبیعی یا اختلاط کامل از طریق فرآیندهای فیزیکی مختلفی را دارند. عوامل بیرونی مانند تلاطم باد و جریان‌های ورودی از حوضه آبریز یا رودخانه‌های بالادست، باعث اختلاط مکانیکی و جابجایی آب در مخزن می‌شوند (۱۹). همچنین خنک‌شدن لایه‌های سطحی در شب‌های سرد یا در فصول سرد سال، می‌تواند منجر به اختلاط همرفتی شود (۲۰). واکنش مخزن به این فرآیندهای طبیعی وابسته به ویژگی‌های فیزیکی آن (مانند عمق و مساحت) و شرایط آب و هوایی است. معمولاً مخازن عمیق‌تر نسبت به مخازن کم‌عمق، زمان بیش‌تری برای لایه‌زدایی طبیعی نیاز دارند که این امر به شدت لایه‌بندی حرارتی و حجم مخزن مرتبط است. علاوه بر فرآیندهای طبیعی، لایه‌زدایی مصنوعی نیز با استفاده از فناوری‌هایی مانند ستون‌های حباب‌دار به

اکولوژیک رودخانه‌هاست، بلکه تأثیرات آن بر تنوع زیستی، پایداری جمعیت‌های ماهی، و کارکردهای اکوسیستم پایین‌دست نیز قابل توجه است.

- کاهش اکسیژن محلول

اکسیژن محلول (DO) یکی از عناصر حیاتی در محیط‌های آبی به‌شمار می‌رود، زیرا در فرآیندهای متابولیک تمامی موجودات هوایی نقش اساسی دارد. کاهش سطح اکسیژن محلول نه تنها بر زیست‌پذیری آب تأثیر منفی دارد، بلکه بر انحلال بسیاری از ترکیبات معدنی اثر می‌گذارد که این ترکیبات می‌توانند کیفیت آب را درون مخزن و در پایین‌دست آن تهدید کنند. در مخزنی که به‌خوبی اختلاط دارند، کاهش تدریجی اکسیژن محلول در عمق معمولاً ناشی از مصرف اکسیژن در فصل مشترک رسوب-آب و در سراسر ستون آب است. با این حال، در مخزنی با اختلاط ضعیف، به‌ویژه در شرایط لایه‌بندی حرارتی، افت اکسیژن به‌شدت تشدید می‌شود. در این وضعیت، شیب چگالی در ترموکلاين مانع از نفوذ آب‌های غنی از اکسیژن سطحی به لایه‌های زیرین شده و از هوادهی مجدد ناحیه هیپولیمنیون جلوگیری می‌کند (۲۱ و ۱۳). اثر لایه‌بندی بر کیفیت آب در یک مخزن در شکل (۴) نشان داده شده است.

در فصل تماس رسوب و آب، واکنش‌های بیوژئوشیمیایی اکسیژن باقی‌مانده را مصرف کرده و شرایط بی‌هوازی (آنوکسیک) ایجاد می‌کنند. این وضعیت منجر به کاهش ناحیه قابل‌زیست برای ماهیان و سایر موجودات می‌شود و احتمال مرگ‌ومیر آن‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش رشد جلبک‌های

تأمین آب یا آبیاری یکی از بارزترین آثار این تغییرات دمایی غیرطبیعی، تأثیر بر زیست‌بوم ماهیان است. فیزیولوژی و رفتار بسیاری از گونه‌های ماهی نسبت به دمای محیط بسیار حساس است، بنابراین انتشار آب سرد از سدها می‌تواند موجب تغییر الگوی پراکنش گونه‌ها شود (۲۲). ساخت سدها می‌تواند به طور قابل توجهی محیط رودخانه پایین‌دست را، در درجه اول از طریق لایه‌بندی حرارتی و متعاقباً انتشار آب سرد تغییر می‌دهد. این تغییرات در دمای آب می‌تواند منجر به تغییر در جانوران رودخانه شود، به‌طوری‌که گونه‌های ماهیان سردآبی جایگزین گونه‌های ماهیان گرم‌آبی می‌شوند (۲۳). چرخه تولیدمثل ماهیان نیز به‌شدت به دمای آب وابسته است. مطالعات بویز^۱ و همکاران (۲۰۰۹) نشان داد که در حوضه موری-دارلینگ^۲، گونه‌های بومی ماهی دارای دوره‌های مشخص تولیدمثل هستند که با نوسانات طبیعی جریان و دمای آب هماهنگ است. انتشار آب سرد از مخازن سد می‌تواند این چرخه‌ها را مختل کرده و رشد و تولیدمثل را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار دهد (۲۴). کاهش موفقیت در جذب تخم‌ها و لاروها، و مرگ‌ومیر ناشی از شرایط نامناسب دمایی در پایین‌دست سد، از جمله پیامدهای قابل‌مشاهده انتشار آب سرد از سدها هستند. در پژوهشی دیگر، میچی^۳ و همکاران (۲۰۲۰) اثرات "شوک سرما" را بر گونه‌های ماهی بومی استرالیا بررسی کردند و نشان دادند که افت ناگهانی دما می‌تواند موجب مرگ‌ومیر فوری و تأثیرات بلندمدت بر تمام گونه‌ها شود (۲۵). بنابراین، پدیده انتشار آب سرد از سدها نه تنها یک تهدید برای کیفیت

¹ Boys

² Murray Darling Basin

³ Michie

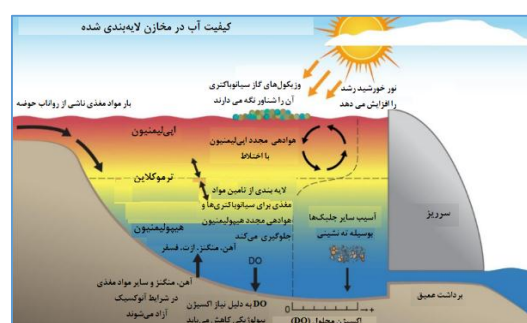
اثر منفی بگذارند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که این فلزات باعث استرس اکسیداتیو، آسیب به آبشش ماهیان، و اختلالات هماتولوژیک می‌شوند. همچنین در حوزه کشاورزی، افزایش غلظت آهن در آب آبیاری ممکن است منجر به انسداد و آسیب تجهیزات شده و بر رشد محصولات اثر منفی بگذارد (۳۱ و ۳۰ و ۲۱)

- سیانوباکتری‌ها (جلبک‌های سبز-آبی)

مخازن به‌طور ذاتی محیطی مناسب برای رشد جلبک‌ها هستند. زمان ماند طولانی و کاهش فرایندهای اختلاط به دلیل لایه‌بندی حرارتی، شرایطی ایده‌آل برای رشد بیش‌ازحد جلبک‌ها ایجاد می‌کند. در چنین شرایطی، افزایش فتوسنتز در لایه‌های سطحی و تجمع مواد مغذی در لایه‌های میانی و پایینی موجب شکوفایی جلبکی می‌شود (۳۳ و ۳۲). سیانوباکتری‌ها یا جلبک‌های سبز-آبی از جمله گونه‌های غالب در چنین محیط‌هایی هستند که نگرانی‌های زیادی از نظر سلامت آب به‌همراه دارند. این موجودات از توانایی تنظیم شناوری برخوردارند؛ به‌واسطه وجود وزیکول‌های گازی، می‌توانند در شرایط چگالی متغیر مخزن در نزدیکی سطح باقی بمانند و با افزایش دریافت نور و کاهش ته‌نشینی، نسبت به فیتوپلانکتون‌های دیگر برتری پیدا کنند (۳۴ و ۲۱).

شکوفایی سیانوباکتری‌ها و تولید سیانوتوکسین‌ها از مشکلات جهانی در مدیریت منابع آبی به‌شمار می‌رود. این سموم می‌توانند منجر به طعم و بوی ناخوشایند در آب آشامیدنی شوند و از طریق آسیب به کبد (هپاتوتوکسین‌ها)، سیستم عصبی (نوروتوکسین‌ها) و پوست (درماتوکسین‌ها) سلامت انسان را تهدید کنند (۳۵ و ۴۳). انتشار آب سدهای حاوی سیانوباکتری‌ها، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت آب پایین‌دست

سمی و صعود آب‌های فاقد اکسیژن می‌تواند تهدیدی جدی برای سلامت اکوسیستم باشد (۲۱). در شرایط آنوکسیک، رسوبات به‌منظور جبران نیاز اکسیژن بیولوژیکی، ترکیبات فلزی نظیر آهن و منگنز را احیا کرده و آن‌ها را به‌صورت محلول آزاد می‌کنند. این فرآیند همراه با رهاسازی سایر مواد مغذی مانند فسفر و نیتروژن، شرایط را برای شکوفایی جلبک‌ها، به‌ویژه سیانوباکتری‌ها، فراهم می‌کند (۲۷ و ۲۶).



شکل (۴): اثر لایه‌بندی بر کیفیت آب در یک مخزن

- آهن و منگنز

افزایش غلظت آهن (Fe) و منگنز (Mn) از دیگر پیامدهای لایه‌بندی حرارتی و شرایط بی‌هوازی در مخازن است که می‌تواند کیفیت آب را در درون مخزن و در پایین‌دست آن تحت تأثیر قرار دهد. حضور این فلزات در آب آشامیدنی موجب افزایش کدورت، تغییر رنگ و بوی نامطلوب می‌شود. اگرچه تأثیر مستقیم آن‌ها بر سلامت انسان در غلظت‌های معمولی نسبتاً محدود است، اما قرارگیری در معرض منگنز به‌ویژه در دزهای بالا ممکن است با مشکلاتی نظیر اختلالات یادگیری و عصبی مرتبط باشد.

اگرچه این فلزات در تصفیه‌خانه‌های پایین‌دست قابل حذف هستند، اما غلظت بالای آن‌ها هزینه تصفیه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد (۲۹ و ۲۸). افزون بر این، آهن و منگنز می‌توانند بر اکوسیستم رودخانه‌ها

راهکارهای مدیریت و کاهش اثرات لایه‌بندی

مدیریت اثرات منفی لایه‌بندی حرارتی در مخازن به‌عنوان یکی از چالش‌های کلیدی در بهره‌برداری پایدار از منابع آبی مطرح است. تمرکز اصلی راهبردهای مدیریتی، کاهش پیامدهای ناشی از انتشار آب سرد از سدها در آبراهه‌های پایین‌دست و بهبود کیفیت آب رهاشده از مخازن است. سه فناوری اصلی که به‌طور گسترده برای مقابله با آثار لایه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت‌اند از (۲۱):

- برداشت انتخابی^۱ از طریق دریچه‌های چندسطحی
- لایه‌زدایی مصنوعی با استفاده از سیستم‌های ستون حبابی^۲
- لایه‌زدایی مصنوعی با بهره‌گیری از همزن‌های سطحی^۳

هر سه روش می‌توانند در کاهش انتشار آب سرد از سدها و بهبود سایر پارامترهای کیفی آب مؤثر باشند، اما در عین حال دارای هزینه‌ها، محدودیت‌ها و معایب خاص خود هستند. برداشت‌های چندسطحی عمدتاً بر کنترل کیفیت جریان‌های خروجی پایین‌دست تمرکز دارند و معمولاً تأثیر محدودی بر کیفیت درون‌مخزنی دارند، در حالی که فناوری‌های لایه‌زدایی مصنوعی، با تمرکز بر داخل مخزن، به بهبود ساختار گرادیان دما و اکسیژن در تمام ستون آب کمک می‌کنند. در ادامه، سه راهکار فوق از نظر عملکرد، مزایا، محدودیت‌ها و ملاحظات اجرایی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

داشته باشد. سیانوتوکسین‌ها در آب آبیاری می‌توانند بر رشد و نمو گیاهان زراعی تأثیر بگذارند (۳۶). آب‌های آلوده به سیانوباکتری‌ها هنگام تخلیه از سدها ممکن است کیفیت آب پایین‌دست را به‌شدت کاهش دهند. این سموم در آب آبیاری نیز می‌توانند بر رشد محصولات زراعی اثر گذاشته و در بافت گیاهان یا خاک باقی بمانند که در نهایت، زنجیره غذایی انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین، مرگ‌ومیر گسترده در بین ماهیان و سایر آبزیان نیز از پیامدهای مستقیم سیانوتوکسین‌ها است؛ به‌طوری‌که تخمین زده می‌شود حدود ۷۰٪ از سیانوباکتری‌ها توانایی تولید سموم کشنده برای حیوانات و مضر برای انسان را دارن (۳۷). از نظر اقتصادی، شکوفایی سیانوباکتری‌ها هزینه‌های سنگینی را به جوامع تحمیل می‌کند، از جمله (۳۸ و ۳۹):

خسارات تفریحی (بیش از ۱ میلیارد دلار در سال در ایالات متحده)

هزینه‌های تصفیه آب (تا ۸۱۳ میلیون دلار آمریکا در سال)

تعطیلی تأسیسات تصفیه (با خسارتی بیش از ۱۳۰ میلیون یوان در دریاچه تای‌هو، چین)

هزینه‌های پایش و کنترل بار مواد مغذی در حوضه آبریز

پیش‌بینی می‌شود که تغییرات اقلیمی و گسترش استفاده از زمین اثرات سیانوباکتری‌ها را تشدید کند، از این‌رو اجرای راهبردهای کارآمد در مدیریت مخازن برای کاهش اثرات آن‌ها بر کیفیت آب بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد.

¹ Multi-Level Offtake; MLO

² Bubble Plume

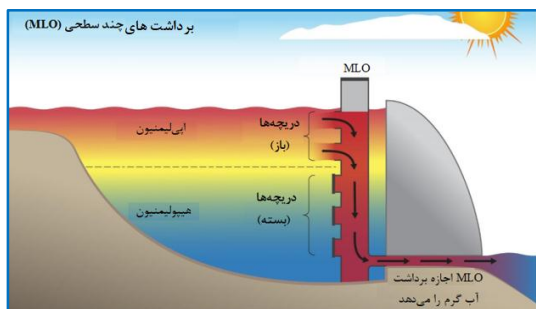
³ Surface Mixers

- لایه زدایی مخازن آب با استفاده از برداشت انتخابی از مخزن

سیستم برداشت چندسطحی یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای مدیریت کیفیت جریان خروجی از سدهاست. این سیستم‌ها امکان برداشت آب از عمق‌های مختلف مخزن را فراهم می‌کنند، به نحوی که می‌توان از برداشت آب سرد از ناحیه هیپولیمنیون جلوگیری کرد یا مانع از تخلیه سیانوباکتری‌های سطحی شد (۲۴و۴۰).

اگرچه برداشت انتخابی بیش‌تر برای سدهایی که پیش‌تر به تجهیزات چندسطحی مجهز شده‌اند

قابل‌اجراست، اما مقاوم‌سازی سازه‌های قدیمی نیز امکان‌پذیر است، هرچند با هزینه بالا همراه است (۴۲-۴۰). نمونه‌ای از نحوه عملکرد این روش در شکل (۵) و مزایا و معایب آن در جدول (۱) ارائه شده‌اند.



شکل (۵): استفاده از برداشت‌های چند سطحی در مخازن

جدول (۱): مزایا و معایب برداشت‌های چند سطحی (۴۳-۴۰ و ۲۴ و ۱۹)

مزایا	معایب
برداشت انتخابی از آب‌های گرم بالای ترموکلاین می‌تواند انتشار آب سرد از سد را به محیط پایین‌دست کاهش دهد.	مقاوم‌سازی یک سد با MLO به‌طور قابل‌توجهی گران‌تر از سایر استراتژی‌های جایگزین است. به همین دلیل، معمولاً به‌عنوان یک گزینه پرهزینه برای کاهش انتشار آب سرد از سدها تلقی می‌شود.
می‌توان از برداشت انتخابی برای جلوگیری از آب هیپولیمنیون بی‌کیفیت استفاده کرد.	برداشت‌های بزرگ‌تر می‌توانند منجر به ورود و خروج آب‌های ناخواسته شود که ممکن است مزایای MLO را کاهش دهد.
برداشت انتخابی می‌تواند برای جلوگیری از تخلیه سیانوباکتری‌های سمی به محیط پایین‌دست، با برداشت از آب‌های زیر سطح استفاده شود.	با توجه به اینکه هر نقطه برداشت به‌سرعت جریان خاصی محدود می‌شود، حجم برداشت ممکن است توسط دما و الزامات کیفیت آب محدود شود. زمان و نیروی کار برای جابجایی دریچه‌ها برای تنظیم تغییرات در ساختار لایه‌بندی و سطوح مخزن موردنیاز است. ممکن است برای تنظیم نیاز به یک روز کارگر داشته باشد.
برداشت‌های چند سطحی از نظر تئوری می‌توانند به‌عنوان وسیله‌ای برای بازیابی جریان‌های محیطی مورد استفاده قرار گیرند.	بسته به عمق تخلیه ممکن است تعمیر و نگهداری پیچیده و سخت باشد.
برداشت عمیق انتخابی می‌تواند برای افزایش اختلاط عمودی استفاده شود که ممکن است کیفیت کلی آب در مخزن را بهبود بخشد.	برداشت آب از لایه‌های خاص در یک مخزن ممکن است آب‌های ایده آل برای زندگی ماهی‌ها را تخلیه کند و منجر به کشتن ماهی‌ها شود.
هزینه عملیاتی کمتر از سایر گزینه‌ها	

- هزینه‌ها

افزودن سامانه برداشت چندسطحی به سدها اغلب پرهزینه‌ترین گزینه در میان روش‌های مدیریت لایه‌بندی محسوب می‌شود. عمده هزینه‌ها مربوط به سرمایه اولیه بوده و بسته به اندازه مخزن، نیاز به

غواصان بیش‌تر و تجهیزات پیشرفته‌تر دارد. هزینه‌های بهره‌برداری شامل نیروی انسانی، باز و بسته کردن شیرها در سطوح مختلف، و نگهداری دوره‌ای است که نسبت به هزینه سرمایه‌گذاری ناچیز تلقی می‌شود (۴۴و۴۲و۴۰).

ملاحظات طراحی و بهره‌برداری

طراحی مؤثر سیستم برداشت چندسطحی نیازمند درک دقیق از ویژگی‌های فیزیکی مخزن، شدت لایه‌بندی، حجم جریان خروجی و کیفیت مطلوب آب در پایین‌دست است (شکل ۶). ملاحظات کلیدی در این زمینه عبارت‌اند از:

- برداشت از بالای ترموکلاین می‌تواند در کاهش انتشار آب سرد از سدها و جلوگیری از رهاسازی آب با اکسیژن محلول پایین و غلظت بالای آهن و منگنز مؤثر باشد (۲۱).

- در حضور سیانوباکتری‌های سمی در لایه سطحی، برداشت چندسطحی ممکن است اثربخشی خود را در کاهش آلودگی از دست بدهد (۴۱).

- سطح پایین مخزن یا لایه‌بندی شدید می‌تواند موجب محدود شدن گزینه‌های برداشت مؤثر شود، به‌ویژه زمانی که تنها برخی از دریچه‌ها فعال باقی می‌مانند و کیفیت یا حجم جریان خروجی را به خطر می‌اندازند (۴۵ و ۴۱).

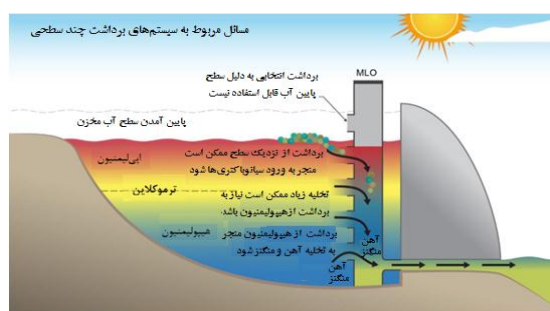
- برداشت بیش از حد ممکن است منجر به بالا آمدن ناخواسته لایه‌های بی‌کیفیت و رهاسازی جلبک‌های سمی یا فلزات سنگین به محیط پایین‌دست شود (۲۴).

- هزینه اولیه نصب یک سیستم برداشت چندسطحی بسیار بالاست، اما هزینه‌های بهره‌برداری معمولاً پایین‌تر از سایر فناوری‌های لایه‌زدایی است و دربرگیرنده نگهداری ساده و عمر مفید بالاست (۲۱).

- اتوماسیون فرآیند برداشت می‌تواند بهره‌وری سیستم را افزایش داده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد، اگرچه ممکن است هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را افزایش دهد.

- این فناوری بیش‌تر بر خروجی پایین‌دست تمرکز دارد و تأثیر مستقیم چندانی بر بهبود کیفیت درون‌مخزنی ندارد. برداشت آب با کیفیت بالا از مخزن ممکن است شرایط زیستی برای گونه‌های آبی در داخل مخزن را تضعیف کند (۴۶).

- برخی طراحی‌ها ممکن است با هدف افزایش اختلاط عمودی در مخزن، برداشت عمیق‌تری را پیشنهاد دهند، ولی ممکن است این اقدام با اهداف کیفی خروجی مانند دمای خاص یا کاهش آلاینده‌ها در تضاد باشد (۴۳ و ۱۹).



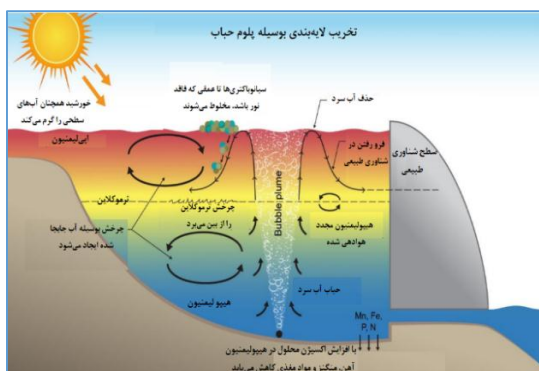
شکل ۶: مسائل بالقوه‌ای که باید در طراحی سیستم‌های

برداشت چند سطحی در نظر گرفته شود

- لایه‌زدایی مخازن آب با استفاده از ستون‌های حباب‌دار

لایه‌زدایی مصنوعی یکی از راهکارهای رایج و مؤثر برای کاهش اثرات لایه‌بندی حرارتی در مخازن آب به شمار می‌رود. در این میان، استفاده از ستون‌های حباب‌دار به دلیل هزینه پایین، عملکرد مناسب و سادگی نصب، به‌عنوان یکی از رایج‌ترین فناوری‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (۴۷ و ۴۰). این سیستم در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است و شامل پمپاژ هوای فشرده از طریق شبکه لوله‌ای به دیفیوزرهایی است که در اعماق مخزن نصب می‌شوند. حباب‌های هوا از عمق به سطح صعود کرده و در این فرآیند، آب سرد هیپولیمنیون را با آب‌های سطحی گرم‌تر ترکیب

نظیر حجم مخزن، نرخ جریان هوا، موقعیت دیفیوزرها، عمق نصب و مدت زمان بهره‌برداری، بر کارایی سیستم و هزینه‌های آن اثرگذارند. بازده مکانیکی این سیستم‌ها معمولاً پایین بوده و به‌ندرت از ۱۵ درصد فراتر می‌رود (۲۱).



شکل (۷): لایه زدایی مخازن با استفاده از ستون حباب‌دار

می‌کنند، در نتیجه ساختار گرادیان چگالی شکسته و لایه‌بندی حرارتی تضعیف می‌شود (۲۱).

تفاوت میان سیستم‌های لایه‌زدایی و سیستم‌های هوادهی حائز اهمیت است؛ چرا که سیستم‌های هوادهی هیپولیمتیک با هدف تأمین اکسیژن برای هیپولیمنیون طراحی شده‌اند و تأثیری بر لایه‌بندی حرارتی ندارند (۴۳). مزایا و معایب این روش در جدول (۲) آمده است.

هزینه‌ها

در مقایسه با سایر روش‌ها، لایه‌زدایی با ستون‌های حباب‌دار از نظر هزینه سرمایه اولیه مقرون‌به‌صرفه‌تر است، اما مصرف برق بالا برای راه‌اندازی کمپرسورها می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را افزایش دهد. عواملی

جدول (۲): مزایا و معایب لایه زدایی مصنوعی با استفاده از ستون‌های حباب‌دار (۵۰-۴۷، ۴۰، ۴۳، ۳۴، ۱۲)

معایب	مزایا
گردش آب‌های بدون اکسیژن و غنی از مواد مغذی به لایه‌های بالایی یک مخزن می‌تواند افزایش سیانوباکتری‌ها و شکوفه‌های جلبکی را با فراهم کردن مواد مغذی برای رشد آن‌ها تسهیل کند.	با مخلوط کردن فیزیکی آب‌های سطحی اشباع‌شده در کف مخزن، اکسیژن را به آب‌های هیپولیمنیون بدون اکسیژن بازگردانید.
سیانوباکتری‌های سمی ممکن است در عمق خروجی مخلوط شوند که در غیر این صورت از آن جلوگیری می‌کند و منجر به تخلیه جلبک‌های سمی در پایین‌دست می‌شود.	مه‌ار آزاد شدن آهن، منگنز و سایر مواد مغذی از رسوبات با بازگرداندن اکسیژن به آب‌های هیپولیمنیون.
اختلاط متناوب یا ناکافی می‌تواند منجر به شرایط مطلوب برای رشد سیانوباکتری شود.	می‌تواند یک روش مؤثر برای کنترل رشد سیانوباکتری باشد. اختلاط در ستون آب، مزیت شناوری سیانوباکتری‌ها را از بین می‌برد و با انتقال جلبک‌ها به اعماق کم‌نور، سرعت رشد را کاهش می‌دهد.
هزینه‌های عملیاتی برای مخازن بزرگ‌تر و عمیق‌تر به‌طور قابل‌توجهی به دلیل حجم آب موردنیاز برای لایه زدایی افزایش می‌یابد.	لایه زدایی با استفاده از ستون حباب‌دار به کاهش pH آب مخزن نسبت داده می‌شود که باعث افزایش رشد جلبک سبز می‌شود که در مقایسه با سیانوباکتری‌ها مطلوب است.
ممکن است محدودیت‌هایی برای مخازن بسیار بزرگ بر اساس توان موجود برای سایتی که سیستم در آن نصب‌شده است وجود داشته باشد.	ثابت‌شده است که در توزیع مجدد دما در سرتاسر ستون آب، افزایش دمای آب عمیق در مخازن و کاهش انتشار آب سرد از سدها به دلیل خروج در آبگیری‌های عمیق مؤثر است.
تعمیر و نگهداری سیستم می‌تواند مشکل باشد، زیرا اکثر شبکه لوله‌کشی معمولاً نزدیک بستر مخزن متصل می‌شود.	به‌عنوان یک جایگزین کم‌هزینه برای مقاوم‌سازی MLO، بر اساس سرمایه‌گذاری اولیه تلقی می‌شود. با این حال هزینه عملیاتی باید در این مقایسه‌ها در نظر گرفته شود.

لایه زدایی می‌تواند برافزایش بودجه گرمایی مخزن، با مخلوط کردن آب‌های سرد هیپولیمینون به سطح تأثیر داشته باشد. این امر می‌تواند کارایی کلی سیستم را در گرم کردن مخزن و کاهش انتشار آب سرد از سدها افزایش دهد.	خرابی یا انسداد خط ممکن است برای رفع مشکل سخت باشد. لایه‌بندی آب می‌تواند به سرعت دوباره برقرار شود و کیفیت آب ممکن است به‌طور قابل توجهی بدتر حالت اولیه شود.
	لایه زدایی سریع می‌تواند منجر به کاهش اکسیژن به دلیل اختلاط آب‌های هیپولیمتیک و رسوبات BOD بالا شود. این می‌تواند منجر به کشتار ماهی شود

- ملاحظات طراحی و بهره‌برداری

- لایه‌زدایی باید پیش از آغاز لایه‌بندی آغاز شود تا از هزینه‌های بالای شکست ساختار لایه‌بندی قوی اجتناب گردد (۲۱ و ۵۲).

- بهره‌گیری از کمپرسورهای سرعت متغیر (VSD)^۱ می‌تواند در بهینه‌سازی عملکرد سیستم مؤثر باشد (۵۳).

- استفاده متناوب از سیستم در برخی شرایط ممکن است اثربخش باشد، اما می‌تواند به افزایش سیانوباکتری‌ها منجر شود (۲۱ و ۳۴).

- به‌کارگیری چرخه‌های عملیاتی متنوع (پیوسته و متناوب) برای مقابله با سازگاری سیانوباکتری‌ها با شرایط محیطی پیشنهاد می‌شود (۲۱).

- شرایط اقلیمی و تغییرات سطح آب باید در طراحی لحاظ گردد (۱۹).

- استفاده از انرژی خورشیدی برای مخازن دورافتاده می‌تواند گزینه‌ای اقتصادی باشد (۲۱).

- تعمیر و نگهداری لوله‌های مستغرق دشوار است و باید از پیش برای آن برنامه‌ریزی شود (۲۱).

طراحی، نصب، بهره‌برداری و هزینه این سیستم‌ها به عوامل متعددی از جمله اندازه مخزن، نوع مخزن و اهداف موردنظر از لایه زدایی مرتبط است. یک نمای کلی از مسائل بالقوه مرتبط با سیستم‌های ستون حباب مورد استفاده برای لایه زدایی حرارتی در مخازن در شکل (۸) نشان داده شده است. نکات کلیدی در طراحی و بهره‌برداری از این سیستم‌ها عبارت‌اند از:

- گرم شدن هیپولیمینون ممکن است به کاهش انتشار آب سرد از سدها کمک کند، اما موجب افزایش تقاضای اکسیژن و در نتیجه افت DO در کل ستون آب می‌شود (۲۱ و ۴۰).

- در مخازن کوچک، سیستم‌های حباب‌دار اثربخش‌تر هستند ولی احتمال شکوفایی سیانوباکتری‌ها وجود دارد؛ در حالی که در مخازن بزرگ، اثربخشی در کنترل جلبک‌ها بیش‌تر است (۲۱).

- کنترل سیانوباکتری‌ها در مخازن کم‌عمق با این سیستم دشوار است (۲۱ و ۴۰).

- قرارگیری دیفیوزرها بسیار نزدیک به بستر می‌تواند موجب آشفته‌گی رسوبات و افزایش کدورت شود. فاصله حداقل یک متری توصیه می‌شود (۲۲).

^۱ Variable Speed Drive

- ملاحظات طراحی و بهره‌برداری

موارد قابل توجه در بهره‌برداری از اختلاط‌دهنده‌های سطحی شامل موارد زیر است:

اثربخشی این سیستم‌ها در مخازن کوچک یا عمیق محدود است (۵۵).

استفاده از لوله مکش برای هدایت جریان به عمق، به‌ویژه در مخازن بزرگ، ضروری است (۲۱).

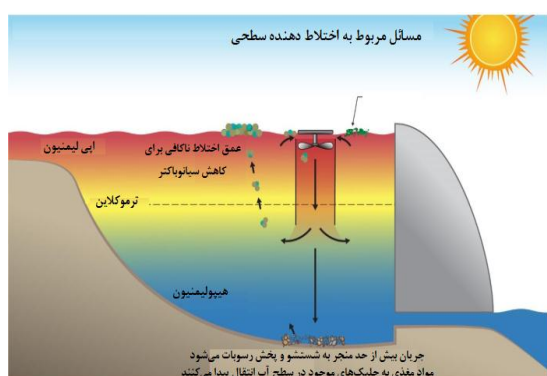
نزدیکی بیش از حد جریان به بستر موجب افزایش کدورت و کاهش کیفیت آب می‌شود (۲۱).

تأثیر این سیستم‌ها عمدتاً موضعی است و برای مقیاس‌های بزرگ اثربخشی کم‌تری دارند (۲۱).

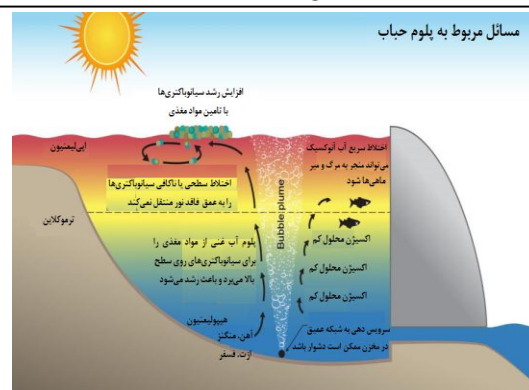
نوسانات سطح آب و بارگذاری موجی باید در طراحی لحاظ شوند (۲۱).

در مکان‌های عمومی، رعایت ایمنی کاربران و محافظت از تجهیزات اهمیت دارد (۲۱).

این سیستم به‌عنوان راهکار مستقل برای مخازن بزرگ توصیه نمی‌شود، اما می‌تواند در ترکیب با ستون‌های حباب‌دار به ارتقاء عملکرد مدیریت لایه‌بندی کمک کند (۲۱).



شکل (۹): مسائل بالقوه‌ای که باید در طراحی اختلاط دهنده سطحی در نظر گرفته



شکل (۸): مسائل بالقوه‌ای که باید در طراحی ستون حباب در نظر گرفته

- لایه زدایی مخازن آب با استفاده از اختلاط دهنده

سطحی

روش دیگر لایه‌زدایی، استفاده از اختلاط‌دهنده‌هایی است که در نزدیکی سطح مخزن نصب می‌شوند. این سیستم‌ها معمولاً شامل پروانه‌هایی هستند که آب را به عمق پرتاب می‌کنند و موجب اختلاط لایه‌های بالایی با لایه‌های پایینی می‌شوند. شکل (۹) سازوکار این سیستم را نشان می‌دهد (۴۸ و ۲۱). این اختلاط موضعی موجب برهم‌زدن ساختار گرادیان حرارتی در محدوده اطراف دستگاه می‌شود.

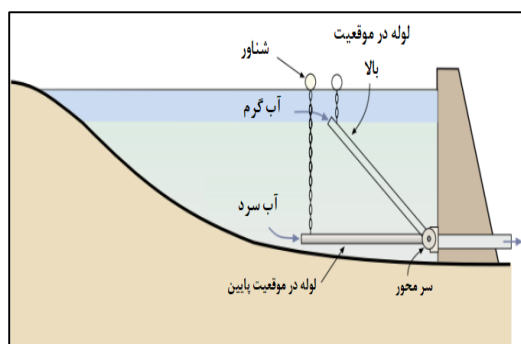
(۲۱ و ۵۴). جدول (۳) مزایا و معایب اختلاط دهنده‌های سطحی را برای کاهش انتشار آب سرد از سدها و سایر مسائل کیفیت آب نشان می‌دهد.

- هزینه‌ها

در مقایسه با ستون‌های حباب‌دار، این روش به دلیل مصرف انرژی کم‌تر و راندمان مکانیکی بالاتر، کم‌هزینه‌تر تلقی می‌شود (۲۱).

جدول (۳): مزایا و معایب لایه زدایی لایه‌بندی مصنوعی با استفاده از اختلاط دهنده سطحی (۵۵ و ۲۱)

مزایا	معایب
یک روش مؤثر برای لایه زدایی محلی است. بسته به هدف سیستم، یک اختلاط دهنده سطحی ممکن است برای مخلوط کردن آب در اطراف یک خروجی (برداشت) کافی باشد.	جت‌هایی که در نزدیکی بستر مخزن نفوذ می‌کنند ممکن است رسوبات کف را فرسایش داده و مجدداً معلق کنند.
با توجه به اینکه بیشتر این سیستم در سطح مخزن قابل دسترسی است، احتمالاً تعمیر و نگهداری سیستم به‌طور قابل توجهی آسان‌تر از گزینه‌های جایگزین خواهد بود.	می‌تواند منجر به سلول‌های چرخشی موضعی شود و بنابراین برای لایه زدایی کل مخزن بی‌اثر باشد.
لوله‌های مکشی اجازه اختلاط را تا عمق دلخواه می‌دهند که می‌تواند برای کنترل سیانوباکتری‌ها مفید باشد. مخلوط کردن جلبک‌های سمی در یک عمق خاص می‌تواند قرار گرفتن در معرض نور را محدود کرده و رشد را مهار کند.	اثرات موضعی ممکن است منجر به اثرات منفی در سایر قسمت‌های مخزن به‌عنوان مثال در تأمین مواد مغذی برای جلبک‌های سمی گردد
	جت‌های محصور نشده از پمپ‌های سطحی بدون لوله کشش ممکن است به دلیل از دست رفتن انرژی جنبشی از طریق تلاطم ایجادشده در نتیجه حباب شدن آب اطراف، مؤثر نباشند.
	مدل‌سازی مخازن خاص نشان داده است که پمپ‌های سطحی ممکن است هیچ سودی برای کنترل جلبک در مقایسه با ستون‌های حباب‌دار نداشته باشند
	اثر منفی سرکوب گونه‌های مطلوب جلبک و همچنین سیانوباکتری‌ها



شکل (۱۰): آبگیرهای شناور

گزینه‌های دیگر لایه زدایی مخازن آب

- آبگیرهای شناور^۱

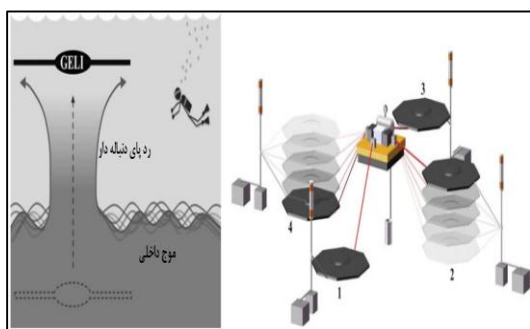
همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، آبگیرهای شناور (ترانسیون) از لوله‌های خروجی لولایی بهره می‌برند که امکان برداشت آب از عمق‌های مختلف مخزن را فراهم می‌کند. با این حال، قطر محدود این لوله‌ها ظرفیت تخلیه سیستم را محدود می‌کند؛ بنابراین، این آبگیرها برای مخازن ذخیره آب آبیاری مناسب نیستند. همچنین کاربرد آنها در مخازن عمیق به دلیل محدودیت طول لوله (معمولاً ۲۵ تا ۳۰ متر) محدود می‌شود (۲۱).

- مانع معلق (غشای جداکننده)^۲

مانع معلق ساخته شده از پلیمرهای مقاوم می‌تواند به صورت معلق یا غوطه‌ور در اطراف سد قرار گیرد تا از انتشار آب سرد از سدها جلوگیری کند. این مانع نفوذناپذیر به آب، جریان‌های آب در زمان رهاسازی‌های پایین‌دست را به روی یا زیر خود

² Suspended curtain¹ Floating intakes

که به منظور کاهش مصرف انرژی ستون‌های حبایی مرسوم طراحی شده است. این سیستم شامل یک دیسک بزرگ و مسطح است که به صورت عمودی در ستون آب حرکت می‌کند و آب سرد را همراه خود می‌کشد. هوای فشرده توسط کمپرسوری ساحلی به کیسه هوایی متصل به دیسک فرستاده می‌شود و باعث شناوری آن می‌گردد. سپس هوا در سطح آزاد شده و دیسک به کف مخزن بازمی‌گردد و آب گرم سطحی را همراه خود به پایین می‌برد [۵۸، ۵۹]. شکل (۱۲) این فناوری را نمایش می‌دهد.

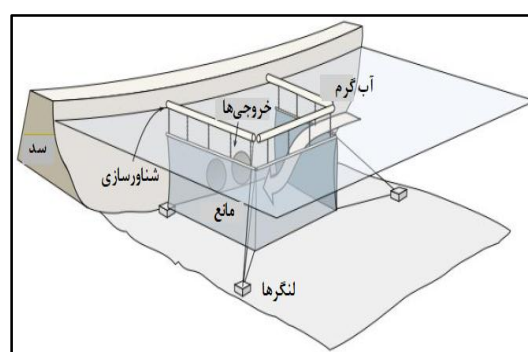


شکل (۱۲): فناوری لایه زدایی از طریق GELI

نتیجه‌گیری

انتشار آب سرد از سدها یکی از چالش‌های مهم مدیریت مخازن و سدهاست. علاوه بر هزینه‌های بالای فناوری‌های رایج کاهش آلودگی، لایه‌بندی در مخازن باعث بروز مشکلات کیفی متعددی در آب مخزن و پایین‌دست می‌شود که کارایی این فناوری‌ها را محدود می‌کند. در این مطالعه، سه استراتژی رایج کاهش انتشار آب سرد از سدها بررسی شد: برداشت انتخابی از طریق ساختار چند سطحی، لایه زدایی مصنوعی با ستون‌های حبایی و اختلاط دهنده‌های سطحی مکانیکی. مزایا، معایب و نکات طراحی و اجرایی هر

هدایت می‌کند (۲۱). با لنگر انداختن این مانع از کف مخزن به سمت بالا، آب گرم سطحی به سمت خروجی‌ها هدایت شده و از انتشار آب سرد از سدها پایین‌دست کاسته می‌شود. برعکس، مانع ممکن است از کف مخزن آویزان شود و با کشیده شدن به سمت سطح، از انتشار جلبک‌های سمی سطحی به پایین‌دست جلوگیری کند (۵۶ و ۵۷). شکل (۱۱) نمونه‌ای از مانع معلق یا غوطه‌ور را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): مانع غوطه‌ور/ معلق

- حوضچه آرامش^۱

حوضچه‌های آرامش با هدف کاهش انتشار آب سرد از سدها طراحی شده‌اند تا آب رهاشده قبل از تخلیه، به دمای مطلوب برسد. آب در یک حوضچه بزرگ و کم‌عمق جمع شده و تا رسیدن به تعادل حرارتی نگه داشته می‌شود، سپس تخلیه می‌گردد. محدودیت اصلی این روش، حجم رهاسازی در مخزن است، زیرا رهاسازی‌های بزرگ نیازمند حوضچه‌هایی با ظرفیت بسیار زیاد و غیرعملی هستند [۲۱].

- لایه زدایی مصنوعی با فناوری GELI^۲

فناوری برگرداننده دریاچه حباب تدریجی (GELI) نمونه‌ای نوین از لایه زدایی مصنوعی است

¹ Stilling basin

² Gradual Entrainment Lake Inverter

روش به طور خلاصه ارائه شده و همچنین تأثیرات لایه‌بندی بر کیفیت آب از جمله انتشار آب سرد از سدها، کاهش اکسیژن محلول، افزایش آهن و منگنز، و شکوفایی سیانوباکتری‌ها بررسی شده است.

اختلاط دهنده‌های سطحی به دلیل تأثیر محدود بر کل شرایط مخزن و پایین‌دست، کم‌اثرترین روش لایه زدایی حرارتی محسوب می‌شوند. این دستگاه‌ها معمولاً اثرات موضعی دارند و ممکن است برای مدیریت کل مخزن مناسب نباشند. همچنین محدودیت طراحی آن‌ها با افزایش اندازه و عمق مخزن بیشتر می‌شود. با این حال، اختلاط دهنده‌های سطحی می‌توانند در مخازن کوچک‌تر با تخلیه کم‌عمق، به عنوان راهکاری مقرون‌به‌صرفه و کاربردی برای اختلاط موضعی مورد استفاده قرار گیرند. آنها همچنین قابلیت پمپاژ آب گرم‌تر به عمق تخلیه در رویدادهای رهاسازی را دارند و می‌توانند به عنوان مکملی برای دیگر استراتژی‌های مدیریتی مانند کنترل رشد سیانوباکتری‌ها به کار روند. این روش هزینه سرمایه‌گذاری پایین و هزینه عملیاتی متوسطی دارد، اما به عنوان راه‌حلی محدود شناخته می‌شود.

لایه زدایی با ستون‌های حبابی، جامع‌ترین و موفق‌ترین روش از نظر کاربرد عملی است. این سیستم‌ها برای بهبود شرایط حرارتی و کیفیت اکسیژن محلول در کل ستون آب، کاهش غلظت آهن و منگنز و کنترل رشد سیانوباکتری‌ها به کار گرفته شده‌اند و به خوبی طراحی و بهینه شده‌اند. با این حال، به دلیل تأثیر عوامل متعدد، جای پیشرفت در طراحی و بهره‌برداری آن‌ها وجود دارد. یکی از نگرانی‌های مهم، احتمال افزایش رشد سیانوباکتری‌ها به دلیل انتقال مواد مغذی به سطح و همچنین گرم شدن کف مخزن است که

ممکن است اکسیژن محلول را کاهش دهد. از نظر هزینه، سرمایه‌گذاری اولیه این سیستم‌ها نسبتاً پایین است اما هزینه‌های عملیاتی آنها بالا بوده و به‌ویژه در مخازن بزرگ و عمیق که نیاز به انرژی زیادی برای لایه زدایی مؤثر وجود دارد، قابل توجه است. توصیه می‌شود پیش از اجرا، مدل‌سازی و بهینه‌سازی استراتژی‌های عملیاتی انجام شود تا امکان‌سنجی و کارایی سیستم بهبود یابد.

برداشت انتخابی با ساختار چند سطحی، گران‌ترین گزینه از نظر سرمایه‌گذاری است. با این حال، باید هزینه‌های طول عمر و نگهداری این روش در مقایسه با ستون‌های حبابی مورد توجه قرار گیرد. در سدهای بزرگ که هزینه‌های عملیاتی ستون‌های حبابی بالا است، ممکن است هزینه مقاوم‌سازی ساختار چند سطحی کمتر باشد. همچنین، هزینه ساخت برداشت چند سطحی با افزایش اندازه مخزن افزایش می‌یابد و کیفیت پایین آب مخزن می‌تواند هزینه‌ها را به شدت بالا ببرد. برداشت چند سطحی نسبت به سایر روش‌های لایه زدایی، اثرات مخرب کمتری بر محیط مخزن دارد. درک دقیق حجم و الگوی رهاسازی و شرایط مخزن برای بهینه‌سازی طراحی این سازه‌ها و ارزیابی ارزش آنها حیاتی است. به طور کلی، مقاوم‌سازی برداشت چند سطحی گزینه‌ای مؤثر اما محدود، با هزینه سرمایه‌گذاری بالا و هزینه عملیاتی پایین برای کاهش انتشار آب سرد از سدها محسوب می‌شود. موفقیت این اقدامات باید بر اساس بهبود همزمان انتشار آب سرد از سدها، کیفیت آب و کنترل سیانوباکتری‌ها سنجیده شود که معمولاً در تضاد با یکدیگر هستند. حفظ یک ستون آب غیر طبقه‌بندی شده، کلید موفقیت در بهبود همزمان این پارامترها

- پایش و کنترل مستمر کیفیت آب:

پیاپی سازی سیستم‌های پایش لحظه‌ای پارامترهای کیفیت آب، به ویژه دما، اکسیژن محلول و غلظت فلزات و جلبک‌ها، به مدیران کمک می‌کند تا وضعیت مخزن را به صورت دقیق رصد کرده و در صورت لزوم، سریعاً واکنش نشان دهند.

- توسعه فناوری‌های کم مصرف و خودکار:

به منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی، توسعه و به کارگیری فناوری‌های نوین با مصرف انرژی کمتر و قابلیت خودکارسازی عملیات، از اولویت‌های مهم است.

- آموزش و توانمندسازی تیم‌های بهره‌برداری:

آموزش متخصصان و بهره‌برداران مخازن در زمینه کاربرد صحیح فناوری‌ها، مدیریت بهینه و تحلیل داده‌های پایش، نقش مهمی در موفقیت پروژه‌ها دارد.

- توجه به شرایط زیست محیطی و اکولوژیکی:

در طراحی و اجرای هر فناوری، باید تأثیرات زیست محیطی و اکولوژیکی به دقت ارزیابی شده و راهکارهای کاهش اثرات منفی در نظر گرفته شود.

- حفظ ستون آب غیر طبقه بندی شده:

از مهم‌ترین اهداف مدیریت انتشار آب سرد از سدها حفظ ستون آب غیر طبقه بندی شده در مخزن است که به عنوان شاخص کلیدی موفقیت شناخته می‌شود و به بهبود همزمان پارامترهای مختلف کیفیت آب کمک می‌کند.

منابع

[1] Nazrehia M., Danaei A., Hashemi SH., Izad Doostda, AH., 2011, Prediction of thermal stratification of the dam under construction in Bakhtiari using the CE-QUAL-W2 model, Environment, 36 1-8.

است. در نهایت با توجه به پیچیدگی مسائل مربوط به انتشار آب سرد از سدها و محدودیت‌های هر یک از فناوری‌های موجود، پیشنهاد می‌شود که:

- در مخازن بزرگ و عمیق با بودجه و امکانات مناسب، استفاده از ستون‌های حبابی به عنوان راهکار اصلی به کار گرفته شود و بهره‌برداری آن‌ها با کمک مدل سازی و پایش دقیق بهینه شود.

- در مخازن کوچک تر یا با نیاز به اختلاط موضعی، اختلاط دهنده‌های سطحی به عنوان راهکار مکمل و مقرون به صرفه استفاده شود.

- در شرایطی که کیفیت آب مخزن بسیار بحرانی است و هزینه‌های عملیاتی بالاست، برداشت انتخابی چند سطحی به عنوان گزینه‌ای مؤثر و پایدار مدنظر قرار گیرد.

- در نهایت، مدیریت موفق کیفیت آب مخازن نیازمند رویکرد جامع، انعطاف پذیر و مبتنی بر پایش مستمر است که بتواند فناوری‌های مختلف را متناسب با شرایط و نیازهای خاص هر مخزن تلفیق و بهینه سازی کند.

اجرای این راهکارها علاوه بر بهبود کیفیت آب، می‌تواند به حفظ اکوسیستم‌های پایین دست، افزایش طول عمر سدها و بهبود بهره‌وری منابع آبی منجر شود.

پیشنهادات عملیاتی و اجرایی**مدل سازی و بهینه سازی پیش از اجرا:**

پیشنهاد می‌شود پیش از اجرای هر فناوری، مطالعات مدل سازی دقیق انجام شود تا ابعاد، محل نصب، زمانبندی بهره‌برداری و پارامترهای عملیاتی بهینه تعیین شوند. این امر باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش اثربخشی می‌شود.

- downstream fish assemblages. *Journal of fish Biology*, 78945-52.
- [13] Gray, R., Jones, HA., Hitchcock, JN., Hardwick, L., Pepper, D., Lugg, A., Seymour, JR., Mitrovic, SM., 2019, Mitigation of cold-water thermal pollution downstream of a large dam with the use of a novel thermal curtain. *River Research and Applications*, 35855-66.
- [14] Chaaya, FC., Miller, BM., 2023, Pindari Dam cold water pollution mitigation through artificial destratification-Monitoring network recommendations. WRL Technical Report 2022/19, UNSW Water Research Laboratory.
- [15] Winton, RS., Calamita, E., Wehrli, B., 2019, Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification. *Biogeosciences*, 16(8):1657-71.
- [16] Huttula, T., 2012, Stratification in Lakes, in *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*, 743-747.
- [17] Gibbs, MM., Howard-Williams, C., Sherman, B., Brookes, JD., Ibelings, BW., 2019, Physical processes for in-lake restoration: Destratification and mixing. *InLake Restoration Handbook: A New Zealand Perspective*, 165-205. Cham: Springer International Publishing.
- [18] Masunaga, E., Komuro, S., 2020, Stratification and mixing processes associated with hypoxia in a shallow lake (Lake Kasumigaura, Japan). *Limnology*, (2):173-86.
- [19] Li, N., Huang, T., Li, Y., Si, F., Zhang, H., Wen, G., 2020, Inducing an extended naturally complete mixing period in a stratified reservoir via artificial destratification. *Science of the Total Environment*, 745 140958.
- [20] Masunaga, E., Komuro, S., 2020, Stratification and mixing processes associated with hypoxia in a shallow lake (Lake Kasumigaura, Japan). *Limnology*, 21173-86.
- [21] Chaaya, FC., Miller, B., 2022, A review of artificial destratification techniques for cold water pollution mitigation. Available in: <https://www.unsw.edu.au/content/dam/pdfs/engineering/civilenvironmental/waterresearchlaboratory/publications/WRL-TR2021-17>.
- [22] Ryan, T., Webb, A., Lennie, R., Lyon, J., 2001, Status of cold-water releases from Victorian dams. Arthur Rylah Institute, Department of Natural Resources and Environment, Melbourne, 61.
- [2] Fazeli M., Attari J., Hashemi S.H., Jumaegi A., 2011, Investigation of methods to prevent thermal stratification in the Latian Dam Lake (first stage of feasibility study), Tehran Regional Water Joint Stock Company, (in Persian).
- [3] Woolway, RI., Merchant, CJ., 2019, Worldwide alteration of lake mixing regimes in response to climate change. *Nature Geoscience*, 12271-6.
- [4] Houshmand-Ayini, A., 2011, Investigation of the stratification phenomenon in reservoirs and methods for preventing it, First Regional on Civil Engineering, Joibar (In Persian).
- [5] Water Science Engineering Specialized Association, Thermal Stratification, 2012, available in <http://aterse.ir> (In Persian).
- [6] Zargarpour, H., Gharavi, M., Jafar, D., 2007, Thermal stratification in successive reservoirs - a case study of Karun 1, 2 and 3 dam reservoirs, *Iranian Water Resources Research*, 3 (In Persian).
- [7] Mohammadnejad, B., Bayramali, P., Navid B., 2015, Simulation of nutrient orientation of Mahabad Dam reservoir using two-dimensional CE-QUAL-W2 model. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, University of Tabriz, 44 107-115. (In Persian).
- [8] Hayes, NM., Deemer, BR., Corman, JR., Razavi, NR., Strock, KE., 2017, Key differences between lakes and reservoirs modify climate signals: A case for a new conceptual model. *Limnology and Oceanography Letters*, 247-62.
- [9] Bengtsson, L., 2012, Classification of Lakes from Hydrological Function, in *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*, 163-164.
- [10] Herschy, RW., 2012, Dams, Classification, in *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, 200-207.
- [11] Poff, NL., Hart, DD., 2002, How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal: an ecological classification of dams is needed to characterize how the tremendous variation in the size, operational mode, age, and number of dams in a river basin influences the potential for restoring regulated rivers via dam removal. *BioScience*, 52659-68.
- [12] Miles, NG., West, RJ., 2011, The use of an aeration system to prevent thermal stratification of a freshwater impoundment and its effect on

- Toxicological & Environmental Chemistry, 96 1535-45.
- [32] Bormans, M., Maršálek, B., Jančula, D., 2016, Controlling internal phosphorus loading in lakes by physical methods to reduce cyanobacterial blooms: a review. *Aquatic Ecology*, 50 407-22.
- [33] Ma, WX., Huang, TL., Li, X., 2015, Study of the application of the water-lifting aerators to improve the water quality of a stratified, eutrophicated reservoir. *Ecological Engineering*, 83 281-90.
- [34] Visser, PM., Ibelings, BW., Bormans, M., Huisman, J., 2016, Artificial mixing to control cyanobacterial blooms: a review. *Aquatic Ecology*, 50 423-41.
- [35] dos-Santos-Silva, RD., Severiano, JS., de-Oliveira, DA., Mendes, CF., Barbosa, VV., Chia, MA., de-Lucena-Barbosa, JE., 2020, Spatio-temporal variation of cyanobacteria and cyanotoxins in public supply reservoirs of the semi-arid region of Brazil. *Journal of Limnology*, 79.
- [36] Manning, SR., Nobles, DR., 2017, Impact of global warming on water toxicity: cyanotoxins. *Current Opinion in Food Science*, 18 14-20.
- [37] Lee, S., Jiang, X., Manubolu, M., Riedl, K., Ludsins, SA., Martin, JF., Lee, J., 2017, Fresh produce and their soils accumulate cyanotoxins from irrigation water: Implications for public health and food security. *Food research international*, 102 234-45.
- [38] Hamilton, DP., Wood, SA., Dietrich, DR., Puddick, J., 2014, Costs of harmful blooms of freshwater cyanobacteria. *Cyanobacteria: An economic perspective*, 10 245-56.
- [39] Hamilton, DP., Salmaso, N., Paerl, HW., 2016, Mitigating harmful cyanobacterial blooms: strategies for control of nitrogen and phosphorus loads. *Aquatic Ecology*, 50 351-66.
- [40] Slavin, EI., Wain, DJ., Bryant, LD., Amani, M., Perkins, RG., Blenkinsopp, C., Simoncelli, S., Hurley, S., 2022, The effects of surface mixers on stratification, dissolved oxygen, and cyanobacteria in a shallow eutrophic reservoir. *Water Resources Research*, 58(7): e2021WR030068.
- [41] Preece, R., 2004, Cold water pollution below dams in New South Wales: a desktop assessment. *Water management Division*,
- [23] Hayes, DB., Dodd, HO., Lessard, JO., 2008, Effects of small dams on coldwater stream fish communities. In *American Fisheries Society Symposium*, 49 1791, American Fisheries Society.
- [24] Boys, C., Miles, N., Rayner, T., 2009, Scoping options for the ecological assessment of cold-water pollution mitigation downstream of Keepit Dam, Namoi River. *Murray–Darling Basin Authority, NSW Department of Primary Industries*.
- [25] Michie, LE., Thiem, JD., Boys, CA., 2020, Mitrovic SM. The effects of cold shock on freshwater fish larvae and early-stage juveniles: implications for river management. *Conservation physiology*, 8 coaa092.
- [26] Bryant, LD., Hsu-Kim, H., Gantzer, PA., Little, JC., 2011, Solving the problem at the source: controlling Mn release at the sediment-water interface via hypolimnetic oxygenation. *Water Research*, 45 6381-92.
- [27] Beutel, MW., Leonard, TM., Dent, SR., Moore, BC., 2008, Effects of aerobic and anaerobic conditions on P, N, Fe, Mn, and Hg accumulation in waters overlaying profundal sediments of an oligo-mesotrophic lake. *Water research*, 42 1953-62.
- [28] Munger, ZW., Carey, CC., Gerling, AB., Hamre, KD., Doubek, JP., Klepatzki, SD., McClure, RP., Schreiber, ME., 2016, Effectiveness of hypolimnetic oxygenation for preventing accumulation of Fe and Mn in a drinking water reservoir. *Water Research*, 106 1-4.
- [29] Khan, K., Wasserman, GA., Liu, X., Ahmed, E., Parvez, F., Slavkovich, V., Levy, D., Mey, J., van-Geen, A., Graziano, JH., Factor-Litvak, P., 2012, Manganese exposure from drinking water and children's academic achievement. *Neurotoxicology*, 33 91-7.
- [30] Vieira, MC., Torronteras, R., Córdoba, F., Canalejo, A., 2012, Acute toxicity of manganese in goldfish *Carassius auratus* is associated with oxidative stress and organ specific antioxidant responses. *Ecotoxicology and environmental safety*, 78 212-7.
- [31] Hedayati, A., Hoseini, SM., Ghelichpour, M., 2014, Acute toxicity of waterborne manganese to *Rutilus caspicus* (Yakovlev, 1870)–gill histopathology, immune indices, oxidative condition, and saltwater resistance.

- [50] Helfer, F., 2012, Influence of air-bubble plumes and effects of climate change on reservoir evaporation, Ph.D. Thesis, Griffith School of Engineering Science, Environment, Engineering and Technology, Griffith University, 6-27.
- [51] Becker, A., Herschel, A., Wilhelm, C., 2006, Biological effects of incomplete destratification of hypertrophic freshwater reservoir. *Hydrobiologia*, 559 85-100.
- [52] Lewis, DM., 2004, Surface mixers for destratification and management of *Anabaena circinalis*, Ph.D. Thesis, School of Civil and Environmental Engineering, University of Adelaide, 221-234.
- [53] Sahoo, GB., Luketina, D., 2003, Bubbler design for reservoir destratification. *Marine and freshwater research*, 54 271-85.
- [54] Cannon, S., 2020, *Reservoir Management: A Practical Guide*. John Wiley & Sons, 17-34.
- [55] Lawson, R., Anderson, MA., 2007, Stratification and mixing in Lake Elsinore, California: An assessment of axial flow pumps for improving water quality in a shallow eutrophic lake. *Water research*, 41 4457-67.
- [56] Gray, R., 2016, Effectiveness of cold-water pollution mitigation at Burrendong Dam using an innovative thermal curtain. University of Technology Sydney (Australia), 35-48.
- [57] Mejica, BN., Ebert, DA., 2023, Tanaka SK, Deas ML. Managing cyanobacteria with a water quality control curtain in Iron Gate Reservoir, California. *Lake and Reservoir Management*, 39 291-310.
- [58] Smith, CA., Read, JS., Vander-Zanden, MJ., 2018, Evaluating the “Gradual Entrainment Lake Inverter” (GELI) artificial mixing technology for lake and reservoir management. *Lake and Reservoir Management*, 34 232-43.
- [59] Read, JS., Shade, A., Wu, CH., Gorzalski, A., McMahon, KD., 2011, “Gradual Entrainment Lake Inverter” (GELI): A novel device for experimental lake mixing. *Limnology and Oceanography: Methods*, 9 14-28.
- Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources.
- [42] Olden, JD., Naiman, RJ., 2010, Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*, 55 86-107.
- [43] Li, N., Huang, T., Mao, X., Zhang, H., Li, K., Wen, G., Lv, X., Deng, L., 2019, Controlling reduced iron and manganese in a drinking water reservoir by hypolimnetic aeration and artificial destratification. *Science of the Total Environment*, 685 497-507.
- [44] Sherman, B., Todd, CR., Koehn, JD., Ryan, T., 2007, Modelling the impact and potential mitigation of cold-water pollution on Murray cod populations downstream of Hume Dam, Australia. *River Research and Applications*, 23 377-89.
- [45] Ingleton, T., Kobayashi, T., Sanderson, B., Patra, R., Macinnis-Ng, CM., Hindmarsh, B., Bowling, LC., 2008, Investigations of the temporal variation of cyanobacterial and other phytoplanktonic cells at the offtake of a large reservoir, and their survival following passage through it. *Hydrobiologia*, 603 221-40.
- [46] Martin, J., Higgins, J., Edinger, J., 2014, Gordon J. Energy Production and Reservoir Water Quality. American Society of Civil Engineers.
- [47] Bryant, LD., Gantzer, PA., Little, JC., 2013, Increased sediment oxygen uptake caused by oxygenation-induced hypolimnetic mixing. *Water research, Management-Deep Reservoir Circulation*. In 7th annual WIOA NSW water industry operations conference. Exhibition Park in Canberra 84-91.
- [48] Elliott, S., Swan, D., 2013, Source Water Management - Deep Reservoir Circulation, in 7th Annual WIOA NSW Water Industry Operations Conference and Exhibition, 84–91
- [49] Bryant, LD., Hsu-Kim, H., Gantzer, PA., Little, JC., 2011, Solving the problem at the source: controlling Mn release at the sediment-water interface via hypolimnetic oxygenation. *Water Research*, 45 6381-92.

“Research article”

Synthesis of alkoxy Meta-Terphenyls using Aryl- Grignards

Mahin Ahmadianarog

Department of Chemistry, Male.C., Islamic Azad University, Malekan, Iran

*Corresponding author: Mahin.ahmadian@iau.ir

(Received: 17 May 2025, Accepted: 15 July 2025)

Abstract

Given the application of terphenyl derivatives (diphenylbenzenes) in the design of chemical sensors for detecting environmental pollutants, advanced adsorbents for removing organic compounds from water and soil, and even biodegradation processes, As well as their application in the synthesis of cyclophenes, star polymers, liquid crystals, plastics, insulating materials, as well as the production of drugs, dyes, pesticides, and fungicides, in this research work, suitable precursors for the synthesis of phenolic terphenyl derivatives have been synthesized. and these precursors were prepared in a simple, low-cost and high-yield method. By using the effect of a Grignard compound (the aromatic part has an alkoxy group) on 6,2-dichloriodobenzene in tetrahydrofuran solvent and then hydrolysis of the intermediate formed, the corresponding meta-terphenyl alkoxy, which is a suitable precursor for the above-mentioned cases, has been prepared. In this study, the methoxy group has been used as the alkoxy. In organic chemistry, the alkoxy group is used as a protecting group for some functional groups.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Aryl- Grignard, alkoxy Meta-Terphenyl, diphenyl benzene, tetrahydrofuran



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال شانزدهم، شماره‌ی ۶۲
تابستان ۱۴۰۴، صفحات ۵۱-۳۹

"مقاله پژوهشی"

سنتز آلکوکسی متا - ترفنیل‌ها با استفاده از آریل گرینیاردها

مهین احمدیان آروق*

گروه شیمی، واحد ملکان، دانشگاه آزاد اسلامی، ملکان، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: Mahin.ahmadian@iaui.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴)

چکیده

با توجه به کاربردی که مشتقات ترفنیل‌ها (دی فنیل بنزن‌ها) در طراحی حسگرهای شیمیایی برای تشخیص آلاینده‌های زیست‌محیطی، جاذب‌های پیشرفته برای حذف ترکیبات آلی از آب و خاک، و حتی فرایندهای تجزیه زیستی دارند، و نیز کاربردی که در سنتز سایکلو فن‌ها، پلیمرهای ستاره‌ای، بلورهای مایع، پلاستیک‌ها، مواد عایق و نیز تولید داروها، رنگ‌ها، آفت کش‌ها و قارچ کش‌ها دارند، در این کار تحقیقاتی اقدام به سنتز پیش ماده‌های مناسب برای سنتز مشتقات فنلی ترفنیل‌ها شده است و این پیش ماده‌ها با روشی آسان و کم هزینه و با راندمان بالا تهیه شدند. با استفاده از اثر دادن ترکیب گرینیاردی (بخش آروماتیکی دارای گروه آلکوکسی می‌باشد) بر ۶، ۲ - دی کلرو یدو بنزن در حلال تترا هیدرو فوران و سپس هیدرولیز حدودا وسط تشکیل شده، آلکوکسی متا ترفنیل مربوطه که پیش ماده‌ای مناسب برای موارد ذکر شده می‌باشد، تهیه شده است. در این پژوهش، از گروه متوکسی به عنوان آلکوکسی استفاده شده است. در شیمی آلی، گروه آلکوکسی به عنوان گروه محافظ برای بعضی از گروه‌های عاملی استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آریل گرینیارد، آلکوکسی متا - ترفنیل، دی فنیل بنزن، تترا هیدرو فوران، کلرو یدو بنزن

مقدمه

ترفنیل‌ها از جمله ترکیبات آروماتیک هستند که با افزودن گروه‌های عاملی مانند کلر یا متوکسی، خواص شیمیایی و کاربردهای متنوعی پیدا می‌کنند. این ترکیبات به دلیل پایداری شیمیایی بالا، در گذشته به عنوان عایق‌های الکتریکی، مایعات انتقال حرارت و افزودنی‌های صنعتی استفاده شده‌اند. از سوی دیگر، مشتقات اصلاح شده ترفنیل‌ها در کاربردهای نوین مانند حسگرهای شیمیایی و جاذب‌های پیشرفته پتانسیل بالایی دارند. این ترکیبات می‌توانند در طراحی حسگرهای شیمیایی برای تشخیص آلاینده‌های زیست‌محیطی، جاذب‌های پیشرفته برای حذف ترکیبات آلی از آب و خاک و حتی فرایندهای تجزیه زیستی به کار روند. مشتقات متوکسی دار این ترکیبات می‌توانند به عنوان جاذب‌های نانوساختار در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی به کار روند (۱-۲).

ترفنیل‌ها مواد اولیه مفیدی برای سنتز سایکلوفن‌ها و بلورهای مایع و پلیمرهای ستاره‌ای و نیز تولید پلاستیک‌ها، رنگ‌ها، داروها، مواد عایق و ... می‌باشند. این ترکیبات به دلیل ساختار پایدار و قابل کنترل، در سنتز داروهای ضد التهاب و داروهایی که نیاز به هسته‌های آروماتیک خاص دارند، کاربرد دارد. در صنایع شیمیایی، این ترکیب به عنوان ماده اولیه یا واسطه واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود، به‌ویژه در واکنش‌های شیمیایی خاص که نیاز به ترکیبات پایداری دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تولید پلیمرها و پلاستیک‌های مقاوم در برابر حرارت و مواد آتش‌گیر، این ترکیبات به عنوان ماده افزودنی استفاده می‌شود و می‌توان در ساختار آن‌ها گروه‌هایی مانند هالوژن استخلاف کرد که وجود برم در ساختار آن به

پلیمرها خاصیت مقاومت در برابر شعله و افزایش پایداری حرارتی می‌دهد. حتی در صنعت کشاورزی نیز می‌توان از برخی مشتقات آن به عنوان قارچ‌کش و آفت‌کش، به دلیل خاصیت ضد باکتریایی و ضد قارچی که دارند، استفاده کرد (۳-۶).

در حوزه تحقیقات، این ترکیب به عنوان نمونه‌ای برای مطالعه خواص و واکنش‌های شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. محققان از آن در مطالعه روی ترکیبات آروماتیک و واکنش‌های جانشینی هسته‌دوستی بهره می‌برند.

در شیمی آلی، گروه آلکوکسی یکی از گروه‌هایی است که به عنوان یک گروه محافظت کننده استفاده می‌شود. این مورد از این جهت اهمیت دارد که در برخی موارد ما مجبوریم از یک گروه محافظت کننده مناسب برای یک یا چند تا از گروه‌های عاملی در یک مولکول استفاده کنیم. از جمله گروه‌هایی که به عنوان محافظ برای فنل‌ها و الکل‌ها استفاده می‌شوند، گروه‌های آلکیل، تری متیل سیلیل، گروه آسیل، سولفونیل و مانند آن‌ها می‌باشند (۷-۹).

در این پژوهش، با روشی مناسب اقدام به سنتز پیش ماده‌های مفید برای سنتز ترکیباتی پر کاربرد شده است. این پیش ماده مورد نظر در دسته ترفنیل‌ها قرار دارد و به متوکسی متا- ترفنیل‌ها معروف هستند. قابل ذکر است که ترفنیل‌ها به عنوان دی فنیل بنزن نیز نام برده می‌شوند.

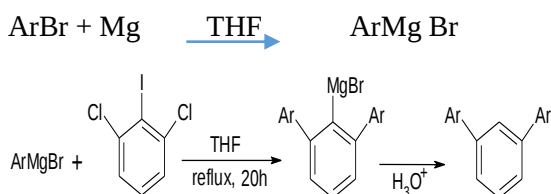
بخش تجربی**مواد و شرایط لازم**

واکنشگرها و حلال‌های مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از:

تجزیه عنصری مواد (CHN) در پژوهشگاه صنعت نفت تهران انجام گرفته است. طیف‌های IR در دانشکده داروسازی و دانشکده شیمی دانشگاه تبریز ثبت شده است.

روش‌ها

با توجه به مطالب گفته شده، در این کار پژوهشی از واکنش دادن ترکیب‌گریناردی ArMg Br (بخش آروماتیکی دارای گروه متوکسی می‌باشد) با ۲،۶-دی‌کلرویدوبنزن یا ۲،۳،۵،۶-تتراکلرو-۱،۴-دی‌یدوبنزن در حلال تتراهیدروفوران حد واسطه‌متا-ترفنیل^۲ -منیزیم برمید تهیه شد که بعد از هیدرولیز، متوکسی‌متا-ترفنیل مربوطه با راندمان خوبی تهیه گردید که با واکنش‌های زیر نشان داده شده است (۱۳-۱۲)



Ar = p- methoxyphenyl, o- methoxy phenyl, m- methoxy phenyl, 1, 4- dimethoxy phenyl

ترکیبات تهیه شده عبارتند از

ترکیب ۱: ۴، ۴- دی متوکسی ۱، ۱'، ۳، ۳'- ترفنیل

ترکیب ۲: ۲، ۲- دی متوکسی ۱، ۱'، ۳، ۳'- ترفنیل

ترکیب ۳: ۵، ۲، ۲، ۵- تترا متوکسی ۱، ۱'، ۳، ۳'- ترفنیل

ترفنیل

ترکیب ۴: ۴، ۴'- بیس (۴- متوکسی فنیل) ۴، ۴-

دی متوکسی ۱، ۱'، ۳، ۳'- ترفنیل

ترکیب ۵: ۴، ۴'- بیس (۳- متوکسی فنیل) ۳، ۳-

دی متوکسی ۱، ۱'، ۳، ۳'- ترفنیل

ترکیب ۶: ۵' (۴- متوکسی فنیل) ۴، ۴- دی

متوکسی ۱، ۱'، ۳، ۳'- ترفنیل

پارا برمو آنیزول، متا برمو آنیزول، اورتو برمو آنیزول، ۱، ۴- دی‌متوکسی- ۲- برموبنزن، پارا متوکسی استوفنون، ۲، ۶- دی‌کلروید و بنزن، ۲، ۳، ۵، ۶- تتراکلرو- ۱، ۴- دی‌یدوبنزن، SiCl_4 ، اتانول، گاز آرگون و تترا هیدرو فوران (تمام پیش ماده‌ها در آزمایشگاه تهیه شدند).

برای خشک کردن تترا هیدرو فوران، ابتدا سدیم به صورت مفتول وارد آن شده و سپس در حضور مقدار کمی بنزوفنون در زیر آرگون تا ظهور رنگ آبی بازروانی شده است. آنگاه تقطیر کرده و مورد استفاده قرار گرفتند.

برای خشک کردن گاز آرگون، گاز مذکور از ستون Drierite (CaSO_4 خشک) و ستون سیلیکاژل خشک عبور داده شد. تمامی وسایل شیشه‌ای قبل از واکنش در دمای 120°C به مدت ۲ ساعت در گرم‌خانه خشک می‌شوند. تمامی واکنش‌ها در شرایط خشک تحت گاز آرگون انجام می‌گیرند.

برای ایجاد دماهای زیر صفر تا -10°C از مخلوط یخ و نمک استفاده می‌گردد برای خالص‌سازی و جداسازی محصولات از کروماتوگرافی ستونی سیلیکاژل با دانه‌بندی ۲۳۰-۴۰۰ و حلال هگزان- دی‌کلرومتان و هگزان- دی‌اتیل اتر استفاده شده است (۱۱-۱۰).

دستگاه‌ها

نقطه ذوب ترکیبات در یک لوله موین روباز به وسیله دستگاه نقطه ذوب Electrothermal9100 اندازه‌گیری شده است.

طیف‌های $^1\text{H-NMR}$ ، $^{13}\text{C-NMR}$ در دانشکده شیمی دانشگاه تبریز با دستگاه ۴۰۰ MHz در حلال DMSO-d_6 و شاهد TMS گرفته شده است.

تهیه ۴، ۴''- دی متوکسی ۱، ۱'، ۳'، ۱''- ترفنیل

(ترکیب ۱)

دستگاه زیر آرگون سوار شد. (قبلا وسایل لازم خشک شده‌اند) ۰/۴ گرم (۱۷ میلی مول) منیزیم توسط قیف مخصوص مواد جامد سریع به بالن دو دهانه خشک منتقل شد. در قیف چکاننده حدود ۱/۵ سی سی (۱۲ میلی مول) پارا برموانیزول ریخته شد و ۲۰ میلی لیتر THF خشک و تازه تقطیر شده به آن اضافه شد. سپس در حال به هم زدن چند قطره از محلول پارا برموانیزول در THF برای شروع واکنش اضافه گردید. به این ترتیب واکنش آغاز می شود و به علت گرمازا بودن واکنش، بدنه بالن گرم می شود. (اگر واکنش انجام نگیرد، می توان با اضافه کردن یک الی دو قطره ۱، ۲- دی برموانتان به داخل بالن منیزیم را فعال کرد). سپس قطره قطره محلول پارا برموانیزول اضافه شد، مخلوط دو ساعت بازروانی می گردد تا تشکیل گرینارد ArMgBr کامل شود و فقط منیزیم اضافی در محیط بماند.

در مرحله بعد مقدار ۱/۴ گرم (۵ میلی مول) ۶، ۲- دی کلرویدوبنزن در مقداری THF خشک حل می- گردد و در قیف چکاننده اضافه می شود. در حالت بازروانی کم کم مواد داخل قیف به داخل بالن منتقل می شود. مدت زمان افزایش دو ساعت به طول می- انجامد. سپس به مدت ۲۰ ساعت مخلوط در حال به هم زدن، بازروانی می شود، در این مدت منیزیم اضافی از بین می رود. این مرحله منجر به تولید حد واسط متا- ترفنیل - ۲' - منیزیم برمید می شود. سپس بعد از رسیدن مخلوط واکنش به دمای محیط، با حمام آب و یخ سرد شده و سپس از زیر آرگون خارج می شود و با محلول رقیق HCl هیدرولیز می شود و با اتر

استخراج می شود. در این مرحله فاز آلی با آب مقطر و آب نمک شستشو داده می شود و با استفاده از سولفات منیزیم بی آب خشک می گردد. TLC در حلال دی کلرو متان انجام واکنش را تایید می کند. بعد از صاف کردن و حلال گیری توسط دستگاه تبخیر کن چرخان ترکیب ۴، ۴''- دی متوکسی متاترفنیل به دست می آید.

تهیه ۲، ۲''- دی متوکسی ۱، ۱'، ۳'، ۱''- ترفنیل

(ترکیب ۲)

به منظور تهیه این ماده، مطابق روش گفته شده در تهیه ترکیب ۱ عمل می گردد، با این تفاوت که به جای پارا برموانیزول از ارتوبرمو آنیزول استفاده می شود. در این مورد نیز واکنش به صورت کمی انجام گرفت.

تهیه ۵، ۵''، ۲''، ۲''- ترا متوکسی ۱، ۱'، ۳'، ۱''- ترفنیل

(ترکیب ۳)

در اینجا نیز مطابق روش گفته شده، واکنش انجام می شود، با این تفاوت که ۱، ۴- دی متوکسی - ۲- برموبنزن استفاده می گردد. در این مورد نیز واکنش به صورت کمی انجام گرفت.

تهیه ۴'، ۶'- بیس (۴- متوکسی فنیل) ۴، ۴''- دی

متوکسی ۱، ۱'، ۳'، ۱''- ترفنیل (ترکیب ۴)

برای تهیه این ماده مطابق روش گفته شده عمل شد و از واکنشگرهای پارا برموانیزول و ۶، ۲، ۳، ۵- تتراکلرو- ۱، ۴- دییدوبنزن استفاده شد. در این مورد نیز واکنش به صورت کمی انجام گرفت.

تهیه ۴'، ۶'- بیس (۳- متوکسی فنیل) ۳''، ۳- دی

متوکسی ۱، ۱'، ۳'، ۱''- ترفنیل (ترکیب ۵)

برای تهیه این ماده از واکنشگرهای متا برموانیزول و ۶، ۲، ۳، ۵- تتراکلرو- ۱، ۴- دییدوبنزن طبق روش

گفته شده در موارد قبلی استفاده می‌شود. در این مورد نیز واکنش به صورت کمی انجام گرفت.

تهیه ۵' (۴- متوکسی فنیل) ۴، ۴"- دی متوکسی ۱، ۱'، ۳، ۳"- ترفنیل (ترکیب ۶)

برای تهیه این ترکیب از واکنش تریمریزاسیون پارا متوکسی استوفنون به روش زیر استفاده می‌شود:

برای این منظور از یک بالن سه دهانه ۱۰۰ میلی‌لیتری استفاده می‌گردد که در یکی از دهانه‌ها دماسنج قرار می‌گیرد و در دهانه دوم قیف چکاننده و در دهانه سوم سیتوم گذاشته می‌شود. دستگاه در زیر هود سوار می‌گردد تا گاز HCl که در طول واکنش آزاد می‌شود باعث ناراحتی نشود. بعد حدود ۲/۲ گرم p- متوکسی استوفنون داخل بالن اضافه می‌شود. سپس ۲۰ میلی‌لیتر اتانول خشک به آن اضافه شده و مخلوط به هم زده می‌شود تا p- متوکسی استوفنون در الکل حل شود. سپس ۲ میلی‌لیتر SiCl_4 تقطیر شده داخل قیف چکاننده ریخته می‌شود. قبل از اضافه کردن SiCl_4 دمای بالن با حمام یخ و آب به صفر درجه سانتی‌گراد رسانده می‌شود، بعد SiCl_4 قطره‌قطره به مخلوط داخل بالن اضافه می‌گردد. قبل از اضافه کردن SiCl_4

محلول شفاف و زرد کم‌رنگ بود. و بعد از اضافه کردن SiCl_4 رنگ محلول نارنجی و رفته رفته قرمز و قرمز تر شد. بعد از تمام شدن SiCl_4 حمام آب و یخ برداشته می‌شود و اجازه داده می‌شود محلول در دمای آزمایشگاه چندین ساعت به هم بخورد. سپس مخلوط واکنش با آب و یخ سرد می‌شود و با آب مقطر هیدرولیز می‌گردد. رنگ محلول بعد از هیدرولیز نارنجی مایل به زرد می‌شود، بعد با دی‌کلرومتان استخراج می‌شود و فاز آلی یک‌بار با آب نمک اشباع و یک‌بار هم با آب مقطر شستشو داده می‌شود و با

استفاده از سولفات منیزیم بی‌آب خشک می‌گردد. TLC (با در نظر گرفتن ماده اولیه به عنوان شاهد) انجام واکنش را تأیید می‌کند. ماده در حلال الکل و تولوئن نوبلور گردید، رسوب زرد کم‌رنگی به دست می‌آید که همان ترکیب ۶ می‌باشد.

نتیجه و بحث

۴، ۴"- دی متوکسی ۱، ۱'، ۳، ۳"- ترفنیل (ترکیب ۱)

نقطه ذوب ترکیب ۱ پس از قرار دادن در خلاء، ۱۶۵-۱۶۶ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. (واکنش کمی بود). تصویر طیف‌های ترکیب ۱ در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است.

اطلاعات طیفی ترکیب ۱:

IR (KBr) = $1045.3, 1253.1 \text{ cm}^{-1}$
 $^1\text{H-NMR}$ (400 MHz, DMSO- d_6) $\delta = 4/95$ (S, 3H), 4/89 (S, 3H), 7/67 (S, 1H), 7/53 (d, J=8/4, J=1/8, 4H), 7/48-7/45 (m, 2H), 6/92 (d, J=8/4, J=1/8, 4H)

$^{13}\text{C-NMR}$ (100MHz, DMSO- d_6) $\delta = 155/7$, 141/3, 131/3, 127/8, 127/4, 123/4, 123/2, 114/9, 72/4, 71.8

= مقدار محاسبه شده) C= 81/28 % : تجزیه عنصری
 = مقدار محاسبه شده) H= 5/97 % (82/76)

۴، ۴"- دی متوکسی ۱، ۱'، ۳، ۳"- ترفنیل (ترکیب ۲)

نقطه ذوب ترکیب ۲ پس از قرار دادن در خلاء ۱۱۲-۱۱۳ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. (واکنش کمی بود). تصویر طیف‌های ترکیب ۲ در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.

اطلاعات طیفی ترکیب ۲:

IR (KBr) = $1050/6, 1258/2 \text{ cm}^{-1}$
 $^1\text{H-NMR}$ (400 MHz, DMSO- d_6) $\delta = 4/87$ (S, 3H), 4/79 (S, 3H), 7/73 (d, J=1/4, 1H) 7/45 (d, J=7/5, J=1/3, 2H), 7/47-7/35 (m, 1H), 7/26 (d, J=7/5, J=1/4, 2H), 7/14 (t, J=7/5,

^{13}C -NMR (100 MHz , $\text{DMSO}-d_6$) $\delta = 155/9$, $137/8$, $131/7$, $130/9$, $129/6$, $114/8$, 58.6

=مقدار محاسبه شده) $\%C = 81/05$: تجزیه عنصری

$\%H = 5.56$ (5/98 = مقدار محاسبه شده)

۶، ۴' - بیس (۳- متوکسی فنیل) ۳، ۳'' - دی

متوکسی ۱، ۱'، ۳'، ۱'' - ترفنیل (ترکیب ۵)

نقطه ذوب ترکیب ۵، حدود $^{\circ}\text{C}$ ۲۶۴-۲۶۵ بدست

آمد. (واکنش کمی بود.) تصویر طیف‌های ترکیب ۵

در شکل‌های ۱۳ ف ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

اطلاعات طیفی ترکیب ۵:

$\text{IR}(\text{KBr}) \bar{\nu} = 1249/8$, $1039/8 \text{ cm}^{-1}$

^1H -NMR (400 MHz , $\text{DMSO}-d_6$) $\delta = 5/87$ - $5/65$ (S, 12H), $7/18$ (S, 2H), $7/04$ - $7/01$ (m, 4H), $6/53$ - $6/50$ (m, 2H)

^{13}C -NMR (100 MHz , $\text{DMSO}-d_6$) $\delta = 156/1$, $140/9$, $138/8$, $131/9$, $128/7$, $119/5$, $115/7$, $112/6$, $60/2$

=مقدار محاسبه شده) $\%C = 80/6$: تجزیه عنصری

$\%H = 5/3$ (81/27 = مقدار محاسبه شده)

5/98)

۵' (۴-متوکسی فنیل) ۴، ۴'' - دی

متوکسی ۱، ۱'، ۳'، ۱'' - ترفنیل (ترکیب ۶)

نقطه ذوب ترکیب ۶ حدود $^{\circ}\text{C}$ ۱۸۵-۱۸۶ درجه

سانتی‌گراد به دست آمد. (واکنش کمی بود.) تصویر

طیف‌های ترکیب ۶ در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نشان داده

شده است.

اطلاعات طیفی ترکیب ۶:

^1H -NMR (400 MHz , $\text{DMSO}-d_6$) $\delta = 4/98$ (S, 6H), $4/86$ (S, 3H), $7/54$ (d, $J = 8/5$, 6H), $7/45$ (S, 2H), $6/45$, (d, $J = 8/5$, 6H)

^{13}C -NMR (100 MHz , $\text{DMSO}-d_6$) $\delta = 156/8$, $141/1$, $130/7$, $127/9$, $121/9$, $115/1$, $61/1$, $62/1$

=مقدار محاسبه شده) $\%C = 80/5$: تجزیه عنصری

$\%H = 6/2$ (81/82 = مقدار محاسبه شده)

$J = 1/4$, 2H), $6/7$ (d, $J = 7/7$, 2H), $6/5$ (t, $J = 7/4$, 2H)

^{13}C -NMR (100 MHz , $\text{DMSO}-d_6$)

$\delta = 153/9$, $153/5$, $137/8$, $130/1$, $129/6$, $128/1$, $126/8$, $119/2$, $114/9$, $69/6$, $68/9$

=مقدار محاسبه شده) $\%C = 82/08$: تجزیه عنصری

$\%H = 6/07$ (82/76 = مقدار محاسبه شده)

۵، ۲'، ۲'' - تترا متوکسی ۱، ۱'، ۳'، ۱'' - ترفنیل

(ترکیب ۳)

نقطه ذوب ترکیب ۳ پس از قرار دادن در خلاء

حدود $^{\circ}\text{C}$ ۱۷۹-۱۸۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمد.

(واکنش کمی بود.) تصویر طیف‌های ترکیب ۳ در

شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است.

اطلاعات طیفی ترکیب ۳:

$\text{IR}(\text{KBr}) = 1249/8$, $1043/5 \text{ cm}^{-1}$

^1H -NMR (400 MHz , $\text{DMSO}-d_6$) $\delta = 4/84$ (S, 6H), $4/91$ (S, 6H), $7/65$ (S, 1H), $7/4$ - $7/34$ (m, 3H), $6/75$ - $6/55$ (m, 6H)

^{13}C -NMR (100 MHz , $\text{DMSO}-d_6$) $\delta = 149/8$, $148/9$, $146/2$, $138/2$, $129/7$, $128/3$, $127/5$, $116/2$, $115/9$, $114/7$, $68/7$, $67/9$

=مقدار محاسبه شده) $\%C = 74/65$: تجزیه عنصری

$\%H = 6/15$ (75/43 = مقدار محاسبه شده)

۶، ۴' - بیس (۴- متوکسی فنیل) ۴، ۴'' - دی

متوکسی ۱، ۱'، ۳'، ۱'' - ترفنیل (ترکیب ۴)

نقطه ذوب ترکیب ۴ بدست آمده، تقریباً $^{\circ}\text{C}$ ۲۹۹-

۳۰۰ می‌باشد. (واکنش کمی بود.)

تصویر طیف‌های ترکیب ۴ در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و

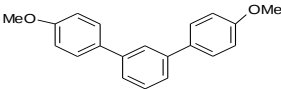
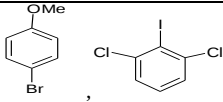
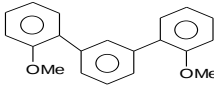
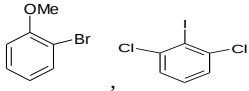
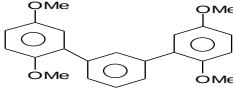
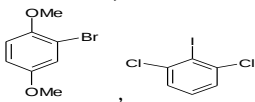
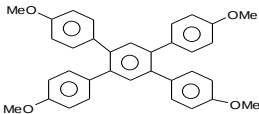
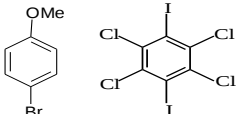
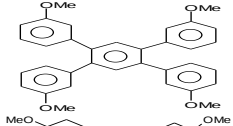
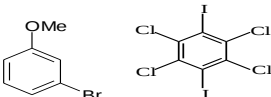
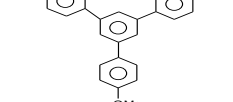
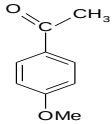
۱۲ نشان داده شده است.

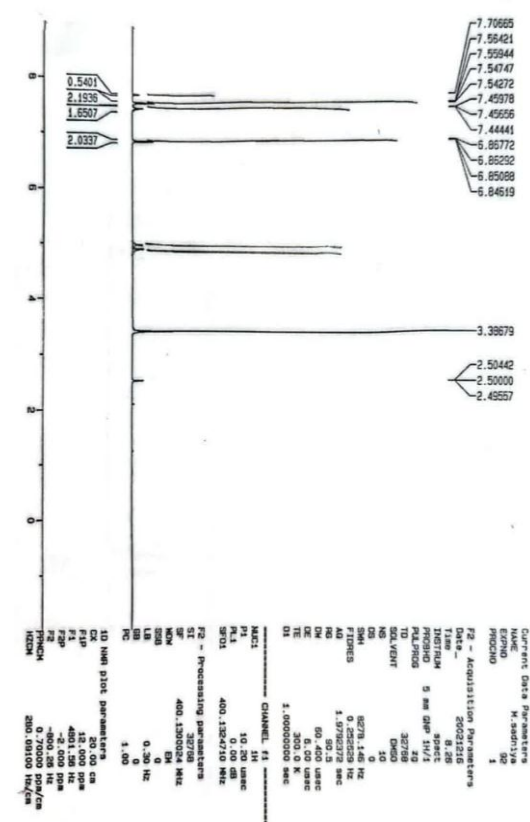
اطلاعات طیفی ترکیب ۴:

$\text{IR}(\text{KBr}) \bar{\nu} = 1259/6$, $1045/3 \text{ cm}^{-1}$

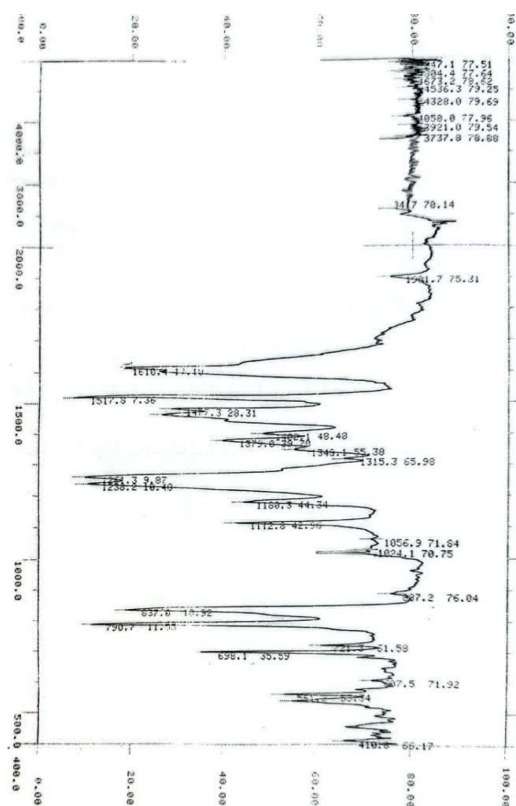
^1H -NMR (400 MHz , $\text{DMSO}-d_6$) $\delta = 5/43$ - $5/62$ (S, 12H), $7/1$ (S, 2H), $6/8$ (d, $J = 8/4$, 8H), $6/4$ (dd, $J = 8/4$, $J = 1/4$, 8H)

جدول ۱: واکنش‌گرها و شرایط واکنش و مواد تهیه شده

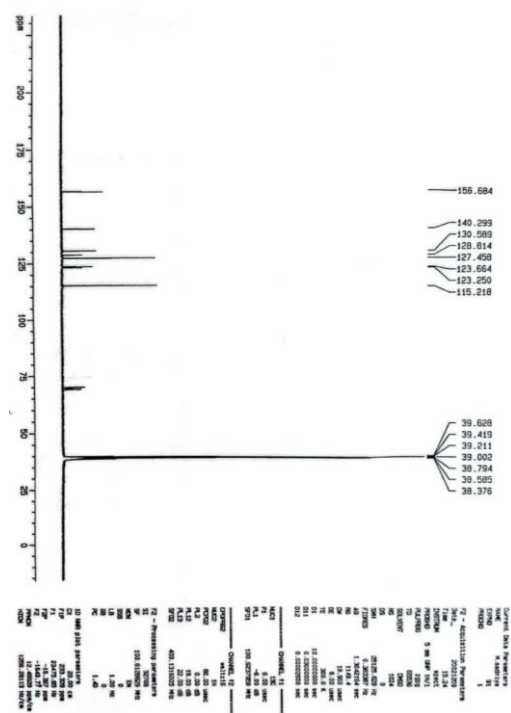
شماره ترکیب	متوکسی-ترفنیل	شرایط واکنش	واکنشگرها
ترکیب ۱		THF, reflux 20h	
ترکیب ۲		≈	
ترکیب ۳		≈	
ترکیب ۴		≈	
ترکیب ۵		≈	
ترکیب ۶		1) EtOH, SiCl ₄ 2) H ₃ O ⁺	



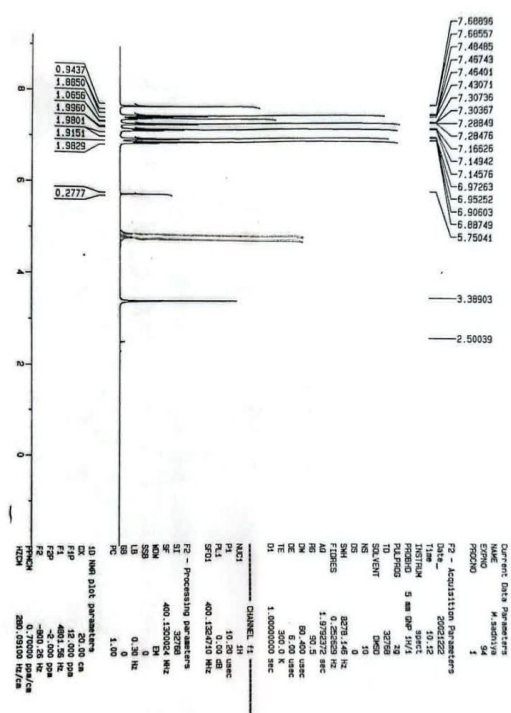
شکل ۲: طیف H-NMR ترکیب ۱



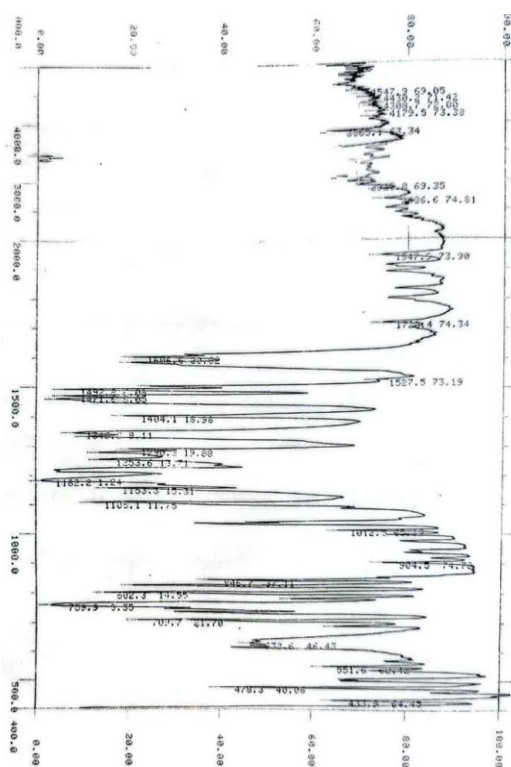
شکل ۱: طیف FT-IR ترکیب ۱



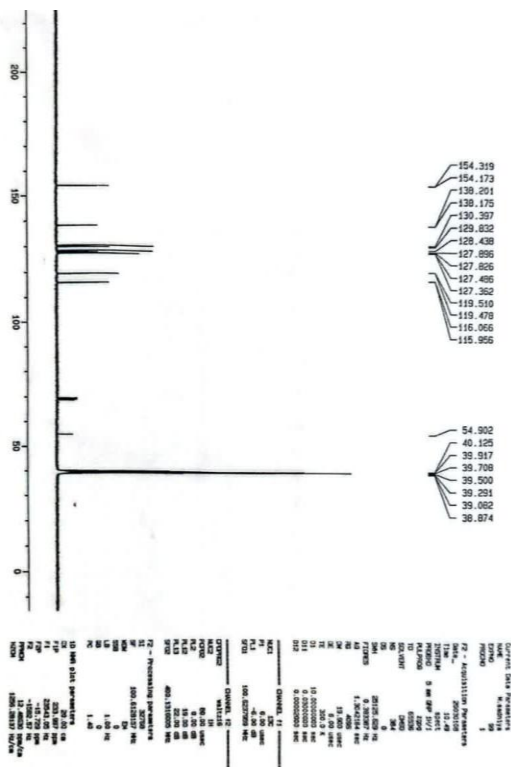
شکل ۳: طیف ^{13}C -NMR ترکیب ۱



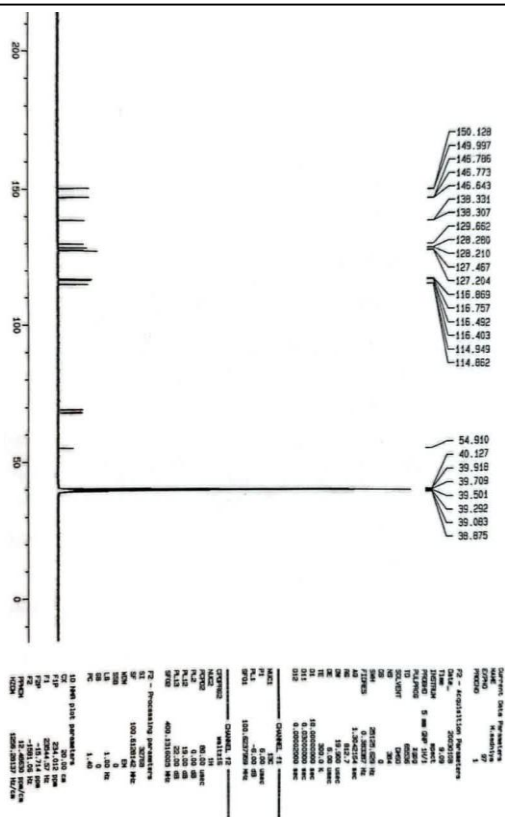
شکل ۵: طیف ^1H -NMR ترکیب ۲



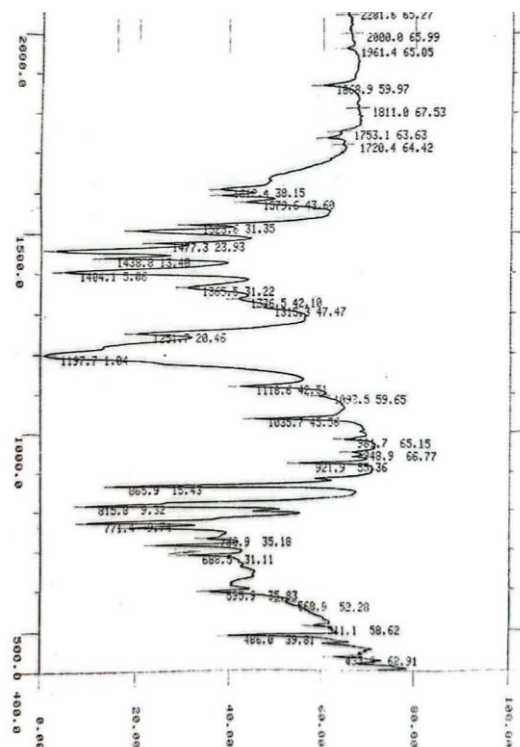
شکل ۴: طیف FT-IR ترکیب ۲



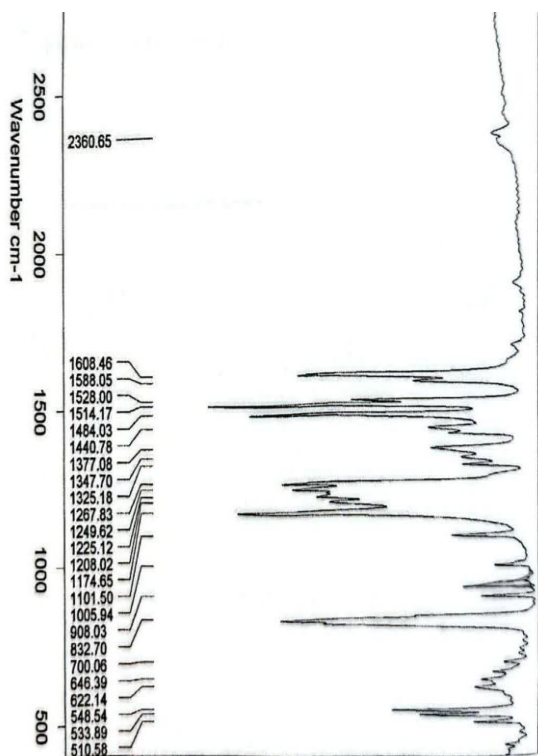
شکل ۶: طیف ^{13}C -NMR ترکیب ۲



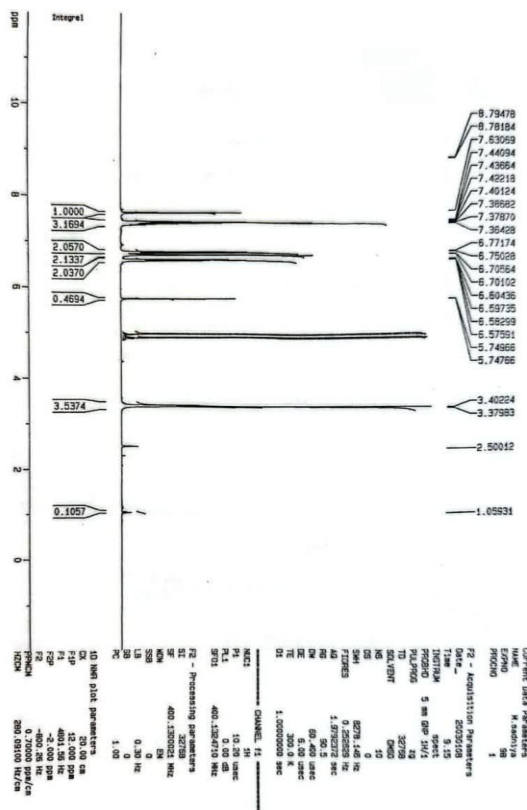
شکل ۹: طیف C- NMR ترکیب ۳



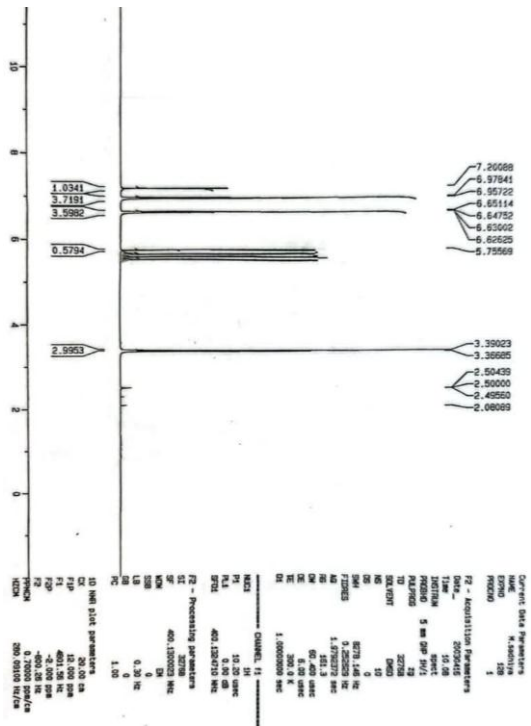
شکل ۷: طیف FT-IR ترکیب ۳



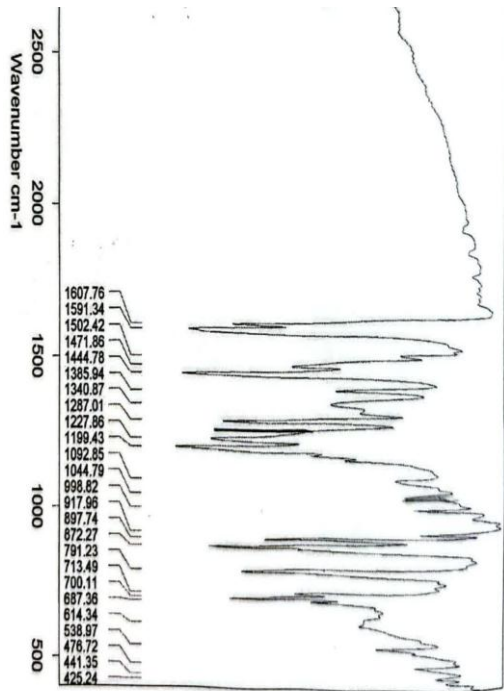
شکل ۱۰: طیف FT-IR ترکیب ۴



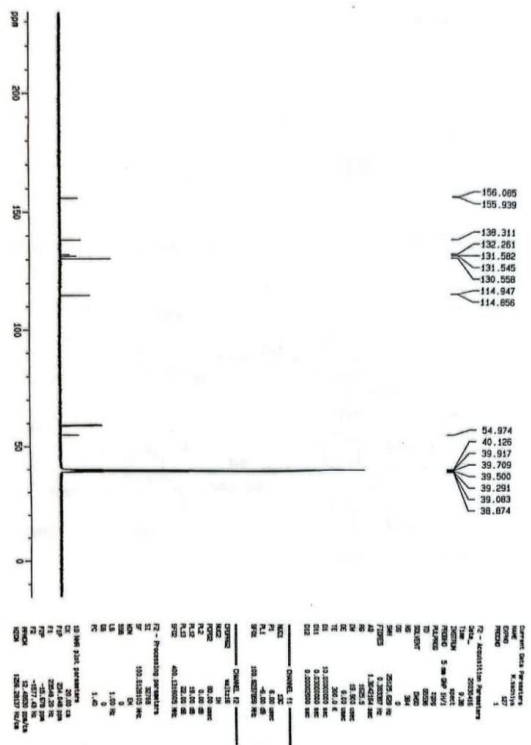
شکل ۸: طیف H-NMR ترکیب ۳



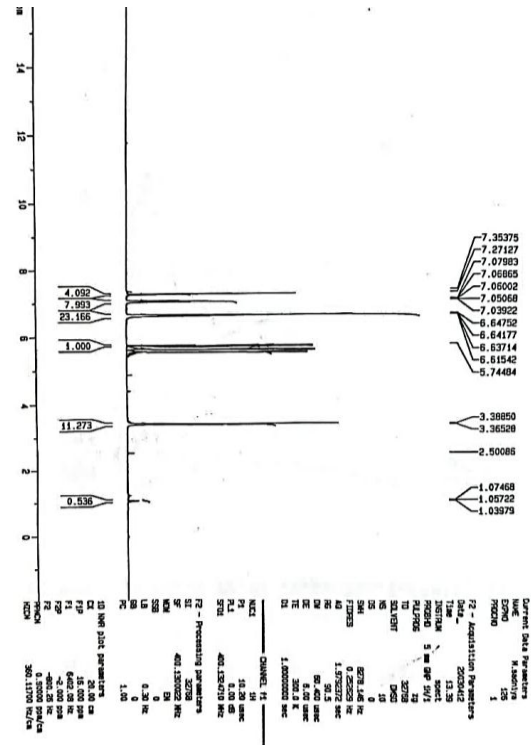
شکل ۱۱: طیف $^1\text{H-NMR}$ ترکیب ۴



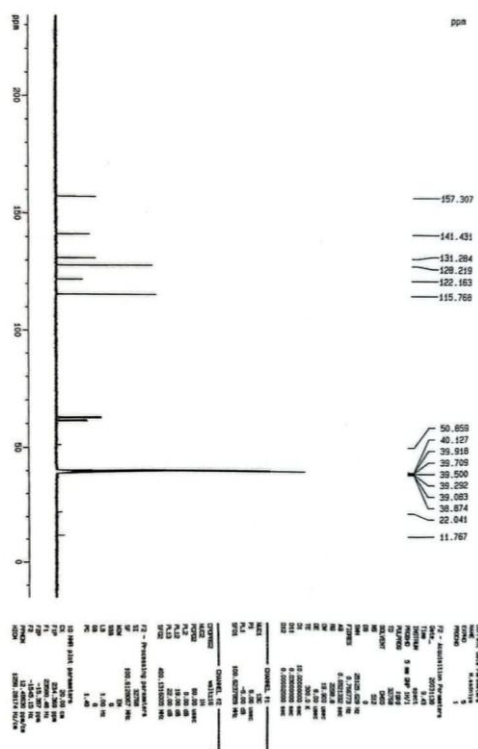
شکل ۱۳: طیف FT-IR ترکیب ۵



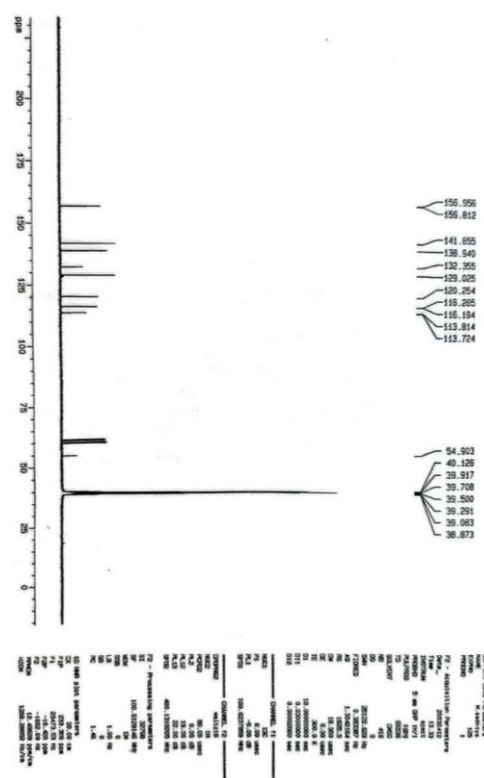
شکل ۱۲: طیف $^{13}\text{C-NMR}$ ترکیب ۴



شکل ۱۴: طیف $^1\text{H-NMR}$ ترکیب ۵



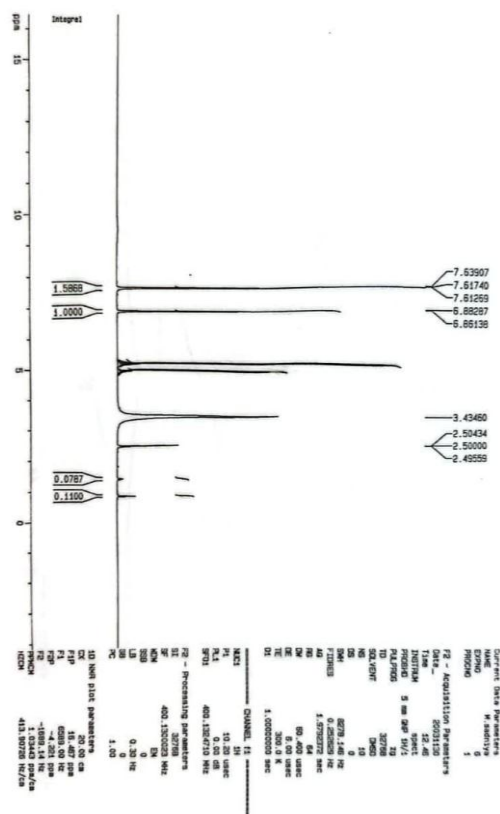
شکل ۱۷: طیف C-NMR ترکیب ۶



شکل ۱۵: طیف C-NMR ترکیب ۵

نتیجه‌گیری

متاترفنیل‌ها مواد اولیه مفیدی در ساختن بعضی ترکیبات مهم مانند سایکلو فن‌ها و کریستال‌های مایع می‌باشند. همچنین در ساختن پلیمرهای ستاره‌ای و به عنوان حسگر در فرایندهای عکاسی و در تولید رنگ-ها، داروها، پلاستیک‌ها، مواد عایق و ... بکار می‌روند. مشتقات ترفنیل‌ها، به ویژه آن‌هایی که گروه‌های عاملی مانند متوکسی دارند، پتانسیل کاربرد در فرایندهای تصفیه محیط‌زیست، حسگرهای شیمیایی و مواد جاذب را دارند. از این رو سنتز مشتقات متا-ترفنیل اهمیت زیادی دارد. در این کار پژوهشی از اثر متوکسی-آریل گریناردها بر ۲، ۶-دی کلرید و بنزن در حلال تترا هیدروفوران و در حال بازروانی متا-ترفنیل-۲-منیزیم بر مایند تهیه گردید که بعد از هیدرولیز ماده مورد نظر یعنی متوکسی متا-ترفنیل‌ها



شکل ۱۶: طیف H-NMR ترکیب ۶

- [12] Rajakumar, P., Srisailas, M., 1997, Meta-terphenyls as building blocks for benzimidazolophanes, *Tetrahedron letters*, 30, 5323-5326.
- [13] Luning, U., Baumgartner, H., Manthey, C., Meynhardt, B., 1996, Concave reagents. 20. Sterically shielded m-terphenyls as selective agents in General protonations, *J. Org. Chem.*, 61, 7922-7926.

تهیه شد. از مزایای این روش می‌توان به کمی بودن واکنش‌ها و در دسترس بودن مواد اولیه اشاره کرد.

منابع

- [1] Environmental, 2004, Terphenyl-Based Sensors for Environmental Monitoring, Science & Technology.
- [2] Euronews, 2005, Forever Chemicals: Brussels' Mission to Clean up Europe's Water, Euronews.
- [3] Sun, Y., Xu, Y., Sun, Z., Ch, Wang., Y, Wei., 2003, Effect of stereo configuration of aromatic ligands on retention and selectivity of terphenyl isomer-bonded stationary phases, *Journal of Chromatography A*, 1698, 464005.
- [4] Sutradhar, C., Bae, W., Song, K., Joo, S., Na, H., Lee, J., W, Kim., Jang, H., 2005, Synthesis and characterization of fluoro sulfonyl imide-based poly(benzoyl diphenyl benzene) membranes for proton exchange membrane fuel cells, *Fuel*, 390, 15, 134741.
- [5] Krieck, S., Kretschmer, R., Golls, H., Westerhauseh, M., 2011, Rubidium-mediated birch-type reduction of 1,2-Diphenylbenzene in tetrahydrofuran, *Journal of the American Chemical Society*, 18, 133, 6960-6963.
- [6] Goto, K., Yamamoto, G., Tan, B., Okazaki, R., 2001, A novel dendrimer-type m-terphenyl substituent for the kinetic stabilization of highly reactive species, *Tetrahedron letters*, 42, 4875-4877.
- [7] Curnow, O. J., Fern, G. M., Wöll, D., 2003, Synthesis of the sterically constrained ligand precursor cyclopentadienyl-2,6-diphenylbenzene and structure of $[(2,6\text{-Ph}_2\text{-C}_6\text{H}_3\text{-}\eta^5\text{-C}_5\text{H}_4)\text{Zr}(\text{NEt}_2)_3]$, *Inorganic Chemistry Communications*, 9, 6, 9, 1201-1204.
- [8] Abeysekera, D., Robertson, K. N., Cameron, J., Clyburne, A. C., 2001, M-terphenyl-substituted amidinates: useful ligands in the preparation of robust aluminum alkyls, *Organometallics*, 20, 5532-5536.
- [9] Furniss, B. S., Hannaford, A. J., Rogers, V., Smith, P. W. G., Tatchel, A. R., 1989, Vogel's Text Book of practical Organic Chemistry, 4 th edition, Longman London and Newyork, 935-937
- [10] Jayaram, R., Tagat Stuart, W., McCombie, Beverly E., Barton, James J., and Jennifer, Sh., 1995, Synthetic inhibitors of interleukin-6 II: 3,5-diaryl pyridines and meta-terphenyls, *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 18, 2143-2146.
- [11] Kannan, A., Rajakumar, P., Kabaleeswaran, V., Rajan, S.S., 1996, Synthesis of cyclophanes with intra-annular functionality and cage structure, *J. Org. Chem.*, 61, 5090.

“Research article”

Development of an Electrochemical Sensor Based on ZnO Nanocomposite and Carbon Nanotubes Modified with Molecularly Imprinted Polymer for Dopamine Detection in Biological Samples

Nasim Ziaefar¹

^{*1}Department of Chemistry, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

^{*}Corresponding author:

(Received: 19 August 2025, Accepted: 30 September 2025)

Abstract

In this study, a novel electrochemical sensor based on a ZnO nanocomposite and multi-walled carbon nanotubes modified with molecularly imprinted polymer was designed and fabricated for the selective determination of dopamine in biological samples. ZnO nanoparticles were employed as an effective platform due to their high surface area, good conductivity, and chemical stability to enhance the electrochemical response. Additionally, carbon nanotubes improved electron transfer and increased sensitivity. the molecularly imprinted polymer was synthesized using dopamine as the template molecule to enhance the sensor's selectivity. The sensor's performance was evaluated using differential pulse voltammetry. the results demonstrated that the proposed sensor exhibited a low detection limit of 0.08 μM , a wide linear range of 0.1–100 μM , and good repeatability. moreover, acceptable recovery was observed in real samples such as human serum and urine. in summary, the findings indicate that the developed sensor possesses adequate sensitivity, selectivity, and stability, and can serve as an efficient tool for the clinical monitoring of dopamine in biological samples.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Dopamine, Electrochemical sensor, ZnO nanocomposite, Carbon nanotubes, Molecularly imprinted polymer



"مقاله پژوهشی"

توسعه حسگر الکتروشیمیایی مبتنی بر نانوکامپوزیت ZnO و نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با پلیمر قالب مولکولی برای تعیین دوپامین در نمونه‌های زیستی

نسیم ضیایی‌فر*

گروه شیمی، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات:

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸)

چکیده

در این پژوهش، یک حسگر الکتروشیمیایی جدید مبتنی بر نانوکامپوزیت ZnO و نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح‌شده با پلیمر قالب مولکولی برای تعیین انتخابی دوپامین در نمونه‌های زیستی طراحی و ساخته شد. نانوذرات ZnO به علت مساحت سطح بالا، رسانایی مناسب و پایداری شیمیایی به عنوان بستری مؤثر برای تقویت پاسخ الکتروشیمیایی به کار رفتند. همچنین نانولوله‌های کربنی موجب افزایش انتقال الکترون و افزایش حساسیت شدند. پلیمر قالب مولکولی با استفاده از دوپامین به عنوان مولکول الگو سنتز گردید تا انتخاب‌پذیری حسگر افزایش یابد. عملکرد حسگر با روش ولتامتری پالسی تفاضلی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که حسگر پیشنهادی دارای حد تشخیص پایین $0.08 \mu\text{M}$ ، محدوده خطی گسترده $0.1-100 \mu\text{M}$ و تکرارپذیری مناسب است. همچنین در نمونه‌های واقعی نظیر سرم خون و ادرار انسانی بازیابی قابل قبولی مشاهده شد. به طور کلی، یافته‌ها بیانگر آن است که حسگر توسعه‌یافته از حساسیت، انتخاب‌پذیری و پایداری مناسبی برخوردار بوده و می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای پایش بالینی دوپامین در نمونه‌های زیستی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: دوپامین، حسگر الکتروشیمیایی، نانوکامپوزیت ZnO، نانولوله کربنی، پلیمر قالب مولکولی

مقدمه

دوپامین یکی از مهم‌ترین انتقال‌دهنده‌های عصبی در سیستم عصبی مرکزی است که در فرایندهای فیزیولوژیکی متعددی از جمله تنظیم خلق و خو، حافظه، پاداش، انگیزه و کنترل حرکتی نقش ایفا می‌کند (۱). کاهش یا افزایش غلظت این ترکیب در مایعات زیستی می‌تواند به بیماری‌هایی نظیر پارکینسون، اسکیزوفرنی، افسردگی و اعتیاد منجر شود (۲). از این‌رو، اندازه‌گیری دقیق و سریع دوپامین در نمونه‌های زیستی، از اهمیت زیادی در علوم پزشکی و دارویی برخوردار است. روش‌های متنوعی برای تعیین دوپامین گزارش شده‌اند، از جمله کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC)، طیف‌سنجی جرمی، روش‌های فلورسانس و تکنیک‌های الکتروشیمیایی (۳). در میان این روش‌ها، روش‌های الکتروشیمیایی به دلیل مزایایی مانند حساسیت بالا، قیمت پایین، قابلیت مینیاتوری‌سازی، پاسخ‌دهی سریع و امکان استفاده در محل و برای تعیین آنالیت‌ها توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند (۴). با این حال، یکی از چالش‌های عمده در حسگرهای الکتروشیمیایی دوپامین، حضور ترکیبات مزاحم مانند اسید آسکوربیک و اسید اوریک است که به دلیل داشتن پتانسیل اکسایش مشابه، می‌توانند باعث تداخل در پاسخ الکتروشیمیایی شوند (۵).

برای رفع این مشکل، راهکارهایی نظیر اصلاح سطح الکتروود با نانو ساختارهای رسانا و استفاده از پلیمرهای قالب مولکولی (MIP) به کار رفته‌اند. نانوذرات ZnO به دلیل خواصی نظیر رسانایی الکتریکی مناسب، مساحت سطح بالا، پایداری شیمیایی و زیست‌سازگاری مطلوب، در ساخت

حسگرهای الکتروشیمیایی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند (۶). اخیراً حسگرهای مبتنی بر نانوذرات ZnO با ساختار گل‌مانند برای شناسایی دوپامین توسعه یافته‌اند و نشان داده‌اند که این ساختار منجر به افزایش سطح فعال و حساسیت بالای حسگر می‌شود (۷). همچنین، نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNTs) به دلیل ساختار پایدار، هدایت الکتریکی بالا و توانایی افزایش نرخ انتقال الکترون، موجب بهبود حساسیت حسگرها می‌شوند (۸). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که حسگرهای مبتنی بر MIP قادر به تشخیص دقیق دوپامین با حساسیت و انتخاب‌پذیری بالا هستند. به عنوان مثال، حسگرهای ترکیبی مبتنی بر MWCNT و MIP عملکرد بالایی در نمونه‌های واقعی زیستی نشان داده‌اند و توانسته‌اند به کاهش تداخل ترکیبات مزاحم کمک کنند (۹ و ۸). با این حال، در بیش‌تر مطالعات پیشین تنها از یکی از این اجزا مانند ZnO، CNT و MIP به تنهایی یا در ترکیبات ساده استفاده کرده‌اند. در مطالعه حاضر، برای نخستین بار، نانوکامپوزیتی مبتنی بر ZnO، نانولوله‌های کربنی چنددیواره و پلیمر قالب مولکولی سنتز شد و به عنوان ماده اصلاح‌کننده الکتروود در ساخت یک حسگر ولتامتری پالسی تفاضلی (DPV) برای تعیین گزینشی و حساس دوپامین در نمونه‌های واقعی زیستی به کار گرفته شد. این طراحی سه‌جزئی منجر به بهبود کارایی حسگر در سه جنبه حساسیت، گزینش‌پذیری و پایداری شد، و خلا پژوهشی موجود در زمینه حسگرهای انتخابی و قابل کاربرد در نمونه‌های بالینی را پوشش داد.

مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی

دوپامین هیدروکلرید، $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWCNTs)، متاکریلیک اسید، بنزوئیل پراکسید، دی‌اتیلن‌گلیکول دی‌متاکریلات، استونیتریل، نیتریک اسید غلیظ، سولفوریک اسید غلیظ، نیترات روی، هیدروکسید سدیم متانول، اسید استیک، اتانول، استون و سایر مواد مورد نیاز از شرکت‌های معتبر Sigma-Aldrich و Merck آلمان خریداری شدند و در تمامی آزمایش‌ها از خلوص مناسب آزمایشگاهی (Analytical Reagent grade) استفاده گردید.

سنتز نانوکامپوزیت ZnO/MWCNT

مرحله ۱: پیش‌تیمار نانولوله‌های کربنی (اکسایش و

فعال‌سازی سطح)

- به‌منظور ایجاد گروه‌های عاملی (کربوکسیل و هیدروکسیل) بر سطح نانولوله‌ها و افزایش آب‌دوستی آن‌ها، ۱۰۰ میلی‌گرم MWCNT در ۱۰۰ میلی‌لیتر مخلوط اسید نیتریک و اسید سولفوریک (به نسبت ۱:۳ حجمی) ریخته شد.

- محلول به مدت ۶ ساعت در حمام التراسونیک با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد تیمار شد.

- سپس محلول با آب دی‌یونیزه چندین بار شست‌وشو داده شد تا pH به حدود ۷ برسد.

- MWCNT اصلاح‌شده با سانتریفیوژ 10000 rpm به مدت ۱۰ دقیقه جمع‌آوری و در آون ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد (۱۰).

مرحله ۲: سنتز نانوذرات ZnO روی نانولوله‌های

اصلاح‌شده

- مقدار ۰/۵ گرم از $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ در ۵۰ میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه حل شد (محلول A)
- مقدار ۲۰ میلی‌گرم از نانولوله‌های اصلاح‌شده در ۵۰ میلی‌لیتر آب دی‌یونیزه دیگر پراکنده شد (محلول B) و به مدت ۳۰ دقیقه با التراسونیک پراکنده‌سازی شد.
- محلول A به آرامی به محلول B اضافه شد و مخلوط حاصل به مدت ۲ ساعت روی همزن مغناطیسی هم زده شد تا یون‌های Zn^{2+} با سطح نانولوله‌ها برهم‌کنش کنند.

- سپس، محلول ۱ مولار سود قطره‌قطره به مخلوط اضافه شد تا pH محلول به حدود ۱۰ برسد. در این مرحله، تشکیل $Zn(OH)_2$ و سپس تبدیل به ZnO آغاز می‌شود.

- محلول به مدت ۳ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد هم زده شد.

- رسوب حاصل با آب و اتانول چندبار شست‌وشو داده شد، سانتریفیوژ گردید، و نهایتاً در آون ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت خشک شد (۱۰).

مرحله ۳: آسیاب و نگهداری

نانوکامپوزیت ZnO/MWCNT خشک‌شده آسیاب شد تا پودری یکنواخت به‌دست آید. این پودر در ظرف شیشه‌ای در محیط خشک و تاریک تا زمان استفاده نگهداری گردید.

در این روش، نانولوله‌های کربنی به‌عنوان بستر هسته‌زایی رشد نانوذرات ZnO عمل کرده و با افزایش سطح تماس و قابلیت انتقال الکترون، خواص الکتروشیمیایی نهایی نانوکامپوزیت را به‌طور مؤثری بهبود می‌بخشند. پیش‌تیمار اسیدی نیز موجب افزایش

تعامل بین Zn^{2+} و گروه‌های عاملی موجود روی سطح MWCNT می‌شود و منجر به پخش یکنواخت ذرات ZnO روی سطح نانولوله‌ها خواهد شد.

تهیه پلیمر قالب مولکولی (MIP)

برای افزایش گزینش‌پذیری حسگر نسبت به دوپامین در حضور ترکیبات مزاحم، از پلیمر قالب مولکولی (MIP) استفاده شد. در این فرآیند، دوپامین به عنوان مولکول الگو، متاکریلیک اسید (MAA) به عنوان مونومر عملکردی، دی‌اتیلن‌گلیکول دی‌متاکریلات (EGDMA) به عنوان عامل اتصال‌دهنده (cross-linker) و بنزوئیل پراکسید (BPO) به عنوان آغازگر پلیمریزاسیون رادیکالی به کار رفت [۴].

مرحله ۱: تهیه محلول پیش‌پلیمریزاسیون

- مقدار ۰/۱ میلی‌مول از دوپامین هیدروکلرید به عنوان مولکول الگو در ۱۰ میلی‌لیتر استونیتریل حل شد.
- سپس ۰/۴ میلی‌مول از متاکریلیک اسید (MAA) به محلول اضافه و به آرامی به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق هم زده شد تا پیوندهای غیرکوالانسی (نظیر پیوند هیدروژنی و برهم‌کنش یونی) بین گروه‌های عاملی دوپامین و مونومر شکل گیرد.
- پس از آن، ۲ میلی‌مول از EGDMA به عنوان عامل اتصال‌دهنده به محلول افزوده شد.
- در نهایت، ۲۰ میلی‌گرم بنزوئیل پراکسید (BPO) به عنوان آغازگر پلیمریزاسیون رادیکالی افزوده گردید.

مرحله ۲: فرآیند پلیمریزاسیون

- محلول پیش‌پلیمریزاسیون تهیه‌شده در یک ویال شیشه‌ای مهر و موم‌شده ریخته شد.
- ویال در حمام آب گرم به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا فرآیند

پلیمریزاسیون کامل انجام شود و پلیمر قالب‌گیری‌شده (MIP) تشکیل گردد.

- پس از پلیمریزاسیون، ژل پلیمری جامد به دست آمده به صورت مکانیکی خرد و آسیاب شد تا ذرات ریز یکنواخت تولید شود.

مرحله ۳: حذف مولکول الگو (دوپامین)

- به منظور ایجاد حفره‌های شناسایی اختصاصی در ساختار پلیمری، دوپامین جذب‌شده در شبکه پلیمری باید استخراج شود.

- برای این منظور، ذرات پلیمری آسیاب‌شده در مخلوط متانول/اسید استیک (نسبت ۹:۱ حجمی) قرار داده شده و به مدت ۶ ساعت در حمام التراسونیک استخراج انجام شد.

- فرآیند استخراج سه مرتبه تکرار شد تا اطمینان حاصل شود که دوپامین به طور کامل از ماتریس پلیمری حذف شده است.

- پلیمر حاصل پس از استخراج خشک و برای استفاده در اصلاح الکتروود ذخیره گردید.

در فرآیند قالب‌گیری مولکولی، مونومرها به صورت انتخابی پیرامون مولکول هدف (دوپامین) سازمان‌دهی می‌شوند. پس از پلیمریزاسیون و حذف دوپامین، جایگاه‌هایی در ساختار پلیمری باقی می‌ماند که از نظر شکل، اندازه و برهم‌کنش‌های شیمیایی مکمل مولکول دوپامین هستند. این ویژگی باعث می‌شود MIP هنگام استفاده در حسگر، انتخاب‌پذیری بالایی نسبت به دوپامین حتی در حضور ترکیبات مزاحم نشان دهد.

دوپامین به عنوان مولکول الگو، متاکریلیک اسید (MAA) به عنوان مونومر عملکردی و EGDMA به عنوان عامل شبکه‌ای استفاده شدند. پس از

مرحله ۳: لایه‌نشانی پلیمر قالب مولکولی (MIP)

- مقدار ۱ میلی‌گرم از ذرات MIP آسیاب‌شده در ۱ میلی‌لیتر اتانول به آرامی پراکنده شد.

- ۵ میکرولیتر از این سوسپانسیون روی لایه قبلی نانوکامپوزیت روی GCE به روش قطره‌چکانی (Drop Casting) قرار داده شد.

- الکتروده به مدت ۳ ساعت در دمای اتاق خشک گردید تا لایه MIP به خوبی به سطح نانوکامپوزیت متصل شود.

ساخت الکترودهای کنترل

- الکتروده **GCE/MWCNT/ZnO/NIP**: مشابه الکتروده اصلی ساخته شد، با این تفاوت که به جای MIP از پلیمر غیرقالبی (NIP) استفاده شد.

- الکتروده **GCE بدون اصلاح**: به عنوان الکتروده پایه جهت مقایسه اولیه استفاده گردید.

اصلاح لایه به لایه باعث ایجاد ساختاری پایدار و فعال روی سطح الکتروده می‌شود. لایه زیرین (ZnO/MWCNT) باعث افزایش انتقال الکترون و

حساسیت می‌شود، درحالی‌که لایه بالایی (MIP) انتخاب‌پذیری بالا نسبت به دوپامین را تضمین می‌کند. استفاده از Nafion نیز به تثبیت فیزیکی و افزایش رسانایی کمک می‌کند.

کاربرد حسگر در آنالیز نمونه‌های واقعی

برای بررسی کارایی عملی و دقت عملکرد حسگر اصلاح‌شده در شرایط پیچیده زیستی، آزمون‌هایی در حضور نمونه‌های واقعی شامل سرم انسانی و ادرار انسانی انجام شد. در این آزمون، مقادیر مشخصی از دوپامین (در سه سطح مختلف: پایین، متوسط و بالا) به نمونه‌های رقیق‌شده سرم و ادرار افزوده شد و

پلیمریزاسیون، مولکول‌های دوپامین با شست‌وشوی مناسب حذف شدند.

ساخت الکتروده اصلاح‌شده با نانوکامپوزیت**ZnO/MWCNT و پلیمر قالب مولکولی (MIP)**

برای ساخت حسگر الکتروشیمیایی نهایی، ابتدا الکتروده کربن شیشه‌ای (GCE) آماده‌سازی و سپس با نانوکامپوزیت ZnO/MWCNT و در نهایت با MIP اصلاح شد. تمام مراحل در شرایط کنترل‌شده برای حصول لایه نازک یکنواخت انجام شد [۱۲ و ۱۱].

مرحله ۱: آماده‌سازی سطح الکتروده GCE

- الکتروده کربن شیشه‌ای (قطر ۳ میلی‌متر) با استفاده از کاغذ آلومینا با ذرات ۰/۰۵ میکرومتر، به مدت ۲ تا ۳ دقیقه به صورت چرخشی روی صفحه‌ی پولیش تمیز شد تا سطح صاف و صیقلی حاصل شود.

- سپس الکتروده با آب دی‌یونیزه، اتانول و استون به صورت متوالی شسته شد و به مدت ۵ دقیقه در حمام التراسونیک برای حذف آلاینده‌های سطحی قرار گرفت.

- در نهایت با جریان ملایم نیتروژن خشک گردید.

مرحله ۲: اصلاح اولیه با نانوکامپوزیت**ZnO/MWCNT**

- مقدار ۱ میلی‌گرم از نانوکامپوزیت ZnO/MWCNT در ۱ میلی‌لیتر اتانول حاوی ۰/۱٪ Nafion برای افزایش چسبندگی، پراکنده شد و با التراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه یکنواخت‌سازی گردید.

- سپس ۵ میکرولیتر از این سوسپانسیون روی سطح الکتروده GCE تمیزشده قطره‌چکانی (Drop Casting) ریخته شد.

- الکتروده در دمای اتاق در جای تمیز به مدت ۲ ساعت خشک شد تا لایه نانویی نازک تثبیت گردد.

صورت لایه‌ای نازک اطراف نانوکامپوزیت را پوشش داده که نشان‌دهنده موفقیت در تشکیل ساختار MIP است.

طیف XRD

الگوی پراش اشعه X نانوکامپوزیت ZnO/CNT@MIP پیک‌های مشخصی در زوایای $2\theta^\circ$ برابر با حدود 31.7° ، 34.4° ، 36.2° ، 47.5° ، 56.6° و 62.8° درجه نشان داد که با صفحات بلوری (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱)، (۱۰۲)، (۱۱۰) و (۱۰۳) ساختار هگزاگونال ZnO مطابقت دارند (مطابق با استاندارد JCPDS کارت شماره ۳۶-۱۴۵۱). این نتایج بیانگر بلورینگی مناسب نانوذرات ZnO هستند. همچنین پیک ضعیف و پهن در حدود $2\theta^\circ = 26.1^\circ$ مربوط به نانولوله‌های کربنی (CNTs) مشاهده شد. عدم وجود پیک‌های اضافی نیز بیانگر خلوص بالای نانوکامپوزیت است.

طیف FT-IR

طیف FT-IR نانوکامپوزیت ZnO/CNT@MIP حضور گروه‌های عاملی مختلف را تأیید کرد. پیک جذبی در محدوده 3430 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی گروه هیدروکسیل بود. پیک‌هایی در محدوده $2920\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی C-H مشاهده شد. پیک‌های مشخص در محدوده $1700\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ مربوط به گروه‌های C=O و C=C بودند که نشان‌دهنده حضور ساختار پلیمری در کامپوزیت است. همچنین، یک پیک مشخص در محدوده $600\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ مشاهده شد که مربوط به ارتعاش کششی پیوند Zn-O می‌باشد و وجود نانوذرات ZnO را تأیید می‌کند.

بازیابی آن توسط حسگر طراحی شده با روش ولتامتری تفاضلی پالسی (DPV) مورد سنجش قرار گرفت. به‌منظور کاهش تداخل ماتریسی، نمونه‌ها به نسبت مناسب با بافر (pH = 7.0) PBS رقیق شدند.

دستگاه و تکنیک‌ها

ولتامتری پالسی تفاضلی (DPV) با استفاده از دستگاه الکتروشیمیایی Metrohm Autolab B.V., Utrecht, Netherlands در بافر فسفاتی (pH=7.0) انجام شدند.

یافته‌ها

بررسی ساختار نانوکامپوزیت

۱. تصاویر SEM و TEM نشان‌دهنده توزیع یکنواخت ذرات ZnO بر سطح نانولوله‌ها بود. آزمون XRD و FT-IR (شکل ۱) نیز تأییدکننده ساخت موفق نانوکامپوزیت و تشکیل پیوند بین اجزا بود.

۲. تصاویر SEM و TEM

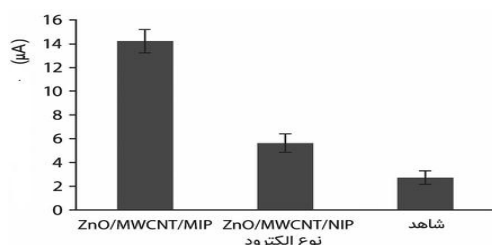
تصاویر SEM نشان‌دهنده ساختاری متخلخل و توزیع یکنواخت ذرات نانوذرات ZnO بر روی سطح نانولوله‌های کربنی بود. ذرات ZnO به صورت کروی با اندازه‌ای در محدوده ۲۰ تا ۴۰ نانومتر مشاهده شدند که به خوبی روی نانولوله‌ها تثبیت شده‌اند. این توزیع یکنواخت می‌تواند منجر به افزایش سطح فعال و بهبود پاسخ الکتروشیمیایی شود.

تصاویر TEM نیز ساختار نانوکامپوزیتی را به‌خوبی تأیید نمود. نانولوله‌های کربنی به صورت رشته‌های توخالی با سطح صاف دیده شدند که نانوذرات ZnO به صورت یکنواخت روی سطح آن‌ها نشسته‌اند. همچنین مشاهده شد که پلیمر قالب‌مولکولی به

افزایش پاسخ جریان اکسایش دوپامین می‌شود. بنابراین، مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که ترکیب ZnO/MWCNT همراه با MIP می‌تواند بهبود قابل ملاحظه‌ای در حساسیت و انتخاب‌پذیری حسگر ایجاد کند و این موضوع یافته‌های فعلی را تقویت می‌کند.

جدول (۱): جریان اکسایش دوپامین در الکترودهای مختلف

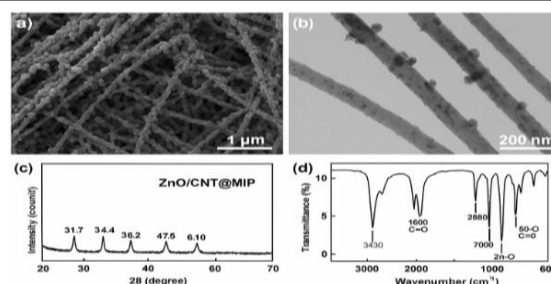
نوع الکتروده	جریان اکسایش دوپامین (μA)	انحراف معیار ($\pm$)
ZnO/MWCNT/MIP	15.8	0.5
ZnO/MWCNT/NIP	3.2	0.3
شاهد	1.5	0.2



شکل (۲): جریان اکسایش دوپامین در الکترودهای مختلف

منحنی کالیبراسیون و حد تشخیص

با استفاده از روش ولتامتری تفاضلی پالسی (DPV)، منحنی کالیبراسیون برای دوپامین (شکل ۳) در بازه غلظتی ۰/۱ تا ۱۰۰ میکرومولار بررسی شد. نتایج نشان داد که رابطه بین غلظت دوپامین و جریان اکسایش به‌طور خطی برقرار است، به‌طوری‌که ضریب همبستگی خطی (R^2) برابر با ۰/۹۹۸ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت و تکرارپذیری بالای سیستم اندازه‌گیری می‌باشد. همچنین، حد تشخیص (LOD) بر اساس نسبت سیگنال به نویز ($S/N=3$) برابر با ۰/۰۸ میکرومولار محاسبه شد که بیانگر حساسیت بالای الکتروده اصلاح‌شده در شناسایی مقادیر کم دوپامین است. مقایسه با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که عملکرد الکتروده اصلاح‌شده حاضر رقابتی و قابل



شکل (۱): (a) SEM, (b) TEM, (c) XRD, (d) FT-IR

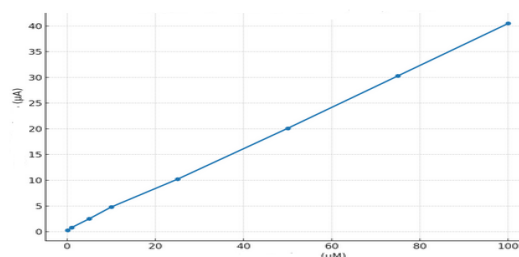
بررسی پاسخ الکتروشیمیایی

الکتروده اصلاح شده با نانوکامپوزیت ZnO/MWCNT/MIP نسبت به الکترودهای شاهد، جریان اکسایش دوپامین قابل توجه و بالاتری نشان داد. (جدول ۱ و شکل ۲) این افزایش جریان ناشی از سطح فعال بالاتر و خواص الکتروشیمیایی بهبود یافته ناشی از حضور ذرات ZnO و نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNT) همراه با پلیمر قالب مولکولی (MIP) است که انتخاب‌پذیری و حساسیت الکتروده را افزایش می‌دهد. در مقابل، الکتروده NIP که فاقد پلیمر قالب مولکولی است، پاسخ مشخص و قابل توجهی به دوپامین نشان نداد که نشان‌دهنده نقش کلیدی MIP در تشخیص انتخابی دوپامین است. نتایج حاضر با گزارش‌های پیشین هم‌خوانی دارد. به‌عنوان نمونه، Chen و همکاران [۷] در حسگری مبتنی بر نانوذرات ZnO با ساختار گل‌مانند، افزایش قابل توجهی در جریان اکسایش دوپامین نسبت به الکترودهای شاهد مشاهده کردند. همچنین، Zhang و همکاران (۴) نشان دادند که استفاده از نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با پلیمر قالب مولکولی می‌تواند به‌طور چشمگیری حساسیت و انتخاب‌پذیری حسگر دوپامین را افزایش دهد. افزون بر این، Wang و همکاران (۶) با ترکیب ZnO و Ti_3C_2 MXene گزارش کردند که حضور نانوساختارهای ZnO موجب بهبود انتقال الکترون و

بازیابی در نمونه‌های واقعی

عملکرد حسگر در نمونه‌های واقعی (سرم و ادرار انسانی) مورد بررسی قرار گرفت. تمامی آزمایش‌ها در حداقل سه تکرار مستقل انجام شد و نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار (SD) گزارش گردید. همچنین تحلیل آماری با استفاده از آزمون t برای مقایسه بین گروه‌ها انجام شد. در نمونه‌های سرم و ادرار انسانی با افزودن مقادیر مشخص دوپامین (جدول ۲)، میزان بازیابی بین ۹۵ تا ۱۰۳٪ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالا، صحت مناسب و نبود تداخل جدی ناشی از ماتریس نمونه در عملکرد حسگر است. این مقادیر بازیابی قابل قبول، توانایی بالای حسگر در شناسایی کمی دوپامین در محیط‌های پیچیده زیستی را تأیید می‌کند و پتانسیل آن را برای کاربرد در آنالیزهای بالینی و پزشکی نشان می‌دهد. بنابراین، حسگر اصلاح‌شده نه تنها در شرایط آزمایشگاهی بلکه در نمونه‌های واقعی انسانی نیز عملکرد پایدار و قابل اعتمادی دارد.

توجه است. به عنوان نمونه، در یک مطالعه با استفاده از نانوکامپوزیت‌های هیبریدی، حد تشخیص ۰/۰۶۷ میکرومولار و بازه ی خطی مشابه گزارش شده است که بسیار نزدیک به نتایج این پژوهش می‌باشد (۱۳). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از نانوساختار Pt-Ag/Graphene، حد تشخیص به حدود ۰/۰۱۲ میکرومولار رسید که حساسیتی بالاتر را نشان می‌دهد (۱۴). با این حال، بسیاری از گزارش‌های دیگر، از جمله مطالعات مبتنی بر ZnO و نانولوله‌های کربنی، حدود تشخیص در محدوده ی چند ده تا چند صد نانومولار ارائه کرده‌اند (۱۵). در این راستا، مقدار ۰/۰۸ میکرومولار به دست آمده در این تحقیق، نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب و قابل قبول الکتروکاتود ZnO/MWCNT/MIP در مقایسه با خانواده حسگرهای مشابه است.



شکل (۳): منحنی کالیبراسیون دوپامین با روش DPV

جدول (۲): بازیابی دوپامین در نمونه‌های واقعی با استفاده از حسگر ZnO/MWCNT/MIP

نوع نمونه	مقدار افزوده شده (μM)	مقدار یافت شده (μM)	بازیابی (%)	انحراف معیار (±SD)
سرم انسانی	1.00	0.98	98.0	2.3
سرم انسانی	10.00	9.87	98.7	1.8
سرم انسانی	50.00	51.55	103.1	2.0
ادرار انسانی	1.00	0.95	95.3	2.5
ادرار انسانی	10.00	10.24	102.4	1.6
ادرار انسانی	50.00	48.7	97.4	2.1

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک حسگر الکتروشیمیایی جدید و کارآمد برای تعیین انتخابی دوپامین در نمونه‌های زیستی طراحی و توسعه داده شد. این حسگر با استفاده از نانوکامپوزیت ZnO/نانو لوله‌های کربنی (CNTs) و اصلاح سطح الکتروود با پلیمر قالب مولکولی (MIP) ساخته شد. آزمون‌های مشخصه‌یابی شامل تصاویر SEM و TEM، الگوی پراش XRD و طیف‌سنجی FT-IR مؤید ساخت موفق نانوکامپوزیت و ایجاد ساختار مناسب قالب‌گیری‌شده در سطح الکتروود بود. الکتروود اصلاح‌شده رفتار الکتروشیمیایی بسیار خوبی از خود نشان داد و در اندازه‌گیری دوپامین در محدوده‌های وسیع با حساسیت بالا عملکرد موفقی داشت. همچنین این حسگر در نمونه‌های واقعی از جمله ادرار و سرم انسانی به کار گرفته شد و نتایج نشان دادند که پاسخ حسگر در ماتریس‌های زیستی واقعی نیز دقیق و قابل اعتماد است. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که این حسگر دارای پتانسیل بالایی برای استفاده در تشخیص بالینی سطوح دوپامین در محیط‌های زیستی است. ترکیب هم‌زمان نانوکامپوزیت‌های ZnO، CNT و پلیمر قالب مولکولی، بستر مناسبی برای طراحی حسگرهای زیستی دقیق، پایدار و حساس فراهم می‌کند. با توسعه بیش‌تر و اعتبارسنجی در شرایط کلینیکی، این سامانه می‌تواند در ابزارهای تشخیصی مدرن مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- of dopamine receptors. *Pharmacological Reviews*, 63(1), 182–217.
- [3] Venton, B. J., & Wightman, R. M., 2003, *Psychoanalytical electrochemistry: dopamine and behavior*. *Current Opinion in Chemical Biology*, 7(5), 728–735.
- [4] Zhang, X., Li, Y., & Wang, J., 2023, A novel dopamine electrochemical sensor based on multiwall carbon nanotubes-cetyltrimethylammonium bromide modified molecularly imprinted polymers. *Microchemical Journal*, 195, 109485.
- [5] Wang, J., 2006, *Analytical Electrochemistry*, 3rd ed., Wiley-VCH.
- [6] Wang, H., Zhang, L., & Sun, Y., 2022, A High-Sensitive Dopamine Electrochemical Sensor Based on Multilayer Ti₃C₂ MXene, Graphitized Multi-Walled Carbon Nanotubes and ZnO Nanospheres. *Microchemical Journal*, 178, 107410.
- [7] Chen, L., Wang, F., & Zhao, H., 2025., A novel electrochemical sensor based on flower-shaped zinc oxide nanoparticles for the efficient detection of dopamine. *Sensors and Actuators. Sensors and Actuators B: Chemical*, 373, 132597.
- [8] Chen, R., Liu, Y., & Zhang, P., 2025, "Rapid and selective detection of dopamine in human serum using an electrochemical sensor based on zinc oxide nanoparticles, nickel phthalocyanines, and carbon nanotubes. *Biosensors and Bioelectronics*, 210, 114211.
- [9] Liu, Y., et al., 2021, Hybrid MIP/nanocomposite sensor for dopamine with enhanced selectivity." *Electrochimica Acta*, 389, 138722.
- [10] Gültekin, D., Alaf, M., & Akbulut, H., 2013., Synthesis and characterization of ZnO nanopowders and ZnO-CNT nanocomposites prepared by chemical precipitation route. *Acta Physica Polonica A*, 123(2), 274–276.
- [11] Vahidifar, M., Es'haghi, Z., Mansoori Oghaz, N., Mohammadi, A. A., & Samadi Kazemi, M., 2022, Multi-template molecularly imprinted polymer hybrid nanoparticles for selective analysis of nonsteroidal anti-inflammatory drugs and analgesics in biological and pharmaceutical samples. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(31), 47416–47435.
- [12] Jiang, J., Wang, X., Qi, H., & Han, Y., 2024, Fabrication of electrochemical sensor

- [1] Missale, C., et al. 1998, Dopamine receptors: from structure to function. *Physiological Reviews*, 78(1), 189–225.
- [2] Beaulieu, J. M., & Gainetdinov, R. R., 2011, The physiology, signaling, and pharmacology

based on molecularly imprinted polymer/zinc oxide nanoparticle-nanocomposite (MIP/ZnO/CPE) for determination of cyanazine in food samples. *Microchemical Journal*, 182, 107957.

[13] Liu, G., Zhang, X., Chen, Y., Wang, H., 2021, Electrochemical Detection of Dopamine and Riboflavine on a Molecularly Imprinted Polymer Modified Electrode, *ACS Omega*, pp. 1371–1378,

[14] Kumar, S., Singh, R., Sharma, P., Gupta, A., 2020, A dopamine electrochemical sensor based on a platinum–silver graphene nanocomposite modified electrode, *RSC Advances*, pp. 11056–11063.

[15] L, Zhao., J, Li., M, Chen., Q, Wang., 2022, A novel dopamine electrochemical sensor based on multiwall carbon nanotubes-cetyltrimethylammonium bromide/nitrogen doped ultra-thin carbon nanosheets, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, Article 131209.

“Research article”

Calculations of Structural and Electronic Properties of Novel Two-Dimensional Planar Aluminum Nitride Allotropes

Behnam Kazempour

Department of Physics, Ah.C., Islamic Azad University, Ahar, Iran.

*Corresponding author: bkazempour@iau.ir

(Received: 17 May 2025, Accepted: 17 August 2025)

Abstract

In this paper, using first principles calculations method based on density functional theory, in order to predict the existence possibility or the ability to synthesize of two-dimensional planar allotropes of aluminum nitride as well as their structural and electronic properties, systematic studies have been done. The investigated systems are included six allotropes in which the atoms of aluminum and nitrogen participate in chemical bonds with sp^2 hybridization. After the structural relaxation, all these allotropes despite the less stable than the famous graphene-like aluminum nitride allotrope, still retain their original structure. The amount of the structural stability of these allotropes depends on the hybridization of constituent atoms and the number density of atoms per their unit cell. Regardless of the structure type and the hybridization of atoms, all these allotrope are semiconductors but the amount and type of energy gap is different for different structures.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Aluminum nitride allotropes, Band structure, Structural and electronic properties; First principles calculations; Density functional theory



"مقاله پژوهشی"

محاسبات خواص ساختاری و الکترونیکی آلوتروپ‌های جدید نیتريد آلومینیوم دوبعدی

بهنام کاظم‌پور

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

* نویسنده مسئول مکاتبات: bkazempour@iaui.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶)

چکیده

در این مقاله، با استفاده از روش محاسبات اصول اولیه مبتنی بر نظریه تابعی چگالی، به منظور پیش‌بینی امکان وجود یا توانایی سنتز آلوتروپ‌های مسطح دوبعدی نیتريد آلومینیوم و همچنین خواص ساختاری و الکترونیکی آن‌ها، مطالعات سیستماتیک و تاثیر این آلوتروپ‌ها در محیط زیست بررسی شده است. از آنجایی که دلیل مساحت سطح بالا و پایداری شیمیایی، نیتريد آلومینیوم در کاربردهای سنجش شیمیایی و بیولوژیکی استفاده می‌شود. سطح آن را می‌توان برای اتصال انتخابی مولکول‌های هدف فعال کرد و امکان تشخیص گازها، مایعات و زیست مولکول‌ها را فراهم کرد. سیستم‌های مورد بررسی شامل شش آلوتروپ هستند که در آن‌ها اتم‌های آلومینیوم و نیتروژن با هیبریداسیون sp^2 و $sp^1 + sp^2$ در پیوندهای شیمیایی شرکت می‌کنند. پس از آزادسازی ساختاری، همه این آلوتروپ‌ها علیرغم پایداری کم‌تر نسبت به آلوتروپ معروف نیتريد آلومینیوم شبه گرافن، همچنان ساختار اولیه خود را حفظ می‌کنند. میزان پایداری ساختاری این آلوتروپ‌ها به هیبریداسیون اتم‌های تشکیل‌دهنده و تراکم تعداد اتم‌ها در هر سلول واحد آن‌ها بستگی دارد. صرف نظر از نوع ساختار و هیبریداسیون اتم‌ها، همه این آلوتروپ‌ها نیمه‌رسانا هستند، اما میزان و نوع شکاف انرژی برای ساختارهای مختلف متفاوت است.

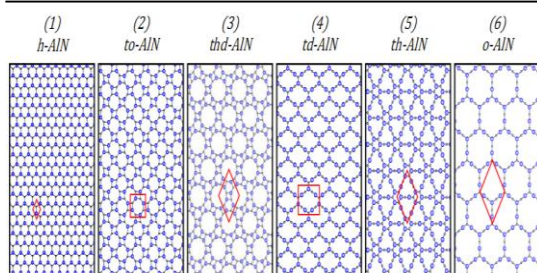
واژه‌های کلیدی: آلوتروپ‌های نیتريد آلومینیوم، محیط زیست، خواص ساختاری و الکترونیکی

مقدمه

کشف تجربی گرافن در سال ۲۰۰۴ (۱) آغاز تحقیقات گسترده در مورد این ماده شگفت‌انگیز با ویژگی‌های غیرمعمول بود. خواص فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و نوری منحصر به فرد و قابل توجه گرافن (۲-۷) در مقایسه با مواد کربنی حجیم، نتیجه برخی محدودیت‌ها در یکی از ابعاد آن است. گرافن یک ساختار مسطح دو بعدی (2D) است که از اتم‌های کربن پیکربندی شده در یک شبکه شش ضلعی لانه زنبوری تشکیل شده است. با این حال، به دلیل اینکه یک شبه فلز است و شکاف باند صفر دارد (۲ و ۱)، از نظر استفاده در برخی از کاربردهای الکترونیکی مانند سلول‌های خورشیدی و حسگرهای گازی محدودیت‌هایی دارد، به همین دلیل برخی از محققان تصمیم به باز کردن شکاف باند آن گرفتند. برای این منظور، تحقیقات نظری و تجربی گسترده‌ای انجام شده است. تأثیرات سودمند نانو لوله‌های آلومینیومی در صنعت دارو سازی و حسگرها، سنسورها و سایر ادوات اپتیکی در تشخیص آلاینده‌گی در محیط زیست به وضوح مشاهده می‌شود (۸). برخی از رویکردهای مختلف مورد بررسی محققان برای باز کردن شکاف باند گرافن عبارتند از: اعمال کرنش‌های مکانیکی (۹)، افزودن ناخالصی‌ها و آلیش به ویژه بور، نیتروژن و فلزات واسطه (۱۰-۱۲)، ایجاد جای خالی در ساختارهای اتمی (۱۳) و برش گرافن در نانوروبان‌های با عرض محدود (۱۵-۱۴)، رویکرد دیگر، حرکت از گرافن به سمت سایر مواد دو بعدی با ساختارهای نزدیک یا مشابه گرافن است. بنابراین، محققان تلاش کردند تا نیمه‌رساناهای دو بعدی جدیدی پیدا کنند که محدودیت‌های گرافن را نداشته باشند. همتایان گرافن

شامل نیتريد آلومینیوم شش ضلعی دو بعدی و نیتريد بور هستند. در واقع، بین مواد مبتنی بر نیتريد آلومینیوم و نیتريد بور و مواد مبتنی بر کربن، تناظر یک به یک وجود دارد. مانند نیتريد بور، مواد مبتنی بر نیتريد آلومینیوم عموماً دارای شکاف‌های باند محدود هستند و نیمه‌رسانا محسوب می‌شوند. نیتريد بور حجیم با ساختارهای مکعبی، ورتزیت و شش ضلعی، نیمه‌رساناهایی با شکاف‌های باند به ترتیب ۵/۱۸، ۵/۸۱ و ۴/۰۷ الکترون‌ولت هستند (۱۷ و ۱۶)، و نیتريد آلومینیوم حجیم با ساختار ورتزیت، نیمه‌رسانایی با شکاف باند وسیع ۶/۳ الکترون‌ولت است (۱۸).

ساختارهای دو بعدی اساس بسیاری از مواد را تشکیل می‌دهند. برخی از مواد سه بعدی از لایه‌های دو بعدی که روی هم چیده شده‌اند، تشکیل می‌شوند. برش در جهات خاصی از ساختارهای دو بعدی مسطح، نانوروبان‌هایی را تشکیل می‌دهد که هنگام لوله شدن و چسبیدن به یکدیگر در لبه‌ها، به نانولوله‌ها تبدیل می‌شوند. بنابراین، مطالعه ساختارهای دو بعدی، راه را برای درک بهتر مواد مبتنی بر این نانولوله‌ها هموار می‌کند. در بسیاری از ساختارهای دو بعدی نیتريد آلومینیوم، اتم‌های آلومینیوم و نیتروژن از طریق هیبریداسیون sp^2 به هم متصل می‌شوند. معمول‌ترین ساختار دو بعدی این ماده، نیتريد آلومینیوم شش ضلعی مانند گرافن است که اتم‌های آن با پیکربندی خاصی روی رئوس یک شبکه لانه زنبوری به یکدیگر متصل می‌شوند. پیکربندی‌های دو بعدی دیگری از اتم‌های آلومینیوم و نیتروژن با هیبریداسیون $sp^1 + sp^2$ نیز می‌توانند در نظر گرفته شوند. با توجه به ملاحظات فیزیکی و شیمیایی، ما با شش آلوتروپ دو بعدی مسطح مختلف جدید از گرافن سروکار داریم. در



شکل (۱): نانو لوله و مشتقات شش گانه آن با اتم‌های آلومینیوم و نیتروژن، توپی‌های آب‌شده و سیاه به ترتیب مشخص‌کننده آلومینیوم و نیتروژن می‌باشد.

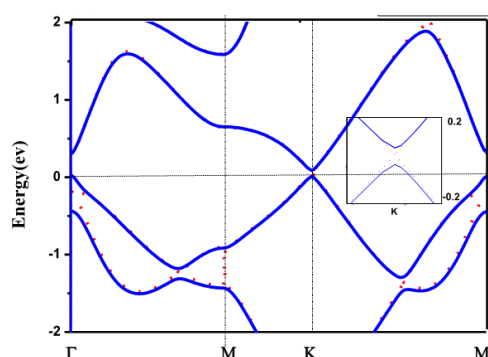
شکل (۱) ساختار دوبعدی آلومینیوم نیتريد نشان می‌دهد که مربوط به ساختار گرافنی است. در این میان، این ساختار کوچکی از آلوتروپ‌های آلومینیوم و نیتروژن می‌باشد. $\{AlN\}$. شکل (۲) آلوتروپی دیگر از این ساختار را نشان می‌دهد که تعداد اتم‌های آلومینیوم و نیتروژن با هم برابر بوده که چهار اتم در الوتروپ $\{Al_2N_2\}$ و هشت اتم در آلوتروپ $\{Al_4N_4\}$ در چرخه مورد نظر دارند. این ساختار آلوتروپی مربعی بوده و دارای چهار اتم آلومینیوم و چهار اتم نیتروژن در چرخه را دارا هستند. شکل (۳-۴) سلول واحد آلوتروپ را با شش آلومینیوم اتمی و شش اتم نیتروژن که در چهار اتم با پیکربندی $\{Al_2N_2\}$ و شش اتم با پیکربندی $\{Al_3N_3\}$ و دوازده اتم با پیکربندی $\{Al_6N_6\}$ در چرخه‌ها را نشان می‌دهد. شکل (۴-۵) ساختار سلول مستطیلی واحد که شامل دوازده اتم یکسان از آلومینیوم و نیتروژن را با پیکربندی $\{Al_6N_6\}$ نشان می‌دهد. دوسوم این ساختار آلوتروپ دارای هیبریداسیون sp^2 و یک سوم دارای هیبریداسیون sp^1 دارا می‌باشد. ما با توجه به تعداد اتم‌ها در چرخه تشکیل آن‌ها در بالا مشخص کردیم و آلوتروپ‌ها از یک تا شش به ترتیب th ، td ، thd ، o ، h ، AlN ، to ، o می‌باشند.

بخش بعد، پس از معرفی روش محاسبه و ساختار هر آلوتروپ، پارامترهای ساختاری آزاد مانند ثابت‌های شبکه، طول پیوندها، پایداری‌های مقایسه‌ای و غیره را محاسبه می‌کنیم. سپس خواص الکترونیکی این آلوتروپ‌ها را بررسی کرده و نوع رسانایی و اندازه و نوع شکاف نواری آن‌ها را تعیین می‌کنیم. نمودارهایی برای ساختار نواری، چگالی حالت‌ها و چگالی بار این آلوتروپ‌ها نشان داده شده است. انتظار می‌رود نتایج این تحقیق در تولید نسل جدید دستگاه‌های الکترونیکی مبتنی بر نیتريد آلومینیوم مفید باشد.

مواد و روش‌ها

سیستم‌های دو لایه یا چند لایه و امثال آن است. در تمام رویکردهای فوق الذکر، شبکه کامل آلومینیوم نیتريد، متشکل از مختصات سه تاییه اتم‌های Al و N در هیبریداسیون sp^2 و آرایش یافته در یک ساختار لانه زنبوری از شش ضلعی‌های $\{Al_3N_3\}$ ، به عنوان ماده پایه به کار رفته است. نانولوله مدل صندلی (۶،۶) که شامل ۴۲ اتم در یاخته بسیط آن می‌باشد و قطر این نانولوله را $8/41$ آنگستروم و فاصله بین لوله‌ها را $3/41$ آنگستروم در نظر می‌گیریم. نانولوله (۶،۶) از نوع نانولوله‌های صندلی وار است و رسانا به حساب می‌آید. شکلی از نحوه قرار گرفتن اتم‌های کربن به صورت مدل صندلی و ابر الکترونی اتم‌ها نشان داده شده است که برای رسم آن از همان نرم‌افزار IVASP استفاده کرده‌ایم. همان طور که مشاهده می‌شود رویهم رفتگی ابر الکترونی نانولوله خالص زیاد است و در ادامه خواهیم دید که با اضافه کردن ناخالصی‌ها چه تغییری در ابر الکترونی مشاهده می‌شود. شکل (۱) مدل اتمی صفحه‌ای دو بعدی را برای آلومینیوم نیتروژن نشان می‌دهد.

نیمرسانای AlN به ترتیب در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): ساختار نواری نیم رسانای AlN.

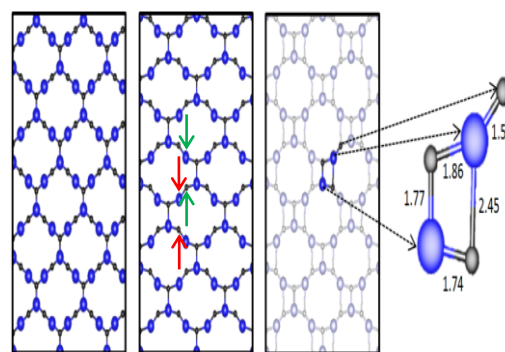
به وضوح مشخص است که نیمرسانای مزبور دارای گاف نواری مستقیم در امتداد نقطه Γ می‌باشد که اندازه آن برای AlN در حدود 2.45 eV بدست آمده است. دلیل اختلاف زیاد گاف نواری با مقادیر تجربی (1.9 eV و 1.77 eV)، به نوع تقریب بکار رفته در جمله تبدیلی - همبستگی مربوط می‌شود، اما مقادیر بدست آمده در مقایسه با دیگر مقادیر تئوری که از روش شبه پتانسیل بدست آمده است کاملاً هم‌خوانی دارد.

محاسبات عددی

بعد از معرفی واهلش ساختاری خواص الکترونی و پایداری آلوتروپ پیشنهادی در شکل (۱) را مورد بررسی قرار دادیم، که بعضی از ویژگی‌ها در جدول (۳) فهرست شده است. در اینجا N تعداد مولکول‌های واحد در سلول یاخته واحد از شکل (۱) می‌باشد. در این جدول انرژی کل $E_0 = E_0/N$ انرژی کل بر واحد تعداد آلوتروپ در ساختار ارائه شده می‌باشد و

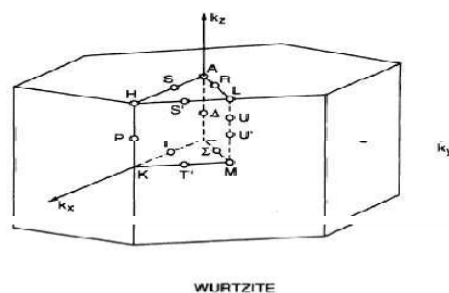
$$E'_0 (\text{eV}) = E'_0(\text{considered allotrope}) - E'_0(\text{allotrope 1})$$

اختلاف انرژی مابین آلوتروپ مورد نظر و آلوتروپ h -AlN می‌باشد. همانطوری که از این جدول مشاهده می‌شود، آلوتروپ‌های ۱ تا ۴



شکل (۵): ساختار هندسی آلوتروپ h -AlN با طول باندهای مربوطه بر حسب آنگستروم

برای محاسبه ساختار نواری نیمرساناهای مذکور لازم است در ابتدا محاسبات خود سازگار انجام گیرد تا انرژی فرمی برای رسم ساختار نواری مشخص شود. نکته مهم بعد از انجام محاسبات خودسازگار، انتخاب مسیر مناسب انتگرال‌گیری در ناحیه کاهش ناپذیر بریلوئن ۲ برای محاسبه نوارهای انرژی می‌باشد. در شکل (۳) مسیر انتگرال‌گیری در فضای وارون برای محاسبات ساختار نواری ساختار ورتسایت مشخص شده که از این مسیر در محاسبات صورت گرفته برای رسم ساختار نواری استفاده شده است.



شکل (۳): مسیر انتگرال‌گیری در منطقه اول بریلوئن برای محاسبات ساختار نواری ساختار ورتسایت

بعد از استخراج داده‌های ضروری، ساختار نواری نمونه‌های مورد مطالعه توسط کد محاسباتی بدست آمده است. نتیجه محاسبات ساختار نواری برای

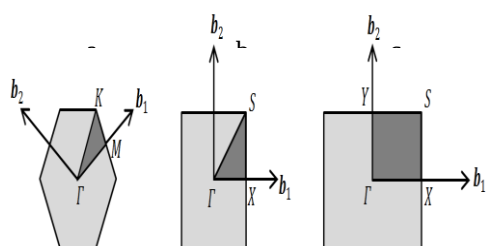
اتم به حجم (منطقه در این مورد) به تعداد بیش‌تری از باندها پایان می‌یابد و بنابراین یک ساختار پایدار تر است. همانطور که در شکل (۱) و جدول (۱) دیده می‌شود، فشردگی سازه‌ها و در نتیجه ثبات آن‌ها از آلوتروپ $h - AlN$ به آلوتروپ شکل شش $o - AlN$ کاهش می‌یابد.

که دارای هیبریداسیون sp^2 می‌باشند، پایدارتر از آلوتروپ‌های $th -$ و $o - AlN$ می‌باشند که دارای هیبریداسیون $sp^1 + sp^2$ هستند.

یکی از عوامل اصلی ثبات در تعداد باندها است که رابطه مستقیمی با تراکم تعداد اتم‌ها در یک سلول واحد دارد. به این دلیل است که نسبت بالاتر از تعداد

جدول (۱): خواص الکترونی آلوتروپ آلومینیوم نیتريد

Allotrope	N	Hybridization	E_0 (eV)	E'_0 (eV)	$\Delta E'_0$ (eV)	$\Delta E'_0$ (%)	Conductivity	E_g (eV)	gap type
(1) $h - AlN$	1	sp^2	-15.16	-15.16	0.00	0.00	Semiconductor	3.05	Indirect
(2) $to - AlN$	4	sp^2	-58.89	-14.72	0.44	2.90	Semiconductor	3.01	Indirect
(3) $thd - AlN$	6	sp^2	-87.64	-14.61	0.55	3.63	Semiconductor	3.05	Indirect
(4) $td - AlN$	6	sp^2	-80.36	-13.39	1.77	11.68	Semiconductor	1.95	direct (Γ)
(5) $th - AlN$	6	$sp^1 + sp^2$	-77.45	-12.91	2.25	14.85	Semiconductor	1.68	Indirect
(6) $o - AlN$	4	$sp^1 + sp^2$	-49.58	-12.40	2.76	18.21	Semiconductor	0.50	direct (Γ)

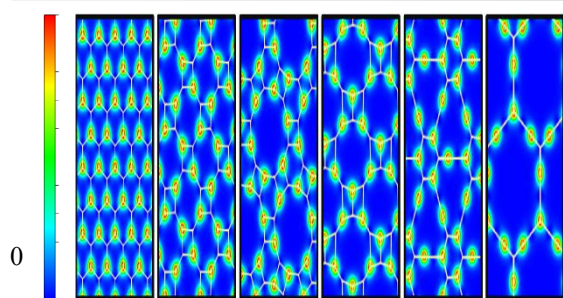


شکل (۵): منطقه اول بریلوئن برای (a) ساختار شش ضلعی (b) ساختار مربعی و (c) ساختار مسطیلی

در شکل (۶) نمودار ساختار نواری (در سمت چپ شکل) و نمودار چالی حالت‌ها (در سمت چپ) نشان داده شده است. در تمامی شکل‌ها مقدار انرژی فرمی به طرف صفر انتقال یافته و توسط خط چین افقی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در تمامی این آلوتروپ‌ها انرژی توسط باند گاف از هم جدا شده اند. بنابراین، باندهای هدایت و باند گاف از هم جدا شده و این آلوتروپ‌ها تماماً نیمه‌رسانا هستند.

در جدول (۱) نوع گاف، تعداد باندهای گاف و حالت‌های هدایت گزارش شده است. از نتایج این جدول مشاهده می‌شود که تمامی آلوتروپ‌ها نیمه-رسانا هستند. در آلوتروپ $td -$ و $o - AlN$ گاف انرژی مستقیم بوده و در نقطه Γ منطقه اول بریلون قرار دارد، در حالی دیگر آلوتروپ‌ها دارای گاف انرژی غیر مستقیم می‌باشند.

شکل (۵) منطقه اول بریلوئن شبکه مستقیم را برای ساختار شش ضلعی، مربعی و مسطیلی نشان می‌دهد. در هر شکل مناطق تیره غیر تکراری مربوط به محاسبات باند بوده و ما این محدوده را مد نظر قرار می‌دهیم. در این شکل‌ها نقاط با تقارن بیش‌تر و ساختار باند مشخص ارائه شده است.



شکل (۷): توزیع چگالی بار دوبعدی در اطراف آلوتروپ‌ها

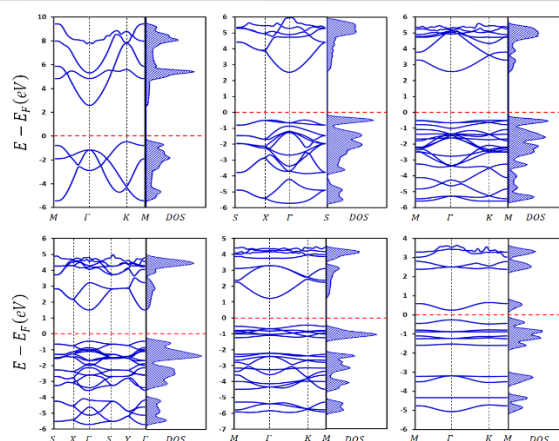
نتیجه‌گیری

در این مقاله، شش آلوتروپ دوبعدی مسطح از نیتريد آلومینیوم معرفی شدند. ما از روش محاسبه اصول اولیه مبتنی بر نظریه تابعی چگالی برای به دست آوردن خواص ساختاری و الکترونیکی برای هر آلوتروپ استفاده کردیم. نکات و نتیجه‌گیری‌های حاصل را

(۱) آلوتروپ‌های $o-AlN$ و $h-AlN$ ساختار شش ضلعی هستند و آلوتروپ‌های $to-AlN$ مربعی هستند، آلوتروپ دارای ساختار $td-AlN$ می‌باشد. (۲) برای آلوتروپ‌های $thd-AlN$ و $h-AlN$ و $td-AlN$ اتم‌های آلومینیوم و نیتروژن در هیبریداسیون sp^2 مشارکت دارند در حالی که برای آلوتروپ‌های در هیبریداسیون $sp^1 + sp^2$ قرار دارند. (۳) حضور تهی جای در ساختار شبکه نانو نوارهای مذکور، خواص مغناطیسی و قطبیدگی اسپینی آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

(۴) مقدار گشتاور مغناطیسی محاسبه شده برای نانونوار آرمچیر یک لایه‌ای مفروض در حضور یک تهیجای برابر $1/53$ مگنتون بوهر است.

(۵) تمامی آلوتروپ‌های معرفی شده نیمه رسانا می‌باشند. آلوتروپ‌های $tdh-AlN$ و $h-AlN$ دارای بیش‌ترین گاف انرژی ($3/5$ الکترون ولت) و



شکل (۶): ساختار نواری (در سمت چپ) و چگالی حالت‌ها (در سمت راست) برای آلوتروپ‌های معرفی شده در شکل (۴۱). انرژی به صفر انتقال شده است.

علاوه بر این، ما مشاهده می‌کنیم که کمینه نوار ظرفیت در تمامی آلوتروپ‌های معرفی شده در نقطه Γ واقع شده است و بیشینه نوار رسانش در مابین نقاط K, X, K, Γ, K قرار دارد. بنابراین، گاف‌های موجود در آلوتروپ‌های $td-AlN$ مستقیم بوده و بقیه آلوتروپ‌ها گاف غیر مستقیم دارند.

از شکل (۷) پراکندگی الکترون‌ها را در اطراف آلوتروپ‌ها نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌کنیم سهم اوربیتال p فلزات واسطه در نوارهای رسانش و ظرفیت (اطراف انرژی فرمی (نسبت به اوربیتال S اتم‌های کالکوزن بیش‌تر است. در شکل ۱ نیز چگالی بار دو بعدی ساختارهای مذکور نشان داده شده است. این طرح‌ها، نحوه توزیع بار در اطراف هر یک از اتم‌ها را به صورت رنگین‌کمانی از آبی برای کم‌ترین مقدار بار (صفر) تا رنگ قرمز برای بیش‌ترین مقدار بار (یک) ارائه می‌دهند. همچنین مشاهده می‌شود، بار اضافی در اطراف یون‌های نیتروژن قرار گرفته‌اند بدین معنی که اتم‌های نیتروژن پذیرنده و اتم‌های آلومینیوم دهنده می‌باشند.

[12] Marinopoulos, A.G., et al., 2004, Ab initio study of the optical absorption and wave-vector dependent dielectric response of graphite. *Physical Review B*, 69(24): p. 245419.

[13] Novoselov, K.S., et al., 2004, Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science*, 2004. 306(5696): p. 666-669.

[14] Haberer, D., et al., 2010, Tunable Band Gap in Hydrogenated Quasi-Free-Standing Graphene. *Nano Letters*, 10(9): p. 3360-3366.

[15] Gierz, I., et al., 2008, Atomic Hole Doping of Graphene. *Nano Letters*, 8(12): p. 4603-4607.

[16] Ryu, S., et al., 2008, Reversible Basal Plane Hydrogenation of Graphene. *Nano Letters*, 8(12): p. 4597-4602.

[17] Kuila, T., et al., 2012, Chemical functionalization of graphene and its applications. *Progress in Materials Science*, 57(7): p. 1061-1105.

[18] Sofo, J.O., A.S. Chaudhari, and G.D. Barber., 2007, Graphane: A two-dimensional hydrocarbon. *Physical Review B*, 75(15): p. 153401.

[19] Savini, G., A.C. Ferrari, and Giustino, F., 2010, First-Principles Prediction of Doped Graphane as a High-Temperature Electron-Phonon Superconductor. *Physical Review Letters*, 105(3): p. 037002.

[20] Einollahzadeh, H., R.S. Dariani, and Fazeli, S.M., 2016, Computing the band structure and energy gap of penta-graphene by using DFT and G0W0 approximations. *Solid State Communications*, 229: p. 1-4.

[21] Shunhong Zhang, J.Z., Qian, W., Xiaoshuang, Ch., 2015, Yoshiyuki Kawazoe and Puru Jena Penta-graphene: A new carbon allotrope. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 112(8): p. 5.

[22] Wu, X., et al., 2016, Hydrogenation of Penta-Graphene Leads to Unexpected Large Improvement in Thermal Conductivity. *Nano Letters*, 16(6): p. 3925-3935.

[23] Stauber, T., J.I. Beltrán, and Schliemann, J., 2016, Tight-binding approach to penta-graphene. *Scientific Reports*, 6: p. 22672.

آلوتروپ‌های $td - AlN$ و $o - AlN$ دارای کم‌ترین گاف انرژی (۰/۵ الکترون ولت) می‌باشند.

منابع

[1] Wang, Z., et al., 2016, Electronic and optical properties of novel carbon allotropes. *Carbon*, 101: p. 77-85.

[2] Coleman, J.N., et al., 2011, Two-Dimensional Nanosheets Produced by Liquid Exfoliation of Layered Materials. *Science*, 331(6017): p. 568-571.

[3] Allen, M.J., V.C. Tung, and R.B. Kaner., 2010, Honeycomb Carbon: A Review of Graphene. *Chemical Reviews*, 110(1): p. 132-145.

[4] Shahrokhi, M., 2016, Quasi-particle energies and optical excitations of ZnS monolayer honeycomb structure. *Applied Surface Science*, 2016., 390: p. 377-384.

[5] Schniepp, H.C., et al., 2006, Functionalized Single Graphene Sheets Derived from Splitting Graphite Oxide. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(17): p. 8535-8539.

[6] Berger, C., et al., 2004, Ultrathin Epitaxial Graphite: 2D Electron Gas Properties and a Route toward Graphene-based Nanoelectronics. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(52): p. 19912-19916.

[7] Nair, R.R., et al., 2008, Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene. *Science*, 320(5881): p. 1308-1308.

[8] Laref, A., et al., 2015, First-principle analysis of the electronic and optical properties of boron and nitrogen doped carbon mono-layer graphenes. *Carbon*, 81: p. 179-192.

[9] Bunch, J.S., et al., 2007, Electromechanical Resonators from Graphene Sheets. *Science*, 315(5811): p. 490-493.

[10] Sun, Z., et al., 2010, Graphene Mode-Locked Ultrafast Laser. *ACS Nano*, 4(2): p. 803- 810.

[11] Shahrokhi, M. and Leonard, C., 2017, Tuning the band gap and optical spectra of silicon-doped graphene: Many-body effects and excitonic states. *Journal of Alloys and Compounds*, 693: p. 1185-1196.

“Research article”

Sedimentary environment and microfacies of Sarvak Formation, Zone 3 in South Azadegan field

Sara Maleki Kheymeh sari^{1*} , Hossein Lotfian Zadeh²

¹Department of Geology, Be.C., Islamic Azad University, Behbahan, Iran

² Department of Geology, Be.C., Islamic Azad University, Behbahan, Iran

*Corresponding author email: Sa.Maleki@iau.ac.ir

(Received: 28 August 2025, Accepted: 30 September 2025)

Abstract

In order to study the Sarvak Formation in Zone 3 of the South Azadegan oil field in the Abadan Plain, 10 cores and 50 thin sections prepared from drilled cores were examined. petrographic analysis led to the identification of seven depositional microfacies. these include lagoonal facies such as miliolid wackestone and benthic foraminifera-bearing packstone/wackestone; barrier facies including benthic foraminifera- and peloid-bearing grainstone, rudist boundstone, and rudist packstone; and open marine facies including pelagic foraminifera (oligosteginid) wackestone and bioclastic echinoid packstone. based on faunal assemblages, the presence of micrite in the sedimentary fabric of most facies, the occurrence of lagoonal, barrier, and open marine facies, and their gradual facies transitions, the depositional model of the Sarvak Formation in Zone 3 of the South Azadegan field has been interpreted as a shallow-water carbonate platform of a homoclinal ramp type. the reservoir quality of the Sarvak Formation is closely related to diagenetic processes. Cementation and compaction are the main processes reducing reservoir quality, whereas dissolution, vuggy porosity, fracture-related porosity, and dolomitization enhance it. lagoonal mud-supported facies, due to dissolution and fracturing, exhibit better reservoir properties. understanding the role of diagenetic processes in reservoir rocks can significantly contribute to evaluating the reservoir quality of the Sarvak Formation in the South Azadegan field.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Microfacies, Depositional environment, Sarvak Formation, South Azadegan oil field



"مقاله پژوهشی"

محیط رسوبی و میکروفاسیس سازند سروک، زون ۳ در میدان آزادگان جنوبی

سارا ملکی خیمه‌سری^{۱*}، حسین لطفیان‌زاده^۲

^۱گروه زمین شناسی، واحد بهبهان، دانشگاه آزاد اسلامی، بهبهان، ایران

^۲گروه زمین شناسی، واحد بهبهان، دانشگاه آزاد اسلامی، بهبهان، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: Email: Sa.Maleki@iau.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸)

چکیده

جهت مطالعه سازند سروک در زون ۳ میدان نفتی آزادگان جنوبی در دشت آبادان تعداد ۱۰ مغزه و ۵۰ مقطع نازک میکروسکوپی از مغزه‌های حفاری گرفته شد. مطالعات میکروسکوپی رخساره‌ها منجر به شناسایی ۷ رخساره رسوبی شده است. این رخساره‌ها عبارتند از محیط‌های لاگونی شامل وکستون حاوی میلیولید و پکستون/ وکستون دارای فرامینفرهای بتتیک، محیط‌های سدی شامل گرینستون حاوی فرامینفرهای بتتیک و پلوئید، باندستون رودیستی و رودیست پکستون و محیط‌های دریای باز شامل وکستون حاوی فرامینفر پلاژیک (الیگوستژنید) و پکستون اکینوئیدی بیوکلاستی شده می‌باشند. بر اساس مجموعه فونی، وجود میکرایت در بافت رسوبی اکثر رخساره‌ها، وجود رخساره‌های لاگون، سد و دریای باز و تغییرات تدریجی رخساره‌ها مدل رسوبی سازند سروک در زون ۳ میدان آزادگان جنوبی پلاتفرم کرناته کم عمق از نوع رمپ هموکلینال شناسایی شده است. کیفیت مخزنی سازند سروک ارتباط نزدیکی با فرآیندهای دیاژنزی دارد. فرآیندهای دیاژنتیکی مانند سیمانی شدن و تراکم باعث کاهش کیفیت مخزنی و فرآیندهای دیاژنتیکی ماندانحلال، تخلخل حفره‌ای، تخلخل حاصل از شکستگی و دولومیتی شدن افزایش دهنده آن بوده است. گل‌پشتیان‌های بخش لاگون به دلیل تاثیر انحلال و شکستگی در آنها، دارای کیفیت مخزنی بهتری هستند. بررسی عملکرد فرآیندهای دیاژنزی بر روی سنگ‌های مخزنی می‌تواند کمک شایانی به شناسایی کیفیت مخزنی سازند سروک در میدان آزادگان جنوبی نماید.

واژه‌های کلیدی: میکروفاسیس، محیط رسوبی، سازند سروک و میدان آزادگان جنوبی

مقدمه

ایران به لحاظ منابع نفتی و گازی به ترتیب مقام سوم و دوم را در جهان به خود اختصاص داده است. یکی از مهم‌ترین این مخازن، مخزن نفتی بنگستان است که پس از مخزن آسماری دومین مخزن تولیدی بزرگ در ایران به شمار می‌آید. سازندهای سروک و ایلام جزء این مخزن هیدروکربوری مهم هستند که از نظر سن در محدوده کرتاسه میانی - پایانی (سنومانین - سانتونین) در حوضه زاگرس نهشته شده‌اند.

حوضه رسوبی زاگرس در مطالعات زمین شناسی ایران و خاورمیانه از جایگاه مهم و ویژه‌ای برخوردار است. به دلیل نفت خیز بودن سازندهای حوضه رسوبی زاگرس به خصوص دوره کرتاسه، مطالعات سنگ شناسی و میکروبیواستراتیگرافی متعدد بر روی آن‌ها انجام شده است.

همچنین شناخت محیط رسوبی، ریز رخساره‌های رسوبی و ویژگی‌های توزیع مخزن برای شناسایی توزیع نفت باقی‌مانده و چاه‌ها حائز اهمیت است. مطالعه ریزرخساره‌ها، تعیین محیط رسوبی، ارائه الگوی محیطی مربوطه در بررسی‌های مخزنی و اکتشاف ذخایر هیدروکربوری اهمیت زیادی دارند. سازند سروک توالی ضخیمی از سنگ‌های کربناته با سن کرتاسه است و یکی از مخازن مهم هیدروکربنی در جنوب غرب ایران محسوب می‌شود (۲).

میدان نفتی آزادگان جنوبی در استان خوزستان، در ۸۰ کیلومتری غرب شهر اهواز و نزدیک به مرز ایران و عراق واقع شده است. این میدان در دشت آبادان قرار گرفته و در سال ۱۳۷۶ توسط اداره اکتشاف شرکت ملی نفت ایران در محدوده‌ای به وسعت ۲۰ × ۷۵ کیلومتر، کشف شد و بزرگترین میدان نفتی ایران

محسوب می‌شود. میدان نفتی آزادگان از شمال در مجاورت میدان مجنون عراق قرار دارد و هیچ رخنمون سطحی ندارد و توسط روش لرزه نگاری دوبعدی شناسایی شده است. مخزن تولید نفت این میدان مشابه با میادین دیگر در منطقه و جنوب عراق است. این میدان همچنین به سمت شمال تا باتلاق حورالعظیم امتداد می‌یابد که منطقه وسیعی را در امتداد مرز ایران و عراق پوشش می‌دهد.

در میدان نفتی آزادگان، سازند سروک با ضخامت بالغ بر ۶۰۰ متر در بین سازند داریان در پایین و سازند ایلام در بالا قرار گرفته است. این سازند متشکل از توالی ضخیمی از سنگ آهک و میان لایه‌هایی از سنگ آهک رسی بوده، بنابراین تغییرات سنگ‌شناسی قابل‌توجهی در آن مشاهده نمی‌شود (۱۸). بالاآمدگی و فرسایش پلت فرم کربناته سروک بالایی در اواخر سنومانین سبب خارج شدن آن از آب و نبود رسوبگذاری در بخش‌هایی از حوضه رسوبی زاگرس و از جمله در منطقه میدان نفتی آزادگان شده است (۱۰). بطوریکه در سازند سروک میدان آزادگان طی اواخر سنومانین گسترش نهشته‌های کانالی گزارش شده است (۱۲).

با مطالعه وضعیت زمین‌شناسی سازند سروک در برش نمونه واقع در تاقدیس بنگستان (۱۵۰ نمونه دستی) در خوزستان و برش سفیدکوه (۵۰ نمونه دستی) در لرستان، ۱۲ میکروفاسیس از وکستون تا گرینستون و باندستون شناسایی گردید که در چهار گروه محیطی دریای باز، سد، لاگون و پهنه جزر و مدی قرار گرفته‌اند (۹).

مطالعه‌ای مبنی بر تحلیل حوضه رسوبی سازند سروک در دو میدان نفتی آزادگان و هندیجان در

جنوب ایران منجر به شناسایی ۴ رخساره رسوبی معرفی شده است که به ترتیب، در بخش عمیق دریای باز، بخش کم عمیق دریای باز، برآمدگی یا سد کربناته و کانال نهشته شده‌اند. شرایط تشکیل هیدروکربور در بخش ۲ و ۳ بهترین حالت بوده است و با توجه به وجود مرز ناپیوستگی در رأس سازند سروک؛ می‌توان وجود تله‌های چینه‌ای را در این دو بخش انتظار داشت (۱۹).

با مطالعه چینه نگاری سکانشی سازند سروک در برش چینه شناسی گل نرگسی، شمال خاوری برازجان از استان بوشهر دو سکانش رسوبی برای نهشته‌های سازند سروک شناسایی شده است. سکانش یک (آلین تا سنومانین) شامل بخش زیرین سازند سروک و بخش بالایی سازند کژدمی و دربرگیرنده رخساره محیط‌های دریای باز و سدی است. سکانش دو (سنومانین) مربوط به بخش بالایی سازند سروک بوده و دارای رخساره محیط‌های لاگون و پهنه‌های جزر و مدی است (۱۶).

مطالعه بایواستراتیگرافی، رخساره‌ها و چینه‌نگاری سکانشی سازند سروک در میدان نفتی اهواز، شمال زون فروافتادگی دزفول منجر به شناسایی ۲۱ جنس و ۱۶ گونه از فرامینیفرهای بنتیک، ۵ جنس و ۶ گونه از فرامینیفرهای پلانکتونیک و ۳ جنس و ۳ گونه از الیگوسترنیدها گردید (۱۵).

مطالعه تاریخچه رسوب گذاری و محیط رسوبی بخش بالایی سازند سروک (کرتاسه) در میدین هیدروکربوری مرکز و جنوب فروافتادگی دزفول، جنوب غرب ایران منجر به شناسایی ۱۴ ریز رخساره رسوبی شده است. این ریز رخساره‌ها در شش مجموعه رخساره‌ای شامل حوضه، رمپ بیرونی، رمپ

میانی، دریای باز، پشته‌های زیرآبی و لاگون محصور شده دسته بندی شده‌اند. بر این اساس، محیط رسوب گذاری سازند سروک در میدان‌های مطالعه شده، رمپ کربناته هم شیب پیشنهاد شده است (۲۰). با مطالعه سازند سروک به سن سنومانین در برخی از چاه‌های میدان نفتی آزادگان در شمال فروافتادگی دزفول در جنوب غرب ایران چهار مجموعه رخساره مربوط به جزر و مد، تالاب، سد و دریای باز شناسایی شده است که نشان می‌دهد که سروک در محیط فلات حاشیه‌دار کربناته نهشته شده است (۵).

مطالعه میکروبیواستراتیگرافی و محیط رسوبی سازندهای سروک و کژدمی در میدان نفتی بهرگانسر منجر به شناسایی چهارده ریز رخساره از سه کمر بند رخساره‌ای شامل محیط‌های باز دریایی، سدی و لاگون شد (۱).

هدف از این مطالعه بررسی محیط رسوبی با تکیه بر خصوصیات میکروفاسیس سازند سروک و عوامل موثر بر این خصوصیات در میدان نفتی آزادگان می‌باشد. بررسی ریزرخساره‌ها، شناسایی محیط رسوبی و تحلیل و تفسیر آن به منظور دستیابی به حداکثر برداشت ذخایر هیدروکربونی از مخازن نفت و گاز، یک ضرورت مهم محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

هدف کلی از این مطالعه بررسی محیط رسوبی با تکیه بر خصوصیات میکروفاسیس سازند سروک و عوامل موثر بر این خصوصیات در میدان نفتی آزادگان جنوبی می‌باشد. منطقه مورد مطالعه بدلیل داشتن کیفیت مخزنی بسیار خوب یکی از منابع هیدروکربنی بسیار مهم کشور محسوب می‌شود و داشتن اطلاعات کافی از محیط و میکروفاسیس قدیمه آن می‌تواند تاثیر

بسیار زیادی در برداشت حداکثری انرژی هیدروکربنی از این میدان داشته باشد.

در این تحقیق از سه روش زیر استفاده شده است:

۱- روش کتابخانه‌ای که شامل موارد زیر است:

الف- بررسی مطالعات پیشین.

ب- گردآوری و مطالعه منابع مرتبط با موضوع پژوهش

۲- روش آزمایشگاهی با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان دو چشمی

۳- استفاده از نرم افزارها که شامل موارد زیر است:

الف) گوگل ارث برای تعیین موقعیت مناطق مورد پژوهش جهت بازدید صحرایی و تهیه عکس هوایی از منطقه

ب) Arc GIS: برای تهیه نقشه جهت موقعیت دسترسی به منطقه

ج) Corel DRAW: برای ویرایش عکس مقاطع میکروسکوپی

در مطالعات تحت الارضی از یکی از چاه‌های سازند سروک در زون ۳ میدان نفتی آزادگان جنوبی تعداد ۱۰ مغزه و تعدادی خرده‌های حفاری برداشت شد و به محیط آزمایشگاه انتقال داده شد و از آن‌ها تعداد ۵۰ مقطع میکروسکوپی تهیه گردید.

نمونه‌های کربناته با کمک میکروسکوپ پلاریزان دو چشمی مورد بررسی قرار گرفتند. پس از شناسایی و تعیین درصد اجزای اسکلتی و غیر اسکلتی، سیمان، ماتریکس، گل و نوع بافت و تخلخل موجود، هر نمونه به روش دانه‌ام (۴) و امبری و کلوان (۶) نام‌گذاری شد و با توجه به اطلاعات به دست آمده نمونه‌ها تقسیم‌بندی و جهت تشخیص رخساره‌های میکروسکوپی، رخساره‌های شناخته شده با ریز

رخساره‌های پیشنهادی فلوگل (۷) مطابقت داده شد تا هم رخساره‌های پیشنهادی بررسی شوند و هم جایگاه آن‌ها در محیط رسوبی به دست آید. سپس مدل رسوب‌گذاری ارائه گردید (۷ و ۲۲).

با این مطالعه می‌توان به تاثیر محیط رسوبی در کیفیت مخزنی و تنوع میکروفاسیس‌های سازند سروک در میدان آزادگان جنوبی پی برد.

نتایج و بحث

در این پژوهش اجزای تشکیل دهنده در مقاطع نازک به دو دسته کربناته و غیر کربناته تقسیم می‌شوند. ارتوکم‌ها شامل میکرایت و اسپارایت بوده و آلوکم‌ها شامل اجزاء کربناته اسکلتی و غیر اسکلتی می‌باشند. اجزاء اسکلتی شامل فرامینفرهای پلاژیک (الیگوسترنید)، بنتیک (میلیولیدها و ...)، خارپوستان (اکینوئیدها) و دوکفه‌ای‌ها (رودیس‌ها) بوده و نیز اجزاء غیراسکلتی شامل پلوئیدها، پلت‌ها و ... می‌باشند (۲۱). رسوبات این سازند دارای بافت‌های بیومیکرایت تا بیواسپارایت در تقسیم‌بندی فولک و بافت‌های وکستون، گرینستون، باندستون و پکستون در تقسیم‌بندی دانه‌ام می‌باشد (۴ و ۸).

اجزای تشکیل دهنده سازند سروک در مقاطع نازک شناسایی و سپس با استفاده از روش دانه‌ام (۴) نام‌گذاری و میکروفاسیس‌های موجود نیز به روش فلوگل (۷) از یکدیگر تفکیک گردیدند.

با مطالعه مقاطع میکروسکوپی سازند سروک در منطقه مورد مطالعه، ۷ ریزرخساره در محیط‌های رسوبی لاگون، سد و دریای باز (به ترتیب کم‌عمق به عمیق) شناسایی شده است.

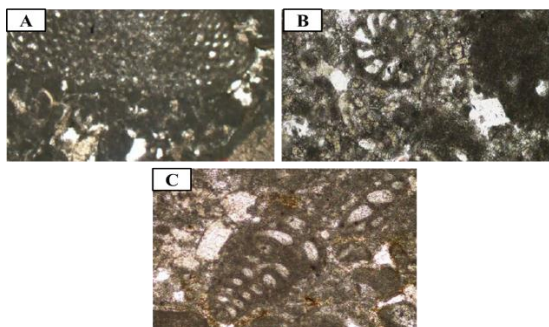
رخساره‌های محیط لاگون

و کستون حاوی میلیولید

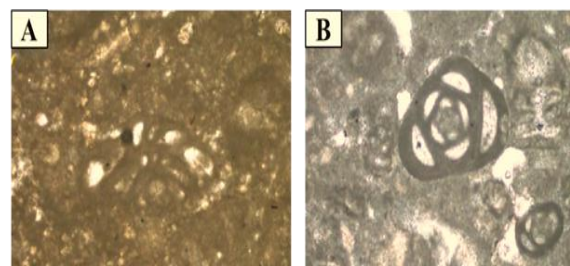
اجزای اصلی این ریز رخساره میلیولید و نزازاتا می‌باشد. پلوئید با فراوانی ۵ درصد از اجزای غیراسکلتی تشکیل‌دهنده این ریز رخساره است. اجزای یادشده در زمینه‌ای از میکرایت قرار دارند و طی دیاژنز، تبلور مجدد یافته و اندازه بلورها درشت‌تر شده است. استیلولیتی شدن از جمله پدیده‌های دیاژنتیکی موجود در ریز رخساره است. این رخساره معادل رخساره RMF9 فلوگل است. وجود میلیولید به عنوان شاخص آب‌های آرام و کم عمق، نیمه شور تا فوق‌العاده شور از عوامل تایید کننده محیط کربناته لاگونی برای برخی از رخساره‌های این مجموعه است (۷).

میلیولیدها در محیط‌های بسیار کم عمق و فوق شور تا کم شور فراوان‌اند اما تا نزدیکی سرایشب هم زندگی می‌کنند و محیط‌های کم تلاطم با بستری از رسوبات دانه‌ریز را ترجیح می‌دهند فراوانی آن‌ها خاص رخساره‌های کولاب غنی از مغذی‌ها و نواحی پشت ریف است (شکل ۱: A,B).

اریتولین می‌باشد و از دیگر اجزای اصلی در این میکروفاسیس پلوئیدها می‌باشند، زمینه سنگ در این رخساره سیمان میکرایت و گل پشتیبان می‌باشد که در بخش‌هایی از مقطع اسپاریتی شده است. فرامینفرها در یک زمینه میکرایت تا میکرو اسپاریت قرار دارند. از اجزای اسکلتی فرعی می‌توان به خرده‌های دو کفه‌ای (روديست) اشاره نمود. فرامینفرهای موجود در این رخساره در محیط‌های نسبتاً عمیق با اکسیژن کم سازگار می‌باشند. تنوع زیاد این مجموعه فونی حاکی از بسترهای نرم و گلی است که از مواد غذایی غنی می‌باشد. این رخساره در بخش میانی رمپ داخلی قرار و در محیطی نسبتاً عمیق‌تر قرار دارند. تنوع فراوان فرامینفرهای بتتیک و همراه بودن منفذهای پورسلانوز با فون‌هایی مانند قطعات دو کفه‌ای نشانگر نهشته شدن این رخساره در لاگون نیمه محصور با چرخش آزاد آب است و قابل مقایسه با میکروفاسیس RMF16 فلوگل می‌باشد (۱۳). حضور قطعات روديست بیانگر این است که این فسیل از رخساره‌های سدی و دریای باز به محیط لاگونی حمل شده است (شکل ۲: A,B,C).



شکل (۲): (A) رخساره پکستون/ وکستون حاوی اریتولین و پلوئید، (B) رخساره پکستون/ وکستون حاوی نزازاتا در زمینه میکرایت و اسپاریت و (C) رخساره پکستون/ وکستون حاوی تکستولاریا به همراه روديست در زمینه میکرایت و اسپاریت و حضور اکسیدهای آهن در اطراف دانه‌ها



شکل (۱): (A) رخساره وکستون حاوی نزازاتا و (B) رخساره فرامینفر حاوی میلیولید با بافت وکستون

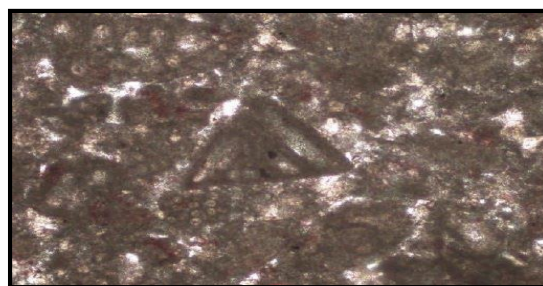
پکستون/ وکستون دارای فرامینفرهای بتتیک

اجزای اصلی اسکلتی این رخساره شامل فرامینفرهای بتتیک از قبیل تکستولاریا، نزازاتا و

رخساره‌های محیط سدی

گرینستون حاوی فرامینیفر بنتیک و پلوئید

اصلی‌ترین دانه تشکیل دهنده این رخساره، پلوئید با فراوانی ۲۵ تا ۳۰ درصد و در اندازه حد ۰/۲ میلی‌متر است. دانه‌های فرعی شامل فرامینیفرهای بنتیک (نظیر میلیولید، تکتولاریا و نزازاتا) با فراوانی کم‌تر از ۱۵ درصد و در اندازه ۰/۴ میلی‌متر می‌باشد. زمینه از اسپاریت تشکیل شده است. در رخساره گرینستون پلوئیدی، حضور فرامینیفرهای بنتیک نظیر (میلیولید و نزازاتا) و حضور پلوئید و ایتراکلاست‌های زاویه‌دار با جورشدگی ضعیف و عدم حضور گل، بیانگر این است که رخساره ذکر شده در بخش‌هایی از محیط سد که در مجاورت لاگون است تشکیل شده و ذرات کربناته غیراسکلتی به این رخساره انتقال یافته‌اند. تعداد گونه‌های فرامینیفرهای بنتیک در دریا‌های باز بیش‌تر از محیط‌های بسته و مردابی می‌باشد (۱۱). فرامینیفرهای بنتیک مشاهده شده در سازند سروک شامل میلیولیده، اربیتولینا، تکتولاریا و نزازاتا می‌باشد (شکل ۳).



شکل (۳): رخساره گرینستون حاوی فرامینیفر بنتیک و پلوئید

باندستون رودیستی

رودیست از فراوانترین اجزای اسکلتی است که در رخساره‌های مربوط به محیط سدی شناسایی شده است. رودیست‌ها معمولاً ساختمان‌های زیستی

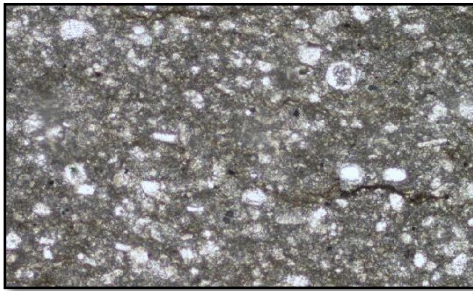
وسیع‌ای ایجاد نمی‌کنند و بصورت توده‌هایی با برجستگی‌های کم دیده می‌شوند. بنابراین ریف‌های که توسط رودیست‌ها ایجاد می‌شود امکان تغییر نیمرخ توپوگرافی حوضه از رمپ به شلف را ندارند. رخساره باندستون رودیستی فقط بصورت ریف‌های پچ مانند محدود (ریف‌های توده‌ای) تشکیل شده و سد بیوکلاستی را تشکیل داده و گسترش زیادی نداشته است. با توجه به نبود گل آهکی در زمینه اکثر رخساره‌های شناسایی شده و فراوانی دانه‌هایی مانند رودیست، این رخساره بیانگر بخش جلویی سد به سمت دریای باز می‌باشد (۷). ویژگی اصلی این رخساره حضور فراوان قطعات رودیست است. اصلی‌ترین دانه این رخساره خرده‌های رودیست با فراوانی ۹۰ درصد و قطر ۲ میلی‌متر است. در نمونه‌های مورد مطالعه زمینه سنگ از اسپاریت تشکیل شده است. این رخساره در محیط‌های با انرژی بالا و جورشدگی ضعیف می‌باشد. بطور کلی رودیست‌ها در ساختن رخساره‌های بیولیتی، کالک آرنایتی و کلسی رودایتی اهمیت خاص دارند و معرف رخساره‌های ریف و بوده و اغلب با مرجان‌ها و جلبک‌ها خصوصاً در دوره کرتاسه همراه می‌باشند (شکل ۴: A).

رودیست پکستون

بخش اعظم این رخساره را قطعات درشت رودیست موجود در زمینه میکریت تشکیل می‌دهند. از فرآیندهای دیاژنزی می‌توان به تراکم، انحلال و تخلخل اشاره نمود. این ریز رخساره دارای جورشدگی و گردشدگی ضعیفی است.

رودیست‌ها در محیط‌های با درجه حرارت بالاتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد و شوری متغیر توسعه و گسترش پیدا می‌کنند، لذا شرایط آب و هوایی در زمان تشکیل

فرامینیفرهای پلانکتونیک مانند الیگوسترینا شاهد محیط‌های عمیق می‌باشد (شکل ۵).

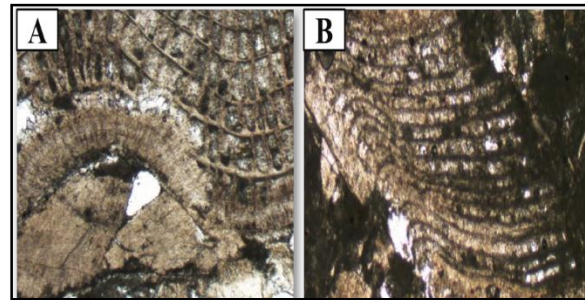


شکل (۵): رخساره فرامینیفر پلاژیک (الیگوسترینا) با بافت وکستون

پکستون اکیئوئیدی بیوکلاستی

اصلی‌ترین دانه تشکیل دهنده این رخساره قطعات اکیئودرم با فراوانی ۵۰ تا ۶۵ درصد و در اندازه حدود ۱ میلی‌متر است. وجود قطعات اکیئودرم بیانگر شرایط رسوب‌گذاری در دریای باز می‌باشند. در کربنات‌های سازند سروک در منطقه مورد مطالعه اکیئوئیدها در اندازه‌های مختلف و به صورت بلورهای کلسیت منفرد و بزرگ که هردانه خاموشی یکنواخت نشان می‌دهد مشاهده می‌شوند. در این سازند همچنین اکیئوئیدها در اندازه‌های مختلف (از حدود ۱ تا ۲ میلی‌متر) مشاهده شده‌اند و در بعضی موارد سیمان هم‌محور اطراف این اکیئوئیدها را فرا گرفته است. اکیئوئیدها دارای صدف سخت و خاردار و بدون ساقه و بازو هستند. صدف آن‌ها از تعداد زیادی صفحات آهکی تشکیل شده که بطور متقارن قرار گرفته‌اند. اکثر خارپوستان دوران دوم و سوم از نوع اکیئوئیدها بوده و کریئوئیدها نسبت به آن‌ها کم‌تر هستند (۲۱) آنچه که از آن‌ها به عنوان فسیل در رسوبات دیده می‌شود در واقع فسیل خار آن‌هاست که به صورت تک بلور در زیر میکروسکوپ دیده می‌شود (شکل ۶: A, B).

رسوبات ناحیه مورد مطالعه گرم و مناسب برای زیست آن‌ها بوده است (۱۴). این ریز رخساره قابل مقایسه با ریز رخساره RMF۹ فلوگل است (شکل ۴: B).



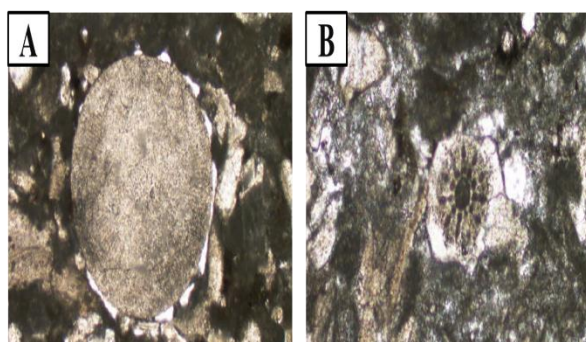
شکل (۴): (A) ریز رخساره بایندستون رودیستی و (B) رودیست پکستون در زمینه میکرایتی

رخساره‌های دریای باز

وکستون حاوی فرامینیفر پلاژیک (الیگوسترینا)

این ریز رخساره از خرده‌های اسکلتی رودیست، اکیئوئید و استراکود در مجموع به میزان ۱۲ درصد تشکیل شده است که در زمینه‌ای از میکرایت و اسپارایت جای گرفته‌اند فرامینیفرهای بتتیک و پلانکتون از اجزای فرعی این رخساره هستند که به مقدار کم‌تر از ۱۰ درصد دیده می‌شوند. فراوانی الیگوسترینا در برخی مقاطع بررسی شده از این ریز رخساره متغیر است. دولومیتی شدن از پدیده‌های دیاژنتیکی موجود در این ریز رخساره است. این ریز رخساره معادل رخساره RMF۵ فلوگل می‌باشد (۷). اصولاً فرامینیفرهای پلانکتون به اعماق بخصوصی از ستون آب تطابق و سازگاری دارند. ذخایر غذایی، درجه حرارت، اکسیژن، نور، شوری، چگالی آب و چرخش آب از عوامل مهم در تجمعات این فرامینیفرهای پلانکتون در اعماق آب هستند. حضور

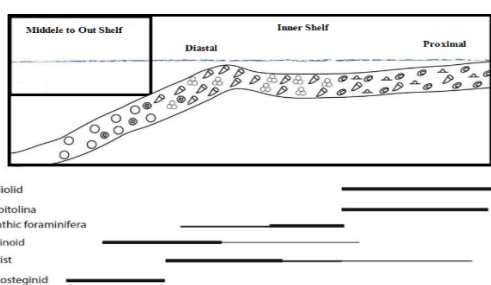
که محیط تشکیل رسوبات این سازند با خشکی آن زمان ارتباط نداشته است. در مجموع براساس مجموعه فونی، وجود میکرایت در اکثر رخساره‌ها، وجود رخساره سد و رخساره‌های لاگون و تغییرات تدریجی رخساره‌ها، مدل رسوبی سازند سروک در زون ۳ میدان آزادگان جنوبی، پلاتفرم کربناته کم‌عمق از نوع رمپ هموکلینال است (شکل‌های ۷ و ۸).



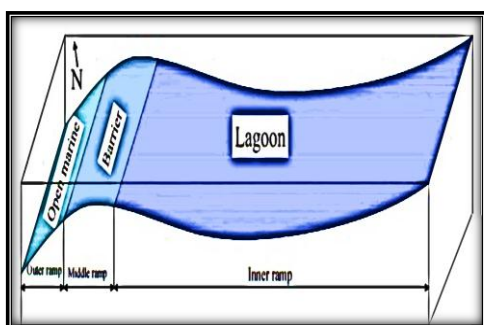
شکل (۶): (A,B) پکستون اکتیوئیدی بیوکلاستی

مدل رسوبی سازند سروک در زون ۳ میدان آزادگان

بر اساس نوع رخساره‌ها، تغییرات عمودی آن‌ها، نوع اجزای اسکلتی و زیر محیط‌های رسوبی تشخیص داده شده در میدان آزادگان و همچنین مقایسه آن با محیط‌های قدیمی و امروزی، مدل رسوبی سازند سروک در ناحیه مورد مطالعه بازسازی شده و مورد تفسیر و تحلیل قرار گرفته است. فرامینفرهای بنتیک در تشکیل پلاتفرم‌های کربناته نقش مهمی ایفا می‌کنند و به عنوان یک ابزار با ارزش برای تعیین عمق نسبی محیط رسوبی و بازسازی محیط‌های قدیمه می‌باشد. لازم به ذکر است که برای انجام این امر از مدل‌های ارائه شده توسط محققین مختلف نیز استفاده شده است (۲۷ و ۲۲). برای سنگ‌های آهکی سازند سروک در برش مورد مطالعه می‌توان یک پلاتفرم کربناته کم‌عمق از نوع رمپ هموکلینال که سه کمر بند رخساره‌ای دریای باز، سد و لاگون در آن قرار دارند پیشنهاد نمود. بدلیل فقدان ساختارهای ریفی پیوسته و بزرگ و عدم وجود ساخت‌های ریزشی نمی‌توان محیط رسوبگذاری سازند سروک را در ناحیه مورد مطالعه به پلاتفرم کربناته حاشیه‌دار نسبت داد و همچنین نبود رخساره‌های پهنه کشندی و تبخیری حاکی از آن است



شکل (۷): الگوی رسوبی سازند سروک در منطقه مورد مطالعه



شکل (۸): مدل رسوبی سازند سروک در زون ۳ میدان آزادگان جنوبی

فراوانی فرامینفرهای بنتیک بدون منفذ (میلولید، نزازاتا و تکستولاریا) در رخساره‌های وکستون/پکستون حاوی فرامینفر بنتیک و وکستون میلولیدی بیانگر رسوبگذاری در محیط لاگونی است. رخساره‌های گرینستونی و باندستونی در محدوده سطح اساس امواج نهشته شده‌اند. همچنین حضور سیمان کربناته حاکی از افزایش انرژی محیط و شسته شدن گل کربناته از محیط می‌باشد. در رخساره پکستون رودیستی و باندستون رودیستی فسیل‌های

رودیستی دیده می‌شود و بیانگر این است که این رخساره در قسمت‌های جلویی سد (رو به دریا) نهشته شده است. و حضور گل بیانگر نهشته شدن این رخساره در محیط با انرژی کم است. همچنین حضور سیمان کربناته حاکی از افزایش انرژی محیط و شسته شدن گل کربناته از محیط می‌باشد (۳). رودیست‌ها به صورت ریف‌های پچ مانند محدود تشکیل شده و سد بیوکلاستی سازند سروک را در میدان مورد مطالعه تشکیل داده است. و حضور گل بیانگر نهشته شدن این رخساره در محیط با انرژی کم است. فراوانی روزن‌داران شناور و الیگوستژنیدها و نبود فونای کفزی، فابریک گل‌پشتیان و نبود بایوکلاست‌های درشت، نشانگر محیط عمیق (دریای باز) هستند. همچنین حضور فرامینفرهای پلاژیک مانند الیگوستژنیدها و گل نشان‌دهنده این است که رخساره وکستون حاوی فرامینفر پلاژیک در یک محیط کم انرژی در زیر خط امواج نرمال در بخش‌های با عمق بیش‌تر دریای باز نهشته شده است. موجودات ریف‌ساز (رودیست) در سازند سروک، سدهای بیوکلاستی پیوسته و گسترده ایجاد نکرده‌اند و همچنین تغییرات تدریجی رخساره‌ها به یکدیگر حاکی از ته‌نشینی در یک رمپ با شیب ملایم است. این رمپ از سه بخش لاگون، سدی و دریای باز تشکیل شده است.

همچنین در این مطالعه رخساره مربوط به پهنه جزر و مدی، تبخیری و ناحیه ژرف دریای باز که مشخصه بارز آن فرامینفرهای پلانکتونیک می‌باشد، مشاهده نگردیده است. در محیط لاگون به دلیل وجود سدهای بیوکلاستی، تنوع کم گونه‌ها، حضور فرامینفرهای بنتیک تایید می‌گردد. بر این اساس، منطقه را از لحاظ

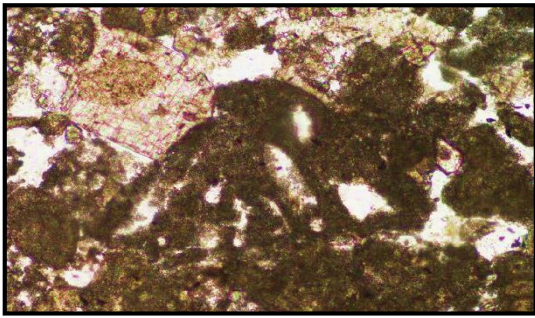
عملکرد انرژی و با توجه به رخساره‌های برجای مانده در محیط، می‌توان به دو بخش آرام و متلاطم تقسیم نمود. بخش نزدیک به سد، که این منطقه نسبت به بخش مرکزی و نزدیک به ساحل، متلاطم‌تر بوده و رسوبات تشکیل دهنده در آن‌ها فابریک دانه پشتیبان داشته و بخش دور از سد با رخساره‌هایی با بافت‌های وکستون/پکستون که عمدتاً شامل فرامینفرهای بنتیک (اریتولین و میلیلید) بوده و شاخص محیط‌های کم انرژی و لاگون می‌باشند.

فرایندهای دیاژنتیکی سازند سروک در زون ۳

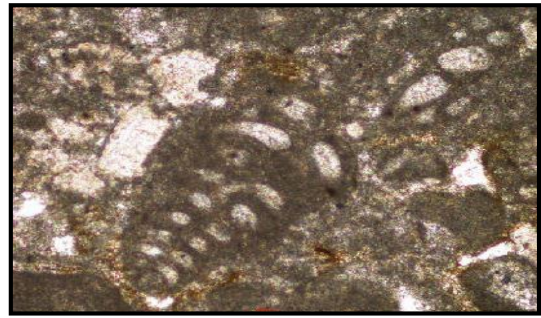
میدان آزادگان جنوبی

دیاژنز عبارتست از کلیه تغییرات شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی که بعد از ته‌نشست اما قبل از دگرگون شدن بر روی رسوبات به وقوع می‌پیوندد. این فرایندها عمدتاً توسط پارامترهای مختلفی نظیر کانی‌شناسی رسوبی، شیمی سیالات درون منفذی، تاریخچه زمین شناسی رسوب نظیر تغییرات عمق، تدفین، بالا آمدگی و تغییرات سطح دریا و آب و هوا کنترل می‌شود (۲۱). مهم‌ترین فرایندهای دیاژنتیکی موثر شناسایی شده در بررسی کیفیت مخزنی سازند سروک در زون ۳ میدان آزادگان جنوبی عبارتند از: سیمانی شدن، تراکم، انحلال، تخلخل حفره‌ای، تخلخل حاصل از شکستگی و دولومیتی شدن.

سیمانی شدن ممکن است باعث کاهش تخلخل و کم شدن تراکم سنگ و یا مانع از پیشرفت تراکم گردد (۷ و ۱۴). بررسی مقاطع نازک نشان می‌دهد که کلسیت اسپاری به صورت سیمان هم بعد بلوکی و رگه‌ای بسیاری از فضاها را خالی بیوکلاست‌ها، حفرات و همچنین شکستگی‌ها را پر می‌کند (شکل ۹).



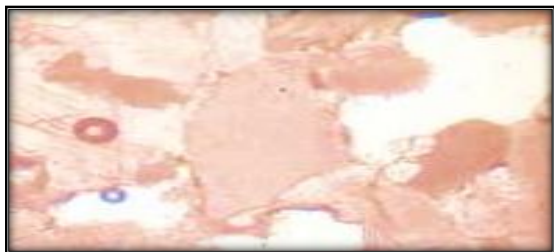
شکل (۱۱): انحلال و پر شدن توسط سیمان



شکل (۹): حفرات فرامینفر بنتیک توسط سیمان پر شده

بسیاری از تخلخل‌های حفره‌ای بر اثر انحلال به وسیله سیالات زیرزمینی غنی از CO_2 ایجاد می‌شوند که باعث بهبود کیفیت مخزنی می‌گردند. اندازه حفره‌های این نوع تخلخل بین ۱ میلی‌متر تا ۱ متر است و اشکال نامنظم دارند و دارای نفوذ پذیری متوسط می‌باشند (۲۱).

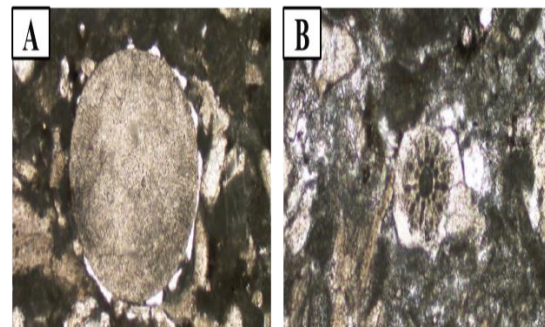
معمول‌ترین نوع تخلخل در مقاطع مطالعه شده تخلخل حفره‌ای است این نوع تخلخل از نظر اندازه بسیار متغیر می‌باشد (شکل ۱۲).



شکل (۱۲): تخلخل حفره‌ای حاصل از انحلال ترکیبات کربناته

تخلخل حاصل از شکستگی در سنگ‌های کربناته بسیار معمول بوده و پدیده‌ای است که بعد از تدفین رسوبات روی می‌دهد. این نوع تخلخل همراه با چین‌خوردگی، گسل‌خوردگی دیپیری شدن نمک‌ها، انحلال نمک‌ها یا افزایش بیش از حد فشار سیالات درون سازندی است (۱۷). تخلخل حاصل از شکستگی نیز در مقاطع مطالعه شده بعد از تخلخل حفره‌ای از فراوانی بالایی برخوردار است (شکل ۱۳).

تراکم از فرایندهای دیاژنتیکی تدفینی بشمار می‌آید که باعث آرایش نزدیکتر دانه‌ها، شکسته شدن بیوکلاست‌ها و در نهایت کاهش تخلخل و حجم کلی سنگ می‌شود (۲۱). (شکل ۱۰: A,B)



شکل (۱۰): تراکم و سیمانی شدن در اطراف دانه‌های اکتوئید

انحلال یکی از پدیده‌های دیاژنتزی شیمیایی می‌باشد و زمانی رخ می‌دهد که در شرایط اسیدیته، فشار بالای گازکربنیک، دمای پایین و فشار هیدرواستاتیک بالا سیالات منفذی از نظر ترکیب نسبت به کانی‌های اطراف خود تحت اشباع باشند. در نتیجه این عمل، تخلخل افزایش می‌یابد (۷). در نمونه‌های مطالعه شده انحلال یکی از فرایندهای متداول می‌باشد که باعث انحلال تمام یا بخشی از بایو کلاست‌ها شده و یا حفره‌ها و کانال‌هایی را ایجاد کرده که بسیاری از آن‌ها توسط سیمان کلسیت هم بعد و یا بلوکی پر شده‌اند (شکل ۱۱).

از بین فرایندهای دیاژنتیکی، سیمانی شدن و تراکم باعث کاهش کیفیت مخزنی و تخلخل حفره‌ای، تخلخل حاصل از شکستگی، انحلال و دولومیتی شدن باعث افزایش تراوایی و بهبود کیفیت مخزنی سازند سروک در منطقه مورد مطالعه شده است. همچنین رخساره‌های گل پشтіیان نسبت به رخساره‌های دان پشтіیان کیفیت مخزنی بهتری دارند.

نتیجه‌گیری

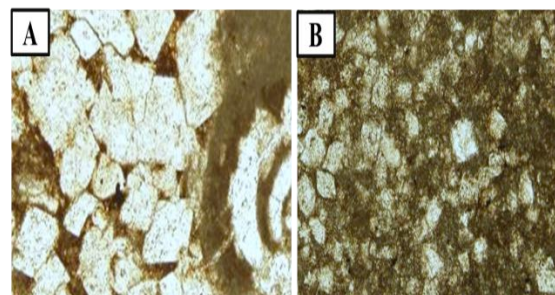
با بررسی‌های سنگ‌شناسی سازند سروک و مطالعات رخساره‌ای بعمل آمده بر روی ۵۰ مقطع نازک حاصل از مغزه‌ها و خرده‌های حفاری در زون ۳ میدان آزادگان جنوبی، از محیط کم‌عمق به عمیق ۷ رخساره در محیط‌های لاگون، سد و دریای باز شناسایی شده است. این رخساره‌ها شامل وکستون حاوی میلیولید و پکستون / وکستون دارای فرامینفرهای بتتیک (محیط‌های لاگونی)، گرینستون حاوی فرامینفرهای بتتیک و پلوئید، باندستون رودیستی و رودیست پکستون (محیط‌های سدی) و وکستون حاوی فرامینفرهای پلاژیک (الیگوسترنید) و پکستون اکیئوئیدی بیوکلاستی (محیط‌های دریای باز) است. با مطالعه مجموعه فرامینفرها، تغییرات تدریجی رخساره‌ها از لاگون به سمت محیط‌های عمیق‌تر سد و دریای باز، فقدان ساختارهای ریفی پیوسته و بزرگ، عدم ساختارهای ریزشی و همچنین نبود رخساره‌های پهنه جزر و مدی و تبخیری‌ها، سازند سروک در یک پلاتفرم کربناته کم‌عمق از نوع رمپ هموکلینال رسوبگذاری شده است. از مهم‌ترین فرایندهای دیاژنتیکی کنترل‌کننده خواص مخزنی سازند سروک در منطقه مورد مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:



شکل (۱۳): تخلخل حاصل از شکستگی به همراه تخلخل حفره‌ای

دولومیت، کربنات مضاعف کلسیم و منیزیم است که عمدتاً با منشاء ثانویه بوده و در اثر جابجا شدن با کلسیت یا آراگونیت تشکیل می‌شود و عواملی چون هیدراسیون یون‌های Mg^{2+} ، فعالیت کم یون CO_3^{2-} ، کشش یونی قوی آب دریا، نرخ رسوب کربنات و حضور SO_4^{2-} و ترکیبات آن در ایجاد این فرآیند نقش دارند (۱۳ و ۲۱).

مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک نشان می‌دهد که دولومیتی شدن در نمونه‌های مورد مطالعه سازند سروک در سطح وسیعی گسترش دارد این فرآیند هم به صورت انتخابی، شکل‌دار، نیمه شکل‌دار و بی‌شکل در اجزاء اسکلتی به ویژه در فرامینفرهای پلاژیک و نیز در زمینه میکریتی به صورت متراکم و پراکنده دیده شده است و باعث افزایش تخلخل و تراوایی می‌شود (شکل ۱۴: A,B).



شکل (۱۴): A,B فرآیند دیاژنتیکی دولومیتی شدن

- [8] Folk, R. L., 1962, Spectral subdivision of limestone types.
- [9] Jalilian, A., 1996, Investigation of microfacies and sedimentary environment of Sarvak Formation in Lorestan and Khuzestan. Tarbiat Moallem University of Tehran, Faculty of Sciences.
- [10] Ghazban, F., 2007, Petroleum Geology of the Persian Gulf: Tehran University Publication, Tehran, 707 p.
- [11] Geel, T., 2000, Recognition of stratigraphic sequences in carbonate platform and slope deposits, Empirical models based on microfacies analysis of paleogene deposits in southeastern Spain: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 155, p. 211-238.
- [12] Honarmand, J., M. Nemati, and Monibi, S., 2009, Geological reservoir study of the Sarvak and Gadvan High Zagros, SW Iran: an outcrop reference model for the Arabian Plate, Geological Society, London, Special Publications; v. 329 (1), p. 187 - 218.
- [13] James, G.a., and Wynd, J.G., 1965, Stratigraphic nomenclature or Iranain oil consortium, agreement area: American Association of Petroleum Geologists Bullten, v. 49, p. 2118-2245.
- [14] Kaufman, J., Cander, H. S., Daniels, L. D., & Meyers, W. j., 1988, Calcite cement stratigraphy and cementation history of the Burlington-Keokuk Formation (Mississippian), Illinois and Missouri. Journal of Sedimentary Research, 58(2), 312-326.
- [15] Kazemzadeh, M., Lotfpour, M., 2015, Biostratigraphy, facies and sequence stratigraphy of the Sarvak Formation in the Ahvaz oil field, north of the Dezful depression zone. Stratigraphic and sedimentological research. Research Journal of Basic Sciences, University of Isfahan.
- [16] Mazdi, M., 2015, Study of microbiostratigraphy, sedimentary environment, microfacies and sequence stratigraphy of the Sarvak Formation in the Gol Nargesi stratigraphic section, northeast of Borazjan (Boshehr Province). Payam Noor University of Fars Province, Payam Noor Center, Shiraz.
- [17] Moore, C. H., 1989, Carbonate diagenesis and porosity. Elsevier.
- سیمانی شدن، تراکم، انحلال، تخلخل حفره‌ای، تخلخل حاصل از شکستگی و دولومیتی شدن. دو مورد اول باعث کاهش تخلخل و تراوایی و سایر موارد باعث افزایش تراوایی و بهبود کیفیت مخزنی سازند سروک در منطقه مورد مطالعه شده است.

منابع

- [1] Ahmadi, S., Vaziri, S. H., Khaksar, K., Jahani, D., & Ali, M. A., 2017, Microbiostratigraphy and sedimentary environment of the Sarvak and Kazhdumi Formations in Bahregansar oil field. International Journal of Geography and Geology, 6(5), 113-122.
- [2] AL-HABSHI, A., DARWISH, A.R., HAMDY, T. and SHEBL, H., 2003, Application of sequence stratigraphy and petrography in preparation of reservoir rock typing scheme in one of Thamama gas reservoirs of onshore Abu Dhabi. SPE paper no. 81533.
- [3] Carannanate. G., Ruberti, D., Sirna, M., 2000, Upper Cretaceous low-energy ramp limestones from the Sorrento Peninsula (southern Apennines, Italy): micro and macrofossil associations and their significance in the depositional sequences. Sedimentary Geology, Vol: 132, p: 89-124.
- [4] Dunham, R. J., 1962, Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: W. E. Ham(ed.)Classification of carbonate rocks,a symposium. Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 1, pp. 108-121.
- [5] Eghtesadi, T., Kohansal Ghadimvand, N., & Taati, F., 2010, Facies analysis, depositional environments and diagenesis of the Sarvak formation in Azadegan oil field. In The 1 st International Applied Geological Congress, Department of Geology, Islamic Azad University Mashad Branch, Iran (pp. 26-28).
- [6] Embery, A. F., Klován. J. E., 1971, A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, Northwest territories: Bulletin of Canadian Petroleum Geology, Vol: 19, P: 730-781.
- [7] Flügel, E., 2010, Microfacies Analysis of Limestones, Analysis Interpretation and Application. Springer-Verlag, Berlin.

- [18] Moti'i, H., 1995, Geology of Iran, Geology of Zagros Oil Volumes 2 and 1, Publications of the Geological Organization of Iran, Plan for compiling the Geology of Iran book, 1010 pages.
- [19] Naserian, Asl, et al., 2014, Analysis of the Sasand sedimentary basin of Sarvuk reservoir in two oil fields in southwestern Iran, National Electronic Conference on New Achievements in Engineering and Basic Sciences, Ardabil.
- [20] Sobhani Foroshani, S, et al., 2021, Sedimentation-diagenesis history and sequence stratigraphy of the upper part of the Sarvak Formation (Cretaceous) in the hydrocarbon fields of the center and south of the Dezful depression, southwest Iran, Journal of Applied Sedimentology.
- [21] Tucker, M. E., & Wright, P., 1990, Carbonate Sedimentology. Blackwell Scientific Pub., Oxford, 482p.
- [22] Wilson, J.L., 1975, Carbonate facies in geological History, Springer- Verlag, New York, 471 pp.