

نیما جلیلی^۱، کیانوش برشان^۲
 ۱، ۲ دانشجوی کارشناسی میکروبیولوژی،
 گروه علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی ارومیه

نقش بیوسنسورها در تشخیص، پایش و درمان سرطان

سرطان به عنوان یک گروه ناهمگن از بیماری‌ها، همچنان یکی از جدی‌ترین چالش‌های سلامت جهانی است. علی‌رغم پیشرفت‌های درمانی، تشخیص دیر هنگام و عدم پایش دقیق پاسخ به درمان، بقای بیماران را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. بیوسنسورها در اصل ابزارهایی هستند که یک عنصر زیستی شناسایی‌کننده را با یک مبدل سیگنال ترکیب می‌کنند تا حضور یا غلظت یک مولکول هدف را اندازه‌گیری نمایند. در زمینه سرطان، این فناوری اهمیت دوچندانی دارد. هدف ما از این مرور جامع، تحلیل انواع بیوسنسورها، کاربردهای بالینی آن‌ها در تشخیص، پایش و درمان سرطان، ادغام با فناوری‌های نوظهور و چالش‌های پیش‌رو است. [۱] و [۲]

انواع بیوسنسورها و مکانیسم عملکرد

۱- بیوسنسورهای الکتروشیمیایی:

این دسته از بیوسنسورها پرکاربردترین نوع در تشخیص سرطان هستند. عملکرد آن‌ها بر اساس تغییراتی است که واکنش بیومولکول هدف با عنصر شناسایی‌کننده در جریان یا ولتاژ الکتریکی ایجاد می‌کند. برای مثال، الکترودهایی که با آنتی‌بادی‌های اختصاصی پوشش داده شده‌اند، می‌توانند آنتی‌ژن‌های سرطانی مانند PSA (آنتی‌ژن اختصاصی پروستات) را در غلظت‌های بسیار پایین از سرم خون تشخیص دهند. یکی از نمونه‌های برجسته بیوسنسورهای هستند که برای شناسایی CA-125، نشانگر زیستی سرطان تخمدان طراحی شده‌اند. حساسیت این سیستم‌ها در برخی مطالعات به محدوده فمتومولار رسیده که از روش‌های استاندارد

زمینه و هدف: سرطان یکی از مهم‌ترین علل مرگ‌ومیر در جهان است. تشخیص دیر هنگام، پایش ناکافی درمان و عدم توانایی در شناسایی زودهنگام متاستاز، از چالش‌های اصلی انکولوژی به شمار می‌روند. [۲]

مواد و روش: این مقاله مروری با جستجوی سیستماتیک و جامع در پایگاه‌های PubMed، Scopus، Web of Science، SID، Google Scholar و MagIran انجام شد. کلمات کلیدی شامل بیوسنسور، سرطان، بیوپسی مایع، نشانگرهای زیستی، نانوفناوری و هوش مصنوعی بودند. بازه زمانی جستجو از ژانویه ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۲۴ در نظر گرفته شد و مقالات مروری، پژوهشی اصلی و بالینی مرتبط انتخاب شده‌اند.

یافته‌ها: بیوسنسورهای الکتروشیمیایی، اپتیکی، آبتامری و پیزوالکتریک قابلیت تشخیص نشانگرهای سرطانی (PSA، CA-125، HER2، ctDNA) را در سطوح بسیار پایین (فمتومولار) فراهم کرده‌اند. ادغام این فناوری‌ها با نانومواد (گرافن، نانوذرات طلا، نقاط کوانتومی) و هوش مصنوعی، حساسیت، اختصاصیت و قابلیت پای را به‌طور قابل توجهی افزایش داده است. کاربردهای برجسته شامل بیوپسی مایع، تشخیص زودهنگام، پایش پاسخ درمانی و شناسایی مقاومت دارویی است. [۱]، [۳]

نتیجه‌گیری: بیوسنسورها پتانسیل بالایی برای تغییر پارادایم تشخیص و درمان سرطان از رویکرد واکنشی به پیشگیرانه و شخصی‌سازی شده دارند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، هنوز چالش‌هایی مانند اختصاصیت، پایداری و تأیید بالینی وجود دارد که نیازمند تحقیقات بیشتر است. [۳] و [۲]



آزمایشگاهی به مراتب دقیق‌تر است. [۵]. [۷]

۲- بیوسنسورهای اپتیکی:

در این بیوسنسورها تغییر در خواص نوری ماده مانند جذب، فلورسانس یا تشدید پلاسمون سطحی به عنوان سیگنال خروجی استفاده می‌شود. تشدید پلاسمون سطحی موضعی (LSPR) که در نانوذرات طلا مشاهده می‌شود، پایه بسیاری از بیوسنسورهای

اپتیکی مدرن است. وقتی مولکول هدف به سطح نانوذره متصل می‌شود، طول موج جذب نور تغییر می‌کند و این تغییر قابل اندازه‌گیری است.

یک حوزه جالب توجه استفاده از نقاط کوانتومی (Quantum Dots) در تصویربرداری تومور است. این نانوساختارها می‌توانند با لیگاند‌های اختصاصی عامل‌دار شوند و در بافت توموری تجمع یابند، بنابراین هم ابزار تشخیصی هستند و هم می‌توانند در آینده حامل‌های دارویی باشند. [۶]

۳- بیوسنسورهای مبتنی بر آپتامر:

آپتامرها قطعات کوتاه DNA یا RNA تک رشته‌ای هستند که از طریق فرآیند انتخاب تکاملی آزمایشگاهی (SELEX) به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که با اتصال اختصاصی به مولکول هدف ساختار سه بعدی مشخصی به خود بگیرند. مزیت آن‌ها نسبت به آنتی‌بادی‌ها پایداری بیشتر، هزینه تولید کمتر و قابلیت تغییر شیمیایی آسان‌تر است. بیوسنسورهای آپتامری در شناسایی سلول‌های سرطانی سیرکولان (CTCs) در خون کاربرد ویژه‌ای دارند. CTC‌ها سلول‌هایی هستند که از تومور اولیه جدا شده و در جریان خون حضور دارند و می‌توانند نشانه‌ای از متاستاز یا پاسخ به درمان باشند.

۴- بیوسنسورهای پیزوالکتریک:

این بیوسنسورها از خاصیت پیزوالکتریک برخی مواد بهره می‌برند؛ اتصال یک مولکول به سطح حسگر جرم آن را تغییر داده و فرکانس ارتعاشی را دگرگون می‌کند. [۱]

کاربردهای بیوسنسورها در تشخیص و پایش سرطان

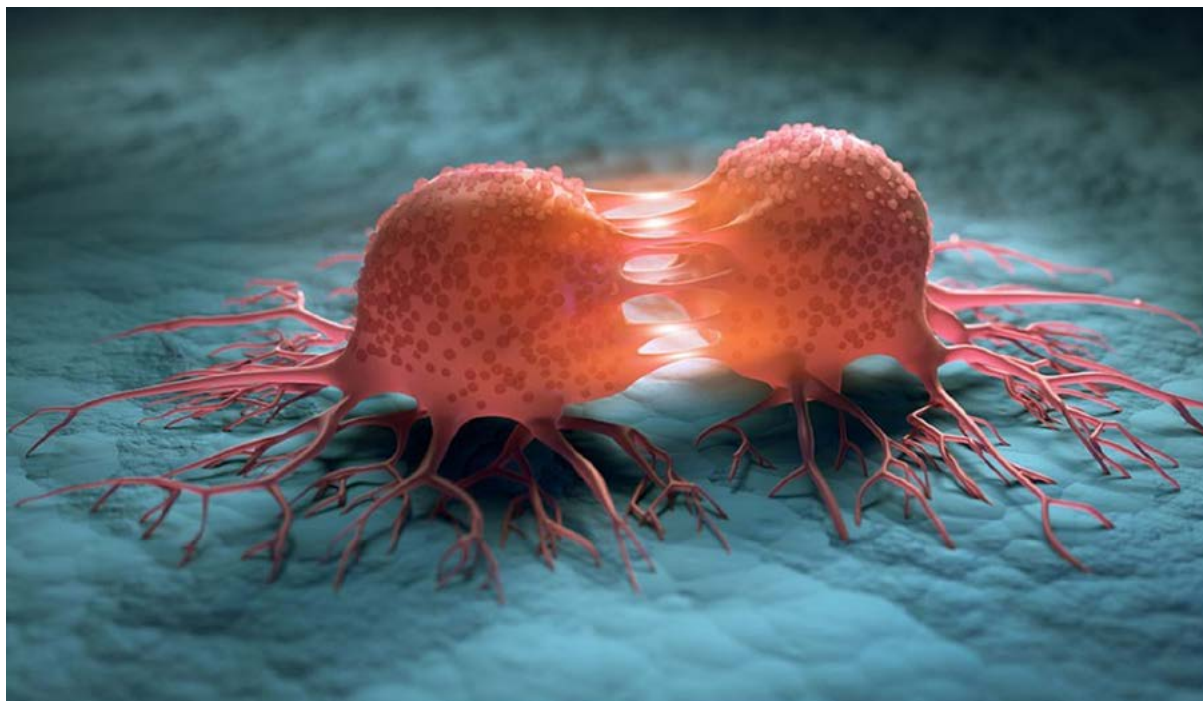
A. بیوپسی مایع: مهم‌ترین حوزه کاربردی بیوسنسورها در انکولوژی، بیوپسی مایع است. این رویکرد به جای نمونه‌برداری از بافت تومور، به تحلیل نمونه‌های خون، ادرار یا سایر مایعات بدن متکی است. هدف شناسایی DNA تومور سیرکولان (ctDNA)، CT (CTC)‌ها یا اگزوزوم‌های سرطانی است.

بیوسنسورهای الکتروشیمیایی و آپتامری در این زمینه نتایج امیدوارکننده‌ای نشان داده‌اند. به عنوان مثال: گروه‌هایی از محققان توانسته‌اند با استفاده از بیوسنسورهای مبتنی بر گرافن، جهش‌های اختصاصی در KRAS یکی از انکوژن‌های رایج در سرطان لوزالمعده را در نمونه‌های پلاسمای بیمار شناسایی کنند. این امر می‌تواند دیگر نیازی به آندوسکوپی یا نمونه‌برداری مستقیم نداشته باشد.

B. پایش درمان: یکی از چالش‌های مهم در انکولوژی، ارزیابی پاسخ بیمار به درمان است. روش‌های تصویربرداری مانند PET-CT گران قیمت، در دسترس نبودن و تأخیر در ارائه نتیجه دارند. بیوسنسورها می‌توانند تغییرات در سطح نشانگرهای زیستی را در زمان واقعی و با خون‌گیری‌های مکرر و کم هزینه ردیابی کنند.

در بیماران مبتلا به سرطان پستان که تحت درمان با تراستوزوماب (هرسپتین) هستند، پایش سطح HER2 در پلازما با بیوسنسورهای اختصاصی می‌تواند نشان دهد که آیا بیمار به درمان پاسخ می‌دهد یا مقاومت دارویی در حال شکل‌گیری است. [۴]. [۳]

C. تشخیص زودهنگام بیماری: در بسیاری از انواع سرطان، تفاوت میان تشخیص در مرحله اول و مرحله چهارم به



C. بیوسنسورهای پوشیدنی و قابل کاشت: در حالی که بیشتر بیوسنسورهای موجود در آزمایشگاه استفاده می‌شود، نسل بعدی این فناوری‌ها به سمت پوشیدنی بودن یا کاشت در بدن پیش می‌رود. پیچ‌های پوستی که قادر به تحلیل عرق بیمار و اندازه‌گیری نشانگرهای سرطانی هستند، یا حسگرهایی که در کنار جراحات سرطانی کاشته می‌شوند تا عود موضعی را تشخیص دهند، از جمله رویکردهای در حال توسعه هستند.

چالش‌ها و محدودیت‌ها

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، بیوسنسورها در مسیر ورود به عرصه بالینی با موانعی روبرو هستند. اول از همه، اختصاصیت یک مشکل جدی است؛ بسیاری از نشانگرهای زیستی منحصر به سرطان نیستند و در شرایط التهابی یا سایر بیماری‌ها نیز بالا می‌روند. دوم اینکه پایداری بیوسنسورها در شرایط نگهداری و استفاده واقعی، هنوز به اندازه کافی برای برخی انواع بهینه نشده است. ضمناً تولید انبوه با کیفیت بکخواخت، یک چالش مهندسی است. آنچه در مقیاس آزمایشگاهی خوب کار می‌کند، لزوماً در تولید انبوه عملکرد یکسانی ندارد و در نهایت، مسائل نظارتی و اعتبارسنجی بالینی - که نیازمند مطالعات گسترده با جمعیت‌های متنوع است - مسیری زمان‌بر پیش روی این فناوری‌ها قرار می‌دهد [۲].

مواد و روش

این مطالعه و مطلب جمع‌آوری شده یک مقاله در

معنای تفاوت میان بقای پنج‌ساله بالای ۹۰ درصد و زیر ۲۰ درصد است. بیوسنسورهای فوق‌حساس می‌توانند سطوح بسیار پایین نشانگرهای زیستی را که در مراحل اولیه بیماری وجود دارند، شناسایی کنند. یک رویکرد نوین، پانل‌های چندنشانگری است یعنی یک سیستم بیوسنسور که به جای یک مولکول، چندین نشانگر را همزمان اندازه می‌گیرد. این امر اختصاصیت تشخیص را افزایش می‌دهد و احتمال نتایج مثبت کاذب را کاهش می‌دهد [۳] و [۱].

ادغام با فناوری‌های نوین

A. نانومواد و بیوسنسورها: ورود نانوفناوری به حوزه بیوسنسورها، انقلابی در حساسیت این ابزارها ایجاد کرده است. نانوذرات طلا، لوله‌های کربنی، گرافن و دندریمرها سطح فعال بیوسنسورها را به شکل چشمگیری افزایش داده و سیگنال‌دهی را بهبود می‌بخشند. برای مثال، الکترودهای اصلاح‌شده با اکسید گرافن کاهش یافته (rGO) رسانایی الکتریکی بالا و سطح تماس وسیعی برای اتصال آنتی‌بادی‌ها فراهم می‌کنند. [۶]

B. هوش مصنوعی و تحلیل داده: داده‌های خروجی از بیوسنسورها به‌ویژه وقتی چند نشانگر به‌طور همزمان اندازه‌گیری می‌شوند حجم زیادی از اطلاعات تولید می‌کنند که تفسیر دستی آن‌ها دشوار است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند الگوهای پیچیده را در این داده‌ها شناسایی کرده و دقت تشخیص را بالا ببرد. ترکیب بیوسنسور با هوش مصنوعی نوعی «تشخیص هوشمند» خلق می‌کند که می‌تواند حتی از پزشک متخصص نیز سریع‌تر و دقیق‌تر عمل کند [۷].

بحث و نتیجه گیری

نتایج این مطالعه مروری با مقالات مشابه همخوانی قابل توجهی دارد. Quazi (۲۰۲۳) و Fam et al (۲۰۲۵) نیز بر پتانسیل بالای بیوسنسورها در بیوپسی مایع و تشخیص زودهنگام تأکید کرده‌اند. با این حال، مقاله حاضر با تمرکز همزمان بر چهار نوع بیوسنسور و ادغام آن‌ها با هوش مصنوعی و نانوفناوری، دید جامع‌تری ارائه می‌دهد. در مقایسه با Sarkar et al (۲۰۲۴) که بیشتر بر جنبه‌های فنی تمرکز دارد، این مرور کاربردی‌تر بوده و چالش‌های بالینی (مانند اختصاصیت و تأیید بالینی) را عمیق‌تر بررسی کرده است. Singh et al (۲۰۲۵) نیز به کاربرد بیوسنسورها در drug delivery اشاره کرده که با یافته‌های ما مبنی بر نقش دوگانه بیوسنسورها در تشخیص و درمان هم‌راستا است.

منابع:

- [1]. Sarkar S, et al. Biosensors for cancer detection: A review. Trends Anal Chem. 2024.
- [2]. Quazi S. Application of biosensors in cancers, an overview. Heliyon. 2023.
- [3]. Fam MK, et al. Biosensor technologies in cancer: tools for early detection and prognostic monitoring. Biomark Res. 2025.
- [4]. Singh S, et al. From detection to drug delivery: innovations in cancer biosensors. J Cancer Metastasis Treat. 2025.
- [5]. Hasan MR, et al. Recent development in electrochemical biosensors for cancer biomarkers. Curr Opin Electrochem. 2021.
- [6]. Iannazzo D, et al. Smart Biosensors for Cancer Diagnosis Based on Graphene Quantum Dots. Cancers. 2021.
- [7]. Karim MM, et al. Electrochemical Biosensors for Cancer Biomarker Detection. Electrochem Sci Adv. 2025. 11

قالب مروری است. بر اساس جستجوی منابع به صورت مستقل توسط دو نویسنده در پایگاه‌های داده بین‌المللی PubMed، Scopus، Web of Science و Google Scholar و همچنین پایگاه‌های فارسی SID و Magiran انجام شد. بازه زمانی جستجو از ژانویه ۲۰۱۵ تا دسامبر ۲۰۲۴ تعیین شد تا پیشرفت‌های یک دهه اخیر این حوزه پوشش داده شود.

نتیجه تحقیق

بر اساس بررسی مقالات منتخب بیوسنسورهای الکتروشیمیایی بیشترین کاربرد را در تشخیص نشانگرهای سرطانی داشته‌اند و قادر به تشخیص PSA و CA-125 در غلظت‌های فمتومولار هستند که نسبت به روش‌های سنتی (مانند ELISA) حساسیت به مراتب بالاتری نشان می‌دهند. بیوسنسورهای مبتنی بر آپتامر و گرافن موفقیت قابل توجهی در تشخیص ctDNA و جهش KRAS در بیوپسی مایع داشته‌اند. ادغام نانومواد (به‌ویژه نانوذرات طلا و گرافن) باعث افزایش ۱۰ تا ۱۰۰ برابری سیگنال در بسیاری از مطالعات شده است. علاوه بر این ترکیب هوش مصنوعی با بیوسنسورها دقت تشخیص را در پانل‌های چندنشانگری تا بیش از ۹۲ درصد افزایش داده است. بیوسنسورهای پوشیدنی نیز پتانسیل بالایی برای پایش مداوم نشانگرها در بیماران تحت درمان نشان داده‌اند. در مجموع، یافته‌ها حاکی از آن است که بیوسنسورها می‌توانند تشخیص سرطان را حداقل ۶-۱۲ ماه زودتر از روش‌های تصویربرداری مرسوم ممکن سازند.

کانال ماهنامه تشخیص آزمایشگاهی در پیام‌رسان "بله" راه اندازی شد

پیج ماهنامه را در اینستاگرام و بله دنبال کنید



@tashkhis_magazine