تشخیص ردپای باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌زیست از طریق فناوری نانوبیوسنسور

فیروزه علویان[۱*]، زینب شوهانی[۱]، عالیه عربی[۲]

۱-دانشیار گروه آموزش زیست شناسی، دانشگاه فرهنگیان، صندوق پستی ۸۸۹-۱۴۶۶۵، تهران، ایران

۲-گروه آموزش زیست شناسی، دانشگاه فرهنگیان، اصفهان، ایران

چکیده

استفاده گسترده از آنتی‌بیوتیک‌ها منجر به تجمع بقایای آن‌ها در محیط‌زیست شده است که به دلیل پتانسیل آن‌ها در ارتقاء مقاومت آنتی‌بیوتیکی تهدیدی قابل‌توجه برای سلامت اکولوژیکی و انسان است. تشخیص این بقایا به دلیل غلظت کم و پیچیدگی نمونه‌های محیطی بحث‌برانگیز است. روش‌های سنتی نیز برای تشخیص این باقی‌مانده‌ها اغلب دست‌وپا گیر، وقت‌گیر و فاقد حساسیت هستند. نانوبیوسنسورهایی الکتروشیمیایی، فیزیکوشیمیایی، گاز، مولکولی و متابولیکی راه‌حل امیدوارکننده‌ای را ارائه می‌دهند که حساسیت، انتخابی بودن و قابلیت‌های تشخیص سریع مقادیر کم باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط را ارائه می‌دهند. مقالات مورد بررسی در پژوهش مروری حاضر مربوط به دوره زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ است. این مطالعه کاربرد نوآورانه فناوری نانوبیوسنسورها را به‌عنوان راه‌حلی در تشخیص باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط بررسی می‌کند و علاوه بر این، مقاله به دنبال مشخص کردن پتانسیل ادغام هوش مصنوعی (AI) با فناوری نانوبیوسنسور برای افزایش قابلیت‌های تشخیص باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌زیست و غلبه بر برخی محدودیت‌ها در این مسیر است.

کلمات کلیدی: *آنتی‌بیوتیک، نانوبیوسنسور، انتخابی، حساسیت، محیط‌زیست، هوش مصنوعی*

نویسنده مسئول f.alavian@cfu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۲۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۴/۲ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۵/۲۶

۱ـ مقدمه

ظهور آنتی‌بیوتیک‌ها با ارائه درمان مؤثر علیه عفونت‌های باکتریایی، پزشکی را متحول کرد. بااین‌حال، استفاده گسترده از این داروهای قوی منجر به عواقب ناخواسته، به‌ویژه آلودگی‌های مختلف زیست‌محیطی شده است. بقایای آنتی‌بیوتیک‌ها که از رواناب کشاورزی، دفع نامناسب و فضولات انسانی و حیوانی به وجود می‌آیند، تهدیدی قابل‌توجه برای محیط‌زیست و سلامت عمومی هستند. همچنین، وجود آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌زیست منجر به گسترش باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک می‌شود که نگرانی عمومی بهداشتی قابل‌توجهی است [۱, ۲]. آلودگی ناشی از آنتی‌بیوتیک‌ها بر کیفیت آب تأثیر می‌گذارد، به اکوسیستم‌های آبزی آسیب می‌زند و درنهایت به دلیل احتمال گسترش عوامل بیماری‌زای مقاوم، سلامت انسان را در معرض خطر قرار می‌دهد. این نوع آلودگی‌ها اغلب با فرآیندهای طبیعی مانند تجزیه توسط میکروارگانیسم‌ها قابل‌کنترل است، اما در صورت تجمع بیش‌ازحد، مشکل‌ساز است. به همین دلیل، مدیریت پسماندهای ارگانیک مانند آنتی‌بیوتیک‌ها و جلوگیری از ورود آن‌ها به محیط‌زیست از اهمیت بالایی برخوردار است [۲-۵].

روش‌های سنتی برای تشخیص باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها، مانند کروماتوگرافی و طیف‌سنجی جرمی، اغلب به دلیل نیاز به آماده‌سازی نمونه، هزینه‌های عملیاتی بالا و زمان‌های طولانی آنالیز، محدود می‌شوند. درنتیجه، نیاز روزافزونی به رویکردهای نوآورانه‌ای وجود دارد که بتوانند تشخیص سریع، حساس و مقرون‌به‌صرفه برای باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط را ارائه دهند [۶-۸].

در تلاش برای مقابله با مسئله گسترده آلودگی ناشی از آنتی‌بیوتیک‌ها، جامعه علمی توجه خود را به حوزه نانوتکنولوژی معطوف کرده است. نانوتکنولوژی به عنوان موضوعی امیدوارکننده در پرداختن به چالش‌های مختلف محیطی ظاهر شده است. خواص منحصر به فرد نانومواد، مانند نسبت سطح به حجم بالا و واکنش پذیری بالا، آنها را برای کاربرد در نظارت، اصلاح و حفاظت محیطی مناسب می کند.

یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی، آلودگی گسترده اکوسیستم‌ها توسط بقایای آنتی‌بیوتیک‌ها است که منجر به توسعه باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک و خطراتی برای سلامت انسان و سایر موجودات زنده می‌شود. روش‌های تحلیلی مرسوم برای تشخیص باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک اغلب فاقد حساسیت، انتخاب‌پذیری و سرعت مورد نیاز برای پایش سریع در ماتریس‌های محیطی پیچیده هستند. تحقیقات اخیر نیز بر پتانسیل نانوتکنولوژی به‌عنوان ابزاری کلیدی در رویارویی با این نوع آلودگی تأکیددارند. مطالعات قبلی اثربخشی انواع مختلف نانو مواد؛ ازجمله نانو ذرات، نانو کامپوزیت‌ها و نانو الیاف، در شناسایی، جذب و تجزیه ترکیبات آنتی‌بیوتیکی را نشان داده‌اند که این امر به کاهش تأثیر آن‌ها بر محیط‌زیست کمک می‌کند [۷, ۹, ۱۰].

نانوتکنولوژی راه‌حل‌های خلاقانه‌ای را برای حل مشکل باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها از طریق توسعه نانوبیوسنسورها ارائه می‌کند. نانوبیوسنسورها دستگاه‌هایی هستند که نانومواد را با عناصر تشخیصی بیولوژیکی برای شناسایی دقیق، سریع، انتخابی و حساس آنالیت‌های هدف (مانند آنتی‌بیوتیک‌ها) ادغام می‌کنند. نانوبیوسنسورها که از خواص منحصربه‌فردی همچون نسبت سطح به حجم بالا، رسانایی الکترونیکی عالی، خواص مغناطیسی، الکتروشیمیایی، فیزیکوشیمیایی، نوری و متابولیسمی برجسته برخوردارند، توانسته‌اند با موفقیت برای تشخیص انواع آنتی‌بیوتیک‌ها به کار روند. آن‌ها می‌توانند باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها را در زمان واقعی و در محل، با حساسیت، اختصاصی بودن و دقت بالا شناسایی کنند. علاوه براین، ادغام هوش مصنوعی (AI) با فناوری نانوبیوسنسور، پیشرفت بعدی در نظارت بر محیط‌زیست در شناسایی باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌زیست است. الگوریتم‌های AI، داده‌های حسگر پیچیده زیست‌محیطی را پردازش می‌کنند، الگوها را شناسایی کرده و با دقت بالا، وقایع بعدی را پیش‌بینی می‌کنند. به‌ویژه می‌توان مدل‌های یادگیری ماشینی را برای تشخیص علائم باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌های مختلف؛ حتی در حضور ماتریس‌های محیطی پیچیده، آموزش داد. این قابلیت به‌طور قابل‌توجهی عملکرد نانوبیوسنسورها در تشخیص آنتی‌بیوتیک‌ها را افزایش می‌دهد و منجر به تشخیص سریع‌تر و مطمئن‌تر می‌شود [۷, ۱۱-۱۶].

این مقاله ضمن معرفی روش‌ها و نانوبیوسنسورهایی که در پاکسازی آنتی‌بیوتیک‌ها از محیط نقش دارند،

به بررسی مکانیسم‌هایی که نانوبیوسنسورها از طریق آن‌ها این آلاینده‌ها را شناسایی می‌کنند، می‌پردازد، مزایا و معایب احتمالی آن‌ها را بررسی می‌کند و درنهایت، جهت‌دهی آینده ادغام نانوبیوسنسورها و AI در شکل‌دهی چشم‌انداز فناوری‌های تشخیص محیطی را مورد تأکید قرار خواهد داد.

۲- روش مطالعه

در مطالعه مروری حاضر، برای یافتن مقالات، جستجوی گسترده‌ای به کمک کلمات کلیدی آنتی‌بیوتیک، نانوبیوسنسور، محیطزیست و AI در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر ISI، PubMed، Science Direct، Scopus و Google scholar انجام شد. بیشتر مقالات انتخابی مربوط به سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ بودند تا اطلاعات به‌روز فراهم شود. از یافته‌های مقالات مختلف برای شناسایی روندها، چالش‌ها و پیشرفت‌ها در تشخیص آنتی‌بیوتیک‌های موجود در محیطزیست با استفاده از حسگرهای زیستی استفاده شد.

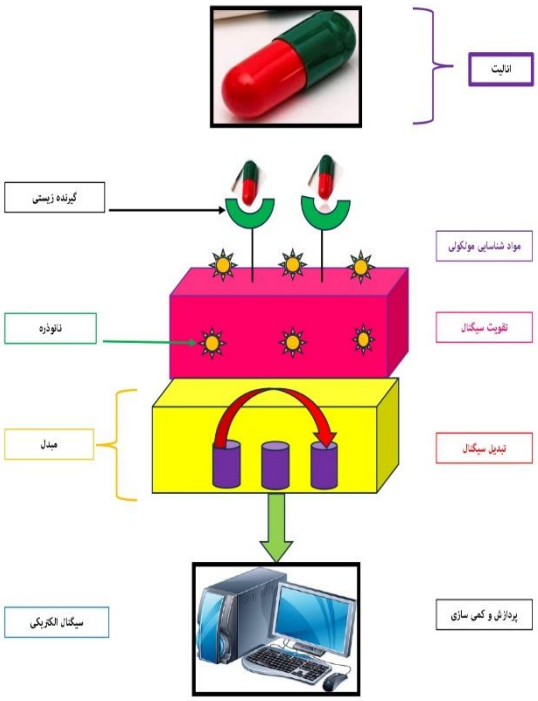
۳- نتایج

۳-۱- روش‌های شناسایی آلاینده‌های آنتی‌بیوتیکی توسط نانوبیوسنسورها

پیشرفت‌های نانوتکنولوژی، رویکرد متحول کننده شناسایی آلاینده‌های آنتی‌بیوتیکی را به ارمغان آورده است.

نانوبیوسنسورها معمولاً با استفاده از آنتی‌بادی‌ها، آپتامرها، یا زیست حسگرهای دیگر که به‌طور خاص به آنتی‌بیوتیک‌ها متصل می‌شوند، طراحی می‌شوند (شکل ۱). آن‌ها برای تشخیص سریع و حساس آنتی‌بیوتیک‌های موجود در نمونه‌های مختلف مانند آب، خاک، یا مواد غذایی استفاده می‌شوند [۱۷, ۱۸].

عملکرد نانوبیوسنسورها به این شکل است که وقتی با آنتی‌بیوتیک تعامل می‌یابند، سیگنالی الکتریکی، اپتیکی، گرمایی و ... تولید می‌کنند. این سیگنال توسط یک مبدل به‌صورت قابل‌اندازه‌گیری تبدیل می‌شود. سپس، توسط یک دستگاه الکترونیکی، قابل‌خواندن تبدیل می‌شود [۱۲, ۱۹]. مثلاً، اگر نانوبیوسنسور برای شناسایی آنتی‌بیوتیک



شکل ۱. ساختار کلی یک نانوبیوسنسور. حسگر ابزاری جهت شناسایی آنالیت (اینجا آنتی بیوتیک) است و شامل بخش تشخیصی بنام گیرنده، مبدل و در نهایت یک سیستم نمایانگر (قرائت کننده) هست. اگر جنس گیرنده از یک عنصر زیستی مثل آنزیم یا پروتئین باشد به آن حسگر زیستی (بیوسنسور) گفته میشود.

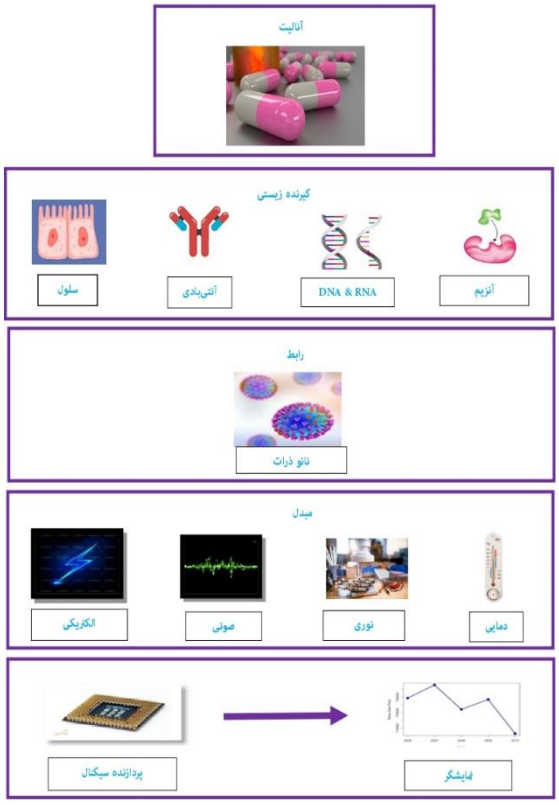
نانوبیوسنسورهای الکتروشیمیایی، از نانو ذرات برای افزایش حساسیت و دقت در تشخیص

تتراسایکلین طراحی‌شده باشد، بایستی شامل آنتی‌بادی‌هایی باشد که به تتراسایکلین متصل می‌شوند. بااتصال تتراسایکلین به این آنتی‌بادی‌ها، تغییری در خواص الکتروشیمیایی سطح نانوبیوسنسور ایجاد می‌شود که قابل‌اندازه‌گیری هستند و اطلاعاتی درباره غلظت آنتی‌بیوتیک در نمونه به ما می‌دهد (شکل ۲)[۲۰, ۲۱].

این بخش به بررسی روش‌های مختلف شناسایی آنتی‌بیوتیک‌های موجود در محیط توسط نانو مواد می‌پردازد و هماهنگی بین مواد پیشرفته و فن‌های تشخیصی جدید را برای ارائه دیدگاه جامع از وضعیت فعلی فناوری شناسایی آنتی‌بیوتیک‌ها ارائه میکند.

۳-۱-۱- نانو حسگرهای الکتروشیمیایی

مولکول‌های زیستی استفاده می‌کنند. این نانو حسگرها به دلیل حساسیت بالا قادر به تشخیص



شکل ۲. مراحل شناسایی انتی‌بیوتیک‌ها توسط نانوبیوسنسور. آنالیت: ماده ای که قرار است شناسایی شود و در ازمایش‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در اینجا آنالیت، آنتی بیوتیک است.

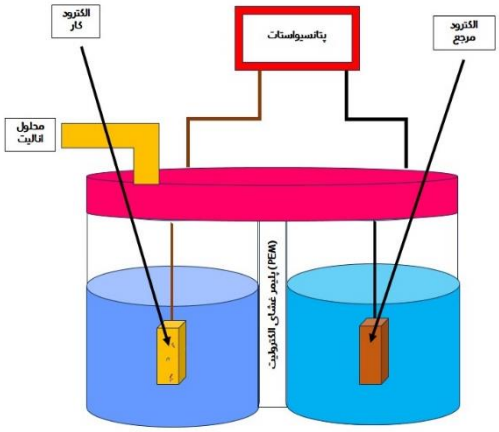
غلظت‌های بسیار پایینی از آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط هستند. آن‌ها به دلیل انتخاب پذیری بالا، به‌طور ویژه به آنتی‌بیوتیک‌های موردنظر پاسخ می‌دهند. اندازه کوچک نانوبیوسنسورهای الکتروشیمیایی امکان استفاده از آن‌ها در فضاهای محدود را فراهم می‌کند. همچنین، می‌توانند در زمان کوتاهی نتایج را ارائه دهند. این موضوع برای تشخیص سریع بسیار مهم است [۲۲, ۲۳].

باوجود مزایای نامبرده فوق، ممکن است برخی از نانو حسگرها در محیط‌های خاص پایداری کمتری داشته باشند و نیاز به شرایط نگهداری خاص داشته باشند. تولید نانو حسگرها معمولاً هزینه‌بر است. همچنین، استفاده مکرر از آنتی‌بیوتیک‌ها منجر به افزایش مقاومت میکروبی می‌شود که این امر، اثر نانو حسگرها در شناسایی آنتی‌بیوتیک‌ها را کاهش می‌دهد [۲۲, ۲۴].

این مزایا و محدودیت‌ها باید در طراحی و استفاده از نانو حسگرهای در شناسایی آنتی‌بیوتیک‌های محیط در نظر گرفته شوند تا اطمینان حاصل شود که نتایج دقیق و قابل‌اعتماد هستند.
ازجمله نانوبیوسنسورهایی الکتروشیمیایی که برای شناسایی باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها در محیطزیست مورداستفاده قرار می‌گیرند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

نانوبیوسنسورهای پتانسیومتری: نانو حسگرهای پتانسیومتری، دستگاه‌های تحلیلی هستند که اختلاف‌پتانسیل بین الکترود کار و الکترود مرجع، در پاسخ به آنتی‌بیوتیک خاص را اندازه‌گیری می‌کنند (شکل ۳). آن‌ها بسیار حساس هستند و می‌توانند حتی مقادیر کم آنتی‌بیوتیک را در محیط‌های مختلف ازجمله آب، خاک و محصولات غذایی تشخیص دهند [۲۵, ۲۶]. به‌عنوان‌مثال، نانو حسگر پتانسیومتری برای تشخیص آنتی‌بیوتیک‌های سفالوسپورین دارای یک غشای انتخابی حاوی گیرنده‌های مخصوص مولکول‌های سفالوسپورین است. اگر سفالوسپورین در نمونه وجود داشته باشد، به این گیرنده‌ها متصل می‌شود و باعث تغییر در پتانسیل الکتریکی در سرتاسر غشاء می‌شود. این تغییر پتانسیل متناسب با غلظت آنتی‌بیوتیک است و در برابر یک الکترود مرجع پایدار اندازه‌گیری می‌شود. عملکرد حسگر را می‌توان با میزان حساسیت، انتخابی بودن، زمان پاسخگویی و محدودیت تشخیص آن تعیین کرد. یک نانو حسگر پتانسیومتری خوب، باید دارای زمان پاسخ سریع و محدودیت تشخیص پایین باشد تا امکان شناسایی سریع و دقیق آنتی‌بیوتیک‌های سفالوسپورین در مایعات بیولوژیکی پیچیده یا آماده‌سازی‌های دارویی را فراهم کند [۱۳, ۲۷].
از محدودیت‌های نانوسنسورهای پتانسیومتری، نیاز به غشای گیرنده پایدار و انتخابی، تداخل احتمالی با سایر مواد موجود در نمونه؛ و نیاز به کالیبراسیون و نگهداری حسگر برای عملکرد ثابت است.

نانوبیوسنسورهای رسانایی: نانوبیوسنسورهای رسانایی نوعی حسگر زیستی هستند که از نانو مواد برای تشخیص باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها در محیطزیست استفاده می‌کنند. این حسگرها، روشی



شکل ۳. اساس ساختاری یک نانوبیوسنسور پتانسیومتری. بیواستات: تأمین پتانسیل الکتریکی موردنیاز برای انجام واکنش‌های شیمیایی و ثابت نگه‌داشتن پتانسیل کار نسبت به محلول آنالیت: محیطی که در آن واکنش شیمیایی رخ می‌دهد و شامل ماده است که قرار است توسط حس‌گر اندازه‌گیری شود (آنتی‌بیوتیک)؛ الکترود کار: وظیفه اصلی در تشخیص و اندازه‌گیری آنالیت را دارد. الکترود مرجع: الکترود مرجع با پتانسیل ثابت و شناخته‌شده برای اندازه‌گیری پتانسیل الکترود کار است. پلیمر غشای الکترولیت: با خاصیت انتخاب‌پذیری برای تشخیص دقیق آنالیت.

حساس، انتخابی و مقرون‌به‌صرفه برای نظارت بر باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک ارائه می‌دهند که برای تضمین ایمنی غذا و حفاظت از سلامت محیط‌زیست حیاتی است. آن‌ها با اندازه‌گیری تغییرات رسانایی الکتریکی مولکول‌های هدف؛ مانند آنتی‌بیوتیک‌ها کار می‌کنند. برخی از این‌ها قادر به تشخیص همزمان چندین آنتی‌بیوتیک هستند. این مسئله از اهمیت بالایی برخوردار است؛ چراکه این مواد غذایی ناسالم معمولاً حاوی چندین نوع آنتی‌بیوتیک هستند که حضور آن‌ها به افزایش سطح سمی بودن منجر می‌شود.

نانوبیوسنسورهای رسانایی از عناصر مختلف تشخیص زیستی و مکانیسم‌های تشخیص برای شناسایی همزمان آنتی‌بیوتیک‌های مختلف استفاده می‌کنند [۱۳, ۲۸, ۲۹].

نانوبیوسنسورهای تغییریافته با آپتامر، نمونه‌ای از این بیوسنسورها هستند که شامل مولکول‌های کوتاه و تک‌رشته‌ای DNA یا RNA هستند و می‌توانند با اهداف خاص باقابلیت اتصال بالا متصل شوند. به‌عنوان‌مثال، نوعی حسگر تغییریافته با آپتامر برای تشخیص انروفلوکساسین (ENR) به کار می‌رود. این حسگر بر اساس اصل انتقال انرژی فلورسانس رزونانس (FRET) کار می‌کند و می‌تواند ENR را در محیط با حد تشخیصی بسیار پایین‌تر از حداکثر میزان باقی‌مانده مجاز تشخیص دهد [۱۳, ۲۶, ۳۰].

نانو حسگرهای آمپرومتریک: نانو حسگرهای آمپرومتریک نقش مهمی در شناسایی آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌زیست دارند. آن‌ها ایده‌های ارزشمندی در مورد آلودگی آنتی‌بیوتیکی ارائه می‌دهند که به مدیریت زیست‌محیطی و تلاش‌های بهداشت عمومی کمک می‌کند. این نانو حسگرها از تغییرات جریان الکتریکی (پاسخ آمپرومتریک) برای شناسایی حضور و غلظت آنتی‌بیوتیک‌ها در منابع آب، فاضلاب‌ها، خاک و سایر ماتریس‌های محیطی استفاده می‌کنند و به ارزیابی تأثیر آلودگی آنتی‌بیوتیکی بر اکوسیستم و سلامت انسان کمک می‌کنند. این نوع حسگرها تغییرات جریان الکتریکی ناشی از واکنش‌های اکسیداسیون یا احیا را اندازه‌گیری می‌کنند. آن‌ها برای تشخیص آنتی‌بیوتیک‌هایی که واکنش‌های اکسیداسیون یا کاهش را تحریک می‌کنند، به کار می‌رود [۶, ۱۴, ۳۱].

نظارت بر آلودگی آنتی‌بیوتیکی در نمونه‌های آب رودخانه را در نظر بگیرید. سطح نانوبیوسنسور آمپرومتریکی که به‌طور خاص برای تشخیص تتراسایکلین طراحی‌شده است، با آنتی‌بادی‌هایی که به‌طور انتخابی به مولکول‌های تتراسایکلین متصل می‌شوند، پوشیده می‌شوند. اگر تتراسایکلین در نمونه آب وجود داشته‌باشد، به لایه آنتی‌بادی متصل می‌شود. این رویداد اتصال، به دلیل واکنش ردوکس(واکنش اکسیداسیون -احیا)، جریان الکتریکی ایجاد می‌کند. نانوبیوسنسور، این جریان که با غلظت تتراسایکلین در ارتباط است را اندازه‌گیری می‌کند. درنهایت، با مقایسه پاسخ فعلی با یک منحنی کالیبراسیون، سطح آنتی‌بیوتیک به‌طور دقیق تعیین می‌شود.

نانو حسگرهای آمپرومتریک به دلایل زیر برای آزمایش سریع در محل (کلینیک‌ها، بیمارستان‌ها یا محیط‌های خانگی) استفاده می‌شوند [۶, ۱۴, ۲۳].

غلظت‌های پایین آنتی‌بیوتیک‌ها را به دلیل توانایی آن‌ها در پاسخ به تغییرات جزئی جریان تشخیص می‌دهند (حساسیت بالا). آن‌ها نتایج را بلافاصله ارائه می‌دهند که برای تصمیم‌گیری به‌موقع بسیار مهم است. تغییرات سطحی خاص به آن‌ها اجازه می‌دهد تا آنتی‌بیوتیک‌های هدف را به‌طور انتخابی

شناسایی کنند. همچنین، اندازه کوچک آن‌ها امکان ادغام با دستگاه‌های قابل‌حمل و سیستم‌های قابل‌استقرار در محل را فراهم می‌کند.
باوجود مزایای زیاد این نانوسنسورها، تنوع محیطی (pH، دما، مواد مزاحم و ...) بر عملکرد این نانو حسگر تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین کالیبراسیون مناسب در برابر غلظت‌های شناخته‌شده آنتی‌بیوتیک ضروری است. اطمینان از ثبات در دوره‌های طولانی برای نظارت قابل‌اعتماد بسیار مهم است. رسوب ناشی از مواد آلی یا بیوفیلم‌ها بر دقت حسگر تأثیر می‌گذارند. درنهایت، سازگاری با محیط‌زیست و سمّی بودن احتمالی آن‌ها باید ارزیابی شود.
نانو حسگرهای امپدانسی: نانو حسگرهای امپدانس ابزارهایی حساس و دقیقی هستند که برای نظارت بر وجود و غلظت آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌های مختلف استفاده می‌شود. این نانوبیوسنسورها از ترکیبی از نانو مواد و ولتاژ الکتریکی (امپدانس) برای تشخیص مولکول‌های هدف استفاده می‌کنند. نانو موادی که به‌عنوان لایه حسگر در نانوبیوسنسور استفاده می‌شوند، توانایی تشخیص مولکول‌های هدف رادارند. وقتی مولکول‌های آنتی‌بیوتیک به این لایه حسگر متصل می‌شوند، تغییراتی در ولتاژ ایجاد می‌شود که به‌عنوان نشانگر حضور آنتی‌بیوتیک در محیط‌زیست مورداستفاده قرار می‌گیرد. سپس، تغییرات امپدانس الکتریکی که توسط نانوبیوسنسورها ایجاد می‌شود، توسط دستگاه‌های خواندن خاص تفسیر می‌شود. این دستگاه‌ها به‌صورت کمی و کیفی باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک را تشخیص می‌دهند [۳۲, ۳۳].
نانو حسگرهای امپدانس را می‌توان برای آزمایش سریع در محل، به‌ویژه در مناطق با منابع محدود، استفاده کرد. حساسیت بالا در تشخیص غلظت‌های پایین آنتی‌بیوتیک‌ها، تشخیص به‌موقع و سریع؛ اندازه کوچک و طراحی کارآمد از ویژگی‌های مثبت نانوبیوسنسورهای امپدانسی است؛ اما تغییرپذیری تحت تأثیر عوامل محیطی، نیاز به اطمینان از انتخاب پذیری آنتی‌بیوتیک‌ها نسبت به سایر ترکیبات، نیاز به شرایط نگهداری و ذخیره‌سازی خاص، هزینه تولید گران و مقاومت میکروبی درنتیجه استفاده مکرر از آنتی‌بیوتیک‌ها بر دقت این حسگرها تأثیر منفی می‌گذارند [۳۴].
فرض کنید می‌خواهیم آلودگی آنتی‌بیوتیکی مانند آمپی‌سیلین در نمونه‌های آب رودخانه را ارزیابی کنیم. بدین منظور، نانوبیوسنسور امپدانس باید از یک سطح حسگر پوشش داده‌شده با آنتی‌بادی انتخابی آمپی‌سیلین تشکیل‌شده باشد. اگر آمپی‌سیلین در نمونه آب وجود داشته باشد، به لایه آنتی‌بادی متصل می‌شود و امپدانس الکتریکی در رابط حسگر تغییر می‌کند. نانوبیوسنسور تغییر امپدانس که با غلظت آمپی‌سیلین ارتباط دارد را اندازه‌گیری می‌کند. درنهایت، با مقایسه پاسخ امپدانس به منحنی کالیبراسیون، سطح دقیق آنتی‌بیوتیک تعیین می‌شود [۱۱].

نانوبیوسنسورهای نقاط کوانتومی کربن (CQDs) و نانولوله‌های کربنی (CNTs): CQDs و CNTs هم جزو حسگرهای امپدانسی یا آمپرومتریک محسوب می‌شوند. این نانو ذرات با اندازه‌ی در حد نانومتر، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند فلورسانس عالی، ویژگی‌های نوری و الکترونیکی برتر، سنتز آسان، زیست سازگاری مناسب و سمّیت پایین، به‌عنوان حسگر زیستی مناسب هستند [34-36].

۲-۱-۳- نانو بیوسنسورهای فیزیکوشیمیایی
نانوبیوسنسورهای فیزیکوشیمیایی، طبق اصول فیزیکی و شیمیایی عمل می‌کنند و به تشخیص و اندازه‌گیری تغییرات فیزیکی (تغییرات اپتیکی، حرارتی، جرمی یا مغناطیسی و ...) و شیمیایی (Ph، اکسیژن و ...) در محیط می‌پردازند [۳۷, ۳۸]. آن‌ها از ساختارهای نانو موادی تشکیل‌شده‌اند که به‌عنوان زندان‌های سه‌بعدی عمل می‌کنند و قابلیت ارائه درک جدید از بیوفیزیک آنتی‌بیوتیک‌ها و ساختارهای آن‌ها رادارند. این نوع نانوبیوسنسورها می‌توانند در تشخیص و کنترل میزان آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌های مختلف، مانند بیمارستان‌ها مورداستفاده قرار بگیرند . نانوبیوسنسورهای فیزیکوشیمیایی به‌واسطه ساختار سه‌بعدی، دارای سطوح جذب بالایی هستند؛ به آنتی‌بیوتیک‌ها متصل می‌شوند و آن‌ها را درون خود زندانی می‌کنند؛ به‌عبارت‌دیگر، باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها را به‌طور انتخابی جذب می‌کنند. جذب آنتی‌بیوتیک‌ها ممکن است به تغییراتی در پتانسیل الکترودها، جریان الکتریکی، خواص نوری، حرارتی، ویسکوزیته(گرانروی) و جریان مایع نانوبیوسنسور منجر شود. این تغییرات به‌عنوان نشانگری برای میزان باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها در نمونه‌ها استفاده می‌شوند.

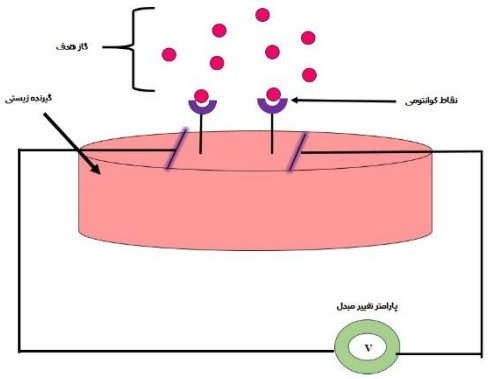
با تحلیل این تغییرات، اطلاعات دقیق‌تری در مورد میزان آنتی‌بیوتیک‌ها در نمونه‌های مختلف به دست می‌آید. فرض کنید یک نانوبیوسنسور فیزیکوشیمیایی با ساختار سه‌بعدی و سطح جذب مخصوص پنی‌سیلین برای تشخیص باقی‌مانده پنی‌سیلین طراحی‌شده است. وقتی نمونه‌ای حاوی پنی‌سیلین به نانوبیوسنسور اضافه می‌شود، پنی‌سیلین توسط آن جذب می‌شود. سپس تغییرات نانوبیوسنسور تحلیل می‌شوند تا میزان باقی‌مانده پنی‌سیلین در نمونه مشخص شود [۱۱, ۳۷, ۳۹].

حسگرهای نانوبیوپیزوالکتریک نمونه‌ای از نانوبیوسنسورهای مکانوشیمیایی هستند. آن‌ها دستگاه‌های نوآورانه‌ای هستند که قادر به تشخیص باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک در محیط‌های مختلف، ازجمله غذا و آب هستند. نانوبیوپیزوالکتریک روشی سریع، حساس و غیر مخرب برای تشخیص باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک ارائه می‌دهند و ابزارهای ارزشمندی برای تضمین ایمنی محیطی و سلامت عمومی هستند. این حسگرها بر اساس اصل پیزوالکتریسیته (الکتریسیته ناشی از فشار) عمل می‌کنند؛ جایی که مواد خاصی در پاسخ به تنش مکانیکی، بار الکتریکی تولید می‌کنند. زمانی که این مواد در مقیاس نانو ساخته می‌شوند، به‌شدت نسبت به حضور مولکول‌های خاصی مانند آنتی‌بیوتیک‌ها حساس می‌شوند. به‌عنوان‌مثال، حسگر ایمونوپیزوالکتریک برای تشخیص پنی‌سیلین G و آمپی‌سیلین در نمونه‌های واقعی مانند شیر و گوشت به کار می‌رود. این نانوحسگر، تغییر در فرکانس رزونانس را زمانی که آنتی‌بیوتیک هدف به آنتی‌بادی سطح حسگر متصل می‌شود، رصد می‌کند [۱۱, ۴۰, ۴۱].

حسگرهای نانوبیوپیزوالکتریک می‌توانند برای تشخیص همزمان چندین آنتی‌بیوتیک طراحی شوند. این موضوع برای نظارت بر ایمنی غذا بسیار مفید است، زیرا باقی‌مانده‌های چندین آنتی‌بیوتیک خطر بزرگ‌تری نسبت به یک نوع تکی ایجاد می‌کنند [۱۳].

۳-۱-۳- نانوبیوسنسورهای گاز

نانو حسگرهای گازی طراحی‌شده برای شناسایی باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک در محیط، فناوری پیشرفته‌ای هستند که نانو مواد را با فناوری حسگر ترکیب می‌کنند تا تشخیص حساس و ویژه این آلاینده‌ها را فراهم کنند (شکل ۴). این حسگرها



شکل ۴. اساس ساختاری یک نانوبیوسنسور گاز، در حس‌گر های گاز، پارامترتغییر مبدل، به تغییر مقاومت ماده داخلی حس‌گر گاز اشاره دارد. این تغییر مقاومت به دلیل غلظت گاز در محیط اتاق اتفاق می‌افتد و به‌عنوان ولتاژ خروجی اندازه گیری می‌شود. ولتاژ خروجی سپس به‌عنوان شاخص تشخیص نوع و غلظت گاز استفاده می‌شود.

معمولاً با استفاده از نانو موادی کار می‌کنند که نسبت سطح به حجم بالایی دارند تا امکان تعامل بیشتر با مولکول‌های هدف؛ مانند باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی را فراهم کنند [۴۲].

مکانیسم تشخیص، اغلب شامل تغییراتی در خواص الکتریکی، نوری یا دیگر خواص فیزیکی و شیمیایی نانو حسگر در تماس با مولکول‌های آنتی‌بیوتیک است. به‌عنوان‌مثال، برخی از حسگرها ممکن است از خواص نوری مانند فلورسانس یا تشدید پلاسمون سطحی استفاده کنند؛ جایی که وجود باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک، منجر به تغییر قابل‌اندازه‌گیری در جذب یا انتشار نور می‌شود [۴۳, ۴۴].

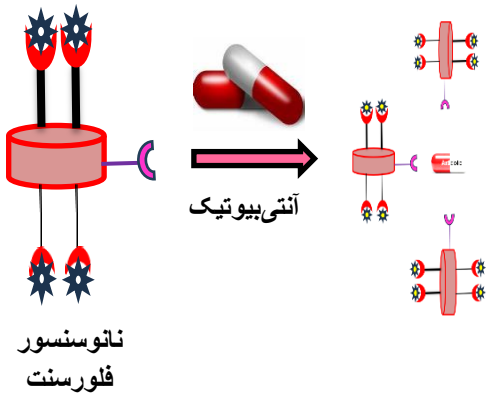
پیشرفت‌های اخیر همچنین استفاده از نقاط کوانتومی را در حسگرهای زیستی برای تشخیص آنتی‌بیوتیک‌ها بررسی کرده است. نقاط کوانتومی ذرات نیمه‌رسانای کوچکی هستند که در صورت تحریک، نور ساطع می‌کنند. می‌توان آن‌ها را طوری مهندسی کرد که به‌طور خاص به مولکول‌های آنتی‌بیوتیک متصل شوند. سپس، تغییر در میزان نوری که از آن‌ها ساطع می‌شود، قابل‌تشخیص و اندازه‌گیری است.

نانوبیوسنسورهای گازی، به‌ویژه برای نظارت بر کیفیت آب مفید هستند، زیرا آنتی‌بیوتیک‌ها به دلیل استفاده و دفع گسترده، آلاینده‌های نوظهور اکوسیستم‌های آبی هستند. نانوبیوسنسورهای گازی می‌توانند گازهای مختلفی را که نشان‌دهنده آلودگی هستند؛ ازجمله محصولات جانبی تجزیه آنتی‌بیوتیک‌ها را تشخیص دهند. توانایی تشخیص

این باقی‌مانده‌ها برای پایش محیطی و جلوگیری از گسترش مقاومت آنتی‌بیوتیکی بسیار مهم است. اگر آنتی‌بیوتیک‌ها به‌طور نادرست دفع شوند، تجزیه‌شده و گازهایی را آزاد می‌کنند. این گازها ممکن است برای اکوسیستم‌ها مضر باشند. نانوبیوسنسورهای گازی با شناسایی گازهای خاص مربوط به حضور این آلاینده‌ها کار می‌کنند. آن‌ها به‌گونه‌ای طراحی‌شده‌اند

که نسبت به سیگنال‌های شیمیایی ساطع‌شده از آنتی‌بیوتیک‌ها و محصولات تخریبی آن‌ها حساس هستند. با نظارت بر این گازها، نانوبیوسنسورها، به‌سرعت اطلاعاتی در مورد غلظت آنتی‌بیوتیک‌ها در بدنه‌های آبی ارائه می‌کنند و به ارزیابی میزان آلودگی و اثربخشی فرآیندهای تصفیه آب کمک می‌کنند [۴۴].

علاوه بر این، نانوبیوسنسورهای گاز، قادر به تشخیص غلظت کم آلاینده‌ها هستند که بسیار مهم است؛ زیرا حتی مقادیر کمی از آنتی‌بیوتیک‌ها می‌توانند اثرات زیست‌محیطی قابل‌توجهی داشته باشند. حساسیت بالا و پاسخ سریع، نانوبیوسنسورهای گازی را به ابزاری ضروری برای نظارت بر محیط‌زیست و حفاظت از اکوسیستم‌های آبی تبدیل می‌کند [۴۳-۴۵].



شکل ۵. نانوحسگر فلورسنت هنگام تعامل با آنتی‌بیوتیک روشن می‌شود. این حسگر از یک ماده نانو تشکیل‌شده است که به‌صورت فلورسانت عمل می‌کند. هنگامی‌که آنتی‌بیوتیک در معرض حسگر باشد، واکنش شیمیایی رخ می‌دهد که منجر به تغییر در خواص فلورسانت می‌شود. این تغییرات درنهایت به تغییر درشدت نور فلورسانت منجر می‌شود که به‌عنوان شاخص تشخیص حضور آنتی‌بیوتیک استفاده می‌شود.

نانو حسگرهای گاز درحال‌توسعه هستند و مراحل آزمایشگاهی و تحقیقاتی را طی می‌کنند. این فنّاوری باعث امیدواری برای توسعه حسگرهایی شده است که قادر به شناسایی و کمیت سنجی باقیمانده آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط‌زیست هستند.

۴-۱-۳- نانوبیوسنسورهای مولکولی

نانوبیوسنسورهای مولکولی دستگاه‌های حسگر پیشرفته‌ای هستند که از فناوری نانو و عناصر زیستی برای تشخیص مولکول‌ها استفاده می‌کنند. آن‌ها نقش کلیدی حساس و انتخابی در تشخیص باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی در محیط دارند. این سنسورهای کوچک به‌طور خاص نسبت به مولکول‌هایی همچون آنتی‌بیوتیک‌ها واکنش نشان می‌دهند و هنگام برخورد با آن‌ها، سیگنال قابل‌اندازه‌گیری ارائه می‌دهند. آن‌ها معمولاً از یک عنصر تشخیصی مانند آنتی‌بادی‌ها، آپتامرها یا آنزیم‌ها تشکیل‌شده‌اند که به‌طور خاص به مولکول هدف (در این مورد، آنتی‌بیوتیک‌ها) متصل می‌شوند. رویداد تشخیص شامل تغییر در ویژگی‌های سنسور (مانند فلورسانس، هدایت الکتریکی یا جرم) است که سپس توسط تبدیل‌کننده، به سیگنال قابل‌اندازه‌گیری تبدیل می‌شود [۱۴, ۴۶].

برخی نمونه‌های نانوبیوسنسورهای مولکولی عبارت‌اند از [۴۶, ۴۷]:

نانوبیوسنسورهای فلورسانت: این بیوسنسورها از مولکول‌های فلورسانت یا کوانتوم دات به‌عنوان عناصر حسگر استفاده می‌کنند. نانوسنسورها هنگام اتصال به آنتی‌بیوتیک‌ها نور (فلورسانس) انتشار می‌دهند (شکل ۵). با اندازه‌گیری تغییر شدت یا طول‌موج فلورسانس، حضور و غلظت باقیمانده‌های آنتی‌بیوتیک تعیین می‌شود. به‌عنوان‌مثال، یک نانو سنسور فلورسانت مبتنی بر اکسید گرافن می‌تواند آنتی‌بیوتیک‌های تتراسایکلین را با خاموش کردن فلورسانس آن تشخیص دهد.

نانو بیوسنسورهای الکتروشیمیایی: این سنسورها از تغییر در ویژگی‌های الکتریکی مانند جریان یا ولتاژ برای تشخیص آنتی‌بیوتیک‌ها استفاده می‌کنند. بااتصال آنزیم‌ها یا آنتی‌بادی‌هایی به سطح الکترود (که با آنتی‌بیوتیک‌ها واکنش می‌دهند) سیگنال الکتروشیمیایی قابل‌اندازه‌گیری ایجاد می‌شود. مثلاً، یک سنسور الکتروشیمیایی مبتنی بر نانو ذرات طلا می‌تواند پنی‌سیلین G و دیگر آنتی‌بیوتیک‌ها را با حساسیت بالا تشخیص دهد.

نانوبیوسنسورهای پلاسمون سطح (SPR): نانو سنسور SPR به‌عنوان روشی حساس و انتخابی برای تشخیص و پایش باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها در محیطزیست مورداستفاده قرار گیرد. این بیوسنسورها از تعامل نور و سطح فلزی برای تشخیص تغییرات مربوط به شاخص شکست ناشی از اتصال مولکول‌های هدف استفاده می‌کنند. به‌طوری‌که الکترون‌ها تحت تحریک نور به سمت ورق فلزی هدایت می‌شوند و سپس موازی با ورق حرکت می‌کنند. با فرض منبع نوری با طول‌موج ثابت و نازک بودن ورق فلزی، زاویه تابشی که SPR را فعال می‌کند، با شاخص شکست آنتی‌بیوتیک موردنظر مرتبط است.

مثالی از SPR که باقیمانده آنتی‌بیوتیک‌های موجود در محیطزیست را شناسایی می‌کنند، بیوسنسور SPR خاص تشخیص باقیمانده آنتی‌بیوتیک در آب است. در این حال، سطح حساس بیوسنسور SPR با آنتی‌بادی‌هایی که به‌طور انتخابی به آنتی‌بیوتیک متصل می‌شوند، پوشانده می‌شود. درصورتی‌که آنتی‌بیوتیک در آب وجود داشته باشد، با آنتی‌بادی‌های سطح حساس تعامل می‌کنند و تغییر در شاخص شکست نور رخ می‌دهد. سپس با استفاده از دستگاه SPR، تغییرات شاخص شکست نور که نشان‌دهنده تغییرات جریان پلاسمون است، اندازه‌گیری می‌شود. با تحلیل این تغییرات، می‌توان به شناسایی و کمیت سنجی باقیمانده آنتی‌بیوتیک در نمونه آب پرداخت.

۵-۱-۳- نانوبیوسنسورهای متابولیکی

نانوبیوسنسورهای متابولیک دستگاه‌هایی بسیار حساس و انتخابی هستند که مقادیر ناچیزی از مواد، مانند باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی را در محیط‌های مختلف تشخیص می‌دهند. در سطح آن‌ها معمولاً یک عنصر شناسایی بیولوژیکی، مانند آنزیم یا آپتامر که به‌طور خاص به مولکول هدف متصل می‌شود، وجود دارد. این رویداد اتصال، ترانس دیوسری را فعال می‌کند تا تعامل را به سیگنال قابل‌اندازه‌گیری (اغلب الکتریکی یا نوری) تبدیل کند. به‌عنوان‌مثال، آپتاسنسور مبتنی بر انتقال انرژی فلورسانس برای تشخیص آنتی‌بیوتیک انروفلوکساسین (ENR) به کار می‌رود. این سنسور از نانو ذرات هسته-پوسته افزایش‌دهنده فرکانس نور (CSUNPs) به‌عنوان دهنده انرژی و از اکسید گرافن (GO) به‌عنوان پذیرنده انرژی استفاده می‌کند. آپتامر ENR به CSUNPs متصل شده و در تعامل با GO، فلورسانس را خاموش می‌کند. این تعامل با غلظت ENR مرتبط است [۲۶, ۳۰, ۴۷].

مثال فوق، پتانسیل نانوبیوسنسورهای متابولیک در ارائه راه‌حل‌های سریع، دقیق و کم‌هزینه برای نظارت بر باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی را نشان می‌دهند که از این طریق ایمنی زیست‌محیطی و سلامت عمومی را تضمین می‌کنند.

۲-۳- ادغام نانوبیوسنسورها و هوش مصنوعی در تشخیص باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط

ادغام نانوبیوسنسوها و هوش مصنوعی (AI) در شناسایی باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک‌ها، رویکردی جدید و پیشرفته است که کارایی و دقت نظارت بر محیطزیست را بهبود می‌بخشد. همان‌طور که در مطالب قبلی اشاره شد، نانوبیوسنسورها دستگاه‌های بسیار حساسی هستند که قادر به تشخیص مقادیر بسیار اندک از باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط هستند. آن‌ها برای پاسخگویی به هدف‌های خاص طراحی می‌شوند و هنگام حضور هدف، سیگنال قابل‌اندازه‌گیری تولید می‌کنند.AI با تجزیه‌وتحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده توسط نانوبیوسنسورها وارد عمل می‌شود. الگوریتم‌های AI قادر به پردازش مجموعه‌های داده پیچیده، شناسایی الگوها و پیش‌بینی وقایع با دقت بالا هستند. این موضوع به‌ویژه هنگام سروکار داشتن با چندین ماده یا زمانی که داده‌ها برای روش‌های تحلیل سنتی بیش‌ازحد پیچیده هستند، مفید است. AI قادر است برای تجزیه‌وتحلیل سیگنال از نانوبیوسنسورهایی که برای تشخیص همزمان چندین آنتی‌بیوتیک طراحی‌شده‌اند، استفاده کند. این موضوع برای نظارت بر ایمنی غذاها؛ که امکان وجود چندین باقی‌مانده آنتی‌بیوتیکی وجود دارد و خطرات قابل‌توجهی برای سلامتی ایجاد می‌شود، حیاتی است. در زیر ۲ مثال از ادغام نانوبیوسنسورها و AI در بهبود ایمنی غذایی معرفی‌شده است [۸, ۱۲, ۱۳, ۱۵, ۴۸].

نانوبیوسنسورهایی که در بسته‌بندی‌های غذا تعبیه‌شده‌اند، فساد یا آلودگی‌های ناشی از آلودگی یا حضور آنتی‌بیوتیک‌ها را تشخیص می‌دهند. سپس AI این اطلاعات را پردازش کرده و هشدارهای لحظه‌ای را در مورد ایمنی غذای مصرف‌کنندگان ارائه می‌دهد.

نانوبیوسنسورهایی که در کشاورزی استفاده می‌شوند، استفاده بیش‌ازحد از آنتی‌بیوتیک‌ها و سایر مواد شیمیایی کشاورزی را تشخیص می‌دهند. AI این داده‌ها را تجزیه‌وتحلیل کرده و استفاده از این مواد را بهینه می‌کند، تأثیر زیست‌محیطی را کاهش داده و سلامت محصولات را بهبود می‌بخشد.
این نمونه‌ها پتانسیل ترکیب حسگرهای نانوبیوسنسور با AI را در ایجاد سیستم‌های هوشمند برای نظارت و تضمین ایمنی محیطزیست و سلامت عمومی نشان می‌دهند.

روش‌های افزایش دقت نانوبیوسنسورها توسط AI و محدودیت‌ها: AI از طریق روش‌های زیر، دقت حسگرهای نانوبیوسنسور را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد [۸, ۱۲, ۱۵]:
۱. الگوریتم‌های AI نقش مهمی در شناسایی الگوها و همبستگی‌هایی که ممکن است برای تحلیل‌گران انسانی آشکار نباشند، دارند. این موضوع منجر به تشخیص دقیق‌تر باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک‌ها و عوارض احتمالی آن‌ها در محیطزیست می‌شود. مثلاً، هوش مصنوعی الگوهای همبستگی در داده‌ها و تغییرات ژنتیکی احتمالی درنتیجه حضور آنتی‌بیوتیک‌ها در محیط را شناسایی می‌کند که برای تحلیلگران انسانی آشکار نیستند.
۲. AI الگوهای پیچیده که منجر به تشخیص همزمان چندین آنتی‌بیوتیک می‌شود را شناسایی می‌کند. برای این کار، بین سیگنال‌های مواد مختلف تمایز قائل می‌شود، اختصاصی بودن را افزایش داده و نتایج مثبت کاذب را کاهش می‌دهد.
۳. AI داده‌های غیر مرتبط یا نویزی که ممکن است با خوانش‌های حسگر تداخل ایجاد کند را، حذف می‌کند و اطمینان حاصل می‌کند که نتایج بر اساس سیگنال‌های واقعی حاصل‌شده‌اند.
۴. AI با استفاده از داده‌های تاریخی، رویدادهای آلودگی احتمالی یا وجود باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک را پیش‌بینی می‌کند تا اقدامات پیشگیرانه انجام شود.
۵. AI، کالیبراسیون و تنظیم نانوبیوسنسورها را به‌طور خودکار انجام می‌دهد و دقت آن‌ها را بدون نیاز به دخالت دستی حفظ می‌کند.
۶. AI امکان تجزیه‌وتحلیل لحظه‌ای اطلاعات حسگر را فراهم می‌کند، بازخورد فوری ارائه می‌دهد و اجازه تصمیم‌گیری به‌موقع را می‌دهد.
احتمال دارد ترکیب نانوبیوحسگرها با AI در استفاده گسترده، با موانع قانونی مواجه شود؛ به‌ویژه در زمینه‌های پزشکی و زیست‌محیطی؛ که ایمنی و قابلیت اطمینان بسیار مهم هستند، این مسئله مطرح است. به‌عنوان‌مثال، ادغام نانوبیوسنسورها با AI، باید حریم خصوصی افراد را حفظ کند، زیرا این فناوری قادر است اطلاعات شخصی افرادی که آنتی‌بیوتیک مصرف کرده‌اند را نیز جمع‌آوری کند.

۴- تجزیه‌وتحلیل نتایج

اکتشاف فناوری نانوبیوسنسور در تشخیص باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی، فصل جدیدی را در پایش محیطی گشوده است. پیشرفت‌های اخیر در توسعه نانوبیوسنسورها نشان داده است که ظرفیت بی‌نهایت آن‌ها در مقابله با مشکلات اساسی در حوزه‌های زیست‌محیطی قابل بهره‌برداری است. این مطالعه برخی از پیشرفت‌های مهم در حوزه نانوبیوسنسورها در شناسایی باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی در محیطزیست را ارائه می‌دهد. ما به انواع مختلف نانوبیوسنسورها و کاربرد آن‌ها در شناسایی آنتی‌بیوتیک‌ها در محیطزیست پرداخته‌ایم؛ و مزایای هر نوع سنسور را مورد تأکید قرار دادیم. همچنین، ادغام هوش مصنوعی به‌عنوان راهی امیدوارکننده برای غلبه بر مشکلات احتمالی استفاده از نانوبیوسنسورها در شناسایی باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی در محیط ارائه‌شده است. نتایج نشان داد که فناوری نانوبیوسنسور پتانسیل قابل‌توجهی درزمینهٔ نظارت بر محیط‌های مختلف مانند بدن انسان، محیطزیست، یا حتی صنایع غذایی دارد. توانایی تشخیص باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی با حساسیت بالا (تشخیص باقیمانده‌های آنتی‌بیوتیک در غلظت‌های پایین)، تخصصی بودن، دقت و سرعت‌بالا و اندازه کوچک (کوچک‌سازی نانوبیوسنسورها)، آن‌ها را به دستگاه‌هایی قابل‌حمل تبدیل می‌کند و کاربرد آن‌ها را در محیط‌های مختلف محیطی افزایش می‌دهد، امکان استفاده در محل و ویژگی‌های متعدد مثبت دیگر نشان داد که نانوبیوسنسورها این پتانسیل رادارند که رویکرد ایمنی زیست‌محیطی و سلامت عمومی را متحول کنند (جدول ۱).
بااین‌حال، این حوزه خالی از انتقاد نیست (جدول ۱). برخی از محققان به چالش‌های مرتبط با کاربرد نانوبیوسنسورها در دنیای واقعی، مانند نیاز به کالیبراسیون، تداخل بالقوه با سایر مواد و پایداری طولانی‌مدت عناصر حسگر زیستی در محیط اشاره‌کرده‌اند. درحالی‌که نانوبیوسنسورهای

فیزیکوشیمیایی ابزارهای قدرتمندی برای شناسایی باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی در محیط هستند، ممکن است در حساسیت و انتخاب پذیری مشکل داشته باشند. این امر باعث می‌شود در حضور ترکیبات مشابه منجر به نتایج مثبت یا منفی کاذب شوند یا اینکه منجر به نادرستی در تشخیص غلظت‌های پایین باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی شوند. نانوبیوسنسورهای گاز، اگرچه در تشخیص باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی گازی شکل مؤثر هستند، اما به دلیل فرار ترکیبات هدف، محدود می‌شوند. نانوبیوسنسورهای مولکولی، علی‌رغم گزینش پذیری بالا، گران‌قیمت و زمان‌بر هستند؛ زیرا اغلب نیاز به توسعه عناصر تشخیص بیولوژیکی سفارشی برای هر آنتی‌بیوتیک هدف دارند. نانوبیوسنسورهای متابولیک با ارائه اطلاعاتی در مورد زیست فعالی باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک، چشم‌انداز منحصربه‌فردی را ارائه می‌دهند. بااین‌حال، اتکای آن‌ها به سلول‌ها یا آنزیم‌های موجود در محیط زنده، زنده باعث ایجاد تنوع می‌شود و می‌تواند تفسیر نتایج را پیچیده کند. علاوه‌براین، توسعه مستمر و ادغام فناوری نانوبیوسنسور با ابزارها و روش‌های پیشرفته، نوید بزرگی را برای ایجاد انقلابی در تشخیص باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیک در محیط، کمک به نظارت مؤثرتر زیست‌محیطی و شیوه‌های مدیریت پایدار دارد. در این میان، ادغام AI با فناوری نانوبیوسنسور به‌عنوان راه‌حلی برای برخی از چالش‌های مربوط به نانوبیوسنسورها پیشنهادشده است. هوش مصنوعی می‌تواند تجزیه‌وتحلیل داده‌ها را بهبود بخشد، تأثیر مواد مزاحم را کاهش دهد، قابلیت اطمینان کلی تشخیص اختصاصی، حساسیت، دقت و سرعت عمل را بهبود بخشد[۸, ۱۲, ۱۳, ۱۵, ۴۹].

اما مهم است که بدانیم هوش مصنوعی خود یک دارو نیست. اثربخشی هوش مصنوعی در نظارت بر محیط‌زیست به کیفیت داده‌هایی که روی آن آموزش داده‌شده است بستگی دارد و ممکن است ملاحظات اخلاقی در مورداستفاده از هوش مصنوعی در فرآیندهای تصمیم‌گیری وجود داشته باشد.

اگرچه تمرکز اصلی این مقاله بر روی شناسایی باقیمانده‌های آنتی‌بیوتیک با استفاده از نانوبیوسنسورها است، اما تحقیقات آینده باید ارزیابی پتانسیل آن‌ها در ایجاد جهش ژنی را با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته یا رویکردهای سم‌زدایی در نظر بگیرند. نظارت در زمان لحظه‌ای حضور آنتی‌بیوتیک در محیط نیز باید بیشتر موردتوجه قرار گیرد.مطالعات فعلی عمدتاً بر تجزیه‌وتحلیل آفلاین تمرکز دارند. بااین‌حال، نظارت زمان برای پرداختن به تغییرات پویا در غلظت باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک در طول زمان حیاتی است. تحقیقات آینده باید حسگرهایی که قادر به نظارت مستمر یا توسعه سامانه‌های تحلیل آنلاین هستند و داده‌های بلادرنگ را ارائه می‌دهند، کشف کنند. درنهایت، گسترش تلاش‌های تحقیقاتی فراتر از تشخیص باقی‌مانده آنتی‌بیوتیک‌ها؛ مانند آفت‌کش‌ها، داروها یا فلزات سنگین. در ادغام نانوحسگرهای زیستی با هوش مصنوعی پیشنهاد می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

استفاده از فناوری نانوبیوسنسور برای تشخیص باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی در محیط، نشان‌دهنده پیشرفت قابل‌توجهی در شیوه‌های نظارت و مدیریت محیطی است. بااین‌حال، چالش‌های شناسایی‌شده توسط محققان قبلی باید از طریق ادامه نوآوری و همکاری بین‌رشته‌ای موردتوجه قرار گیرد. کالیبراسیون و پایداری نانوبیوسنسورها، گزینش پذیری حسگرها و هزینه‌های تولید حسگرهای مولکولی همگی زمینه‌هایی هستند که به تحقیقات بیشتری نیاز دارند. محدودیت‌های نانوبیوسنسورهای گازی در تشخیص آنتی‌بیوتیک‌های غیر فرار و تنوع معرفی‌شده توسط حسگرهای متابولیک نیز فرصت‌هایی برای بهبود ایجاد می‌کنند.

ادغام هوش مصنوعی با فناوری نانوبیوسنسور، پیشرفت خاص و منحصربه‌فردی است. با بهره‌گیری از قدرت یادگیری ماشینی و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، می‌توانیم عملکرد نانوبیوسنسورها را افزایش دهیم و نظارت بر محیط‌زیست را قابل‌دسترس‌تر و قابل‌اعتمادتر کنیم. بااین‌حال، باید بااحتیاط پیش رفت و اطمینان حاصل کرد که سیستم‌های هوش مصنوعی که توسعه می‌یابند، شفاف، اخلاقی و مبتنی بر داده‌های باکیفیت بالا هستند.

جدول ۱: برخی ویژگی‌های نانوبیوسنسورهای مؤثر در تشخیص باقی‌مانده‌های آنتی‌بیوتیکی در محیط

نوع نانوبیوسنسور	کاربرد	حساسیت	اختصاصی بودن	مزایا	تداخل محیطی	مواد و ساختار	اندازه	هزینه‌ها	محدودیت‌ها و چالش‌ها	یکپارچه‌سازی با هوش مصنوعی
الکتروشیمیایی	تشخیص انواع آنتی‌بیوتیک‌ها در نمونه‌های آب و غذا	بالا	بالا	پاسخ سریع، LOD کم	احتمال واکنش با سایر مولکول‌ها یا یون‌های باردار در محیط	مواد رسانا مانند گرافن (از انواع نانو کامپوزیت‌های کربنی)، الکترودها، نانو ذرات طلا	مقیاس نانو تا میکرو	متوسط	نیاز به کالیبراسیون دقیق و مکرر، جذب غیراختصاصی، پایداری در ماتریس‌های پیچیده	کاربردهای در حال ظهور
فیزیکوشیمیایی	نظارت در محل بر آنتی‌بیوتیک‌ها در نمونه‌های آب، مراقبت‌های بهداشتی	متوسط تا بالا	متغیر	برنامه‌های کاربردی فراوان و متنوع	ممکن است تحت تأثیر کدورت و ذرات معلق، دما یا pH محیط قرار گیرد.	نقاط کوانتومی، نانو ذرات فلزی، پلیمرها	مقیاس نانو تا میکرو	متوسط تا بالا	ممکن است نیاز به آمادسازی پیچیده نمونه داشته باشد. زمان‌بر، نیاز به عملیات ماهرانه	هنوز به‌طور گسترده یکپارچه نشده است.
گاز	تشخیص آنتی‌بیوتیک‌های فرار یا متابولیت‌های آن‌ها، نظارت بر کیفیت هوا	متغیر	بالا برای گازهای هدف	تشخیص سریع گازها	حساس به سایر ترکیبات فرار	پلیمرها، نانولوله‌های کربنی، اکسیدهای فلزی	مقیاس نانو تا میکرو	کم تا متوسط	محدود به ترکیبات فرار، تحت تأثیر رطوبت	پتانسیل محدود اما امیدوارکننده
مولکولی	تشخیص هدفمند آنتی‌بیوتیک‌های خاص در محیط‌های مختلف	بالا	بسیار بالا	انتخاب پذیری بالا، قابل طراحی برای هدف‌های خاص	کم با طراحی خاص	حسگرهای مبتنی بر DNA ، آپتامرها و سایر قالب‌های مولکولی	مقیاس نانو تا میکرو	متوسط تا بالا	پیچیدگی در طراحی و سنتز، مشکلات ثبات	الگوریتم‌های هوش مصنوعی انتخاب پذیری را افزایش می‌دهند.
متابولیک	نظارت بر تغییرات متابولیکی که وجود آنتی‌بیوتیک	متوسط	بالا	نظارت لحظه‌ای	می‌تواند تحت تأثیر فرآورده‌های متابولیکی قرار	آنزیم‌ها، سلول‌ها	مقیاس میکرو	متوسط	حساسیت به شرایط محیطی، محدود به	هوش مصنوعی می‌تواند در

نوع نانوبیوسنسور	کاربرد	حساسیت	اختصاصی بودن	مزایا	تداخل محیطی	مواد و ساختار	اندازه	هزینه‌ها	محدودیت‌ها و چالش‌ها	یکپارچه‌سازی با هوش مصنوعی
	را در محیط‌های زنده نشان می‌دهد.				گیرد. تداخل با ماتریس‌های بیولوژیکی پیچیده				مسیر های متابولیک موجود	تشخیص الگو کمک کند.
نانوبیوسنسورهای یکپارچه با AI	تشخیص و تجزیه‌وتحلیل پیشرفته‌تر چندین آنتی‌بیوتیک	بالا	بالا	دقت بهبودیافته، تحلیل داده‌ها	کاهش‌یافته توسط پردازش داده‌های هوشمند	ترکیبی از نانو مواد و عناصر بیورسپتور (معمولاً بستگی به نوع حسگر یکپارچه با AI دارد)	متغیر	بالا	هزینه توسعه، پیچیدگی یکپارچه‌سازی با AI	ویژگی اصلی

LOD= Limit of Detection (بیوسنسور می‌تواند مقادیر بسیار کمی از آنتی‌بیوتیک‌ها را در نمونه‌ها تشخیص دهد)، AI= هوش مصنوعی

۶. منابع

[1]. Sodhi, K.K., et al., Perspectives on the antibiotic contamination, resistance, metabolomics, and systemic remediation. SN Applied Sciences. 2021;3: 1-25. doi.org/10.1007/s42452-020-04003-3.

[۲]. Haghighi poodeh, S., Y. Sefidbakht, and H. Kouchakzadeh. Environmental Pollution Caused by Antibiotics. Science Cultivation. 2019. 09(2): 82-88. doi.20.1001.1.2008935.1398.09.2.4.5.

[۳]. Apreja, M., et al., Antibiotic residues in environment: antimicrobial resistance development, ecological risks, and bioremediation. doi: 10.1007/s11356-021-17374-w. .Environmental Science and Pollution Research. 2022: 1-17.

[٤]. Bilal, M., et al., Antibiotics traces in the aquatic environment: persistence and adverse environmental impact. Current opinion in environmental science & health. 2020; 13: 68-74. doi: 10.1016/j.coesh.2019.11.005.

[٥] . Wang, Z., et al., Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Waters: Pollution, Risks, and Control. Frontiers in Environmental Scienc. 2022; 10: 967118. doi.org/10.3389/fenvs.2022.967118.

[٦] . Toyos-Rodríguez, C., D. Valero-Calvo, and A. de la Escosura-Muñiz, Advances in the screening of antimicrobial compounds using electrochemical biosensors: is there room for nanomaterials? Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2023; 415(6): 1107-1121. doi.org/10.1007/s00216-022-04449-x.

[۷]. Joshi, A. and K.-H. Kim, Recent advances in nanomaterial-based electrochemical detection of antibiotics: Challenges and future perspectives. Biosensors and Bioelectronics. 2020; 153: 112046. doi.org/10.1016/j.bios.2020.112046.

[۸] . Melo, M.C., J.R. Maasch, and C. de la Fuente-Nunez, Accelerating antibiotic discovery through artificial intelligence. Communications biology. 2021; 4(1): 1050. doi.org/10.1038/s42003-021-02586-0.

[۹]. Wang, X., et al., A review of graphene-based nanomaterials for removal of antibiotics from aqueous environments. Environmental pollution. 2019; 253: 100-110. doi.org/10.1038/s42003-021-02586-0.

[۱۰]. Bekele, T. and G. Alamnie, Treatment of antibiotic-resistant bacteria by nanoparticles: current approaches and prospects. Ann Adv Chem, 2022; 6: 001-009. oi.org/10.29328/journal.aac.1001025.

[۱۱]. Guliy, O., et al., Biosensor systems for antibiotic detection. Biophysics. 2021; 66: 555-564. doi.org/10.1134/S0006350921040060.

[۱۲]. Kulkarni, M.B., N.H. Ayachit, and T.M. Aminabhavi. Recent advancements in nanobiosensors: current trends, challenges, applications, and future scope. Biosensors. 2022; 12(10): 892. doi.org/10.3390/bios12100892.

[۱۳]. Lu, N., et al., Recent Advances of Biosensors for Detection of Multiple Antibiotics. Biosensors. 2023; 13(9): 850. doi.org/10.3390/bios13090850.

[۱٤]. Salouti, M. and F. Khadivi Derakhshan, Biosensors and nanobiosensors in environmental

applications. Biogenic nano-particles and their use in agro-ecosystems. 2020: 515-591. doi: 10.1007/978-981-15-2985-6_26.
[۱۵]. Zhou, C., et al., Machine-learning-driven optical immunosensor based on microspheres-encoded signal transduction for the rapid and multiplexed detection of antibiotics in milk. Food Chemistry. 2024. 437: p. 137740. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137740.
[۱۶]. Nano World. 2018; 14(52): 4-12.
[۱۷]. Sercan, D. and F. Altay. Biosensors from the first generation to nano-biosensors. International Advanced Researches and Engineering Journal. 2018; 2(2): 200-207.
[۱۸]. Seth, S. and P. Rathinasabapathi. A short review on detection of antibiotics in milk using nanomaterial-based biosensor. Food Analytical Methods. 2022; 15(8): 2181-2192. doi.org/10.1007/s12161-022-02291-6.
[۱۹]. Ye, C., et al., A wearable aptamer nanobiosensor for non-invasive female hormone monitoring. Nature Nanotechnology. 2023: 1-8. doi.org/10.1038/s41565-023-01513-0.
[۲۰]. Yang, S., et al., A label-free fluorescent biosensor based on specific aptamer-templated silver nanoclusters for the detection of tetracycline. Journal of Nanobiotechnology. 2023: 21(1): 22. doi.org/10.1186/s12951-023-01785-7.
[۲۱]. Du, X., et al., A novel nanosensor for detecting tetracycline based on fluorescent palladium nanoclusters. New Journal of Chemistry. 2020; 44(22):9248-9254.doi.org/10.1039/C9NJ06218A.
[۲۲]. Choi, H.K., J.-H. Choi, and J. Yoon, An updated review on electrochemical nanobiosensors for neurotransmitter detection. Biosensors. 2023; 13(9): 892.doi.org/10.3390/bios13090892.
[۲۳]. Hassan, R.Y., Advances in electrochemical nano-biosensors for biomedical and environmental applications: From current work to future perspectives. Sensors. 2022; 22(19):7539.doi.org/10.3390/s22197539
[۲۴]. Bakirhan, N.K., et al., Current advances in electrochemical biosensors and nanobiosensors. Critical reviews in analytical chemistry. 2022; 52(3): 519-534. doi.org/10.1080/10408347.2020.1809339.
[۲۵]. Dezhakam, E., et al., Electrochemical and optical (bio) sensors for analysis of antibiotic residuals. Food Chemistry. 2023: 138145.doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138145.
[۲۶]. Zhang, Y., et al., Aptamer-modified sensitive nanobiosensors for the specific detection of antibiotics. Journal of Materials Chemistry B. 2020; 8(37): 8607-8613. doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138145.
[۲۷]. Kulapina, E., et al., Potentiometric Sensors Sensitive to Some Cephalosporin Antibiotics: Properties and Applications. Journal of Analytical Chemistry. 2022; 77(8):963-973. doi.org/10.1134/S1061934822080056.
[۲۸] . Raghu, H., T. Parkunan, and N. Kumar. Application of nanobiosensors for food safety monitoring. Environmental Nanotechnology Volume 4. 2020: 93-129. doi.org/10.1007/978-3-030-26668-4_3.

[۲۹]. Hernandez-Vargas, G., et al., Electrochemical biosensors: A solution to pollution detection with reference to environmental contaminants. Biosensors. 2018; 8(2): 29. doi.org/10.3390/bios8020029.
[۳۰]. Liang, G., et al., Aptamer sensors for the detection of antibiotic residues—A mini-review. Toxics. 2023; 11(6): 513. doi.org/10.3390/toxics11060513.
[۳۱]. Ulucan-Karnak, F., C.İ. Kuru, and S. Akgöl, Commercial roadmap of nanobiosensor development. Frontiers in Nanotechnology. 2024; 6: 1348308. doi.org/10.3389/fnano.2024.1348308.
[۳۲]. Singh, K., Nanosensors for food safety and environmental monitoring. Nanotechnology for food, agriculture, and environment. 2020: 63-84. doi.org/10.1007/978-3-030-31938-0_4.
[۳۳]. Jaballah, M.B., et al., Development of a sustainable nanosensor using green Cu nanoparticles for simultaneous determination of antibiotics in drinking water. Analytical Methods. 2022; 14(20): 2014-2025. doi: 10.1039/D2AY00419D.
[۳٤] . Li, X., et al., Enhancing the performance of paper-based electrochemical impedance spectroscopy nanobiosensors: An experimental approach. Biosensors and Bioelectronics. 2021; 177: 112672.doi.org/10.1016/j.bios.2020.112672.
[۳۵]. Walther, B.K., et al., Nanobiosensing with graphene and carbon quantum dots: Recent advances. Materials Today. 2020; 39:23-46. doi.org/10.1016/j.mattod.2020.04.008.
[۳٦]. Alabsi, S.S., et al., A review of carbon nanotubes field effect-based biosensors. IEEE Access. 2020. 8: 69509-69521. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2987204.
[۳۷]. Gautam, A., et al., Electrical, optical, and mechanical transducer–based nanosensor and nanobiosensor for agricultural applications, in Nanotechnology and Nanomaterials in the Agri-Food Industries. 2024: 151-184. doi.org/10.1016/B978-0-323-99682-2.00015-3
[۳۸]. Touhami, A., Biosensors and nanobiosensors: design and applications. 2014.
[۳۹]. Li, C. and F. Sun. Graphene-assisted sensor for rapid detection of antibiotic resistance in Escherichia coli. Frontiers in Chemistry. 2021; 9: 696906. doi: 10.3389/fchem.2021.696906.
[٤۰]. Kharewal, T., et al., Biosensors for penicillin quantification: a comprehensive review. Biotechnology Letters. 2020; 42: 1829-1846. doi: 10.1007/s10529-020-02970-6.
[٤۱]. Hong, J., et al., A minireview for recent development of nanomaterial-based detection of antibiotics. Biosensors. 2023; 13(3): 327. doi.org/10.3390/bios13030327.
[٤۲]. Mahmoud, A.E.D. and M. Fawzy, Nanosensors and nanobiosensors for monitoring the environmental pollutants. Waste Recycling Technologies for Nanomaterials Manufacturing. 2021: 229-246. doi.org/10.1007/978-3-030-68031-2_9.
[٤۳]. Sun, Y., J. Zhao, and L. Liang, Recent development of antibiotic detection in food and environment: The combination of sensors and nanomaterials. Microchimica Acta. 2021. 188: 1-22.

doi.org/10.1007/s00604-020-04671-3.
[٤٤]. Yadav, A. and P.D. Indurkar, Gas sensor applications in water quality monitoring and maintenance. Water Conservation Science and Engineering. 2021; 6(3): 175-190. doi.org/10.1007/s41101-021-00108-x.
[٤٥]. Dincer, C., et al., Disposable sensors in diagnostics, food, and environmental monitoring. Advanced Materials. 2019; 31(30): 1806739. doi, 10.1002/adma.201806739.
[٤٦]. Moradi, S., et al., Nano-biosensors in cellular and molecular biology. Cellular and Molecular Biology. 2018; 64(5): 85-90. doi: 10.14715/cmb/2018.64.5.14.
[٤٧]. Lavrukhina, O., et al., Determination of Residual Amounts of Antibiotics in Environmental Samples and Food Products. Journal of Analytical Chemistry. 2022; 77(11): 1349-1385.doi.org/10.1134/S1061934822110077.
[٤٨]. Srivastava, A.K., A. Dev, and S. Karmakar. Nanosensors and nanobiosensors in food and agriculture. Environmental Chemistry Letters. 2018; 16: 161-182. doi.org/10.1007/s10311-017-0674-7.
[٤٩]. Athira, E., et al., Recent progress in optical nanosensors for antibiotics detection. Applied Nanoscience. 2023; 13(9): 6519-6538. doi: 10.1007/s13204-023-02923-1.

Detection of residual traces of antibiotics in the environment through Nanobiosensor technology

Firoozeh Alavian*[1], Zeinab Shohani[1], Aliyeh Arabi[2]

[1]Associate Professor, Department of Biology Education,Farhangian University, P.O.Box 14665-889, Tehran, Iran

[2]Department of Biology Education, FarhangianUniversity, Isfahan, Iran

Abstract

The widespread use of antibiotics has led to the accumulation of their residues in the environment, which poses a significant threat to ecological and human health due to their potential to promote antibiotic resistance. Detecting these residues is controversial due to their low concentration and the complexity of environmental samples. Traditional methods for detecting these residues are often cumbersome, time-consuming, and lack sensitivity. Nanobiosensors, including electrochemical, physicochemical, gas, molecular, and metabolic types, offer a promising solution that provides sensitivity, selectivity, and the capability to rapidly detect low levels of antibiotic residues in the environment. The articles examined in the current research relate to the period from 2014 to 2024. This study investigates the innovative application of Nanobiosensor technology as a solution for detecting antibiotic residues in the environment. Furthermore, the article seeks to identify the potential of integrating artificial intelligence (AI) with Nanobiosensor technology to enhance the detection capabilities of antibiotic residues in the environment and overcome some limitations in this path.

Keywords: Antibiotic, nanobiosensor, selection, sensitivity, environment, artificial intelligence

***f.alavian@cfu.ac.ir**