Nanomeghyas
www.nanomeghyas.ir
نانومقیاس

ربات‌های میکروسکوپی برای دارورسانی هوشمند: نوآوری‌ها، چالش‌ها و کاربردهای بالینی

سارا خلفی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد الکترونیکی، تهران

چکیده: ربات‌های میکروسکوپی برای دارورسانی هوشمند، به‌عنوان یک تکنولوژی نوظهور، قابلیت بهبود دقت و کارایی درمان‌ها را دارند. این ربات‌ها، که در مقیاس نانو یا میکرو طراحی می‌شوند، قادر به حرکت و هدایت درون بدن به سمت بافت‌های هدفمند هستند. آن‌ها می‌توانند داروها را مستقیم به سلول‌ها یا نواحی آسیب‌دیده تحویل دهند، که این امر منجر به افزایش تمرکز دارو در محل مورد نظر و کاهش اثرات جانبی می‌شود. این مقاله تکنولوژی‌های مختلف ساخت، مواد مورد استفاده، مکانیسم‌های هدایت، و کاربردهای بالینی این ربات‌ها را بررسی می‌کند. همچنین، چالش‌های طراحی و کارایی و چشم‌اندازهای آینده این فناوری نیز مورد بحث قرار می‌گیرد.در بخش نوآوری‌ها، تکنولوژی‌های پیشرفته مانند نانوذرات هدفمند، سامانه‌های کنترل نانومتری، و ابزارهای اپتیکال و مغناطیسی که امکان دارورسانی دقیق را فراهم می‌آورند، ارزیابی می‌شوند. چالش‌های فنی همچون قدرت پردازش، توانایی حرکت، و انتخاب زمینه محیطی نیز بررسی می‌شوند تا نقاط قوت و ضعف این فناوری مشخص شوند.در بخش کاربردهای بالینی، نقش این ربات‌ها در تحویل دارو، ارزیابی دقیق بیماری‌ها، و تصویربرداری بالینی بررسی می‌شود. مطالعه موردی نشان می‌دهد که این ربات‌ها می‌توانند نقش موثری در بهبود نتایج بالینی و کاهش اثرات جانبی داروها داشته باشند. امید است که این مقاله بتواند محققان را به همکاری در بهبود این فناوری‌ها تشویق کند.

واژگان کلیدی: ربات‌های میکروسکوپی، دارورسانی هوشمند، نانوربات‌ها، هدف‌گیری دارویی، نانوتکنولوژی.

* *sara1khalafi@gmail.com*

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۴/۲۷
تاریخ بازنگری ۱۴۰۳/۵/۱۴
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۵/۲۴

پاییز ۱۴۰۳| شماره ۳ | سال یازدهم

۱- مقدمه

ربات‌های میکروسکوپی[1] یا نانوربات‌ها[2] به عنوان یک فناوری پیشرفته در حوزه دارورسانی، توانایی ارائه درمان‌های دقیق و کنترل‌شده را دارند و پتانسیل بالایی برای تحول در پزشکی مدرن به نمایش می‌گذارند. این ربات‌ها، با بهره‌گیری از فناوری‌های نانو و میکرو، قادر به حرکت و هدایت درون بدن به سمت بافت‌های هدفمند هستند. استفاده از این ربات‌ها، به دلیل توانایی تحویل دقیق داروها به محل‌های مورد نظر، می‌تواند منجر به افزایش اثربخشی درمان‌ها و کاهش عوارض جانبی ناخواسته شود. به عنوان مثال، در درمان سرطان، ربات‌های میکروسکوپی می‌توانند داروهای ضدسرطان را به‌طور مستقیم به سلول‌های سرطانی تحویل دهند، که این امر منجر به کاهش آسیب به سلول‌های سالم و افزایش کارایی درمان می‌شود [۱].

تکنولوژی‌های پیشرفته مانند نانوذرات هدفمند، سامانه‌های کنترل نانومتری، و ابزارهای اپتیکال و مغناطیسی، امکان دارورسانی دقیق را فراهم آورده‌اند. این فناوری‌ها، با استفاده از روش‌های ساخت پیشرفته نظیر لیتوگرافی نانو، فناوری MEMS، و مهندسی میکروسیالات، به ایجاد ربات‌های میکروسکوپی پیچیده و کارآمد کمک کرده‌اند. همچنین، استفاده از مواد زیست‌سازگار مانند پلیمرهای بیولوژیکی و نانوذرات طلا، امکان تعامل مناسب این ربات‌ها با بافت‌های بیولوژیکی بدن را فراهم کرده است.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، چالش‌های متعددی همچنان وجود دارد. یکی از بزرگترین چالش‌ها، هدایت و کنترل دقیق این ربات‌ها در بدن است. ربات‌های میکروسکوپی باید بتوانند در محیط‌های پیچیده و متنوع بدن حرکت کنند و به محل‌های هدف برسند. تکنیک‌های مختلفی برای کنترل این ربات‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، از جمله استفاده از میدان‌های مغناطیسی، امواج صوتی، و روش‌های شیمیایی. هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند و نیازمند تحقیقات و توسعه بیشتر هستند. علاوه بر این، زیست‌سازگاری و ایمنی این ربات‌ها نیز از مسائل حیاتی است که باید مورد بررسی و ارزیابی دقیق قرار گیرد [۲].

ربات‌های میکروسکوپی نقش مهمی در تحویل دارو، ارزیابی دقیق بیماری‌ها، و تصویربرداری بالینی ایفا می‌کنند. مطالعه موردی از کاربردهای فعلی نشان می‌دهد که این ربات‌ها می‌توانند نقش موثری در بهبود نتایج بالینی داشته باشند و به کاهش اثرات جانبی داروها کمک کنند. به عنوان مثال، در پزشکی شخصی‌سازی‌شده ، درمان‌ها و روش‌های پزشکی با توجه به ویژگی‌ها، نیازها و شرایط خاص هر بیمار طراحی و اجرا می‌شوند. به عنوان مثال، در این نوع پزشکی، ربات‌های میکروسکوپی می‌توانند درمان‌ها را با نیازهای خاص هر بیمار تطبیق دهند. این امر به بهبود کیفیت درمان‌ها منجر می‌شود زیرا هر بیمار به صورت منحصر به فرد و بر اساس ویژگی‌های فردی خود درمان می‌شود. علاوه بر این، استفاده از ربات‌های میکروسکوپی در جمع‌آوری و تحلیل نمونه‌های بیولوژیکی می‌تواند به تشخیص سریع‌تر و دقیق‌تر بیماری‌ها کمک کند، زیرا این ربات‌ها قادرند به‌طور دقیق و کارآمد نمونه‌های مورد نیاز را از بدن بیمار جمع‌آوری و تحلیل کنند. این دقت و سرعت در تشخیص و درمان می‌تواند به بهبود نتایج درمانی و کاهش زمان بهبودی بیماران منجر شود[۳].

چشم‌انداز آینده ربات‌های میکروسکوپی در دارورسانی هوشمند بسیار امیدوارکننده است. با پیشرفت مداوم فناوری‌های ساخت و کنترل، انتظار می‌رود که این ربات‌ها نقش برجسته‌تری در درمان‌های هدفمند و اختصاصی ایفا کنند. تحقیقات مداوم در

1. Microscale Robots
2. Nanorobots

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۴/۲۷
تاریخ بازنگری ۱۴۰۳/۵/۱۴
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۵/۲۴

زمینه بهبود قابلیت‌های حرکتی، کاهش عوارض جانبی، و افزایش دقت تحویل دارو می‌تواند به بهبود کیفیت درمان‌ها و کاهش هزینه‌های پزشکی کمک کند. همچنین، توسعه سیستم‌های هوشمند کنترل حرکت، استفاده از سنسورهای دقیق و انجام آزمایش‌های دقیق برای ارزیابی عملکرد ربات‌ها در شرایط واقعی، می‌تواند امکانات جدیدی را در زمینه پزشکی و سایر حوزه‌های بیولوژیکی فراهم آورد.

استفاده گسترده‌تر و اثربخش‌تر از این فناوری در عرصه پزشکی می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی بیماران منجر شود. افزایش دقت در دارورسانی و کاهش عوارض جانبی داروها از جمله تاثیرات مثبت این فناوری است که می‌تواند تغییرات چشمگیری در خدمات درمانی ایجاد کند. این ربات‌ها با دارا بودن قابلیت‌های مکانیکی و زیستی پیشرفته، می‌توانند به‌طور مؤثر داروها را به سلول‌ها و بافت‌های هدف تحویل دهند، که به بهبود کیفیت درمان و کاهش عوارض جانبی کمک می‌کند. به‌علاوه، کاهش زمان بهبود و افزایش راحتی بیمار نیز از دیگر مزایای استفاده از ربات‌های میکروسکوپی است [۴].

ربات‌های میکروسکوپی به عنوان یک فناوری پیشرفته در دارورسانی، امکان ارائه درمان‌های دقیق و کنترل‌شده را فراهم می‌کنند و پتانسیل بالایی برای تحول در پزشکی مدرن دارند. با استفاده از این ربات‌ها، می‌توان به بهبود دقت و کارایی درمان‌ها، کاهش عوارض جانبی، و افزایش کیفیت زندگی بیماران دست یافت. این فناوری، با ترکیب نوآوری‌های تکنولوژیکی و مواد زیست‌سازگار، امکانات بی‌نظیری را در زمینه دارورسانی هوشمند و درمان‌های پزشکی ارائه می‌دهد. امید است که با ادامه تحقیقات و توسعه‌های بیشتر، بتوان به پتانسیل کامل این فناوری دست یافت و به بهبود کیفیت درمان بیماران و کاهش عوارض جانبی داروها کمک کرد.

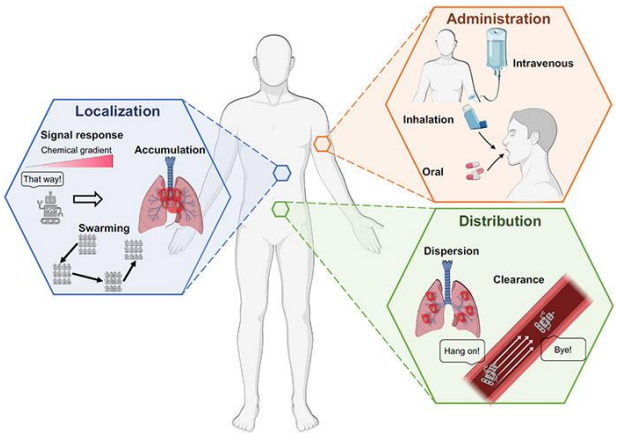
در نهایت، استفاده از ربات‌های میکروسکوپی می‌تواند به عنوان یک راه‌حل نوین در مقابله با چالش‌های پیچیده پزشکی، نقش [illegible] کند و به تحول و پیشرفت‌های جدید در عرصه درمان [۵].

در ادامه، به بررسی تعدادی از تحقیقات اخیر در زمینه ربات‌های میکروسکوپی برای دارورسانی هوشمند پرداخته می‌شود. این تحقیقات به تحلیل پیشرفت‌های جدید در طراحی و کاربرد ربات‌های میکروسکوپی برای بهبود دقت و اثربخشی دارورسانی به نواحی خاص بدن می‌پردازند. علاوه بر این، چالش‌های مرتبط با این فناوری و کاربردهای بالقوه آن در زمینه‌های بالینی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

احمد و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به بررسی استفاده از ربات‌های میکروسکوپی برای دارورسانی به تومورها پرداختند. آنها ربات‌های میکروسکوپی را با قابلیت‌های تصویربرداری پیشرفته طراحی کردند که قادر به شناسایی و هدف‌گیری تومورهای سرطانی با دقت بالا بودند. نتایج تحقیق نشان داد که این ربات‌ها می‌توانند به طور مؤثر دارو را به تومورهای هدف برسانند و تأثیرات درمانی را بهبود بخشند. این فناوری می‌تواند به کاهش عوارض جانبی درمان‌های سنتی کمک کند و بهبود قابل توجهی در درمان سرطان‌ها به وجود آورد[۶].

لی و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی وضعیت کنونی و چالش‌های پیش روی استفاده از ربات‌های میکروسکوپی در حوزه زیست پزشکی پرداخته اند. این تحقیق به‌طور جامع مشکلات فنی و علمی مرتبط با طراحی، ساخت و کاربرد این ربات‌ها در محیط‌های بیولوژیک را تحلیل می‌کند. از جمله چالش‌های عمده، می‌توان به مشکلات مربوط به کنترل و هدایت دقیق این ربات‌ها در محیط‌های پیچیده زیستی، ادغام مناسب آنها با سیستم‌های بیولوژیک و مسائل مربوط به پایداری و عملکرد در شرایط مختلف اشاره کرد.نتایج مقاله نشان می‌دهند که اگرچه ربات‌های میکروسکوپی پتانسیل‌های زیادی برای پیشرفت در درمان‌ها و تشخیص‌های پزشکی دارند، هنوز بسیاری از مشکلات و موانع برای کاربرد عملی آنها باید برطرف شوند. بهبود این فناوری و رفع چالش‌های موجود نیازمند تلاش‌های تحقیقاتی گسترده‌تر، نوآوری‌های تکنولوژیک و همکاری‌های بین‌رشته‌ای است. پیشرفت در این حوزه می‌تواند به تحول اساسی در روش‌های درمانی و تشخیصی منجر شود و بهبود قابل توجهی در کیفیت زندگی بیماران به همراه داشته باشد.

انتقال و حمل ربات‌های میکروسکوپی برای کاربردهای زیست‌پزشکی بسیار مهم است. این ربات‌ها باید به ناحیه دقیق بدن، با تراکم مناسب و در زمان مناسب منتقل شوند(شکل ۱) . با توجه به پیچیدگی محیط‌های زیستی و نیاز به عبور از شبکه‌های پیچیده و نفوذ به بافت‌ها، این کار چالش‌برانگیز است. محققان تاکنون بر ساخت ربات‌های تکی با حرکت دقیق در محیط‌های پیچیده تمرکز کرده‌اند، اما برای کاربردهای بالینی که نیاز به حرکت تعداد زیادی ربات دارد، این رویکرد کافی نیست [۷].



شکل ۱. ملاحظات و استراتژی‌ها برای انتقال ربات‌های میکروسکوپی درون بدن [۷].

رن و همکاران (۲۰۲۳) به تحلیل طراحی و کاربرد ربات‌های میکروسکوپی خوراکی که به طور خاص برای تحویل دارو از طریق دستگاه گوارش توسعه یافته‌اند، پرداخته اند. این تحقیق به بررسی نوآوری‌های جدید در فناوری ربات‌های میکروسکوپی و چالش‌های مرتبط با استفاده از آنها برای دارورسانی دقیق و مؤثر می‌پردازد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که این ربات‌ها قادرند داروها را با دقت بالا به نواحی هدف بدن منتقل کرده و بهبود قابل توجهی در اثربخشی درمان‌های دارویی ایجاد کنند. این فناوری به‌ویژه در درمان‌های خوراکی می‌تواند به کاهش عوارض جانبی، افزایش دقت درمان کمک کند، که نویدبخش و قابل توجهی در این حوزه است[۸].

۲- طراحی و ساخت ربات‌های میکروسکوپی

فناوری‌های دارورسانی سنتی معمولاً با محدودیت‌هایی مانند تحویل غیردقیق دارو و عوارض جانبی بالا همراه هستند. ربات‌های میکروسکوپی و نانوربات‌ها به عنوان یک راه‌حل نوآورانه، قابلیت‌های جدیدی را در زمینه دارورسانی ارائه می‌دهند. این ربات‌ها با توانایی دسترسی به نواحی دور از دسترس بدن، می‌توانند داروها را با دقت و کنترل بالا به سلول‌ها و بافت‌های خاص برسانند.

طراحی ربات‌های میکروسکوپی شامل پارامترهای مختلفی همچون اندازه، شکل، و مواد سازنده است که همگی برای بهینه‌سازی عملکرد در محیط بدن انسان تنظیم می‌شوند. نانوربات‌ها اغلب از مواد زیست‌سازگار نظیر پلیمرها، فلزات زیست‌پذیر، و نانوذرات ساخته می‌شوند که قابلیت تعامل مناسب با بافت‌های بیولوژیکی را دارند [۹].

طراحی و ساخت ربات‌های میکروسکوپی مستلزم بهره‌گیری از مواد و تکنیک‌های پیشرفته‌ای است که برای ارائه دارورسانی کارآمد و دقیق، باید به جنبه‌های مختلفی توجه داشته باشند. این موارد شامل انتخاب مواد مناسب، بهینه‌سازی روش‌های ساخت و تضمین قابلیت هدایت و کنترل دقیق ربات‌ها در محیط‌های بیولوژیکی پیچیده است. در ادامه به شرح مواد و روش‌های ساخت این ربات‌ها می‌پردازیم:

۲-۱- مواد و روش های ساخت

طراحی و ساخت ربات‌های میکروسکوپی به دانش گسترده‌ای در زمینه مواد زیست‌سازگار و تکنیک‌های ساخت پیشرفته نیاز دارد. این ربات‌ها به دلیل نیاز به سازگاری با محیط بیولوژیکی بدن و تحویل دقیق داروها، از مواد و فناوری‌هایی استفاده می‌کنند که به‌طور خاص برای کاربردهای زیستی طراحی شده‌اند [۱۰].

۲-۱-۱- مواد مورد استفاده در ساخت ربات‌های میکروسکوپی

مواد زیست سازگار: مواد استفاده‌شده در ربات‌های میکروسکوپی باید از نظر زیست‌سازگاری مناسب باشند تا از واکنش‌های نامطلوب بدن جلوگیری شود. این مواد باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که نه‌تنها برای بدن بی‌ضرر باشند، بلکه بتوانند در محیط زیستی بدن تجزیه و متابولیزه شوند [۱۱]. مواد زیست سازگار متداول عبارتند از:

پلیمرهای بیولوژیکی: پلیمرهای بیولوژیکی به دلیل ویژگی‌های خاصی مانند تجزیه‌پذیری زیستی و سازگاری با بافت‌های بدن، نقش مهمی در پیشرفت مواد زیستی و پزشکی دارند. این پلیمرها به‌ویژه در زمینه‌هایی مانند مهندسی بافت، بخیه‌های قابل جذب، و سیستم‌های دارورسانی کاربرد دارند. از نمونه‌های بارز این پلیمرها می‌توان به پلی‌لاکتیک اسید[۳] (PLA) و پلی‌گلیکولیک اسید[۴] (PGA) اشاره کرد که به دلیل تجزیه‌پذیری بالا و عدم تحریک سیستم ایمنی بدن، مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته‌اند.

پلیمرهای بیولوژیکی مانند پلی‌لاکتیک اسید و پلی‌گلیکولیک اسید به دلیل تجزیه‌پذیری زیستی بالا و عدم تحریک سیستم ایمنی بدن در کاربردهای پزشکی و مهندسی زیستی بسیار مورد توجه قرار دارند. PLA که از منابع تجدیدپذیر تولید می‌شود، به سرعت در محیط زیست تجزیه شده و محصولات تجزیه‌اش به دی‌اکسید کربن و آب تبدیل می‌شود، در حالی که PGA ، با تجزیه مشابه، در بدن به آرامی جذب شده و دفع می‌شود. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که هر دو پلیمر برای استفاده در داربست‌های زیستی، بخیه‌های قابل جذب و سیستم‌های دارورسانی مناسب باشند، زیرا آنها خطر واکنش‌های التهابی را به حداقل می‌رسانند و به بهبود و ترمیم بافت‌ها کمک می‌کنند.

نانوذرات طلا: این نانوذرات به دلیل خاصیت زیست‌سازگاری و قابلیت اتصال به مولکول‌های زیستی برای کاربردهای دارورسانی و تصویربرداری به‌کار می‌روند [۱۲].

مواد کامپوزیتی زیستی: ترکیباتی که از مواد زیست‌سازگار و اجزای عملکردی مانند نانوذرات مغناطیسی یا فلزات زیستی تشکیل شده‌اند. این مواد نه‌تنها در بدن قابل تجزیه هستند، بلکه می‌توانند برای کنترل حرکت و هدایت ربات‌ها نیز استفاده شوند [۱۳]. متداول ترین مواد کامپوزیتی زیستی عبارتند از :

کامپوزیت PLA/PGA: این ماده ترکیبی از پلی‌لاکتیک اسید و پلی‌گلیکولیک اسید است که خواص مکانیکی بهتری نسبت به هر یک از مواد منفرد دارد. به دلیل تجزیه‌پذیری و بهبود خواص مکانیکی، برای دارورسانی طولانی‌مدت و ساخت ایمپلنت‌ها استفاده می‌شود[۱۴].

نانوکامپوزیت کیتوزان/گرافن: ترکیبی از کیتوزان (پلیمر طبیعی زیست‌سازگار) و گرافن است که علاوه بر زیست‌سازگاری، خواص هدایت الکتریکی را نیز داراست. این ماده برای ترمیم بافت‌های عصبی و دارورسانی کاربرد دارد[۱۵].

کامپوزیت هیدروکسی‌آپاتیت/کلاژن: این ماده ترکیبی از هیدروکسی‌آپاتیت (ماده اصلی معدنی استخوان) و کلاژن (پروتئین اصلی بافت پیوندی) است که شباهت زیادی به بافت استخوان دارد و تجزیه‌پذیر است. از این ماده برای ترمیم استخوان و دارورسانی موضعی استفاده می‌شود[۱۶].

ماده استفاده‌شده	ویژگی‌های زیست‌سازگاری	کاربردها
پلی‌لاکتیک اسید(PLA)	تجزیه‌پذیر، عدم تحریک سیستم ایمنی	دارورسانی،مهندسی بافت
پلی‌گلیکولیک اسید (PGA)	تجزیه‌پذیر، بی‌ضرر برای بدن	بخیه‌های قابل جذب، سیستم‌های دارورسانی
نانوذرات طلا	زیست‌سازگار، قابل تجزیه	تحویل داروهای ضدسرطان، تصویربرداری
کامپوزیت PLA/PGA	تجزیه‌پذیر، خواص مکانیکی بهبود یافته	دارورسانی طولانی‌مدت، ایمپلنت‌ها

3. Polylactic Acid
4. Polyglycolic Acid

عنوان	شرح
تکنولوژی‌های ساخت	لیتوگرافی نانو، فناوری MEMS ، مهندسی میکروسیالات
مواد سازنده	پلیمرهای بیولوژیکی(PLA و PGA) ، نانوذرات طلا، فلزات زیست‌پذیر
مکانیسم‌های هدایت	میدان‌های مغناطیسی، امواج صوتی، روش‌های شیمیایی
کاربردهای بالینی	تحویل دارو به تومورهای سرطانی، ارزیابی دقیق بیماری‌ها، تصویربرداری بالینی، درمان‌های شخصی‌سازی‌شده
چالش‌ها	هدایت و کنترل دقیق، زیست‌سازگاری و ایمنی، قابلیت حرکت در محیط‌های پیچیده بدن، کاهش عوارض جانبی
چشم‌انداز آینده	پیشرفت در قابلیت‌های حرکتی، توسعه سیستم‌های هوشمند کنترل حرکت، استفاده از سنسورهای دقیق، آزمایش‌های دقیق برای ارزیابی عملکرد در شرایط واقعی، بهبود کیفیت درمان و کاهش هزینه‌های پزشکی

نانوکامپوزیت کیتوزان/گرافن	زیست‌سازگار، هدایت الکتریکی	ترمیم بافت‌های عصبی، دارورسانی
کامپوزیت هیدروکسی‌آپاتیت/کلاژن	شباهت به بافت استخوان، تجزیه‌پذیر	ترمیم استخوان، دارورسانی موضعی

جدول ۱. مواد مورد استفاده در ساخت ربات‌های میکروسکوپی

استفاده از مواد زیست‌سازگار به این معنی است که پس از انجام وظیفه، ربات‌ها یا باید به‌طور ایمن از بدن دفع شوند یا در صورت باقی‌ماندن، به‌طور طبیعی تجزیه و بدون آسیب به بدن از طریق مسیرهای متابولیکی دفع شوند. این ویژگی‌ها مانع از تجمع مواد در بافت‌ها و اعضا شده و خطرات بلندمدت را کاهش می‌دهد.

۲-۱-۲- روش های ساخت ربات‌های میکروسکوپی

برای ساخت ربات‌های میکروسکوپی، از روش‌های پیشرفته‌ای نظیر لیتوگرافی نوری، الکترواسپینینگ، و تکنیک‌های چاپ سه‌بعدی در نانومقیاس استفاده می‌شود. این روش‌ها امکان تولید دقیق و سفارشی این ربات‌ها را فراهم می‌کنند تا بتوان به طور دقیق و به‌صورت منظم قطعات و ساختارهای میکروساختاری را ایجاد کرد. همچنین، تکنیک‌های جدیدی مانند نانومولکول‌سازی نیز برای ساخت قطعات پیچیده و میکروساختارهای چندلایه مورد استفاده قرار می‌گیرند که این تکنولوژی‌ها به محققان امکان می‌دهند تا ربات‌های میکروسکوپی را با دقت بالا و با توانایی‌های متنوع ساختاری طراحی کنند.

لیتوگرافی نوری: لیتوگرافی نوری یکی از روش‌های متداول برای ساخت ربات‌های میکروسکوپی است. این تکنیک، با استفاده از پرتوهای نوری برای ایجاد الگوهای دقیق روی سطح مواد، امکان تولید ساختارهای میکروسکوپی با دقت بالا را فراهم می‌کند. این روش برای تولید قطعات کوچک و پیچیده با ویژگی‌های دقیق مناسب است [۱۷].

جدول ۲: فناوری‌ها، مواد سازنده، مکانیسم‌های هدایت و کاربردهای بالینی ربات‌های میکروسکوپی در دارورسانی هوشمند

الکترواسپینینگ: الکترواسپینینگ فرآیندی است که از نیروهای الکتریکی برای ایجاد الیاف نانو استفاده می‌کند. این تکنیک به‌ویژه برای ساخت ساختارهای فیبری با قطر در مقیاس نانو مفید است و می‌تواند برای تولید پوسته‌های نانوفیبر استفاده شود که داروها را در خود جای می‌دهند [۱۸].

چاپ سه‌بعدی در نانومقیاس: چاپ سه‌بعدی در نانومقیاس یک روش نوین است که با استفاده از مواد زیست‌سازگار، امکان تولید دقیق و سفارشی ساختارهای پیچیده را فراهم می‌کند. این روش به‌ویژه برای ساخت قطعات با طراحی پیچیده و نیازمند دقت بالا مناسب است و می‌تواند اجزای میکروسکوپی را با قابلیت‌های عملکردی متفاوت تولید کند [۱۹].

نانومولکول‌سازی: نانومولکول‌سازی تکنیکی است که به تولید ساختارهای چندلایه در مقیاس نانو می‌پردازد. این روش برای ساخت قطعات پیچیده و میکروساختارهایی که نیاز به ترکیب چندین عملکرد در یک ربات دارند، به‌کار می‌رود. با استفاده از این تکنیک، امکان ایجاد ساختارهای دقیق با توانایی‌های مختلف فراهم می‌شود [۲۰].

با استفاده از این مواد و روش‌های پیشرفته، امکان ساخت ربات‌های میکروسکوپی که قادر به حمل دقیق و ارسال مواد دارویی به نقاط مشخص در بدن باشند، ممکن می‌شود. این پیشرفت‌ها در زمینه تکنولوژی ساخت، بهبود مستمری را در زمینه

داروسانی هوشمند و درمان‌های پزشکی ارائه می‌دهند که می‌تواند به بهبود کیفیت درمان بیماران کمک کند و اثرات جانبی داروها را کاهش دهد.ترکیب مواد زیست‌سازگار و روش‌های ساخت پیشرفته، امکان تولید ربات‌های میکروسکوپی را فراهم می‌کند که قادر به حمل دقیق داروها به نقاط مشخص در بدن هستند. این ربات‌ها با دارا بودن قابلیت‌های مکانیکی و زیستی پیشرفته، می‌توانند به‌طور مؤثر داروها را به سلول‌ها و بافت‌های هدف تحویل دهند، که به بهبود کیفیت درمان و کاهش عوارض جانبی کمک می‌کند.

در نتیجه استفاده از مواد زیست‌سازگار و تکنیک‌های ساخت پیشرفته در طراحی و ساخت ربات‌های میکروسکوپی، امکانات بی‌نظیری برای دارورسانی دقیق و مؤثر فراهم آورده است. این ربات‌ها نه تنها قابلیت تطبیق با محیط‌های پیچیده بدن را دارند، بلکه می‌توانند به‌طور مؤثر داروها را به نقاط هدف برسانند و پس از انجام وظیفه به‌طور ایمن از بدن دفع شوند. پیشرفت‌های مداوم در این حوزه به بهبود کیفیت درمان بیماران و کاهش عوارض جانبی داروها کمک خواهد کرد.

۳- سیستم‌های هدایت و حرکت

سیستم‌های هدایت و حرکت برای کنترل دقیق موقعیت و عملکرد ربات‌های میکروسکوپی در بدن از تکنیک‌های پیشرفته‌ای مانند میدان‌های مغناطیسی، امواج صوتی، و محرک‌های شیمیایی بهره می‌گیرند. این سیستم‌ها نقش کلیدی در هدایت ربات‌ها به محل‌های دقیق درمانی و تضمین تحویل مؤثر دارو دارند و به طور همزمان حرکت آن‌ها را در محیط پیچیده و متغیر بدن مدیریت می‌کنند. کارایی این سیستم‌ها به قابلیت تطبیق با شرایط متغیر بدن و دقت در رسیدن به اهداف درمانی بستگی دارد، که به بهبود اثربخشی درمان و کاهش عوارض جانبی کمک می‌کند و به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند که به شرح زیر می‌باشند:

۳-۱- هدایت مغناطیسی

هدایت مغناطیسی، روشی پیشرفته برای کنترل حرکت و موقعیت‌یابی ربات‌های میکروسکوپی است که از میدان‌های مغناطیسی برای هدایت دقیق این ربات‌ها در بدن استفاده می‌کند. در این روش، میدان‌های مغناطیسی می‌توانند از منابع خارجی نظیر کویل‌های الکتریکی یا آهنرباهای دائمی یا حتی از منابع داخلی تعبیه‌شده در نزدیکی محل هدف فراهم شوند. این ربات‌ها به مواد مغناطیسی مانند نانوذرات آهن یا آلیاژهای مغناطیسی مجهز هستند که باعث می‌شود تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی به سمت مناطق خاصی حرکت کنند. کنترل این میدان‌ها از خارج بدن امکان هدایت دقیق ربات‌ها به نقاط مورد نظر را فراهم می‌کند، که برای کاربردهایی مانند تحویل دارو به محل‌های دور از دسترس یا اهداف خاص در بدن بسیار مفید است.

استفاده از میدان‌های مغناطیسی خارجی برای هدایت ربات‌های میکروسکوپی به‌دلیل غیرتهاجمی بودن و قابلیت کنترل بالا، محبوبیت زیادی دارد. میدان‌های مغناطیسی به‌طور دقیق می‌توانند شدت و جهت خود را تنظیم کنند، به‌طوری که ربات‌ها بتوانند مسیر خود را مطابق با نیازهای درمانی تغییر دهند.

این روش اجازه می‌دهد ربات‌ها بدون نیاز به جراحی و با کمترین تداخل با بافت‌های سالم، به محل‌های هدف برسند. به‌عنوان مثال، در درمان تومورهای سرطانی، ربات‌های مجهز به نانوذرات مغناطیسی می‌توانند به‌طور دقیق به محل تومور هدایت شده و داروهای ضدسرطان را مستقیماً به سلول‌های توموری تحویل دهند. این روش هدایت علاوه بر افزایش اثربخشی دارو، به‌طور قابل توجهی عوارض جانبی را کاهش می‌دهد، زیرا دارو به طور مستقیم و متمرکز به هدف می‌رسد، و از پخش شدن آن در سایر نواحی بدن جلوگیری می‌شود [۲۱ و ۲۲].

۳-۲- هدایت شیمیایی

هدایت شیمیایی در ربات‌های میکروسکوپی بر پایه تشخیص و واکنش به تغییرات شیمیایی محیط اطراف استوار است. این ربات‌ها به سنسورها و سیستم‌های تشخیص شیمیایی مجهز هستند که

می‌توانند غلظت‌های متفاوت مواد شیمیایی را شناسایی کرده و بر اساس این تغییرات، جهت حرکت خود را تعیین کنند. به‌عنوان مثال، ربات‌ها ممکن است به غلظت‌های بالای گلوکز، اکسیژن، یا حتی سیگنال‌های شیمیایی ناشی از سلول‌های سرطانی واکنش نشان دهند و به سمت نواحی با این مشخصات خاص حرکت کنند. این روش هدایت به‌ویژه در محیط‌های بیولوژیکی پیچیده و نواحی که دسترسی مستقیم به آن‌ها دشوار است، نظیر اعماق بافت‌ها یا نواحی محصور، کاربرد فراوان دارد.

کاربرد هدایت شیمیایی در سیستم‌های بیولوژیکی مزایای زیادی دارد، از جمله قابلیت نفوذ به نواحی با دسترسی محدود و شناسایی دقیق اهداف بر اساس نشانگرهای شیمیایی خاص. این قابلیت به ربات‌ها اجازه می‌دهد تا در مسیرهای شیمیایی متفاوت حرکت کرده و به مناطق هدف که ممکن است با روش‌های هدایت مکانیکی یا مغناطیسی دسترسی به آن‌ها مشکل باشد، برسند. به‌عنوان مثال، در درمان التهاب‌ها یا عفونت‌ها، ربات‌ها می‌توانند به سمت نواحی با غلظت بالای مولکول‌های التهابی یا عفونی حرکت کنند و داروها را دقیقاً در محل‌های مورد نیاز آزاد کنند. این روش به بهبود اثربخشی درمان کمک کرده و کاهش عوارض جانبی ناشی از پراکندگی دارو در سایر نواحی بدن را امکان‌پذیر می‌سازد [۲۳].

۳-۳- هدایت بیومیمتیک[5]

هدایت بیومیمتیک در ربات‌های میکروسکوپی، بر مبنای تقلید از مکانیسم‌های حرکتی موجود در طبیعت برای افزایش کارایی و تطبیق‌پذیری آن‌ها در محیط‌های بیولوژیکی طراحی شده است. این روش با استفاده از ساختارها و حرکات طبیعی مانند حرکت شناوری، بال‌زدن حشرات، یا پیچیدن پروانه‌ها، به ربات‌ها اجازه می‌دهد تا در محیط‌های پیچیده و متنوع بدن، مانند بافت‌ها و اعضای بدن، به‌طور مؤثرتری عمل کنند. حرکت شناوری می‌تواند برای ربات‌هایی که در مایعات بدن حرکت می‌کنند، الهام‌بخش باشد و به آن‌ها کمک کند تا با کمترین انرژی در محیط‌های سیال مانند خون یا مایع بینابینی جابه‌جا شوند. پروانه‌های مینیاتوری نیز می‌توانند برای ربات‌هایی که نیاز به حرکت در فضاهای محدود یا پیچیده دارند، الگویی کارآمد فراهم کنند.

استفاده از هدایت بیومیمتیک به‌طور خاص در محیط‌های بیولوژیکی که نیاز به مانور و حرکت دقیق دارند، کارایی بالایی دارد. این مکانیسم‌ها به ربات‌ها امکان می‌دهند تا با انعطاف‌پذیری و سازگاری بیشتری به موانع طبیعی و ساختاری بدن پاسخ دهند. برای مثال، ربات‌هایی که از الگوهای حرکتی مشابه با آمیب‌ها یا باکتری‌ها استفاده می‌کنند، می‌توانند به‌خوبی از میان فضاهای تنگ و پیچیده بافت‌های بدن عبور کنند و به مناطق هدف برسند. این تطابق با محیط طبیعی بدن نه‌تنها حرکت و هدایت ربات‌ها را بهینه می‌کند، بلکه می‌تواند در کاهش آسیب به بافت‌ها و افزایش دقت در تحویل داروها و انجام وظایف درمانی مؤثر باشد.

سیستم‌های هدایت و حرکت در ربات‌های میکروسکوپی، با امکانات و ویژگی‌های منحصر به فردشان، نقش کلیدی در توسعه و بهبود روش‌های دارورسانی هوشمند در بدن انسان ایفا می‌کنند. این سیستم‌ها، از جمله هدایت مغناطیسی، شیمیایی، و بیومیمتیک، با بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته و دقیق، قادرند ربات‌ها را به‌طور دقیق به سمت محل‌های هدف حرکت دهند و داروها را به نقاط خاصی از بدن تحویل دهند. دقت بالای این سیستم‌ها در کنترل و هدایت، امکان رسیدن به نواحی دور از دسترس یا پیچیده را فراهم کرده و به ربات‌ها اجازه می‌دهد تا بدون تداخل زیاد با بافت‌های سالم، به وظایف درمانی خود بپردازند.

در کاربردهای پزشکی و داروسازی، این سیستم‌ها با بهبود کیفیت و اثربخشی درمان‌ها، تحولی اساسی ایجاد کرده‌اند. با هدایت دقیق ربات‌ها به محل‌های مورد نظر، داروها می‌توانند به‌طور متمرکز و مؤثر به بافت‌های بیمار منتقل شوند، که این امر به کاهش عوارض جانبی ناشی از پراکندگی دارو در بدن کمک می‌کند. این پیشرفت‌ها نه‌تنها به بهبود نتایج درمانی و افزایش دقت در دارورسانی منجر می‌شود، بلکه قابلیت انجام درمان‌های پیچیده و شخصی‌سازی شده را نیز به طور چشمگیری ارتقا

5. Biomimetic Guidance

می‌دهد، که در نهایت به افزایش کیفیت زندگی بیماران می‌انجامد [۲۴ و ۲۵].

٤- مکانیسم‌های رهایش دارو

مکانیسم‌های رهایش دارو در ربات‌های میکروسکوپی برای کنترل دقیق و آزادسازی دارو در پاسخ به محرک‌های محیطی، یکی از جنبه‌های حیاتی در تکنولوژی دارورسانی هوشمند محسوب می‌شود. این مکانیسم‌ها به‌طور خاص برای تحریک واکنش‌های دارو در محیط‌های خاص طراحی می‌شوند، به‌طوری که داروها با دقت و به موقع در نقاط مشخصی از بدن آزاد شوند.

به‌عنوان مثال، این مکانیسم‌ها ممکن است بر اساس تغییرات شیمیایی، فیزیکی یا حرارتی در محیط فعال شوند و داروها را دقیقاً در مکان‌هایی که نیاز به آن‌ها وجود دارد، آزاد کنند. این رویکرد به افزایش دقت و کارایی دارورسانی منجر می‌شود، زیرا داروها تنها در محل‌های مورد نیاز و به مقدار مناسب آزاد می‌شوند و به این ترتیب از عوارض جانبی ناخواسته کاسته می‌شود.

این مکانیسم‌ها از جمله سیستم‌های کنترل‌شده‌ای هستند که باعث می‌شوند داروها به تناسب و به‌صورت دقیق در محیط مورد نظر تحریک شوند و در نتیجه، بهبود موثری در اثربخشی درمانی و کاهش عوارض جانبی داروها ایجاد می‌کنند. این قابلیت‌ها به ربات‌های میکروسکوپی اجازه می‌دهند تا به عنوان وسیله‌ای پیشرفته و هوشمند، به طور موثر در تحویل دقیق داروها و انجام فعالیت‌های درمانی در بدن انسان مشارکت کنند، که در نتیجه بازده و کیفیت درمان‌های پزشکی را بهبود می‌بخشند [۲۶].

در ادامه، به تفصیل به مکانیسم‌های اصلی مورد استفاده در این زمینه می‌پردازیم:

٤-١- سیستم‌های حساس به pH

سیستم‌های دارورسانی هوشمند بر اساس تغییرات pH محیط عمل می‌کنند که این تغییرات به‌طور خاص در محیط‌هایی مانند تومورها که اسیدیته بالایی دارند، قابل مشاهده هستند. این سیستم‌ها از رویکردهای مهندسی شیمیایی استفاده می‌کنند تا داروها را در یک پوشش محافظتی (مثلاً کپسول یا نانوذرات) قرار دهند که با pH اسیدی ترمیمی مواجه شود. این پوشش معمولاً از موادی تشکیل شده است که در pH نرمال بدن (حدود ۷/۴) پایدارند، اما در pH پایین‌تر (حدود ۵/۵–۶/۸) که در تومورها یا نواحی بیماری‌زای دیگری موجود است، تخریب می‌شوند.

وقتی که ربات میکروسکوپی به ناحیه مورد نظر در بدن می‌رسد و با محیط اسیدی تماس می‌گیرد، پوشش حفاظتی دارو تخریب می‌شود و داروها آزاد می‌شوند. این فرآیند به دقت بیشتر و هدفمندتر در تحویل داروها به نقاط مشخص در بدن منجر می‌شود. به‌این ترتیب، تمرکز دارو در ناحیه مورد نظر افزایش می‌یابد و احتمال ایجاد اثرات جانبی در مناطق سالم کاهش می‌یابد.

استفاده از این سیستم‌ها در تکنولوژی دارورسانی هوشمند، از جمله جنبه‌های پیشرفته در پژوهش‌های پزشکی است که بهبود مستمری در تحویل داروها و افزایش کارایی در درمان‌ها را ایجاد می‌کند. این روش‌ها نه‌تنها امکانات درمانی را بهبود می‌دهند، بلکه به عنوان یک روش هدفمند و هوشمند برای ارسال داروها به نقاط دقیق‌تر بدن عمل می‌کنند، که این امر به تجربه بهتر بیماران و کاهش هزینه‌های درمانی کمک می‌کند [۲۷].

٤-٢- سیستم‌های حساس به دما

سیستم‌های حساس به دما در تکنولوژی دارورسانی هوشمند بر اساس تغییرات دما در محیط عمل می‌کنند. این سیستم‌ها معمولاً برای واکنش به تحریک‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مانند تغییرات دما در نواحی موضعی مانند تومورها یا مناطق آلوده به التهابات. داروها در این سیستم‌ها به صورت کپسول یا نانوذراتی با پوشش حساس به دما قرار می‌گیرند. این پوشش معمولاً از موادی تشکیل شده است که در دماهای نرمال بدن (حدود ۳۷ درجه سانتی‌گراد) پایدار هستند، اما با افزایش دما به یک حد خاص (مانند ۳۹–۴۲ درجه سانتی‌گراد)، تخریب می‌شوند.

وقتی که ربات میکروسکوپی به منطقه مورد نظر در بدن می‌رسد و دما به حد مورد نظر افزایش می‌یابد (به عنوان مثال، در ناحیه توموری که دما بیشتر از دیگر مناطق بدن است)، پوشش حساس به دما دارو تخریب می‌شود و داروها آزاد می‌شوند. این فرآیند باعث می‌شود که داروها فقط در محل و زمان مناسب آزاد شوند، که بهبود قابل توجهی در دقت و اثربخشی درمانی ایجاد می‌کند. همچنین، احتمال ایجاد اثرات ناخواسته در مناطق سالم بدن به حداقل می‌رسد، که این امر به کاهش عوارض جانبی و بهبود کیفیت درمان‌ها کمک می‌کند. استفاده از این سیستم‌ها در تحویل داروها به نقاط دقیقتر بدن، از اهمیت بالایی برخوردار است و به توسعه‌ی پزشکی هدفمندتر و کارآمدتر کمک می‌کند [۲۸].

٤-۳- سیستم‌های لایه‌بردار

سیستم‌های لایه‌بردار در تکنولوژی دارورسانی هوشمند از لایه‌برداری مکانیکی یا شیمیایی برای آزادسازی دارو استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها به طور عمومی شامل مواد حاجب هستند که دارو را در داخل لایه‌های مختلفی قرار می‌دهند. این لایه‌های حاجب معمولاً با تغییرات محیطی خاص، مانند pH، دما یا تراکم یونی، تخریب می‌شوند که این امر به آزادسازی دارو منجر می‌شود.

یکی از روش‌های شایع در این سیستم‌ها، استفاده از لایه‌های حاجب حاوی پلیمرهای حساس به pH است. در این حالت، دارو در داخل یک کپسول یا نانوذراتی که پوشش حاوی این پلیمرها است، قرار می‌گیرد. وقتی ربات به ناحیه مورد نظر در بدن می‌رسد، اگر محیط اطراف اسیدیته بالایی داشته باشد (مانند ناحیه‌های توموری)، پلیمرها حساس به pH که پوشش دارو را تشکیل می‌دهند، تخریب می‌شوند. این فرآیند باعث آزادسازی دقیق و محلی دارو در نقطه‌ای خاص می‌شود که نیاز به درمان دارد، در حالی که اثرات جانبی در مناطق دیگر بدن کاهش می‌یابد.

سیستم‌های لایه‌بردار به دلیل امکان کنترل دقیق و خودکار آزادسازی دارو در زمان‌های مختلف، بهبود قابل توجهی در کیفیت درمان‌ها و اثربخشی داروسانی ایجاد می‌کنند. این روش‌ها نه‌تنها به افزایش دقت در تحریک محلی کمک می‌کنند بلکه به کاهش نیاز به تزریق‌های مکرر دارو و کاهش هزینه‌های درمانی نیز منجر می‌شوند [۲۹].

به طور کلی مکانیسم‌های رهایش دارو در ربات‌های میکروسکوپی از تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای هستند که به دقت و کنترل بالا در تحویل داروها به نقاط خاص در بدن انسان کمک می‌کنند. این سیستم‌ها بر اساس واکنش به محرک‌های محیطی مانند تغییرات دما، pH، نور، یا تحریک‌های شیمیایی طراحی شده‌اند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای آن‌ها در داروسازی هوشمند، استفاده از داروها در نواحی خاص مانند تومورها است. به عنوان مثال، در صورتی که یک ربات میکروسکوپی به ناحیه توموری برسد که محیط آن اسیدی است، پوشش حاوی دارو که حساس به pH است، تخریب شده و دارو به صورت آزاد در محل تومور منتشر می‌شود. این عمل باعث کاهش اثرات جانبی دارو در سایر اجزای بدن و افزایش دقت درمانی می‌شود.

استفاده از مکانیسم‌های رهایش دارو در ربات‌های میکروسکوپی به پیشرفت‌های چشمگیری در حوزه‌های پزشکی و درمانی منجر شده است. این فناوری قابلیت ارائه راهکارهای درمانی سفارشی و شخصی‌سازی شده را دارد، زیرا می‌تواند به طور دقیق به نیازهای بیماران پاسخ دهد. به علاوه، این روش‌ها می‌توانند به بهبود کیفیت درمانی کمک کنند و احتمال ایجاد عوارض جانبی را کاهش دهند، چرا که داروها فقط در محل و زمان مناسب و در مقادیر دقیقی آزاد می‌شوند. با توجه به پیچیدگی‌های بیماری‌ها و نیازهای مختلف درمانی، این فناوری می‌تواند به پزشکان ابزاری قدرتمند برای مدیریت بهتر درمان بیماران فراهم کند و به آن‌ها کمک کند تا به شکلی کاملاً هدفمند و کارآمد درمان را ارائه دهند.

۵- کاربردهای بالینی

کاربردهای بالینی ربات‌های میکروسکوپی به استفاده از این فناوری در حوزه‌های پزشکی و درمان اشاره دارد. این ربات‌ها به

دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان می‌توانند در بسیاری از زمینه‌های پزشکی مورد استفاده قرار گیرند که به تحسین و بهبود کیفیت خدمات درمانی کمک می‌کنند. برخی از کاربردهای بالینی ربات‌های میکروسکوپی شامل موارد زیر می‌شود:

۵-۱- درمان سرطان

درمان سرطان با استفاده از ربات‌های میکروسکوپی یکی از برجسته‌ترین کاربردهای این فناوری است. این ربات‌ها می‌توانند داروهای شیمی‌درمانی را به طور مستقیم به تومورها تحویل دهند و باعث افزایش غلظت دارو در محل تومور و کاهش عوارض جانبی سیستمیک شوند. ربات‌های میکروسکوپی در درمان سرطان به عنوان ابزاری بسیار قدرتمند و کارآمد شناخته می‌شوند. این ربات‌ها قادرند داروهای شیمی‌درمانی را به طور مستقیم و به صورت موضعی به تومورها تحویل دهند، که این امر منجر به افزایش غلظت دارو در محل تومور و کاهش عوارض جانبی سیستمیک می‌شود.

۵-۱-۱- هدایت مغناطیسی در درمان سرطان

از میدان‌های مغناطیسی برای هدایت ربات‌ها به تومورها استفاده می‌شود. این روش به ربات‌ها امکان می‌دهد که به صورت دقیق به نقاط مورد نظر دسترسی پیدا کرده و داروها را به محل‌های مشخص در تومور تحویل دهند، که این اقدام به بهبود تاثیر درمانی و کاهش اثرات جانبی کمک می‌کند [۳۰].

۵-۱-۲- تحویل داروهای مقاوم به شیمی‌درمانی

ربات‌های میکروسکوپی می‌توانند برای تحویل داروهای جدید و مقاوم به شیمی‌درمانی به طور هدفمند استفاده شوند. این روش به کاهش مقاومت دارویی تومورها در برابر درمان‌های شیمی‌درمانی [illegible] کند و امکان توسعه ترکیبات دارویی جدید را فراهم [illegible] ۲۵].

۵-۲- تحویل داروهای ژن‌درمانی

ربات‌های میکروسکوپی به عنوان ابزاری برای تحویل داروهای ژن‌درمانی نیز بسیار مؤثر هستند. این ربات‌ها می‌توانند مواد ژنتیکی، نظیر RNA و DNA درمانی یا ویرایشگرهای ژنی مانند CRISPR/Cas9 را به سلول‌های هدف تحویل دهند و به تغییرات ژنتیکی دقیق و اصلاح بیماری‌های ژنتیکی کمک کنند.

۵-۲-۱- تحویل ویرایشگرهای ژنی

ربات‌های میکروسکوپی می‌توانند ویرایشگرهای ژنی را به صورت مستقیم به محل‌های مورد نظر در ژنوم سلول‌ها تحویل دهند. این امر به اصلاح ژنتیکی دقیق و درمان‌های سفارشی‌سازی شده برای بیماری‌های خاص کمک می‌کند.

۵-۲-۲- تحویل RNA و DNA

این ربات‌ها می‌توانند RNA و DNA درمانی را به سلول‌ها تحویل دهند تا عملکرد ژنتیکی آن‌ها را بهبود بخشند یا ژن‌های معیوب را اصلاح کنند. این فناوری به امکان توسعه روش‌های درمانی نوین و بهبود بخشیدن به کیفیت زندگی بیماران کمک می‌کند [۳۲ و ۳۳].

۵-۳- کاربردهای تشخیصی

علاوه بر کاربردهای درمانی، ربات‌های میکروسکوپی به عنوان ابزارهای تشخیصی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ربات‌ها قادر به جمع‌آوری نمونه‌ها از نواحی خاص بدن، اندازه‌گیری نشانگرهای بیوشیمیایی، یا انجام تست‌های تشخیصی در محل هستند.

۵-۳-۱- نمونه گیری دقیق

ربات‌ها قادرند به مناطق دور از دسترس بدن دسترسی پیدا کنند و نمونه‌های دقیق و تمیز از بافت‌ها یا مایعات بیولوژیکی جمع‌آوری کنند. این امر به تشخیص دقیق‌تر و زودتر بیماری‌ها کمک می‌کند [۳۴].

۵-۳-۲- تشخیص نشانگرهای بیوشیمیایی

آن‌ها می‌توانند نشانگرهای بیوشیمیایی خاص را در بدن تشخیص دهند و اطلاعات دقیقی در مورد وضعیت بیماری‌ها فراهم کنند، که این امر به پیشگیری و درمان سریع‌تر بیماری‌ها کمک می‌کند [۳۵].

این کاربردها نشان دهنده توانایی بالقوه ربات‌های میکروسکوپی در بهبود تحولات در حوزه‌های پزشکی و بهداشتی هستند.

۵-٤- دارورسانی هدفمند

یکی از کاربردهای اصلی ربات‌های میکروسکوپی در پزشکی، داروسانی هدفمند است. این ربات‌ها می‌توانند داروها را با دقت بالا و به صورت مستقیم به ناحیه‌های مشخص در بدن انسان تحویل دهند. به عنوان مثال، درمان‌های سرطان می‌توانند از این فناوری بهره‌مند شوند تا داروها به صورت مستقیم در ناحیه توموری تحریک شوند و از اثرات جانبی کاهش یابند [۳۶].

۵-٤-۱- جراحی‌های مینیمال

ربات‌های میکروسکوپی نقش مهمی در جراحی‌های مینیمال ایفا می‌کنند، جراحی‌هایی که هدف اصلی آن‌ها کاهش میزان تهاجم و صدمات به بافت‌های سالم است. این ربات‌ها به دلیل اندازه کوچک و دقت بالای خود، قادرند به نواحی دشوار و عمیق بدن دسترسی پیدا کنند. با استفاده از این تکنولوژی، جراحان می‌توانند عملیات‌های پیچیده را با حداقل برش‌ها و تهاجم انجام دهند، که این امر منجر به کاهش درد پس از جراحی، کاهش خطر عفونت، و تسریع فرآیند بهبودی بیماران می‌شود. علاوه بر این، دقت ت‌های میکروسکوپی به جراحان امکان می‌دهد تا با ری عمل کنند، که این موضوع می‌تواند نتایج بهتری برای بیمار به همراه داشته باشد و عوارض جانبی جراحی را به حداقل برساند. [۳۷].

۵-٤-۲- تشخیص و تصویربرداری

ربات‌های میکروسکوپی می‌توانند به عنوان ابزاری برای تشخیص بیماری‌ها و تصویربرداری از بافت‌ها و اعضا در داخل بدن استفاده شوند. این امر می‌تواند در تشخیص زودرس بیماری‌ها مانند سرطان و همچنین پیگیری اثربخشی درمان‌ها مفید باشد [۳۸].

۵-٤-۳- پزشکی شخصی سازی

با استفاده از ربات‌های میکروسکوپی، امکان پزشکی شخصی‌سازی‌شده که به معنای ارائه درمان‌های متناسب با نیازهای خاص هر بیمار است، فراهم می‌شود. این ربات‌ها می‌توانند اطلاعات دقیق از بیمار را به مسئولین و مدیران بهداشت ارائه دهند تا اقدامات درمانی را بر اساس این اطلاعات بهینه‌سازی کنند.

به طور خلاصه، ربات‌های میکروسکوپی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان در حوزه پزشکی و درمان کاربردهای گسترده‌ای دارند که از جمله مهم‌ترین آنها عبارتند از: درمان سرطان با تحویل داروهای شیمی‌درمانی به صورت مستقیم به تومورها، جراحی‌های مینیمال برای کاهش تهاجم و صدمات به بافت‌های سالم، تشخیص و تصویربرداری دقیق برای زودتر و دقیق‌تر شناسایی بیماری‌ها، تحویل داروهای ژن‌درمانی و ویرایشگرهای ژنی به سلول‌های هدف، و امکان پزشکی شخصی‌سازی‌شده بر اساس نیازهای خاص هر بیمار. این فناوری قادر است بهبود کیفیت خدمات درمانی را فراهم کرده و اثرات جانبی را کاهش دهد، که می‌تواند به پیشرفت‌های بزرگ در زمینه‌های پزشکی و بهداشتی منجر شود [۳۹].

٦- چالش ها و محدودیت ها

ربات‌های میکروسکوپی در حوزه پزشکی و درمان، همچنان با چالش‌ها و محدودیت‌هایی مواجه هستند که در ادامه به شرح آنها می‌پردازیم:

٦-١- کنترل حرکت و هدایت

کنترل دقیق حرکت و هدایت ربات‌های میکروسکوپی در محیط پیچیده بدن با چالش‌های متعددی همراه است. میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی ممکن است به طور غیر یکنواخت در بدن توزیع شوند، و موانعی نظیر جریان‌های خون، بافت‌های مختلف و سیستم‌های ایمنی می‌توانند بر دقت هدایت تاثیر بگذارند

٦-١-١- تداخل با جریان‌های بیولوژیکی

جریان‌های مختلف در بدن انسان از جمله خون و سایر مایعات بیولوژیکی می‌توانند به طور غیرمنتظره حرکت ربات‌های میکروسکوپی را تحت تأثیر قرار دهند. این تداخلات می‌توانند باعث منحرف شدن مسیر حرکت ربات‌ها و کاهش دقت هدایت آنها شوند. به عنوان مثال، جریان خون در شرایط مختلف و بافت‌های مختلف ممکن است مسیر حرکت ربات را متأثر کند و باعث از دست رفتن دقت در موقعیت‌دهی و هدایت شود.

٦-١-٢- موانع فیزیکی

ساختارهای پیچیده آناتومیک و بافت‌های متراکم در بدن می‌توانند مانع حرکت آزادانه ربات‌های میکروسکوپی شوند. این موانع فیزیکی ممکن است باعث برخورد ربات با بافت‌های اطراف یا محدودیت در حرکت در فضاهای تنگ شوند. نتیجه این مشکلات، کاهش دقت و کارایی ربات در انجام وظایفش است، زیرا ربات نمی‌تواند به‌طور مؤثر و دقیق در این محیط‌های پیچیده عمل کند.

برای مواجهه با این چالش‌ها، محققان به طراحی و توسعه سیستم‌های هدایت و حرکت پیشرفته نیاز دارند که قادر باشند با [illegible]ت بیولوژیکی و موانع فیزیکی مقابله کنند و دقت و [illegible]ت‌ها را به حداکثر برسانند. استفاده از مدل‌سازی پیشرفته، الگوریتم‌های هوشمند کنترل حرکت، و سنسورهای دقیق برای مانور بهتر ربات‌ها در محیط پیچیده بدن از جمله راهکارهایی است که می‌تواند به بهبود کارایی این فناوری بزرگ کمک کند [۴۰].

٦-٢- زیست‌سازگاری و ایمنی

زیست‌سازگاری و ایمنی مواد و فناوری‌های به‌کار رفته در ربات‌های میکروسکوپی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این ربات‌ها باید قادر باشند به طور ایمن و بدون ایجاد اثرات جانبی نامطلوب در بدن انسان عمل کنند. اطمینان از زیست‌سازگاری مواد مورد استفاده به معنی کاهش احتمال واکنش‌های آلرژیک یا سمی در بدن است. علاوه بر این، فناوری‌های به‌کار رفته باید به گونه‌ای باشند که عملکرد صحیح و پایدار ربات‌ها را در محیط‌های بیولوژیکی پیچیده تضمین کنند. رعایت این اصول نه تنها ایمنی بیمار را تضمین می‌کند، بلکه به بهبود نتایج درمانی و افزایش اعتماد به استفاده از این فناوری‌های نوین در پزشکی کمک می‌کند. در ادامه به شرح دقیق و جامع این چالش‌ها و محدودیت‌ها خواهیم پرداخت:

٦-٢-١- تحریک سیستم ایمنی

استفاده از مواد نامناسب یا طراحی‌های غیربهینه در ربات‌های میکروسکوپی می‌تواند باعث تحریک سیستم ایمنی بدن شود. این تحریک ممکن است منجر به واکنش‌های ایمنی نامطلوبی شود که می‌تواند به دفع یا آسیب به ربات‌ها و حتی بافت‌های اطراف منجر شود. چنین واکنش‌هایی می‌توانند عملکرد صحیح ربات‌ها را مختل کنند و التهاباتی در اطراف آن‌ها ایجاد کنند، که این امر به کاهش کارایی و ایمنی این تکنولوژی منجر می‌شود. برای جلوگیری از این مشکلات، انتخاب مواد زیست‌سازگار و بهینه‌سازی طراحی ربات‌ها ضروری است تا بتوانند بدون تحریک سیستم ایمنی بدن به طور مؤثر عمل کنند.

٦-٢-٢- اثرات طولانی مدت

اثرات طولانی‌مدت حضور ربات‌های میکروسکوپی در بدن انسان باید با دقت مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از موادی که ممکن است به طور ناشناخته در بدن تجمع کنند یا دارای سمیت طولانی‌مدت باشند، می‌تواند به مشکلات جدی ایمنی و سلامت منجر شود. به عنوان مثال، تجمع این مواد در ارگان‌ها یا بافت‌ها می‌تواند خطرات جدی مانند سمیت سیستمیک یا تشکیل

توده‌های سمی را به دنبال داشته باشد، که این امر می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی برای بیمار شود. بنابراین، انتخاب مواد زیست‌سازگار و انجام آزمایش‌های دقیق پیش از استفاده بالینی از این ربات‌ها ضروری است تا اطمینان حاصل شود که حضور طولانی‌مدت آن‌ها در بدن ایمن و بدون خطرات جدی است.

برای پیشبرد این فناوری، ضروری است که محققان و مهندسان از موادی استفاده کنند که به‌طور مؤثر در بدن تجزیه شده و در عین حال، تحریک‌کننده واکنش‌های نامطلوب ایمنی نباشند. علاوه بر این، ارزیابی دقیق و مداوم اثرات طولانی‌مدت حضور ربات‌ها در بدن بسیار مهم است تا سلامت و ایمنی بیماران تضمین شود و از بروز مشکلات جدی پیشگیری گردد. این اقدامات به تضمین عملکرد بهینه و ایمن ربات‌های میکروسکوپی در کاربردهای پزشکی کمک می‌کند و به ارتقای کیفیت درمان و کاهش عوارض جانبی منجر می‌شود. [۴۱].

٦-۳- تولید و هزینه

تولید ربات‌های میکروسکوپی در مقیاس انبوه و با هزینه مناسب چالشی دیگر است. فرآیندهای پیچیده تولید و نیاز به تجهیزات پیشرفته می‌تواند هزینه تولید این ربات‌ها را بالا ببرد.

٦-۳-۱-تجهیزات پیشرفته

تولید ربات‌های میکروسکوپی نیازمند بهره‌گیری از تجهیزات پیچیده و دقیق برای فرآیندهای ساخت و مونتاژ است. این تجهیزات شامل دستگاه‌های پرسیژن، دستگاه‌های لیتوگرافی نانو، دستگاه‌های اپتیکال و الکترونیکال، و تجهیزات دیگر مرتبط با تولید می‌شود. هر یک از این تجهیزات نیازمند سرویس‌های بالا برای تهیه، نگهداری و به‌روزرسانی هستند که این موضوع می‌تواند هزینه تولید را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد و امکان دسترسی به این فناوری را محدود کند.

٦-۳-۲- مقیاس پذیری

تولید انبوه و مقیاس‌پذیری ربات‌های میکروسکوپی با حفظ کیفیت و کارایی یکی از چالش‌های اصلی در این حوزه است. برای رسیدن به مقیاس‌پذیری مطلوب، لازم است فرآیندهای تولید بهینه‌سازی شوند و روش‌هایی توسعه یابند که امکان تولید با کیفیت بالا و هزینه مناسب را فراهم کنند. این شامل بهبود مستمر فرآیندهای تولید، استفاده از فناوری‌های نوینی مانند چاپ سه‌بعدی در مقیاس نانومتری، و استفاده بهینه از مواد و قطعات مختلف است. همچنین، ایجاد خطوط تولید خودکار و روباتیزه می‌تواند به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها کمک کند. با این اقدامات، می‌توان به تولید انبوه ربات‌های میکروسکوپی با کیفیت و کارایی بالا در مقیاس وسیع دست یافت. [۴۲].

به طور کلی ربات‌های میکروسکوپی در حوزه پزشکی و درمان با چالش‌های متعددی روبرو هستند که می‌تواند بر کارایی و دقت آن‌ها تأثیر بگذارد. یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها، کنترل دقیق حرکت و هدایت این ربات‌ها در محیط پیچیده بدن انسان است. این ربات‌ها باید با موانع مختلفی مانند جریان‌های بیولوژیکی (مثلاً جریان خون) و بافت‌های متفاوت بدن که می‌توانند به طور غیرمنتظره حرکت ربات را تحت تأثیر قرار دهند، مقابله کنند. برای مثال، جریان خون ممکن است باعث کاهش دقت و انحراف مسیر حرکت ربات‌ها شود. همچنین، ساختارهای پیچیده آناتومیک و بافت‌های متراکم می‌توانند موانع فیزیکی ایجاد کنند که حرکت و هدایت ربات‌ها را محدود کرده و دقت عملکرد آن‌ها را کاهش دهند.

در زمینه زیست‌سازگاری و ایمنی، ضروری است که مواد و فناوری‌های استفاده‌شده در ربات‌های میکروسکوپی با بدن انسان سازگاری کامل داشته باشند. این ربات‌ها باید به طور ایمن و بدون ایجاد تأثیرات جانبی منفی در بدن عمل کنند تا از ایجاد واکنش‌های ایمنی نامطلوب یا آسیب به بافت‌های اطراف جلوگیری شود. برای مثال، استفاده از مواد نامناسب می‌تواند باعث تحریک سیستم ایمنی بدن شود و منجر به واکنش‌های غیرمنتظره‌ای گردد که ممکن است عملکرد ربات‌ها را کاهش

دهد یا التهاباتی در اطراف آن‌ها ایجاد کند. به همین دلیل، لازم است که مواد مورد استفاده به دقت بررسی شوند و تأثیرات طولانی‌مدت حضور ربات‌ها در بدن انسان به‌طور کامل ارزیابی شود تا از ایمنی و سلامت بیماران اطمینان حاصل شود و از بروز مشکلات جدی پیشگیری گردد.

برای مواجهه با این چالش‌ها و محدودیت‌ها، ضروری است که تحقیق و توسعه در فناوری‌های جدید، بهبود فرآیندهای تولید، کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی روش‌های تولید انجام شود. این اقدامات به ربات‌های میکروسکوپی این امکان را می‌دهد که به یک فناوری مؤثر و قابل استفاده در زمینه‌های پزشکی و بیوتکنولوژی تبدیل شوند و به بهبود عملکرد و کارایی درمان‌های پزشکی مدرن کمک کنند.

۷- چشم اندازهای آینده

توسعه فناوری ربات‌های میکروسکوپی همچنان ادامه دارد و چشم‌اندازهای آینده این حوزه شامل بهبود قابلیت‌های خودپیش‌رانی، افزایش دقت هدایت، و توسعه سیستم‌های رهایش دارویی پیشرفته‌تر است.

۷-۱- پیشرفت در خودپیش‌رانی

در حوزه توسعه فناوری ربات‌های میکروسکوپی، پیشرفت در خودپیش‌رانی از اهمیت بالایی برخوردار است. این پیشرفت‌ها به دلیل توانایی ربات‌ها در انجام وظایف بدون نیاز به کنترل انسانی، می‌توانند تحولات قابل توجهی در فعالیت‌های پزشکی و دیگر زمینه‌های بیولوژیکی به همراه داشته باشند. بهبود سیستم‌های نورپردازی و استفاده از سنسورهای پیشرفته، از جمله این پیشرفت‌ها هستند که می‌توانند باعث افزایش دقت در شناسایی جام عملیات دقیق‌تر در داخل بدن انسان شوند. برای های مجهز به سیستم‌های نورپردازی پیشرفته قادر به شناسایی دقیق‌تر و بازتولید بهتر تصاویر از داخل اعضای بدن می‌باشند، که این امر به پزشکان کمک می‌کند تا عملیات‌های جراحی و تشخیصی را با دقت بیشتری انجام دهند.

علاوه بر این، پیشرفت در استفاده از سنسورهای پیشرفته‌تر نیز از جمله اقداماتی است که به افزایش قابلیت‌های خودپیش‌رانی ربات‌ها کمک می‌کند. سنسورهای دقیق‌تر می‌توانند اطلاعات دقیق‌تری از محیط را به ربات‌ها ارائه دهند، که این اطلاعات اساسی برای اتخاذ تصمیمات هوشمندانه در مواقع پیچیده می‌باشند. به علاوه، افزایش دقت در شناسایی محیط و انجام عملیات می‌تواند بهبود قابلیت‌های تشخیصی و درمانی را به همراه داشته باشد و باعث افزایش کارایی و امنیت در استفاده از ربات‌های میکروسکوپی در زمینه‌های پزشکی و سایر کاربردهای بیولوژیکی گردد.

۷-۲- افزایش دقت هدایت

افزایش دقت هدایت ربات‌های میکروسکوپی یکی از چالش‌های مهم در توسعه این فناوری است که اهمیت بالایی دارد. با تحقیقات بیشتر و بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته، می‌توان بهبوداتی در سیستم‌های هدایت و کنترل ربات‌ها ایجاد کرد که به طور مستقیم منجر به افزایش دقت حرکت و موقعیت‌یابی آن‌ها در محیط‌های پیچیده (مانند داخل بدن انسان) شود. این بهبودات می‌تواند دقت انجام عملیات جراحی و تشخیصی را افزایش دهد، زیرا ربات‌های دقیق‌تر و پیشرفته‌تر می‌توانند به راحتی به نقاط مورد نظر دسترسی یابند و وظایف خود را با دقت بیشتری انجام دهند.

علاوه بر این، افزایش دقت هدایت ربات‌ها می‌تواند امکانات جدیدی را در زمینه پزشکی و سایر حوزه‌های بیولوژیکی فراهم آورد. به عنوان مثال، درمان‌های دقیق‌تر و بهینه‌تر، کاهش خطاهای عملیاتی و افزایش ایمنی در استفاده از تکنولوژی رباتیک از جمله نتایج این بهبودات هستند. این پیشرفت‌ها نیازمند طراحی و توسعه سیستم‌های هوشمند کنترل حرکت، استفاده از سنسورهای دقیق و انجام آزمایش‌های جامع برای ارزیابی عملکرد ربات‌ها در شرایط واقعی است. بنابراین، تحقیقات در این حوزه می‌توانند به بهبودات مهمی در عملکرد و کارایی ربات‌های میکروسکوپی منجر شوند که برای بهبود خدمات به بیماران و

افزایش کارایی در زمینه‌های پزشکی و دیگر صنایع بیولوژیکی ضروری هستند.

۷-۳- توسعه سیستم‌های رهایش دارویی پیشرفته‌تر

توسعه سیستم‌های رهایش دارویی پیشرفته‌تر به عنوان یکی از جوانب کلیدی فناوری رباتیک در زمینه پزشکی، به اهمیت بسیاری دست می‌دهد. این سیستم‌ها طراحی شده‌اند تا به صورت دقیق و مستقیم داروها را در نقاط مورد نیاز در بدن آزاد کنند، به خصوص در زمینه درمان سرطان و بیماری‌های دیگر. با استفاده از این سیستم‌ها، امکان ارسال داروها به طور مستقیم به منطقه مورد نیاز در بدن بدون تأثیرات جانبی نامطلوب بسیار بیشتر خواهد شد. این امر می‌تواند منجر به بهبود کارایی درمانی، کاهش عوارض جانبی و افزایش رضایت بیماران شود، زیرا که اثرات مستقیم دارو در نقطه مورد نظر هدف قرار می‌گیرد و نیاز به مصرف داروهای با دوز بالا و یا درمان‌های گسترده‌تر را کاهش می‌دهد.

برای دستیابی به این اهداف، لازم است که سیستم‌های رهایش دارویی پیچیده‌تر و با قابلیت کنترل دقیق‌تری طراحی و توسعه شوند. استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته مانند نانوتکنولوژی، سنسورهای هوشمند، و سیستم‌های خودکار کنترل دارو، می‌تواند به دقت و کارایی بالاتر این سیستم‌ها کمک کند. علاوه بر این، نیاز به آزمایش‌های بیشتر در شرایط مختلف بدن انسان اساسی است تا از عملکرد صحیح و ایمن این سیستم‌ها در محیط‌های واقعی اطمینان حاصل شود. به این ترتیب، توسعه سیستم‌های رهایش دارویی پیشرفته‌تر نقش مهمی در پیشبرد فناوری‌های پزشکی با تمرکز بر بهبود کارایی و کیفیت درمانی با داروها خواهد داشت.

۳۰ هش هزینه ها

کاهش هزینه‌های تولید ربات‌های میکروسکوپی یکی از عوامل کلیدی برای جلب استفاده گسترده از این فناوری در حوزه‌های پزشکی و دیگر صنایع است. بهبود فرآیندهای تولید و استفاده از تکنولوژی‌های نوین، مانند چاپ سه‌بعدی نانومتری و استفاده بهینه از مواد ارزان‌تر، می‌تواند به‌طور مستقیم منجر به کاهش هزینه‌های تولید این ربات‌ها شود. به عنوان مثال، استفاده از فرآیندهای تولید خودکار و روباتیزه به جای تولید دستی می‌تواند هزینه‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش داده و به افزایش کیفیت و دقت تولید کمک کند.

این اقدامات نه تنها هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهند، بلکه زمان تولید را نیز کوتاه‌تر می‌کنند، که این امر به نوبه خود می‌تواند پذیرش و استفاده گسترده‌تر از ربات‌های میکروسکوپی را در زمینه‌های مختلف تسهیل نماید.

برای افزایش مقیاس‌پذیری تولید ربات‌های میکروسکوپی نیز، لازم است که فرآیندهای تولید بهینه‌سازی شوند تا بتوان در مقیاس بزرگتری تولید انجام داد. استفاده از تجهیزات پیشرفته و به‌روز رسانی آن‌ها نیز از اهمیت بسزایی برخوردار است. این اقدامات می‌توانند به کاهش مدت زمان تولید، بهبود کیفیت محصول و حتی افزایش انعطاف‌پذیری در تولید کمک کنند. به طور کلی، برای رسیدن به هدف کاهش هزینه‌ها و افزایش مقیاس‌پذیری، نیازمند بهره‌گیری از رویکردهای نوین در طراحی و تولید ربات‌های میکروسکوپی هستیم که این امر می‌تواند از پیشرفت و گسترش این فناوری برای مصارف عمومی سود بیشتری به‌دست آورد.

توسعه فناوری ربات‌های میکروسکوپی در آینده با پیشرفت‌های چشمگیری روبرو خواهد شد، که شامل بهبود قابلیت‌های خودپیش‌رانی، افزایش دقت هدایت، و توسعه سیستم‌های رهایش دارویی پیشرفته‌تر است. این پیشرفت‌ها در خودپیش‌رانی به دلیل بهبود سیستم‌های نورپردازی، استفاده از سنسورهای پیشرفته، و دقت بیشتر در شناسایی محیط، می‌توانند عملیات پزشکی را دقیق‌تر و کارامدتر کنند.

به علاوه، توسعه سیستم‌های رهایش دارویی با استفاده از تکنولوژی‌های نانومتری و سنسورهای هوشمند، می‌تواند بهبود قابلیت درمانی داروها را فراهم آورده و عوارض جانبی را به حداقل برساند .کاهش هزینه‌های تولید و افزایش مقیاس‌پذیری نیز از جمله چالش‌های مهمی است که با بهره‌گیری از فرآیندهای نوین

و استفاده بهینه از منابع، می‌تواند پیشرفت و گسترش این فناوری را تسهیل کند، به‌طوری که ربات‌های میکروسکوپی به عنوان ابزاری اساسی در زمینه‌های پزشکی و بیولوژیکی مورد استفاده قرار گیرند و به بهبود خدمات به بیماران کمک کنند.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی فناوری نوظهور ربات‌های میکروسکوپی برای دارورسانی هوشمند پرداخته شد. این تکنولوژی، با قابلیت‌های منحصربه‌فرد خود، پتانسیل عظیمی برای تحول در روش‌های درمانی و تشخیصی مدرن دارد. با توجه به یافته‌های ارائه شده، می‌توان نتایج و دستاوردهای این فناوری را به طور مفصل‌تر بررسی کرد.

یکی از بزرگترین مزایای ربات‌های میکروسکوپی، افزایش دقت و کارایی درمان‌ها است. این ربات‌ها، که معمولاً در مقیاس نانو یا میکرو طراحی می‌شوند، توانایی حرکت و هدایت درون بدن به سمت بافت‌های هدفمند را دارند. با استفاده از این ربات‌ها، داروها می‌توانند به‌طور مستقیم به سلول‌ها یا نواحی آسیب‌دیده تحویل داده شوند، که این امر منجر به افزایش تمرکز دارو در محل مورد نظر و کاهش اثرات جانبی ناخواسته می‌شود. به‌عنوان مثال، در درمان سرطان، نانوربات‌ها می‌توانند داروهای ضدسرطان را به‌طور مستقیم به سلول‌های سرطانی تحویل دهند، که منجر به کاهش آسیب به سلول‌های سالم و افزایش اثربخشی درمان می‌شود.

تکنولوژی‌های پیشرفته مانند نانوذرات هدفمند، سامانه‌های کنترل نانومتری، و ابزارهای اپتیکال و مغناطیسی، امکان دارورسانی دقیق را فراهم آورده‌اند. این فناوری‌ها، با استفاده از روش‌های رفته نظیر لیتوگرافی نانو، فناوری MEMS، و مهندسی میکروسیالات، به ایجاد ربات‌های میکروسکوپی پیچیده و کارآمد کمک کرده‌اند. همچنین، استفاده از مواد زیست‌سازگار مانند پلیمرهای بیولوژیکی و نانوذرات طلا، امکان تعامل مناسب این ربات‌ها با بافت‌های بیولوژیکی بدن را فراهم کرده است.

علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر، چالش‌های متعددی همچنان وجود دارد. یکی از بزرگترین چالش‌ها، هدایت و کنترل دقیق این ربات‌ها در بدن است. ربات‌های میکروسکوپی باید بتوانند در محیط‌های پیچیده و متنوع بدن حرکت کنند و به محل‌های هدف برسند. تکنیک‌های مختلفی برای کنترل این ربات‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، از جمله استفاده از میدان‌های مغناطیسی، امواج صوتی، و روش‌های شیمیایی. هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند و نیازمند تحقیقات و توسعه بیشتر هستند.

ربات‌های میکروسکوپی، نقش مهمی در تحویل دارو، ارزیابی دقیق بیماری‌ها، و تصویربرداری بالینی ایفا می‌کنند. مطالعه موردی از کاربردهای فعلی نشان می‌دهد که این ربات‌ها می‌توانند نقش موثری در بهبود نتایج بالینی داشته باشند و به کاهش اثرات جانبی داروها کمک کنند. به عنوان مثال، در پزشکی شخصی‌سازی‌شده، این ربات‌ها می‌توانند درمان‌ها را با نیازهای خاص هر بیمار تطبیق دهند، که این امر به بهبود کیفیت درمان‌ها منجر می‌شود.

چشم‌انداز آینده ربات‌های میکروسکوپی در دارورسانی هوشمند بسیار امیدوارکننده است. با پیشرفت مداوم فناوری‌های ساخت و کنترل، انتظار می‌رود که این ربات‌ها نقش برجسته‌تری در درمان‌های هدفمند و شخصی‌سازی‌شده ایفا کنند. تحقیقات مداوم در زمینه بهبود قابلیت‌های حرکتی، کاهش عوارض جانبی، و افزایش دقت تحویل دارو می‌تواند به بهبود کیفیت درمان‌ها و کاهش هزینه‌های پزشکی کمک کند. همچنین، توسعه سیستم‌های هوشمند کنترل حرکت، استفاده از سنسورهای دقیق و انجام آزمایش‌های دقیق برای ارزیابی عملکرد ربات‌ها در شرایط واقعی، می‌تواند امکانات جدیدی را در زمینه پزشکی و سایر حوزه‌های بیولوژیکی فراهم آورد.

استفاده گسترده‌تر و اثربخش‌تر از این فناوری در عرصه پزشکی می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی بیماران منجر شود. افزایش دقت در دارورسانی و کاهش عوارض جانبی داروها از جمله تاثیرات مثبت این فناوری است که می‌تواند تغییرات چشمگیری در

خدمات درمانی ایجاد کند. این ربات‌ها با دارا بودن قابلیت‌های مکانیکی و زیستی پیشرفته، می‌توانند به‌طور مؤثر داروها را به سلول‌ها و بافت‌های هدف تحویل دهند، که به بهبود کیفیت درمان و کاهش عوارض جانبی کمک می‌کند.

بطور کلی ربات‌های میکروسکوپی به عنوان یک فناوری پیشرفته در دارورسانی، امکان ارائه درمان‌های دقیق و کنترل‌شده را فراهم می‌کنند و پتانسیل بالایی برای تحول در پزشکی مدرن دارند. با استفاده از این ربات‌ها، می‌توان به بهبود دقت و کارایی درمان‌ها، کاهش عوارض جانبی، و افزایش کیفیت زندگی بیماران دست یافت. این فناوری، با ترکیب نوآوری‌های تکنولوژیکی و مواد زیست‌سازگار، امکانات بی‌نظیری را در زمینه دارورسانی هوشمند و درمان‌های پزشکی ارائه می‌دهد. امید است که با ادامه تحقیقات و توسعه‌های بیشتر، بتوان به پتانسیل کامل این فناوری دست یافت و به بهبود کیفیت درمان بیماران و کاهش عوارض جانبی داروها کمک کرد.

ربات‌های میکروسکوپی برای دارورسانی هوشمند، نوآوری‌های قابل توجهی در درمان‌های پزشکی ارائه می‌دهند. با امکان تحویل داروها به نواحی خاص، کاهش عوارض جانبی، و بهبود اثربخشی درمان‌ها، این فناوری نقش مهمی در آینده پزشکی دارد. با این حال، برای دستیابی به پتانسیل کامل این فناوری، چالش‌های مربوط به طراحی، زیست‌سازگاری، و تولید انبوه باید به دقت مورد توجه قرار گیرد.

مراجع

[1] Sitti M, Ceylan H, Hu W, Giltinan J, Turan M, Yim S. and Diller E., Biomedical Applications of Untethered Milli/Microrobots, *Proceedings of* **103**, 205-224, 2015.

[2] Nelson B.J., Kaliakatsos I.K. and Abbott J.J., Microrobots for Minimally Invasive Medicine, *Annual Review of Biomedical Engineering*, **12**, 55-85, 2010.

[3] Kim J., Chung S. E., Choi S. E., Lee H., Kim J. and Kwon S., Programming Magnetic Microrobots for Navigation and Drug Delivery, *Advanced Materials*, **24**, 5565-5570, 2012.

[4] Li J., Esteban-Fernández de Ávila B., Gao W., Zhang L. and Wang J., Micro/nanorobots for biomedicine: Delivery, surgery, sensing, and detoxification, *Science Robotics*, **2**, 1-12, 2017.

[5] Patra D., Sengupta S., Duan W., Zhang H., Pavlick R. & Sen A., Intelligent, self-powered, drug delivery systems, *Nanoscale*, **5**, 1273-1283, 2013.

[6] Ahmed, M., Zha, R., Liu, J., & Sun, S. , Microswimmers for targeted cancer therapy: Design, development, and applications , Advanced Drug Delivery Reviews , 176, 113945 , 2021.

[7] Lee, J. G., Raj, R. R., Day, N. B., & Shields, C. W. , Microrobots for Biomedicine: Unsolved Challenges and Opportunities for Translation. , Advanced Healthcare Materials, 11(12), 2200245 , 2022 .

[8] Ren, A., Hu, J., Qin, C., Xia, N., Yu, M., Xu, X., Yang, H., Han, M., Zhang, L., & Ma, L. , Oral Administration Microrobots for Drug Delivery. , Journal of Controlled Release*, 359, 185-197, 2023.

[9] Xu T., et al., Micro/Nanorobots for Biomedicine: Delivery, Surgery, Sensing, and Detoxification, *Advanced Healthcare Materials*, **8**, 1900970, 2019.

[10] Gao W. et al., Design and Fabrication of Biocompatible Micro/Nanoswimmers for Targeted Drug Delivery and Cancer Therapy, *Advanced Functional Materials*, **30**, 1907675, 2020.

[11] Langer R. and Vacanti J.P., Tissue Engineering, *Science*, **260**, 920-926, 1993.

[12] Dreaden E.C., et al., Nanoparticle Drug Delivery to the Brain: Challenges and Opportunities, *Journal of Controlled Release*, **190**, 496-505, 2014.

[13] Park J.H., et al., Biocompatible Micro/Nanostructured Particles for Respiratory Drug Delivery, *Journal of Controlled Release*, **219**, 445-459, 2015.

[14] Lu, L., Peter, S. J., Lyman, M. D., Lai, H. L., Leite, S. M., Tamada, J. A., ... & Mikos, A. G. , In vitro and in vivo degradation of porous poly(DL-lactic-co-glycolic acid) foams ,Biomaterials, 21(18), 1837-1845 , 2002 .

[15] Bao, H., Pan, Y., Ping, Y., Sahoo, N. G., Wu, T., Li, L., & Li, J. , Chitosan-functionalized graphene oxide as a nanocarrier for drug and gene delivery , Small , 7(11), 1569-1578 , 2011 .

[16] Kikuchi, M., Itoh, S., Ichinose, S., Shinomiya, K., & Tanaka, J. , Self-organization mechanism in a bone-like hydroxyapatite/collagen nanocomposite synthesized in vitro and its biological reaction in vivo , Biomaterials , 22(13), 1705-1711, 2001 .

[17] Liao W.H., et al., Advanced Lithography for Micro/Nanorobotics, *IEEE Transactions on Robotics*, **37**, 1284-1297, 2021.

[18] Lee K.B., et al. Electrospinning of Nanofibers: Recent Advances and Future Directions. *Progress in Polymer Science*, **39**, 1411-1432, 2014.

[19] Zhang S., et al., 3D Bioprinting: An Emerging Technology for Biomedical Applications, *Nucleic Acids Research*, **42**, W730-W738, 2014.

[20] Cho I.N., et al., Nanoassembly of Multi-layered Structures for Micro/Nanorobotics. *Nanotechnology*, **25**, 135301, 2014.

[21] Wang, Y., et al., System integration of magnetic medical microrobots: from design to control, *Frontiers in Robotics and AI*, **7**, 1-12, 2022.

[22] Peyer K. E., Zhang L. and Nelson B. J., Bio-inspired magnetic swimming micro ۳۳ biomedical applications, *Nanoscale*, 1272, 2013.

[23] Bechhoefer J., et al., Biochemical guidance of micro-robots in biological environments, *Nature Biotechnology*, **31**, 315-317, 2013.

[24] Liu Q., et al., Bioinspired design of micro/nanomachines, *Advanced Materials*, **31**, 1805098, 2019.

[25] Sitti M., et al., Biomedical applications of untethered mobile milli/microrobots, *Proceedings of the IEEE*, **103**, 205-224, 2015.

[26] Wang H., et al., Magnetically actuated swarming microrobots for targeted delivery and universal construction of functional cargoes, *Science Robotics*, **5**, eaax7329, 2020.

[27] Li J., et al., pH-sensitive nanocarriers for drug delivery, *Journal of Controlled Release*, **193**, 139-153, 2014.

[28] Ganta S., et al., Thermo-responsive systems for drug delivery, *Expert Opinion on Drug Delivery*, **11**, 861-870, 2014.

[29] Lee H., et al., Micro- and nano-structured stimuli-responsive polymeric systems for controlled drug delivery, *Advanced Drug Delivery Reviews*, **64**, 60-72, 2012.

[30] Park J.H., et al., Magnetic navigation system for the precise targeting of magnetic nanoparticles to tumors, *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, **101**, 2375-2381, 2013.

[31] Shi J., et al., Smart tumor-targeting nanoparticles for combination therapy of triple-negative breast cancer, *Nanoscale*, **5**, 9678-9684, 2013.

[32] Wang H., et al., CRISPR/Cas9-based genome editing for disease modeling and therapy: applications and challenges, *Human Molecular Genetics*, **25**, R40-R46, 2016.

[33] Lee K., et al., Nanoparticle-mediated gene delivery in vivo, *Nature Biotechnology*, **35**, 443-451, 2017.

[34] Joseph J., et al., Microbotics for minimally invasive sampling of hard-to-reach sites, *Advanced Healthcare Materials*, **9**, 2000974, 2020.

[35] Chen X., et al., Biochemical sensing with nanorobots for early disease diagnosis, *Nano Today*, **35**, 100945, 2020.

[36] Kim S., et al., Micro-robotics in minimally invasive surgeries: precision and minimal tissue damage, *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, **16**, e2091, 2020.

[37] Yamano S., Ohshima S., Katsuki H. & Funakoshi Y., Micro-nano robots as emerging therapeutic carriers for cancer treatment, *Advanced Drug Delivery Reviews*, **128**, 70-83,2018.
[38] Smith J., Robotic Microscopic Imaging for Disease Detection and Tissue Visualization, *Journal of Medical Robotics*, **5**, 112-125,2023.
[39] Jones M.A., Personalized Medicine Enabled by Robotic Microscopy: Applications and Challenges, *Robotics in Surgery and Medicine*, **8**, 101-118,2023.
[40] Brown S.C., Challenges and Advances in Motion Control of Microscopic Robots in Complex Biological Environments, *IEEE Transactions on Robotics*, **38**, 112-130,2024.
[41] Johnson, R.A., Biocompatibility and Safety Considerations in Microscopic Robot Design for Medical Applications, *Biomedical Engineering Trends*, **15**, 78-92, 2023.
[42] Smith, E.R., Challenges and Advances in Mass Production of Microscopic Robots: Cost-Effective Approaches and Scalability, *Advanced Manufacturing Technology*, **12**, 45-60, 2023.

Nanomeghyas
www.nanomeghyas.ir
نانومقیاس

Microscopic Robots for Intelligent Drug Delivery: Innovations, Challenges, and Clinical Applications

Sara Khalfi

Islamic Azad University E-Campus, Tehran

Abstract: Microscale robots for smart drug delivery represent a promising technology to enhance the precision and efficiency of treatments. These robots, typically designed at the nano or micro scale, have the ability to navigate within the body towards targeted tissues. They deliver drugs directly to cells or damaged areas, increasing drug concentration at the desired site and reducing unwanted side effects. This paper explores various construction technologies, materials, guidance mechanisms, and clinical applications of microscale robots in drug delivery. Additionally, it discusses current challenges in design and performance, as well as future prospects for advancing this technology.In the innovations section, advanced technologies such as targeted nanoparticles , nanometric control systems, and optical and magnetic tools are reviewed, enabling precise drug delivery. Technical challenges like processing power, mobility, and environmental selection are examined to identify the strengths and weaknesses of this technology.In the clinical applications section , the role of these robots in drug delivery, precise disease assessment, and clinical imaging is investigated. Case studies demonstrate that microscale robots can significantly improve clinical outcomes and help reduce drug side effects.

Keywords: Microscale robots, smart drug delivery, nanorobots, targeted drug delivery, Nanotechnology.

*Correspondent Author Email: *sara1khalafi@gmail.com*