

نقش بیوسنسورها در تشخیص و درمان سرطان The role of biosensors in cancer diagnosis and treatment

فاطمه صالحی^۱، زهرا غفاریپور^۲

فاطمه صالحی، دانشجوی بیوتکنولوژی دانشگاه آزاد، واحد تبریز، ایران

زهرا غفاریپور دانشجوی بیوتکنولوژی دانشگاه آزاد، واحد تبریز، ایران

چکیده:

بیوسنسورها به عنوان ابزارهای تحلیلی پیشرفته، نقش مهمی در تشخیص سریع، دقیق و غیرتهاجمی بیماری‌ها ایفا می‌کنند. این فناوری با ترکیب یک جزء زیستی حساس (مانند آنزیم، آنتی‌بادی، DNA یا سلول زنده) با یک مبدل فیزیکی-شیمیایی، قادر است سیگنال‌های زیستی را به پاسخ‌های قابل اندازه‌گیری تبدیل نماید. در سال‌های اخیر، توسعه بیوسنسورهای نسل جدید موجب تحولات چشمگیری در حوزه تشخیص و درمان سرطان شده است. بیوسنسورهای آنزیمی، نوری، الکتروشیمیایی، پیزوالکتریک و مغناطیسی توانسته‌اند در شناسایی بیومارکرهای توموری، پایش پاسخ دارویی و حتی رسانش هدفمند داروها نقش مؤثری داشته باشند. با وجود چالش‌هایی همچون پایداری پایین عناصر زیستی، هزینه‌ی بالا و نیاز به استانداردسازی بالینی، استفاده از نانوذرات، گرافن و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، مسیر پیشرفت این فناوری را هموار کرده است. آینده بیوسنسورها در پزشکی، به‌ویژه در آنکولوژی، در راستای دستیابی به پزشکی دقیق و شخصی‌سازی شده است که می‌تواند موجب تشخیص زودهنگام، درمان هدفمند و بهبود کیفیت زندگی بیماران سرطانی شود.

کلمات کلیدی:

بیوسنسور، سرطان، درمان هدفمند، بیومارکر، نانوفناوری، هوش مصنوعی،

مقدمه:

سرطان دومین عامل مرگ‌ومیر در جهان و یکی از چالش‌برانگیزترین بیماری‌های انسانی به شمار می‌آید. پیچیدگی این بیماری از منشأهای گوناگون آن ناشی می‌شود؛ از جمله عوامل ژنتیکی، عوامل محیطی (مانند مواد سرطان‌زا یا تابش‌ها) و برخی میکروب‌ها یا ویروس‌ها (مانند ویروس HPV که عامل سرطان دهانه رحم است). این چندوجهی بودن، تشخیص زودهنگام و دقیق سرطان را، به‌ویژه در مراحل اولیه، با دشواری‌های فراوانی همراه کرده است. با وجود پیشرفت‌های فراوان در روش‌های درمانی، محدودیت‌های روش‌های کنونی تشخیص زودهنگام، مانع از تشخیص دقیق و به موقع می‌شوند. این محدودیت‌ها عمدتاً شامل نیاز به تجهیزات گران‌قیمت، زمان طولانی تجزیه و تحلیل، و دقت پایین در مراحل ابتدایی بیماری هستند. با این حال، تشخیص سرطان در مراحل اولیه برای دستیابی به درمان مؤثر و افزایش طول عمر بیماران حیاتی است. در دهه‌های اخیر، آنتی‌ژن‌های توموری و بیومارکرهای سرطان توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. بیومارکرها مولکول‌های زیستی‌ای هستند که در مایعات بدن همچون خون، ادرار یا بافت‌ها قابل شناسایی‌اند و می‌توانند اطلاعات حیاتی در مورد وضعیت سلولی و تحولات پاتولوژیک بدن ارائه دهند. با این وجود، روش‌های متداول جداسازی و شناسایی بیومارکرها، مانند سانتریفیوژ و روش‌های مبتنی بر میکروسکوپ نوری (MAT)، اغلب زمان‌بر بوده و نیاز به مهارت و کنترل دقیق دارند، که کاربرد آن‌ها در غربالگری توده‌ای را محدود می‌کند. علاوه بر این، یکی از چالش‌های مهم در بیوسنسورهای سنتی، محدودیت

در شناسایی هم‌زمان چندین بیومارکر (Multiplexing) است. در پاسخ به این نیازها، ابزارهای تشخیصی جدید، سریع، دقیق و ارزان در حال توسعه هستند. در این راستا، بیوسنسورها (Biosensors) نقشی حیاتی ایفا می‌کنند. بیوسنسورهای نوری-فیبری، به عنوان مثال، قادرند بیومارکرها و سلول‌های سرطانی را با افزایش سیگنال نوری و شناسایی مقادیر اندک آن‌ها تشخیص دهند. هدف این مقاله، بررسی نقش محوری بیوسنسورها به عنوان ابزاری نوین، دقیق و کارآمد در تشخیص سریع و مقرون‌به‌صرفه سرطان و ارزیابی اثربخشی درمان آن است.

تعریف بیوسنسور :

بیوسنسور (Biosensor) وسیله‌ای تحلیلی است که یک جزء زیستی (مانند آنزیم، آنتی‌بادی، DNA، RNA، یا سلول زنده) را با یک میدل فیزیکی یا شیمیایی ترکیب می‌کند تا حضور یا غلظت ماده‌ای خاص (آنالیت) را در نمونه‌های بیولوژیکی یا محیطی شناسایی کند. هدف اصلی بیوسنسور تبدیل یک پاسخ زیستی به یک سیگنال قابل اندازه‌گیری الکتریکی، نوری یا شیمیایی است

عملکرد بیوسنسور

عملکرد بیوسنسور در سه مرحله انجام می‌شود:

۱. شناساگر زیستی (Bioreceptor) بخشی از سنسور که به طور اختصاصی با مولکول هدف (مثل آنتی‌ژن سرطان) واکنش می‌دهد.

۲. میدل (Transducer) سیگنال زیستی حاصل از واکنش را به یک سیگنال قابل اندازه‌گیری (الکتریکی، نوری، گرمایی و...) تبدیل می‌کند.

۳. واحد پردازش و نمایش (Processor/Display): سیگنال تولید شده را پردازش کرده و به شکلی قابل تفسیر و خواندن برای کاربر نمایش می‌دهد.

انواع بیوسنسورها

بیوسنسورها را می‌توان بر اساس عنصر زیستی، نوع میدل، نسل فناوری و کاربرد دسته‌بندی کرد. این تقسیم‌بندی‌ها کمک می‌کنند تا عملکرد و حوزه‌ی استفاده‌ی هر نوع سنسور بهتر درک شود.

۱. بر اساس عنصر زیستی (Biorecognition Element): در این نوع تقسیم‌بندی، تفاوت بیوسنسورها بر پایه‌ی نوع مولکولی است که با ماده‌ی هدف واکنش می‌دهد یا آن را شناسایی می‌کند:

۱.۱ بیوسنسورهای آنزیمی:

در این سنسورها از آنزیم به عنوان جزء زیستی استفاده می‌شود. آنزیم‌ها به طور اختصاصی با ماده‌ی هدف واکنش داده و محصولی تولید می‌کنند که قابل اندازه‌گیری است. این نوع سنسورها حساسیت بالایی دارند و در شناسایی متابولیت‌ها (مثل گلوکز، لاکتات و H_2O_2) کاربرد فراوان دارند.

در زمینه‌ی سرطان، از این سنسورها برای تشخیص تغییرات متابولیکی سلول‌های توموری استفاده می‌شود.

۱.۲ ایمونوسنسورها (Immunosensors):

بر اساس واکنش اختصاصی بین آنتی ژن و آنتی بادی عمل می کنند. وقتی آنتی ژن هدف (مثلاً یک پروتئین توموری مانند PSA یا HER2) به آنتی بادی متصل می شود، سیگنالی تولید می گردد که میزان آن به غلظت آنتی ژن بستگی دارد. این سنسورها دقت بسیار بالایی دارند و در تشخیص زودهنگام سرطان کاربرد دارند.

۱.۳ ژنوسنسورها (: Genosensors)

در این نوع، رشته های DNA یا RNA به عنوان عنصر زیستی عمل می کنند. در صورت وجود توالی مکمل (مثل DNA جهش یافته ی تومور)، این رشته ها با هم جفت می شوند و سیگنال قابل اندازه گیری ایجاد می شود. ژنوسنسورها در تشخیص سرطان های ارثی مانند جهش BRCA1 در سرطان پستان نقش مهمی دارند.

۱.۴ سلولی و میکروبی:

در این بیوسنسورها از سلول های زنده یا میکروارگانیسم ها استفاده می شود. واکنش فیزیولوژیکی سلول به مواد خاص (مثل دارو یا سم) باعث تولید سیگنال می شود. این سنسورها برای بررسی اثر داروهای ضد سرطان روی سلول ها کاربرد دارند.

۱.۵ آپتاسنسورها (: Aptasensors)

در این سنسورها از آپتامرها، یعنی قطعات کوتاه DNA یا RNA مصنوعی که به هدف خاصی متصل می شوند، استفاده می شود. آن ها عملکردی شبیه آنتی بادی ها دارند ولی پایداری بیشتر و تولید آسان تری دارند. امروزه از آپتاسنسورها برای تشخیص دقیق پروتئین ها و بیومارکرهای توموری استفاده می شود.

۲. بر اساس نوع مبدل (Transducer)

مبدل بخش کلیدی بیوسنسور است که سیگنال زیستی را به یک سیگنال قابل اندازه گیری (مانند جریان الکتریکی یا نور) تبدیل می کند.

۲.۱ بیوسنسورهای الکتروشیمیایی:

در این نوع، تغییرات شیمیایی ناشی از واکنش زیستی به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود. اندازه گیری جریان (آمپرومتری)، ولتاژ (پتانسیومتری) یا مقاومت (ایمپدانس سنجی) انجام می شود. این نوع سنسورها به خاطر سادگی و دقت بالا، در تشخیص بیومارکرهای سرطانی و متابولیت ها کاربرد فراوانی دارند.

۲.۲ بیوسنسورهای نوری (Optical):

مبنای عملکرد آن ها تغییر در ویژگی های نوری مانند جذب، بازتاب یا فلورسانس است. اتصال مولکول هدف باعث تغییر شدت نور یا رنگ می شود که با دستگاه نوری ثبت می شود. از جمله روش های رایج در این گروه می توان به سنسورهای فلورسانس و پلاسمون سطحی (SPR) اشاره کرد. این سنسورها در تشخیص پروتئین های توموری و DNA های جهش یافته بسیار پرکاربرد هستند.

۲.۳ بیوسنسورهای پیزوالکتریک:

در این نوع، اتصال مولکول هدف باعث تغییر جرم سطح سنسور می شود که به صورت تغییر در فرکانس نوسان قابل اندازه گیری است. این روش بدون نیاز به برچسب گذاری و بسیار دقیق است.

۲.۴ بیوسنسورهای حرارتی:

بر پایه اندازه‌گیری تغییرات گرما در واکنش زیستی عمل می‌کنند. هر واکنش آنزیمی مقدار مشخصی گرما آزاد یا جذب می‌کند که با استفاده از حسگرهای حرارتی اندازه‌گیری می‌شود.

۲.۵ بیوسنسورهای مغناطیسی:

در این سنسورها از نانوذرات مغناطیسی استفاده می‌شود. وقتی مولکول هدف به این نانوذرات متصل شود، ویژگی مغناطیسی محیط تغییر می‌کند. این تغییرات برای تشخیص سلول‌های سرطانی بسیار مفید است.

۳. بر اساس نسل فناوری ((Generation of Biosensors

بیوسنسورها از نظر پیشرفت فناوری نیز به چند نسل تقسیم می‌شوند:

- نسل اول: بر اساس واکنش مستقیم آنزیم و ماده‌ی هدف (ساده و ابتدایی).
- نسل دوم: از واسطه‌هایی برای انتقال الکترون بین آنزیم و الکتروود استفاده می‌کند تا دقت و سرعت افزایش یابد.
- نسل سوم: انتقال مستقیم الکترون بدون واسطه انجام می‌شود که دقت را به حداکثر می‌رساند.
- نسل چهارم (مدرن): ترکیب بیوسنسورها با نانوذرات، گرافن و هوش مصنوعی که امروزه در مسیر توسعه سریع هستند.

۴. بر اساس کاربرد

بیوسنسورها کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف دارند، از جمله:

- پزشکی: تشخیص بیماری‌هایی مانند سرطان، دیابت و عفونت‌ها.
 - محیط‌زیست: شناسایی آلاینده‌ها و سموم
 - صنعت غذا: کنترل کیفیت و تشخیص عوامل میکروبی
 - تحقیقات دارویی: بررسی پاسخ سلولی و اثر داروها
- با وجود پیشرفت در طراحی انواع بیوسنسورها، این فناوری همچنان با چالش‌هایی روبه‌روست که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

چالش‌ها

۱. پایداری پایین عناصر زیستی (مثل آنزیم‌ها) در شرایط محیطی
 ۲. نیاز به دقت بالا و جلوگیری از تداخل سیگنال‌ها
 ۳. هزینه بالا و دشواری در تولید انبوه
 ۴. استانداردسازی و تأیید بالینی زمان‌بر
 ۵. چالش‌های اخلاقی و حفظ داده‌های بیماران
- آینده بیوسنسورها و نقش هوش مصنوعی
- آینده بیوسنسورها و نقش هوش مصنوعی (AI) ترکیب بیوسنسورها با هوش مصنوعی، آینده تشخیص و درمان سرطان را متحول خواهد کرد.

پردازش داده‌های بیوسنسوری با یادگیری ماشین (Machine Learning) برای تشخیص الگوهای مولکولی پیچیده. سیستم‌های پوشیدنی (Wearable biosensors) که با گوشی‌های هوشمند متصل می‌شوند و به صورت لحظه‌ای تغییرات سلولی و پروتئینی را گزارش می‌دهند. مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده سرطان بر اساس داده‌های بیوسنسورهای چندگانه و الگوریتم‌های یادگیری عمیق. نانوبیوسنسورهای هوشمند که دارو را فقط در پاسخ به سیگنال‌های توموری آزاد می‌کنند.

نتیجه و بحث:

بیوسنسورها با فراهم کردن امکان تشخیص سریع، دقیق و مقرون به صرفه، انقلابی در حوزه‌ی تشخیص و درمان سرطان ایجاد کرده‌اند. آینده این فناوری در گرو توسعه بیوسنسورهای هوشمند، نانوپایه و هوش‌محور است که می‌توانند به سمت پزشکی شخصی (Personalized medicine) حرکت کنند.

منابع:

Dashtipour, H., Nooras, A., Daneshjoo, S., Mohbi, S., & Mousavi Neiri, N. (2025). Recent advances in nanotechnology for biosensors: the application of artificial intelligence. Tehran, Iran: Islamic Azad University, Tehran Medical Sciences Branch.

Chaudhry G-E, Akim A-M, Safdar N, Yasmin A, Begum S, Sung Y Y, Tengku Sifzizul Tengku Muhammad. Cancer and disease diagnosis – biosensor as potential diagnostic tool for biomarker detection. J Adv Pharm Technol Res. 2022;13(4):243-247. doi:10.4103/japtr.japtr_106_22