



"مقاله مروری"

آرایه‌های میکروسوزن: مروری بر اصول، کاربردها و پیشرفت‌های اخیر

نوشین داداش‌زاده^{۱*}، الناز پوررضا^۲، ناصر مصلحی میلانی^۳

^۱ استادیار، گروه آموزشی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارس، شهر جلفا، ایران
^۲ دکتری برق، گروه آموزشی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارس، شهر جلفا، ایران
^۳ استادیار، گروه آموزشی فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، شهر اهر، ایران
* نویسنده مسئول مکاتبات:

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸)

چکیده

آرایه‌های میکروسوزن ابزارهای نوآورانه‌ای هستند که از سوزن‌های ریز در ابعاد چند ده میکرون تا چند میلی‌متر تشکیل شده‌اند. این ریزساختارها که از مواد مختلفی مانند فلزات، پلیمرها، سرامیک‌ها و مواد زیست‌سازگار ساخته می‌شوند، کاربردهای گسترده‌ای را در زمینه‌های مختلف پزشکی به ارمغان آورده‌اند. آرایه‌های میکروسوزن‌ها با نفوذ به لایه‌های بالایی پوست یا بافت‌های دیگر، روش‌های نوینی را برای انتقال دارو، واکسیناسیون، نمونه برداری و تشخیص بیماری‌ها ارائه می‌دهند. در این مطالعه تلاش شده است با بهره‌گیری از تحقیقات روز دنیا و جزئیات بیشتر، اطلاعات دقیق‌تری را درباره میکروسوزن‌ها و کاربردهای آنها در حوزه‌های زیبایی‌شناسی، پزشکی و سایر زمینه‌ها بدست آید. به علاوه، نقاط ضعف و چالش‌هایی که در استفاده از این فناوری وجود دارد نیز بررسی و تحلیل می‌شوند تا در آینده بتوانیم از میکروسوزن‌ها بهره بیشتری ببریم و نقاط قوت آنها را بهبود دهیم. همچنین، بررسی دقیق‌تر و دسته‌بندی بهتر انواع میکروسوزن‌ها و تأثیرات آنها بر روی پوست و بافت‌های تحت تأثیر آنها نیز به دلیل اهمیت‌شان در استفاده از این فناوری صورت خواهد گرفت. در نهایت با ترکیب داده‌ها و نتایج بدست آمده راهکارهای بهبود و ارتقای استفاده از میکروسوزن‌ها و توسعه‌ی کاربردهای جدید در این حوزه ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: آرایه میکروسوزن، انتقال پوستی دارو، میکروسوزن جامد، میکروسوزن خالی، میکروسوزن متخلخل، میکروسوزن قابل حل، میکروسوزن متورم

مقدمه

یکی از مهم‌ترین کاربردهای میکروسوزن‌ها، دارورسانی است. با استفاده از میکروسوزن‌ها، می‌توان داروها را به صورت موضعی و مستقیم به بافت هدف رساند که این امر منجر به افزایش کارایی دارو و کاهش عوارض جانبی می‌شود. همچنین میکروسوزن‌ها در تشخیص بیماری‌ها، واکسیناسیون و مهندسی بافت نیز کاربرد دارند (۳). به دلیل مزایای فراوان میکروسوزن‌ها، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه در حال انجام است و پیش‌بینی می‌شود که در آینده از این فناوری در درمان بسیاری از بیماری‌ها استفاده شود. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در فناوری نانو، انتظار می‌رود که میکروسوزن‌ها در آینده با ویژگی‌های بهتر و کاربردهای متنوع‌تری تولید شوند.

تاریخچه و توسعه آرایه‌های میکروسوزن

ایده استفاده از سوزن‌های ریز برای نفوذ به پوست و انتقال دارو یا مواد دیگر به بدن، سابقه‌ای دیرینه دارد که ریشه در خلاقیت و نوآوری بشر در زمینه درمان بیماری‌ها دارد. در طول سال‌ها، مفاهیم میکروسوزن از استفاده از سوزن‌های بزرگ به طراحی مدرن امروزی میکروسوزن‌ها تکامل یافته است. در سال ۱۹۰۵، دکتر ارنست کرومایر، متخصص پوست آلمانی، با استفاده از مته‌های دندانپزشکی با اندازه‌های مختلف که توسط موتور کار می‌کردند، به درمان جای زخم، لک‌های تیره و سایر بیماری‌های پوستی پرداخت (۴). اولین سند مکتوبی که به استفاده از میکروسوزن اشاره می‌کند در سال ۱۹۲۱ توسط چمبرز نوشته شد که در آن سوزنی را به هسته‌ی تخم مرغ تزریق کرد (۵). در دهه‌ی ۱۹۶۰، تزریق دارو به لایه شاخی مورد توجه قرار گرفت (۶). پس از آن، مفهوم میکروسوزن در دهه

پوست بزرگ‌ترین عضو بدن است و به عنوان یک مانع بیولوژیکی قوی عمل می‌کند که از ورود بیماری‌های عفونی و مواد مضر به بدن جلوگیری می‌کند. با این حال این مانع، جذب موثر داروها از طریق پوست را نیز دشوار می‌کند. پوست از سه لایه متمایز تشکیل شده است: کوتیکول: لایه بیرونی مرده که از کراتینوسیت‌های مرده و ماتریکس بین سلولی تشکیل شده است. اپیدرم زنده: لایه داخلی که مسئول تشکیل کوتیکول است. درم: لایه عمیق‌تر که شامل رگ‌های خونی و انتهای عصبی است. استراتوم کورنئوم (لایه بیرونی) به عنوان مانع اصلی جذب دارو عمل می‌کند. این لایه به دلیل ساختار متراکم خود، عبور داروها را بسیار دشوار می‌کند (۱).

آرایه‌های میکروسوزن‌ها ابزارهایی هستند که برای انتقال دارو از طریق پوست استفاده می‌شوند. نوک این ابزارها در مقیاس میکرومتر است و به شکل پچ میکروسوزنی^۱ با آرایه‌های متعددی از سوزن‌ها به طول ۲۵ تا ۲۰۰۰ میکرومتر ارائه می‌شوند (۲). میکروسوزن‌ها، ساختارهای بسیار ریزی هستند که عمدتاً در حوزه پزشکی و زیست‌شناسی برای انتقال مواد به داخل بافت‌ها یا نمونه‌برداری از آن‌ها استفاده می‌شوند. این ابزارها معمولاً به صورت آرایه‌ای از سوزن‌های بسیار ریز ساخته می‌شوند که می‌توانند در اندازه، شکل و جنس متفاوت باشند. میکروسوزن‌ها به دلیل ابعاد بسیار کوچک خود، قادرند بدون آسیب رساندن به بافت‌ها، مواد را به صورت دقیق و هدفمند به داخل سلول‌ها انتقال دهند یا از آن‌ها نمونه‌برداری کنند.

^۱ Microneedle patch

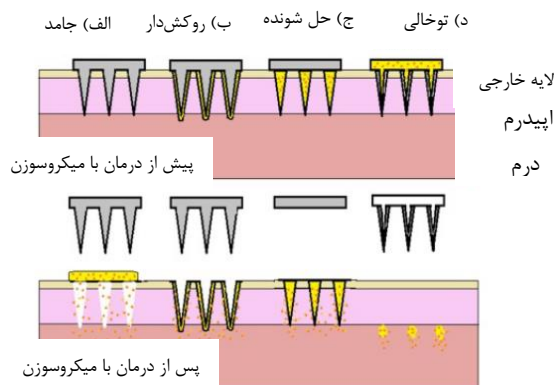
تخریب‌پذیر، آرایه‌های میکروسوزن‌هایی با اشکال، اندازه‌ها و ویژگی‌های مختلف طراحی و ساختند. این تنوع در طراحی، امکان استفاده از آن‌ها برای انتقال طیف وسیعی از داروها، واکسن‌ها و مواد آرایشی را فراهم کرد.

میکروسوزن‌های جامد، روکش‌دار، توخالی، قابل حل و هیدروژل‌ساز همگی انواع مختلفی از میکروسوزن‌ها هستند. علاوه بر این، روش‌های ساخت متفاوتی مانند لیزر، لیتوگرافی، میکرو تزریق قالب‌گیری و غیره وجود دارد. این اکتشافات منجر به اولین گزارش‌های استفاده از میکروسوزن قابل حل برای انتقال داروی پوستی در سال ۲۰۰۵ شد (۱۳). به تازگی، روش‌های ساخت افزایشی برای ساخت قالب‌های میکروسوزن به منظور ارائه راه‌حل‌های کم‌هزینه برای ساخت میکرو قالب‌ها توسعه یافته است (۱۴). گزارش‌هایی که نشان‌دهنده استفاده از چاپگرهای سه بعدی موجود در بازار برای ساخت قالب اصلی میکروسوزن است، عصر جدیدی را برای ساخت دستگاه و امکانات ساخت سفارشی با حجم بالا برای میکروسوزن‌ها به ارمغان آورده است (۱۵). احمد و همکاران به طور انتقادی فرآیندهای مختلفی را که از طریق آن‌ها میکروسوزن‌ها را می‌توان برای بهینه‌سازی بازده زایمان پوشش داد بررسی کردند (۱۶). نشان داده شده است که رویکرد میکروسوزن در چنین زمینه‌هایی منجر به عملکرد قابل مقایسه یا در برخی موارد برتر از تزریق‌های زیر جلدی و عضلانی معمولی می‌شود (۱۷).

در حال حاضر، تحقیقات بر روی توسعه آرایه‌های میکروسوزن‌های هوشمند و چند منظوره با قابلیت

۱۹۷۰ معرفی شد (۷). با این حال این مفهوم تا دهه‌ی ۱۹۹۰ به صورت تجربی نشان داده نشد (۸). در سال ۱۹۷۹ اولین سیستم انتقال پوستی برای استفاده با اعمال یک چسب سه روزه برای درمان بیماری حرکت، مورد تایید قرار گرفت (۹). در سال ۱۹۹۴، اورنترایش عمل جراحی زیرپوستی را انجام داد که در آن یک سوزن زیرپوستی سه لبه را برای آزاد کردن رشته‌های فیبری وارد پوست کرد (۱۰). این عمل جراحی روی نواقص پوستی زیر پوست که باعث ایجاد چین و چروک می‌شد متمرکز بود. اولین میکروسوزن برای انتقال پوستی در سال ۱۹۹۸ پیشنهاد شد و از ویفرهای سیلیکونی از طریق حکاکی یونی و لیتوگرافی ساخته شد (۱۱). این مطالعه به استفاده از میکروسوزن‌های میکروساخت برای افزایش انتقال دارو از طریق پوست اشاره کرد. این مقاله منجر به تحقیقات گسترده‌ای در زمینه میکروسوزن شد. مواد مختلفی مانند شیشه، سرامیک، فلز و پلیمر برای ساخت میکروسوزن‌ها معرفی شدند. در سال ۲۰۰۴، از یک آرایه‌ی میکروسوزن برای ایجاد سوراخ‌هایی در پوست برای انتقال داروی پوستی استفاده شد (۱۲) که منجر به بررسی چندین روش ساخت برای اهداف انتقال دارو از طریق پوست^۲ (TDD) گردید. پیشرفت تکنولوژی‌های میکروساخت، ساخت آرایه‌های میکروسوزن‌ها با دقت و ظرافت بسیار بیشتر را امکان‌پذیر کرد. این امر به توسعه نسل جدیدی از آرایه‌های میکروسوزن با قابلیت‌های بیشتر و کاربردهای متنوع‌تر در حوزه‌های مختلف پزشکی و زیبایی منجر شد. در این دوره، دانشمندان با استفاده از مواد مختلفی مانند فلزات، پلیمرها و مواد زیست

² Transdermal Drug Delivery



شکل (۱): انواع مختلف میکروسوزن‌ها: الف) میکروسوزن‌های جامد با رویکرد سوزن زدن با پیچ برای پیش‌درمانی پوست استفاده می‌شوند. ب) میکروسوزن‌های متخلخل از رویکرد روکش و سوزن زدن استفاده می‌کنند، جایی که روکشی از محلول دارو روی سطح سوزن اعمال می‌شود. ج) میکروسوزن‌های حل‌شونده از پلیمرهای زیست‌تخریب پذیر ساخته شده‌اند. د) میکروسوزن‌های توخالی با محلول دارو پر شده و دارو را در درم رسوب می‌دهند (۱۸).

این روش شبیه به غلتک‌های درم ابریژن مورد استفاده در درمان‌های آرایشی است که توجه تنظیم‌کننده‌های مرتبط با انتقال عوامل بیماری‌زا از طریق خون و مایعات بدن را به خود جلب کرده است. طرح‌های جدیدتر بر روی پوشش آرایه‌های سوزنی با مواد درمانی متمرکز شده‌اند. هنگامی که چسب اعمال می‌شود، سوزن‌ها لایه شاخی^۴ (SC) پوست را سوراخ می‌کنند و به مولکول‌های دارو اجازه می‌دهند تا به سادگی در بافت اطراف حل شده و میکروسیرکولاسیون منتشر شوند. دوز انتقالی در نهایت به ناحیه تحت پوشش میکروسوزن‌ها بستگی دارد و بنابراین بازده بالقوه محدود خواهد بود. استفاده از میکروسوزن‌های پوشش‌داده شده جایگاه ویژه‌ای در تحویل عوامل با

کنترل نفوذ و انتشار دارو متمرکز شده است. این نوع آرایه‌های میکروسوزن می‌توانند بر اساس نیازهای خاص بیمار و نوع دارو، میزان نفوذ و سرعت انتشار دارو را کنترل کنند. میکروسوزن‌ها به عنوان ابزاری نوین در حوزه پزشکی، پتانسیل‌های بسیار زیادی در زمینه‌های مختلف درمانی، از جمله: انتقال داروهای با وزن مولکولی بالا، درمان بیماری‌های مزمن مانند دیابت و آرتریت، ارائه واکسن، رساندن مواد مغذی به پوست، درمان بیماری‌های پوستی و بسیاری موارد دیگر را دارند.

با توجه به پیشرفت‌های روزافزون در زمینه فناوری‌های میکروساخت و مواد، انتظار می‌رود که در آینده شاهد توسعه و کاربرد گسترده‌تر آن‌ها در حوزه‌های مختلف پزشکی و زیبایی باشیم. آرایه‌های میکروسوزن‌های هوشمند با قابلیت‌های پیشرفته، می‌توانند انقلابی در زمینه انتقال دارو و درمان بیماری‌ها ایجاد کنند.

انواع آرایه‌های میکروسوزن

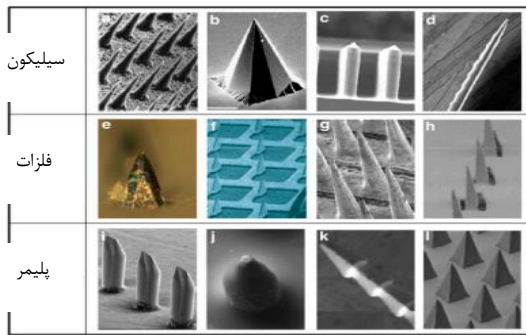
آرایه‌های میکروسوزن بر اساس نوع ساختار به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند شکل (۱).

میکروسوزن‌های جامد^۳

میکروسوزن‌های جامد ساخته شده از سیلیکون، تیتانیوم یا فولاد ضد زنگ جزو اولین مواردی بودند که برای استفاده در سیستم‌های دارورسانی مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۲) (۱۹). این میکروسوزن‌ها به وسیله چسب جداگانه یا با استفاده از ابزارهای پانچ یا غلتکی که معمولاً به آن‌ها اشاره می‌شود، روی پوست اعمال می‌شوند.

⁴ stratum corneum

^۳ Solid Microneedles



شکل (۲): میکروسوزن‌های جامد ساخته شده از سیلیکون، فلزات و پلیمر (۱۷).

میکروسوزن‌های توخالی^۶

میکروسوزن‌های توخالی برای انتقال دارو از مخزنی درون پیچ به سیستم گردش خون میکروسکوپی^۷ ساخته شده‌اند و می‌توانند تا ۲۰۰ میکرولیتر دارو را منتقل کنند. عملکرد این سیستم در بسیاری از جنبه‌ها شبیه سرنگ‌های زیرپوستی (هیپودرمیک) معمولی است (۲۳). میکروسوزن توخالی از طراحی با محفظه‌ی توخالی تشکیل شده است که در آن مایع دارو تزریق می‌شود (شکل ۳) (۱۸). در مقایسه با میکروسوزن توپر، میکروسوزن توخالی می‌تواند دوز زیادی از محلول دارو را تحمل کند (۲۴). میکروسوزن توخالی همچنین قابلیت انتقال دارو به اپیدرم یا درم زنده را دارد که برای ترکیبات با وزن مولکولی بالا مناسب است (۲۵). علاوه بر این، انتشار دارو را در طول زمان کنترل می‌کند که آن را برای استفاده با فرمولاسیون واکسن مایع مناسب می‌کند (۲۶). برخلاف میکروسوزن‌های توپر که عمدتاً داروها را بر اساس شیب اسمزی دفع می‌کنند، میکروسوزن‌های توخالی یک سیستم انتقال داروی فعال هستند که بر اساس یک مخزن داروی بدون فشار، کانالی برای انتشار دارو به درم ایجاد می‌کنند.

مشخصات بازده پایین و قدرت بالا (یعنی مواد آنتی ژنیک/RNA) پیدا کرده است. بهره‌برداری از میکروسوزن‌ها به‌عنوان یک سیستم تحویل واکسن بسیار مناسب است زیرا جمعیت قابل‌توجهی از سلول‌های ارائه‌دهنده آنتی‌ژن^۵ (APCs) در لایه‌های بیرونی پوست وجود دارد که پاسخ ایمنی قوی را از تحویل مقادیر کمی از مواد ایمنی‌زا ممکن می‌سازد (۲۰). مهم‌تر از همه، این رویکرد به طرز ماهرانه‌ای از بسیاری از نگرانی‌های ایمنی مرتبط با سوزن‌های معمولی زیر پوستی جلوگیری می‌کند و از مسائل مربوط به سوزن‌هراسی در بیماران جلوگیری می‌کند. مورد دوم می‌تواند به ویژه هنگام در نظر گرفتن واکسیناسیون کودکان خردسال مهم باشد و مطالعات متعددی در مورد مقایسه ترجیح پیچ نسبت به سیستم‌های سوزنی معمولی انجام شده است. میکروسوزن جامد در مقایسه با تزریق داخل عضلانی برای انتقال واکسن مناسب است زیرا ماندگاری بیشتری دارد و پاسخ آنتی‌بادی قوی‌تری ایجاد می‌کند (۲۱). یک نکته جالب این است که فرض شده است که پیچ‌های خود تجویز می‌توانند جذب واکسیناسیون را بهبود بخشند. این ادعا در یک مطالعه اخیر تأیید شده است که در آن در دسترس بودن دومی در مقایسه با حالت‌های تزریق استاندارد، تمایل به واکسینه شدن را از ۴۴٪ به ۶۵٪ افزایش می‌دهد (۲۲).

⁷ Microcirculation

⁵ Antigen-Presenting Cell

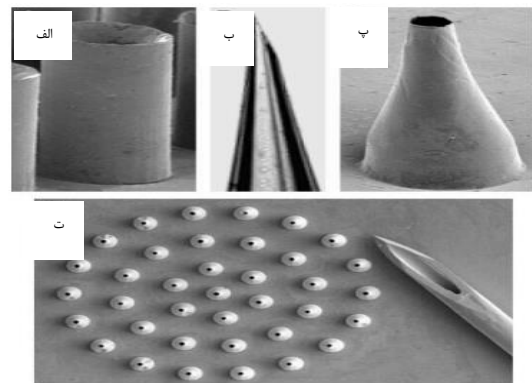
⁶ Hollow Microneedles

تصویربرداری شده‌اند. (الف) میکروسوزن فلزی با دیواره صاف از یک آرایه ۱۰۰ سوزنه که با رسوب الکتریکی روی یک قالب پلیمری ساخته شده است (ارتفاع ۲۰۰ میکرومتر). (ب) نوک یک میکروسوزن شیشه‌ای مخروطی و مورب، ساخته شده توسط کشنده میکروپیپت معمولی (طول ۹۰۰ میکرومتر نشان داده شده است). (پ) میکروسوزن فلزی مخروطی (ارتفاع ۵۰۰ میکرومتر) از یک آرایه ۳۷ سوزنه ساخته شده با رسوب الکتریکی روی یک قالب پلیمری. (ت) آرایه‌ای از میکروسوزن‌های فلزی مخروطی (ارتفاع ۵۰۰ میکرومتر) که در کنار نوک یک سوزن زیرجلدی گیج ۲۶ نشان داده شده است (۳۰).

ساخت این نوع میکروسوزن‌ها پیچیده‌تر است. میکروسوزن‌های توخالی با نسبت ابعاد بالا فاقد ساختار پشتیبان داخلی مشترک با سوزن‌های جامد هستند که در صورت قرارگیری نامناسب، منجر به خرابی احتمالی آن‌ها می‌شود. انتظار می‌رود که حرکات تصادفی در هنگام گذاشتن یا برداشتن پیچ، تنش‌های مختلفی (فشرده‌گی محوری و برشی) ایجاد کند که ممکن است منجر به شکستن سوزن‌ها شود (۳۱). این موضوع می‌تواند توسط تغییرات طبیعی در مورفولوژی پوست بیمار پیچیده‌تر شود. در جایی که قرارگیری غیر یکنواخت آرایه میکروسوزن‌ها ناخواسته باعث ایجاد تنش برشی و خم شدن عرضی ساختار میکروسوزن‌ها می‌شود (۳۲). در اکثر روش‌های ساخت میکروسوزن، کاهش ارتفاع میکروسوزن بسیاری از مشکلات ناشی از تنش سازه‌ای را برطرف می‌کند و حاشیه ایمنی مطلوب‌تری را به همراه دارد (۳۳).

فرمولاسیون مواد و پارامترهای ساخت میکروسوزن‌های توخالی را می‌توان برای دستیابی به سینتیک انتشار قابل تنظیم به کار گرفت. داروهای با غلظت بالاتر می‌توانند منجر به پروفایل‌های انتشار انفجاری دارو شوند، در حالی که داروهای با بار ماتریسی می‌توانند انتشار مداوم دارو را برای چند روز تا چند هفته بسته به هدف کاربرد، امکان‌پذیر سازند (۲۷). مشابه سوزن‌های زیرپوستی، میکروسوزن‌های توخالی را می‌توان برای تنظیم سرعت جریان و فشار طراحی کرد. پارامترهای فرآیند مانند نسبت طول به قطر میکروسوزن (نسبت ارتفاع به قطر قاعده) را می‌توان برای رهاسازی سریع، تزریق آهسته یا سرعت انتقال متغیر با زمان کنترل کرد (۲۸).

در طول سال‌ها، میکروسوزن توخالی با موفقیت در انواع اکسیناسیون اعمال شده است (۱۳). با این حال، به دلیل اینکه میکروسوزن توخالی نسبتاً ضعیف‌تر است و از نظر طراحی سوزن و روش تزریق به مراقبت بیشتری نیاز دارد، این نوع میکروسوزن در مقایسه با میکروسوزن توپر مورد توجه کم‌تری قرار گرفته است (۲۹). علاوه بر این، میکروسوزن توخالی در فرآیند تزریق دچار مشکلات فنی مانند نشتی و گرفتگی می‌شود (۱۳).



شکل (۳): میکروسوزن‌های توخالی ساخته شده از سیلیکون، فلز و شیشه که با میکروسکوپ الکترونی روبشی و نوری

میکروسوزن‌های متخلخل^۸

میکروسوزن‌های قابل حل

میکروسوزن‌های متخلخل نوعی از میکروسوزن‌ها هستند که دارای ساختار متخلخل برای افزایش نفوذپذیری و انتقال دارو به داخل پوست هستند. این نوع میکروسوزن‌ها مزایای قابل توجهی نسبت به میکروسوزن‌های سنتی ارائه می‌دهند و در زمینه‌های مختلف پزشکی و دارورسانی کاربرد دارند.

میکروسوزن‌های متخلخل از مواد مختلفی مانند پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر، سیلیکون و فلزات ساخته می‌شوند. این میکروسوزن‌ها دارای ساختار متخلخلی هستند که به طور معمول با روش‌های مختلفی مانند لیزر، حکاکی شیمیایی یا الکتروشیمیایی ایجاد می‌شود. اندازه و شکل منافذ در این میکروسوزن‌ها می‌تواند بسته به کاربرد مورد نظر متفاوت باشد.

ساختار متخلخل میکروسوزن‌ها به طور قابل توجهی نفوذپذیری آن‌ها را برای عبور دارو به داخل پوست افزایش می‌دهد. میکروسوزن‌های متخلخل می‌توانند دارو را به طور مستقیم به لایه‌های عمیق‌تر پوست و حتی سیستم گردش خون منتقل کنند. نوک تیز میکروسوزن‌های متخلخل به طور قابل توجهی درد و ناراحتی مرتبط با تزریق را کاهش می‌دهد. اندازه و شکل منافذ در میکروسوزن‌های متخلخل می‌تواند به گونه‌ای تنظیم شود که سرعت انتشار دارو را کنترل کند. میکروسوزن‌های متخلخل برای انتقال طیف وسیعی از داروها، از جمله داروهای ضد درد، آنتی‌بیوتیک‌ها، واکسن‌ها و مواد آرایشی مناسب هستند.

میکروسوزن حل‌شونده که اولین بار در سال ۲۰۰۵ معرفی شد (۱۳)، تکنیکی امیدوارکننده است که بر اساس ویژگی‌هایش شناخته می‌شود. این ویژگی‌ها شامل تسهیل انتشار سریع ماکرومولکول‌ها (۳۴) و سهولت مصرف دارو به دلیل یک مرحله‌ای بودن روش می‌شود (۳۵). با توجه به بهبودهایی که در روش «فروکردن و رهاسازی» با استفاده از میکروسوزن‌های حل‌شونده مشاهده شده است، این روش نسبت به روش‌های دیگر ارجحیت دارد (۳۶). نوک میکروسوزن حل‌شونده را می‌توان با استفاده از روش قالب‌گیری دو مرحله‌ای به سرعت بارگذاری کرد (۳۵). پس از فرو رفتن میکروسوزن حل‌شونده در پوست، بار دارو با حل شدن نوک سوزن آزاد شده و به راحتی منتشر می‌شود (۱۳). از مواد محلول در آب برای ساخت میکروسوزن‌های حل‌شونده بیش‌تر استفاده می‌شود (۳۷). همچنین، روش میکرو قالب‌گیری برای تولید میکروسوزن‌های حل‌شونده مناسب‌ترین است (۲۵). طراحی و تولید آرایه‌ای از میکروسوزن‌های حل‌شونده به تخصص فنی نیاز دارد (۱۳). با این حال، این نوع میکروسوزن نیاز به فرو رفتن کامل در پوست دارد که اغلب دستیابی به آن دشوار است و همچنین با تأخیر در حل شدن همراه است (۱۸).

یکی از جدیدترین استراتژی‌های ظهور یافته در طراحی میکروسوزن‌ها بر پایه استفاده از پلیمرهای قابل حل است. در این روش، دارویی که باید منتقل شود، در زمان ساخت درون هسته سوزن به دام افتاده است. پس از شکستن پوست، پلیمری که ساختار سوزن را

⁸ Porous Microneedles

تشکیل می‌دهد، حل شده و بدین ترتیب دارو را آزاد می‌کند. حل شدن سوزن در پوست به طور مؤثری احتمال بروز صدمات ناشی از سوزن^۹ (NSI) پس از استفاده را از بین می‌برد (۳۸).

مشابه میکروسوزن‌های جامد، محدودیت هسته با بازده انتقال دارو مرتبط است، زیرا جزء اصلی انتقال دارو ساختار سوزن است و برخلاف طرح‌های سوزن توخالی، صفحه پایه به طور معمول به عنوان مخزن عمل نمی‌کند (۲۳). این موضوع پیچیدگی‌هایی را در ساخت به وجود می‌آورد، زیرا باید تعادلی بین مقدار دارویی که باید تحویل داده شود و مقدار پلیمری که برای اطمینان از استحکام سازه‌ای سوزن واقعی مورد نیاز است، وجود داشته باشد (۳۲). لیو و همکاران دریافتند که در مورد انسولین، حداکثر محتوای دارو حدود ۱۰ درصد است که بازده تحویلی ۰.۶ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع را به همراه دارد (۳۸).

میکروسوزن‌های هیدروژل

میکروسوزن‌هایی که پس از سوراخ کردن لایه شاخی متورم می‌شوند، پالایش دیگری هستند و برای رفع محدودیت‌های بازده کم طرح‌های قابل حل طراحی شده‌اند. این پچ‌ها بر اساس ساختار هیدروژل ساخته شده‌اند که خاصیت دوست‌آب بودن آن‌ها به طور فعال مایعات را از بافت اطراف جذب می‌کند و در نتیجه باعث انبساط هسته سوزن و ایجاد منافذ و نانومجره‌هایی می‌شود که عامل درمانی می‌تواند از طریق آن‌ها منتشر شود (۱۹).

یکی از مزایای اصلی این روش بر استفاده از صفحه پایه به عنوان مخزنی برای دارو متمرکز است که قادر به انتقال از طریق ساختار متورم میکروسوزن به سیستم

گردش خون زیرین است. یک کاربرد به‌خصوص خلاقانه از سیستم متورم‌کننده، توانایی استخراج مایع بینابینی است (۳۹). با توجه به اینکه بیشتر نمونه‌گیری‌های خون شامل استخراج وریدی است، سیستم میکروسوزن متورم‌کننده امکان برداشتن بدون درد مایع را فراهم می‌کند در حالی که سوزن‌های متورم، احتمال آسیب ناشی از سوزن پس از نمونه‌گیری را از بین می‌برند.

تورم میکروسوزن‌ها منافذ و نانومجره‌هایی ایجاد می‌کند که به انتشار آسان‌تر عامل درمانی به داخل پوست کمک می‌کند. برخلاف پچ‌های سنتی که دارو را در سطح پوست نگه می‌دارند، میکروسوزن‌های متورم دارو را به طور مستقیم به سیستم گردش خون منتقل می‌کنند. ساختار متورم میکروسوزن‌ها می‌تواند مقدار قابل توجهی از دارو را ذخیره کند و به طور پیوسته آن را آزاد کند. تورم میکروسوزن‌ها به طور طبیعی درد و ناراحتی مرتبط با تزریق را کاهش می‌دهد.

مواد استفاده شده در آرایه‌های میکروسوزن

میکروسوزن‌ها ابزارهای ریزی هستند که برای نفوذ به لایه بالایی پوست (اپیدرم) استفاده می‌شوند. مواد مختلفی برای ساخت میکروسوزن‌ها به کار می‌رود تا متناسب با کاربردهای خاص آن‌ها باشد. در این بخش به برخی از این مواد اشاره می‌کنیم:

انتخاب مواد مناسب برای ساخت میکروسوزن‌ها بر اساس نوع کاربرد و ویژگی‌های مورد نظر صورت می‌گیرد. برخی از مواد رایج عبارتند از:

⁹ Needle stick injury

مواد پلیمری^{۱۰}

پلیمرها جایگزین مناسبی برای مواد دیگر در ساخت میکروسوزن‌ها هستند. آن‌ها زیست‌تطبیق‌پذیری عالی، سمیت کم و هزینه پایینی دارند (۴۰). با این حال، آن‌ها همچنین استحکام کمتری نسبت به سیلیکون و فلزات دارند (۴۱). پلیمرها معمولاً در تولید آرایه‌های میکروسوزن قابل حل و تشکیل دهنده هیدروژل (۲۷)، آرایه‌های میکروسوزن توپر، روکش‌دار و توخالی به کار می‌روند (۶). انواع مختلفی از داروها با استفاده از میکروسوزن‌های زیست تخریب‌پذیر به پوست اعمال شده‌اند (۴۲).

پلیمرهایی مانند پلی لاکتیک اسید^{۱۱} (PLA) و پلی آنیدرید مالفئیک^{۱۲} (PMA) به دلیل انعطاف‌پذیری، زیست‌سازگاری و سهولت در تولید، برای ساخت آرایه‌های میکروسوزن‌های توپر و حل‌شدنی مناسب هستند (۲۳).

مواد فلزی

فلزاتی مانند فولاد ضد زنگ و تیتانیوم استحکام و هدایت بالایی دارند و برای ساخت آرایه‌های میکروسوزن‌های توخالی و تزریقی مناسب هستند. با این حال، هزینه تولید بالاتر و احتمال واکنش‌های التهابی از معایب استفاده از فلزات است. از فلزات به دلیل داشتن ویژگی‌های خوب زیست‌تطبیقی و مکانیکی در ساخت میکروسوزن‌ها استفاده می‌شود (۴۳). فلزات استحکام کششی و مقاومت تسلیم بالایی دارند. در مقایسه با سیلیکون، فلزات قوی‌تر و شکستن آن‌ها دشوارتر است (۲۳). اولین فلزی که در ساخت

میکروسوزن به کار رفت، استیل ضدزنگ و پس از آن تیتانیوم بود. با وجود توانایی نفوذ میکروسوزن‌های فلزی به پوست، استفاده از آن‌ها ممکن است باعث واکنش آلرژیک شود (۴۴).

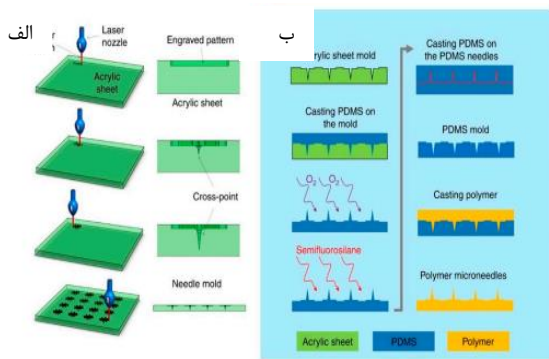
مواد سیلیکونی^{۱۳}

اولین میکروسوزن‌ها در دهه ۱۹۹۰ از جنس سیلیکون ساخته شدند (۴۵). سیلیکون مزایای زیادی نسبت به مواد دیگر دارد، از جمله انعطاف‌پذیری ذاتی آن که امکان ساخت آسان میکروسوزن‌ها با شکل و اندازه دلخواه را فراهم می‌کند. از سیلیکون برای ساخت میکروسوزن‌های توپر، توخالی و روکش‌دار استفاده می‌شود (۶). با وجود این، استفاده از سیلیکون محدودیت‌هایی هم دارد، از جمله زمان‌بر بودن ساخت (۴۶)، هزینه بالا (۳) و احتمال ایجاد شکستگی در پوست (۴۷). سیلیکون انعطاف‌پذیر، زیست‌سازگار و دارای هدایت الکتریکی مناسبی است و برای ساخت آرایه‌های میکروسوزن‌های هوشمند و حسگرهای زیستی کاربرد دارد.

مواد سرامیکی

به دلیل خواص شیمیایی عالی و مقاومت در برابر فشار، از مواد سرامیکی مانند آلومینا برای ساخت میکروسوزن استفاده شده است (۴۸). با این حال، آلومینا در مقایسه با سایر مواد استحکام کششی پایین‌تری دارد. سولفات کلسیم دی‌هیدرات و فسفات کلسیم دی‌هیدرات انواع دیگری از سرامیک‌های مورد استفاده در ساخت میکروسوزن‌ها هستند (۱۸). برای ساخت میکروسوزن با استفاده از مواد سرامیکی می‌توان از تکنیک میکرو قالب‌گیری استفاده کرد. این

¹³ Silicon-Based Materials¹⁰ Polymer-Based Materials¹¹ Poly Lactic Acid¹² Poly Maleic Anhydride



روش تولید انبوه با هزینه کم را ارائه می‌دهد (۴۹). مطالعه‌ای که توسط بوستوروا و همکارانش انجام شد نشان داد که میکروسوزن‌های ساخته شده از آلومینا در صورت اعمال دستی روی پوست شکسته می‌شوند (۵۰).

روش‌های ساخت میکروسوزن

برای ساخت آرایه‌های میکروسوزن روش‌های مختلفی وجود دارد. متداول‌ترین روش‌ها عبارتند از: لیزر، میکرو قالب‌گیری، ساخت افزایشی، قالب تزریق، حکاکی شیمیایی همسانگرد، میکروساخت سطحی/حجمی و تکنیفرمینگ-لیتوگرافی.

لیزر

لیزر برای ساخت آرایه‌های میکروسوزن با برداشتن مواد از طریق تاباندن پرتو نور متمرکز روی بستر استفاده می‌شود. لیزرها برای پردازش مواد مختلف در ابعاد میکرو و نانو برای کاربردهای گوناگون به کار می‌روند (۵۱). انواع مختلفی از لیزر برای ساخت آرایه‌های میکروسوزن مورد بررسی قرار گرفته‌اند، از جمله لیزر دی اکسید کربن (۵۲) (شکل ۴)، لیزر برانگیخته فرابنفش (۵۳) و لیزر فمتوثانیه (۵۴).

روش لیزر برای ساخت میکروسوزن‌ها سریع و مؤثر در نظر گرفته می‌شود. مدت زمان لازم برای برخورد پرتو لیزر به نقطه ذوب در ورق ماده، ۱۰ تا ۱۰۰ نانوثانیه است (۴۰). همچنین می‌توان از لیزر برای شکل‌دهی به هر نوع فلزی استفاده کرد. این روش با اثرات حرارتی در سطح برش همراه است که منجر به تغییر ساختار و خواص مکانیکی میکروسوزن می‌شود (۵۵). این امر می‌تواند منجر به عوارض ناخواسته‌ای در میکروسوزن‌ها مانند ترک خوردن یا کاهش مقاومت به خستگی شود (۵۶).

شکل (۴): فرآیند ساخت قالب میکروسوزن: الف) از یک برش لیزری برای ساخت قالب میکروسوزن اکریلیک با استفاده از تکنیک خطوط متقاطع پیشنهادی استفاده شده است. ب) قالب اکریلیک برای ساخت قالب میکروسوزن پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS) استفاده می‌شود که می‌تواند برای ساخت انواع مختلف میکروسوزن‌های پلیمری به کار رود (۵۲).

روش لیزر غیرتماسی است و گرمای کمی به بستر منتقل می‌کند (۵۷). با این حال، هزینه لیزر نسبت به سایر تجهیزات بیش‌تر است (۵۴). روش لیزر برای تولید انبوه مناسب نیست.

لیتوگرافی

از تکنیک لیتوگرافی برای انتقال الگوی اصلی اشکال هندسی به سطح یک بستر استفاده می‌شود (۵۸). لیتوگرافی نوری به دلیل کاربرد گسترده در زمینه میکروالکترونیک، عمدتاً برای انتقال الگو استفاده می‌شود. سایر تکنیک‌هایی مانند میکروالکترونیک و میکروماشینکاری از لیتوگرافی به عنوان اولین مرحله در ساخت میکروسوزن استفاده می‌کنند (۶). لیتوگرافی نیازمند پردازش دقیق فتوریست (رزین حساس به نور) است این تکنیک تقریباً سهم ۳۰ تا ۳۵ درصدی در هزینه‌های ساخت مدارهای مجتمع دارد (۵۹).

لیتوگرافی توانایی ایجاد محصولات از مواد مختلفی مانند شیشه، فلز، سرامیک و پلاستیک را دارد (۶۰). همچنین هندسه‌های دقیق و دیواره‌های جانبی صاف

فعال ریخته می‌شود (۴۴) (شکل ۶). میکرو قالب‌گیری روشی با صرفه در نظر گرفته می‌شود و برای تولید انبوه به کار می‌رود (۶۲). میکرو قالب‌گیری به طور معمول با مواد پلیمری برای ساخت میکروسوزن استفاده می‌شود (۶۳). پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان^{۱۴} (PDMS) در تکنیک‌های میکرو قالب‌گیری دارای چندین مزیت مانند کم هزینه بودن، سهولت استفاده، انرژی سطحی پایین و پایداری حرارتی است (۳۳). محدودیت‌های مرتبط با این تکنیک، مشکلات مربوط به کنترل عمق نفوذ، ظرفیت بارگذاری دارو و رفتار مکانیکی پلیمر است (۶۳).

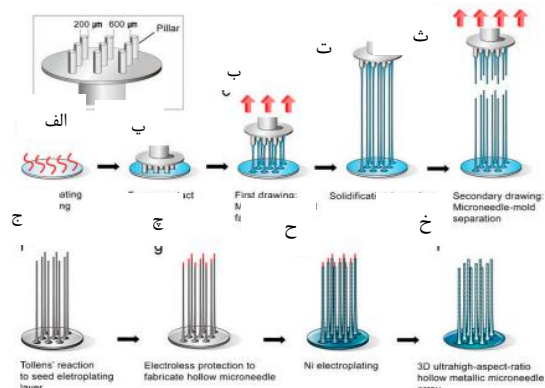
قالب تزریق

قالب تزریق روش دیگری برای ساخت میکروسوزن است. فرآیند ساخت میکروسوزن با استفاده از قالب تزریق و تکنیک برجسته‌سازی گرم در شکل ۶ نشان داده شده است.

لرنولد و همکاران از پلی‌کربنات^{۱۵} (PC) برای ساخت آرایه 4×4 میکروسوزن توخالی پلیمری استفاده کردند (۶۴). این میکروسوزن‌ها در برابر نیروی بالا مقاوم بودند و برای چندین بار تزریق بدون کند شدن سوزنی شکل، قابل استفاده بودند. مطالعه دیگری با استفاده از فرآیند قالب‌گیری تزریقی میکرو، یک میکروسوزن توپر ساخت (۶۵). این سوزن‌ها می‌توانستند مولکول‌های با وزن مولکولی بالا و دوستاندار آب را منتقل کنند.

سامورا و همکاران یک میکروسوزن پلیمری را با قالب‌گیری پلاستیک ساختند (۶۶). از این سوزن‌ها برای نفوذ موفقیت‌آمیز به ران مرغ تازه و جگر گاو

را تولید می‌کند (۵۴) (شکل ۵). با این حال، این تکنیک نیازمند یک مرکز پیشرفته (اتاق تمیز) و زمان تولید طولانی است.



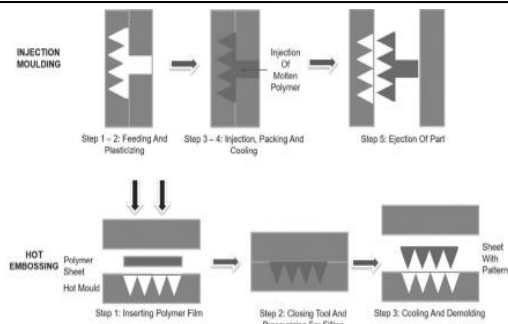
شکل (۵): لیتوگرافی کششی برای ساخت میکروسوزن فوق بلند با نسبت ابعاد بالا. یک سیستم کششی با ستون‌های الگودار برای لیتوگرافی کششی را نشان می‌دهد. از مته‌های استیل با قطر ۲۰۰ میکرومتر و طول ۳ میلی‌متر به عنوان ستون استفاده شده و در یک آرایه ۳ در ۳ روی قاب PDMS ثابت شده‌اند. (الف) رزین حساس به نور SU-8 2050 با روش پوشش چرخشی روی سطح قرار داده شده و سرد می‌شود. (ب) پس از تماس رزین با ستون الگودار، لیتوگرافی کششی انجام می‌شود. (پ) کشش باعث ایجاد یک پل مخروطی شکل کشیده بین زیرلایه و ستون می‌شود. (ت) قالب میکروسوزن مورد نظر برای ایجاد یک ساختار سخت، پخت می‌شود. (ث) جداسازی پل ریزساختار سه‌بعدی، یک قالب میکروسوزن توپر ایجاد می‌کند. (ج) رسوب شیمیایی روی قالب‌های میکروسوزن توپر. (چ) قسمت بالایی قالب میکروسوزن با ماده بدون جریان الکتریسته پوشانده می‌شود. (ح) آبکاری نیکل روی قالب‌های میکروسوزن توپر رسانا. (خ) آرایه میکروسوزن فلزی توخالی با حذف رزین حساس به نور و پوشش محافظ ایجاد می‌شود. (۶۱).

میکرو قالب‌گیری

فرآیند میکرو قالب‌گیری شامل تکثیر قالب اصلی است. قالب با محلولی حاوی پلیمر و مواد دارویی

¹⁵ Polycarbonate

¹⁴ Polydimethylsiloxane



شکل (۷): مراحل فرآیند قالب‌گیری تزریقی استاندارد و برجسته‌سازی گرم مرحله‌ای و تکرارشونده (۶۷).

چاپ سه بعدی

چاپ سه بعدی (ساخت افزایشی) در سال‌های اخیر به عنوان روشی برای تولید آرایه‌های میکروسوزن مورد توجه زیادی قرار گرفته است. چاپگر سه بعدی با قرار دادن لایه‌های پی در پی مواد موردنظر، یک شیء را می‌سازد. در سال‌های اخیر، فناوری چاپ سه بعدی در صنعت تجهیزات پزشکی، به ویژه برای ساخت ایمپلنت‌های مهندسی بافت، به سرعت در حال پیشرفت است (۷۱-۶۸).

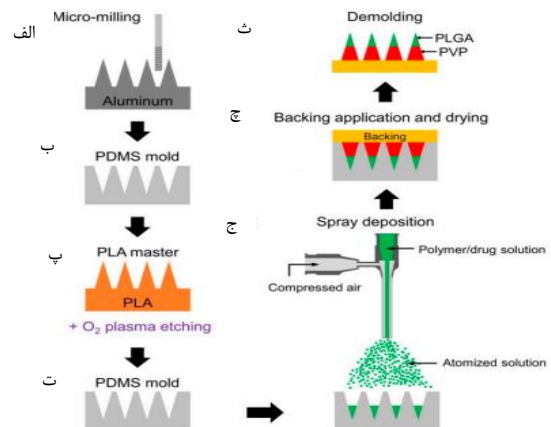
در سال ۲۰۱۹، جانسون و همکارانش برای اولین بار با استفاده از یک چاپگر سه بعدی تجاری، قالب اصلی میکروسوزن را ساختند (۱۴). کریگر و همکاران، روشی دو مرحله‌ای به نام «چاپ و پر کردن» را برای ساخت قالب میکروسوزن معرفی کردند (شکل ۷) (۱۷). همچنین مطالعه دیگری از تکنیک استریولیتوگرافی برای ساخت پیچ‌های میکروسوزن استفاده کرده است (۷۲).

یکی از مزایای استفاده از چاپگرهای سه بعدی برای ساخت آرایه‌های میکروسوزن، انعطاف‌پذیری در پارامترهای طراحی و زمان کوتاه‌تر پردازش است (۱۴).

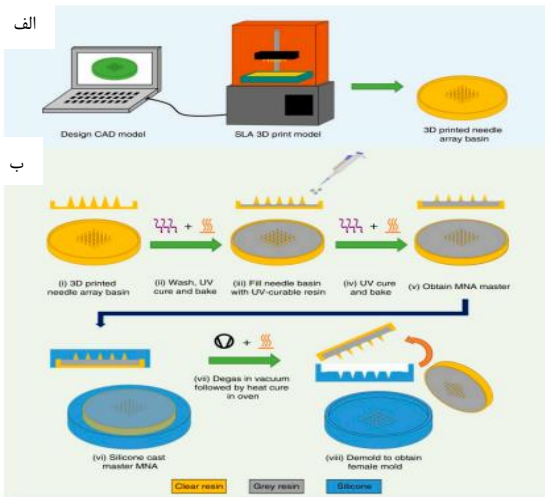
استفاده شد و حدود ۰/۰۴ میکرولیتر مایع از این بافت‌ها کشیده شد. روش پیشنهادی امکان تولید انبوه میکروسوزن‌ها با هزینه کم را فراهم می‌کند.

قالب‌گیری تزریقی میکرو همچنین هنگامی که جداسازی مرحله نرم‌سازی و تزریق مذاب پلیمری انجام شود، قابلیت تکرارپذیری بالا، دوز دقیق و سرعت جریان تزریق بالا را ارائه می‌دهد (۳۴).

محدودیت استفاده از تکنیک قالب تزریق، کنترل حجم تزریق کم به دلیل اندازه رایج مارپیچ که تقریباً ۱۵ تا ۱۵۰ میلی‌متر است و هزینه اولیه بالای تجهیزات است (۶۸).



شکل (۶): فرآیند کلی ساخت میکروسوزن‌های چند لایه: (الف) ساخت الگوی اصلی آلومینیومی با استفاده از میکرو فرز. (ب) تکثیر قالب PDMS از روی الگو. (پ) ساخت الگوی اصلی PLA با استفاده از میکرومولینگ و تیز کردن نوک با پلاسما اکسیژن. (ت) تکثیر قالب PDMS از روی الگوی اصلی PLA. (ث) پاشش محلول پلیمری حاوی دارو برای پر کردن حفره قالب. میکروسوزن چندلایه با رسوب متوالی محلول‌های پلیمری شکل می‌گیرد. (ج) اعمال لایه پشتیبان (زرد) روی قالب و خشک کردن در دمای اتاق برای جامد شدن پلیمر. (چ) خارج کردن آرایه میکروسوزن چندلایه جامد شده از قالب. رنگ سبز و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده لایه‌های PLGA و PVP هستند (۶۳).



شکل (۸): بررسی اجمالی روش ساخت “چاپ و پر کردن” (الف) طراحی حوضه آرایه سوزن، سپس چاپ سه بعدی طرح با استفاده از چاپگر. (ب) روش ساخت قالب اصلی میکروسوزن قابل پر کردن (i) برداشتن حوضه آرایه سوزن چاپ سه بعدی شده؛ (ii) شستشو به دنبال عمل آوری UV و پخت حوضه آرایه سوزن چاپ شده؛ (iii) پر کردن حوضه آرایه سوزن با رزین با UV؛ (iv) دومین عمل آوری UV و پخت؛ (v) به دست آوردن قالب اصلی آرایه‌های میکروسوزن؛ (vi) ریخته‌گری سیلیکونی قالب اصلی آرایه‌های میکروسوزن؛ (vii) قالب سیلیکونی خلا زدایی شده و سپس در فر با گرما پخت می‌شود؛ (viii) جدا کردن از قالب برای به دست آوردن قالب قابل استفاده میکروسوزن (۱۷).

یک میکروسوزن جامد برای انتقال پروتئین آنتی ژن به پوست خوکچه هندی بدون مو استفاده شد (۷۶). از میکروسوزن‌های جامد سیلیکونی و فلزی برای انتقال کالسیئین (۷۷)، و انسولین (۳۰) استفاده شده است. علاوه بر این، از میکروسوزن‌ها برای نفوذ از راه پوست برای داروهای مختلفی مانند ایبوپروفن، کتوپروفن و پاراستامول استفاده شده است (۷۸). داروهای دیگری که از طریق میکروسوزن‌ها منتقل می‌شوند شامل اسید L-آسکوربیک، ریوفلاوین، آسپرین، پیلوکارپین، لیدوکائین هیدروکلراید، کتوپروفن و گلیسرول هستند (۷۹). با وجود اینکه در

کاربردهای میکروسوزن

میکروسوزن‌ها توجه زیادی را از سوی محققان، دانشمندان و فعالان صنعت به خود جلب کرده‌اند. مطالعات متعددی وجود دارد که پتانسیل و توانایی استفاده از میکروسوزن‌ها را در زمینه‌های مختلف نشان داده است. این زمینه‌ها شامل موارد زیر هستند:

انتقال دارو از طریق پوست

یکی از مهم‌ترین کاربردهای آرایه‌های میکروسوزن‌ها، استفاده از آن‌ها برای انتقال دارو به بدن از طریق پوست است. این روش با ایجاد منافذ میکروسکوپی در پوست، مسیر جدیدی را برای انتقال دارو به جریان خون فراهم می‌کند. اولین کاربرد میکروسوزن برای انتقال دارو در سال ۱۹۹۸ با استفاده از یک میکروسوزن سیلیکونی جامد بود (۱۱). از یک پیچ میکروسوزن قابل حل برای انتقال هورمون رشد انسانی به منظور انتقال از راه پوست به پوست موش بدون مو استفاده شد (۷۳). یک پیچ میکروسوزن قابل حل حاوی کافئین برای کنترل وزن موش‌های چاق و به عنوان راهکاری برای درمان چاقی مورد استفاده قرار گرفت (۷۴). اولین کاربرد میکروسوزن برای انتقال دارو در سال ۱۹۹۸ با استفاده از یک میکروسوزن سیلیکونی جامد بود (۱۱). از یک پیچ میکروسوزن قابل حل برای انتقال هورمون رشد انسانی به منظور انتقال از راه پوست به پوست موش بدون مو استفاده شد (۷۳). یک پیچ میکروسوزن قابل حل حاوی کافئین برای کنترل وزن موش‌های چاق و به عنوان راهکاری برای درمان چاقی مورد استفاده قرار گرفت (۷۴). از یک پیچ میکروسوزن روکش‌دار برای انتقال کلسیتونین ماهی آزاد استفاده شد (۷۵).

بافت نیز استفاده کرد (۸۲). از میکروسوزن‌های قابل حل برای انتقال واکسن‌های مالاریا، دیفتتری (۸۳)، آنفلوانزا (۸۴)، هپاتیت B (۸۵)، HIV (۸۶) و فلج اطفال (۸۷) استفاده شده است.

اگرچه از میکروسوزن‌های قابل حل بیشتر برای انتقال واکسن استفاده می‌شود، از آرایه‌های میکروسوزن روکش‌دار نیز با موفقیت برای واکسیناسیون استفاده شده است (۶). مطالعه‌ای با استفاده از یک روش واکسیناسیون ساده، ایمن و سازگار برای تقویت سیستم ایمنی خوک‌ها با تجویز واکسن باسیل با استفاده از یک میکروسوزن متخلخل انجام شد (۸۸). مطالعه دیگری با موفقیت پروتئین ویروس هپاتیت C را در واکسن DNA روکش شده روی میکروسوزن کدگذاری کرد (۸۹). این میکروسوزن به طور موثری برای لئوسیت‌های T سیتوتوکسیک خاص در موش‌ها آماده‌سازی اولیه انجام داد. علاوه بر این، یک میکروسوزن روکش‌دار حاوی آنتی‌ژن ویروس آنفلوانزا برای واکسیناسیون در موش‌ها حمل می‌کرد (۹۰).

از میکروسوزن‌های توخالی برای انتقال واکسن آنتراکس با آنتی‌ژن محافظتی نو ترکیب به خرگوش به جای تزریق معمولی استفاده شده است (۹۱). یک میکروسوزن توخالی برای واکسیناسیون علیه پلاک در مدل موش ارزیابی شد (۹۲). کارآزمایی بالینی انجام شده روی انسان با استفاده از میکروسوزن توخالی با واکسن آنفلوانزا، نتایج مشابهی را با سیستم ایمنی در مقایسه با تزریق عضلانی نشان داد (۹۳). استفاده از میکروسوزن‌ها برای واکسیناسیون می‌تواند به ویژه در کشورهای در حال توسعه که با چالش‌هایی مانند

اکثر مطالعات از آرایه میکروسوزن برای انتقال دارو به پوست موش، خوک و انسان استفاده شده است، مطالعات دیگری نیز وجود داشتند که تزریق میکروسوزن به ران مرغ (۸۰) و بافت مغز (۸۱) را با موفقیت نشان دادند.

واکسیناسیون و ایمنی سازی

انقلاب در روش‌های واکسیناسیون با آرایه‌های میکروسوزن‌ها روشی نوین و کارآمد برای تحریک سیستم ایمنی بدن. واکسن‌های حاوی آنتی‌ژن‌های ضعیف شده یا غیرفعال عوامل بیماری‌زا، می‌توانند از طریق آرایه‌های میکروسوزن‌ها وارد لایه‌های بالایی پوست شوند. این امر باعث تحریک سیستم ایمنی بدن و ایجاد پاسخ ایمنی مناسب می‌شود.

میکروسوزن‌های قابل حل نوع رایجی از میکروسوزن‌هایی است که برای انتقال واکسن استفاده می‌شود. این میکروسوزن‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که پس از تزریق واکسن در پوست، به طور کامل حل شده و جذب بدن می‌شوند. مزایای استفاده از میکروسوزن‌های قابل حل بسیار چشمگیر است. این میکروسوزن‌ها نه تنها به طور قابل توجهی درد ناشی از تزریق را کاهش می‌دهند، بلکه خطر عفونت را نیز به حداقل می‌رسانند. همچنین، از آنجایی که این میکروسوزن‌ها در بدن حل می‌شوند، نیازی به جمع‌آوری و دفع زباله‌های پزشکی خطرناک نیست.

هنگامی که میکروسوزن‌ها حاوی واکسن به پوست نفوذ می‌کنند، سیستم ایمنی بدن را فعال کرده و باعث تولید آنتی‌بادی‌های خاصی می‌شود که در برابر عامل بیماری‌زا محافظت می‌کنند. علاوه بر واکسیناسیون، از میکروسوزن‌های قابل حل می‌توان برای درمان برخی بیماری‌های پوستی، دارورسانی موضعی و مهندسی

کاربردهای آرایشی و پوستی

میکروسوزن‌ها به طور گسترده در کاربردهای آرایشی مانند درمان پوست و رشد مو مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شکل ۹).

بهبود نفوذ داروهای موضعی: برخی از داروهای موضعی با مشکل نفوذ به لایه‌های زیرین پوست روبرو هستند. میکروسوزن‌ها می‌توانند با ایجاد منافذ موقت در پوست، به نفوذ بهتر این داروها کمک کنند.

کیم و همکارانش یک پیچ میکروسوزن قابل حل مبتنی بر اسید هیالورونیک برای انتقال درون‌آستانه‌ای اسید آسکوربیک و رتینیل رتینوات (ویتامین A) توسعه دادند (۱۰۰). کومار و همکارانش با استفاده از یک میکروسوزن جامد، افزایش انتقال موضعی (برای کاهش موهای زائد صورت) را به صورت آزمایشگاهی و درون‌تنظیمی نشان دادند (۱۰۱). علاوه بر این، فناوری میکروسوزن توانست دو بیمار مبتلا به آلوپسی (ریزش موی سکه‌ای) را درمان کند (۱۰۲). این بیماران پس از درمان، رشد مو را تجربه کردند. کارآزمایی‌های بالینی موثری با استفاده از میکروسوزن بر روی جای زخم‌های فرورفته صورت (۱۰۳)، جای زخم‌های فرورفته آکنه (۱۰۴) و جای زخم‌های سوختگی هیپرتروفیک (۱۰۵) انجام شده است.

تحریک کلاژن سازی: میکروسوزن‌ها می‌توانند با ایجاد میکرو آسیب‌های کنترل شده در پوست، بدن را به تولید کلاژن بیش‌تر تحریک کنند. کلاژن، پروتئینی است که باعث استحکام و جوانی پوست می‌شود. میکروسوزن‌ها به عنوان یک درمان مؤثر برای کاربردهای آرایشی مرتبط با پیری، ضایعات پوستی، ویتیلیگو (لک و پیس) و چین و چروک در نظر گرفته می‌شوند (۹۹). با افزایش تقاضا برای محصولات

کمبود نیروی انسانی متخصص در مراکز درمانی روبرو هستند، مفید باشد.

تشخیص بیماری

تشخیص بیماری و اثربخشی درمان را می‌توان از طریق چندین روش تثبیت‌شده برای سنجش زیستی که نمونه‌هایی از مایعات بدن را برای ارزیابی و نظارت بر شرایط سلامتی جمع‌آوری می‌کنند، انجام داد. روش‌های فعلی می‌توانند دردناک باشند، نیازمند تکنیک‌های تخصصی، تجهیزات اختصاصی و پرسنل پزشکی حرفه‌ای هستند (۹۴). با این حال، فناوری میکروسوزن راه‌حلی برای سنجش زیستی با تجربه بدون درد و اجرای ساده ارائه می‌دهد (۹۴).

میکروسوزن‌های توخالی توانایی تشخیص چندین بیماری مانند دیابت (۳۹) و آلزایمر (۹۵) را دارند. یکی دیگر از کاربردهای میکروسوزن‌ها، پایش سلامت بیمار است. برای مثال، از یک میکروسوزن توخالی شیشه‌ای می‌توان برای بررسی سطح گلوکز خون استفاده کرد (۹۶). علاوه بر این، اوماهونی و همکارانش، سیستم میکروسوزن را برای بهینه‌سازی سیگنال نوار قلب پیشنهاد کردند (۹۷). یک آنزیم مبتنی بر میکروسوزن برای اندازه‌گیری الکل در مایع میان‌بافتی مصنوعی به کار گرفته شد (۹۸). میکروسوزن‌ها با نانوذرات توانستند نشانگرهای زیستی را در مراحل اولیه آرتروز تشخیص دهند (۹۹). از میکروسوزن‌ها به عنوان حسگر برای پراکسید هیدروژن، لاکتات، اکسیژن محلول و گلوتامات استفاده شده است (۷۹).

کنترل دقیق عمق نفوذ سوزن‌ها با توجه به ضخامت و ویژگی‌های مختلف پوست افراد، همچنان یک چالش به شمار می‌رود.

ایجاد دردهای خفیف^{۱۶}: اگرچه نفوذ آرایه‌های میکروسوزن نسبت به سوزن‌های تزریق سنتی بدون درد کم‌تری دارد، اما در برخی موارد ممکن است دردهای خفیفی ایجاد شود. به خصوص در کاربردهایی مانند واکسیناسیون کودکان، به حداقل رساندن هرگونه ناراحتی اهمیت دارد (۱۷).

ایمنی و سازگاری با بدن: مواد مورد استفاده در ساخت آرایه‌های میکروسوزن باید از نظر ایمنی زیستی با بدن سازگار باشند و کم‌ترین واکنش التهابی را ایجاد کنند. همچنین، فرآیند استریل‌سازی آرایه‌های میکروسوزن نیز برای جلوگیری از عفونت اهمیت دارد (۱۸). مدت زمان بسته شدن کانال‌های ایجاد شده توسط سوزن پس از سوراخ شدن پوست، برای سوزن‌های جامد معمولی چند ساعت است، اما در مورد سیستم‌های قابل حل/متورم‌کننده اوضاع می‌تواند پیچیده‌تر شود. در این موارد، ممکن است باقی‌مانده‌های پلیمر حل نشده باقی بماند و همچنان از سد پوست عبور کند. بسته شدن سریع میکروکانال‌های ایجاد شده توسط سوزن، بدون شک عامل مهمی در به حداقل رساندن عفونت است، اما این امر می‌تواند تحت تأثیر عدم حل شدن یا حذف کامل میکروسوزن‌های متورم‌کننده قرار گیرد.

تولید انبوه: در حال حاضر، برخی از روش‌های ساخت آرایه‌های میکروسوزن هزینه بر هستند و برای تولید انبوه و کاهش قیمت نهایی محصول مناسب نیستند

آرایشی، میکروسوزن‌ها (پیچ‌ها و غلتک‌ها) در آینده پتانسیل بالایی دارند (۸۶).



شکل (۹): رشد مجدد سریع‌تر مو در گروه تحت درمان با میکرونیدلینگ بعد از یک هفته (۱۰۶).

چالش‌ها و مسیرهای آینده آرایه‌های میکروسوزن

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در زمینه فناوری میکروسوزن، همچنان چالش‌هایی برای استفاده گسترده‌تر از این فناوری وجود دارد. در این بخش به برخی از مهم‌ترین چالش‌ها و مسیرهای آینده آرایه‌های میکروسوزن اشاره می‌کنیم:

چالش‌ها

کنترل عمق نفوذ: نفوذ آرایه‌های میکروسوزن به عمق مناسب پوست برای رساندن دارو به لایه هدف، از اهمیت بالایی برخوردار است (۱۰۷). با این حال،

¹⁶ Mild Pain

واکسن انجام داده‌اند. با این حال، چالش آینده، ساخت میکروسوزن‌هایی است که توانایی انتقال مولکول‌های درشت با وزن مولکولی بالا و آب‌دوستی زیاد را داشته باشند (۱۰۹). سایر مشکلات مرتبط با استفاده از میکروسوزن برای انتقال دارو، تحریک، آلرژی پوستی و قرمزی هستند (۱۸). ابزارهای مختلف میکروسوزن مانند درمارولر^{۱۹} در بازار موجود است، با این حال هنوز هیچ میکروسوزنی از جنس پلیمر زیست تخریب‌پذیر به بازار عرضه نشده است (۱۱۰). علاوه بر این، در حال حاضر هیچ میکروسوزنی وجود ندارد که بتواند محصولات پروتئینی را وارد بدن کند (۱۱۱). با تلاش‌های محققان در جهت رفع چالش‌های موجود و توسعه مسیرهای آینده، انتظار می‌رود که آرایه‌های میکروسوزن در آینده نقشی پررنگ‌تر در حوزه پزشکی و درمان بیماری‌ها ایفا کنند.

نتیجه‌گیری

آرایه‌های میکروسوزن ابزارهای نوظهوری هستند که با نفوذ به لایه‌های بالایی پوست، پتانسیل بالایی را برای کاربردهای مختلف در حوزه پزشکی و زیبایی به ارمغان آورده‌اند. این ریزساختارها از سوزن‌های ریزی تشکیل شده‌اند که با مواد مختلفی مانند پلیمرها، فلزات و مواد زیست تخریب‌پذیر ساخته می‌شوند.

این مقاله، مروری جامع بر فناوری آرایه‌های میکروسوزن ارائه کرد. در بخش‌های ابتدایی، به معرفی کلی آرایه‌های میکروسوزن، تاریخچه توسعه و انواع آن‌ها پرداخته شد. در ادامه، کاربردهای متنوع آرایه‌های میکروسوزن در انتقال دارو از طریق پوست،

(۱۰۸). توسعه روش‌های تولید اقتصادی مقرون به صرفه از اهمیت بالایی برخوردار است.

مسیرهای آینده

آرایه‌های میکروسوزن هوشمند: یکی از مسیرهای آینده آرایه‌های میکروسوزن، توسعه نسل جدیدی از آرایه‌های میکروسوزن‌های هوشمند است. این آرایه‌های میکروسوزن‌ها می‌توانند بر روی عمق نفوذ سوزن و میزان انتشار دارو در بدن نظارت داشته باشند. همچنین، این آرایه‌های میکروسوزن می‌توانند با حسگرهای زیستی ترکیب شده و اطلاعاتی را در مورد وضعیت سلامتی فرد جمع‌آوری کنند. آرایه‌های میکروسوزن چند منظوره^{۱۷}: نسل جدیدی از آرایه‌های میکروسوزن در حال توسعه هستند که علاوه بر قابلیت انتقال دارو، می‌توانند برای نمونه برداری از مایعات بدن یا اهداف تشخیصی مورد استفاده قرار گیرند.

آرایه‌های میکروسوزن با قابلیت تجزیه زیستی^{۱۸} توسعه آرایه‌های میکروسوزنی که پس از انجام وظیفه خود در بدن به تدریج تجزیه می‌شوند، می‌تواند باعث کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از دفع آرایه‌های میکروسوزن استفاده شده گردد.

شخصی سازی آرایه‌های میکروسوزن: با در نظر گرفتن ویژگی‌های فردی بیماران مانند ضخامت پوست و نوع بیماری، می‌توان آرایه‌های میکروسوزن شخصی سازی شده طراحی کرد که اثربخشی درمان را افزایش دهند.

مطالعات مختلف، آزمایش‌های درون‌تنظیمی را بر روی میکروسوزن‌های ساخته‌شده برای انتقال دارو و

¹⁹ Dermaroller

¹⁷ Multifunctional MNAs

¹⁸ Biodegradable MNAs

and fertilization of the echinoderm egg. *Biol. Bull.* 41, 318–350.

[6] Larraneta, E., Lutton, R.E.M., Woolfson, A.D., Donnelly, R.F., 2016, *Microneedle Arrays As Transdermal and Intradermal Drug Delivery Systems: Materials Science, Manufacture and Commercial Development*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 104, 1-32

[7] Gerstel, M.S., Place, V.A., 1976, *Drug Delivery Device*. U.S. Patent US3964482A, 22 June, 3, 964, 482.

[8] Reed, M., Lye, W.-K., 2004, *Microsystems for Drug and Gene Delivery*. *Proc. IEEE*, 92, 56–75.

[9] Prausnitz, M.R., Langer, R., 2009, *Transdermal drug delivery*. *Natl. Inst. Health* 2009, 26, 1261–1268.

[10] Orentreich, D.S., Orentreich, N., 1995, *Subcutaneous Incisionless (Subcision) Surgery for the Correction of Depressed Scars and Wrinkles*. *Dermatol. Surg.*, 21, 543–549.

[11] Henry, S., McAllister, D.V., Allen, M.G., Prausnitz, M.R., 1998, *Microfabricated Microneedles: A Novel Approach to Transdermal Drug Delivery*. *J. Pharm. Sci.*, 87, 922–925.

[12] Prausnitz, M.R., 2004, *Microneedles for transdermal drug delivery*. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 56, 581–587.

[13] Dang, N., Liu, T.Y., Prow, T.W., 2017, *Nano-and Microtechnology in Skin Delivery of Vaccines*. In *Micro and Nanotechnology in Vaccine Development*; William Andrew Publishing: Norwich, NY, USA.

[14] Johnson, A.R., Procopio, A.T., 2019, *Low cost additive manufacturing of microneedle masters*. *3D Print. Med*, 5, 2.

[15] Krieger, K.J., Bertollo, N., Dangol, M., Sheridan, J.T., Lowery, M.M., O’Cearbhaill, E.D., 2019, *Simple and customizable method for fabrication of high-aspect ratio microneedle molds using low-cost 3D printing*. *Microsyst. Nanoeng*, 5, 42.

[16] Haj-Ahmad, R., Khan, H., Arshad, M.S., Rasekh, M., Hussain, A., Walsh, S., Li, X., Chang, M.-W., Ahmad, Z., 2015, *Microneedle Coating Techniques for Transdermal Drug Delivery*. *Pharmaceutics*; 7:486–502.

[17] Wang, B.Z., Gill, H.S., He, C., Ou, C., Wang, L., Wang, Y.-C., Feng, H., Zhang, H., Prausnitz, M.R., Compans, R.W., 2014,

و اکسیناسیون، درمان‌های پوستی و زیبایی مورد بررسی قرار گرفت.

تحقیقات در زمینه آرایه‌های میکروسوزن همچنان در حال پیشرفت است و دانشمندان بر روی توسعه نسل جدیدی از آرایه‌های میکروسوزن با قابلیت‌های بیش‌تر تمرکز کرده‌اند. برخی از مسیرهای آینده این فناوری شامل ۱- توسعه آرایه‌های میکروسوزن هوشمند با قابلیت کنترل نفوذ و انتشار دارو ۲- طراحی آرایه‌های میکروسوزن چند منظوره برای انتقال دارو، نمونه‌برداری و تشخیص بیماری ۳- ساخت آرایه‌های میکروسوزن زیست تخریب پذیر دوستدار محیط زیست ۴- شخصی سازی آرایه‌های میکروسوزن بر اساس ویژگی‌های فردی بیماران، است. چالش‌هایی مانند کنترل دقیق عمق نفوذ، ایجاد دردهای خفیف، هزینه بالای تولید و مسائل ایمنی همچنان وجود دارد. با تلاش‌های پژوهشگران در جهت رفع این چالش‌ها، انتظار می‌رود که آرایه‌های میکروسوزن در آینده به روشی ایمن، موثر و کارآمد برای انتقال دارو، و اکسیناسیون و درمان بیماری‌ها تبدیل شوند.

منابع

[1] Scheuplein, R.J., Blank, I.H., 1971, *Permeability of the skin*. *Physiol. Rev*, 51, 702–747.

[2] Singh, T., Mcmillan, H., Mooney, K., Alkilani, A., Donnelly, R., 2013, *Microneedles for drug delivery and monitoring*. *Microfluid. Devices Biomed. Appl.*, 185–230.

[3] Donnelly, R.F., Singh, T.R.R., Larrañeta, E., McCrudd, M.T.C., 2018, *Microneedles for Drug and Vaccine Delivery and Patient Monitoring*; John Wiley and Sons, Incorporated: Hoboken, NJ, USA.

[4] Walsh, L., 2019, *Microneedling: A versatile and popular treatment option*. *J. Aesthetic Nurs.* 8, 280–284.

[5] Chambers, R., 1921, *Microdissection studies, III. some problems in the maturation*

- Photosensitizers and Precursors. *Photochem. Photobiol.*, 90, 641–647.
- [28] Mishra, R., Bhattacharyya, T., 2020, MEMS-based hollow microneedles for transdermal drug delivery. *Drug Deliv. Devices Ther. Syst.*, 325–344.
- [29] Zhang, P., Dalton, C., Jullien, G.A., 2009, Design and fabrication of MEMS-based microneedle arrays for medical applications. *Microsyst. Technol.*, 15, 1073–1082.
- [30] McAllister, D.V., Wang, P.M., Davis, S.P., Park, J.H., Canatella, P.J., Allen, M.G., Prausnitz, M.R., 2003, Microfabricated needles for transdermal delivery of macromolecules and nanoparticles: Fabrication methods and transport studies. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 100, 13755–13760
- [31] Khanna P., Luongo K., Strom, J.A., Bhansali, S., 2010, Axial and shear fracture strength evaluation of silicon microneedles. *Microsyst. Technol.*, 16:973–978.
- [32] Gittard, S., Chen, B., Xu, H., Ovsianikov A., Chichkov, B.N., Monteiro-Riviere, N.A., Narayan, R.J., 2013, The Effects of Geometry on Skin Penetration and Failure of Polymer Microneedles. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 27:227–243.
- [33] Park, J.H., Allen, M.G., Prausnitz, M.R., 2005, Biodegradable polymer microneedles: Fabrication, mechanics and transdermal drug delivery. *J. Control. Release.*;104:51–66. doi: 10.1016/j.jconrel.2005.02.002.
- [34] Demir, Y.K., Akan, Z., Kerimoglu, O., 2013, Characterization of Polymeric Microneedle Arrays for Transdermal Drug Delivery. *PLoS ONE*, 8, e77289.
- [35] Rodgers, A.M., Cordeiro, A.S., Donnelly, R.F., 2019, Technology update: Dissolvable microneedle patches for vaccine delivery. *Med Devices*, 12, 379–398.
- [36] Guillot, A.J., Cordeiro, A.S., Donnelly, R.F., Montesinos, M.C., Garrigues, T.M., Melero, A., 2020, Microneedle-Based Delivery: An Overview of Current Applications and Trends. *Pharmaceutics*, 12, 569.
- [37] González-Vázquez, P., Larrañeta, E., McCrudden, M.T., Jarrahan, C., Rein-Weston, A., Quintanar-Solares, M., Zehring, D., McCarthy, H., Courtenay, A.J., Donnelly, R.F., 2017, Transdermal delivery of gentamicin using dissolving microneedle arrays for Microneedle delivery of an M2e-TLR5 ligand fusion protein to skin confers broadly cross-protective influenza immunity. *J. Control. Release.*;178:1–7. doi: 10.1016/j.jconrel.2014.01.002.
- [18] Waghule, T., Singhvi, G., Dubey, S.K., Pandey, M.M., Gupta, G., Singh, M.; Dua, K., 2018, Microneedles: A smart approach and increasing potential for transdermal drug delivery system. *Biomed. Pharmacother.* 2018, 109, 1249–1258.
- [19] Kim, Y.C., Park, J.H., Prausnitz, M.R., 2015, Microneedles for drug and vaccine delivery. *Drug Deliv. Transl. Res.*, 5, 311–312.
- [20] Al-Zahrani, S., Zaric, M., McCrudden, C., Scott, C., Kissenpfennig, A., 2012, Donnelly R.F. Microneedle-mediated vaccine delivery: Harnessing cutaneous immunobiology to improve efficacy. *Expert Opin. Drug Deliv.* 2012; 9: 541 – 550.
- [21] Jacoby, E., Jarrahan, C., Hull, H.F., Zehring, D., 2015, Opportunities and Challenges in Delivering influenza Vaccine by Microneedle Patch; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, p. 20892.
- [22] Norman, J.J., Arya, J.M., McClain, M.A., Frew, P.M., Meltzer, M.I., Prausnitz, M.R., 2014, 2014, Microneedle patches: Usability and acceptability for self-vaccination against influenza. *Vaccine*, 32:1856–1862.
- [23] Gardeniers, H.J.G.E., Lutge, R., Berenschot, E.J.W., de Boer, M.J., Yeshurun S.Y., Hefetz M., van't Oever, R., 2003, van den Berg A. Silicon micromachined hollow microneedles for transdermal liquid transport. *J. Microelectromech. Syst.* 2003; 12:855–862.
- [24] Cheung, K., Das, D.B., 2014, Microneedles for drug delivery: Trends and progress. *Drug Deliv.*, 23, 2338–2354.
- [25] Ita, K., 2015, Transdermal Delivery of Drugs with Microneedles-Potential and Challenges. *Pharmaceutics*, 7, 90–105.
- [26] Sanjay, S.T., Dou, M., Fu, G., Xu, F., Li, X., 2017, Controlled Drug Delivery Using Microdevices Sharma. *Curr. Pharm. Biotechnol.*, 25, 1032–1057.
- [27] Donnelly, R.F., Morrow, D.I.J., McCrudden, M.T.C., Alkilani, A.Z., Vicente-Pérez, E.M., O'Mahony, C., González-Vázquez, P., McCarron, P., Woolfson, A.D., 2014, Hydrogel-Forming and Dissolving Microneedles for Enhanced Delivery of

- on Demand: Rijeka, Croatia, Norderstedt, Germany.
- [49] Indermun, S., Luttge, R., Choonara, Y., Kumar, P., du Toit, L., Modi, G.; Pillay, V., 2014, Current advances in the fabrication of microneedles for transdermal delivery. *J. Control. Release*, 185, 130–138.
- [50] Bystrova, S., Luttge, R., 2011, Micromolding for ceramic microneedle arrays. *Microelectron. Eng.*, 88, 1681–1684.
- [51] Adarkwa, E.; Desai, S., 2016, Scalable Droplet Based Manufacturing Using In-Flight Laser Evaporation. *J. Nanoeng. Nanomanuf.*, 6, 87–92.
- [52] Nejad, H.R., Sadeqi, A., Kiaee, G., Sonkusale, S., 2018, Low-cost and cleanroom-free fabrication of microneedles. *Microsyst. Nanoeng.*, 4, 17073.
- [53] Chen, Y.T., Ma, K.J., Tseng, A.A., Chen, P.H., 2005, Projection ablation of glass-based single and arrayed microstructures using excimer laser. *Opt. Laser Technol.*, 37, 271–280.
- [54] Zheng, H., Lam, Y., Sundarraman, C., Tran, D., 2007, Influence of substrate cooling on femtosecond laser machined hole depth and diameter. *Appl. Phys. A*, 89, 559–563.
- [55] Lutton, R., Larrañeta, E., Kearney, M.C., Boyd, P., Woolfson, A., Donnelly, R.F., 2015, A novel scalable manufacturing process for the production of hydrogel-forming microneedle arrays. *Int. J. Pharm.*, 494, 417–429.
- [56] Zaied, M., Miraoui, I., 2013, Analysis of heat affected zone obtained by CO₂ laser cutting of low carbon steel (S235). In *AIP Conference Proceedings; American Institute of Physics: College Park, MD, USA*.
- [57] Cerami, L., Mazur, E., Nolte, S., Schaffer, C.B. (2013). *Femtosecond Laser Micromachining*. In: Thomson, R., Leburn, C., Reid, D. (eds) *Ultrafast Nonlinear Optics*. Scottish Graduate Series. Springer, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00017-6_12.
- [58] Gaikwad, A., Desai, S., 2021, Molecular Dynamics Investigation of the Deformation Mechanism of Gold with Variations in Mold Profiles during Nanoimprinting. *Materials*, 14, 2548.
- [59] Plummer, J. D., Deal, M. D., & Griffin, P. B. (2000). *Silicon VLSI Technology: potential treatment of neonatal sepsis*. *J. Control. Release*, 265, 30–40.
- [38] Liu S., Jin M.N., Quan Y.S., Kamiyama F., Kusamori K., Katsumi H., Sakane T., Yamamoto, A., 2014, Transdermal delivery of relatively high molecular weight drugs using novel self-dissolving microneedle arrays fabricated from hyaluronic acid and their characteristics and safety after application to the skin. *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, 86:267–276.
- [39] Chang, H., Zheng, M., Yu, X., Than, A., Seeni, R.Z., Kang, R., Tian, J., Khanh, D.P., Liu, L., Chen, P., 2017, et al. A Swellable Microneedle Patch to Rapidly Extract Skin Interstitial Fluid for Timely Metabolic Analysis. *Adv. Mater.*; 29:1702243. doi: 10.1002/adma.201702243.
- [40] Jeggy, C. (2004). *Micro-Injection Moulding: From Process to Modelling* (p. 231). Presses Universitaires de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium.
- [41] Monteiro-Riviere, N. A. (2010). *Toxicology of the Skin* (p. 308). CRC Press, New York, NY, USA.
- [42] Yuan, W., Hong, X., Wu, Z., Chen, L., Liu, Z., Wu, F., Wei, L.L., 2013, Dissolving and biodegradable microneedle technologies for transdermal sustained delivery of drug and vaccine. *Drug Des. Dev. Ther.*, 7, 945–952.
- [43] Niinomi, M., Nakai, M., 2011, Titanium-Based Biomaterials for Preventing Stress Shielding between Implant Devices and Bone. *Int. J. Biomater.*, 836587.
- [44] Donnelly, A.D.W.R.F., Singh, T.R.R., Morrow, D.I.J., 2012, *Microneedle-Mediated Transdermal and Intradermal Drug Delivery*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.
- [45] Sharma, D., 2018, *Microneedles: An Approach in Transdermal Drug Delivery: A Review*. *PharmaTutor*, 6, 7–15.
- [46] Badilescu, S.; Packirisamy, M., 2016, *BioMEMS: Science and Engineering Perspectives*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- [47] O'Mahony, C., 2014, Structural characterization and in-vivo reliability evaluation of silicon microneedles. *Biomed. Microdevices*, 16, 333–343.
- [48] Pignatello, R., 2011, *Biomaterials: Applications for Nanomedicine*; BoD–Books

- Additive Manufacturing (3d Printing). *Am. J. Appl. Sci.*, 16, 238–243.
- [72] Pere, C.P.P., Economidou, S.N., Lall, G., Ziraud, C., Boateng, J.S., Alexander, B.D., Lamprou, D., 2018, Douroumis, D. 3D printed microneedles for insulin skin delivery. *Int. J. Pharm.*, 544, 425–432.
- [73] Lee, J.W., Choi, S.-O., Felner, E.I., Prausnitz, M.R., 2011, Dissolving Microneedle Patch for Transdermal Delivery of Human Growth Hormone. *Small*, 7, 531–539.
- [74] Dangol, M., Kim, S., Li, C.G., Lahiji, S.F., Jang, M., Ma, Y., Huh, I., Jung, H., 2017, Anti-obesity effect of a novel caffeine-loaded dissolving microneedle patch in high-fat diet-induced obese C57BL/6J mice. *J. Control. Release*, 265, 41–47.
- [75] Tas, C., Mansoor, S., Kalluri, H., Zarnitsyn, V.G., Choi, S.-O., Banga, A.K., Prausnitz, M.R., 2012, Delivery of salmon calcitonin using a microneedle patch. *Int. J. Pharm.*, 423, 257–263.
- [76] Matriano, J.A., Cormier, M., Johnson, J., Young, W.A., Buttery, M., Nyam, K., Daddona, P.E., 2002, Macroflux® Microprojection Array Patch Technology: A New and Efficient Approach for Intracutaneous Immunization. *Pharm. Res.*, 19, 63–70.
- [77] Donnelly, R.F., Morrow, D.I.J., McCarron, P., Woolfson, A.D., Morrissey, A., Juzenas, P., Juzeniene, A., Iani, V., McCarthy, H., Moan, J., 2009, Microneedle Arrays Permit Enhanced Intra-dermal Delivery of a Preformed Photosensitizer. *Photochem. Photobiol.*, 85, 195–204.
- [78] Stahl, J., Wohler, M., Kietzmann, M., 2012, Microneedle pretreatment enhances the percutaneous permeation of hydrophilic compounds with high melting points. *BMC Pharmacol. Toxicol.*, 13, 5.
- [79] Nayak, S., Suryawanshi, S., Bhaskar, V., 2016, Microneedle Technology for Transdermal Drug Delivery: Applications and Combination With Other Enhancing Techniques. *J. Drug Deliv. Ther.*, 6, 65–83.
- [80] Stoeber, B., Liepmann, D., 2000, Fluid injection through out-of-plane microneedles. In Proceedings of the 1st Annual International IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology. Proceedings, Lyon, France, 12–14 October; pp. 224–228.
- Fundamentals, Practice, and Modeling (p. 308). Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, ISBN: 0-13-085031-5
- [60] Tran, K.T., Nguyen, T.D., 2017, Lithography-based methods to manufacture biomaterials at small scales. *J. Sci. Adv. Mater. Devices* 2017, 2, 1–14.
- [61] Lee, K., Lee, H.C., Lee, D.-S., Jung, H., 2010, Drawing Lithography: Three-Dimensional Fabrication of an Ultrahigh-Aspect-Ratio Microneedle. *Adv. Mater.*, 22, 483–486.
- [62] Griffiths, C.A., 2008, Micro Injection Moulding: Tooling and Process Factors; Cardiff University: Cardiff, UK.
- [63] Kim, M.J., Park, S.C., Rizal, B., Guanés, G., Baek, S.K., Park, J.H., Betz, A.R., Choi, S.O., 2018, Fabrication of Circular Obelisk-Type Multilayer Microneedles Using Micro-Milling and Spray Deposition. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 6, 54.
- [64] Lhernould, M.S., Deleers, M., Delchambre, A., 2015, Hollow polymer microneedles array resistance and insertion tests. *Int. J. Pharm.*, 480, 152–157.
- [65] Nair, K.J., 2014, Micro-Injection Moulded Microneedles for Drug Delivery; University of Bradford: Bradford, UK.
- [66] Sammoura, F.; Kang, J., Heo, Y.-M., Jung, T., Lin, L., 2006, Polymeric microneedle fabrication using a microinjection molding technique. *Microsyst. Technol.*, 13, 517–522.
- [67] Juster, H., van der Aar, B., de Brouwer, H., 2019, A review on microfabrication of thermoplastic polymer-based microneedle arrays. *Polym. Eng. Sci.*, 59, 877–890.
- [68] Parupelli, S.K., Desai, S., 2019, A Comprehensive Review of Additive Manufacturing (3D Printing): Processes, Applications and Future Potential. *Am. J. Appl. Sci.*, 16, 244–272.
- [69] Aldawood, F.K., Desai, S., Chang, S., 2020, Additive Manufacturing of Compensator Devices for Radiation Therapy. In Proceedings of the 2012 IISE Annual Conference, Virtual Conference, 1–3.
- [70] Aldawood, F.K., Chang, S.X., Desai, S., 2020, Design and manufacture of a high precision personalized electron bolus device for radiation therapy. *Med. Devices Sensors*, 3.
- [71] Haeberle, G., Desai, S., 2019, Investigating Rapid Thermoform Tooling Via

- against lethal influenza virus challenge. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 106, 7968–79739.
- [91] Mikszta, J.A., Dekker, J.P., Harvey, N.G., Dean, C.H., Brittingham, J.M., Huang, J., Sullivan, V.J., Dyas, B., Roy, C., Ulrich, R.G., 2006, Microneedle-Based Intradermal Delivery of the Anthrax Recombinant Protective Antigen Vaccine. *Infect. Immun.*, 74, 6806–6810.
- [92] Huang, J., D'Souza, A.J., Alarcon, J.B., Mikszta, J.A., Ford, B.M., Ferriter, M.S., Evans, M., Stewart, T., Amemiya, K., Ulrich, R.G., 2009, Protective Immunity in Mice Achieved with Dry Powder Formulation and Alternative Delivery of Plague F1-V Vaccine. *Clin. Vaccine Immunol.*, 16, 719–725.
- [93] Van Damme, P., Oosterhuis-Kafeja, F., van der Wielen, M., Almagor, Y., Sharon, O., Levin, Y., 2009, Safety and efficacy of a novel microneedle device for dose sparing intradermal influenza vaccination in healthy adults. *Vaccine*, 27, 454–459.
- [94] Zhu, J., Zhou, X., Libanori, A., Sun, W., 2020, Microneedle-based bioassays. *Nanoscale Adv.*, 2, 4295–4304.
- [95] Kim, J.Y., Han, M.R., Kim, Y.H., Shin, S.W., Nam, S.Y., Park, J.H., 2016, Tip-loaded dissolving microneedles for transdermal delivery of donepezil hydrochloride for treatment of Alzheimer's disease. *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, 105, 148–155.
- [96] Wang, P.M., Cornwell, M., Prausnitz, M.R., 2005, Minimally Invasive Extraction of Dermal Interstitial Fluid for Glucose Monitoring Using Microneedles. *Diabetes Technol. Ther.*, 7, 131–141.
- [97] O'Mahony, C., Pini, F., Vereschagina, L., Blake, A., O'Brien, J., Webster, C., Galvin, P., McCarthy, K.G., 2013, Skin insertion mechanisms of microneedle-based dry electrodes for physiological signal monitoring. In *Proceedings of the 2013 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, Rotterdam, The Netherlands, 31 October–2, pp. 69–72.
- [98] Mohan, A.V., Windmiller, J.R., Mishra, R.K., Wang, J., 2017, Continuous minimally-invasive alcohol monitoring using microneedle sensor arrays. *Biosens. Bioelectron.*, 91, 574–579.
- [99] Sharma, S., Hatware, K., Bhadane, P., Sindhikar, S., Mishra, D.K., 2019, Recent advances in microneedle composites for
- [81] Chen, J., Wise, K.D., Hetke, J.F., 1997, Bledsoe, S.C. A multichannel neural probe for selective chemical delivery at the cellular level. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 44, 760–769.
- [82] Marshall, S., Sahm, L.J., Moore, A., 2016, The success of microneedle-mediated vaccine delivery into skin. *Hum. Vaccines Immunother.*, 12, 2975 – 2983.
- [83] Matsuo, K., Hirobe, S., Yokota, Y., Ayabe, Y., Seto, M., Quan, Y.S., Kamiyama, F., Tougan, T., Horii, T., Mukai, Y., 2012, Transcutaneous immunization using a dissolving microneedle array protects against tetanus, diphtheria, malaria, and influenza. *J. Control. Release*, 160, 495–501.
- [84] Yang, J., Liu, X., Fu, Y., Song, Y., 2019, Recent advances of microneedles for biomedical applications- drug delivery and beyond.pdf. *Acta Pharm. Sin. B*, 9, 469–483.
- [85] Poirier, D., Renaud, F., Dewar, V., Strodiot, L., Wauters, F., Janimak, J., Shimada, T., Nomura, T., Kabata, K., Kuruma, K., 2017, Hepatitis B surface antigen incorporated in dissolvable microneedle array patch is antigenic and thermostable. *Biomaterials*, 145, 256–265.
- [86] Pattani, A., McKay, P., Garland, M.J., Curran, R.M., Migalska, K., Cassidy, C.M., Malcolm, K., Shattock, R.J., McCarthy, H., Donnelly, R.F., 2012, Microneedle mediated intradermal delivery of adjuvanted recombinant HIV-1 CN54gp140 effectively primes mucosal boost inoculations. *J. Control. Release*, 162, 529–537.
- [87] Edens, C., Dybdahl-Sissoko, N.C., Weldon, W.C., Oberste, M.S., Prausnitz, M.R., 2015, Inactivated polio vaccination using a microneedle patch is immunogenic in the rhesus macaque. *Vaccine*, 33, 4683–4690.
- [88] Hiraishi, Y., Nandakumar, S., Choi, S.-O., Lee, J.W., Kim, Y.C., Posey, J.E., Sable, S.B., Prausnitz, M.R., 2011, Bacillus Calmette-Guérin vaccination using a microneedle patch. *Vaccine*, 29, 2626–2636.
- [90] Gill, H.S., Söderholm, J., Prausnitz, M.R., Sällberg, M., 2010, Cutaneous vaccination using microneedles coated with hepatitis C DNA vaccine. *Gene Ther.* 17, 811–814.
- [90] Zhu, Q., Zarnitsyn, V.G., Ye, L., Wen, Z., Gao, Y., Pan, L., Skountzou, I., Gill, H.S., Prausnitz, M.R., Yang, C., 2009, Immunization by vaccine-coated microneedle arrays protects

- biomedical applications. *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, 168, 127–131.
- [110] Li, Q.Y., Zhang, J.N., Chen, B.Z., Wang, Q.L., Guo, X.D., 2017, A solid polymer microneedle patch pretreatment enhances the permeation of drug molecules into the skin. *RSC Adv.*, 7, 15408–15415.
- [111] Al-Japairai, K.A.S., Mahmood, S., Almurisi, S.H., Venugopal, J.R., Hilles, A.R., Azmana, M., Raman, S., 2020, Current trends in polymer microneedle for transdermal drug delivery. *Int. J. Pharm.*, 587, 119673–119673.
- biomedical applications: Advanced drug delivery technologies. *Mater. Sci. Eng. C*, 103, 109717.
- [100] Park, Y.H., Ha, S.K., Choi, I., Kim, K.S., Park, J., Choi, N., Kim, B., Sung, J.H., 2016, Fabrication of degradable carboxymethyl cellulose (CMC) microneedle with laser writing and replica molding process for enhancement of transdermal drug delivery. *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, 21, 110–118.
- [101] Kumar, A., Naguib, Y., Shi, Y.C., Cui, Z., 2016, A method to improve the efficacy of topical eflornithine hydrochloride cream. *Drug Deliv.*, 23, 1495–1501.
- [102] Mysore, V., Chandrashekar, B., Yepuri, V., 2014, Alopecia areata-successful outcome with microneedling and triamcinolone acetonide. *J. Cutan. Aesthetic Surg.*, 7, 63–64.
- [103] Majid, I., 2009, Microneedling therapy in atrophic facial scars: An objective assessment. *J. Cutan. Aesthetic Surg.*, 2, 26–30.
- [104] El-Domyati, M., Barakat, M., Awad, S., Medhat, W., El-Fakahany, H., Farag, H., 2015, Microneedling therapy for atrophic acne scars an objective evaluation. *J. Clin. Aesthet. Dermatol.*, 8, 36–42.
- [105] Aust, M.C., Knobloch, K., Reimers, K., Redeker, J., Ipaktchi, R., Altintas, M.A., Gohritz, A., Schwaiger, N., Vogt, P.M., 2010, Percutaneous collagen induction therapy: An alternative treatment for burn scars. *Burns*, 36, 836–843.
- [106] Dhurat, R., Sukesh, M., Avhad, G., Dandale, A., Pal, A., Pund, P., 2013, A randomized evaluator blinded study of effect of microneedling in androgenetic alopecia: A pilot study. *Int. J. Trichology*, 5, 6–11.
- [107] Economidou, S.N., Douroumis, D., 2021, 3D printing as a transformative tool for microneedle systems: Recent advances, manufacturing considerations and market potential. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 173, 60–69.
- [108] Bhatnagar, S., Gadeela, P.R., Thathireddy, P., Venuganti, V.V.K., 2019, Microneedle-based drug delivery: Materials of construction. *J. Chem. Sci.*, 131, 90.
- [109] Desai, S., Perkins, J., Harrison, B.S., Sankar, J., 2010, Understanding release kinetics of biopolymer drug delivery microcapsules for

“Review article”

Microneedle Arrays: A Review of Principles, Applications, and Recent Advancements

Noushin Dadashzadeh^{1*}, Elnaz Poorreza², Naser Moslehi Milani³

¹ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering Aras Branch, Islamic Azad University, Jolfa, Iran

² PHD, Department of Electrical Engineering Aras Branch, Islamic Azad University, Jolfa, Iran

³ Assistant Professor, Department of Physics Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

*Corresponding author:

(Received: 10 September 2024, Accepted: 18 November 2024)

Abstract

Microneedle Arrays (MNA) are innovative tools composed of tiny needles ranging from several tens of microns to a few millimeters. These microstructures, fabricated from various materials such as metals, polymers, ceramics, and biocompatible materials, have brought extensive applications in various medical fields. By penetrating the upper layers of the skin or other tissues, MNAs offer novel methods for drug delivery, vaccination, sampling, and disease diagnosis. In this study, we will strive to gain a more detailed understanding of microneedles and their applications in the fields of aesthetics, medicine, and other areas by utilizing the latest research and providing more in-depth information. Additionally, the limitations and challenges associated with this technology will be examined and analyzed to enable us to make better use of microneedles in the future and enhance their strengths. Furthermore, a more thorough examination and categorization of microneedle types and their effects on the skin and underlying tissues will be conducted due to their significance in the application of this technology. Finally, by combining the data and findings obtained, we will be able to develop strategies for improving and enhancing the use of microneedles and expanding their applications in this field.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Microneedle Arrays (MNA), Transdermal Drug Delivery, Solid Microneedles, Hollow Microneedles, Porous Microneedles, Dissolving Microneedles, Swelling Microneedles



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال پانزدهم، شماره‌ی ۵۹
پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۲۵-۳۵

"مقاله مروری"

توسعه فناوری سلول‌های خورشیدی کم هزینه با کارایی بالا با استفاده از نانو ساختارهای پلاسمونیک

مجتبی جمعیتی*

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

* نویسنده مسئول مکاتبات: drmjamiati@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸)

چکیده

سلول‌های خورشیدی چند پیوندی مرکب III-V عملکرد راندمان فوق العاده بالایی را در طرح‌هایی که می‌توان از سلول‌های فرعی با کیفیت مواد بالا و راندمان کوانتومی داخلی بالا استفاده کرد، امکان‌پذیر می‌کند. با این حال، مسأله لایه‌نشانی آن‌ها مشروط به شکاف باندهای مناسب هر لایه با لایه‌های مجاور جهت افزایش بازدهی حائز اهمیت می‌باشد. برای داشتن بازدهی بالا در سلول‌های خورشیدی، علاوه بر توجه به انتخاب درست مواد تشکیل دهنده ساختار، بایستی طراحی ساختار نیز به گونه‌ای انجام شود که حداکثر جذب نور را در لایه فعال داشته باشد. بدین لحاظ با وارد کردن نانو ذرات (طلا - نقره و...) در لایه فعال، خواص الکتریکی این لایه را در راستای افزایش جذب بهبود می‌بخشند. نانو ذرات فلزی کاندیداهایی برای افزایش بازده تبدیل توان سلول‌های خورشیدی پلاسمونیک توسط تشدید پلاسمون سطحی متمرکز شده و توانایی به دام انداختن نور در فیلم می‌باشند. طیف کارایی کوانتومی برای سلول پیوندی، کاملاً مشابه با هر یک از زیرسلول‌های GaAs و InGaAs بدون پیوند بود. ولتاژ مدار باز سلول دو پیوندی باند برابر با مجموع ولتاژهای مدار باز سلول فرعی غیر پیوندی بود، که نشان می‌دهد فرآیند پیوند کیفیت مواد سلول را کاهش نمی‌دهد، زیرا هر گونه نقص کریستالی ایجاد شده که به عنوان مراکز نوترکیبی عمل می‌کند، باعث کاهش ولتاژ می‌شود. همچنین رابط پیوندی، نرخ نوترکیبی حامل قابل توجهی برای کاهش ولتاژ مدار باز ندارد.

واژه‌های کلیدی: سلول‌های خورشیدی، پلاسمونیک، کریستالی، نانو ذرات، GaA

مقدمه

مصرف انرژی الکتریکی در جهان کنونی حدود TW ۱۲-۱۳ است و در هر ثانیه حدود $1/1 \times 10^{20}$ KWh انرژی از خورشید ساطع می‌شود. تنها یک دو میلیاردم این انرژی به سطح بیرونی جو زمین برخورد می‌کند. این انرژی معادل $5/1 \times 10^{15}$ KWh در سال است. که بدلیل بازتاب، تفرق و جذب توسط گازها و ذرات معلق در جو تنها ۴۷٪ از این انرژی به سطح زمین می‌رسد. بدین ترتیب انرژی تابیده شده به سطح زمین سالانه حدوداً معادل 7×10^7 KWh است. بنابراین سهم زمین در دریافت انرژی از خورشید میزان کمی از کل انرژی تابشی آن می‌باشد (۶-۱).

با توجه به استانداردهای بین‌المللی مورد استفاده در دنیا اگر میانگین انرژی تابشی خورشید در روز بالاتر از $3/5$ کیلو وات ساعت در مترمربع (3500 وات/ساعت) باشد استفاده از مدل‌های انرژی خورشیدی نظیر کلکتورهای خورشیدی یا سیستم‌های فتوولتائیک بسیار اقتصادی و مقرون به صرفه است. انرژی خورشیدی یک عرصه جوان اما در حال پیشرفت سریع است. طی ده سال اخیر، دنیا هر چه فعال‌تر از فناوری مشهور تبدیل نور خورشید به انرژی گرمایی و برق استفاده می‌کند. فقط دلایل اقتصادی مانع از رسیدن انرژی خورشید به هر یک از خانه‌ها می‌شود زیرا فعلاً هر کیلووات برق دریافتی از آن بیش از حد گران تمام می‌شود که البته در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشم‌گیری در جهت کاهش این هزینه‌ها نیز صورت گرفته است. برای برآورد نیاز مصرف انرژی در جهان، به منطقه وسیعی از مبدل‌های انرژی

نیاز دارد. بنابراین تبدیل انرژی خورشیدی با راندمان بالا بسیار مهم است. سلول‌های خورشیدی که فتوولتائیک نیز نامیده می‌شوند، دستگاه‌هایی هستند که انرژی نور خورشید را با اثر فتوولتائیک کشف شده توسط دانشمند فرانسوی هانری بکرل در سال ۱۸۳۹ به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. سلول خورشیدی متشکل از یک پیوند pn می‌باشد که در یک ماده نیمه‌رسانای چند لایه^۱ ایجاد شده است و در تاریکی مشخصه ولتاژ - جریان آن مشابه با مشخصه نمایی یک دیود می‌باشد. سلول‌های خورشیدی به ویژه از زمان بحران‌های نفتی دهه ۱۹۷۰ به عنوان یک منبع انرژی جایگزین مهم شناخته شده‌اند. سلول‌های خورشیدی همچنین به عنوان یک منبع انرژی بدون کربن برای غلبه بر گرمایش جهانی امیدوار کننده هستند.

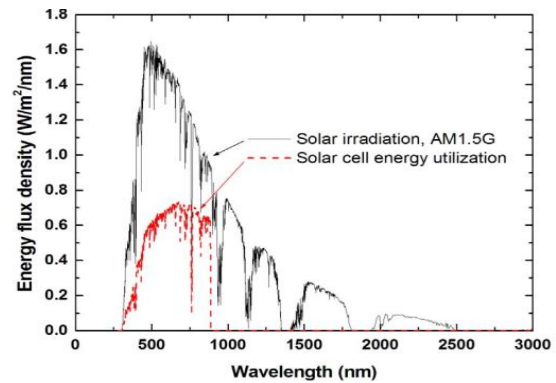
بازده تبدیل انرژی یک سلول خورشیدی به عنوان نسبت توان الکتریکی تولید شده توسط سلول خورشیدی به انرژی نور خورشید وارد شده به سلول خورشیدی در هر زمان تعریف می‌شود. در حال حاضر بالاترین راندمان سلولی گزارش شده در آزمایشگاه‌ها حدود ۴۰٪ است در حالی که راندمان تبدیل انرژی برای تولید برق حرارتی می‌تواند از ۵۰٪ فراتر رود. اما این واقعیت هرگز به معنای برتری تولید حرارتی نیست زیرا منابع آن مانند سوخت‌های فسیلی محدود است در حالی که انرژی خورشیدی اساساً نامحدود است. طیف شار انرژی فرودی نور خورشید برای بازده سلول‌های خورشیدی گزارش شده به عنوان برخی از طیف‌های تعریف شده خاص مانند جرم هوا صفر (AM0) جرم هوا ۱/۵ جهانی و مستقیم

¹ Wafer

خورشیدی به طیف تابش خورشیدی با بازده تبدیل انرژی مطابقت دارد و در این مورد ۳۱٪ است (۱۱). تمرکز نور خورشید در ناحیه برخوردی کوچک‌تر با استفاده از لنزها دو مزیت برای کاربردهای سلول خورشیدی دارد. اولین مورد کاهش هزینه مواد با مساحت کوچک‌تر سلول‌های خورشیدی گزارش شده به عنوان برخی از طیف‌های تعریف شده خاص مانند جرم هوا صفر (AM0)، جرم هوا ۱/۵ جهانی و مستقیم (AM1.5G, AM1.5D) استاندارد شده است (۱۰-۷). شکل ۱ طیف‌های خورشید را نشان می‌دهد، که بیشتر برای سلول‌های خورشیدی زمینی تحت اندازه‌گیری‌های طیف نور خورشید غیر متمرکز ذکر شده است.

سلول‌های خورشیدی ساخته شده از ترکیبات نیمه هادی III - V به جای سایر موادی که توسط سیلیکون نشان داده شده‌اند، بازده تبدیل انرژی بالاتری را نشان می‌دهند (۹). علاوه بر پتانسیل برای راندمان بالا، مواد ترکیبی نیمه‌هادی III - V دارای مزایایی از جمله قابلیت تنظیم شکاف باند توسط ترکیبات عنصری، جذب فوتون بیشتر توسط انرژی‌های باند مستقیم، مقاومت بالاتر در برابر پرتوهای پراثری در فضا، و تخریب بازده کم‌تر توسط گرما نسبت به سلول‌های خورشیدی Si راندمان تبدیل انرژی سلول‌های خورشیدی III - V به طور پیوسته سال به سال افزایش می‌یابد و برای سلول‌های در مقیاس آزمایشگاهی به ۴۰٪ می‌رسد که در شکل ۲ مشاهده می‌شود (۱۰). تا به امروز تلاش‌های زیادی برای بهبود عملکرد سلول به منظور توسعه فعالیت‌های فضایی و راه حلی برای

(AM1.5G, AM1.5D) استاندارد شده است (۱۰-۷). شکل ۱ طیف‌های خورشید را نشان می‌دهد، که بیشتر برای سلول‌های خورشیدی زمینی تحت اندازه‌گیری‌های طیف نور خورشید غیر متمرکز ذکر شده است.



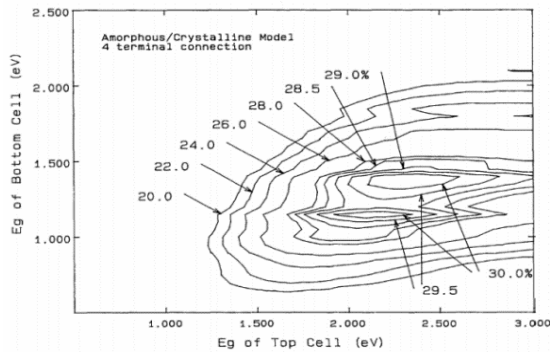
شکل (۱): طیف تابش خورشیدی AM1.5G و طیف استفاده از انرژی توسط یک سلول خورشیدی تک اتصالی با فاصله باند انرژی 1.4 eV (۵).

طیف خورشیدی به طور گسترده‌ای بین ۳۰۰ نانومتر تا ۲۰۰۰ نانومتر است که اوج آن در حدود ۶۰۰-۵۰۰ نانومتر است و کسر بزرگی از محدوده مرئی ناشی می‌شود. فرو رفتگی‌هایی که در طول موج‌های ۱۱۰۰، ۱۴۰۰ نانومتر و غیره مشاهده می‌شوند، به دلیل جذب عمدتاً توسط CO_2 و H_2O در جو است. کسر انرژی طیف خورشیدی مورد استفاده توسط یک سلول خورشیدی ایده آل تک اتصالی با فاصله باند انرژی 1/4 eV تعیین شده توسط محاسبه تعادل دقیق بر اساس ترمودینامیک با در نظر گرفتن تلفات نوترکیبی حامل‌ها (جفت الکترون-حفره) پیشنهاد شده توسط شاکلی و کوپسر^۲ (۵) در شکل ۱ نشان داده شده است. نسبت مساحت این طیف تولید انرژی توسط سلول

² Shockley and Queisser

چند پیوندی یا پشت سر هم نامیده می شوند. حد بازده نظری بر اساس محاسبه تعادل دقیق برآورد شده توسط هنری^۳ نشان می دهد که یک سلول ۳۶ اتصالی به طور ایده آل می تواند به بازده ۷۲ درصد نسبت به ۳۷ درصد برای یک سلول ۱ شکاف برسد (۵).

یک محاسبه نظری برای بازده ایده آل با توجه به ترکیب انرژی باند مواد نیمه رسانای بالا و پایین در سلول‌های خورشیدی دو اتصالی (J₂)^۴ در شکل ۳ نشان داده شده است (۵).

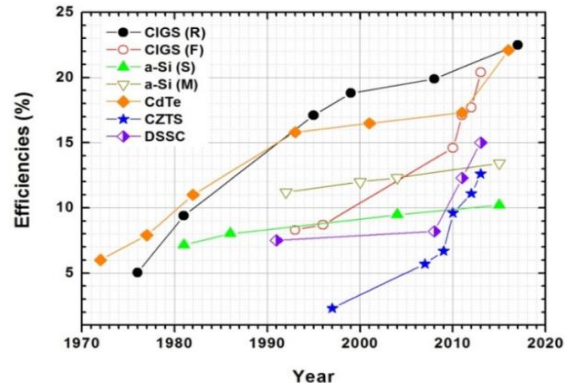


شکل (۳): نقشه بازدهی محاسبه شده برای سلول‌های

خورشیدی چهار پایانه دو پیوندی تحت طیف AM 1.5 G در روشنایی یک خورشیدی با توجه به شکاف‌های باند سلول بالا و پایین (۶)

برای سلول‌های چند پیوندی، ساختارهای یکپارچه یا دو ترمینالی به جای ساختارهای سه یا چهار ترمینالی گران قیمت و غیر عملی معمولاً مورد علاقه و استفاده قرار می گیرند. یک نمودار مقطعی شماتیک از یک ساختار سلول خورشیدی یکپارچه J₃^۵ در شکل ۴ نشان داده شده است (۱۲-۵).

بحران انرژی آتی و مسائل زیست محیطی جهانی صورت گرفته است.



شکل (۲): ثبت زمانی راندمان تبدیل انرژی سلول‌های

خورشیدی (۶)

توسعه سلول‌های خورشیدی ترکیبی نیمه‌هادی

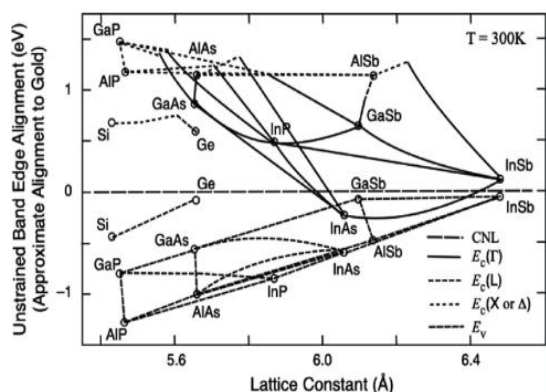
III-V چند پیوندی

یکی از عوامل اصلی اتلاف انرژی در یک سلول خورشیدی، شکاف بین انرژی فوتون و انرژی گپ باند مواد فتوولتائیک است. اگر انرژی فوتون کوچک تر از انرژی فوتون باشد، هیچ جذبی رخ نمی دهد و صرفاً می توان بخشی معادل انرژی فاصله باند از انرژی فوتون را به عنوان نیروی الکتریکی استخراج کرد و بخش دیگر را به عنوان گرما هدر داد، اگر بزرگ تر باشد. بنابراین، انباشته شدن چندپشته مواد فتوولتائیک با انرژی‌های مختلف باند معمولاً برای سلول‌های خورشیدی با راندمان بالا III-V برای کاهش این اتلاف انرژی و جذب انرژی فوتون از طیف نور خورشید به طور گسترده تر و کارآمدتر، با بهره گیری از قابلیت تنظیم انرژی‌های باند و ثابت‌های شبکه استفاده می شود. با ترکیبات نیمه هادی III-V که سلول‌های

³ Henry

⁴ two-junction

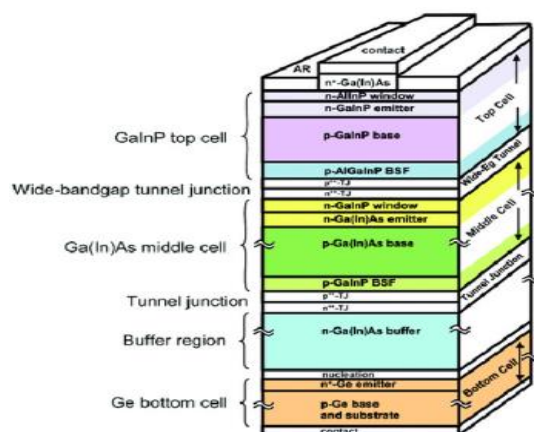
⁵ three-junction



شکل (۶): انرژی لبه نواری رسانایی و لبه باند ظرفیت به عنوان تابعی از ثابت شبکه نیمه‌هادی‌ها رسم شده است. نقطه انرژی صفر موقعیت تقریبی مانع شاتکی طلا را در شکاف نواری هر آلیاژ معین نشان می‌دهد (۱۳).

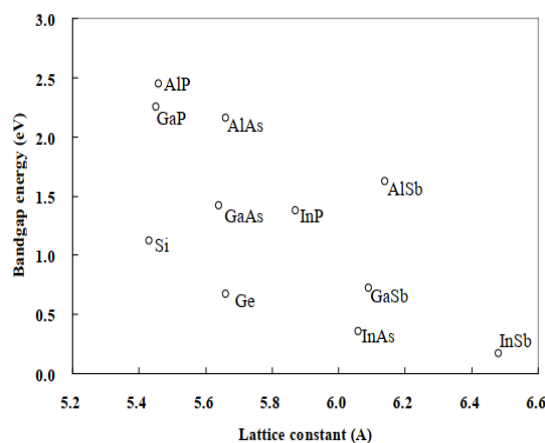
یکی از رایج‌ترین و با بالاترین راندمان سلول‌های دوتایی J_۲ شامل ترکیبی از $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ و GaAs با ثابت شبکه 5.64Å و انرژی باندگپ به ترتیب 1.86 eV و 1.42 eV است. این سلول InGaP/GaAs دارای بالاترین بازده 30.3% درصدی تحت طیف خورشیدی AM1.5D با شدت ۱ خورشیدی (۱۰۰ میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع) در میان سلول‌های یکپارچه J_۲ است، در حالی که پیکربندی ۴ ترمینالی راندمان بالاتر از J_۲ در حد 32.6% را در طیف AM1.5 D در ۱۰۰ خورشید برای پستی GaAs/GaSb شبکه ای مجاز می‌کند، ($\text{GaSb}: 6.09\text{ Å}$) (5) (0.70 eV) .

برای ساخت سلول‌های J_۳ معمولاً، یک سلول پایین Ge به سلول InGaP/GaAs (J_۲) اضافه می‌شود تا یک ساختار InGaP/GaAs/Ge برای ثابت شبکه Ge با 5.66 Å تقریباً برابر با InGaP/GaAs تشکیل دهد. این ساختار J_۳ بر روی یک بستر Ge رشد می‌کند و مزیت آن این است که Ge ماده‌ای ارزان‌تر و از نظر مکانیکی



شکل (۴): شماتیک مقطعی ساختار سلول سه اتصالی (۱۲)

سلول‌های خورشیدی چند پیوندی با رشد همپایه به طور کلی با رسوب بخار شیمیایی آلی فلزی (MOCVD) لایه‌بندی شده‌اند که نیاز به تطبیق شبکه بین مواد نیمه هادی انباشته دارد. شکل‌های ۵ و ۶ رابطه بین ثابت‌های شبکه و انرژی‌های باند شکاف را برای ترکیبات نیمه هادی V-III که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند نشان می‌دهد.



شکل (۵): انرژی‌های باند به عنوان تابعی از ثابت شبکه نیمه هادی‌ها (۶)

⁶ Metal organic chemical vapor deposition

این ویژگی‌ها به شدت به جذب پلاسماون سطحی، یعنی جذب افزایش یافته نور یا میدان‌های الکترومغناطیسی با جفت شدن بین فوتون‌های فرودی و نوسان جمعی الکترون‌های آزاد در سطح فلز وابسته است (۸ و ۹). از نظر تئوری پیشنهاد شده که انرژی الکترومغناطیسی را می‌توان در امتداد آرایه‌های زنجیره‌های تناوبی از نانوذرات فلزی با فاصله نزدیک هدایت کرد که حالت نوری را به پلاسماون‌های سطحی غیر تابشی تبدیل می‌کند (۱۰). چنین دستگاه‌های پلاسماونیک از مکان‌یابی نور در جفت شدن دو قطبی یا نوسانات پلاسماون دو قطبی جمعی الکترون‌ها در ذرات فلزی در مقیاس نانو در فرکانس پلاسماون استفاده می‌کنند. موجبرهای پلاسماون متشکل از نانوذرات نقره با فاصله نزدیک با قطر حدود ۳۰ نانومتر به طور تجربی برای هدایت انرژی الکترومغناطیسی در فواصل چند صد نانومتری از طریق فعل و انفعالات ذرات میدان نزدیک مشاهده شده است (۱۱). علاوه بر این، پیشنهاد شده است که نور را می‌توان به طور موثر در اطراف گوشه‌های تیز آرایه‌های زنجیره‌ای نانوذرات هدایت کرد (۱۲). چنین فناوری‌های موجبر پلاسماونی به طور بالقوه می‌تواند برای ساخت تمام نوری مورد استفاده قرار گیرد.

چنین فناوری‌های موجبر پلاسماونی را می‌توان به طور بالقوه برای ساخت شبکه‌های نانومقیاس نوری مورد استفاده قرار داد (۱۳). لایه‌های فتوولتائیک نازک‌تر جذب نور کم‌تری خواهند داشت در حالی که لایه‌های

قوی‌تر از GaAs نسبت به سلول‌های رشد یافته روی بسترهای GaAs است.

به طور خاص برای استفاده در فضا، سلول‌های بسیار نازک، سبک و انعطاف‌پذیر InGaP/GaAs (J2) و InGaP/GaAs/Ge (J3) اخیراً در حال توسعه هستند. اگرچه فرآیندهای ساخت به خوبی فاش نشده است، لایه‌های فتوولتائیک به فیلم‌های پشتیبان فلز یا پلیمر و زیرلایه‌های اصلی برای رشد همبافته^۷ (روشی برای پوشش لایه‌ای تک‌بلور روی زیرلایه‌ای تک‌بلور است) متصل شده‌اند (۵).

برای بهبود بیشتر کارایی سلول، سلول‌هایی با اتصالات بیشتر مانند ساختار InGaP/GaAs/InGaAsN/Ge (J4) و سلول (AllnGaP/InGaP/InGaAsN/Ge) (J6) پیشنهاد شده‌اند راندمان این سلول (J6) در حد ۲۳.۶٪ تحت (AM0) در ۱ خورشید (2 mWcm^{-2}) گزارش شده است (۵).

پلاسماونیک برای کاربردهای سلول خورشیدی

نانوذرات فلزی ویژگی‌های نوری متمایزی مانند پراکندگی رامان تقویت شده سطحی (SERS)^۸ و نسل دوم هارمونیک (SHG)^۹ را نسبت به شکل توده‌ای فلزات نشان می‌دهند (۱-۳). سایر میدان‌های الکترونیک نوری با تابش نانوذرات فلزی مانند جذب چند فوتونی و تحریک فلورسانس برای میکروسکوپ، میکروساخت و ذخیره‌سازی داده‌های نوری نیز در حال ظهور هستند (۶ و ۷).

⁷ Epitaxy

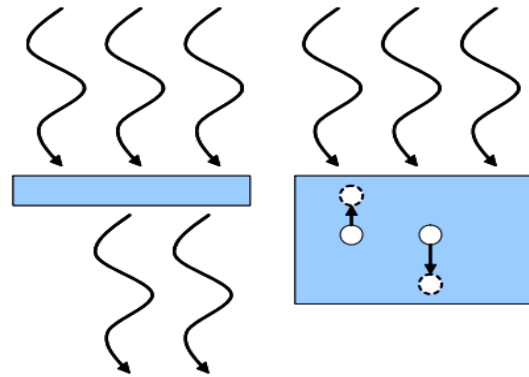
⁸ Surface-enhanced Raman scattering

⁹ Second harmonic generation

شدت استفاده شده است. برای مثال جذب نوری در سلول خورشیدی، پراکندگی رامان و پدیده‌های نوری غیرخطی در فرکانس‌های تشدید به شدت به محیط دی‌الکتریک، خواص مواد، اندازه و شکل نانوذرات فلزی وابسته و حساس هستند. این امر استفاده از تشدید پلاسمونی سطحی را به‌عنوان سنسورهای شیمیایی یا زیستی ممکن می‌سازد (۱۴).

یکی از محدودیت‌های ذاتی ادوات نوری مجتمع، کوچک‌سازی عناصر سازنده آن است که توسط حد پراش نور محدود می‌شود. پلاسمون پلاریتون‌های سطحی به دلیل غلبه بر این مشکل و امکان هدایت نور در ابعاد زیر طول موج، می‌توانند کاربردهای گسترده‌ای در مجتمع سازی مدارهای نوری داشته باشند. این پدیده می‌تواند رویای رسیدن به فناوری پردازنده‌های فوق سریع را واقعیت ببخشد. موج‌برهای فلز-عایق-فلز به علت هدایت پلاسمون‌های سطحی در سطح مقطع فلز-دی‌الکتریک ساختارهای بسیار مهمی در ادوات پلاسمونیک هستند (۱۵). در سال‌های اخیر این ساختارها محبوبیت زیادی در میان محققین بدست آورده‌اند چراکه این موج‌برها نه تنها از انتشار مدهای با طول موج بسیار کوچک و با سرعت گروهی بالا پشتیبانی می‌کنند، بلکه توانایی هدایت موج تا فواصل نسبتاً بالا را از خود نشان می‌دهند. ترکیب این موج‌برها با نانو تشدیدگرهایی با شکل‌های مختلف که از پهلوی به آن‌ها کوپل شده‌اند، ساختارهای متنوع جدیدی را به وجود می‌آورند که کاربردهای زیادی در ادوات تمام نوری دارند. این ساختار می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای طراحی سوئیچ‌های پلاسمونی در قدرت‌های پایین باشد (۱۶).

ضخیم‌تر بازترکیب حامل بیش‌تری دارند، این موضوع به صورت شماتیک در شکل ۷ نشان داده شده است.



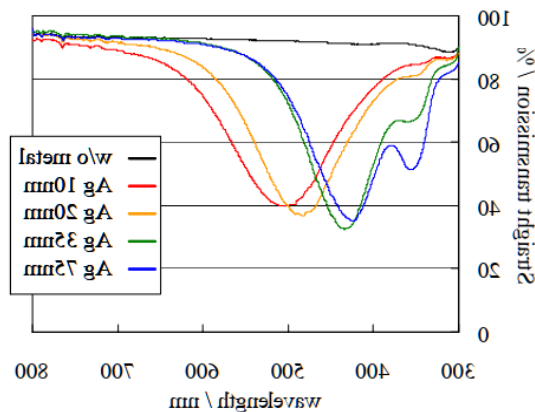
شکل (۷): شماتیک برای مسئله مبادله در ضخامت لایه فتوولتائیک. لایه‌های فتوولتائیک نازک‌تر جذب نور کم‌تری دارند (سمت چپ) در حالی که لایه‌های ضخیم‌تر نور ترکیب حامل حجیم‌تر بیش‌تری دارند (راست) (۵).

هر دوی این دو عامل تلفات خروجی الکتریکی سلول خورشیدی تبدیل شده از انرژی نور خورشید تابشی خواهد بود. بنابراین ضخامت لایه فتوولتائیک فعال معمولاً برای به حداکثر رساندن راندمان تبدیل انرژی از طریق آن مبادله بهینه می‌شود. نانو ساختارهای فلزی می‌توانند پلاسمون‌های سطحی را تحریک کنند و می‌توانند به طور چشمگیری طول مسیر نوری را در لایه‌های نازک فتوولتائیک فعال افزایش دهند تا جذب نور کلی را افزایش دهند.

در تشدید پلاسمون‌های سطحی، پراکندگی و جذب نانو ذرات فلزی به ابعاد فلزی تا چندین برابر آت نانوذره افزایش می‌یابد که منجر به یک فیلترینگ در باندهای خاص از طیف الکترومغناطیس خواهد شد. نتیجه دیگر تشدید پلاسمون‌های سطحی این است که در مجاورت نانوذرات فلزی افزایش شدت رخ خواهد داد که این برای ارتقای پدیده‌های نوری وابسته به

قابل توجهی بالاتر است، که می‌توان آن را به بازده تابش بسیار بالاتر نسبت داد.

طیف انتقال برای آرایه‌های نانوذرات نقره با قطر ذرات ۶۰ نانومتر و ارتفاع‌های ذرات مختلف که روی لام‌های شیشه‌ای قرار گرفته‌اند در شکل ۹ نشان داده شده است. تشدید پلاسمون سطحی در نانوذرات فلزی به صورت افت در حدود ۴۰۰-۵۰۰ نانومتر دیده می‌شود.

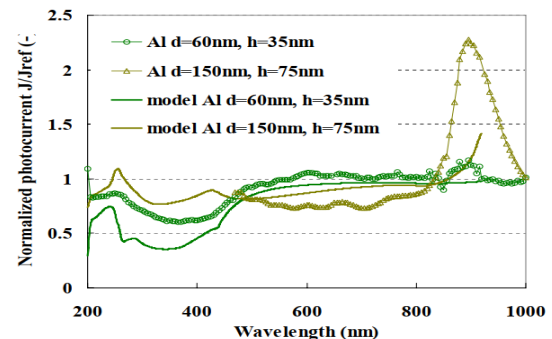
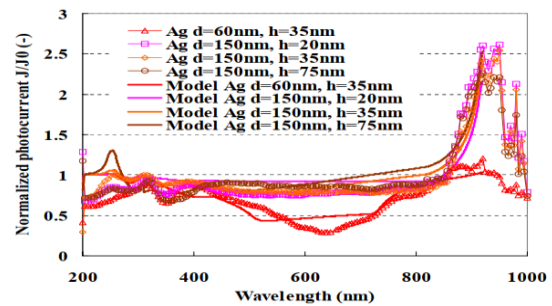


شکل (۹): طیف‌های مستقیم انتقال نوری آرایه‌های نانوذرات نقره با قطر ذرات ۶۰ نانومتر و ارتفاع‌های ذرات مختلف که بر روی لایه‌های شیشه‌ای قرار گرفته‌اند (۵).

در حالی که هیچ پراکندگی قابل توجهی برای منطقه نزدیک به IR مشاهده نمی‌شود. در شکل ۸، یک فرورفتگی احتمالاً ناشی از تشدید پلاسمون برای سلول با ذرات نقره با قطر ۶۰ نانومتر در حدود ۶۰۰ نانومتر دیده می‌شود، که اختلاف آن از طیف‌های انتقال به اثر لایه‌های مختلف نسبت داده می‌شود که در آن GaAs ضریب شکست بالاتری نسبت به شیشه دارد. فرکانس رزونانس را به قرمز منتقل کنید.

تجزیه و تحلیل نتایج

شکل ۸ طیف جریان نوری سلول‌های خورشیدی GaAs را با نانوذرات فلزی Ag و Al نشان می‌دهد. این داده جریان نوری توسط پاسخ طیفی سلول GaAs مرجع بدون نانوذرات فلزی نرمال می‌شود. حداکثر افزایش جریان نوری ۲۶۰ درصد در حدود ۹۰۰ نانومتر، برای سلول GaAs با نانوذرات نقره با قطر ۱۵۰ نانومتر، ارتفاع ۲۰ نانومتر و ۳۰ درصد پوشش سطحی دیده می‌شود.



شکل (۸): طیف جریان نور نرمال شده برای سلول‌های خورشیدی GaAs با (الف) نانوذرات نقره و (ب) Al. منحنی‌های جذب نرمال شده محاسبه شده در سلول‌های خورشیدی GaAs با نانوذرات Ag و Al بر اساس مدل نوری نیز رسم شده‌اند (۵).

جریان نوری نرمال شده (J/J_0) برای سلول‌هایی با نانوذره با قطر ۱۵۰ نانومتر نسبت به سلول‌هایی با قطر ۶۰ نانومتر برای تقریباً کل محدوده طیفی به‌طور

بحث و نتیجه‌گیری

منابع

- [1] Luo, D., Su, R., Zhang, W., Gong, Q., Zhu, R., Vignolini, L., 2020, Minimizing non-radiative recombination losses in perovskite solar cells. *Nat Rev Mater*, 5 (1), 44-60.
- [2] Han, S. E., Chen, G., 2010, Optical absorption enhancement in silicon nanohole arrays for solar photovoltaics. *Nano Lett*, 10, 1012-1015.
- [3] Jamiati, M., 2020, Kinetic Energy Distribution for Neutron-Induced Fission of Thorium Isotopes. *Physics of Atomic Nuclei*, 83, 859-865.
- [4] Schertel, L., Vignolini, S., 2020, Nanotechnology in a Shrimp Eye's View. *Nature Nanotechnology*, 15, 87-88.
- [5] Katsuaki, T., 2008, Low-Cost High-Efficiency Solar Cells with Wafer Bonding and Plasmonic Technologies. In *Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy*, California Institute of Technology Pasadena, California.
- [6] Katsuaki, T., 2009, Review of Ultrahigh Efficiency III-V Semiconductor Compound Solar Cells: Multijunction Tandem, Lower Dimensional, Photonic Up/Down Conversion and Plasmonic Nanometallic Structures. *Energies*, 2(3), 504-530.
- [7] Patil, A., Mishra, V., Thakur, S., Riyaz, B., Kaur, A., Khursheed, R., Patil, K., Sathe, B., 2019, Nanotechnology Derived Nanotools in Biomedical Perspectives: An update. *Current Nanoscience*, 15, 137-146.
- [8] Jamiati, M., 2021, Modeling of Maximum Solar Power Tracking by Genetic Algorithm Method. *Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment*, 12(2), 118-124.
- [9] Raj S., Jose S., Sumod U.S., Sabitha M., 2012, Nanotechnology in cosmetics: Opportunities and challenges. *J. Pharm. Bioallied Sci.*, 4, 186-193.
- [10] 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.
- [11] Lv, P., Xie, D., Zhang, Z., 2018, Magnetic carbon dots based molecularly imprinted polymers for fluorescent detection of bovine hemoglobin. *Talanta*, 188, 145-151.

افزایش جریان نوری و رفتار طیفی جریان نوری نرمال شده به‌طور کیفی توسط یک مدل نوری ساده که نشان‌دهنده تشدید پلاسمون سطحی نانوذرات فلزی و پراکندگی چند زاویه‌ای است، بازتولید می‌شود. به ویژه، ذرات فلزی با اندازه زیر موج بزرگ‌تر به دلیل راندمان تابش بالاتر برای Ag و Al منجر به جریان نوری بزرگ‌تر می‌شوند. سلول‌های بسیار نازک GaAs با لایه‌های پشتی Ag از طریق پیوند ویفری و انتقال لایه‌های GaAs ساخته شدند. این سلول GaAs موجب مانده افزایش جریان نور خالص را در سراسر محدوده طیفی خورشیدی نسبت به سلول GaAs مرجع با لایه پشتی GaAs جذب کننده نشان داد. یک قله بزرگ برای جریان نوری نرمال شده در اطراف باند GaAs پیدا شد و به بازتاب چند زاویه‌ای در لایه پشتی Ag نسبت داده شد. یک پیک کوچک‌تر در ۶۰۰ نانومتر یافت شد که به دلیل جفت شدن پلاسمون سطحی یا اثر تشدید فابری-پرو است. طیف‌های جذب نرمال‌شده محاسبه‌شده برای سلول‌های خورشیدی GaAs با نانوذرات فلزی با جریان نوری نرمال‌شده تجربی برای سلول‌های مربوطه نتایج تجربی را به‌خوبی بازتولید می‌کند، از جمله پیک‌های اطراف ۳۰۰ نانومتر و ۹۰۰ نانومتر و شیب‌های اطراف در ۶۰۰ نانومتر برای ۶۰ نانومتر نقره و ۳۵۰ نانومتر برای قطر ۶۰ نانومتر Al. شیب حدود ۶۰۰ نانومتر در جریان نوری نرمال شده برای سلول با ذرات نقره با قطر ۶۰ نانومتر، احتمالاً به دلیل تشدید پلاسمون سطحی در ذرات نقره، برای قطر ۱۵۰ نانومتر دیده نمی‌شود.

- [12] Cotal, H., Fetzer, C., Boisvert, J., Kinsey, G., King, R., Hebert, P., Yoon, H., & Karam, N, 2009, III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics. *Energy and Environmental Science*, 2(2), 174-192.
- [13] Cheng, K. Y., 2020, Heterostructure Electronic Devices. *Energy and Environmental Science*, 2(2), 174-192.
- [14] Liu, N., Mesch, M., Weiss, T., Hentschel, M., Giessen, H., 2010, Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor. *Nano letters*, 10 (7), 2342-2348.
- [15] Adedeji, M. A., Hamed, M. S. G., Mola, G.T., 2020, Light trapping using copper decorated nano-composite in the hole transport layer of organic solar cell. *Sol. Energy*, 203, 83-90.
- [16] Shabani, L., Mohammadi, A., Jalali, T., 2023, Performance analysis of polymer bulk heterojunction solar cells with plasmonic nanoparticles embedded into the P3HT:PC61BM active layer using the FDTD method. *Polym. Bull.*, 80, 9589-9610.

“Review article”

Development of low-cost, high-performance solar cell technology using plasmonic nanostructures

Mojtaba Jamiati*

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

*Corresponding author: drmjamiati@gmail.com

(Received: 2 March 2024, Accepted: 8 September 2024)

Abstract

III-V compound multijunction solar cells enable ultra-high efficiency performance in designs where sub-cells with high material quality and high internal quantum efficiency can be used. However, the issue of their layering is subject to the proper band gap of each layer with the adjacent layers to increase the efficiency. In order to have high efficiency in solar cells, in addition to paying attention to the correct selection of the materials that make up the structure, the design of the structure should also be done in such a way that we have the maximum absorption of light in the active layer, in this sense, by introducing nanoparticles (gold, silver, etc.) . In the active layer, the electrical properties of this layer are improved in line with increasing absorption. Metal nanoparticles are candidates for increasing the power conversion efficiency of plasmonic solar cells by focused surface plasmon resonance and the ability to trap light in the film. The quantum efficiency spectra for the grafted cell were quite similar to each of the ungrafted GaAs and InGaAs subcells. The open-circuit voltage of the double-band bonded cell was equal to the sum of the open-circuit voltages of the non-bonded subcell, indicating that the bonding process does not reduce the quality of the cell material because any crystal defects created that act as recombination centers cause a voltage drop. Also, the junction interface does not have a significant carrier recombination rate to reduce the open circuit voltage.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: solar cells, plasmonic, crystal, nanoparticles, GaAs



"مقاله پژوهشی"

بهینه‌سازی فرآیند تجزیه ۴-کلروفنول از پساب صنعتی با استفاده از نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت و کاربرد اولتراسونیک

زهرا حاجیانی^۱، علی منتظری^۲، زهرا پور نوروز نوده^۳، محمد طاهر شفیعی سیف آبادی^۴، علی آقابابایی بنی^{۵*}

^۱گروه شیمی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

^۲پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۳گروه شیمی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران

^۴شرکت پتروشیمی لاوان، هلدینگ انرژی سپر، تهران، ایران

^{۵*}گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: aliaghababai@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۹/۲۶)

چکیده

۴-کلروفنول یکی از آلاینده‌های مقاوم و سمی در پساب‌های صنعتی است که نیازمند روش‌های کارآمد برای حذف آن از محیط زیست می‌باشد. در این مطالعه، کارایی نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت در تجزیه ۴-کلروفنول با استفاده از فرآیند سونو-شبه فنتون بررسی شد. در این پژوهش با هدف اقتصادی شدن فرایند، کربن فعال به عنوان پایه ی کاتالیزور از پوست سخت هسته گیلان تهیه شد. نتایج نشان داد که در pH برابر با ۳، دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و دوز نانوکاتالیزور ۲ گرم در لیتر، کارایی حذف به بیش از ۹۰٪ برای غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر ۴-کلروفنول رسید. افزایش غلظت ۴-کلروفنول موجب کاهش کارایی و افزایش زمان اکسیداسیون شد. همچنین، پراکسید هیدروژن به عنوان عنصر کلیدی در تولید رادیکال‌های هیدروکسیل برای تجزیه آلاینده‌ها نقش داشت و کمبود یا زیاد بودن آن کارایی فرآیند را تحت تأثیر قرار داد.

واژه‌های کلیدی: ۴-کلروفنول، فرآیند شبه فنتون، نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت، اولتراسونیک، پراکسید هیدروژن، پساب صنعتی

مقدمه

۴-کلروفنول یکی از ترکیبات آلی پرکاربرد است که به‌طور گسترده در صنایع مختلف مانند تولید آفت‌کش‌ها، مواد نگهدارنده چوب، رنگ‌ها، رزین‌ها، و داروسازی استفاده می‌شود (۱). این ماده به‌عنوان یک ماده میانی در سنتز شیمیایی و همچنین به‌عنوان ضد عفونی‌کننده نیز به کار می‌رود. با این حال، به دلیل پایداری شیمیایی و سمیت بالای آن، ۴-کلروفنول پس از استفاده صنعتی به راحتی وارد فاضلاب صنعتی و منابع آبی می‌شود و مشکلات زیست‌محیطی و بهداشتی متعددی ایجاد می‌کند (۲). این ماده در محیط زیست به سختی تجزیه می‌شود و می‌تواند منجر به آلودگی خاک، آب‌های سطحی و زیرزمینی گردد. تجمع ۴-کلروفنول در محیط، آثار زیانباری بر روی اکوسیستم‌های آبی داشته و همچنین به دلیل خاصیت سرطان‌زایی و سمیت برای انسان، تهدیدی جدی برای سلامت عمومی محسوب می‌شود (۳). بنابراین، حذف مؤثر این ماده از فاضلاب صنعتی برای کاهش اثرات مخرب آن بسیار ضروری است. در فرآیند سونو-شبه فنتون، ترکیب امواج اولتراسونیک، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و یک کاتالیزور، واکنش‌های زنجیره‌ای را آغاز می‌کند که به تولید رادیکال‌های هیدروکسیل ($\bullet OH$) بسیار واکنش‌پذیر منجر می‌شود (۴). این رادیکال‌ها آلاینده‌های آلی را به‌طور مؤثر از طریق واکنش‌های اکسیداسیون تخریب می‌کنند. کاتالیزور نقش حیاتی در افزایش کارایی فرآیند دارد و تولید و استفاده از رادیکال‌های $\bullet OH$ را تسهیل می‌کند (۵).

تحقیقات اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در تخریب ۴-کلروفنول با استفاده از فرآیندهای فنتون یا شبه فنتون به دست آورده‌اند. چندین مطالعه به بررسی

اثربخشی کاتالیزورهای مختلف و شرایط واکنش در دستیابی به حذف مؤثر آلاینده پرداخته‌اند. به عنوان مثال، گان و همکاران استفاده از لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهری به‌عنوان پایه کاتالیزور را بررسی کرده و تخریب کامل آهن دوظرفیتی را پس از چندین چرخه گردش فاضلاب نشان داده‌اند (۶). دوان و همکاران بر اصلاح کربن فعال تجاری با Fe_3O_4 تمرکز کردند که منجر به ایجاد کربن فعال مغناطیسی با سطح ویژه بالا شد (۷). یافته‌های آن‌ها نشان داد که فرآیند فنتون به‌طور قابل توجهی ۹۰٪ از ۴-کلروفنول را حذف کرد که ۱۰٪ بیش‌تر از فرآیند جذب است. سانتانا-مارتینز و همکاران به بررسی تخریب ۴-کلروفنول با استفاده از فرآیندهای الکترو-فنتون و الکترو-شبه فنتون پرداختند که به ترتیب بازده‌های حذف ۴۵٪ و ۷۰٪ را نشان دادند (۸). یانگ و همکاران یک سیستم فنتون‌مانند ناهمگن جدید مبتنی بر Mg/Fe و O_2 توسعه دادند که عملکرد بسیار خوبی در تخریب ۴-کلروفنول از خود نشان داد (۹). شرایط بهینه آن‌ها نسبت مولی منیزیم به آهن ۱:۳۲ و حداکثر غلظت پراکسید هیدروژن ۳۴/۵ میلی‌گرم در لیتر را ارائه داد. همچنین، سو و همکاران با موفقیت یک کاتالیزور نانومقیاس متشکل از نانوذرات اکسید مس/منگنز برای حذف ۴-کلروفنول از فاضلاب تهیه کردند (۱۰). لیو و همکاران یک نانولوله کامپوزیت شامل نانولوله‌های کربنی و آهن-روی را سنتز کرده و نتایج امیدوارکننده‌ای در تخریب فنتون‌مانند ۴-کلروفنول به دست آوردند (۱۱). علاوه بر این، هادی و همکاران کارایی تخریب ۴-کلروفنول را با استفاده از یک سیستم شبه فنتون ناهمگن با پرسولفات و اسید اگزالیک بررسی کردند که به نرخ حذف چشمگیر

بختیاری تهیه شدند. ۴-کلروفنول ($\text{ClC}_6\text{H}_4\text{OH}$)، کلرید آهن (III) شش‌آبه ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)، سولفات آهن (II) هفت‌آبه ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)، محلول آمونیاک ۲۸٪ (NH_3)، هیدروکسید سدیم (NaOH)، و اسید کلریدریک ۳۷٪ (HCl) از شرکت Sigma-Aldrich خریداری شدند. محلول ۴-کلروفنول ($\text{C}_6\text{H}_5\text{ClO}$) با غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر با حل کردن ۱ گرم ۴-کلروفنول در یک لیتر آب تهیه شد. غلظت‌های مختلف در هر سری از آزمایش‌ها با رقیق‌سازی محلول مادر ساخته شد.

تهیه نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت

در این مطالعه، کربن فعال از ضایعات کشاورزی به دست آمد. ابتدا پوسته سخت هسته ی گیلاس به‌خوبی آسیاب شد (قبلاً دانه ی گیلاس برای روغن‌گیری از آن خارج شده بود)، سپس با آب مقطر دوبار تقطیر شده تمیز و شسته شدند. سپس در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت در یک آون خشک شدند. ماده خشک‌شده به دست آمده در مرحله بعد، به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در یک کوره قرار داده شد. برای به‌دست آوردن نانوذرات Fe_3O_4 ، از روش شیمیایی هم‌رسوبی استفاده شد. در این فرآیند، ۲.۸۴ گرم سولفات آهن (II) و ۵.۴ گرم کلرید آهن (III) در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شدند (۱۴). محلول در دمای محیط به مدت ۶۰ دقیقه و با هم‌زدن با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه روی هم‌زن مغناطیسی گرم شد. به تدریج، ۴۰ میلی‌لیتر محلول آمونیاک ۲۸٪ به‌صورت قطره‌قطره به محلول اضافه شد. اضافه کردن آمونیاک باعث تشکیل رسوب سیاه‌رنگ شد که نشان‌دهنده حضور مگنتیت است. در طول فرآیند، pH محلول با دقت کنترل شد تا محیط قلیایی حفظ شود.

۹۹/۶٪ دست یافتند (۱۲). همچنین، ژو و همکاران از فرآیند فنتون‌مانند با آهن و نانومیله‌های $\alpha - \text{MnO}_2$ که از خاکستر پوست گریپ‌فروت به دست آمده بود، استفاده کردند که نرخ تخریب را در مقایسه با فرآیند فنتون سنتی به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد (۱۳).

این مطالعات اخیر نشان‌دهنده کاتالیزورها و شرایط واکنشی متنوعی است که در تخریب ۴-کلروفنول استفاده شده‌اند و پتانسیل روش‌های کارآمدتر و پایدارتر تصفیه فاضلاب را نشان می‌دهند. با این حال، شایان ذکر است که اکثر این تحقیقات در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده‌اند و هدف آن‌ها بررسی امکان‌پذیری و کارایی کاتالیزورها و شرایط واکنشی مختلف است. در این راستا، تحقیق ما با معرفی رویکردهای نوآورانه به این حوزه کمک می‌کند. ابتدا، ما پیشنهاد استفاده از ضایعات کشاورزی یعنی پوست سخت هسته گیلاس را برای سنتز کربن فعال ارائه می‌دهیم که یک روش دوستدار محیط‌زیست و مقرون‌به‌صرفه برای تولید کاتالیزور است. همچنین، بر سنتز نانوکاتالیزورهای کم‌هزینه تمرکز می‌کنیم که امکان تولید در مقیاس بزرگ را برای پیاده‌سازی عملی فراهم می‌کند. علاوه بر این، برای بهبود فرآیند تخریب، یک سیستم مجهز به اولتراسونیک طراحی و در مطالعه ما استفاده شده است. ترکیب این عناصر نوآورانه، تحقیق ما را متمایز کرده و راه‌های جدیدی برای کاربرد عملی فرآیندهای فنتون یا شبه فنتون در تصفیه فاضلاب باز می‌کند.

بخش تجربی

مواد اولیه

ضایعات کشاورزی شامل پوست سخت هسته گیلاس از باغ‌های محلی شهر بن استان چهارمحال و

طراحی فرآیند

برای بررسی تجزیه ۴-کلروفنول در فرآیند سونو شبه فتون همراه با اکسیداسیون تر توسط پراکسید، یک مطالعه جامع انجام شد. متغیرهای مستقل مهم در این فرآیند به صورت همزمان و با استفاده از رویکرد طراحی آزمایش، با روش پاسخ سطح (RSM: Response surface method) با استفاده از طراحی مرکب مرکزی (CCD: central composite design) مورد بررسی قرار گرفتند. دامنه‌ها و سطوح کدگذاری شده و غیرکدگذاری شده متغیرهای مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. برای این مطالعه، یک بشر با حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر که مجهز به پروب اولتراسونیک بود، ساخته شد (شکل ۱). آزمایش‌ها با استفاده از ۱۰۰ میلی‌لیتر پساب در داخل این راکتور انجام شد. در هر آزمایش مقادیر متغیرهای مستقل (pH، دما، دوز نانو کاتالیست، غلظت H_2O_2 ، توان اولتراسونیک و زمان ماند بر اساس الگوی پیشنهاد شده توسط طراحی آزمایش تنظیم شد.

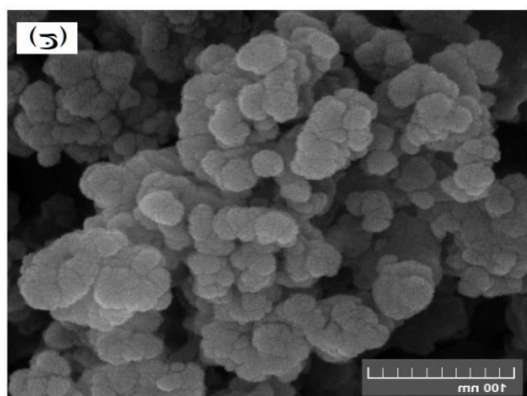
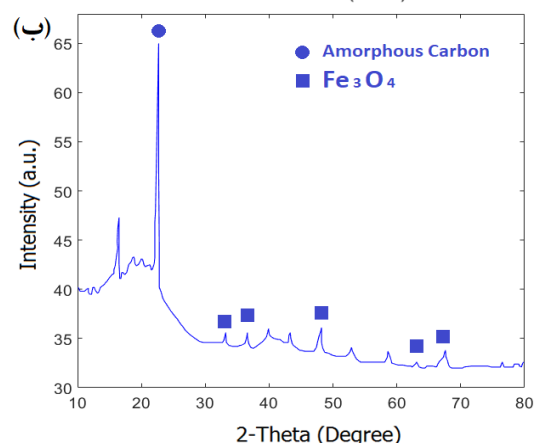
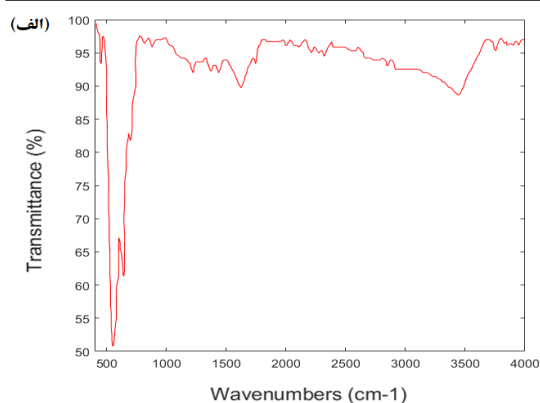
پس از هم‌زدن محلول به مدت ۲ ساعت، محلول به مدت ۱ ساعت بدون تحریک ماند تا دو فاز مجزا مشاهده شود. رسوب موجود در محلول سپس با استفاده از کاغذ صافی جدا شد و رسوب باقی‌مانده با آب مقطر کافی شسته شد تا pH محلول شستشو به سطح خنثی برسد. در نهایت، رسوب سیاه‌رنگ در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در یک آون خشک شد. برای تهیه نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت، کربن فعال با نسبت وزنی ۱۰٪ با نانوذرات مگنتیت ترکیب شد. مخلوط با مقدار مناسبی از آب مقطر دوبار تقطیر شده مخلوط و روی یک شیکر با سرعت ۳۵۰ دور بر دقیقه قرار داده شد. پس از ۳ ساعت مخلوط‌سازی کامل، ذرات جامد از محلول با استفاده از کاغذ صافی جدا شده و سپس به مدت ۱ ساعت در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند.

جدول (۱): محدوده‌ها و سطوح کد شده و غیر کد شده متغیرها در تجزیه اکسیداتیو فرآیند سونو شبه فتون.

متغیرهای مستقل	نماد و کد	سطح				
		-2	-1	0	+1	+2
pH	A: X_1	3	5.25	7.5	9.75	12
دما (°C)	B: X_2	28	33.5	39	44.5	50
دوز نانو کاتالیست ($g L^{-1}$)	C: X_3	0.2	0.65	1.1	1.55	2
H_2O_2 غلظت ($mmol L^{-1}$)	D: X_4	5	16.25	27.5	38.75	50
غلظت ۴-کلروفنل ($mg L^{-1}$)	E: X_5	50	287.5	525	762.5	1000
توان اولتراسونیک (W)	F: X_6	100	175	250	325	400
زمان ماند (min)	G: X_7	5	23.75	42.5	61.25	80

پاسخ

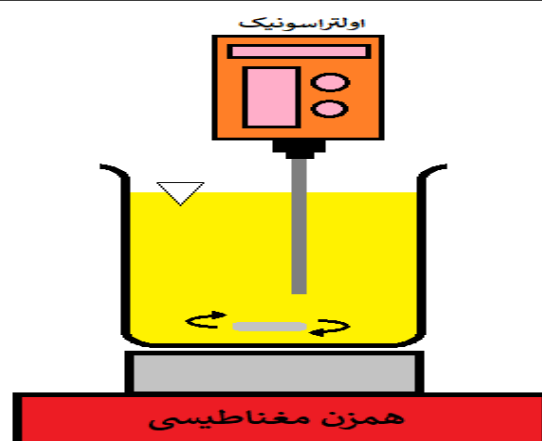
بازده حذف ۴-کلروفنل	R (%)
---------------------	-------



شکل (۲): (الف) طیف FT-IR، (ب) RDX و (ج) SEM از نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت.

اثر pH

pH محیط اطراف نقش مهمی در اکسیداسیون مواد دارد و در نتیجه بر سرعت واکنش تجزیه ۴-کلروفنول توسط نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت در فرآیند تخریب سونو-شبه فنتون تأثیر می‌گذارد (۱۵). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از امواج

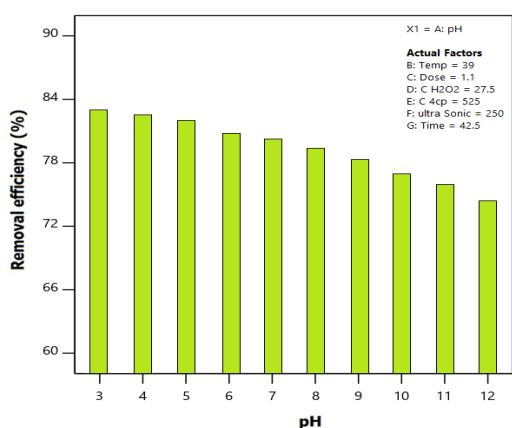


شکل (۱): شماتیک فرایند سونو شبه فنتون تجزیه ۴-کلروفنول.

نتایج و بحث

شناسایی و اندازه‌گیری

شکل ۲ (الف) طیف FT-IR نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت را نمایش می‌دهد. طیف کربن فعال حضور گروه‌های کربوکسیلیک و فنولی را با پیک‌های مشخصه نشان می‌دهد. در طیف کربن فعال/مگنتیت، پیک‌هایی که نشان‌دهنده گروه‌های NH_2 و O-H و ارتعاشات پیوند Fe-O هستند، حضور اکسید آهن در نانوکاتالیزور را تأیید می‌کنند. مطابق شکل ۲ (ب) الگوی XRD یک پیک بزرگ در 26° درجه را نشان می‌دهد که به طبیعت آمورف کربن مربوط است. در مقایسه منحنی XRD نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت با کارت JCPDS-19-0629، پیک‌هایی که به ساختار بلوری مکعبی مربوط هستند، حضور نانوذرات Fe_3O_4 در نانوکاتالیزور را تأیید می‌کنند. تصویر SEM در شکل ۲ (ج) نشان داد که کربن فعال دارای ساختار متخلخل و نانوذرات Fe_3O_4 با اندازه کم‌تر از 100 nm نانومتر هستند. همچنین، نانوذرات Fe_3O_4 به صورت خوشه‌ای کنار هم جمع شده و پوشش سطح کربن فعال با این نانوذرات کیفیت بالایی دارد.



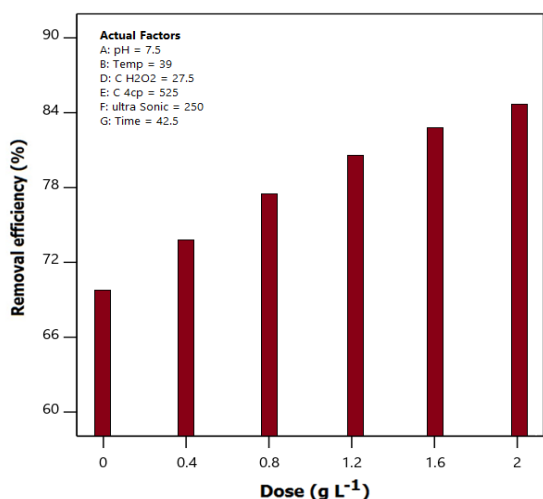
شکل (۳): تاثیر pH بر بازده حذف ۴-کلروفنول توسط نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت در فرآیند تخریب سونو-شبه فنتون.

اثر دما

اثر دما بر تجزیه ۴-کلروفنول با استفاده از فرآیند شبه فنتون در محدوده دمایی ۲۸-۵۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شد (شکل ۴). نتایج نشان داد که تجزیه ۴-کلروفنول در دمای بین ۴۰-۴۵ درجه سانتی‌گراد سریع‌تر انجام می‌شود که به دلیل افزایش نرخ واکنش بین پراکسید هیدروژن و کاتالیزور و در نتیجه تولید بیشتر رادیکال‌های OH[•] است (۱۹). با این حال، مشاهده شد که در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، کارایی تجزیه تا ۷۵٪ کاهش می‌یابد که این به دلیل کاهش پایداری کاتالیزور است. مطالعات قبلی معمولاً فرآیند مشابه فنتون را در دماهای محیط آزمایشگاهی انجام داده‌اند، بدون اینکه به طور گسترده متغیر دما را بررسی کنند (۲۰). با این حال، دما نقش مهمی در تصفیه پساب ایفا می‌کند و برخی کاربردها ممکن است به دماهای بالاتر برای کاهش موثر دوز کاتالیزور نیاز داشته باشند (۲۱). افزایش دما زیر محدوده بهینه می‌تواند با تأمین انرژی اضافی برای غلبه بر انرژی فعال‌سازی واکنش، کارایی فرآیند را افزایش دهد و در نتیجه نرخ واکنش را تسریع کند. دماهای بالاتر

فراصوت منجر به تشکیل رادیکال‌های OH[•] یا H[•] از بخار آب در حباب‌های ناشی از کاویتاسیون می‌شود. مشاهده شده است که این پدیده تحت تأثیر pH محیط قرار دارد (۱۶). نتایج بررسی pH در شکل ۳ ارائه شده است. مشخص شد که نرخ حذف ۴-کلروفنول در شرایط pH اسیدی بالاتر از شرایط pH خنثی و قلیایی است. بازده‌های حذف گزارش شده نزدیک به ۸۴٪ برای pH اسیدی، ۷۷٪ برای pH خنثی و ۷۳٪ برای pH قلیایی بود. تحقیقات مشابهی که از FeSO₄ به عنوان کاتالیزور استفاده کرده‌اند، این یافته‌ها را تأیید می‌کنند. فرآیند سونو شبه فنتون اثر pH را بر اکسیداسیون به این صورت توضیح می‌دهد: در سطح pH اسیدی ۳، آهن دوظرفیتی محلول است، در حالی که در محدوده pH ۳ تا ۵ به صورت Fe₂O₃.H₂O کلوئیدی ظاهر می‌شود. در pH بالاتر از ۵، رسوب Fe₂O₃ مشاهده می‌شود (۱۷). شرایط pH قلیایی منجر به تشکیل هیدرات آهن و تولید گونه‌های فریک می‌شود که باعث تجزیه سریع H₂O₂ به آب و اکسیژن می‌گردد و به همین دلیل تولید رادیکال‌های هیدروکسیل که در تجزیه ۴-کلروفنول نقش دارند متوقف می‌شود (۱۸). برعکس، در شرایط واکنش اسیدی، غلظت بالاتری از یون‌های آهن دوظرفیتی وجود دارد که در نتیجه قدرت اکسیدکنندگی رادیکال هیدروکسیل را افزایش می‌دهد (۱۹).

واکنش ایفا می‌کند، جایی که حضور آهن و پراکسید هیدروژن منجر به تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل می‌شود که به طور قابل توجهی به تجزیه مواد آلی کمک می‌کنند (۲۳).

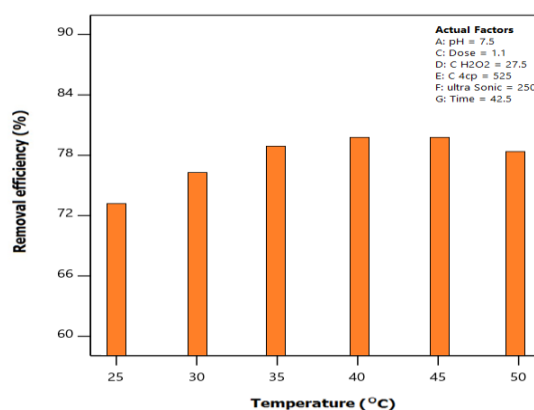


شکل (۵): تاثیر دوز نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت بر بازه حذف ۴-کلروفنول در فرآیند تخریب سونو-شبه فتون

اثر غلظت پراکسید هیدروژن

تغییر غلظت H₂O₂ از ۵ تا ۲۳ میلی‌مول در لیتر در شکل ۶ نشان داده شده است. افزودن H₂O₂ به فرآیند سونو-شبه فتون معمولاً باعث افزایش نرخ اکسیداسیون شیمیایی می‌شود. با این حال، تعیین یک غلظت بهینه از H₂O₂ ضروری است، زیرا غلظت‌های بالاتر از ۲۷/۵ میلی‌مول در لیتر می‌تواند منجر به کاهش کارایی حذف آلاینده‌ها شود، به دلیل عملکرد H₂O₂ به عنوان یک گیرنده رادیکال آزاد که دسترسی به رادیکال‌های هیدروکسیل را کاهش می‌دهد یعنی با رادیکال‌های هیدروکسیل فعال واکنش می‌دهد و آنها را غیر فعال می‌کند. برای بهبود کارایی تصفیه، پراکسید هیدروژن باید به تدریج اضافه شود تا از واکنش‌های جانبی و تجزیه سریع آن جلوگیری شود. پایداری H₂O₂ نیز به

می‌تواند تولید رادیکال‌های هیدروکسیل را افزایش دهند (۲۲) اما همچنین واکنش‌های جانبی را تشدید می‌کنند که منجر به نتایج متناقض می‌شود. در اینجا به طور کلی، افزایش دما برای تصفیه پساب مفید است، اما باید احتیاط کرد زمانی که دما از ۴۰ درجه سانتی‌گراد فراتر می‌رود. ویژگی‌های خاص پساب و دینامیک واکنش باید در نظر گرفته شوند تا شرایط دمایی برای تجزیه موثر آلاینده‌ها بهینه‌سازی شود.

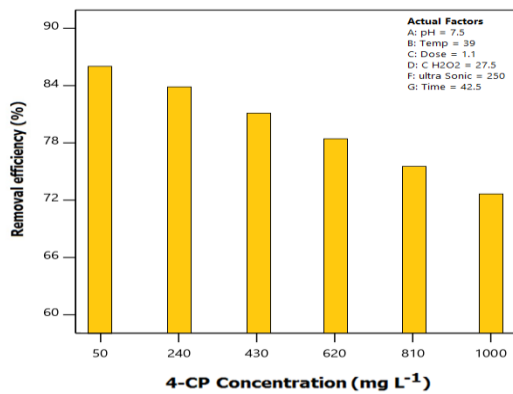


شکل ۴. تاثیر دما بر بازه حذف ۴-کلروفنول توسط

نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت در فرآیند تخریب سونو-شبه فتون

اثر دوز کاتالیزور

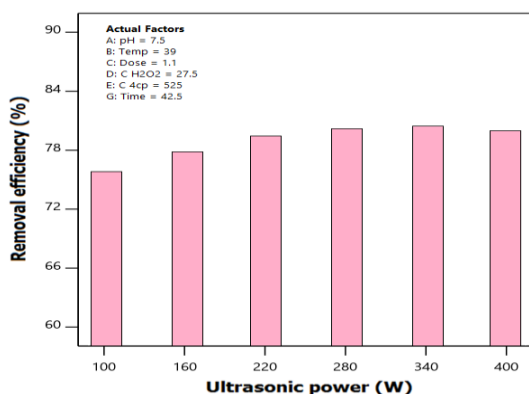
تأثیر دوز نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت بر فرآیند تجزیه ۴-کلروفنول با استفاده از روش سونو-شبه فتون بررسی شد. نتایج نشان داده شده در شکل ۵ نشان می‌دهد که افزایش دوز نانوکاتالیزور با افزایش کارایی حذف ۴-کلروفنول مرتبط است. به طور خاص، کارایی حذف از ۶۹٪ به ۸۵٪ افزایش یافت زمانی که دوز کربن فعال/مگنتیت از ۰.۲ به ۲ گرم در لیتر افزایش یافت. عملکرد بهبود یافته با افزایش دوز نانوکاتالیزور را می‌توان به حضور نانوذرات آهن بر سطح کربن فعال نسبت داد. آهن نقش مهمی در تسهیل



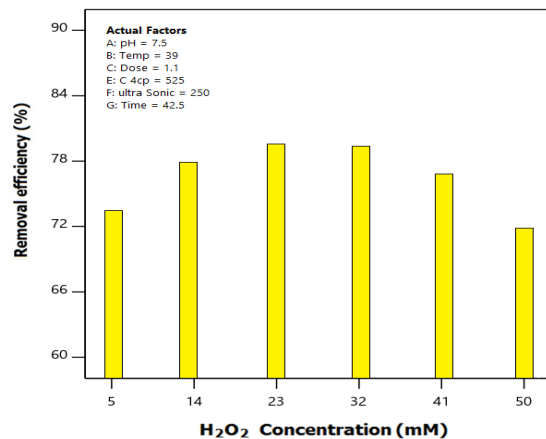
شکل (۷): اثر غلظت اولیه ۴-کلروفنول بر بازده حذف توسط نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت در فرآیند تخریب سونو-شبه فنتون

اثر توان اولتراسونیک

مطابق شکل ۸، کارایی حذف ۴-کلروفنول به طور مستقیم تحت تأثیر توان اولتراسونیک قرار دارد و موثرترین محدوده بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ وات مشاهده می‌شود. در واکنش‌های فنتون و شبه فنتون که از اولتراسونیک استفاده می‌شود، جداسازی آب و اکسیژن مولکولی تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و تولید موضعی H₂O₂ را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از فناوری‌های میکروویو و فرابنفش می‌تواند سطح رادیکال‌های هیدروکسیل را در واکنش‌های فنتون همگن افزایش دهد (۷).



pH محلول وابسته است، به طوری که شرایط اسیدی پایداری را افزایش می‌دهد و شرایط قلیایی باعث تسریع تجزیه آن می‌شود.



شکل (۶): اثر پراکسید هیدروژن بر بازده حذف ۴-کلروفنول با نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت در فرآیند تخریب سونو-شبه فنتون

اثر غلظت ۴-کلروفنول

مطابق شکل ۷ افزایش غلظت ۴-کلروفنول منجر به کاهش کارایی فرآیند سونو-شبه فنتون در حذف این آلاینده می‌شود. به طور کلی، با افزایش غلظت ۴-کلروفنول از ۵۰ به ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر، کارایی حذف از ۸۶٪ به ۷۲٪ کاهش می‌یابد. افزایش دوز نانوکاتالیزور و غلظت پراکسید هیدروژن می‌تواند کارایی فرآیند را بهبود بخشد. به عنوان مثال، افزایش دوز نانوکاتالیزور به ۲ گرم در لیتر، امکان حذف بیش از ۸۰٪ ۴-کلروفنول در غلظت‌های بالاتر را فراهم می‌کند. همچنین، غلظت‌های بالاتر H₂O₂ (۳۰ میلی‌مول در لیتر) کارایی حذف ۴-کلروفنول را در غلظت‌های بالای آلاینده به بیش از ۷۸٪ افزایش می‌دهد.

در فرآیند تصفیه پساب‌های حاوی ۴-کلروفنول، یکی از اهداف اصلی یافتن مقادیر بهینه برای متغیرهای واکنش تجزیه ۴-کلروفنول از طریق فرآیند سونو-شبه فنتون است. هدف از بهینه‌سازی شرایط این فرآیند، بررسی صرفه اقتصادی و دستیابی به کارایی بالا در حذف ۴-کلروفنول است. با این حال، بهینه‌سازی فرآیند دشوار است زیرا تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. بر اساس نتایج آزمایشات شرایط بهینه به شرح زیر تعیین شد: pH ۳، دما ۴۲ درجه سانتی‌گراد، دوز کاتالیزور نانو کربن فعال/مگنتیت ۲ گرم در لیتر، غلظت H_2O_2 ۲۵/۵۸ میلی‌مول در لیتر، قدرت اولتراسونیک ۳۲۰ وات و زمان واکنش ۷۸ دقیقه. در این شرایط، نتایج تکرار آزمایش نشان داد کارایی حذف برای غلظت‌های ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر ۴-کلروفنول به ترتیب ۹۶٪ و ۹۲.۵٪ خواهد بود.

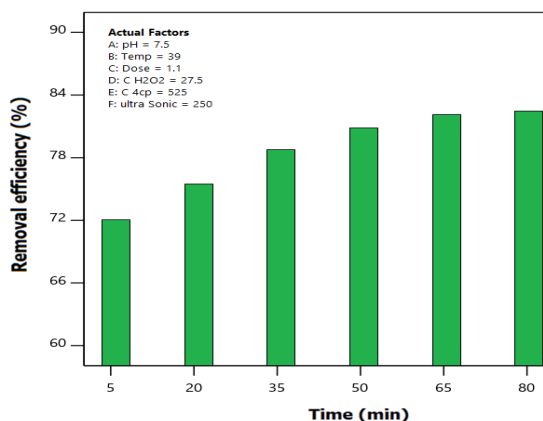
نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت انتخابی مؤثر برای فرآیند سونو-شبه فنتون در تجزیه ۴-کلروفنول است و با استفاده از این کاتالیزور، کارایی فرآیند بهبود چشمگیری یافت. تکنولوژی اولتراسونیک، با تولید حباب‌های کوچک و رادیکال‌های بسیار واکنش‌پذیر، کارایی فرآیند را به طور قابل توجهی افزایش داد، اما نیاز به حفظ پایداری فیزیکی و شیمیایی کاتالیزور در شرایط اولتراسونیک را ضروری می‌سازد. تأثیر pH و دما نیز بر کارایی فرآیند بسیار محسوس بود؛ به‌طور خاص، pH برابر با ۳ و دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد باعث حداکثر کارایی تجزیه شد، در حالی که pH بالاتر و دماهای بالاتر از این نقطه کارایی را کاهش دادند. افزایش دوز

شکل (۸): اثر توان اولتراسونیک بر بازده حذف ۴-کلروفنول توسط نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت در فرآیند تخریب سونو-شبه فنتون.

اثر زمان ماند

مطابق شکل ۹ نرخ حذف ۴-کلروفنول در محدوده زمانی ۵ تا ۵۰ دقیقه به صورت خطی افزایش می‌یابد و پس از ۶۵ دقیقه ثابت می‌ماند، که نشان‌دهنده کافی بودن زمان واکنش ۶۵ دقیقه است. تأثیر غلظت پراکسید هیدروژن با گذشت زمان ثابت است، اما برای غلظت‌های بالای ۴-کلروفنول، زمان واکنش بیشتری برای دستیابی به کارایی بالا نیاز است. استفاده از اولتراسونیک و انتخاب کاتالیزور بهبود یافته می‌تواند زمان واکنش را کاهش دهد. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از نور خورشید و کاتالیزورهای خاص می‌تواند کارایی حذف را افزایش دهد. در مقایسه، استفاده از کاتالیزورهای $Mg/Fe - O_2$ کارایی بیشتری نسبت به کاتالیزورهای Mg/O_2 یا $Fe-O_2$ در مدت زمان مشابه ارائه داده است (۹).



شکل (۹): تأثیر زمان ماند بر بازده حذف ۴-کلروفنول توسط نانوکاتالیزور کربن فعال/مگنتیت در فرآیند تخریب سونو-شبه فنتون

بهینه‌سازی تجزیه ۴-کلروفنول

Environ. 725, 138299.

[7] Duan, Z., Zhang, W., M. Lu, Z. Shao, W. Huang, J. Li, Y. Li, J. Mo, Y. Li, Chen, C., 2020, Magnetic Fe₃O₄ / activated carbon for combined adsorption and Fenton oxidation of 4-chlorophenol, Carbon N. Y. 167, 351-363.

[8] Santana-martínez, G., Roa-morales, G., E. Martin, R. Romero, B.A. Frontana-uribe, R., 2016, Natividad, Electrochimica Acta Electro-Fenton and Electro-Fenton-like with in situ electrogeneration of H₂O₂ and catalyst applied to 4-chlorophenol mineralization, 195-246-256.

[9] Yang, Z., Zhang, X., Pu, S., R. Ni, Y. Lin, Liu, Y., 2019, Novel Fenton-like system (Mg / Fe-O 2) for degradation of, Environ. Pollut. 250 906-913.

[10] Su, Y., Y. Long, J. Chen, S. Zhao, C. Li, F. Qu, B. Han, Z. Zhang, Zhang, B., 2022, Applied Surface Science In situ synthesis of Tree-branch-like Copper-manganese oxides nanoarrays supported on copper foam as a superior efficiency Fenton-like catalyst for enhanced degradation of 4-chlorophenol, Appl. Surf. Sci. 593 153241.

[11] Liu, Y., Fan, Q., Y. Liu, Wang, J., 2018, Fenton-like oxidation of 4-chlorophenol using H₂O₂ in situ generated by Zn-Fe-CNTs composite, J. Environ. Manage. 214 252-260.

[12] Hadi, S., E. Taheri, Mehdi, M., 2020, A. Fatehizadeh, Synergistic degradation of 4-chlorophenol by persulfate and oxalic acid mixture with heterogeneous Fenton like system for wastewater treatment: Adaptive neuro-fuzzy inference systems modeling, J. Environ. Manage. 268 110678.

[13] Zhou, H., X. Zhu, Chen, 2020, B., Science of the Total Environment Magnetic biochar supported α -MnO₂ nanorod for adsorption enhanced degradation of 4-chlorophenol via activation of peroxydisulfate, Sci. Total Environ. 724 138278.

[14] Wei, K., X. Liu, S. Cao, H. Cui, Y. Zhang, Z. Ai., 2021, Fe₂O₃ @ FeB composites facilitate heterogeneous Fenton process by efficient Fe (III) / Fe (II) cycle and in-situ H₂O₂ generation, Chem. Eng. J. Adv. 8 100165.

[15] Niu, H., Zheng, Y., S. Wang, L. Zhao, S. Yang., 2018, Continuous generation of hydroxyl radicals for highly efficient elimination of chlorophenols and phenols catalyzed by heterogeneous Fenton-like

نانوکاتالیزور موجب افزایش سرعت تجزیه و کاهش زمان لازم برای دستیابی به کارایی مطلوب شد. با این حال، افزایش غلظت اولیه ۴-کلروفنول باعث کاهش کارایی و افزایش زمان اکسیداسیون شد. همچنین، پراکسید هیدروژن به عنوان عنصر کلیدی در تولید رادیکال‌های هیدروکسیل برای اکسیداسیون عمل کرد و کمبود یا اضافه بودن آن می‌تواند به طور قابل توجهی کارایی فرآیند را تحت تأثیر قرار دهد.

منابع

[1] Garba, Z.N., Zhou, W., Lawan, I., Xiao, W., Zhang, M., Wang, L., Chen, L., Yuan, Z., 2019, An overview of chlorophenols as contaminants and their removal from wastewater by adsorption: A review, J. Environ. Manage. 241 59-75.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.00>.

[2] Abu-nada, A., Abdala, A., Mckay, G., 2021, Journal of Environmental Chemical Engineering Removal of phenols and dyes from aqueous solutions using graphene and graphene composite adsorption: A review, J. Environ. Chem. Eng. 9, 105858.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105858>.

[3] Liu, F., Zhu, S., Li, D., Chen, G., Ho, S.H., 2020, Detecting Ferric Iron by Microalgal Residue-Derived Fluorescent Nanosensor with an Advanced Kinetic Model, IScience. 23 101174.

[4] Shokri, A., 2019, Employing Sono-Fenton Process for Degradation of 2-Nitrophenol in Aqueous Environment Using Box-Behnken Design Method and Kinetic Study, Russ. J. Phys. Chem. A. 93, 243-249.

[5] Mian, M.M., Liu, G., Fu, B., 2019, Conversion of sewage sludge into environmental catalyst and microbial fuel cell electrode material: A review, Sci. Total Environ. 666, 525-539.

[6] Gan, Q., Hou, H., Liang, S., Qiu, J., Tao, S., L. Yang, W. Yu, K. Xiao, B. Liu, J. Hu, Y. Wang, Yang, J., 2020, Science of the Total Environment Sludge-derived biochar with multivalent iron as an efficient Fenton catalyst for degradation of 4-Chlorophenol, Sci. Total

- catalysts yolk / shell Pd @ Fe₃O₄ @ metal organic frameworks, *J. Hazard. Mater.* 346 174-183.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.027>.
- [16] Zhu, Y., W. Fan, W. Feng, Y. Wang, S. Liu, Dong, Z., 2021, A critical review on metal complexes removal from water using methods based on Fenton-like reactions: Analysis and comparison of methods and mechanisms, *J. Hazard. Mater.* 414, 125517.
- [17] Lu, J., Y. Zhou, L. Ling, Zhou, Y., 2022, Enhanced activation of PMS by a novel Fenton-like composite Fe₃O₄ / S-WO₃ for rapid chloroxylenol degradation, *Chem. Eng. J.* 446 137067.
- [18] Duan, F., Yang, Y., Y. Li, H. Cao, Y. Wang, Zhang, Y., 2014, Heterogeneous Fenton-like degradation of 4-chlorophenol using iron / ordered mesoporous carbon catalyst, *J. Environ. Sci.* 26, 1171-1179.
- [19] Bao, T., J. Jin, M. Mezemir, K. Wu, Z., 2019, Ming, Green synthesis and application of nanoscale zero-valent iron / rectorite composite material for P-chlorophenol degradation via heterogeneous Fenton reaction, *J. Saudi Chem. Soc.* 864-878.
- [20] Lu, S., Liu, L., Demissie, H., G. An, D. Wang., 2021, Design and application of metal-organic frameworks and derivatives as heterogeneous Fenton-like catalysts for organic wastewater treatment: A review, *Environ. Int.* 146.
- [21] Pan, X., Z. Gu, W. Chen, Q. Li., 2021, Science of the Total Environment Preparation of biochar and biochar composites and their application in a Fenton-like process for wastewater decontamination: A review, *Sci. Total Environ.* 754, 142104.
- [22] Pang, H., L. Liu, Z. Bai, R. Chen, H. Tang, Y. Cai, S. Yu, B. Hu, Wang, X., 2022, Fabrication of sulfide nanoscale zero-valent iron and heterogeneous Fenton-like degradation of 2, 4-Dichlorophenol, *Sep. Purif. Technol.* 285 120408.
- [23] Qu, W., H. Wen, X. Qu, Y. Guo, L. Hu, W. Liu, Tian, S., 2022, Chemosphere Enhanced Fenton-like catalysis for pollutants removal via MOF-derived Co_x Fe_{3-x}O₄ membrane: Oxygen vacancy-mediated mechanism, *Chemosphere.* 303 135301.

“Research article”

Optimization of the Decomposition Process of 4-Chlorophenol from Industrial Wastewater Using Activated Carbon/Magnetite Nanocatalyst and Ultra Sonic Application

Zahra Hajyani¹, Ali Montazeri², Zahra Pournuroz Nodeh³, Mohammad Taher Shafiei Seifabadi⁴, Ali Aghababaei Beni^{5*}

¹Department of Chemistry, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

²Department of Energy, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

³Department of Chemistry, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.

⁴Lavan Petrochemical Company, Sepehr Energy Holding, Tehran, Iran.

⁵Department of Chemical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

*Corresponding author: aliaghababai@yahoo.com

(Received: 5 September 2024, Accepted: 16 December 2024)

Abstract

4-Chlorophenol is one of the resistant and toxic pollutants in industrial wastewater that requires efficient methods for its removal from the environment. In this study, the efficiency of activated carbon/magnetite nanocatalyst in the degradation of 4-chlorophenol using the sono-Fenton-like process was investigated. To make the process more economical, activated carbon as the catalyst support was prepared from cherry pit hard shells. The results showed that at a pH of 3, a temperature of 40°C, and a nanocatalyst dosage of 2 g/L, the removal efficiency reached over 90% for a 4-chlorophenol concentration of 500 mg/L. An increase in the concentration of 4-chlorophenol led to a decrease in efficiency and an increase in oxidation time. Additionally, hydrogen peroxide played a key role in the production of hydroxyl radicals for pollutant degradation, and its deficiency or excess influenced the process efficiency.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: 4-Chlorophenol, Fenton-like process, activated carbon/magnetite nanocatalyst, Ultra Sonic, hydrogen peroxide, industrial wastewater



"مقاله پژوهشی"

بازیافت پسماند لجنی و تهیه کمپوست از سیستم تصفیه کارخانه روغن خوراکی (مطالعه موردی، کارخانه گنجه رودبار)

حسین رضانی گنجه^۱، زهره قاضی طباطبایی^{۲*}

^۱ گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

^۲ گروه شیمی کاربردی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

^۳ مرکز تحقیقات مدیریت توسعه پایدار حوضه آبریز دریاچه ارومیه و رودخانه ارس، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: zghazitabatabai@iaua.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶)

چکیده

سابقه و هدف: تولید کمپوست از پسماندهای لجنی تصفیه خانه‌های صنایع روغن خوراکی، به دلیل وجود مقادیر قابل توجه بار آلی در لجن، یک روش مناسب جهت بازیافت و مدیریت این پسماندهای لجنی می‌تواند باشد. در این تحقیق قابلیت تبدیل پسماند کارخانه گنجه رودبار به کمپوست با استفاده از سیستم کمپوست‌سازی در شرایط هوایی و برگرداندن سطحی توده انجام گرفت. مواد و روش‌ها: پسماند کارخانه با ۳۰ درصد کاه گندم برای تنظیم نسبت کربن به نیتروژن به صورت لایه لایه مخلوط شد و چند بار برای همگن شدن مخلوط زیر و رو گردید و در انتها توده‌ای با ابعاد ۲ متر در ۲ متر و ۱/۵ متر ارتفاع ایجاد گردید. فرکانس برگرداندن توده‌ی کمپوست جهت فرایند هوایی هر ۴ روز یکبار بود. تغییرات دما، رطوبت، pH، هدایت الکتریکی و نسبت کربن به نیتروژن در طی روند کمپوست‌سازی به مدت ۹۱ روز مورد پایش قرار گرفت و هر هفته یک بار نمونه‌گیری صورت گرفت. نتایج و بحث: بررسی‌ها نشان داد توده کمپوست در روز ۱۴ ام به بالاترین دما، ۵۷ درجه سانتی‌گراد، رسید و سپس توده شروع به سرد شدن کرد و در آخرین روز پایش به دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد رسید. رطوبت مواد در حین کمپوست‌سازی از ۶۵/۸٪ به ۲۹/۳٪ در پایان تحقیق کاهش یافت. تغییرات pH از ۶/۴۳ به ۷/۷۸ رسید. نسبت کربن به نیتروژن از ۳۰/۲۱ با شیب ملایمی به عدد ۱۹/۷۴ در انتهای تحقیق کاهش یافت. نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان داد که توده کمپوست با موفقیت دوره گرمایی خود را طی کرده و نسبت کربن به نیتروژن در نمونه نهایی به حد مطلوب خود رسیده که حاکی از به بلوغ رسیدن توده کمپوست می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بازیافت، پسماند لجنی، کمپوست، هوایی، نسبت کربن به نیتروژن

مقدمه

مدیریت پسماندهای صنعتی یکی از شیوه‌های بسیار مناسب برای ایجاد تعامل و پیوند بین صنعت و محیط زیست و کاهش اثرگذاری سوء فعالیت های صنعتی در محیط زیست می‌باشد (۱). چنین مدیریتی با استفاده از روش‌های مختلف از جمله پیشگیری از آلودگی یا کمینه‌سازی پسماندها در مبدا تولید، بازیافت و بهره‌گیری مجدد قابل اعمال است (۲ و ۳). ایران در چند دهه اخیر با دشواری‌های مربوط به آلاینده‌های صنعتی در نتیجه رشد سریع صنایع و توسعه صنعتی مواجه شده است. در کارخانه‌های تولید روغن نباتی در ایران که به بهره‌برداری از دانه‌های روغنی کلزا، کنجد، آفتاب‌گردان، سویا و ذرت می‌پردازند، مدیریت پسماند تولیدی از لجن حاصل از عملیات تصفیه فاضلاب نیز یکی از بزرگ‌ترین مشکلات موجود بوده و از آنجایی که پساب حاصل از مرحله صمغ‌گیری^۱ و خنثی‌سازی^۲ اسیدیته روغن‌های خام که با تزریق سود حاصل می‌شود به همراه سایر پساب‌ها وارد واحد تصفیه فاضلاب می‌گردد، این پسماند حاوی املاح و مواد آلی فراوانی می‌باشد (۴). بدلیل حساسیت‌های محیط زیستی موجود در چنین صنایعی، دفع بهداشتی لجن تولیدی، لازم و ضروری است. با توجه به وجود مقادیر قابل توجه بار آلی در لجن، تولید کود کمپوست از این نوع لجن، یک روش بهینه و مناسب جهت بازیافت پسماند جامد حاصل از سیستم تصفیه خانه صنایع روغن‌های خوراکی می‌تواند باشد. کمپوست از تجزیه کنترل شده مواد آلی در حرارت و رطوبت مناسب به وسیله باکتری‌ها، قارچ‌ها، کپک‌ها و سایر

میکروارگانیسم‌های هوازی و یا غیر هوازی بدست می‌آید (۵). کمپوست یک پروسه بیوشیمیایی تجزیه مواد آلی است که دارای سه مرحله، فعالیت‌های اولیه، مرحله گرم‌زایی یا ترموفیلیک که با افزایش ناگهانی دما همراه است و مرحله مزوفیلیک که با سرد شدن مواد آلی همراه هست، می‌باشد. فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها باعث تولید گرما می‌شود که این امر منجر به تغییرات فیزیوشیمیایی مواد آلی به زیست توده و گاز دی اکسید کربن می‌گردد و در پایان باعث تولید مخلوط هوموس پایدار می‌شود (۶). ترکیب شیمیایی مواد اولیه که یکی از مهم‌ترین فاکتورها در تجزیه و هوموس‌سازی می‌باشد شامل کربن، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سایر عناصر بوده که جزو مهمی از فعالیت توده کمپوست می‌باشد و تاثیر مثبتی بر ساختمان، باروری و حاصل‌خیزی خاک دارد. بنابراین استفاده از کمپوست برای تولید محصولات کشاورزی امری ضروری است و در حالت کلی سبب بهبود ظرفیت نگهداری آب در خاک، ظرفیت تبدلی آنیون و کاتیونی، افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک، تجزیه آفت‌کش‌ها و سایر مواد آلی مصنوعی می‌شود (۷). فرایند تولید کمپوست به دو صورت هوازی و بی‌هوازی صورت می‌گیرد. مزیت روش هوازی سرعت بالای تجزیه توسط میکروارگانیسم‌های مختلفی نظیر باکتری‌ها، قارچ‌ها و اکتنومیس‌ها و کیفیت بالای کمپوست تولیدی می‌باشد. تولید کمپوست به روش هوازی شامل روش‌های برگردادن توده سطحی، هوادهی غیر فعال، هوادهی فعال و تولید در راکتور می‌باشد (۸). در روش برگردادن توده سطحی، توده

¹ Degumming² Neutralization

مخازن مشخص و در دو فاز کاملاً متمایز صورت می‌گیرد که یکی مرحله تجزیه با نرخ بالا و دیگری مرحله تکمیل است.

در این پژوهش، سعی بر آن شد که با بررسی طرح‌های انجام شده در داخل کشور و نحوه مدیریت پسماند در کارخانه‌های مشابه خارجی، طرحی عملیاتی از تصفیه زیستی (تولید کمپوست) برای مدیریت بهداشتی پسماند، در یکی از کارخانجات تولید روغن در شمال کشور (کارخانه گنجه رودبار)، که در آن روزانه بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ تن از انواع دانه‌های روغنی، روغن گیری می‌گردد و عملیات تصفیه روغن روزانه برای ۱۵۰ تن انجام می‌شود و پالایش هر ۱۵۰ تن از انواع روغن‌ها روزانه به طور تقریب ۷۵۰ کیلو گرم پسماند در سیستم تصفیه فاضلاب کارخانه تولید می‌کند، بر اساس توانمندی‌های موجود ارائه گردد. اولین گام در انجام این پژوهش، شناسایی کامل و دقیق نوع پسماند نهایی بود. بر اساس ویژگی‌های ضایعات و بودجه کارخانه و با توجه به دستورالعمل‌های موجود در کشور، روش تولید کمپوست هوازی به صورت برگرداندن توده سطحی انتخاب شد.

بخش تجربی

مواد اولیه و آماده سازی

ابتدا مقدار ۷۰۰ کیلوگرم از پسماند کارخانه به سایت تحقیقاتی کارخانه حمل گردید. سپس در محلی که برای این منظور به مساحت ۳۶ مترمربع سیمان کاری شده بود قرار گرفت. برای کمپوست کردن پسماندها باید مواد افزودنی از قبیل، کاه، خاک اره، ضایعات کارخانه پشم، برگ زیتون، سبوس برنج، تقاله کنجد، کود مرغی، کود گوسفندی، کود گاوی، ضایعات شاخه‌های انگور و یا غیره برای تعدیل نسبت

تشکیل شده معمولاً بین ۱ تا ۳/۵ متر ارتفاع و عرضی بین ۱/۵ تا ۶ متر دارد. دما می‌تواند در مرکز توده به حدود ۶۵ درجه سانتی‌گراد برسد. استفاده از کاغذ و یا برگ درختان که از مواد سلولزی هستند و دیر تجزیه می‌شوند کمک شایانی به حرکت هوا در داخل توده در این روش می‌کنند. این ترکیب برای توازن نسبت کربن به نیتروژن و پخش یکنواخت رطوبت در کل توده نیز مناسب است. نرخ هوادهی به تخلخل توده بستگی دارد. همچنین در زمان برگرداندن توده حرارت ذخیره شده در داخل توده تا حدودی آزاد می‌گردد و این عمل علاوه بر تبخیر آب منجر به تصاعد گازها از جمله گاز آمونیاک می‌گردد. برگرداندن توده باید زمانی انجام پذیرد که دمای توده یا بالاتر از ۵۰ درجه سانتیگراد و یا پایین‌تر از ۳۲ درجه است (۹). در روش هوادهی غیرفعال، از یک سری لوله‌های سوراخ دار به منظور انجام هوادهی از طریق جریان همرفتی استفاده می‌شود. در این روش هوادهی مناسب تحت تاثیر طراحی مناسب لوله‌های هوادهی می‌باشد (۱۰). روش هوادهی فعال هم یکی از پرکارترین روش‌های تولید کمپوست است که در آن دماهای ترمودینامیک ایجاد شده و پاتوژن‌ها غیر فعال می‌شوند. در این روش لوله‌های داخل توده به یک دمنده و یا مکنده متصل هستند که باعث انتقال هوا در داخل توده می‌شوند. در این روش معمولاً از یک ترموکوپل به منظور کنترل نرخ هوادهی توده استفاده می‌شود. زیرا هوادهی بیش از اندازه موجب سرد شدن توده و همچنین تلفات زیاد نیتروژن می‌گردد و پایین بودن دما نیز باعث ناپایداری حرارتی در داخل توده می‌شود (۱۱). در سیستم تولید کمپوست در راکتور هم تولید کمپوست در داخل

گردید (W₂). نمونه در داخل آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد. ظرف با محتویات آن و سرپوش خشک و با دقت وزن گردید (W₃). مقدار رطوبت (W) بر حسب درصدی از وزن خشک کود از فرمول (۱) بدست آمد (۱۲).

$$w\% = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1} \times 100 \quad \text{فرمول (۱)}$$

تعیین pH و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC)

میزان اسیدیته و قلیائیت برای عصاره کمپوست صاف شده به نسبت حجمی ۱ به ۱۰ توسط pH سنج (مدل pH meter 650; Swiss made) بدست آمد. به طور معمول هدایت الکتریکی در طول فرایند کمپوست افزایش می‌یابد (۱۳) بنابراین هدایت الکتریکی عصاره کمپوست توسط دستگاه (مدل Metrohm 912; Swiss made) اندازه‌گیری شد.

آنالیزهای شیمیایی

تعیین مقدار فسفر

برای اندازه‌گیری فسفر قابل جذب (یون‌های اورتوفسفات) کمپوست، نمونه کمپوست خشک شده در محیط اسیدی با محلول مولیبدو وانادات، ترکیب شد. با تنظیم اسپکتروفتومتر (مدل 15V- DR5000 HACH; USA made) در طول موج ۴۷۰ نانومتر، منحنی کالیبراسیون ترسیم گردید و مقدار فسفر در هر نمونه محاسبه گردید. میزان فسفر در نمونه خشک کمپوست بر حسب درصد از فرمول (۲) بدست آمد (۱۴).

$$P = \frac{(A-B) \times V}{2000W} \times 100 \quad \text{فرمول (۲)}$$

کربن به نیتروژن، حجم بخشیدن به توده کمپوست، تهویه هوا و بهبود نفوذپذیری هوا استفاده شود که با توجه به پتانسیل منطقه در تولید کاه گندم از آن برای تولید کمپوست به روش برگرداندن توده سطحی استفاده شد و پسماند کارخانه با ۲۰۰ کیلوگرم کاه گندم به صورت لایه لایه مخلوط شد و چند بار برای همگن شدن مخلوط زیر و رو گردید و در انتها توده ای با ابعاد ۲ متر عرض ۱/۵ متر ارتفاع ایجاد گردید. فرکانس برگرداندن توده هر چهار روز یک بار بود، تا اکسیژن به تمامی نقاط برسد و فرایند هوازی کامل صورت گیرد. پارامترهای مورد نظر در طی روند کمپوست‌سازی به مدت ۹۱ روز مورد پایش قرار گرفت و هر هفته یک بار نمونه‌گیری صورت گرفت و تعداد ۱۴ نمونه در طی این مدت بدست آمد و به آزمایشگاه کارخانه ارسال گردید. نمونه‌های ارسالی به آزمایشگاه از سه قسمت سطحی، میانی و عمقی توده بدست آمده و سپس مخلوط شد تا نمونه ارسالی همگن و تعریف کننده کل توده باشد. آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی ترکیبات به ترتیب برای همه نمونه ها انجام شد.

آنالیزهای فیزیکی

اندازه‌گیری دما

برای اندازه‌گیری دمای توده مورد نظر دمای عمق میانی توده توسط دما سنج (مدل WT-03; Swiss made) مورد سنجش قرار گرفت.

اندازه‌گیری رطوبت

حداقل ۳۰ گرم کود خرد شده در ظرفی که قبلاً وزن آن تعیین شده (W₁) ریخته شد و سپس سرپوش ظرف گذاشته شده و ظرف و محتویاتش دوباره وزن

سولفات مصرفی بر حسب میلی‌لیتر برای تیتراسیون نمونه کمپوست، می‌باشند.

تعیین مقدار ازت کل (روش کجدال)

نیتروژن کل (نیتروژن آمونیومی، نیتراتی، نیتريتی و ترکیبات آلی نیتروژن دار) موجود در کمپوست، به روش هضم در سیستم کجدال (مدل Automatic Kjeldahl Analyzer Apparatus K1100)، تعیین شد. سپس پودر سلنیوم به آن اضافه شد و بالن با احتیاط بر روی هیتر هضم قرار گرفت و تا از بین رفتن رنگ و کف ایجاد شده در سطح آن جوشانده شد. بعد از تمام شدن مرحله هضم، به بالن سرد شده مقدار ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر، به آرامی همراه با تکان دادن اضافه گردید. سپس محتویات بالن به بخش تقطیر دستگاه کجدال منتقل یافت. مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول تقطیر شده، جمع آوری شده و چند قطره معرف نیتروژن به آن افزوده و با اسید سولفوریک تیتراژ گردید. برای مقایسه آزمایش نمونه شاهد (بدون نمونه کمپوست)، مشابه روش فوق انجام شد. حجم مصرفی اسید سولفوریک در آزمایش نمونه شاهد و نمونه‌های کمپوستی، ثبت گردید. نیتروژن کل (T_N) با استفاده از فرمول ۴ محاسبه شد.

$$\%T_N = \frac{(V_S - V_B) \times N \times \frac{M_w}{m}}{1000} \times 100 \quad \text{فرمول (۴)}$$

که در آن V_S حجم اسید سولفوریک مصرفی در تیتراسیون نمونه بر حسب میلی‌لیتر، V_B ، حجم اسید سولفوریک مصرفی در تیتراسیون شاهد، بر حسب میلی‌لیتر N ، نرمالیه اسید سولفوریک، M_w ، جرم مولی نیتروژن، m ، وزن نمونه کمپوست خشک شده، می‌باشد.

که P درصد فسفر در نمونه، A غلظت فسفر در نمونه بر حسب میلی‌گرم بر لیتر، B غلظت فسفر در شاهد بر حسب میلی‌گرم بر لیتر، V حجم نهایی کمپوست در مرحله هضم بر حسب میلی‌لیتر، W وزن نمونه کمپوست خشک مورد استفاده جهت هضم بر حسب گرم می‌باشد.

تعیین مقدار پتاسیم

غلظت پتاسیم با استفاده از فلیم فتومتری (Systronics flame photometer-128) و با مقایسه شدت تابش های منتشر شده از نمونه و استانداردها با رسم منحنی کالیبراسیون از طریق برون‌یابی تعیین گردید (۱۵).

تعیین مقدار کربن آلی

مقدار مواد آلی کمپوست نسبت به وزن خشک آن، با استفاده از روش کاهش وزن در کوره الکتریکی، تعیین شد. کربن آلی قابل اکسایش توسط روش اصلاح شده والکلی-بلک معروف به روش هضم تر، اندازه‌گیری شد (۱۶). ماده آلی توسط مخلوطی از پتاسیم دی کرومات و اسید سولفوریک غلیظ اکسید شده و اضافی دی کرومات با فروآمونیم سولفات، تیتراژ شد. بدین ترتیب یون‌های دی کرومات نارنجی رنگ، پس از احیاء، به یون های Cr^{+3} سبز رنگ و ترکیبات آلی به دی اکسید کربن، تبدیل شدند. درصد کربن آلی از فرمول (۳) محاسبه شد.

$$OC = 60.03 \frac{V_B - V_S}{V_B} \quad \text{فرمول (۳)}$$

در این رابطه OC ، درصد کربن آلی، V_B ، حجم فروآمونیم سولفات مصرفی بر حسب میلی‌لیتر برای تیتراسیون محلول شاهد، V_S ، حجم فروآمونیم

تعیین مقدار نسبت کربن به نیتروژن

زمانی که فرایند کمپوست برای مواد زائد ارگانیک ارزیابی می‌شود، نسبت کربن به نیتروژن (C/N) و تجزیه زیستی مواد آلی باید در نظر گرفته شود. نسبت کربن به نیتروژن (C/N) از فرمول ۵ محاسبه شد.

$$\frac{C}{N} = \frac{OC}{T_N} \quad \text{فرمول (۵)}$$

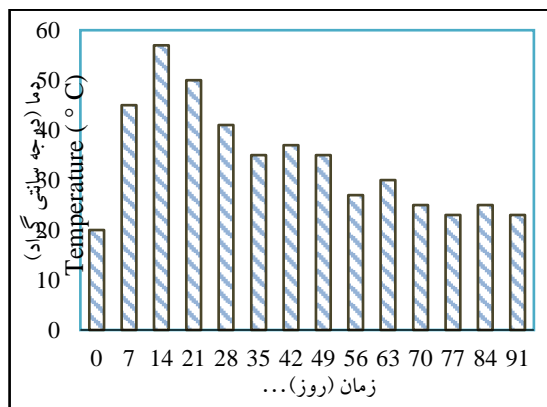
که در آن OC، درصد کربن آلی موجود در نمونه و T_N درصد نیتروژن کل موجود در نمونه کمپوستی می‌باشد.

بحث و نتایج

بررسی اثر دما

اندازه گیری تغییرات دمایی در حین کمپوست سازی حائز اهمیت است، زیرا جمعیت‌های غالب فعال میکروبی با توجه به دمای فرایند کمپوست، تکامل می‌یابند. بنابراین دما نشان‌گر فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌باشد و در تجزیه مواد آلی نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند (۱۷). مطالعات نشان داده است که درجه حرارت بیش از ۵۵ درجه سانتی‌گراد برای حذف میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا ضروری است (۱۸). البته افزایش دما به فرکانس برگرداندن، تخلخل بافت کمپوست و رطوبت وابسته است. نتیجه بررسی دمایی در شکل ۱ نشان داد که پارامتر دما تغییرات نسبتاً مناسبی از خود نشان می‌دهد. درجه حرارت توده از ۲۰ درجه سانتی‌گراد در روز اول به ۵۷ درجه سانتی-گراد در روز ۱۴ ام رسید که نشان از فعالیت باکتری-های دوره ترموفیلیک در این مرحله است (۱۹). همچنین کمپوست باید برای از بین بردن پاتوژن‌ها سه روز دمای بالای ۵۵ درجه سانتی‌گراد را تجربه می‌کرد

که نتایج این تحقیق با سایر تحقیقات هم‌خوانی دارد (۲۰-۲۱). همچنین روند تغییر دما یک سیر نزولی به سمت پایان تحقیق داشت که این مسئله در رابطه با کامل شدن فرایند و به بلوغ رسیدن کمپوست مرتبط می‌باشد.

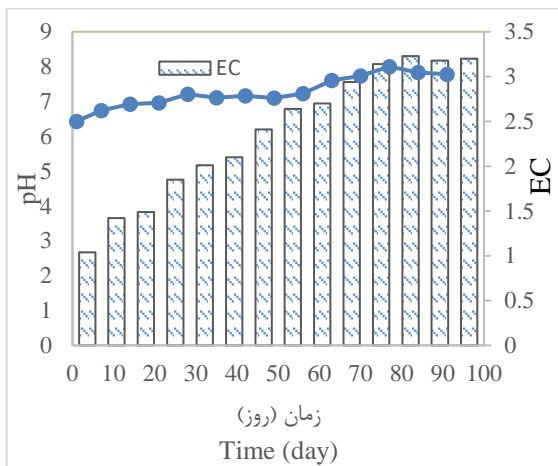


شکل (۱): نمودار تغییر دمایی کمپوست در ۹۱ روز
Fig 1. Compost temperature change chart in 91 days

بررسی رطوبت

رطوبت بر فعالیت میکروبی و همچنین خواص فیزیکی کمپوست تاثیر می‌گذارد. بنابراین دارای تاثیر مهم در تجزیه زیستی مواد آلی است (۱۲). بیش تر مواد آلی در رطوبت بین ۵۰ الی ۴۰ درصد به بهترین نحو کمپوست می‌شوند و رطوبت بالای ۶۰ درصد کمپوست را به بی‌هوازی شدن هدایت می‌کند (۲۲). در این مطالعه رطوبت توده در ابتدای دوره رقم ۶۵/۸ درصد بود که این رقم در روز ۲۱ ام تحقیق به ۴۶/۴ درصد رسید و این کاهش ناگهانی می‌تواند به سبب افزایش ناگهانی دمای توده، تبخیر و افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌های ترموفیلیک باشد. البته روند کاهش رطوبت می‌تواند تا حدودی به فرکانس برگرداندن توده نیز مربوط باشد، زیرا افزایش هوادهی می‌تواند باعث

و همچنین تبخیر آمونیاک و شسته شدن نمک‌ها بر اثر تجزیه مواد آلی باشد (۲۴). همچنین افزایش شوری کمپوست در پایان فرایند را به افت وزن کلی مواد معدنی شدن مواد آلی و تبخیر آب نسبت می‌دهند که در نهایت منجر به افزایش غلظت نمک‌های محلول می‌شود (۲۵). با توجه به استانداردهای موجود، مقدار EC برای نمونه‌ها از روز ۳۲م رو به افزایش بود به گونه‌ای که در روز ۷۷ به حداکثر مقدار خود (۳/۲۳) دسی زیمنس بر متر) رسید که در محدوده قابل قبول قرار داشته و از این لحاظ، برای کاربرد مصرف‌های کشاورزی محدودیتی ندارد (۲۶).



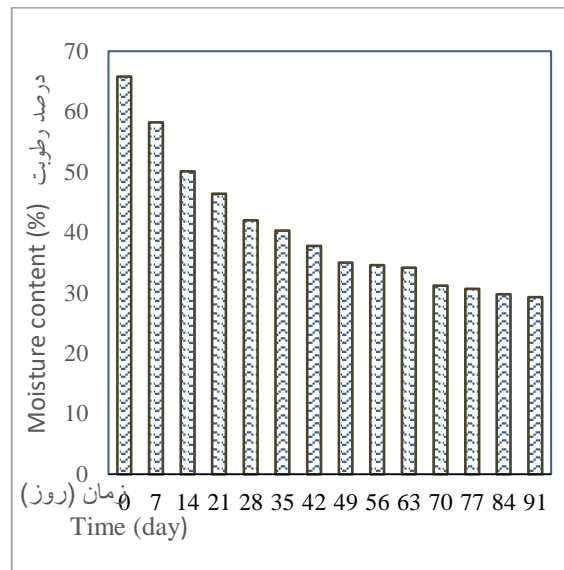
شکل (۳): نمودار تغییرات pH و هدایت الکتریکی در ۹۱ روز

Figure 3- Graphs of pH and electrical conductivity changes in 91 days

بررسی کربن آلی

مقدار کربن آلی نمونه اولیه ۴۲ درصد بود که با نزدیک شدن به انتهای دوره به ۱۵ درصد تقلیل یافت، که کاهش نسبتاً زیادی با ابتدای دوره داشت (شکل ۴). البته بیش‌ترین کاهش تا روز ۲۱ ام آزمایش صورت گرفته بود که این نیز می‌تواند به دلیل افزایش تعداد میکروارگانیسم‌ها در دوره ترموفیلیک باشد و به علت استفاده میکروارگانیسم‌ها از کربن آلی در ساخت

تقویت فعالیت‌های بیولوژیکی شود و سیستم را هم خنک کند (۱۹).



شکل (۲): نمودار تغییرات رطوبت کمپوست در ۹۱ روز

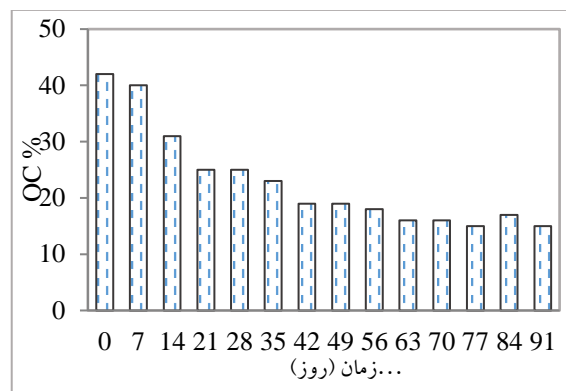
Fig. 2 - Compost moisture change chart in 91 days

بررسی pH و هدایت الکتریکی (EC)

رشد میکروارگانیسم‌ها شدیداً تحت تاثیر pH بوده و pH در محدوده بین ۶ تا ۷/۵ بر فعالیت باکتری-ها و بین ۵/۵ تا ۸ بر فعالیت قارچ‌ها مناسب است (۲۲). در این پژوهش در ابتدای فرایند pH برابر ۶/۴۳ بود و در روز ۷۷ ام به ۸ رسید و در روز آخر تحقیق به رقم ۷/۷۸ تقلیل یافت (شکل ۳)، این نتایج می‌تواند پیامد سنتز مواد آلی با افزایش جمعیت میکروبی باشد که از اسیدها به عنوان سوسترا استفاده کرده و توده کمپوست را قلیایی می‌کنند و نیز می‌تواند تبدیل مواد آلی به مواد معدنی توسط میکروارگانیسم‌ها باشد، در مجموع به نظر می‌رسد که روند تغییرات pH عادی بوده و نتایج تحقیق با سایر تحقیقات هم‌خوانی دارد (۲۳). افزایش هدایت الکتریکی کمپوست در طول روند کمپوست‌سازی ممکن است به دلیل آزاد شدن نمک‌های معدنی مانند فسفات، پتاسیم و یون آمونیوم

دیواره سلولی و همچنین استفاده میکروارگانیسم‌ها به عنوان منبع انرژی می‌باشد (۲۷).

یکدیگر بر عملکرد و کیفیت کمپوست تاثیر می‌گذارد (۲۸). مطابق با نمودارهای شکل ۵، نیتروژن کل نمونه در ابتدای تحقیق ۱/۳۹ درصد بود که رفته رفته از مقدار آن کاسته شده و در انتهای تحقیق به ۰/۷۶ درصد رسید. کاهش نیتروژن می‌تواند در اثر تعدد برگرداندن و تصاعد سریع‌تر گاز آمونیاک از توده باشد. مقدار فسفر از رقم ۰/۸۵ درصد در ابتدای دوره به عدد ۱/۲۱ درصد در پایان دوره افزایش یافت که این امر می‌تواند در نتیجه شکسته شدن مواد آلی توسط میکروارگانیسم‌ها باشد (۲۹) ولی مقدار پتاسیم نمونه به صورت قابل توجهی تغییر نکرد و روند تغییر آن بین ۰/۳۷ درصد الی ۰/۴۷ درصد بود. تمامی این تغییرات مطابق با مقادیر استاندارد (ISIRI, 10716) می‌باشد.

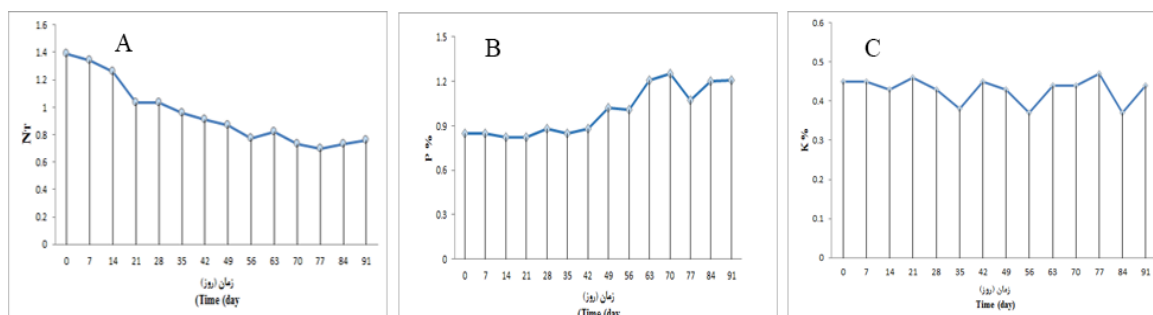


شکل (۴): نمودار تغییرات کربن آلی در ۹۱ روز

Fig. 4. Graph of organic carbon changes in 91 days

نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم

نیتروژن، فسفر و پتاسیم سه ماده غذایی عمده هستند که چه به صورت مجزا و چه در ترکیب با



شکل (۵): نمودارهای تغییرات (A) نیتروژن کل، (B) فسفر و (C) پتاسیم در ۹۱ روز

Fig.5. Graphs of changes in (A) total nitrogen, (B) phosphorus and (C) potassium in 91 days

در حالیکه مقادیر بیش‌تر می‌تواند روند کمپوست را به دلیل کمبود نیتروژن برای حمایت از فعالیت میکروبیولوژیک کاهش دهد. حضور کربن بیش از حد هم باعث کاهش فعالیت‌های میکروبی می‌شود (۳۰). مطابق نمودار شکل ۶، مقدار اولیه کربن به نیتروژن ۴۰/۲۱ بود که با کاهش در انتهای دوره به ۲۲/۷۴ رسید. البته طبق استاندارد ملی کمپوست ایران، ISIRI,

نسبت کربن به نیتروژن

نسبت کربن به نیتروژن (C/N) مشخص کننده بالانس مواد مغذی در داخل توده کمپوست می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده است که نسبت کربن به نیتروژن (C/N) مطلوب باید در محدوده ۱۵ الی ۲۵ باشد. مقادیر کم‌تر باعث کاهش N به شکل NH_3 می‌شود،

کمپوست در کشاورزی و توسعه فضای سبز کارخانه و سایر مناطق استفاده کرد.

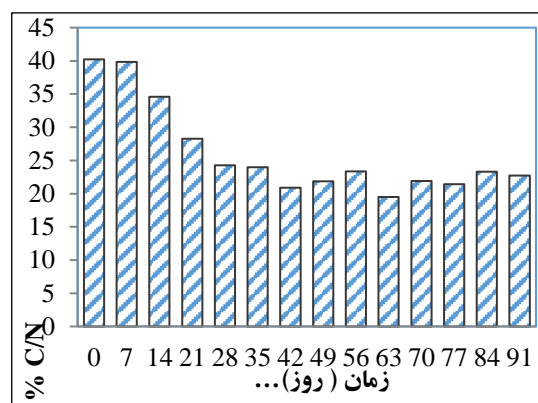
تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از حوزه پژوهشی کارخانه گنجه رودبار که شرایط آزمایش و امکانات آزمایشگاهی لازم را در راستای اجرای این پژوهش فراهم نمودند، اعلام می‌نمایند.

منابع

- [1] Lasaridi, K.E., Manios, T., Stamatidis, S., Chroni, C., Kyriacou, A., 2018, The Evaluation of Hazards to Man and the Environment during the Composting of Sewage Sludge. Sustainability, Vol. 10, pp. 2618-2625.
- [2] Zahedniya, M., Ghazi Tabatabaei, Z., 2018, Investigation of BTEX removal from aqueous solution by single wall carbon nanotubes decorated with ZnO. Journal of Water and Wastewater, Vol. 29, pp.1-11.
- [3] Modirshahla, N., Behnaiady, MA., Ghazi Tabatabaei, Z., 2006, Kinetic modeling on photo oxidative degradation of CI acid yellow 23 by UV/H₂O₂ process. Journal of Physical & Theoretical Chemistry, Vol. 2, pp.27-32.
- [4] Koolivand. A., Rastgordani. P., Mohammadalebi. E., 2021, Investigation on the Efficiency of Modified Fenton on the Treatment of Leachate Generated From Oily Sludge Composting. J Arak Uni Med Sci, Vol. 24, pp. 324-333.
- [5] Rezazadeh, H., Khrasani, S.K., Haghghi, R.S.A., 2012, Effects of humic acid on decrease of phosphorus usage in forage maize var. KSC704 (Zea mays L.). Australian Jurnal of Agricultural Engineering, Vol. 3, pp. 34-38.
- [6] kulikowska, D., Gusiatin, Z., 2015, Sewage sludge composting in a two- stage system: Carbon and nitrogen transformations and potential ecological risk assessment, Waste Management, Vol. 38, pp. 312-320.
- [7] Morales, A.B., Bustamante, M.A., Marhuenda-Egea, F.C., Moral, R., Ros, M., Pascual, J.A., 2016, Agri-food sludge management using different co-composting strategies: study of the added value of the

(10716) این نسبت باید در کمپوست رسیده به رقم ما بین ۲۰ الی ۳۰ برسد. مطالعات دیگر نیز نشان داد نتایج حاصله با آن هم‌خوانی دارد و فرایند کمپوست بطور رضایت بخشی پیشرفت کرده است (۳۲ و ۳۱).



شکل (۶): نمودار تغییرات کربن به نیتروژن در ۹۱ روز

Fig. 6. Graph of changes in carbon to nitrogen in 91 days

نتیجه‌گیری

در این تحقیق قابلیت تبدیل پسماند کارخانه روغن‌سازی گنجه رودبار به کمپوست با استفاده از سیستم کمپوست‌سازی در شرایط هوایی و برگرداندن سطحی توده انجام گرفت که برای حجم بخشیدن به پسماند و تنظیم نسبت کربن به نیتروژن از ۳۰ درصد کاهش استفاده شد. فرکانس برگرداندن توده کمپوست هر ۴ روز یکبار بود. نتایج این تحقیق نشان داد که توده کمپوست با موفقیت دوره گرمایی خود را طی کرد و برای از بین بردن پاتوژن‌ها درجه حرارت بیش از ۵۵ درجه سانتی‌گراد را برای سه روز تجربه کرد. هدایت الکتریکی و نسبت کربن به نیتروژن در نمونه نهایی به حد مطلوب خود، مطابق با استاندارد ملی کمپوست ایران، رسید که حاکی از به بلوغ رسیدن توده کمپوست می‌باشد. بنابراین می‌توان از این

- Quality Using Aerated Static Piles in Rural Areas, *J. Env. Sci. Tech.*, Vol. 21, pp. 224-237.
- [19] Karnchanawong, S. Nissaikla, S., 2014, Effects of microbial inoculation on composting of household organic waste using passive aeration bin. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. Vol. 3, pp.113-119.
- [20] Han, W., Clarke, W., Pratt, S., 2014, Composting of waste algae: a review. *Waste management*. Vol. 34, pp.1148-1155.
- [21] Saffar Taluri, S., Jafari, S.M. & Bahrami, 2019, A. Evaluation of changes in the quality of extracted oil from olive fruits stored under different temperatures and time intervals. *Sci Rep*. Vol. 9, 19688.
- [22] Gomez, R.B., Lima, F.V., Bolasell, M.A.G., Gea, T., Ferrer, A.S., 2005, Respirometric assays at fixed and process temperatures to monitor composting process. *Bioresource technology*. Vol.96, pp. 1153-1159.
- [23] Guo, F., Fu, G., Zhang, Z., 2015, Performance of mixed-species biocathode microbial fuel cells using saline mustard tuber wastewater as self-buffered catholyte. *Bioresource technology*, Vol. 180, pp. 137-143.
- [24] Dong, Y., Qu, Y., He, W., Du, Y., Liu, J., Han, X., Feng, Y., 2015, A 90-liter stackable baffled microbial fuel cell for brewery wastewater treatment based on energy self-sufficient mode. *Bioresource technology*, Vol. 195, pp. 66-72.
- [25] Soobhany, N., 2018, Assessing the physicochemical properties and quality parameters during composting of different organic constituents of municipal solid waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Vol. 6, pp. 1979-1988.
- [26] Sarlaki, E., Kianmehr, M.H., Ghorbani, M., 2022, Analytical methods for assessing the quality of sugarcane bagasse compost and improving the physicochemical properties toward densification. *Environmental Sciences*. Vol.19, pp. 107-130.
- [27] Gea, T., Ferrer, P., Alvaro, G., Valero, F., Artola, A., Sánchez, A., 2007, Co-composting of sewage sludge: fats mixtures and characteristics of the lipases involved. *Biochemical Engineering Journal*. Vol. 33, pp. 275-83.
- composts obtained. *J. Clean. Prod.* Vol. 121, pp.186–197.
- [8] Khurshid, M., Khan, M.Z., Abbasi, M.K., Kazmi, M.H., 2011, Lignite-derived humic acid effect on growth of wheat plants in different soils. *Pedosphere*, Vol. 21, pp. 124-131.
- [9] Soyöz, C., Ekinçi, K. & Kilic, Ş. 2021, Effects of Recirculation of Exhaust Air in Rotary Drum Composter on Composting Properties and Energy Consumption. *Waste Biomass Valor*, Vol. 12, pp. 3645–3656.
- [10] Ghorbanpour, A., Pooya, A., and Najj Azimi, Z., 2022, Application of Green Supply Chain Management in the Oil Industries: Modeling and Performance Analysis. *Mater. Today Proc.* Vol 49, pp. 542–553.
- [11] Valadabadi, S.A., Farahdahr, F., Amiri, I., Razavi Pour, T., 2011, Effect of Azolla compost on the yield and absorption of nitrogen, phosphorus and potassium in rice. *Quarterly Journal of ecophysiology of crops*. Vol. 3, pp. 378-387.
- [12] Kumar, M., Ou, Y.L. and Lin, J.G., 2010, Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management*, Vol. 30, pp. 602- 609.
- [13] Sarlaki, E., Sharif Paghaleh, A., 2017, Effects of centrifuge pretreatment on membrane ultrafiltration of coal-derived humic alkaline extracts. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. Vol. 48, pp. 273-283.
- [14] Barrington, S., Choiniere, D., Trigui, M., and Knight, W., 2003, Compost convective air flow under passive aeration. *Bioresource Technology*. Vol. 86, pp.259-266.
- [15] Chowdhury, S., Bolan, N.S., Seshadri, B., Kunhikrishnan, A., Wijesekara, H., Xu. Y., 2016, Co-composting solid biowastes with alkaline materials to enhance carbon stabilization and revegetation potential. *Environmental Science and Pollution Research*. Vol. 23, pp.7099-7110.
- [16] Kougias, P.G., Angelidaki, I., 2018, Biogas and its opportunities a review. *Front. Environ. Sci. Eng.* Vol. 12, pp. 14-20
- [17] Sabiene, N., Kusliene, G., Zaleckas, E., 2010, The influence of land use on soil organic carbon and nitrogen content and redox potential. *Agriculture*. Vol. 97, pp. 15-24.
- [18] Omrani, G.A., Abdoli, M.A., Safa, M., 2017, The Impact of Input Material on Compost

- [28] Zazouli, M.A, Ala, A., 2019, Review of Co-Composting Municipal Sewage Sludge with a Variety of Biological Waste, *Journal of Health*. Vol. 10, pp.19-33.
- [29] Ahn, H., Richard, T.L., Glanville, T., 2008, Optimum moisture levels for biodegradation of mortality composting envelope materials. *Waste Management*. Vol. 28, pp. 1411-1416.
- [30] Komilis, D.P., 2006. A kinetic analysis of solid waste composting at optimal conditions. *Waste management*. Vol. 26, pp. 82-91.
- [31] Puyuelo, B., Ponsá, S., Gea, T., Sánchez, A., 2011, Determining C/N ratios for typical organic wastes using biodegradable fractions. *Chemosphere*. Vol. 85, pp. 653-659.
- [32] Yan, Z., Song, Z., Li, D., Yuan, Y., Liu, X., Zheng, T., 2015, The effects of initial substrate concentration, C/N ratio, and temperature on solid-state anaerobic digestion from composting rice straw. *Bioresour. Technol*. Vol. 177, pp. 266-273.

“Research article”

Recycling of Sludge Waste and Preparation of Compost from the Treatment System of Edible Oil Factory

(Case study, Rudbar Ganjeh Factory)

Hossein Ramezani Ganjaei¹, Zohreh Ghazi Tabatabaei^{2,3,*}

1-Department of Chemical Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

2- Department of Chemistry, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

3-Sustainable Development Management Research Center of Urmia Lake Basin and Aras River, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

*Corresponding author: zghazitabatabai@iau.ac.ir

(Received: 8 September 2024, Accepted: 8 October 2024)

Abstract

Introduction: Production of compost from sludge wastes of edible oil refineries can be a suitable method for recycling these sludge wastes due to the significant amounts of organic charge in the sludge. In this research, the ability to convert the waste of Ganjeh Rudbar factory to compost in aerobic conditions and return the surface of the mass was investigated. **Materials and Methods:** The sludge deposited in factory-treated wastewater was mixed with 30% wheat straw in layers to volume the waste and it adjust the carbon to nitrogen ratio. The mixture was stirred several times to homogenize. A mass with dimensions of 2 × 2 meters and a height of 1.5 meters was created. For aerobic process, the mass was returned every 4 days. The factors were monitored during the composting process for 91 days. During the composting process, changes in temperature, humidity, pH, EC and carbon to nitrogen ratio were monitored for 91 days and sampling was done once a week. **Results and discussion:** Studies showed that the compost mass reached its highest temperature (57 °C) on the 14th day. The mass then began to cool, reaching a temperature of 23 °C on the last day of monitoring. Humidity at the end of the study decreased from 65.8% to 29.3%. The carbon to nitrogen ratio decreased from 30.21 with a slight slope to 19.74 at the end of the study. **Conclusion:** The results of this study showed that the compost mass has successfully passed its heating period and the ratio of carbon to nitrogen in the final sample has reached its desired level, which indicates that the compost mass has matured.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Recycling, Sludge Waste, Compost, Aerobic, C/N ratio



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال پانزدهم، شماره‌ی ۵۹
پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۷۳-۶۱

"مقاله پژوهشی"

مطالعه پتروگرافی و ژئوشیمیایی کانسار باریت حور، استان کرمان

برزو رحیم دشتی^۱، فرهاد احیاء^{۲*}، سارا ملکی خیمه سری^۳، علیرضا زراسوندی^۴

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

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

^۳ گروه زمین شناسی، واحد بهبهان، دانشگاه آزاد اسلامی، بهبهان، ایران

^۴ دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران، اهواز

* نویسنده مسئول مکاتبات: Email: ehya.farhad@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹)

چکیده

کانسار باریت حور، واقع در واحدهای رسوبی ماسه‌سنگی و شیلی، به عنوان یک کانسار هیدروترمال رگه‌ای در محیط قاره‌ای شکل گرفته است. این پژوهش با هدف بررسی زمین‌شیمی و کانی‌شناسی این کانسار و تعیین منشأ و شرایط تشکیل آن انجام شد. توزیع عناصر نادر خاکی (REEs) در نمونه‌های باریت نشان‌دهنده غنی‌شدگی از عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) و وجود آنومالی‌های مثبت Ce و منفی Eu است که به شرایط اکسایش-کاهش خاصی در محیط تشکیل اشاره دارد. مقادیر پایین ΣREEs و نسبت‌های LREE/HREE در باریت‌های کانسار حور نیز دلالت بر منشأ هیدروترمالی این کانسار دارند. علاوه بر این، شواهد ساختاری و بافتی، از جمله حضور رگه‌های چند مرحله‌ای و خردشدگی بلورها، تأیید می‌کنند که کانی‌سازی باریت در این منطقه تحت تأثیر فرآیندهای تکتونیکی و سیالات هیدروترمالی صورت گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کانسار باریت حور مشابه با ذخایر گرمابی در محیط‌های قاره‌ای بوده و منشأ آن از سیالات هیدروترمالی است که در شرایط تکتونیکی فعال به رگه‌ها و رگچه‌های باریت منجر شده است.

واژه‌های کلیدی: باریت، ژئوشیمی، پتروگرافی، کانسار حور

مقدمه

باریت، رایج‌ترین کانی باریت‌دار است این کانی گاه‌ها به صورت اتفاقی و در بعضی از موارد به میزان قابل توجهی در مقیاس‌های بزرگ مانند رگه یا لایه تمرکز می‌یابد. این تمرکز می‌تواند تنها یا به همراه کانی‌هایی نظیر فلوتورین، سلسنتین، کوارتز، گالن، اسفالریت، کلسیت، دولومیت و سیدریت در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی رخ دهد (۱). در نهشته‌های ماگمایی، باریت همراه با کربناتیت‌ها و سنگ‌های نفوذی قلیایی، نهشته‌های سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد (VMS) و کانی‌سازی Ba در اسکارنها تشکیل می‌گردد (۲ و ۳). با این حال، مهم‌ترین ذخایر باریت در محیط‌های رسوبی در نقاط مختلف کره زمین تشکیل شده است. کانسارهای باریت رسوبی به چندین نوع تقسیم می‌شوند که هر کدام ویژگی‌های خاص خود را دارند. در ادامه به توضیح این انواع پرداخته می‌شود:

ذخایر باریت رسوبی شامل ذخایر باریت باقیمانده و مرتبط با کارست (Pb-Zn)، نهشته‌های Ba-Pb-Zn (Ag) میزبان کربناته (سولفیدی و غیر سولفیدی)، نهشته‌های باریت-سلسنتیت مربوط به دیاپیر، نهشته‌های باریت استراتاباند در سنگ‌های سیلیسی، رسوبات باریت-پیریت در ذخایر سیلیسی-آواری-کربناتی و ذخایر سلسنتیت-باریت در محیط‌های دریاچه‌ای (پلایا) (۴). دسته دیگر از ذخایر باریت، ذخایر مرتبط با ساختارها و شکستگی‌ها هستند، از جمله رگه‌های برشی F-Ba اپی‌ترمال، ذخایر F-Ba اپی‌ترمال، نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT)، گرمابی می‌باشد (۵ و ۶).

سازوکار معمول تشکیل کانی باریت، مخلوط شدن و واکنش بین سیال‌های غنی از باریت و سولفات در محیط خشکی در آب دریاست (۷). در ارتباط با تشکیل ذخایر باریت، به طور کلی ۴ فرآیند اصلی مطرح شده است (۱۱، ۱۰، ۹، ۸ و ۱۲): نوع اول آن باریت ساحلی یا باریت دریایی آب‌زادی نامیده می‌شود، باریت بر اثر تخریب مواد آلی در محیط رها شده و می‌تواند محیط ابر اشباع را تشکیل داده و از آب دریا ته‌نشست شود. باریت نوع دوم که به باریت خودزا موسوم است، از سیالات باقی‌مانده در منافذ رسوب‌ها طی دیاژنز تهیه می‌شود و یا از تراوش سیالات سرد در نزدیکی کف دریا بوجود می‌آید. در فرآیند سوم، باریت از سیال‌های با دمای بالا (۱۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) در کف دریا از دودکش‌ها و پشته‌های میان اقیانوسی و همچنین کمان‌های آتشفشانی در کف اقیانوس شکل می‌گیرد و باریت گرمابی دمای بالا را تشکیل می‌دهد. در نوع چهارم، باریت گرمابی (با دمای پایین) از مایع‌های با دمای کم‌تر از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، در چشمه‌های آب گرم و زیر سطح با گردش مایع‌ها در محیط زمین-ساختی کرانه قاره‌ای بوجود می‌آید (۱۴ و ۱۳).

لیسه رودی و همکاران (۱۵) در پژوهشی به نحوه تشکیل و نوع کانسار سرب-روی (فلوتور-باریم) سرچلشک، منطقه سوادکوه، استان مازندران پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد عدم روند مشابه عناصر کمیاب و کمیاب خاکی در نمونه‌های کانه‌دار و سنگ‌های آذرین مافیک، بیانگر عدم ارتباط ژنتیکی کانه‌زایی با ماگماتیسم مافیک منطقه بوده و خاستگاه گرمابی آذرین‌زاد کانسار سرچلشک را منتفی می‌سازد. ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانه‌زایی، مجموعه کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ در کانسار

زمین‌شناسی

کانسار باریت حور در استان کرمان و در فاصله ۱۱۰ کیلومتری شهر کرمان واقع شده است. از نظر موقعیت زمین‌شناسی، این کانسار در زون ایران مرکزی قرار دارد که به عنوان مرکز و بخش اصلی فلات ایران شناخته می‌شود. این زون با مساحتی حدود ۲۳۰۰ کیلومتر مربع از شمال به رشته کوه‌های البرز و کپه‌داغ، از غرب و جنوب به رشته کوه‌های زاگرس و مکران و از شرق به رشته کوه‌های ایران شرقی محدود می‌شود (شکل ۱-ا).

شکل ۱-ب نقشه زمین‌شناسی کانسار حور را نشان می‌دهد. مطابق نقشه، واحدهای مختلف زمین‌شناسی در این منطقه وجود دارد که سن آن‌ها از پرکامبرین تا کرتاسه می‌باشد. بر اساس مطالعات صحرایی، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در محدوده نقشه زمین‌شناسی کانسار باریت حور، شامل یک توالی از سنگ‌های رسوبی شامل شیل، ماسه‌سنگ و مارن مربوط به سازندهای بیدو با سن ژوراسیک زیرین تا بالایی و سازند دزو با سن پرکامبرین، سنگ آهک کرتاسه و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن می‌باشد. با توجه به بازدیدهای به عمل آمده مشخص شده واحدهای سنگی غالب در منطقه مورد مطالعه سنگ‌های رسوبی - ژوراسیک هستند که میزبان کانه‌زایی باریت در منطقه می‌باشند. واحدهای ژوراسیک پس از واحدهای تریاس، به صورت لایه‌ای با ضخامت ۱۰ تا ۲۵ متری از ماسه‌سنگ قهوه‌ای رنگ در منطقه گسترش یافته و مستقیماً روی سنگ آهک تریاس قرار گرفته است. بر روی واحد سنگی ماسه‌سنگ قهوه‌ای با سن ژوراسیک تناوبی از شیل، ماسه‌سنگ، ژریس و مارن نهشته شده است. بر روی سازند نایبند، یکسری ماسه‌سنگ دانه‌ریز

سرچلشک شباهت زیادی با کانسارهای سرب و روی تیپ دره می‌سی‌سی‌پی (زیردره غنی از فلوئور و باریم) دارد.

رسولی و همکاران (۱۶) در پژوهشی به زمین‌شیمی، ایزوتوپ‌های S و Sr، و منشأ کانسار باریت شاه نشین، شمال غرب استان کردستان، ایران پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد نزدیکی مقادیر $\delta^{34}S$ نمونه‌های باریت و آب دریای مرتبط با آن‌ها (-۲۲٪)، گویای مقدار کم گوگرد سیال ماگمایی، تشکیل باریت در جریان آزاد آب و شرایط اکسیدان بستر دریاست. داده‌های باریت شاه نشین همسان کانسار نوع فلسیک کوروکو، نهشته‌شده در حوضه حاشیه قاره‌ای بین پهنه فرورانش و حاشیه غیرفعال است.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد تاکنون کانسار باریت حور مورد مطالعات زمین‌شناسی دقیق به منظور تعیین منشأ قرار نگرفته است. با این حال، منشأ دقیق سیالات کانه‌زا، عوامل ته‌نشست و ماهیت کانی‌سازی باریت تا کنون برای این کانسار مشخص نشده است. فقدان اطلاعات دقیق زمین‌شناسی در مورد کانسارهای باریت در ایران، انگیزه انجام این مطالعه بود. از طرفی با توجه به اینکه کانسار باریت حور جز کانسارهای نو اکتشاف محسوب می‌گردد و مطالعه‌ای در این زمینه صورت نگرفته لذا در این مطالعه سعی بر آن است با استفاده از مجموعه داده‌ای متشکل از مطالعات سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی شرایط تشکیل کانسار باریت شرح داده شود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری در این پژوهش به روش لیتوژئوشیمیایی صورت گرفته و نمونه‌هایی که در این تحقیق انتخاب و مطالعه می‌شوند شامل: الف) نمونه‌هایی که از کانسنگ و سنگ‌های میزبان برای مطالعات سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی انتخاب شده است، به تعداد حدود ۵۰ نمونه؛ ب) نمونه‌هایی که از کانسنگ و سنگ‌های میزبان برای تجزیه شیمیایی به روش ICP-MS انتخاب شده است (۱۳ نمونه).

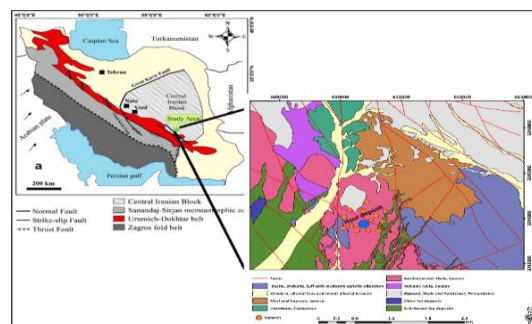
مطالعات میدانی برای بررسی ویژگی‌های میکروسکوپی کانه و سنگ‌های میزبان و تعیین روابط سنگ میزبان انجام شد. در طول مشاهدات میدانی، در مجموع ۱۳ نمونه معدنی، سنگ معدنی و سنگ میزبان از بخش‌های مختلف رگه باریت و سنگ‌های میزبان برای مطالعات پتروگرافی و زمین‌شیمیایی، جمع‌آوری شد. نمونه‌های معدنی از مرکز رگه و دور از دایک‌ها گرفته شد تا از تأثیر احتمالی سنگ‌ها و دایک‌های میزبان بر ژئوشیمی اولیه و دمای سازند جلوگیری شود.

نتایج

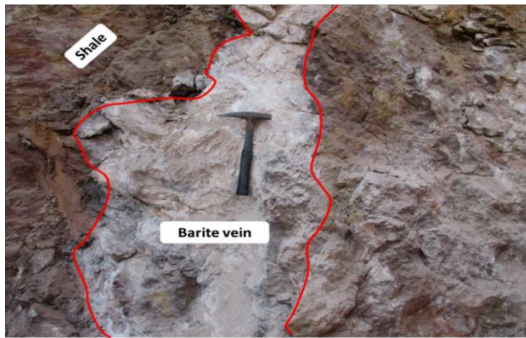
کانه‌زایی و کانی‌شناسی

در منطقه مورد مطالعه کانه‌زایی باریت به شکل رگه چینه‌ای در واحدهای رسوبی همچون شیل و ماسه‌سنگ (ژوراسیک و کرتاسه) تشکیل شده است (شکل ۲). این توالی رسوبی متشکل از ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک، مارن و ژئیس در مجاورت رگه باریت می‌باشد. ۳ رگه میزبان باریت با ضخامت متوسط دو متر و طول حدود ۱۰ تا ۱۵ متر در منطقه شناسایی شد. شیب این رگه‌ها حدود ۶۰ تا ۸۰ درجه است و جهت

به ضخامت ۵ تا ۲۵ متر همراه با تناوبی از ماسه‌سنگ‌های کوارتزیتی، ماسه‌سنگ و میکروکنگلوپراهای نازک‌لایه تشکیل شده است (۱). این واحد معادل سازند شمشک معرفی شده و سن ژوراسیک (لیاس تا دوگر) را دارا می‌باشد که بر روی لایه سنگ آهک بادامو با تناوبی از ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز خاکستری و آهکی با میان لایه‌های شیل تیره تشکیل گردیده که ارتفاعات پست و حالت تپه ماهور را در منطقه تشکیل می‌دهد. این واحد معادل سازند هجدک (دوگر و ژوراسیک) می‌باشد. مارن‌های ژئیس‌دار قرمز، ماسه-سنگ‌های قرمز و آهک‌های ماسه‌ای سازند بیدو بر روی سازند هجدک واقع شده است. تنها واحد مربوط به سنگ‌های آتشفشانی در منطقه مشاهده شده دارای سن ائوسن می‌باشد که در فاصله کمی دورتر از کانسار حور واقع شده است (۱۱). با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه در زون ایران مرکزی واقع شده است و منطقه به شدت دچار چین‌خوردگی و گسلش گردیده، لذا به نظر می‌رسد که نمودهای ساختاری در تشکیل رگه‌های باریت تأثیر داشته‌اند. کانسار حور در محل اتصال زون گسلی مثلث میانی ایران مرکزی قرار دارد. این زون گسلی همان است که فروافتادگی باغین-ماهان بر روی آن قرار دارد.



شکل (۱): a: موقعیت کانسار حور در نقشه زون‌های ساختاری ایران. b: نقشه زمین‌شناسی کانسار حور.



شکل (۳): نمای نزدیک از رگه باریت با سنگ میزبان آهکی در منطقه مورد مطالعه.

بر اساس مطالعات میکروسکوپی، اندازه بلورهای باریت از درشت بلور پهن تا بلورهای سوزنی ریز متغیر می‌باشد. برخی از بلورهای بسیار پهن و درشت باریت نشانگر تشکیل در دمای زیاد می‌باشند که فضای رشد کافی، زمان تبلور طولانی و تداوم کافی سیال کانی‌ساز را در اختیار داشته‌اند، لذا بنظر می‌رسد مربوط به اولین نسل از کانی‌سازی باریت باشند. بر اساس مشاهدات میکروسکوپی، بلورهای باریت تشکیل شده در مرحله اول کانی‌سازی اکثراً طی فرآیندهای تکتونیکی بعدی و نیروهای برشی وارده، خرد شده و فضای بین قطعات خرد شده توسط کانی‌هایی مثل کوارتز ریز بلور (کلسدونی) و کلسیت پر شده‌اند (شکل ۴). خردشدگی در این نسل از باریت هم از نوع برشی خردشده (برش حاصل از فعالیت‌های تکتونیکی و برش حاصل از فرآیندهای گرمایی می‌باشد).

کانه‌زایی آن‌ها در منطقه اکثراً به صورت شمال‌شرق-جنوب‌غرب و شمال‌غرب-جنوب‌شرق بود؛ بزرگ‌ترین رگه‌ها در امتداد شمال‌شرق-جنوب‌غرب بود. باریت در بعضی مناطق مشابه کرومیت چینه‌سان رفتار کرده و به صورت لنزهایی باز و بسته می‌شود. رگه و رگچه‌های باریت درون ماسه‌سنگ‌ها و به مقدار کم‌تر در شیل‌ها برون‌زد دارند و عوامل ساختاری به ویژه درزه و شکاف‌ها در کنار عوامل سنگ‌شناسی نقش موثری در کنترل کانی‌سازی ایفا نموده‌اند. وجود سنگ‌هایی همچون ماسه‌سنگ به دلیل نفوذپذیری، وجود شکستگی‌ها و همچنین توانایی واکنش با سیال کانسارساز و سرانجام ته‌نشینی مواد در ناحیه واکنشی، شرایط مناسبی را برای ته‌نشین شدن باریت فراهم کرده است. شواهدی همچون قطع شدن تعدادی از رگه‌های باریت توسط رگه‌ها یا رگچه‌های جوان‌تر دربردارنده باریت، برشی شدن به همراه کانی‌سازی مجدد در رگه‌ها حاکی از رخ دادن کانه‌زایی بیش از یک مرحله در منطقه مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۳).



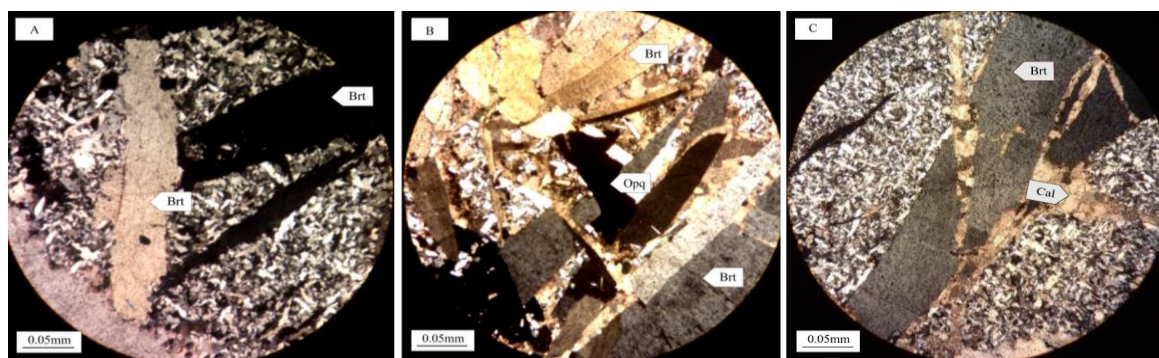
شکل (۲): رگه‌ی باریت با سنگ میزبان آهکی در منطقه مورد مطالعه.



شکل (۴): تصاویر میکروسکوپی از کانی باریت نسل اول در نور XPL. (a) و (b) بلورهای بسیار پهن باریت که دچار خرد شدگی شده و فضای بین شکستگی‌های آنها توسط کلسیت پر شده است (بافت برشی خرد شده و بافت برشی موزائیک). (c) بلورهای درشت کلسیت که در فضای شکستگی‌های کانی باریت درشت بلور پهن پر شده‌اند و جانشین باریت شده‌اند.

روابط بین بلورهای باریت تشکیل شده در طی این مرحله اکثراً مضرسی بوده ولی گاه‌آ ساده نیز می‌باشد که حالت اول بیانگر وجود فضای رشد اندک و تأثیر تنش است. بلورهای باریت حالت قطعه‌قطعه شدن دارند که این حالت در بلورهای پهن باریت هم مشاهده می‌شود که می‌تواند دلیلی بر تداوم نیروهای تکتونیکی بعد از تشکیل بلورهای باریت باشد. بر اساس مستندات مذکور و شواهد بافتی و ساختی و کانی‌شناسی، بنظر می‌رسد این نوع کانی‌سازی مربوط به دومین نسل کانی‌سازی باریت باشد (شکل ۵).

نسل دوم از کانی‌سازی باریت مربوط به بلورهای تخته‌ای، خودشکل و طویل باریت است که نشانگر تشکیل در دمای بالا هستند و در فضاهای خالی رشد نموده و بلورهای خرد شده مرحله قبل را قطع کرده‌اند. علاوه بر این بلورهای تشکیل شده در این مرحله پیش‌تر حالت متقاطع دارند و در واقع بطور تصادفی همدیگر را در جهات مختلف قطع کرده‌اند. بلورهای باریت تشکیل شده در این مرحله نیز در اثر فرایند تکتونیکی و گرمایی، برشی و خرد شده‌اند (خردشدگی).

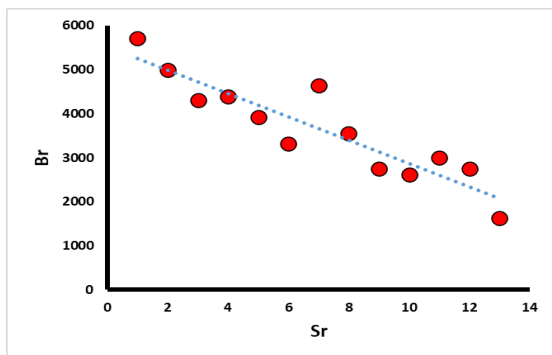


شکل (۵): تصاویر میکروسکوپی مربوط به دومین نسل از کانی‌سازی باریت. تصاویر (a, c, c) در نور XPL نشان‌دهنده نحوه قرارگیری بلورهای تخته‌ای باریت نسل دوم می‌باشد. همانطور که قابل مشاهده است بلورهای تخته‌ای باریت از حواشی مورد هجوم باریت‌های ریز بلور سوزنی شکل به همراه کوارتزهای آمورف (کلسدونی) قرار گرفته است. در شکل (c) رگه کلسیتی علاوه بر قطع کانی‌سازی باریت‌های تیغه‌ای شکل ریز بلور به همراه کوارتزهای ریز کلسدونی، بلور تخته‌ای شکل باریت را نیز قطع کرده است (رگه کلسیتی نسبت به کانی‌سازی باریت جوان‌تر است).

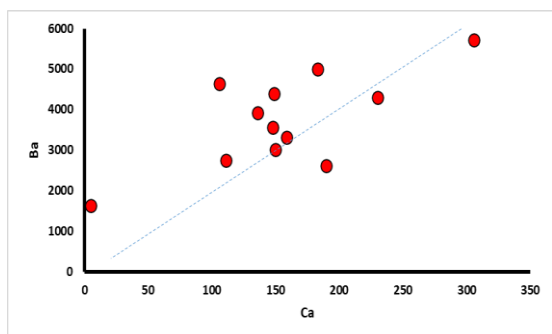
جدول (۱): نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه‌های کانی‌سازی به روش ICP-MS

As	Al	Ba	Ca	Cr	Dy	Er	Eu	Fe	Ni	P	Pb	Pr	S	Sm	Sn	Sr	Ta	Ti	Tb	Te	Th	V
2.7	<100	5713	306	7	0.4	0.2	1.04	703	<1	74	4	1.66	2352	1.9	0.1	1914	0.2	<10	0.1	7.4	0.4	2
3.3	<100	4993	183	5	0.4	0.2	0.75	266	<1	73	4	1.65	2370	1.5	<0.1	3241	0.2	<10	0.1	7	0.4	2
3.6	112	4300	230	10	0.4	0.2	0.65	590	4	73	3	1.68	2814	1.4	0.1	3949	0.2	<10	0.1	5.8	0.4	2
3.6	<100	4386	149	12	0.4	0.2	0.54	259	2	74	3	1.7	2775	1.2	<0.1	4751	0.2	<10	0.1	5.6	0.4	2
2.8	<100	3915	136	5	0.4	0.2	0.5	208	<1	74	<1	1.7	2664	1	<0.1	4767	0.2	<10	0.1	4.3	0.4	2
3.3	<100	3319	159	19	0.4	0.2	0.42	275	7	74	27	1.67	2862	0.8	0.2	5638	0.2	<10	0.1	3.7	0.4	2
1.7	<100	4643	106	11	0.4	0.2	0.8	281	3	73	<1	1.66	2047	1.4	0.2	2644	0.2	<10	0.1	7.6	0.4	2
5	<100	3557	148	20	0.4	0.2	0.5	435	7	74	<1	1.67	2659	0.9	0.3	3553	0.2	<10	0.1	4.2	0.4	2
2.6	<100	2755	111	15	0.4	0.2	0.33	311	5	74	<1	1.69	3261	0.9	0.2	6703	0.2	<10	0.1	2.7	0.4	2
3	<100	2609	190	10	0.4	0.2	0.3	278	3	73	12	1.67	3336	0.8	0.3	6555	0.3	<10	0.1	2.8	0.4	2
3.5	265	3009	150	6	0.4	0.2	0.47	383	2	74	2	1.71	3333	0.9	2.3	6345	0.2	<10	0.1	4	0.4	2
4.9	2744	2754	39178	10	1.3	0.6	0.68	4056	<1	91	41	2.06	4909	1.8	0.3	6202	0.3	<10	0.3	3.9	0.8	7
2.9	1253	1632	>10%	5	2	0.9	0.61	5056	2	81	65	2.09	6954	2	<0.1	7494	0.2	<10	0.4	2	0.7	6

از کانه‌زایی کلسیت که جوان‌تر از کانی‌سازی باریت بوده است مربوط باشد. بطور کلی بررسی زمین‌شیمی نمونه‌های باریت منطقه مورد مطالعه نشان داد که کانسار باریت حور مشابه با ذخایر گرمابی است.



شکل ۶: مقدار Sr نسبت به Ba در نمونه‌های کانسار حور (بر حسب گرم در تن).



شکل ۷: مقدار Ba نسبت به Ca در نمونه‌های کانسار حور.

زمین شیمی عناصر اصلی در کانسار باریت حور

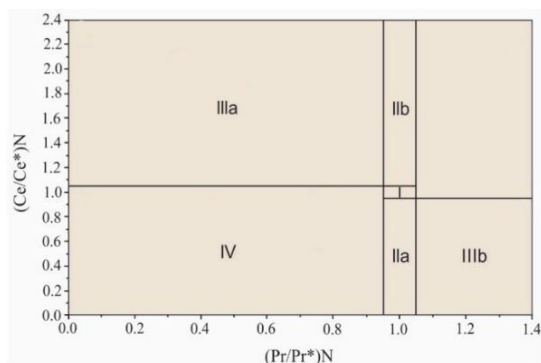
در نمونه‌های اندازه‌گیری شده (طبق جدول ۱) Ba بین ۱۶۳۲ تا ۵۷۱۳ گرم در تن متغیر است و عنصر Sr (۱۹۱۴ تا ۷۴۹۴ ppm) و Ca بسته به میزان کلسیت (۳۰۶ تا ۳۹۱۷۸ ppm) بطور قابل توجهی در کانسار حور وجود دارد. عناصر فلزی مانند Fe (۲۷۸ تا ۵۰۵۶ ppm)، Pb (۲ تا ۶۵ ppm) و Al و Ti به طور کلی پایین است. مقادیر سایر عناصر اندازه‌گیری شده به روش ICP-MS ناچیز بود. مقادیر اندک Al و Ti اغلب در باریت‌های گرمابی دیده می‌شود، زیرا در این نوع ذخایر بیشتر عناصر گرمابی با تحرک بالا که ویژه فازهای پایانی هستند، غنی می‌شوند و سیالات با عناصر Al و Ti دار به مقدار کم‌تر دخالت دارند. همبستگی و ارتباط برخی عناصر در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است بین مقادیر Ba با Sr و Ca رابطه مستقیم وجود دارد بطوری که با بالا رفتن مقدار Ba مقدار Sr و Ca افزایش پیدا کرده است. این رابطه مستقیم می‌تواند به علت الف) به علت نبود کانی‌های کلسیت و سلسیت در برخی از رگچه‌ها ب) بخشی

زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی

نمودار توزیع عناصر نادر خاکی نمونه‌های باریت مورد مطالعه در شکل ۸ نشان داده شده است. نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی نمونه‌های باریت نشان می‌دهد که پس از بهنجار شدن با کندریت (۱۷)، یک شیب منفی همراه با آنومالی منفی Er, Yb, Gd, Eu و آنومالی مثبت La, Ce, Nd, Sm وجود دارد بدین معنی که غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین قابل مشاهده است این روند نزولی ناشی از الگوی غنی‌شدگی در LREE و تهی‌شدگی در HREE است (شکل ۸). دو عنصر Eu و Ce از حساسیت فوق‌العاده‌ای برخوردار هستند و در نمونه‌های زمین‌شناسی به عنوان مهمترین ردیاب برای ارزیابی شرایط محیطی در سیستم‌های زمین‌شناختی مختلف محسوب می‌شوند (۱۸). آنومالی Ce بیش‌تر به‌وسیله شرایط اکسایش - کاهش کنترل می‌شود. همچنین به عنوان یک ردیاب برای تفکیک آب‌های کاهنده و اکسید کننده کاربرد دارد (۱۹). تهی‌شدگی Eu در نمونه‌های باریت این کانسار می‌تواند مرتبط با تبلور بخشی پلاژیوکلاز از ماگمای مرتبط با کانه‌زایی باشد. Eu دارای شعاع یونی برابر با Ca بوده و می‌تواند جانشین کلسیم در پلاژیوکلازهای کلسیک شده و همراه آن از سیستم ماگمایی خارج شود. از سوی دیگر Ce می‌تواند به Ce^{4+} اکسید شود. بنابراین در شرایط اکسیداسیون، Ce از سایر عناصر نادرخاکی جدا می‌شود و می‌تواند یک آنومالی مثبت به وجود آید (۱۸). وجود آنومالی مثبت Ce می‌تواند دلیل عدم خروج آن از محیط و حضور نسبی Ce در ساختمان کانه‌هایی مانند مگنتیت باشد (۲۰).

در همین راستا نسبت LREE/HREE و مولفه ΣREE برای بررسی شرایط تشکیل نمونه‌های باریت محاسبه گردید. مقادیر ΣREE نشان می‌دهد که نمونه‌های کانسار حور با مقدار میانگین $13/85$ در محدوده $5/32$ تا $14/56$ گرم در تن قرار دارند که این مقدار پایینی است. نسبت LREE/HREE به طور میانگین $18/71$ گرم در تن بوده که در محدوده $18/10$ تا $120/33$ گرم در تن جای می‌گیرند و نشان دهنده غنی‌شدگی باریت کانسار حور از عناصر نادرخاکی سبک است. بدلیل شباهت یونی بیش‌تر عناصر LREE به Ba در مقایسه به عناصر HREE انتظار می‌رود که عناصر مذکور جایگزین یون Ba^{2+} و کانی‌های همراه دیگر همچون مگنتیت شوند (۲۱).

باریت‌های دارای منشا دریایی دارای میزان HREE بیش‌تری نسبت به باریت‌های با منشا گرمابی در مناطق قاره‌ای هستند. عموماً باریت‌های با منشا دریایی ۱۰ تا ۱۰۰ برابر بیش‌تر از باریت‌های مناطق قاره‌ای حاوی عناصر نادر خاکی هستند (۲۲ و ۲۱). مقادیر $9/55$ تا $17/63$ نمونه‌های باریت کانسار حور از این نظر پایین بوده و بیانگر وجود یک منشا قاره‌ای از نوع هیدروترمالی در مقایسه با عملکرد یک منشا دریایی در تشکیل کانسار مذکور است. از سوی دیگر نسبت Ce/La نیز یک عمل تفکیکی پیشنهادی بین منشا دریایی و منشا قاره‌ای در نمونه‌های باریت است (۲۱). در باریت‌های دریایی این نسبت < 1 و در مقابل در باریت‌های با منشا قاره‌ای (رگه‌ای شکل) > 1 را دارا خواهند بود (۲۱). در نمونه‌های باریت کانسار حور نسبت مذکور بیش‌تر از یک است. بر این اساس به نظر می‌رسد که نمونه‌های باریت مورد مطالعه دارای منشا قاره‌ای و به شکل رگه‌ای تشکیل شده باشند.



شکل (۹): نمودار مربوط به نسبت $(Ce/Ce^*)_N$ در مقابل $(Pr/Pr^*)_N$ (۲۵).
 (Pr^*) نرمال شده به شیل پست-آرکنن استرالیا

با این توضیح که:

I: بدون آنومالی

IIa: آنومالی مثبت La به علت حضور مواد والد

IIb: آنومالی منفی La تولید شده از مواد والد دارای

آنومالی مثبت Ce

IIIa: آنومالی مثبت واقعی Ce

IIIb: آنومالی منفی واقعی Ce

IV: آنومالی مثبت La که همراه با یک آنومالی مثبت

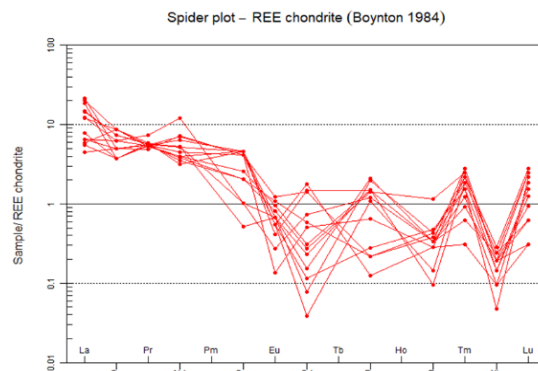
Ce است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از عناصر نادرخاکی و مطالعات پتروگرافی جهت شناسی تیپ کانه‌زایی و ژنز کانسار باریت حور واقع در کرمان بهره گرفته شد.

کانسار باریت حور از نظر تیپ کانه‌زایی در دسته‌ی کانسارهای هیدروترمال رگه‌ای قرار می‌گیرد. این نوع کانسارها به واسطه‌ی تشکیل رگه‌ها و رگچه‌های معدنی درون سنگ‌های میزبان، معمولاً در امتداد شکستگی‌ها، درزه‌ها و سایر ساختارهای تکتونیکی ایجاد می‌شوند. در مورد کانسار حور، رگه‌ها و رگچه‌های باریت عمدتاً در واحدهای رسوبی ماسه‌سنگی و شیلی شکل گرفته‌اند. این رگه‌ها دارای

نسبت‌های $(La/La^*)_N$ و $(Gd/Gd^*)_N$ در نمونه‌های باریت با منشا دریایی بالاتر از واحد است (۲۳). در نمونه‌های باریت کانسار حور، میانگین نسبت‌های یاد شده به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۲۵ بوده و کمتر از مقدار واحد هستند که بیانگر تشکیل آن‌ها در یک محیط قاره‌ای است. نسبت $(Ce/Ce^*)_N$ نیز نشان می‌دهد که یک آنومالی مثبت از عناصر Ce و La وجود دارد. در سیستم‌های باز آب‌های دریایی، آنومالی منفی Ce دیده می‌شود زیرا عنصر یاد شده به سرعت طی اکسیداسیون از محیط خارج می‌شود (۲۴). از اینرو بنظر می‌رسد که با وجود آنومالی مثبت Ce نمونه‌های باریت کانسار حور، در یک محیط قاره‌ای و بدور از آب‌های دریایی تشکیل شده باشند. ترسیم نمودار مربوط به مقادیر نسبت‌های $(Ce/Ce^*)_N$ و $(Pr/Pr^*)_N$ نیز نشان می‌دهد که جایگیری نمونه‌های باریت کانسار حور در محدوده IV بیانگر آنومالی مثبت La و Ce است (شکل ۹).



شکل (۸): نمودار عنکبوتی عناصر نادر خاکی نمونه‌های باریت بهنجار شده به کندریت.

شیب نسبتاً زیاد (۶۰ تا ۸۰ درجه) بوده و در جهت‌های شمال‌شرق-جنوب‌غرب و شمال‌غرب-جنوب‌شرق کشیده شده‌اند، که این مسئله نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فعالیت‌های تکتونیکی بر فرآیند کانه‌زایی است. همچنین، حضور رگه‌های چند مرحله‌ای و جوان‌تر که رگه‌های قدیمی‌تر را قطع می‌کنند، دلالت بر چند مرحله‌ای بودن فرآیند کانی‌سازی دارد.

از نظر ژنز، کانسار باریت حور به عنوان یک کانسار با منشأ هیدروترمال در محیط قاره‌ای در نظر گرفته می‌شود. در این نوع کانسارها، سیالات هیدروترمال از عمق زمین و از طریق شکستگی‌ها و درزه‌ها به سمت بالا حرکت می‌کنند و با سرد شدن و تغییر شرایط شیمیایی، مواد معدنی را در داخل این فضاها ته‌نشین می‌کنند. شواهد ژئوشیمیایی موجود، از جمله توزیع عناصر نادر خاکی (REEs) در باریت‌های این کانسار، غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE)، و همچنین آنومالی‌های Eu و Ce، تأیید می‌کنند که این کانسار توسط سیالات هیدروترمال غنی از عناصر با حرکت بالا مانند Ba تشکیل شده است. این سیالات با نفوذ در واحدهای رسوبی، به ویژه ماسه‌سنگ‌ها که به دلیل نفوذپذیری بالا و وجود شکستگی‌ها شرایط مناسبی برای عبور سیالات و ته‌نشینی مواد معدنی دارند، باعث تشکیل رگه‌ها و لنزهای باریت شده‌اند.

این فرآیند با چند مرحله‌ای بودن کانی‌سازی باریت همراه بوده است، به طوری که نسل اول بلورهای باریت به دلیل تأثیرات تکتونیکی بعدی خرد شده و فضای بین قطعات خرد شده توسط کانی‌های دیگری مانند کوارتز و کلسیت پر شده است. نسل دوم باریت نیز به صورت بلورهای خودشکل و طویل در فضاهای

خالی رشد کرده و بلورهای خرد شده مرحله قبل را قطع کرده است. این شواهد بافتی و ساختاری، همراه با مقادیر پایین عناصر فلزی مانند Al و Ti، که در کانسارهای هیدروترمال رایج است، نشان‌دهنده آن است که کانسار باریت حور به طور عمده توسط سیالات هیدروترمال در یک محیط قاره‌ای تشکیل شده و فرآیند کانی‌سازی آن تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی و شرایط ژئوشیمیایی خاص محیط بوده است.

نمودار عنکبوتی و مقادیر نسبت‌های LREE/HREE و Σ REE نشان می‌دهد که باریت‌های کانسار حور از عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) غنی شده‌اند که این الگو معمولاً در کانسارهای هیدروترمالی مشاهده می‌شود، زیرا عناصر LREE به دلیل شباهت یونی بیشتر به Ba تمایل بیشتری به جایگزینی در ساختار باریت دارند. آنومالی‌های مشاهده شده در Eu و Ce، به ویژه آنومالی مثبت Ce و نسبت Ce/La بزرگتر از یک، نشانه‌هایی از تشکیل در محیط قاره‌ای و منشأ هیدروترمالی است، در حالی که باریت‌های دریایی به طور معمول نسبت Ce/La کم‌تر از یک دارند. مقادیر پایین Σ REEs در نمونه‌های باریت حور نیز تأییدی بر منشأ هیدروترمالی قاره‌ای آن است، چرا که باریت‌های با منشأ دریایی به طور معمول مقادیر REEs بیشتری دارند. علاوه بر این، شواهد ساختاری و بافتی از جمله بلورهای پهن و درشت باریت که نشان‌دهنده تشکیل در دمای بالا و فضای مناسب برای رشد بلورها هستند، همراه با خردشدگی و برش‌های مشاهده شده در بلورها که بیانگر فعالیت‌های تکتونیکی و گرمایی است،

type barite (\pm base metal, gold) deposits in northern Madagascar and its link with Mesozoic Pangean rifting. *Mineralium Deposita* 59, 255-273.

[7] Zhou, Z., Wen, H., Qin, C., de Fourestier, J., Liu, L., Shi, Q., 2018, The genesis of the Dahebian Zn-Pb deposit and associated barite mineralization: Implications for hydrothermal fluid venting events along the Nanhua Basin, South China. *Ore Geology Reviews* 101, 785-802.

[8] Torres, M. E., Brumsack, H. J., Bohrmann, G., Emeis, K. C., 1996, Barite fronts in continental margin sediments: a new look at barium remobilization in the zone of sulfate reduction and formation of heavy barites in diagenetic fronts. *Chemical Geology* 127, 125-139.

[9] Cansu, Z., Öztürk, H., 2020, Formation and genesis of Paleozoic sediment-hosted barite deposits in Turkey. *Ore Geology Reviews* 125, 103700.

[10] Canet, C., Anadón, P., González-Partida, E., Alfonso, P., Rajabi, A., Pérez-Segura, E., Alba-Aldave, L. A., 2014, Paleozoic bedded barite deposits from Sonora (NW Mexico): Evidence for a hydrocarbon seep environment of formation. *Ore Geology Reviews* 56, 292-300.

[11] Hormozi, H.K., Ehya, F., Paydar, G.R., kHeymehsari, S., 2023, Formation of barite in the Ab Torsh deposit, Kerman province, Iran: Insights from rare earth elements, O and S isotopes, and fluid inclusions, *Geochemistry* 83 1- 14.

[12] Ehya, F., Mazraei, S. M., 2017, Hydrothermal barite mineralization at Chenarvardeh deposit, Markazi Province, Iran: evidences from REE geochemistry and fluid inclusions. *Journal of African Earth Sciences* 134, 299-307.

[13] Alzughoul, K. A., Ibrahim, K. M., Khoury, H. N., Farouk, S., Maynard, J. B., 2022, Mineralogy, geochemistry, and stable isotope characteristics of barite deposits from Wadi El Mingar, North Eastern Jordan. *Neues Jahrbuch Geol. Palaontol. Abhand.*, 123-142.

[14] Keveshk, H. H., Ehya, F., Paydar, G. R., Kheymsari, S. M., 2021, Rare earth elements geochemistry, O and S isotopic compositions, and microthermometric data of

نشان‌دهنده کانی‌سازی چند مرحله‌ای در این کانسار است. این شواهد همگی حاکی از این هستند که کانسار باریت حور در یک محیط قاره‌ای و تحت تأثیر فرآیندهای هیدروترمالی تشکیل شده است.

تشکر و قدرانی

این مقاله حاصل بخشی از فعالیت‌های پژوهشی لازم برای اخذ درجه دکتری زمین‌شناسی اقتصادی نویسنده اول از دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان می‌باشد. از داوران گرامی مجله کاربرد شیمی در محیط زیست که با پیشنهادات سازنده خود موجب بهبود کیفیت مقاله شدند، سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

- [1] Alizadeh-Kouskuie, A., Atapour, H., Rahmani, F., 2020, Assessing the geochemical and environmental baseline of heavy metals in soils around hydrothermal hematite-barite-galena veins in Baghin area, Kerman, Iran. *Environmental Geochemistry and Health* 42, 4011-4036.
- [2] Ebunu, A. I., Olanrewaju, Y. A., Ogolo, O., Adetunji, A. R., Onwualu, A. P., 2021, Barite as an industrial mineral in Nigeria: occurrence, utilization, challenges and future prospects. *Heliyon*, 7, 6.
- [3] Middleton, J. T., Hong, W. L., Paytan, A., Auro, M. E., Griffith, E. M., Horner, T. J., 2023, Barium isotope fractionation in barite-fluid systems at chemical equilibrium. *Chemical Geology* 627, 121453.
- [4] Kursun, G. B., Yalcin, M. G., 2020, Origin of barite deposits in dolomite-limestone units, Gazipasa, Eastern of Antalya: Geology, geochemistry, statistics, sulfur isotope composition. *Mining of Mineral Deposits*, 14, 62-71.
- [5] Song, Y. C., Liu, Y. C., Hou, Z. Q., Fard, M., Zhang, H. R., Zhuang, L. L., 2019, Sediment-hosted Pb-Zn deposits in the Tethyan domain from China to Iran: characteristics, tectonic setting, and ore controls. *Gondwana Research* 75, 249-281.
- [6] Heijlen, W., Vos, K., Kartalis, N., Boyce, A. J., Mucchez, P., 2024, The formation of vein-

index for subtropical sandy soils under different Eucalyptus harvest residue managements. *J. For. Res.* 34, 243–255.

[24] Pattan, J.N., Pearce, N.J.G., Mislankar, P.G., 2005, Constraints in using Cerium-anomaly of bulk sediments as an indicator of paleo bottom water redox environment: a case study from the Central Indian Ocean Basin. *Chem. Geol.* 221, 260–278.

[25] Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985, *The Continental Crust: Its Composition and Its Evolution*. Blackwell, Oxford, p. 312p.

barite from the Kuh–Ghalagheh deposit, Markazi Province, Iran. *Applied Geochemistry* 135, 105128.

[15] Mohammadi Lisehroudi, M., Mokhtari, M. A. A. , Kouhestani, H. and Zohdi, A. (2022). Genetic model and type of Sarchelešk Pb–Zn (F–Ba) deposit, Savadkouh area, Mazandaran province. *Journal of Economic Geology*, 14(2), 1-28.

[16] Amin-Rasouli, H., Moradi, M., Baleshabadi, Z. S., 2021, Geochemistry, S and Sr isotopes and origin of the Shahneshtin barite deposit, NW Kurdistan Province, Iran, *Journal of Economic Geology*, 13 (4), 789-815.

[17] Boynton, W. V. 1984, Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In *Developments in geochemistry* (Vol. 2, pp. 63-114). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>

[18] Jiang, S.Y., Zhao, H.X., Chen, T.Y., Yang, T., Yang, J.H. and Ling, H.F., 2007, Trace and rare earth element geochemistry of phosphate nodules from the Lower Cambrian black shale sequence in the Mufu Mountain of Nanjing, Jiangsu Province China. *Chemical Geology*, 244(3-4): 584- 604.

[19] Karadag, M.M., Kupeli, S., Arik, F., Ayhan, A., Zedef, V., and Doyen, A., 2009, Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortas bauxite deposit (Seydisehir/konya-Southern Turkey). *Chemie der Erde- Geochemistry* 69, 143- 159.

[20] Appel, P.W.U., 1983, Rare earth element in the early Archaen Isua iron-formation, west Greenland. *Precambrian Research* 20, 243-258.

[21] Guichard, F., Church, T.M., Treuil, M., Jaffrezic, H., 1979, Rare earths in barites: distribution and effects on aqueous partitioning. *Geochim. Cosmochim. Acta* 43, 983–997.

[22] Dora, M.L., Roy, S.K., Khan, M., Randive, K., Kanungo, D.R., Barik, R., Kaushik, C.S., Bari, S.H., Pattanayak, R.S., Krishna, K.V.S., Mayachar, G.K., 2022, Rift-induced structurally controlled hydrothermal barite veins in 1.6 Ga granite, Western Bastar Craton, Central India: constraints from fluid inclusions, REE geochemistry, sulfur and strontium isotopes studies. *Ore Geol. Rev.* 148, 105050.

[23] de Sao ~ Jos'e, J.F.B., Cherubin, M.R., Vargas, L.K., Lisboa, B.B., Zanatta, J.A., Araújo, E.F., Bayer, C., 2023, A soil quality

“Research article”**Petrographic and Geochemical Study of the Hour Barite Deposit, Kerman Province****Borzo Rahim Dashti¹, Farhad Ehya^{2*}, Sara Maleki Khime Sari³, Alireza Zarasundi⁴**¹Department of Geology, Behbahan Branch, Islamic Azad University, Behbahan, Iran²Department of Geology, Behbahan Branch, Islamic Azad University, Behbahan, Iran³Department of Geology, Behbahan Branch, Islamic Azad University, Behbahan, Iran⁴Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University, Ahvaz

*Corresponding author: ehya.farhad@gmail.com

(Received: 29 October 2024, Accepted: 8 January 2025)

Abstract

The Hour Barite deposit, located within sedimentary units of sandstone and shale, has formed as a hydrothermal vein-type deposit in a continental environment. This study aims to investigate the geochemistry and mineralogy of this deposit, as well as to determine its origin and formation conditions. The distribution of rare earth elements (REEs) in the barite samples indicates enrichment of light rare earth elements (LREEs) relative to heavy rare earth elements (HREEs), along with the presence of positive Ce and negative Eu anomalies, which suggest specific oxidation-reduction conditions in the formation environment. The low Σ REEs values and LREE/HREE ratios in the Hour deposit's barites further indicate a hydrothermal origin for this deposit. Additionally, structural and textural evidence, including the presence of multi-phase veins and crystal fragmentation, confirm that barite mineralization in this area was influenced by tectonic processes and hydrothermal fluids. The results of this study suggest that the Hour Barite deposit is similar to other hydrothermal deposits in continental environments, with its origin attributed to hydrothermal fluids that, under active tectonic conditions, led to the formation of barite veins and vein.

Conflict of interest: None declared.**Keywords:** Barite, Geochemistry, Petrography



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال پانزدهم، شماره‌ی ۵۹
پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۸۱-۷۵

"مقاله پژوهشی"

کاربرد معادلات دیفرانسیل در حل مدلی از پدیده‌های زیست محیطی

مجید باقری *

گروه ریاضی کاربری، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

* نویسنده مسئول مکاتبات: E-mail: majid.bagheri5391@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰)

چکیده

معادلات دیفرانسیل نقش کلیدی در علوم زیست محیطی ایفا می‌کنند و ابزارهای ریاضی را برای درک فرآیندهای محیطی و پیش‌بینی تغییرات فراهم می‌کنند. هدف تحقیق ارائه روش‌های مدل‌سازی ریاضی برای حل مسائل زیست محیطی و استفاده از تکنیک‌ها و متدهای استاندارد ریاضی جهت حل مدل با دست آوردن نتایج مورد نظر است و تجزیه و تحلیل بر اساس قوانین ریاضی و سیستم اکولوژی انجام می‌شود. در این تحقیق به کاربرد معادلات دیفرانسیل برای مدل‌سازی محیطی، به ویژه در پراکنندگی آلاینده‌ها، دینامیک اکوسیستم و پیش‌بینی تغییرات آب و هوا پرداخته می‌شود. در این پژوهش مبانی ریاضی، روش مدل‌سازی از طریق معادله دیفرانسیل بررسی می‌شود و نقش آن را در تبیین پیچیدگی سیستم محیطی نمایان می‌کند. این مطالعه همچنین به پتانسیل توسعه آینده معادلات دیفرانسیل در موضوعات بین رشته‌ای و محاسبات پیشرفته‌تر اشاره می‌کند که زمینه تحقیق و مسیر بهبود را برای حوزه علوم زیست محیطی فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: علوم زیست محیطی، مدل‌سازی ریاضی، معادله دیفرانسیل

مقدمه

روش‌ها

مسائل علوم زیست محیطی مربوط به حفاظت از اکوسیستم، استراتژی‌های توسعه پایدار و رفاه انسان از اهمیت حیاتی برخوردار است (۱). در این علوم، درک تأثیر فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی بر روی محیط زیست، شامل مناطقی مانند تغییرات آب و هوا، تنوع زیستی، منابع آب و کنترل آلودگی مورد توجه عام قرار می‌گیرد. در این زمینه، معادلات دیفرانسیل نقش کلیدی ایفا می‌کنند و محققان را قادر می‌سازند تا دینامیک پیچیده سیستم‌های محیطی را از طریق مدل‌های ریاضی توصیف کنند (۲-۳). این مدل‌ها نه تنها برای فرآیندهای اساسی اعمال می‌شوند، بلکه در سیستم‌های پیچیده‌تر مانند تغییرات آب و هوا و پویایی‌های اکولوژیکی نیز گسترش می‌یابند. استفاده از معادلات دیفرانسیل دانشمندان را قادر می‌سازد تا مسائل محیطی را به دقت تجزیه و تحلیل کرده و روش‌های مؤثری را پیشنهاد کنند (۴-۵). بنابراین، معادلات دیفرانسیل به عنوان یک ابزار مهم در مدل‌سازی علوم زیست محیطی برای کمک به دانشمندان در خصوص درک بهتر سیستم‌های محیطی، مبنای علمی را برای حل مسائل چالش‌های محیطی ارائه می‌کند. مدل ریاضی با رویکرد مکانیکی سیستم‌های محیطی به عبارات ریاضی مانند نمادها و معادلات اشاره دارد که برای توصیف عواملی که منجر به تغییرات یا دگرگونی در فرآیندهای محیطی با کنترل زمان، مکان و شرایط می‌شود، مورد استفاده می‌گیرد.

مدل‌سازی معادلات دیفرانسیل در علوم زیست محیطی به صورت مراحل زیر بررسی می‌شود: مرحله اول: مسئله تعریف شده و نظریه و داده‌های مربوطه جمع‌آوری شده و سپس فرضیه ایجاد می‌شود. مرحله دوم: با استفاده از اطلاعات بدست آمده، مسئله به فرم معادلات دیفرانسیل مدل‌سازی می‌شود. مرحله سوم: معادله دیفرانسیل به صورت تحلیلی یا عددی حل می‌شود. مرحله چهارم: پس از تایید و تنظیم با داده‌های تجربی، از مدل برای پیش‌بینی و تصمیمات واقعی مدیریت زیست محیطی، استفاده می‌شود.

مدل‌های پراکندگی

در کاربردهای کلاسیک مدل‌های PDEs¹ برای اکولوژی جمعیت، موجودات زنده دارای حرکت تصادفی برآونی فرض می‌شوند که سرعت آن در زمان و مکان تغییر نمی‌کند. این فرضیه منجر به انتشار مدل (۱) می‌شود (۷-۹).

$$\frac{\partial u(x,y,t)}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

که در آن $u(x,y,t)$ چگالی موجودات در فضای مکانی به مختصات (x,y) ، زمان t است و D ضریب انتشار است که میزان پراکندگی را با واحد مسافت بر زمان اندازه‌گیری می‌کند.

¹ Partial differential equations

آلاینده در محیط کاسته خواهد شد، لذا علامت آن منفی در نظر گرفته می شود.

روش تحلیلی حل معادلات دیفرانسیل جزئی

محققان در پژوهش های انجام یافته جهت حل معادلات دیفرانسیل حاصل شده از انتشار- انتقال آلاینده ای از روش های مختلف تحلیلی و عددی استفاده کرده اند که روش های عددی در یک بازه معین توام با خطا محدود می باشند (۱۲-۱۵). از طرفی روش های تحلیلی و نیمه تحلیلی از نظر پیچیدگی نوع روش و زمان مناسب نیستند (۱۶-۲۱)، ولی با استفاده از روش بکار برده شده در این تحقیق، معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر انتشار- انتقال آلاینده ای ها از طریق تغییر متغیر تبدیل خطی به معادله دیفرانسیل معمولی تبدیل می شوند که با روش های ضرائب نامعین و تغییر پارامتر به سهولت قابل حل هستند.

معادلات دیفرانسیل جزئی در رابطه (۳)

$$P(u, u_x, u_y, u_t, u_{xx}, u_{yy}, u_{tt}, u_{xt}, \dots) = 0 \quad (3)$$

با تغییر متغیر $\eta = k(x + ay - ct)$ به معادله دیفرانسیل معمولی رابطه (۴) تبدیل می شوند:

$$P(u, ku', ka'u, -kc'u, k^2u'', k^2a^2u'', k^2c^2u'', -k^2cu'', \dots) = 0 \quad (4)$$

که k, a و c ثابت های اختیاری هستند که شکل مرسوم معادله فوق به فرم زیر می باشد:

$$P_0(u, u^{(1)}, u^{(2)}, u^{(3)}, \dots) = 0 \quad (5)$$

P_0 چند جمله ای بر حسب $u(\eta)$ و مشتقات مراتب مختلف آن هست و $u^{(m)}$ مشتق تابع $u(\eta)$ از مرتبه صحیح m است.

معادله دیفرانسیل انتقال (معادله جابجایی - پراکندگی - واکنش) $(ADRE^2)$ در رودخانه ها

اولین فرایند انتقال آلودگی در رودخانه از محلی به محل دیگر از طریق جریان آب، فرایند جابجایی می باشد (۱۰). فرایند دیگر در انتقال آلاینده ای فرایند پراکندگی است که توسط فیک^۳ ارائه شده است. معادله حاکم بر انتقال آلودگی در محیط های آبی اعم از رودخانه ها و جریانات زیرسطحی، در حالات یک، دو و سه بعدی، معادله انتقال (معادله جابجایی - پراکندگی - واکنش) $(ADRE)$ است که این معادله یکی از مهم ترین معادلات دیفرانسیل جزئی ناهمگن سهموی بوده و از ترکیب معادله پیوستگی و قانون اول فیک به دست آمده و دارای کاربردهای وسیعی در علوم آب، جو و انتقال حرارت است. فرم کلی این معادله در حالت انتقال یک بعدی آلاینده که در معرض سه پدیده جابجایی، پراکندگی و واکنش قرار دارد به صورت رابطه (۲) است

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = -V \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) - ku(x,t) \pm \varphi(x,t) \quad (2)$$

که t زمان، x فاصله کف رودخانه از محل ورود آلاینده، V سرعت میانگین در مقطع رودخانه در جهت طولی، D ضریب پراکندگی طولی، k ثابت نرخ واکنش، $u(x,t)$ غلظت آلاینده ای که بصورت تابعی از زمان و مکان تعریف می شود $\varphi(x,t)$ ، چاهک است و تحت شرایطی که $\varphi(x,t)$ چشمه یا منبع آلاینده خارجی باشد، به غلظت ماده آلاینده در محیط افزوده خواهد شد، لذا علامت آن مثبت در نظر گرفته می شود. در صورتی که $\varphi(x,t)$ چاهک باشد، از غلظت ماده

³ Fick

² Advection-Dispersion-Reaction equation

روندها و چالش‌های آینده

کاربرد معادلات دیفرانسیل در علوم زیست محیطی با چالش‌هایی روبرو بوده و روند توسعه آشکاری را نشان می‌دهد. با تعمیق یکپارچگی چند رشته‌ای، مانند ترکیب علم محاسبات، علوم داده و علوم اجتماعی، مدل‌های معادلات دیفرانسیل پیچیده‌تر و کاربردی‌تر می‌شوند و می‌توانند پویایی سیستم‌های محیطی را به طور جامع‌تری منعکس کنند.

علاوه بر این، با پیشرفت در قدرت محاسباتی و الگوریتم‌ها، حل معادلات دیفرانسیل پیچیده مانند معادلات دیفرانسیل جزئی با مرتبه بالا ترا در حال امکان پذیر شدن است و شبیه‌سازی‌های دقیق‌تری از فرآیندهای محیطی ارائه می‌دهند. در عین حال، همگرایی روش‌ها، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی سبب بهبود کارایی پیش‌بینی مدل‌ها و توانایی آن‌ها در مدیریت داده‌های با مقیاس بزرگ می‌شود.

با این حال، پیچیدگی و ماهیت غیرخطی سیستم‌های محیطی، مدل‌سازی را به‌ویژه از نظر عدم قطعیت پارامتر و کیفیت داده‌ها چالش برانگیز می‌کند. به عنوان مثال، مدل‌های تغییر آب و هوا باید تعاملات سیستم‌های متعدد را در نظر بگیرند. این راه‌حل‌های پیشنهادی شامل توسعه روش‌های عددی کارآمدتر و ابزارهای محاسبه، استفاده از فناوری ترکیب داده‌ها برای بهبود تخمین پارامترهای مدل، و استفاده از روش‌های آماری برای تجزیه و تحلیل حساسیت مدل و تعیین کمیت عدم قطعیت است.

در نتیجه، کاربرد معادلات دیفرانسیل در علوم محیطی امیدوارکننده است و به توصیف و پیش‌بینی کمک می‌کند. فرآیندهای زیست محیطی دقیق‌تر در مواجهه با چالش‌های کنونی، همکاری میان رشته‌ای،

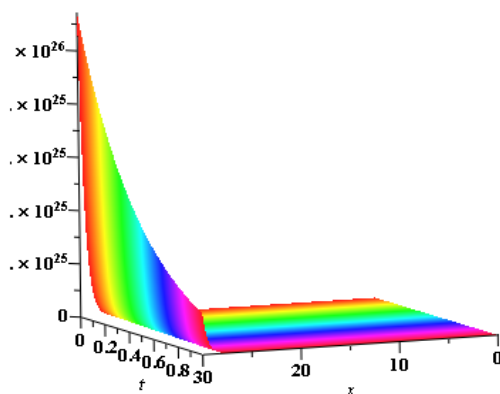
به عنوان مثال روش فوق را برای معادله (۱) انجام می‌دهیم:

با تغییر متغیر $\eta = k(x + ay - ct)$ معادله (۱) به معادله دیفرانسیل $-cku = Dk^2u'' + Da^2k^2u''$ که به فرم کلی معادله دیفرانسیل معمولی خطی مرتبه دوم همگن $(Dk^2 + Da^2k^2)u'' - cku = 0$ بر حسب متغیر η می‌باشد و به سادگی جواب عمومی آن با تشکیل معادله مشخصه جبری $(Dk^2 + Da^2k^2)r^2 - (ck)r = 0$ بر حسب r بدست می‌آیند که جواب‌های آن $r = 0$ و $r = \frac{c}{Dk + Da^2k}$ می‌باشند لذا جواب عمومی معادله (۱) بصورت رابطه (۶) می‌باشد:

$$u = c_1 + c_2 e^{\frac{c}{Dk + Da^2k} \eta} \quad (6)$$

که در آن $\eta = k(x + ay - ct)$ و c_1 و c_2 ثابت‌های اختیاری هستند و در نتیجه تابع چگالی و یا تابع غلظت آلاینده $u(x, y, t)$ بر حسب متغیرهای اصلی x, y, t مشخص می‌شود.

گرافیک تابع $u(x, y, t)$ بازای مقادیر $D = \frac{1}{2}, k = 2, c = c_1 = c_2 = 1, a = 0$ برای پارامترهای آن به شکل زیر می‌باشد.



شکل (۱): نمودار تابع غلظت، $u(x, t) = 1 + e^{2(x-t)}$

منابع

- [1] Tsoko. C. P., Xu, Y., 2009, Modeling carbon dioxide emissions with a system of differential equations. *Nonlinear Analysis-Theory Methods & Applications*, 71(12). E1182-E1197.
- [2] Lu, Z., L. Zhenwei., Wang, H. L., 2016, The application of regression analysis and differential equation models in the prediction of indoor PM2.5 concentration. *Journal of Residuals Science & Technology*, 13(1), 325-328.
- [3] Tiwari, J. L., Hobbie, J. E., 1976, Random differential equations as models of ecosystems Initial condition and parameter specifications in terms of maximum entropy distributions. *Mathematical Biosciences*, 31(1-2), 37-53.
- [4] Liu, Y. L., Chen, C., Alotaibi, R., Shorman, S. M., 2022, Study on audio-visual family restoration of children with mental disorders based on the mathematical model of fuzzy comprehensive evaluation of differential equation. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 7(2), 307-314.
- [5] Kafle, R. C., Pokhrel, K. P., Khanal, N Tsokos. C. P., 2019, Differential equation model of carbon dioxide emission using functional linear regression. *Journal of Applied Statistics*, 46(7), 1246-1259.
- [6] Cai, W. G., & Pan, J. F., 2017, Stochastic differential equation models for the price European CO2 emissions allowances. *Sustainability*, 9(2), 207.
- [7] Murray, J. D., 1989, *Mathematical biology*. Biomathematics. Volume 19. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [8] Edelstein-Keshet, L., 1986, *Mathematical models in biology*. Random House, New York, New York, USA.
- [9] Okubo, A., 1980, *Diffusion and ecological problems: mathematical models*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [10] Gulliver, J.S, 2007, *Introduction to chemical transport in the environment*. Cambridge University Press.
- [11] Chapra. S.C., 1997, *Surface water-quality modeling*, Vol. 1, McGraw- Hill New York.
- [12] Massabo. M., Cianci, R., Paladino, O., 2011, An analytical solution of the advection dispersion equation in a bounded domain and its application to laboratory experiments,

نواوری فن آوری و توسعه روش شناختی کلیدی است و انتظار می رود که به طور موثر بر این مشکلات غلبه کند.

نتیجه گیری

معادلات دیفرانسیل نقش کلیدی در علوم محیطی ایفا می کنند و ابزار قدرتمندی برای درک و پیش بینی سیستم های محیطی ارائه می دهند. از طریق مدل سازی ریاضی، معادلات دیفرانسیل به دانشمندان کمک می کند تا مشکلات پیچیده محیطی را به طور دقیق توصیف و تجزیه و تحلیل کنند و مبنای علمی برای تصمیم گیری های مدیریت زیست محیطی فراهم کنند. معادلات دیفرانسیل روابط دینامیکی و غیرخطی را در سیستم های محیطی مانند پراکندگی آلاینده ها، جمعیت نشان می دهد.

دینامیک و تغییرات آب و هوایی آنها نه تنها متغیرهای محیطی را پیش بینی می کنند، بلکه از سیاست گذاری نیز حمایت می کنند. تحقیقات آینده به ادغام آمار، یادگیری ماشین و سایر فناوری ها برای بهبود دقت مدل نیاز دارد. در کلیه رشته ها برای ساخت مدل های زیست محیطی جامع تر، چالش هایی از جمله مدل سازی سیستم پیچیده، عدم قطعیت پارامتری و کیفیت داده ها را می توان از طریق روش های محاسباتی پیشرفته، ادغام داده ها و تحلیل حساسیت مدل، برطرف کرد.

معادلات دیفرانسیل در حل مشکلات زیست محیطی بسیار مهم هستند و مدل های بهبود یافته به درک سیستم زمین و حمایت از محیط زیست و توسعه، پایدار می باشند. با روش های تحلیلی کارآمدتر، جواب عمومی معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسائل زیست محیطی را می توان بدست آورد.

- Journal of Applied Mathematics, 2011, 1,p.493014..
- [13] Mikhailov, M. D., & Ozisik, M. N., 1984, Unified analysis and solutions of heat and mass diffusion.
- [14] Pérez Guerrero, J., et al., 2009, Analytical solution of the advection–diffusion transport equation using a change-of-variable and integral transform technique, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52(13), 3297-3304.
- [15] Van Genuchten, M. T., 1982, Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation (No. 1661). US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- [16] Barati Moghaddam, M., Mazaheri, M., Mohammad Vali Samani, J., 2015, Numerical Solution of Advection-Dispersion Equation with Temporal Conservation Zones in Case of Unsteady Flow in Irregular Sections. Journal of Science And Irrigation Engineering, 40, 1, 99-117.
- [17] Parsaie, A., Haghiaibi, A. H., 2015, Calculation of Longitudinal Dispersion Coefficient and Modeling of Pollution transport in Rivers (Case Study: Severn and Narew Rivers), Water and Soil, in persian, 29, 5, 1070-1085.
- [18] Wu, L., Zhang, X., & Manafian, J., 2021, On the Exact Solitary Wave Solutions to the New (2+ 1) and (3+ 1)-Dimensional Extensions of the Benjamin-Ono Equations. Advances in Mathematical Physics, 2021(1), 6672819.
- [19] Manafian, J., 2018, Optical solitons in a power-law media with fourth order dispersion by three integration methods, Cogent math. stat., 5 (1), 1434924.
- [20] Manafian, J., Lakestani, M., 2016, Abundant soliton solutions for the Kundu-Eckhaus equation via (ϕ^2) -expansion method. Optik, 127:5543–51.
- [21] Dehghan, M., & Manafian, J., 2009, The solution of the variable coefficients fourth-order parabolic partial differential equations by the homotopy perturbation method. Zeitschrift für Naturforschung A, 64(7-8), 420-430.

“Research article”

Application of differential equations in solving a model of environmental phenomena

majid Bagheri ^{1*}

¹ Applied Mathematics Department, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran.

*Corresponding Author: majid.bagheri5391@gmail.com

(Received: 4 January 2025, Accepted: 19 January 2025)

Abstract

Differential equations play a key role in the environmental sciences and provide mathematical tools for understanding environmental processes and predicting changes. The purpose of the research is to provide mathematical modeling methods to solve environmental problems and to use standard mathematical techniques and methods to solve the model by obtaining the desired results, and the analysis is done based on mathematical laws and ecological system. In this research, the application of differential equations for environmental modeling, especially in pollutant dispersion, ecosystem dynamics, and climate change prediction, is discussed. In this research, mathematical foundations, modeling method through differential equation is examined and its role in explaining the complexity of the environmental system is revealed. This paper also points to the potential for future development of differential equations in interdisciplinary topics and more advanced computing, which provides a research context and improvement path for the field of environmental sciences.

Conflict of interest: None declared.

Keyword: environmental science, mathematical modeling, differential equation